

**Universidade de Brasília**  
**Faculdade de Tecnologia – FT**  
**Departamento de Engenharia Elétrica – ENE**  
**Laboratório de Automação, Visão e Sistemas**  
**Inteligentes – LAVSI**

# **Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem Didático com Microcontrolador PIC 18F252 – Experimentos de Controle no Domínio da Frequência**

Relatório de Trabalho de Graduação em Engenharia Mecatrônica

**Rafael Guimarães da Rocha Mendes – 00/53244**  
**Sandro Tamayo – 99/20897**

**Orientador: Prof. Dr. Adolfo Bauchspiess**

**Brasília 2004**

*Aos meus pais e familiares,  
Por seu apoio, compreensão e, principalmente, confiança.*

*Rafael G. R. Mendes*

*Dedico este trabalho ao meu pai,  
pelo exemplo de pessoa que sempre demonstrou ser,  
pelo amor, carinho e empenho sempre a mim dispensados.*

*Sandro Tamayo*

## **Agradecimentos**

Gostaríamos de agradecer a todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a nossa formação e sucesso na realização deste projeto. Não poderia aqui faltar um registro de especial gratidão:

Aos nossos pais, pelo apoio incondicional, dedicação e carinho no decorrer deste projeto e de nossas vidas;

Aos nossos familiares, sempre prestativos, que contribuíram com um agradável convívio diário, suportando-nos nos momentos difíceis;

Ao professor orientador Adolfo Bauchspiess, pela dedicação e disponibilidade a nós dispensadas durante a realização deste trabalho, pelos imprescindíveis ensinamentos que nos permitiram desenvolver com sucesso este projeto;

Ao professor Geovany Araújo Borges, pelo apoio e dedicação demonstrados nos momentos difíceis, ajuda esta, sem a qual não seria possível a conclusão deste trabalho;

Aos colegas de laboratório pelo suporte e amizade que muito contribuíram para nosso sucesso;

Aos demais professores, técnicos e colegas que contribuíram diretamente para o sucesso do projeto;

Aos colegas de trabalho, pelos ensinamentos profissionais e pelo apoio e compreensão nos momentos em que tivemos que nos dedicar a este trabalho;

Aos amigos e colegas de faculdade pelo companheirismo, disponibilidade, e pelos momentos de descontração ao longo de nossa formação, pois sem estes não seria possível chegar a este momento com sucesso;

Aos demais amigos, pelas verdadeiras amizades que nos sustentaram ao longo de nossas vidas.

## Resumo

O objetivo deste trabalho consiste em criar um ambiente de ensino de técnicas de controle no domínio da frequência para os alunos de Engenharia Elétrica e Mecatrônica da Universidade de Brasília (UnB). Um processo de nível de líquidos mostrou-se adequado para tal objetivo, segundo os critérios: tempo de resposta, custo, segurança e opções de configuração. Com o intuito de facilitar o acesso dos alunos da disciplina Controle Dinâmico, e eventualmente alunos e pesquisadores de outras instituições, um outro foco deste projeto foi a integração da experimentação em laboratório com o acesso remoto.

Foi inicialmente realizado um estudo das técnicas de controle no domínio da frequência, de forma a elaborar um novo experimento de controle não disponível no Sistema de Nível de Líquidos Multivariável do Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes (LAVSI), do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB. O sistema de nível de líquidos do LAVSI consiste em uma bancada experimental idealizada para o estudo e a implementação remota de diferentes estratégias de controle em um processo de tanques acoplados multivariável. Implementou-se neste sistema o controle no domínio da frequência, disponibilizado para experimentação por parte dos alunos da disciplina Controle Dinâmico a partir do primeiro semestre letivo de 2004. Os resultados obtidos validaram o projeto e o experimento elaborados.

O Sistema de Nível de Líquidos Multivariável, já existente no laboratório, apesar de apresentar resultados válidos à aplicação de controle no domínio da frequência, possui falhas e limitações que impedem uma melhor experimentação das técnicas de controle no domínio da frequência. Identificou-se então, através do estudo deste sistema, os seus pontos de melhoria. Assim, decidiu-se implementar um novo sistema, mais robusto, prático, eficiente e barato. Optou-se por um sistema físico de segunda ordem, constituído de dois tanques acoplados, controlado por um microcontrolador PIC e conectado a um servidor *web*. O modelo matemático do sistema permitiu a calibração de seus sensores e atuadores. Foi elaborado um programa responsável por controlar o sistema e implementar os diferentes controladores cobertos por este. Foram obtidos resultados que validaram o comportamento do sistema projetado, comprovando as melhorias propostas.

## **Abstract**

The main goal of this work is to create a teaching environment for frequency domain control techniques for engineering students at UnB (University of Brasília). Intending to provide a more available access for the students, eventually others institution's students and researchers, this work also focused on integrating the laboratory experimentation and the remote access.

Initially, frequency domain control techniques have been studied, intending to elaborate a new control experiment for the Multivariable Liquid Level System of LAVSI (Automation, Vision and Intelligent Systems Laboratory) at UnB. LAVSI's liquid level system is a experimental bench built for study and remote implementation of different control strategies for a multivariable process. The frequency domain control has been implemented for this system and turned available for remote experimentation since the first semester of 2004. Satisfactory results were found, validating the project and experiment elaborated.

Despite the satisfactory results, the Multivariable Liquid Level System has failings and limitations that restricting a better experimentation of frequency domain control techniques. A study of this system identified its failings and limitations and a new system, more rough, practical, efficient and cheaper has been built. This system is a second order process, composed by two coupled tanks, controlled by a PIC microcontroller and connected to a web server. The results obtained validated the system's behavior and confirmed the proposed improvements.

## Índice

Agradecimentos .....	3
Resumo .....	4
Abstract.....	5
1. Introdução.....	10
1.1. Escopo do Trabalho.....	12
1.2. Revisão Bibliográfica.....	13
1.3. Estrutura do Trabalho.....	14
2. Sistema de Nível de Líquido de Segunda Ordem Didático.....	16
3. Modelamento Matemático.....	21
3.1. Balanço de Massa.....	21
3.2. Modelo Não-Linear .....	22
3.2.1. Equações do Sistema de Nível de Líquidos.....	22
3.2.2. Parâmetros do Modelo .....	23
4. Características de Implementação do Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem Didático .....	25
4.1. Sensores e Atuadores .....	26
4.1.1. Sensores de Nível.....	26
4.1.2. Atuadores do Sistema .....	27
4.2. Controle do Sistema .....	28
4.2.1. Microcontrolador PIC .....	29
4.2.2. PWM .....	30
4.2.3. Circuitos.....	31
4.2.4. Programa de Controle .....	36
4.3. Comunicação PIC – Servidor Web .....	37
4.4. Calibração dos Sensores e Atuadores.....	39
4.4.1. Sensores de Nível.....	39
4.4.2. Atuadores .....	41
5. Controle no Domínio da Frequência .....	44
5.1. Resposta em Frequência.....	44
5.2. Projeto no Domínio da Frequência.....	45
5.3. Equação de Controle .....	47
6. Resultados Obtidos .....	49
6.1. Resultados Obtidos no Sistema Multivariável.....	49
6.1.1. Modelo Matemático Experimental do Sistema .....	49
6.1.2. Experimento de Controle no Domínio da Frequência .....	52
6.2. Resultados Obtidos no Sistema Escalar .....	60
6.2.1. Modelo Matemático Experimental do Sistema .....	60
6.2.2. Controle no Domínio da Frequência.....	63
6.2.3. Validação do Funcionamento do Sistema.....	64
7. Conclusões e Perspectivas para Trabalhos Futuros .....	68
8. Referências Bibliográficas .....	70
Apêndice I: Cálculos dos Projetos de Controladores.....	71

Apêndice II: Roteiro elaborado para o experimento de controle no domínio da frequência .....	74
Apêndice III: Programa de Controle.....	77

## Índice de Figuras e Tabelas

<b>Figura 1 – Sistema de Tanques Acoplados [3]</b> .....	10
<b>Figura 2 – Representação do Sistema Multivariável de Tanques Acoplados [2]</b> .....	12
<b>Figura 3 – Projeto do Novo Sistema de Nível de Líquido</b> .....	17
<b>Figura 4 – Representação do Sistema de Nível de Líquido Escalar</b> .....	18
<b>Figura 5 – Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem Didático</b> .....	20
<b>Figura 6 – Diagrama de Blocos do Sistema Implementado</b> .....	25
<b>Figura 7 – Sensor de Nível de Líquido</b> .....	26
<b>Figura 8 – PIC 18F252 [7]</b> .....	30
<b>Figura 9 – Forma Típica de Onda PWM</b> .....	31
<b>Figura 10 – Circuito Implementado para a Gravação do PIC [9]</b> .....	32
<b>Figura 11 – Circuito de Controle do Sistema de Nível de Líquido Escalar</b> .....	32
<b>Figura 12 – Opto-acoplador 4N25</b> .....	33
<b>Figura 13 – Montagem dos Circuitos de Gravação do PIC e de Controle, Acionamento e Sensoriamento do Sistema de Nível de Líquido Escalar</b> .....	34
<b>Figura 14 – Chaveamento entre os Circuitos de Gravação do PIC e de Controle</b> ....	35
<b>Figura 15 – Circuito Regulador de Tensão Variável de Alta Corrente</b> .....	36
<b>Figura 16 – Comunicação PIC – Servidor Web - Usuário</b> .....	38
<b>Figura 17 – Curva de Calibração do Sensor de Nível do Tanque 1</b> .....	40
<b>Figura 18 – Curva de Calibração do Sensor de Nível do Tanque 2</b> .....	40
<b>Figura 19 – Curva de Calibração da Bomba de Enchimento</b> .....	42
<b>Figura 20 – Curva de Calibração da Bomba de Esvaziamento</b> .....	42
<b>Figura 21 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado com <math>k_p=60</math> (Sistema Multivariável)</b> .....	49
<b>Figura 22 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Fechada (Sistema Multivariável)</b> .....	51
<b>Figura 23 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Aberta (Sistema Multivariável)</b> .....	52
<i>Tabela 1 – Resposta em frequência do sistema em malha fechada</i> .....	53
<i>Tabela 2 – Resposta em frequência do sistema em malha aberta</i> .....	54
<b>Figura 24 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Aberta Obtido Experimentalmente (Sistema Multivariável)</b> .....	55
<b>Figura 25 – Diagrama de Bode do Sistema Controlado em Avanço (Projeto experimental – Sistema Multivariável)</b> .....	56
<b>Figura 26 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado em Avanço (Projeto Experimental – Sistema Multivariável)</b> .....	57
<b>Figura 27 – Diagrama de Bode do Sistema Controlado em Avanço (Projeto Teórico – Sistema Multivariável)</b> .....	59
<b>Figura 28 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado em Avanço (Projeto Teórico – Sistema Multivariável)</b> .....	59
<b>Figura 29 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado com <math>k_p=60</math> (Sistema Escalar)</b> .....	61
<b>Figura 30 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Fechada (Sistema Escalar)</b> ....	62
<b>Figura 31 – Diagrama de Bode do Sistema Controlado em Avanço (Sistema Escalar)</b> .....	63

<b>Figura 32 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado em Avanço (Sistema Escalar).....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 33 – Resposta do Sistema Escalar a Entradas Degrau de Amplitudes Positivas e Negativas .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 34 – Comportamento dos Sinais de PWM Aplicados nos Atuadores em Reposta a Entradas Degrau de Amplitudes Positivas e Negativas .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 35 – Comportamento do Sistema em Funcionamento (Enchimento) .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 36 – Comportamento do Sistema em Funcionamento (Esvaziamento).....</b>	<b>67</b>

## 1. Introdução

Atualmente o ensino a distância é uma realidade, permitindo a interação de pesquisadores, professores e estudantes, em diferentes localidades, com recursos dedicados ao ensino.

Experimentos em laboratórios são fundamentais para o processo de aprendizado em engenharia. A experimentação remota mostra-se como uma alternativa extremamente interessante à limitada disponibilidade dos laboratórios das universidades brasileiras, uma vez que pode ser acessada a qualquer hora e de qualquer lugar onde se possua um computador com acesso à Internet.

O Sistema de Nível de Líquido do LAVSI – Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes – (Figura 1) consiste em um recurso educacional remoto. Os alunos de graduação dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecatrônica que cursam a disciplina Controle Dinâmico fazem uso do sistema remotamente para realizar experiências de laboratório. O sistema também é utilizado em diversos projetos de pesquisa, entre projetos de graduação, mestrados e doutorados.



Figura 1 – Sistema de Tanques Acoplados [3]

Através do sistema, conceitos aprendidos em sala de aula são fixados e vistos na prática. Dessa forma, o aluno adquire experiência por comprovação prática de conceitos

teóricos, fixando de forma sólida e coerente o que lhe foi apresentado nas aulas teóricas expositivas.

Essa metodologia possui a grande vantagem de disponibilizar ao aluno a oportunidade de realizar experimentos práticos, interagindo em tempo real com o sistema físico, deparando-se assim, com características práticas reais e não simuladas de um sistema de controle. O que é disponibilizado via Internet é o acesso remoto ao sistema físico onde o experimento é realizado e não o acesso a um software que simula a execução do mesmo.

A bancada experimental consiste em um processo de tanques acoplados, em tamanho reduzido, que foi construído pra servir de plataforma para a implementação e avaliação de diferentes estratégias de controle em um processo multivariável. O processo de tanques acoplados é bastante adequado por ser amplamente utilizado em escala industrial, principalmente nos ramos químico, petroquímico, de celulose e de alimentos.

Nesta bancada são realizados experimentos envolvendo controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

O sistema multivariável é constituído de três tanques interconectados por válvulas e alimentados por duas moto-bombas DC proporcionais, que por sua vez são acionadas por um *driver* de potência comandado com um sinal de tensão. O nível de líquido é monitorado por sensores elétricos (potenciômetros) acoplados a bóias por meio de uma haste metálica.

As entradas dos sistemas são dadas pela vazão em cada uma das bombas e as saídas dos mesmos correspondem aos níveis de água em cada um dos três tanques. Como demonstrado em [2], podem ser utilizados neste sistema subsistemas diferentes: um sistema de primeira ordem, que controla o nível de água do tanque 1; um sistema de segunda ordem, que controla o nível de água do tanque 3 (o tanque 2 não é controlado). Para obter tal configuração, a válvula de interconexão entre os tanques 1 e 3 é mantida fechada. O sistema também pode ser utilizado em uma configuração de terceira ordem, utilizando simultaneamente os três tanques (Como, por exemplo, no estudo de Controle por rede neural realizado pelo doutorando Júlio César Oliveira).

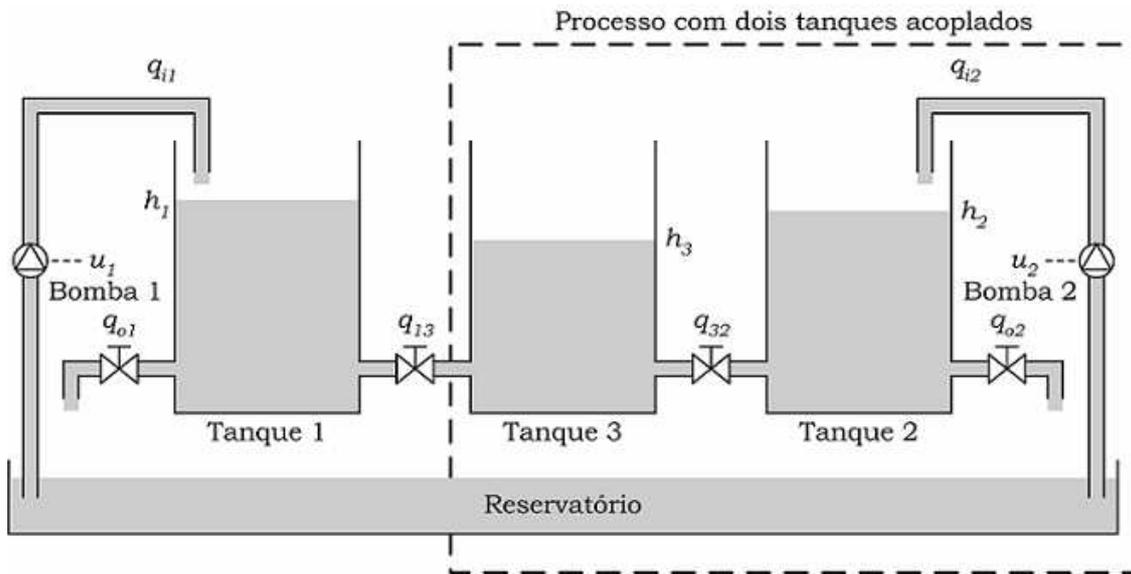


Figura 2 – Representação do Sistema Multivariável de Tanques Acoplados [2]

O sistema possui portanto um nível de complexidade elevado e tem a capacidade de simular diversas situações de controle. Este pode portanto ser intensivamente utilizado em pesquisas.

### 1.1. Escopo do Trabalho

Até o início do segundo semestre letivo de 2003 eram realizados dois experimentos, envolvendo controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID). Porém, existem outras técnicas de controle muito eficientes, com as quais podem ser obtidos resultados satisfatórios, e cuja experimentação é de grande valia para o aprendizado de controle. Uma destas técnicas consiste no controle no domínio da frequência. As técnicas de resposta no domínio da frequência consistem em ferramentas amplamente utilizadas na análise de sistemas de controle e no projeto de compensadores [5].

Este trabalho tem como primeiro objetivo projetar e implementar mecanismos de controle no domínio da frequência do Sistema de Nível de Líquido do LAVSI. Com isso, foi elaborado um novo experimento, no qual os alunos devem projetar um controlador de avanço utilizando os métodos da resposta em frequência. Este projeto deve ser feito a partir da análise do diagrama de Bode, obtido experimentalmente, do sistema de Nível de

Líquido do LAVSI. Para orientar os alunos no experimento a ser executado, foi elaborado um roteiro de laboratório (Apêndice II).

Paralelamente, foi implementado, em outro projeto de graduação, o controle no espaço de estados, possibilitando a elaboração de mais um experimento [3].

Ao idealizar este projeto, observou-se que o sistema de nível de líquido multivariável do LAVSI, apresentado acima, possui uma complexidade elevada e alguns inconvenientes (detalhes que não foram previstos na sua construção), os quais serão evidenciados nas próximas seções deste trabalho. Além disto, as atividades de laboratório desenvolvidas no LAVSI no curso de Controle Dinâmico não utilizam toda a capacidade que este sistema possui (por exemplo, no laboratório utiliza-se no máximo o sistema de segunda ordem) e encontram dificuldades de uso devido à complexidade do sistema (como por exemplo existência de válvulas de comunicação entre os tanques e controle feito através de um PC que comunica com o servidor via rede). Assim, a utilização deste sistema para o laboratório torna-se ineficiente. Tem-se por maior objetivo neste projeto implementar um novo sistema de nível de líquido, dedicado às atividades de laboratório. Com um sistema mais simples, pode-se obter uma utilização muito mais eficiente e com menos problemas de operação. No projeto deste novo sistema também pretende-se corrigir algumas falhas existentes no sistema atual, visando otimizar a utilização por parte dos alunos.

## **1.2. Revisão Bibliográfica**

**GOSMANN, H. L.** - Um Sistema Multivariável de Tanques Acoplados para Avaliação de Técnicas de Controle - Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2002.

Este trabalho descreve o sistema de tanques acoplados do LAVSI, utilizado para o estudo de diferentes estratégias de controle em um processo multivariável. Este trabalho serviu de base para o desenvolvimento deste projeto.

**OGATA, KATSUHIKO** – Engenharia de Controle Moderno, Terceira Edição, Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1990.

Este livro é um dos mais completos e amplamente utilizado nas aulas introdutórias e avançadas da área de Automação e Controle da Universidade de Brasília. Ele inclui conceitos sobre processos, sistemas de controle realimentado e métodos convencionais para a execução de um projeto de controle, inclusive os métodos de resposta em frequência.

**PEREIRA, F.** – Microcontroladores PIC – Programação em C – 1ª Edição, Ed. Érica, São Paulo, Brasil, 2003.

Este livro consiste em uma literatura sobre a linguagem C, com ênfase para as aplicações com microcontroladores PIC. Esta bibliografia foi muito utilizada no desenvolvimento do programa de controle do sistema.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma.

O **Capítulo 2** apresenta o projeto do sistema desenvolvido neste trabalho. É apresentado o conceito do sistema projetado e são descritas algumas características de sua construção.

O **Capítulo 3** apresenta a modelagem matemática do sistema projetado. O modelo não linear é obtido de forma analítica e são obtidos também os modelos do processo linearizados em torno de um ponto de operação, necessários para o projeto dos controladores utilizados.

O **Capítulo 4** descreve o sistema implementado, descrevendo os diferentes elementos que compõem o sistema. É apresentada também a calibração dos sensores e dos atuadores.

O **Capítulo 5** apresenta o método de resposta em frequência, descrevendo seus conceitos básicos e aplicações. É descrito o método adotado para o projeto de

compensadores no domínio da frequência e a obtenção de sua equação discretizada (a ser utilizada para o controle do sistema).

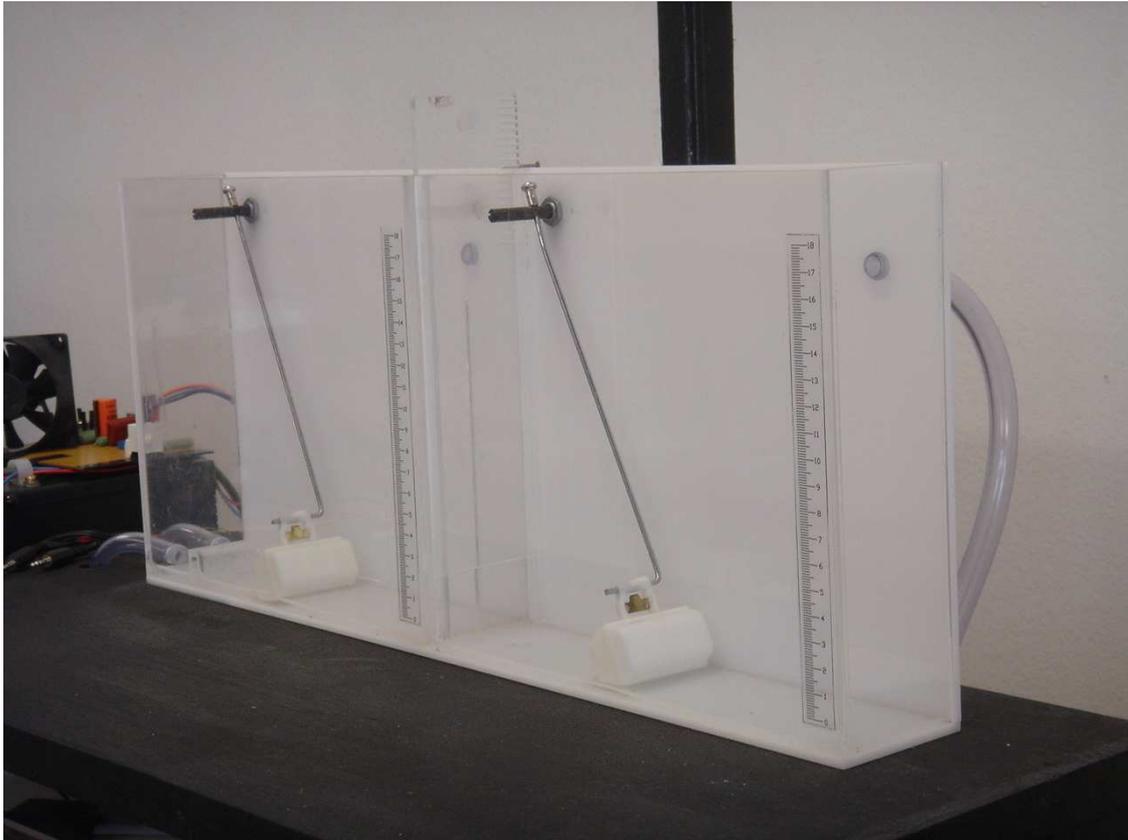
No **Capítulo 6** são apresentados os resultados obtidos através de testes experimentais. É feita uma validação do funcionamento do sistema implementado neste projeto e da implementação do controle no domínio da frequência e do experimento elaborado.

Por fim, o **Capítulo 7** apresenta conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

## **2. Sistema de Nível de Líquido de Segunda Ordem Didático**

Visando atender aos objetivos propostos, foi projetado um novo sistema de nível de líquido focando a sua aplicação nas atividades de laboratório de Controle Dinâmico. Assim, foram consideradas algumas simplificações e melhorias a serem feitas em relação ao sistema já existente. Em laboratório são utilizadas apenas as configurações do sistema de primeira e de segunda ordem. Assim, este novo sistema contempla apenas estas duas configurações.

O sistema consiste em um tanque com dimensões totais de 516 x 60 x 220 mm. Este tanque é subdividido em dois compartimentos, que serão considerados como sendo dois tanques diferentes, separados por uma chapa de acrílico que possui uma ranhura de 2mm. Uma chapa desliza em sentido vertical, tampando totalmente, parcialmente ou nulamente essa ranhura. Ou seja, a ranhura e a chapa deslizante funcionam como uma válvula, de forma que a vazão de água entre os dois tanques seja controlada pelo deslizamento da chapa (foram determinadas posições fixas para a chapa deslizante). Assim, é possível obter as configurações de sistema de primeira ordem (fazendo uso apenas do primeiro tanque, correspondente ao compartimento da esquerda) e de segunda ordem (com a ranhura parcialmente tampada controlando a vazão de água entre os dois tanques do sistema). O sistema implementado está representado na Figura 3.



**Figura 3 – Projeto do Novo Sistema de Nível de Líquido**

É portanto possível utilizar este sistema em duas configurações diferentes: um sistema de primeira ordem, no qual é controlado o nível de água apenas no primeiro tanque; e um sistema de segunda ordem, onde são utilizados os dois tanques. Nesta segunda configuração, é controlado o nível de água no segundo tanque, correspondente ao compartimento da direita. Para obter tal configuração, é necessário fazer uso da chapa deslizante, regulando a vazão entre os dois compartimentos do tanque.

Em ambos os casos, a entrada do sistema é dada pela vazão na bomba 1 (sinal de entrada positivo) ou na bomba 2 (sinal de entrada negativa). São utilizadas duas bombas com o intuito de implementar um sinal de entrada  $u$  positivo ou negativo, possibilitando o controle do nível de líquido tanto no enchimento como no esvaziamento dos tanques. Assim, as duas bombas não serão utilizadas simultaneamente. A saída do sistema corresponde ao nível de água no primeiro ou no segundo tanque, dependendo da configuração utilizada. Este sistema, ao contrário do sistema multivariável pré-existente,

possui apenas uma entrada e uma saída, podendo portanto ser denominado de Sistema Escalar. A Figura 4 abaixo representa esquematicamente o sistema de nível de líquido projetado.

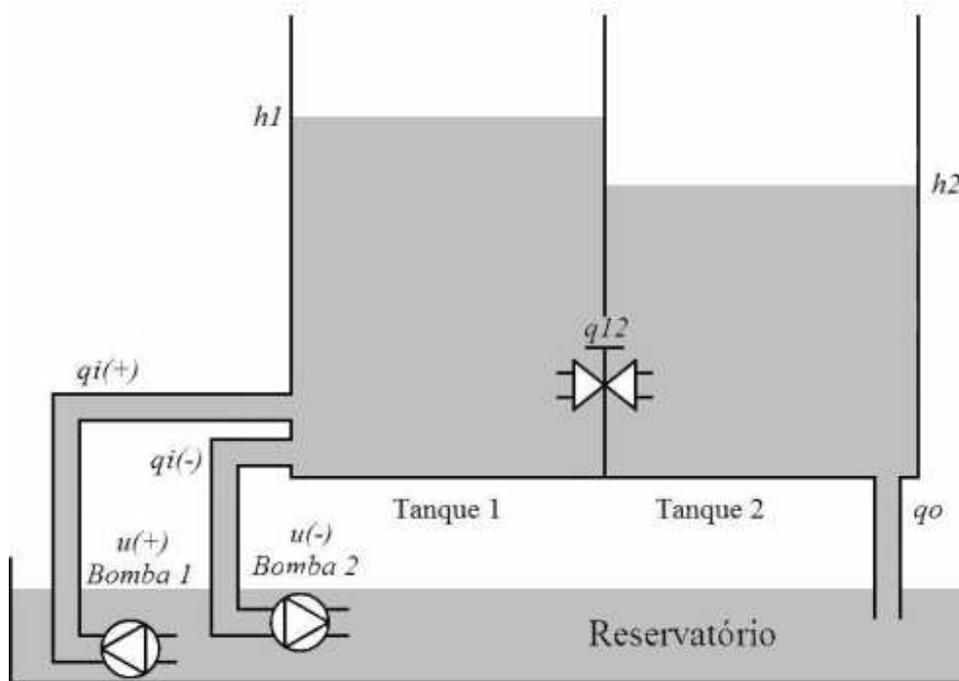


Figura 4 – Representação do Sistema de Nível de Líquido Escalar

No sistema projetado não são utilizadas tubulações para alimentar e conectar os tanques, ao contrário do sistema anterior. A conexão entre os tanques é feita através do sistema já mencionado (ranhura + chapa deslizante) e a saída de água do sistema é feita diretamente para o reservatório, através de um furo. Com isso, há uma menor perda de carga, tornando mais preciso o modelo matemático do sistema e conseqüentemente tornando os resultados obtidos através da utilização do sistema mais precisos.

Além disso, a construção dos tanques foi feita de forma a evitar o acúmulo de água no seu interior quando inoperantes, melhorando consideravelmente a assepsia do sistema. No sistema multivariável, alguns problemas foram causados pelo acúmulo de água nos tanques, como o aparecimento de larvas de mosquitos e sujeira nos tanques.

Como foi mencionado, através do uso de duas bombas, nesse sistema pode ser aplicado um sinal de entrada positivo ou negativo, ao contrário do sistema multivariável, onde somente era possível aplicar sinais de entrada positivos. Assim, o sistema é capaz de

controlar o nível de líquido também no esvaziamento do tanque (e não somente no enchimento), ao contrário do sistema anterior, em que o esvaziamento dos tanques era feito unicamente pela força da gravidade. Essa modificação se traduz em uma melhoria do sistema visto que o esvaziamento dos tanques não controlado consistia em uma limitação do sistema. O controle na saída permite, por exemplo, um levantamento mais preciso da resposta em frequência do sistema estudado (Variando a frequência de uma senóide, os alunos podem observar o acompanhamento do sinal, inclusive na descida).

A chapa deslizante possui furos em sua lateral, espaçados de 3mm. A partir desses furos é possível determinar posições fixas da chapa e conseqüentemente diferentes aberturas da ranhura que separa os dois tanques. Assim, é possível obter uma maior precisão e flexibilidade no ajuste da vazão de água entre os dois tanques.

De modo a minimizar o efeito da turbulência causada pela entrada de água no tanque sobre as medidas de nível de líquido no primeiro tanque, foi projetado um pequeno anteparo, posicionado em frente à entrada de água no tanque. Fazendo uma analogia com um circuito elétrico, este anteparo funciona como um capacitor, reduzindo o ruído introduzido no sistema pela entrada de água em regime turbulento no tanque.

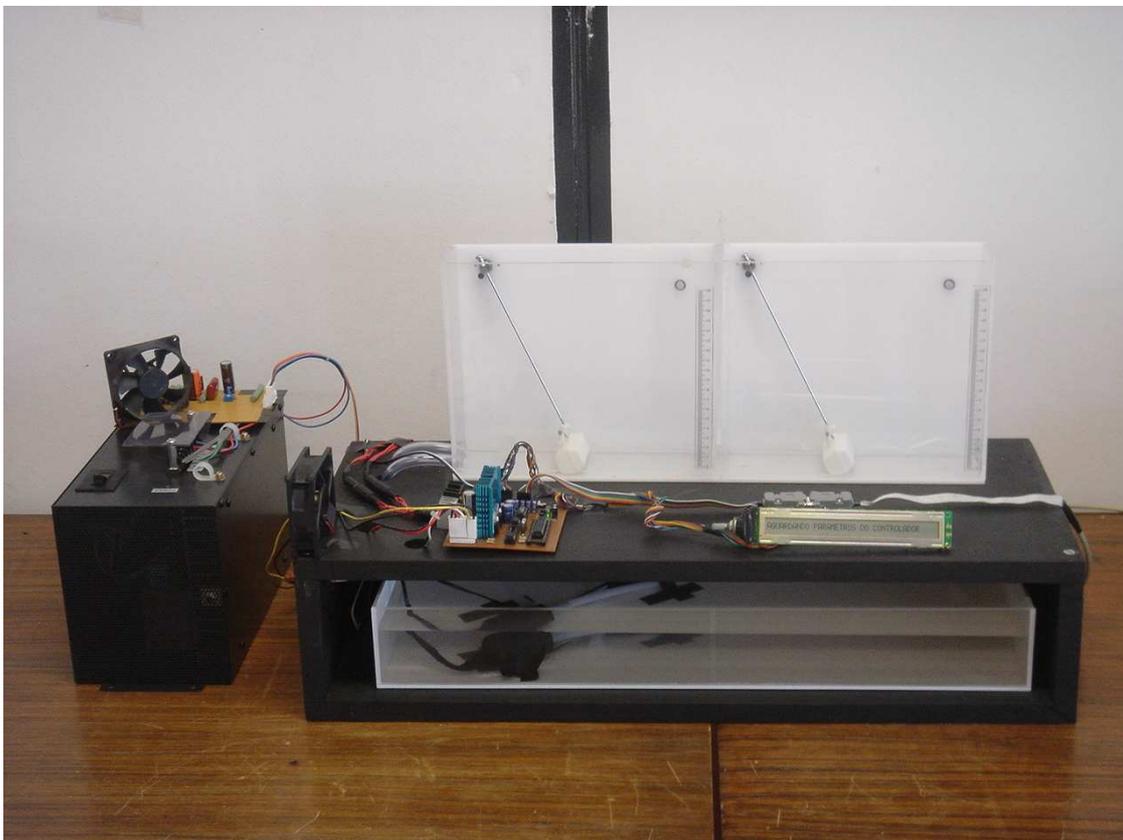
Também foi projetado e construído um suporte de madeira para acomodar o tanque, o reservatório e todos os circuitos. Este suporte consiste em uma caixa de madeira, aberta na frente, de 700 x 400 x 160 mm.

Foi projetado um reservatório de água com a frente em acrílico transparente, facilitando assim o monitoramento do volume de água disponível para o sistema.

O tanque é disposto sobre o suporte, assim como toda a eletrônica do sistema, disposta de maneira organizada. O reservatório é posicionado no interior do suporte de madeira descrito acima. Com isso obtém-se um sistema mais organizado e portátil, podendo ser transportado compactamente.

O sistema foi projetado para ser inteiramente desmontável, de forma a facilitar eventuais manutenções, trocas de componentes danificados, ou mesmo a simples retirada dos tanques para limpeza, procedimentos estes extremamente trabalhosos no sistema multivariável pré-existente.

A Figura 5 apresenta uma foto do sistema implementado no LAVSI.



**Figura 5 – Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem Didático**

Porém, o sistema projetado possui uma limitação: a impossibilidade de modificar rapidamente e remotamente a configuração do sistema (primeira ou segunda ordem). Para contornar esta limitação foram construídos dois sistemas idênticos que serão postos em funcionamento simultaneamente (a princípio um sistema funcionando em cada configuração). Como apenas um experimento faz uso da configuração de primeira ordem, após a realização deste, os dois sistemas podem funcionar simultaneamente na configuração de segunda ordem, atenuando os problemas de acesso remoto ao sistema por parte dos alunos.

### 3. Modelamento Matemático

Neste capítulo será desenvolvido o modelo do processo real de tanques acoplados, baseado em [2]. Este processo consiste de dois tanques acoplados com capacidade total de  $6811,2 \text{ cm}^3$  (Figura 3). O tanque 1 (compartimento da esquerda) possui uma entrada e uma saída de água bombeadas por meio de moto-bombas, possibilitando um sinal de controle positivo ou negativo. As bombas são controladas por meio de sinais PWM gerados pelo microcontrolador PIC. Cada compartimento do tanque é dotado de um sensor de nível de líquido. O objetivo consiste em controlar o nível de água no primeiro (no caso de se utilizar a configuração de sistema de primeira ordem) ou no segundo tanque (no caso de se utilizar a configuração de sistema de segunda ordem).

Para modelar o processo, algumas considerações simplificadoras serão assumidas.

1. O sistema será considerado a parâmetros concentrados. Assim sendo, só será de interesse conhecer algumas variáveis em alguns pontos específicos;
2. A perda de carga será desprezada;
3. A área de seção transversal é constante. Observando-se o interior do tanque, percebe-se que esta consideração é, a rigor, incorreta. Entretanto, após um certo nível, a área é de fato constante;
4. As dinâmicas dos sensores e dos atuadores são muito mais rápidas do que as dinâmicas dos tanques, podendo assim ser desprezadas. Dessa forma, estes elementos serão modelados como sistemas de ordem zero;
5. A água é incompressível e seu peso específico não varia;
6. A pressão atmosférica em cada ponto do sistema é a mesma.

#### 3.1. Balanço de Massa

Para modelar o processo, serão consideradas as equações que governam o balanço de massa nos tanques, que estabelece que a vazão (mássica) de água que entra menos a que sai é igual à variação de massa no tanque.

Para facilitar o entendimento, será apresentado inicialmente o balanço de massa em apenas um tanque (sistema de primeira ordem). Em seguida será obtido o modelo completo de sistema de nível de líquidos. Para o tanque considerado, tem-se

$$\frac{dm}{dt} = \omega_i - \omega_o \quad (1)$$

sendo que  $m$  é a massa de água no tanque, em kg;  $\omega_i$  e  $\omega_o$  são as vazões mássicas de entrada e saída, respectivamente, em kg/s. Estas vazões mássicas podem ser convertidas em vazões volumétricas, bastando para isso, observar que a massa de água no tanque é igual ao volume multiplicado pela densidade da água, ou seja,  $m = V\rho$ . Considerando-se a área da seção transversal do tanque constante pode-se escrever

$$m = Ah\rho \quad (2)$$

sendo que  $\rho$  é a massa específica da água em  $kg/cm^3$ ;  $h$  é a altura do nível de água em cm e  $A$  é a área em  $cm^2$ . Substituindo a Equação 1 na Equação 2, tem-se

$$\begin{aligned} \rho A \frac{dh}{dt} &= q_i \rho - q_o \rho \\ \frac{dh}{dt} &= \frac{q_i - q_o}{A} \end{aligned} \quad (3)$$

sendo que  $q_i$  e  $q_o$  são, respectivamente, as vazões volumétricas de entrada e saída, em  $cm^3/s$ .

## 3.2. Modelo Não-Linear

### 3.2.1. Equações do Sistema de Nível de Líquidos

Considerando agora o sistema de nível de líquido com os dois tanques, como mostrado na Figura 4, as seguintes variáveis podem ser definidas:

- $q_i$ : vazão de entrada no tanque, em  $cm^3/s$ . Esta vazão pode ser positiva ou negativa;
- $q_o$ : vazão de saída do tanque, em  $cm^3/s$ ;
- $q_{12}$ : vazão entre os dois tanques, em  $cm^3/s$ ;

- $h_1$  e  $h_2$ : altura do nível de água nos compartimentos da esquerda e da direita, respectivamente, em cm.

Calculando o balanço de massa em cada compartimento do tanque, como na Equação (1), tem-se

$$A \frac{dh_1}{dt} = q_i + \text{sin al} (h_2 - h_1) q_{12} \quad (4)$$

$$A \frac{dh_2}{dt} = -\text{sin al} (h_2 - h_1) q_{12} - q_o \quad (5)$$

onde  $\text{sin al}(\cdot)$  é a função que retorna -1 se o sinal do argumento for negativo, 0 se for nulo e 1 se for positivo, ou seja

$$\text{sin al}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

Estas são as equações dinâmicas que modelam o processo de sistema de nível de líquido, considerando-se os dois compartimentos do tanque.

### 3.2.2. Parâmetros do Modelo

Nas equações (4) e (5) o único parâmetro conhecido consiste na área da seção transversal dos tanques,  $A = 150 \text{ cm}^2$  (25cm x 6cm). É preciso portanto, determinar a vazão de saída ( $q_o$ ) e a vazão entre os compartimentos do tanque ( $q_{12}$ ) em função das alturas dos níveis de água nos mesmos.

A equação de Bernoulli [2] determina a relação entre a vazão de saída  $q$  e a altura  $h$  no tanque. Esta relação é dada pela equação a seguir

$$q = k\sqrt{h}$$

onde  $k$  [ $\text{cm}^{2.5}/\text{s}$ ], dependendo do tipo de escoamento, pode ou não variar. Devido às condições simplificadoras assumidas anteriormente, considerou-se essa relação constante.

No caso desse sistema, existem duas constantes diferentes. Uma primeira constante  $k_1$  relaciona a vazão de saída  $q_o$  do sistema e o nível de água e uma segunda

constante  $k_2$  relaciona a vazão de água entre os dois tanques ( $q_{12}$ ) e o nível de água nos tanques.

São então determinadas as vazões do processo:

$$q_o = k_1 \sqrt{h_2} \quad (6)$$

$$q_{12} = k_2 \sqrt{|h_2 - h_1|} \quad (7)$$

O valor destas constantes depende do coeficiente de descarga do escoamento, da área da seção transversal do tanque, da área do orifício de saída e também da aceleração da gravidade. Para o processo em questão, os valores de  $k_1$  e  $k_2$  foram obtidos experimentalmente, observando-se o nível de estabilização da água nos tanques para diferentes vazões de entrada. No ponto de estabilização do nível de líquido as vazões de entrada, de saída e entre os dois tanques são iguais, sendo então possível calcular o valor das constantes  $k_1$  e  $k_2$  a partir das equações (6) e (7), respectivamente. Foram obtidos os seguintes valores:

$$k_1 = 13,13$$

$$k_2 = 26,93$$

Determinadas as vazões do processo, pode-se reescrever as Equações (4) e (5), obtendo-se o modelo completo do sistema projetado.

$$A \frac{dh_1}{dt} = q_i + \text{sinal} (h_2 - h_1) k_2 \sqrt{|h_2 - h_1|} \quad (8)$$

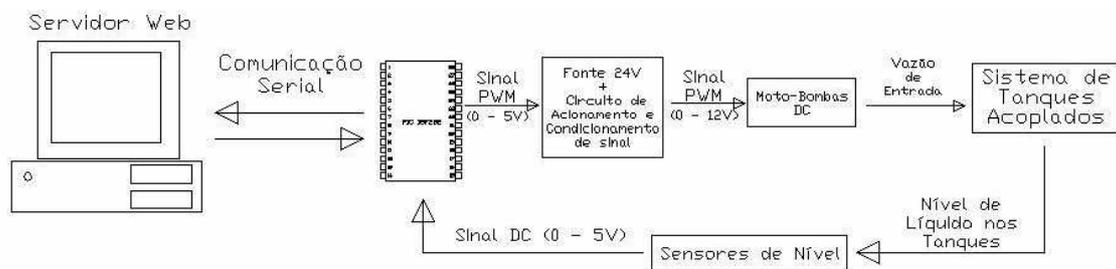
$$A \frac{dh_2}{dt} = -\text{sinal} (h_2 - h_1) k_2 \sqrt{|h_2 - h_1|} - k_1 \sqrt{h_2} \quad (9)$$

## 4. Características de Implementação do Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem Didático

O sistema de nível de líquido de segunda ordem didático é constituído dos seguintes elementos:

- Sistema de Tanques Acoplados
- Microcontrolador PIC
- Servidor Web
- Fonte DC 24V
- Circuito de Acionamento
- Circuito Regulador de Tensão
- Sensores e Atuadores

O diagrama de blocos, representado na Figura 6, apresenta o arranjo funcional do sistema e a ligação entre cada um destes elementos.



**Figura 6 – Diagrama de Blocos do Sistema Implementado**

Neste capítulo são estudados cada um destes elementos.

## 4.1. Sensores e Atuadores

### 4.1.1. Sensores de Nível

Os sensores instalados nos dois tanques do sistema consistem em potenciômetros de valor nominal de  $1\text{k}\Omega$ , acoplados a uma haste metálica com uma bóia na extremidade, como visualizado na Figura 7. Para tal foram utilizados raios de bicicleta e bóias de carburador (Modelo Vogel 105).

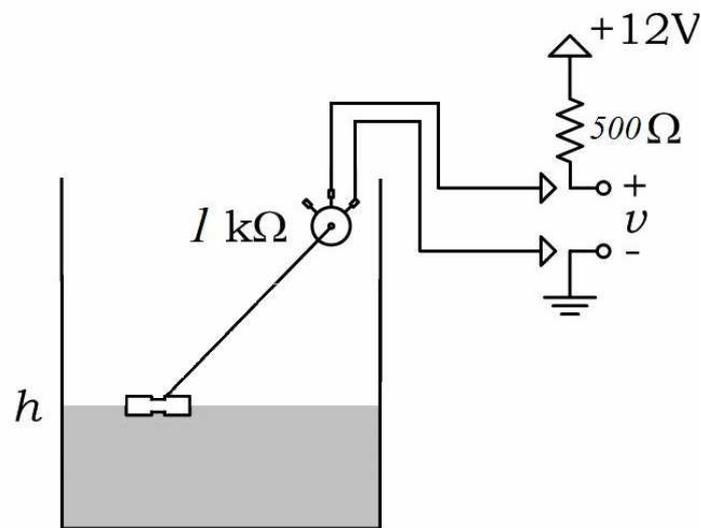


Figura 7 – Sensor de Nível de Líquido

Os potenciômetros estão ligados em série com um resistor em uma configuração de divisor de tensão alimentado por  $+12\text{V}$ . A tensão sobre cada sensor é relacionada à altura de nível de líquido no tanque. O resistor de  $500\Omega$  foi inserido no circuito, de modo a maximizar a resolução do sistema, uma vez que o sistema de aquisição trabalha com valores de tensão de até  $5\text{V}$  e foi verificado que, na medida do nível máximo, o potenciômetro apresenta uma resistência de cerca de  $350\Omega$ . Utilizando essa configuração, quando o nível de água no tanque estiver em  $16\text{cm}$  a tensão sobre o sensor correspondente estará próxima de  $5\text{V}$ , que corresponde à tensão máxima da placa de aquisição de dados.

Em paralelo com a configuração divisor de tensão potenciômetro-resistência foi inserido um capacitor de  $3300\mu\text{F}/25\text{V}$  com o objetivo de manter constante a tensão

entre os terminais do divisor, minimizando distorções na leitura do nível de líquido de cada tanque do sistema decorrentes de variações na tensão de alimentação do potenciômetro (Figura 11).

Os dois terminais do capacitor estão ainda conectados a dois pinos de entrada de referência da conversão analógico-digital do PIC de forma a compensar eventuais distorções de leitura causadas por variações na tensão de alimentação que ainda assim venham a ocorrer, fazendo com que a tensão de saída do potenciômetro mantenha sempre uma relação linear com a referência do conversor analógico-digital do PIC.

Além desse capacitor foram inseridos no circuito outros dois capacitores (um para cada sensor) de  $470\mu F / 25V$  em paralelo com os potenciômetros de forma a minimizar os efeitos das distorções no sinal de leitura do sistema causadas pela turbulência da água (Figura 11).

#### 4.1.2. Atuadores do Sistema

Os atuadores do sistema, responsáveis pela alimentação dos tanques, consistem em duas moto-bombas DC proporcionais que operam com tensões entre 0 e 12V. Estes atuadores (bombas de limpadores de pára-brisa de carros) foram projetados para funcionar sempre com um volume de água em seu interior. Assim, para um correto funcionamento, a bomba deveria ser posicionada de tal forma que esta condição de projeto seja satisfeita, evitando assim um comportamento observado no sistema multivariável: ao colocar a bomba em funcionamento com os tanques vazios, essa “engasga”, funcionando em vazio por algum tempo, até atingir um funcionamento normal, problema este que já causou a queima de inúmeras dessas bombas.

Para contornar esse problema, as bombas foram vedadas e posicionadas dentro do reservatório que alimenta de água os tanques. Esse posicionamento das bombas também atenuou o elevado ruído produzido pelo funcionamento dos atuadores. Essa solução foi escolhida após verificar-se que a operação da bomba nessa configuração acarreta em uma refrigeração da mesma muito mais eficiente que a anterior, realizada pela passagem de ar por ranhuras muito pequenas.

## 4.2. Controle do Sistema

O controle da planta de nível de líquidos do sistema multivariável pré-existente é realizado por um computador Intel Pentium 90MHz. A Placa AD/DA, que possui 12 bits de resolução, utilizada para comunicação com a planta, possui 16 entradas analógicas, das quais três estão em uso, e duas saídas digitais, ambas em uso para controle das moto-bombas.

As entradas analógicas são utilizadas para receber os sinais do sistema de condicionamento de sinal. As saídas analógicas são enviadas para a placa de acionamento das moto-bombas. A saída do sistema consiste na vazão de entrada de líquido nos tanques imprimida pela tensão de alimentação em seus terminais fornecida pela placa AD/DA. Assim, as moto-bombas foram calibradas, de modo que a placa de acionamento, que consiste em um dispositivo caro e extremamente subutilizado nesta configuração, gerasse uma saída na forma de tensão.

De modo a obter um sistema mais robusto e barato, além de torná-lo mais compacto, decidiu-se por controlar o sistema escalar projetado fazendo uso de um micro-controlador PIC.

O sistema de acionamento implementado foi projetado de forma a minimizar os danos com queimas de componentes. Duas alterações importantes foram feitas para que esse objetivo fosse alcançado: foi introduzido um opto-acoplador no circuito de acionamento, isolando-o do circuito de controle, e os transistores de potência anteriormente utilizados foram substituídos por MOSFET's de alta potência encarregados agora de fazer o chaveamento da alimentação das bombas de acordo com os pulsos de PWM gerados pelo microcontrolador PIC.

Com o uso do microcontrolador, torna-se possível fazer o controle da vazão por PWM (*Pulse Width Modulation*), mais eficiente e robusto que o controle realizado até agora, principalmente por permitir o isolamento, já mencionado, entre o circuito de potência, que alimenta os atuadores, e o circuito de controle.

#### 4.2.1. Microcontrolador PIC

Microcontroladores consistem em circuitos integrados que possuem internamente um microprocessador e todos os seus periféricos essenciais ao seu funcionamento, como pinos de entrada e saída, memória de programa (geralmente do tipo EPROM – *Erasable Programmable Read-Only Memory*, onde são armazenadas as informações de programa, a serem executadas pelo microprocessador), memória de dados (geralmente do tipo RAM, onde ficam armazenadas as informações de dados utilizadas pelo programa), temporizadores e contadores, clock e pinos de interrupção.

Através da programação de microcontroladores podem ser controladas suas saídas, tendo como referência as entradas ou um programa interno. O que diferencia os diversos tipos de micro-controladores são a quantidade de memória interna, velocidade de processamento, quantidade de pinos de entrada e saída (I/O), alimentação, periféricos, arquitetura e set de instruções.

Para o controle deste sistema, escolheu-se o PIC 18F252, da Microchip, por este possuir uma boa capacidade de processamento e de memória, além de atender aos requisitos de entrada e saída do circuito de controle do sistema.

O PIC 18F252 consiste em um microcontrolador de 28 pinos, como representado na Figura 8, e possui as seguintes características básicas [7]:

- Freqüência de operação: DC – até 40 MHz
- Memória: 32K
- Instruções simultâneas: 16384
- Memória EEPROM: 256 bytes
- 4 Timers
- 2 Saídas PWM
- Comunicação serial
- 3 pinos de interrupção externa
- 5 canais de entrada com conversão Analógica-Digital de 10 bits

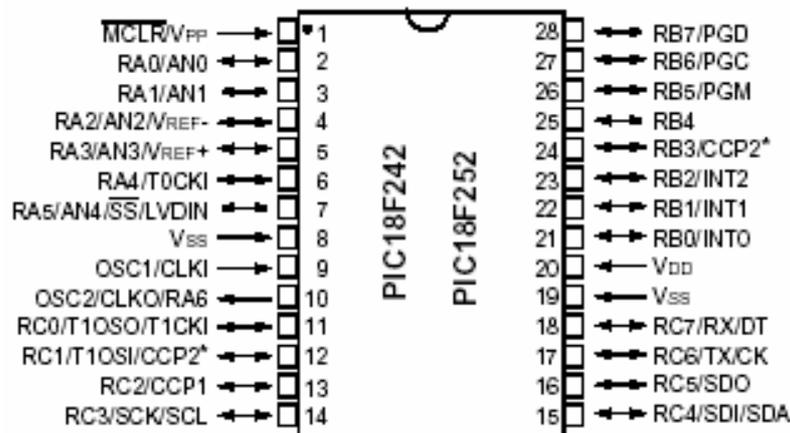


Figura 8 – PIC 18F252 [7]

Para o controle do sistema, devido à grande carga computacional demandada pelos cálculos efetuados durante um ciclo de controle, os quais compreendem leitura do nível de líquido, cálculo da referência, do erro, do sinal de controle e a conversão deste para o valor PWM a ser aplicado nos atuadores, fez-se necessária a utilização de toda a capacidade computacional do microcontrolador. Assim, o circuito implementado leva o PIC a operar a uma frequência de 40MHz.

Desejando-se obter resultados de controle semelhantes aos obtidos através do controle analógico, aplicando técnicas de controle digital, procurou-se obter no sistema a maior taxa de amostragem possível. Essa preocupação é justificada pelos requisitos aos quais se dedica o sistema, ou seja, implementar controladores projetados com técnicas de controle dinâmico. Assim, foram realizados testes de forma a se obter a maior taxa de amostragem realizável, sem que houvesse perda ou distorção de dados, encontrando-se um valor de 5Hz ( $T=0,2s$ ).

#### 4.2.2. PWM

De forma a obter um controle mais eficiente e robusto, optou-se neste projeto por fazer o acionamento das bombas a partir das saídas PWM (*Pulse Width Modulation*) do micro-controlador utilizado, obtendo vazões variáveis a partir da variação da largura de pulso.

Pulsos de amplitude constante e largura variável (PWM) consistem em uma técnica amplamente utilizada para controlar circuitos analógicos fazendo uso de saídas digitais de microprocessadores. O PWM é empregado em uma grande variedade de aplicações, dentre as quais o acionamento de motores de corrente contínua.

A partir do ciclo de trabalho do sinal é controlada a magnitude do acionamento do motor. O ciclo de trabalho é definido por:

$$DT = \frac{t_H}{t_H + t_L} = \frac{t_H}{T}$$

onde  $T$  é o período do sinal,  $t_H$  é o tempo, em um período, em que o sinal mantém seu valor alto, e  $t_L$  é o tempo, em um período, em que o sinal mantém seu valor baixo.

Como os motores de corrente contínua possuem um comportamento dinâmico do tipo filtro passa-baixo, devido à sua inércia e tempo de resposta elevados, o motor comporta-se como se estivesse sujeito a uma tensão constante. O motor recebe um sinal de amplitude constante com pulsos de largura variável, mas funciona como se estivesse recebendo um valor contínuo, equivalente ao valor médio do sinal. Diferentes ciclos de trabalho, ou seja diferentes largura de pulsos, geram valores médios diferentes. Assim, é possível controlar a magnitude do acionamento do motor de corrente contínua. Um sinal típico de PWM é representado na Figura 9.

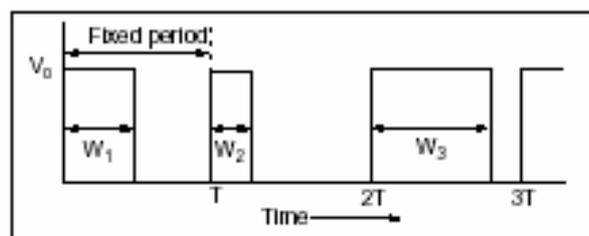


Figura 9 – Forma Típica de Onda PWM

#### 4.2.3. Circuitos

Para a programação do microcontrolador faz-se uso do circuito representado na Figura 10, gravadora JDM, sugerido em [8], onde também foi sugerida a utilização do software de programação via porta serial IC-Prog, desenvolvido por Bonny Gijzen [9].

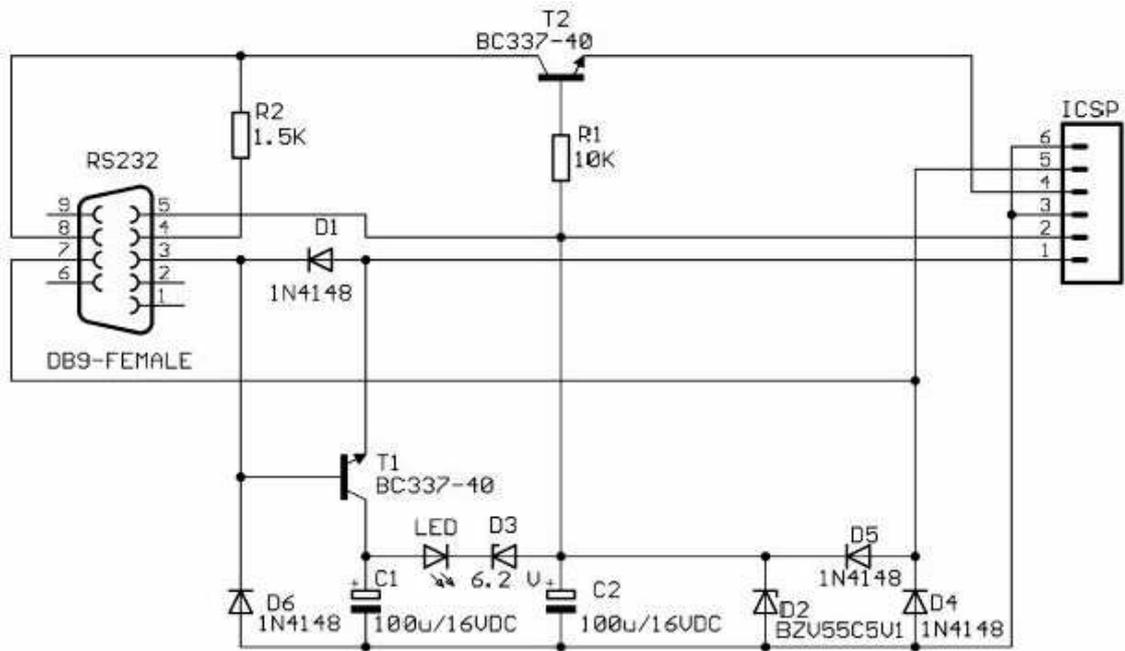


Figura 10 – Circuito Implementado para a Gravação do PIC [9]

O circuito de controle do sistema projetado está representado na Figura 11.

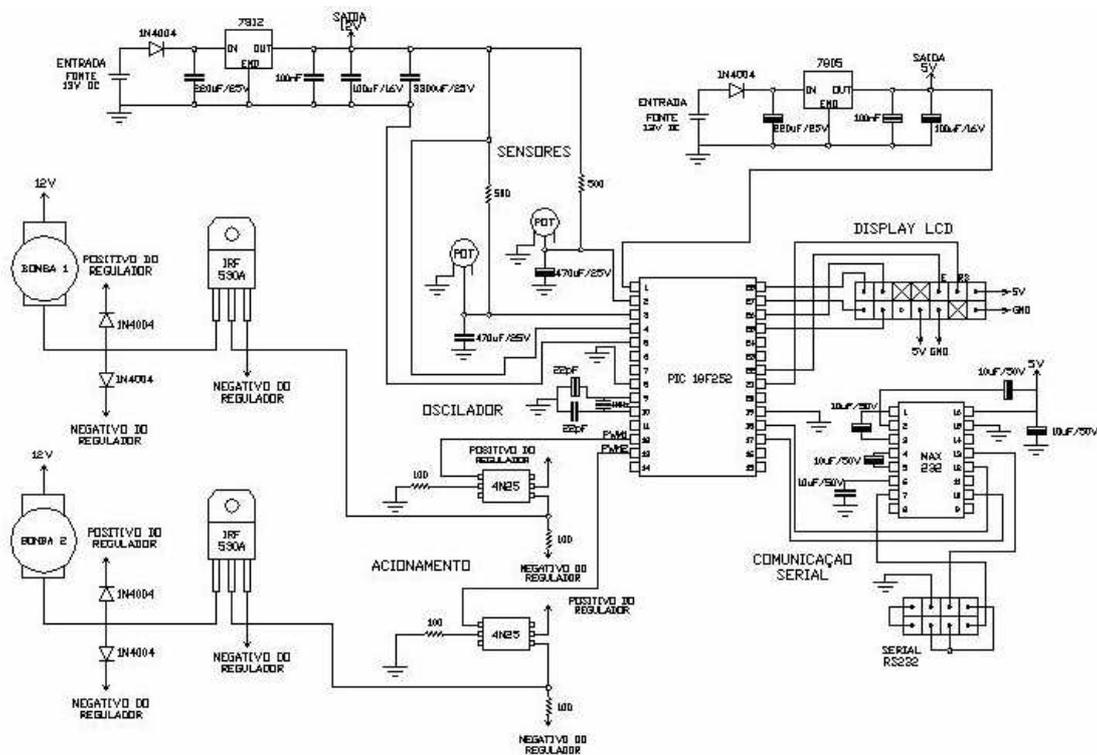


Figura 11 – Circuito de Controle do Sistema de Nível de Líquido Escalar

Para a implementação da comunicação entre o servidor do processo e o microcontrolador PIC, responsável pelo controle do sistema, foi escolhida a interface serial, por ser simples e amplamente difundida. Para tal, utilizou-se como dispositivo de interface entre o microcontrolador e a porta serial do PC o componente MAX232, montado na placa de controle juntamente com um circuito capacitivo, como apresentado na Figura 11.

Foi utilizado um display LCD para exibição externa do status do sistema de controle, de forma a facilitar o monitoramento do estado do sistema, seu desenvolvimento e resolução de problemas. Após concluída a construção do sistema, o display passou a ser utilizado para exibir as variáveis de controle: tempo de execução, valor do sinal de referência e nível de líquido nos tanques.

Com o intuito de alimentar com tensões reguladas de 5 e 12 V o circuito de controle e de aquisição de dados, foram implementadas duas fontes com reguladores de tensão, conforme representado na Figura 11.

De modo a isolar o circuito de controle de altas tensões e proteger o microcontrolador PIC, fez-se uso de dois opto-acopladores. Um opto-acoplador, representado na Figura 12, tem como função separar o sinal de saída do microcontrolador do circuito de acionamento. A separação de potenciais exige uma transformação de sinais elétricos em sinais de outras naturezas. No caso do opto-acoplador, o sinal de entrada é transformado em luz. Para tal tarefa, são utilizados dispositivos opto-eletrônicos (semicondutores fotosensíveis), nos quais a transmissão do sinal de um circuito para outro faz-se pela emissão luminosa de um diodo emissor de infra-vermelhos. Do outro lado, o fototransistor inserido no circuito de saída entra em comutação em função da luz recebida. Assim, o sinal do microcontrolador é passado para o circuito de acionamento de forma segura, evitando eventuais queimas do microcontrolador.

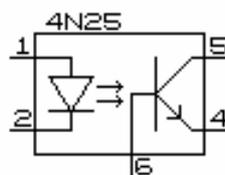
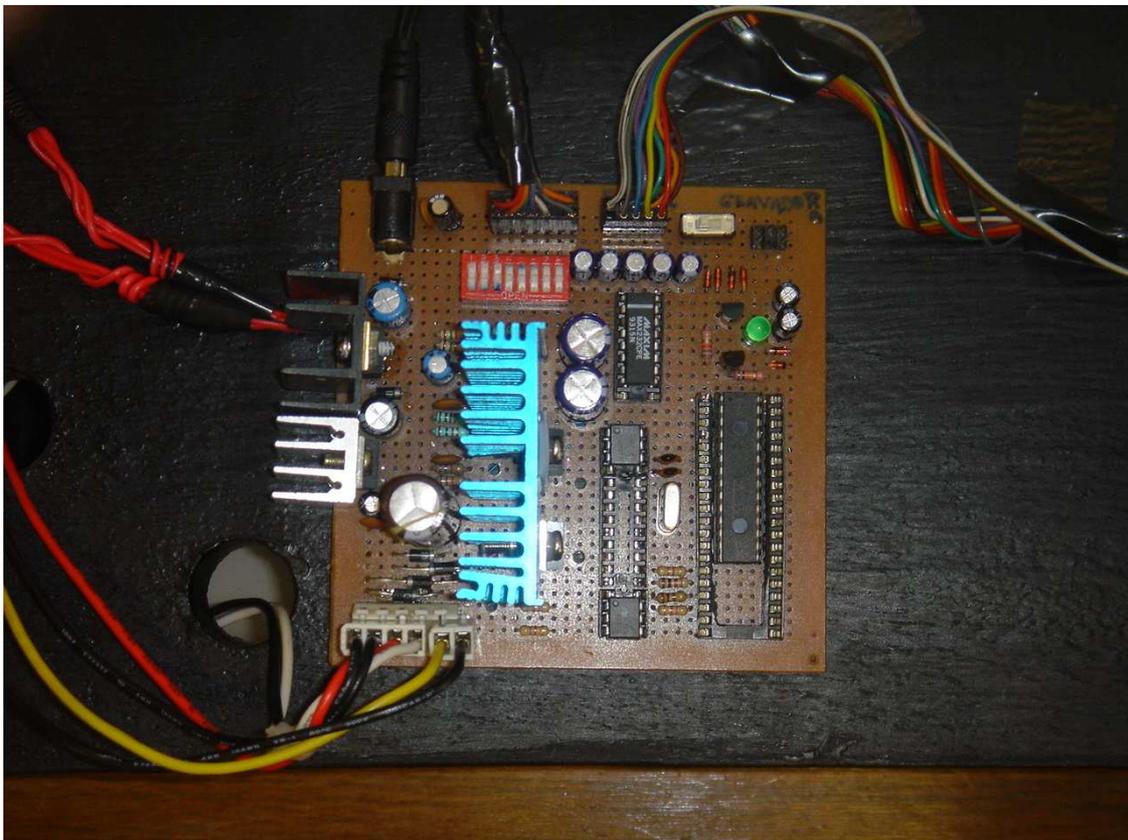


Figura 12 – Opto-acoplador 4N25

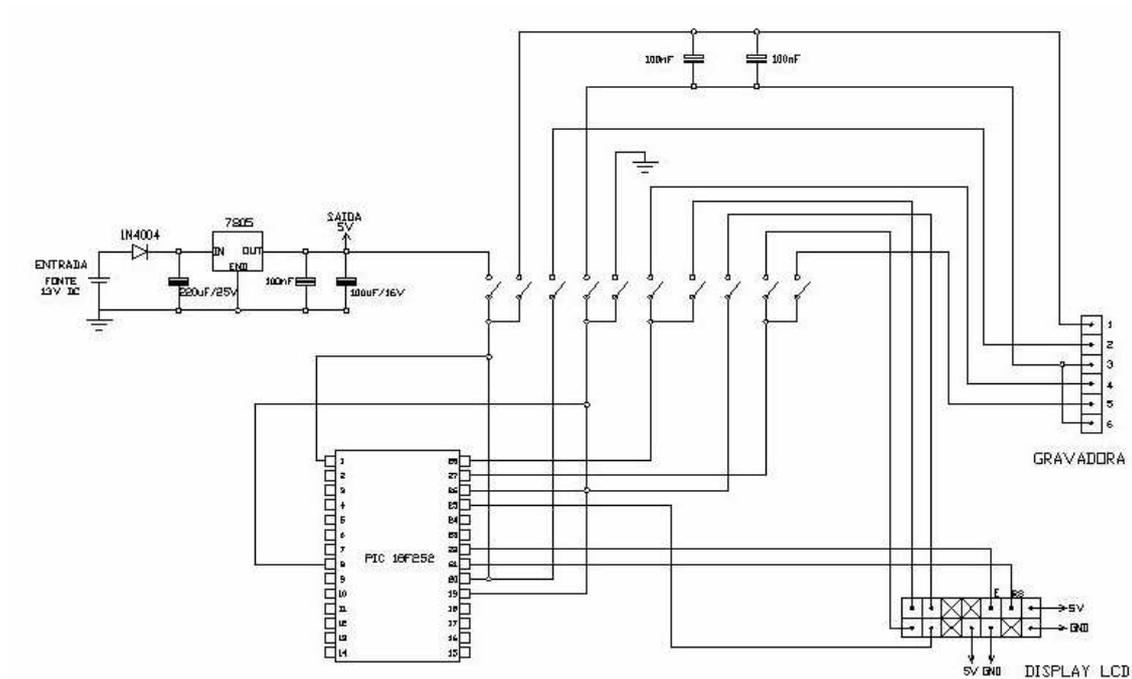
O emissor do transistor do opto-acoplador é conectado diretamente a uma resistência aterrada de  $100\ \Omega$  e no *gate* do MOSFET IRF530A, escolhido para fazer o chaveamento da alimentação dos atuadores através do PWM por suportar altas tensões aplicadas entre seus terminais, além de oferecer baixa resistência à passagem das altas correntes, as quais também é capaz de suportar (até 10A).

A Figura 13 apresenta uma foto da placa contendo os circuitos de gravação do microcontrolador PIC e de controle, acionamento e sensoriamento do sistema.



**Figura 13 – Montagem dos Circuitos de Gravação do PIC e de Controle, Acionamento e Sensoriamento do Sistema de Nível de Líquido Escalar**

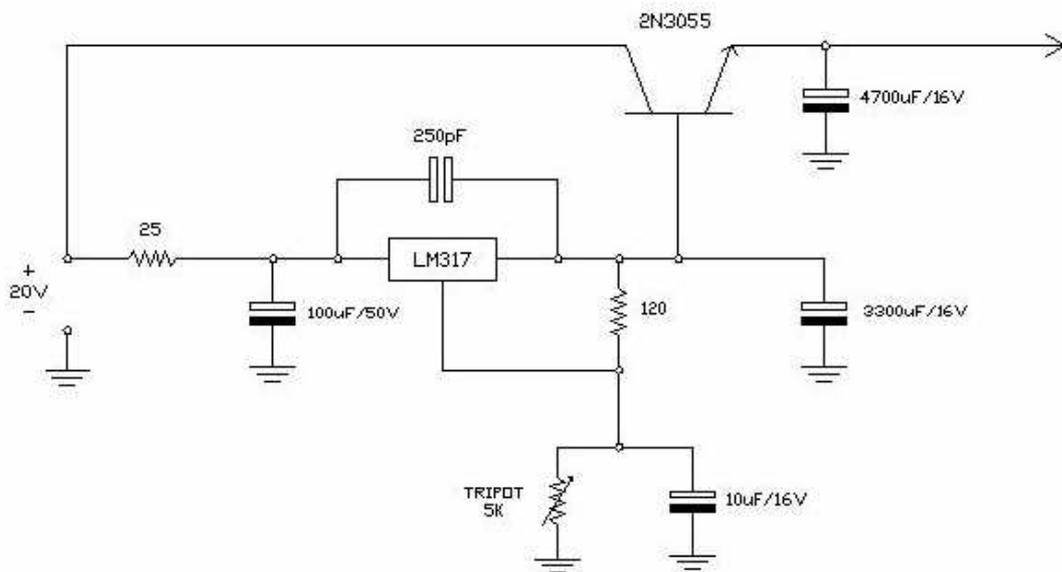
A conexão entre o PIC e o circuito de gravação do mesmo não pode ser mantida durante a operação do sistema, uma vez que alguns pinos utilizados para gravação do microcontrolador são também utilizados para o envio de dados ao display LCD ou para a alimentação do microcontrolador. Desta forma, fez-se necessário o chaveamento destes pinos de forma a isolar os dois circuitos, conforme representado na Figura 14.



**Figura 14 – Chaveamento entre os Circuitos de Gravação do PIC e de Controle**

Para fornecer a tensão de alimentação necessária para o acionamento dos atuadores foi utilizada uma fonte chaveada de 24V, 7.5A fabricada pela KYOCERA Corporation. Foi desenvolvido um circuito regulador de tensão variável de alta corrente, representado na Figura 15, de forma a fornecer aos atuadores uma tensão de 12V, especificada para o seu funcionamento adequado.

Este circuito é controlado pelo regulador ajustável LM317, o qual é capaz de fornecer correntes da ordem de até 1A. Como os atuadores exigem uma corrente muito superior a este valor, foi adicionado ao circuito do regulador um transistor de potência 2N3055 responsável pelo fornecimento da corrente necessária. Assim, o regulador LM317, que seria responsável por alimentar a carga do circuito, passa a ter o papel de regular a tensão de base do transistor de potência, e conseqüentemente a tensão de saída do circuito regulador (cerca de 0,9V menor que a tensão de base), tendo de fornecer somente a corrente necessária para a habilitação do transistor no modo de saturação.



**Figura 15 – Circuito Regulador de Tensão Variável de Alta Corrente**

#### 4.2.4. Programa de Controle

O programa de controle do PIC desenvolvido (Apêndice III) é dedicado à implementação dos controladores proporcional, proporcional – integral, proporcional – integral – derivativo e no domínio da frequência (controladores de avanço/atraso). Sua construção foi baseada no programa desenvolvido pelo aluno de mestrado Ronaldo de Jesus Santos (sistema térmico) e no programa existente no sistema de nível de líquidos multivariável do LAVSI, desenvolvido pelo ex-aluno de mestrado Hugo Gosmann [2] e aprimorado pelo aluno de graduação Alfredo Américo [3].

O software de desenvolvimento do código em C utilizado foi um compilador CCS C - O PIC C Compiler, desenvolvido por R. Walton Dragon Developments Ltd.

O programa consiste basicamente em uma rotina de leitura dos parâmetros vindos da porta serial do servidor do processo, o qual irá transmitir ao PIC os comandos de início ou parada do processo de controle, ordem do sistema a ser controlado, tipo de controle a ser implementado e tipo de referência a ser seguida. Ao receber estes parâmetros do servidor, o PIC habilita as rotinas de interrupção internas Timer0 e

Timer1, responsáveis pela comunicação do sistema com o meio exterior e servidor e execução de todo o ciclo de controle do processo.

A rotina de interrupção Timer0 exibe em um display LCD, o tempo de execução do experimento, o valor da referência e os níveis correntes de cada tanque, em tempo de execução. Esta mesma rotina envia ao servidor, através da comunicação serial, estes quatro parâmetros e os valores de PWM gerados pelo PIC e enviados para os dois atuadores responsáveis pelo controle do sistema para que sejam exibidos na página *web* para visualização do usuário e armazenamento em arquivo de dados do tipo texto, o qual será disponibilizado para o usuário ao final do experimento de controle.

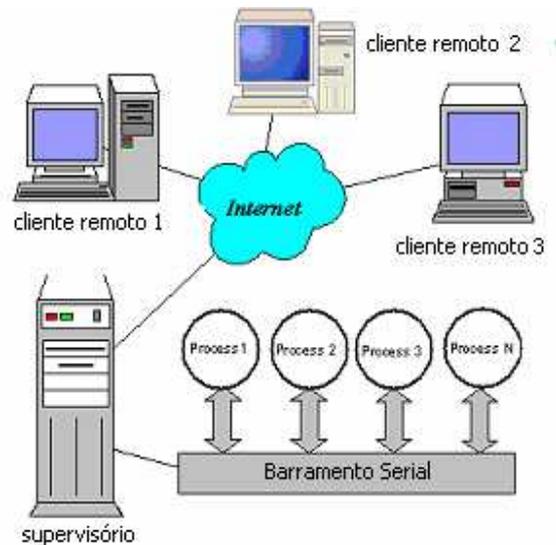
A rotina de interrupção Timer1 é a responsável pela chamada e execução de todos os passos necessários para o controle do sistema de nível de líquidos. Inicialmente, ela armazena os valores correntes de erro e sinal de controle e atualiza então os níveis de cada tanque no sistema através da chamada de uma função dedicada à conversão analógica digital dos sinais originários dos sensores de nível. Possuindo estes valores, chama a função responsável por gerar o sinal de referência do sistema especificado pelo usuário, calculando o sinal de erro proveniente da diferença entre referência e nível atual do tanque controlado (tanque 1 ou 2), dependendo da ordem do sistema de controle especificado pelo usuário. Uma vez calculado o sinal de erro, é chamada a função responsável pelo cálculo do sinal de controle do sistema, de acordo com o tipo de controlador e parâmetros de controle especificados pelo usuário. Esse sinal é então convertido em PWM e enviado a um dos atuadores do sistema, completando um ciclo de controle.

O sistema permite ainda ao usuário que, em tempo de execução, caso seja de seu interesse, altere o tipo de controle a ser implementado, os parâmetros do controlador escolhido, bem como o tipo e nível da referência do sistema.

### **4.3. Comunicação PIC – Servidor Web**

Para a implementação do sistema remoto dois subsistemas de comunicação tiveram de ser implementados. Um é o de comunicação entre o computador que publica a

pagina na internet e os processos; o outro cuida da interação com os usuários remotos. Estes subsistemas estão representados na Figura 16.



**Figura 16 – Comunicação PIC – Servidor Web - Usuário**

Para estabelecer a comunicação entre o servidor e os microcontroladores foi utilizada uma interface serial do tipo RS232, como mencionado na seção 4.2.3.

A arquitetura de comunicação entre usuário remoto e servidor baseia-se no modelo cliente/servidor e foi desenvolvida em Java. Desta maneira o operador pode acessar o sistema supervisório usando qualquer sistema operacional que suporta um *browser web* com a máquina virtual Java. Todos os *web browsers* relativamente recentes possuem esta máquina virtual.

O uso de interfaces gráficas que ilustram em tempo real o funcionamento do sistema faz com que o usuário se aproxime da realidade que envolve uma experimentação ou um processo controlado remotamente. Assim, foi implementada uma interface na qual o usuário pode visualizar os níveis de líquidos nos tanques e os sinais de controle, observando o comportamento do sistema em resposta à atuação do controlador projetado.

## 4.4. Calibração dos Sensores e Atuadores

### 4.4.1. Sensores de Nível

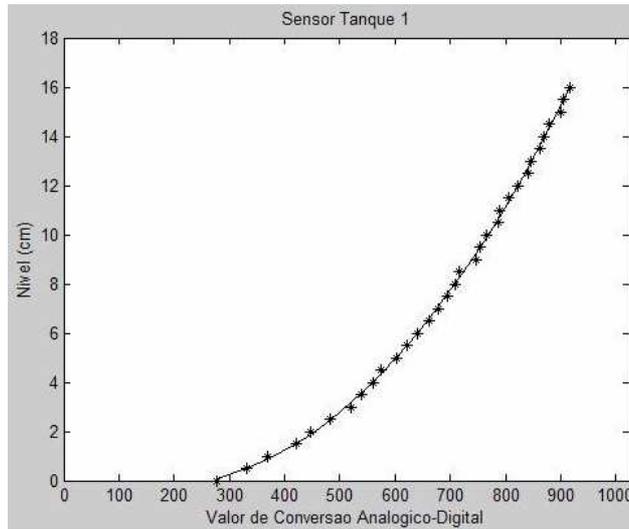
A precisão dos sensores é fator determinante no sucesso do controle. Portanto, foi levantado um modelo que relaciona a altura do nível de líquido  $h$  (cm) com a tensão  $v$  (Volts) de cada conjunto sensor- circuito de condicionamento.

Para modelar a característica dos sensores foi considerada uma relação estática entre as variações de nível no tanque e de tensão no divisor, ou seja, variações no nível produzem variações instantâneas na tensão  $v$ , visto que a dinâmica interna dos sensores é muito mais rápida do que a dinâmica de cada tanque [2].

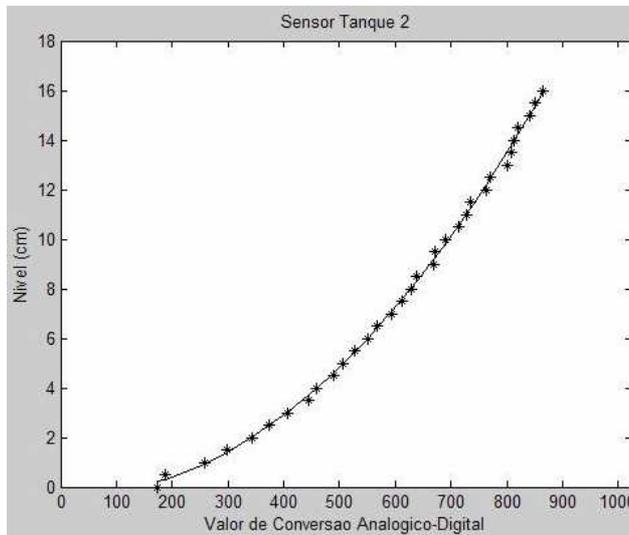
O levantamento da característica  $h$  (cm) x  $v$  (volts) de cada sensor foi realizado através de um procedimento de calibração onde, para cada nível entre 0cm e 16cm, com intervalos de 0,5cm, foi feita a leitura do valor digital (numero variando de 0 a 1024) na entrada de aquisição de dados do microcontrolador (valor este proporcional à tensão do conjunto sensor – circuito de condicionamento). Visto que os sensores utilizados apresentam uma histerese desprezível [2], o levantamento de dados foi realizado apenas no esvaziamento dos tanques.

Durante a calibração dos sensores, verificou-se experimentalmente que estes possuem uma precisão de medida de 2mm nas condições de operação propostas neste trabalho.

As curvas obtidas na calibração dos sensores de Nível de Líquido do Sistema de Segunda Ordem Didático estão representadas nas Figuras 17 e 18.



**Figura 17 – Curva de Calibração do Sensor de Nível do Tanque 1**



**Figura 18 – Curva de Calibração do Sensor de Nível do Tanque 2**

A partir dos pontos medidos foi calculado o polinômio que melhor se adequava à curva referente a cada sensor. Foram utilizados polinômios de grau 3, que melhor se adequaram ao comportamento da curva levantada, para equacionar a relação entre o valor digital e a altura marcada por cada sensor, onde  $h_i$  é a altura do nível no tanque  $i$  e  $n_i$  é o valor digital lido para o sensor  $i$ .

$$h_1 = 0,00000000367814n_1^3 + 0,00002410499612n_1^2 - 0,00826710199563n_1 - 1,44258336304874$$

$$h_2 = 0,00000000017461n_2^3 + 0,00002310104326n_2^2 - 0,00204546754186n_2 - 0,73105643567369$$

#### 4.4.2. Atuadores

Assim como no caso dos sensores de nível, considerou-se que a dinâmica das duas moto-bombas é muito mais rápida do que a dinâmica dos tanques, podendo assim ser desprezada no processo de modelagem. Deseja-se então escrever a vazão nas bombas em função do sinal de PWM aplicado, ou seja,  $q = g(pwm)$ , onde  $pwm$  é o sinal aplicado, variando de 0 a 100%.

Para identificar a função  $g$  foram realizados testes que consistiram na aplicação de um sinal PWM fixo na entrada do circuito de acionamento e na medição do tempo necessário para que um determinado volume fosse preenchido (no caso da bomba 1, de enchimento dos tanques) ou esvaziado (no caso da bomba 2), calculando-se assim a vazão média nas moto-bombas para o sinal dado. Estes testes foram realizados, para ambas as bombas, com sinais de PWM variando de 0 a 100%, em intervalos de 5%.

As Figuras 19 e 20 mostram as curvas de calibração dos dois atuadores. Os asteriscos (\*) indicam os pontos experimentais obtidos.

Observa-se que existe uma saturação no seu comportamento. Abaixo de um determinado valor de PWM (5%), não existe vazão na bomba, e acima de um determinado valor (90% no caso da Bomba 1 e 85% no caso da Bomba 2), a vazão permanece constante e igual à vazão máxima. As expressões que modelam a vazão nas bombas fora da faixa de saturação são as seguintes:

$$q_i(+) = 0,00022663685357pwm_1^3 - 0,04187960096319pwm_1^2 + 3,23160790047013pwm_1 - 6,92826797385620, \quad 5\% < pwm_1 < 90\%$$

$$q_i(-) = 0,00024024767802pwm_2^3 - 0,03759958720330pwm_2^2 + 2,73883900928792pwm_2 + 8,48088235294123, \quad 5\% < pwm_2 < 85\%$$

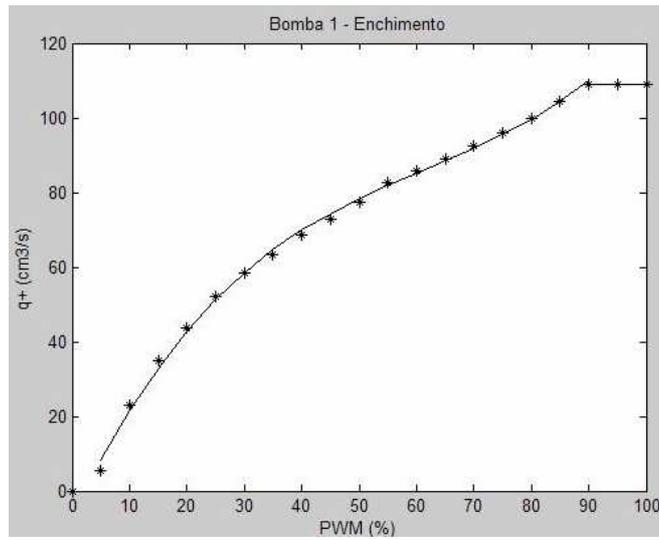


Figura 19 – Curva de Calibração da Bomba de Enchimento

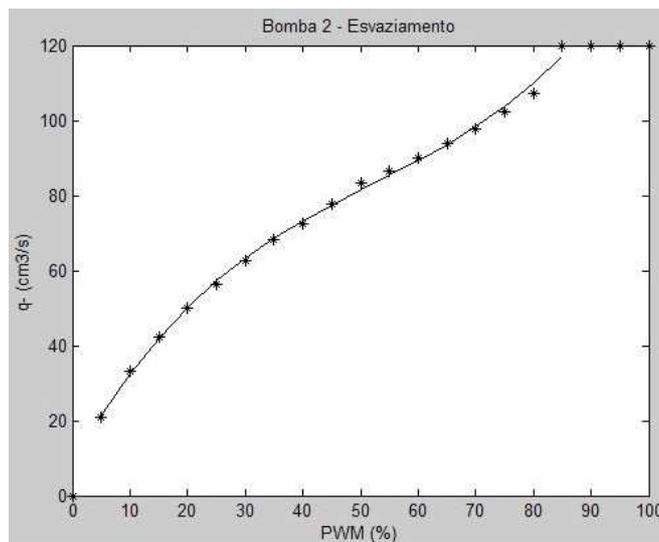


Figura 20 – Curva de Calibração da Bomba de Esvaziamento

Para efetuar o controle do sistema é necessário relacionar o valor do PWM a ser aplicado em função da vazão de entrada desejada. Assim, foram inseridas no programa de controle as relações dos PWM's em função das vazões das bombas. Seguem as relações:

$$pwm_1 = -0,00000434157953q_i(+)^3 + 0,01951276572677q_i(+)^2 - 0,07754350722353q_i(+)$$

$$+ 16,89554745684901$$

$$pwm_2 = -0,00010361822132q_i(-)^3 + 0,02536081539480q_i(-)^2 - 0,45874852929115q_i(-) + 15,45419444120391$$

## **5. Controle no Domínio da Frequência**

A resposta em frequência consiste em um método muito utilizado na avaliação de sistemas e projeto de compensadores. Esta seção consiste em apresentar este método, descrevendo seus conceitos básicos e aplicações. Em seguida, será apresentado o procedimento adotado para a implementação deste tipo de controle no sistema de nível de líquido do LAVSI, descrevendo a técnica de projeto de compensadores no domínio da frequência e a obtenção da equação de controle utilizada na implementação.

### **5.1. Resposta em Frequência**

Pelo termo resposta em frequência entende-se a resposta em regime estacionário de um sistema submetido a um sinal de entrada senoidal. Nos métodos de resposta em frequência, varia-se a frequência do sinal de entrada ao longo de uma faixa de interesse e estuda-se a resposta resultante [5]. No caso do sistema de nível de líquido multivariável, essa análise limita-se a frequências muito baixas, devido ao fato do sistema operar em malha aberta ao esvaziar os tanques.

A partir da obtenção da resposta em frequência, pode-se traçar um Diagrama de Bode, que consiste em dois gráficos: um gráfico do logaritmo do módulo da função de transferência senoidal e um gráfico do ângulo de fase. Ambos são construídos em função da frequência em uma escala logarítmica [5]. A partir da análise do Diagrama de Bode, podem ser tiradas conclusões sobre o comportamento do sistema estudado.

A compensação de sistemas dinâmicos pode ser realizada pela utilização de compensadores de avanço e de atraso de fase. Porém, para poder utilizar esta técnica de controle no sistema estudado, é necessário que o sistema seja operado em torno de um ponto de operação e que a amplitude dos sinais seja tal que não ocorra saturação dos atuadores, para que o sistema possa ser considerado linear.

Para obter uma resposta transitória satisfatória, faz-se uso de compensadores de avanço. Já compensadores de atraso são eficazes quando visa-se melhorar a resposta em regime permanente do sistema. Também podem ser projetados e implementados

compensadores compostos de dois avanços ou de um avanço e um atraso, dependendo das especificações a serem atingidas. No experimento proposto, será utilizado apenas o compensador de avanço simples.

Controladores de avanço podem ser projetados seguindo dois métodos: pelo método do lugar das raízes, no qual o projeto é realizado a partir de parâmetros tais como coeficiente de amortecimento, tempo de subida, sobre-passo, coeficiente de erro em regime permanente, etc. O segundo método, a ser utilizado no experimento elaborado, consiste no projeto no domínio da frequência. Neste caso, o projeto visa atender especificações definidas pelas margens de fase e de ganho. Este método tem como principal vantagem não necessitar da função de transferência do sistema. Apenas com a resposta em frequência do sistema é possível projetar um controlador de avanço ou atraso que atenda às especificações desejadas.

Um controlador de avanço ou de atraso é composto por um pólo e um zero, dispostos de maneira a compensar eficientemente o sistema. Tais controladores podem ser representados pela seguinte função de transferência:

$$G_c(s) = k_c \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1}$$

onde  $-1/T_1$  é o zero do compensador e  $-1/T_2$  é o pólo. Caso o pólo esteja mais afastado da origem do que o zero ( $T_1 > T_2$ ), trata-se de um compensador de avanço.

## 5.2. Projeto no Domínio da Frequência

A função principal do compensador de avanço de fase consiste em dar nova forma à curva de resposta em frequência de forma a propiciar um ângulo de avanço de fase suficiente para compensar o retardo de fase em excesso associado aos componentes de um determinado sistema [5]. Retardo este que prejudica a resposta transitória do sistema.

Um controlador de avanço de fase é representado pela seguinte função de transferência:

$$G_c(s) = k_c \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1} = k_c \frac{T_1s + 1}{\alpha T_1s + 1} \quad (10)$$

O procedimento para projetar um compensador de avanço de fase através da técnica de resposta em frequência consiste nos passos a seguir [5].

1. Determinar o ganho  $k_p$  que satisfaça o requisito sobre o erro em regime permanente dado.

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + k_p}$$

2. Calcular o valor da constante de erro de posição do sistema controlado em malha aberta, de modo a obter o ganho  $k_c$  do controlador de avanço.

$$k_p = \lim_{s \rightarrow 0} k_c G_c(s) F_{MA}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} k_c \frac{T_1s + 1}{\alpha T_1s + 1} \cdot \frac{k}{(p_1s + 1)(p_2s + 1)} \Rightarrow k_c = \frac{k_p}{k}$$

3. Aplicar o ganho  $k_c$  à função de transferência do sistema em malha aberta e traçar um Diagrama de Bode de  $k_c F_{MA}(j\omega)$  (sistema com o ganho ajustado porém não-compensado). Avaliar a margem de fase.

4. Determinar o ângulo de avanço de fase  $\phi$  necessário a ser acrescentado ao sistema.

$$\phi = (MF_{desejada} - MF_{real}) + 10^\circ$$

5. Determinar o fator de atenuação  $\alpha$ .

$$\text{sen}\phi = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (11)$$

6. Determinar o valor do ganho em dB que levaria à nova frequência  $\omega_c$  de cruzamento com a reta 0dB do sistema compensado.

$$|k_c F_{MA}(j\omega_c)| = -\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$$

7. Obter, no Diagrama de Bode a frequência de cruzamento  $\omega_c$ , onde ocorre o valor máximo de defasagem  $\phi_m$ .

8. Encontrar os valores do zero o do pólo do controlador de avanço

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} = \sqrt{\alpha} \omega_c \quad (12)$$

$$\frac{1}{\alpha T} = \frac{1}{T_2} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\alpha}} \quad (13)$$

### 5.3. Equação de Controle

Foi inserida no programa que controla o processo (Apêndice III) uma função para realizar o controle de avanço. Para tal, foi necessário obter uma equação de controle discreta para o compensador de avanço.

Esta equação foi obtida a partir da discretização, utilizando-se o método *zero order hold* [4], da função de transferência do controlador (10), onde U(s) foi denominado como entrada do controlador e E(s) a sua saída (entrada do sistema a ser controlado).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{T_1}{T_2} k_c \frac{s+1/T_1}{s+1/T_2} = \frac{T_1}{T_2} k_c \frac{s+a}{s+b}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T_1}{T_2} k_c (1-z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{1}{s} \frac{s+a}{s+b} \right\} = \frac{T_1}{T_2} k_c (1-z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{\frac{a}{b} + \frac{-\frac{a}{b} + 1}{s+b}}{s} \right\}$$

$$U(z) - U(z)z^{-1}e^{-bT} = E(z) \left[ \frac{T_1}{T_2} k_c \frac{a}{b} - \frac{T_1}{T_2} k_c \frac{a}{b} z^{-1}e^{-bT} + 1 - \frac{a}{b} \right]$$

Assim,

$$u(kT) - u(kT-T)e^{-bT} = e(kT) \left[ \frac{T_1}{T_2} k_c \frac{a}{b} + 1 - \frac{a}{b} \right] - e(kT-T) \frac{T_1}{T_2} k_c \frac{a}{b} e^{-bT}$$

Visto que

$$a = 1/T_1 \text{ e } b = 1/T_2$$

Obtém-se a equação de controle

$$u(kT) = u(kT - T)e^{-\frac{T}{T_2}} + e(kT) \left( k_c + 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) - e(kT - T) \left( k_c e^{-\frac{T}{T_2}} \right) \quad (14)$$

## 6. Resultados Obtidos

### 6.1. Resultados Obtidos no Sistema Multivariável

#### 6.1.1. Modelo Matemático Experimental do Sistema

O modelo matemático consiste em uma representação matemática do sistema físico estudado, sendo este representado por uma equação, denominada de função de transferência, que relaciona a saída do sistema com a sua entrada. A obtenção de um modelo permite a realização de diversas análises sobre o comportamento do sistema e o projeto de controladores.

Para obter o modelo matemático experimental do sistema de nível de líquido multivariável, utilizou-se o método descrito no primeiro experimento realizado pelos alunos [1], que consiste na análise da resposta do sistema controlado proporcionalmente a uma entrada degrau. Aplicando-se um ganho de 60 ao sistema realimentado, foram obtidos os parâmetros da função de transferência em malha fechada. A Figura 21 mostra a resposta à aplicação de três degraus de 3cm de amplitude, onde a curva verde representa o nível de água do tanque 3, ou seja, a saída do sistema de segunda ordem. As curvas vermelha e preta representam, respectivamente, o nível de água nos tanques 1 (sistema de primeira ordem) e 2 (variável não-controlada do sistema de segunda ordem).

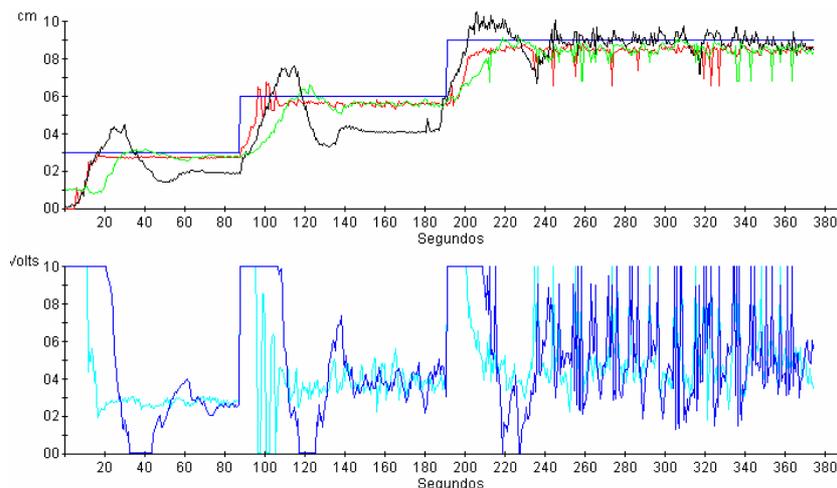


Figura 21 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado com  $k_p=60$  (Sistema Multivariável)

Foi selecionado o degrau entre os níveis 3cm e 6cm para a obtenção dos parâmetros da função de transferência em malha fechada.

Considerando-se que trata-se de um sistema de segunda ordem, com ganho  $k$  e constantes de tempo (1/pólo)  $T_1$  e  $T_2$ , a função de transferência do sistema em malha fechada, controlado proporcionalmente, é dada por:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k_p k}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1) + k_p k} = \frac{\frac{k_p k}{T_1 T_2}}{s^2 + s \left( \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \right) + \frac{1 + k_p k}{T_1 T_2}} \quad (15)$$

Iguala-se (15) à função de transferência típica de um sistema de segunda ordem.

$$F(s) = \frac{\frac{k_p k}{T_1 T_2}}{s^2 + s \left( \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \right) + \frac{1 + k_p k}{T_1 T_2}} = \frac{A \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

O degrau obtido inicia em 2,8cm (referência). A resposta ao degrau se estabiliza em 5,6cm (2,8cm acima do nível inicial) e tem pico em 6,4cm (3,6 cm acima do nível inicial).

Portanto, o sobre-passo percentual, que consiste no máximo valor da resposta do sistema com relação ao seu valor final, é dado por:

$$\%sp = 100 \cdot \frac{3,6 - 2,8}{2,8} = 28,57\%$$

O tempo de subida, tempo necessário para a resposta do sistema percorrer o intervalo entre 10% e 90% do seu valor final, é:

$$t_s = t_{90\%} - t_{10\%} = 110 - 93 = 17s$$

A partir dos valores encontrados, é possível obter os parâmetros da função de transferência em malha fechada.

$$\%sp = 100 \cdot e^{-\frac{\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow \zeta = 0,37$$

$$t_s = \frac{\pi - \phi}{\omega_d} \Rightarrow \omega_n = 0,12 rad/s$$

$$A = \frac{\Delta y}{\Delta r} = \frac{2,8}{3,0} = 0,93$$

Assim, obteve-se a função de transferência do sistema em malha fechada:

$$F_{MF}(s) = \frac{0,0134}{s^2 + 0,0888s + 0,0144} \quad (17)$$

O Diagrama de Bode desta função de transferência está representado na Figura 22.

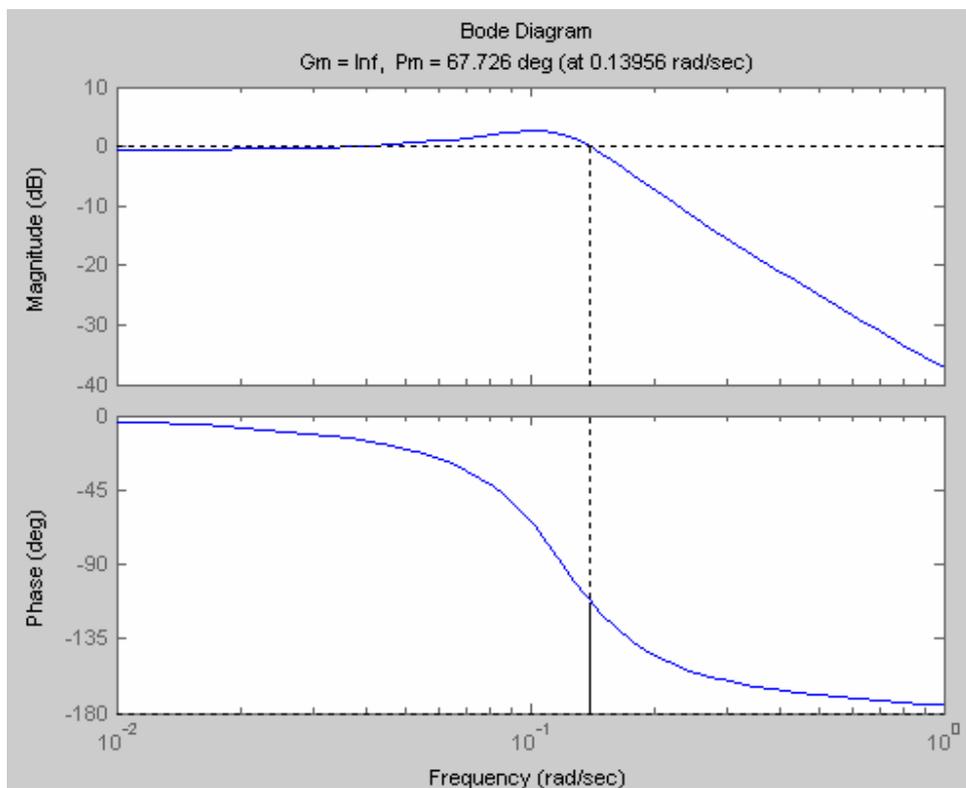


Figura 22 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Fechada (Sistema Multivariável)

Partindo do valor de  $k_p$ , é possível encontrar os parâmetros  $k$ ,  $p_1$  e  $p_2$  da função de transferência do sistema de malha aberta, a partir da equação (16).

$$\begin{aligned} k &= 0,22 \\ T_1 &= 13,28 \\ T_2 &= 74,19 \end{aligned}$$

Assim, a função de transferência do sistema de nível de líquido multivariável não controlado é:

$$F_{MA}(s) = \frac{0,22}{(13,28s + 1)(74,19s + 1)} \quad (18)$$

A Figura 23 apresenta o Diagrama de Bode do sistema de nível de líquido não controlado, em malha aberta.

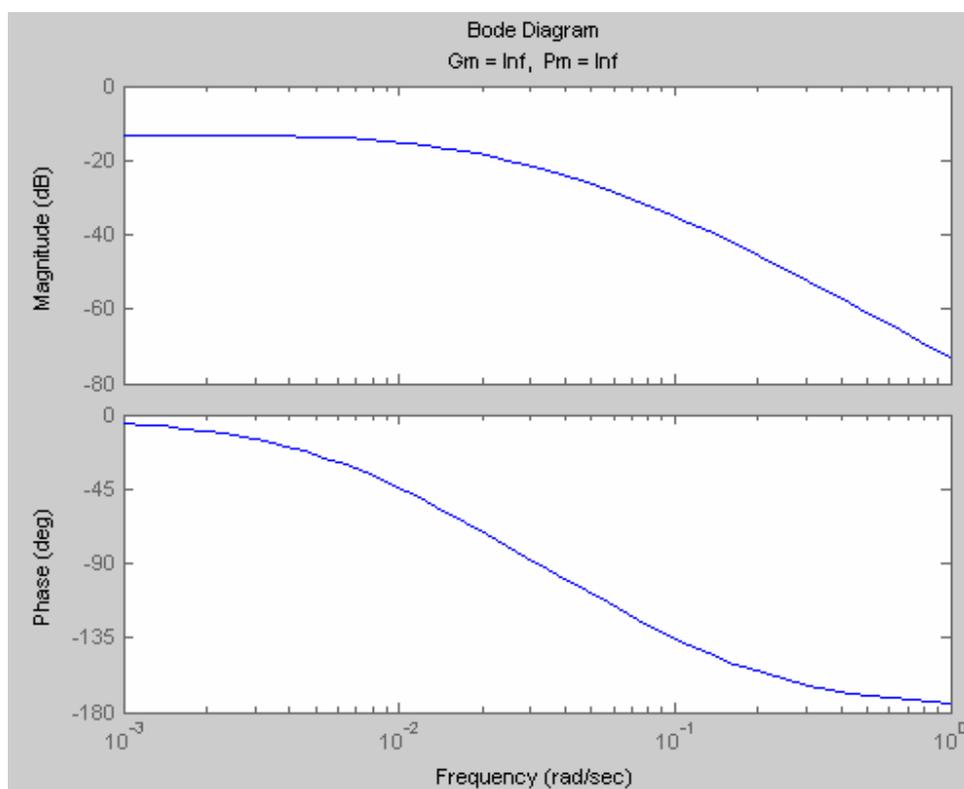


Figura 23 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Aberta (Sistema Multivariável)

### 6.1.2. Experimento de Controle no Domínio da Frequência

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na realização do experimento elaborado e na validação feita a partir de um projeto de controlador baseado na função de transferência do sistema (18).

Para validar o experimento proposto, este foi executado conforme o roteiro disponibilizado para os alunos (Apêndice II).

A grande vantagem de se utilizar o projeto de controladores no domínio da frequência consiste em não ser necessário, para a realização do projeto, do modelo do sistema a ser controlado, bastando apenas o seu comportamento na frequência, ou seja, o seu diagrama de bode. Portanto, para a realização deste experimento levantou-se experimentalmente o diagrama de Bode do sistema.

Observou-se a resposta do sistema controlado por um controlador proporcional com  $k_p = 20$  a entradas senoidais para 5 frequências diferentes. Para cada frequência calculou-se o ganho e a defasagem. Devido ao fato do sistema operar sem controle no esvaziamento dos tanques, o intervalo de frequências utilizadas foi restrito, possibilitando a construção de apenas um trecho do diagrama. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

*Tabela 1 – Resposta em frequência do sistema em malha fechada*

<b>Frequência (Hz)</b>	$A\angle\phi$	$c + jd$
0,004	0,92 $\angle$ -26,58	0,82 - j0,41
0,006	0,92 $\angle$ -46,53	0,63 - j0,67
0,010	0,75 $\angle$ -72	0,23 - j0,71
0,015	0,67 $\angle$ -116,31	-0,30 - j0,60
0,020	0,33 $\angle$ -144	-0,27 - 0,19

Este dados são referentes ao sistema de malha fechada descrito em (19):

$$F_{MF}(s) = \frac{k_c F_{MA}(s)}{1 + k_c F_{MA}(s)} \quad (19)$$

$$F_{MF}(j\omega) = \frac{k_c F_{MA}(j\omega)}{1 + k_c F_{MA}(j\omega)}$$

Para o projeto do controlador deve-se obter o diagrama de bode do sistema em malha aberta, ou seja, de  $F_{MA}(j\omega)$ . Para cada frequência,  $F_{MF}(j\omega)$  e  $F_{MA}(j\omega)$  são números complexos e podem ser expressos na forma  $\text{Re} + j\text{Im}$ . Assim:

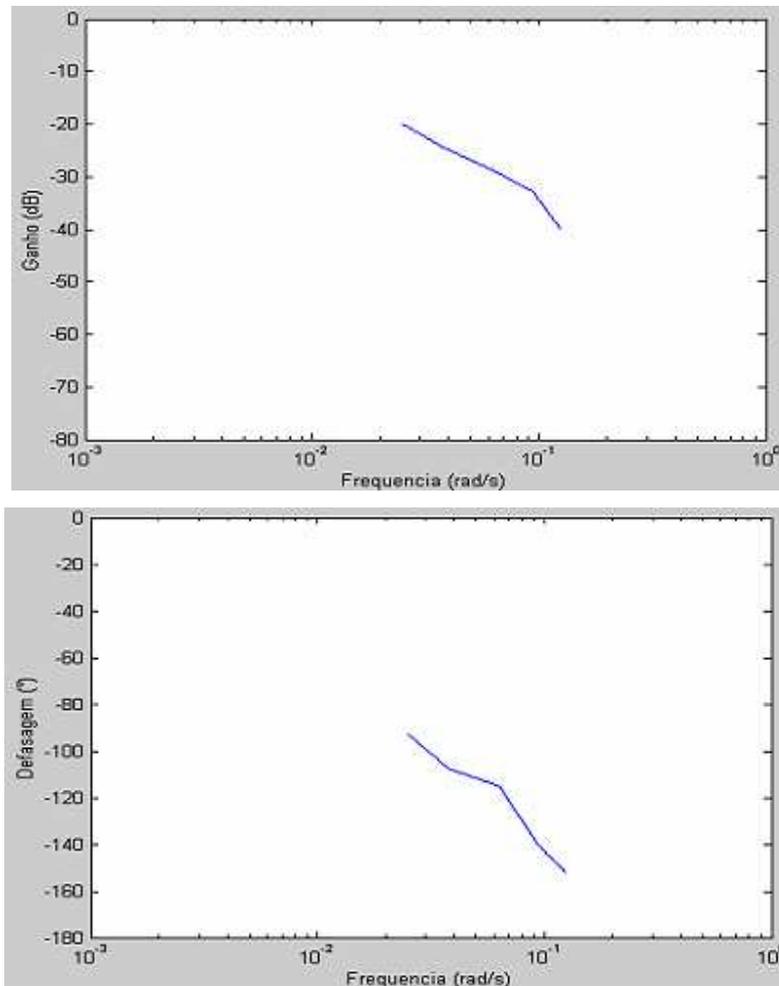
$$c + jd = \frac{k_p(a + jb)}{1 + k_p(a + jb)} \Rightarrow a + jb = \frac{c + jd}{k_p[1 - (c + jd)]}$$

Obtém-se assim a resposta na frequência do sistema de malha aberta, representada na tabela 2.

Tabela 2 – Resposta em frequência do sistema em malha aberta

Frequência (Hz)	$a + jb$	$A \angle \phi$	A(dB)	$\phi(^{\circ})$	$\omega(\text{rad} / \text{s})$
0,004	$-5,11 \cdot 10^{-3} - j0,1$	$0,1 \angle -92,9$	-20,00	-92,9	0,025
0,006	$-0,018 - j0,057$	$0,06 \angle -107,5$	-24,44	-107,5	0,038
0,010	$-0,015 - j0,032$	$0,036 \angle -115,1$	-28,87	-115,1	0,063
0,015	$-0,018 - j0,015$	$0,023 \angle -140,2$	-32,77	-140,2	0,094
0,020	$-0,011 - j5,76 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \angle -152,36$	-40,00	-152,4	0,125

Traçou-se então o Diagrama de Bode experimental do sistema em malha aberta, representado na Figura 24 .



**Figura 24 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Aberta Obtido Experimentalmente (Sistema Multivariável)**

A partir deste diagrama, fez-se um projeto de compensador de avanço, seguindo o procedimento descrito na seção 5.2, obtendo os seguintes valores para os parâmetros do controlador (Os cálculos são apresentados no Apêndice I):

$$k_c = 91 ; T_1 = 10,66 ; T_2 = 4,37$$

O controlador projetado possui, portanto, a seguinte função de transferência:

$$G_C(s) = 91 \frac{12,59s + 1}{3,78s + 1} \quad (20)$$

É então obtida uma função de transferência para o sistema controlado em malha aberta:

$$G_C(s)F_{MA}(s) = 91 \cdot \frac{12,59s + 1}{3,78s + 1} \cdot \frac{0,22}{(13,28s + 1)(74,19s + 1)}$$

$$G_C(s)F_{MA}(s) = \frac{251,8s + 20}{3724,2s^3 + 1308,3s^2 + 89,25s + 1} \quad (21)$$

Levantando-se o diagrama de bode da função de malha aberta do sistema compensado obteve-se uma margem de fase de  $54,633^\circ$  e uma frequência de cruzamento com o eixo 0 db de  $0,20405$  rad/s, conforme representado na Figura 25 .

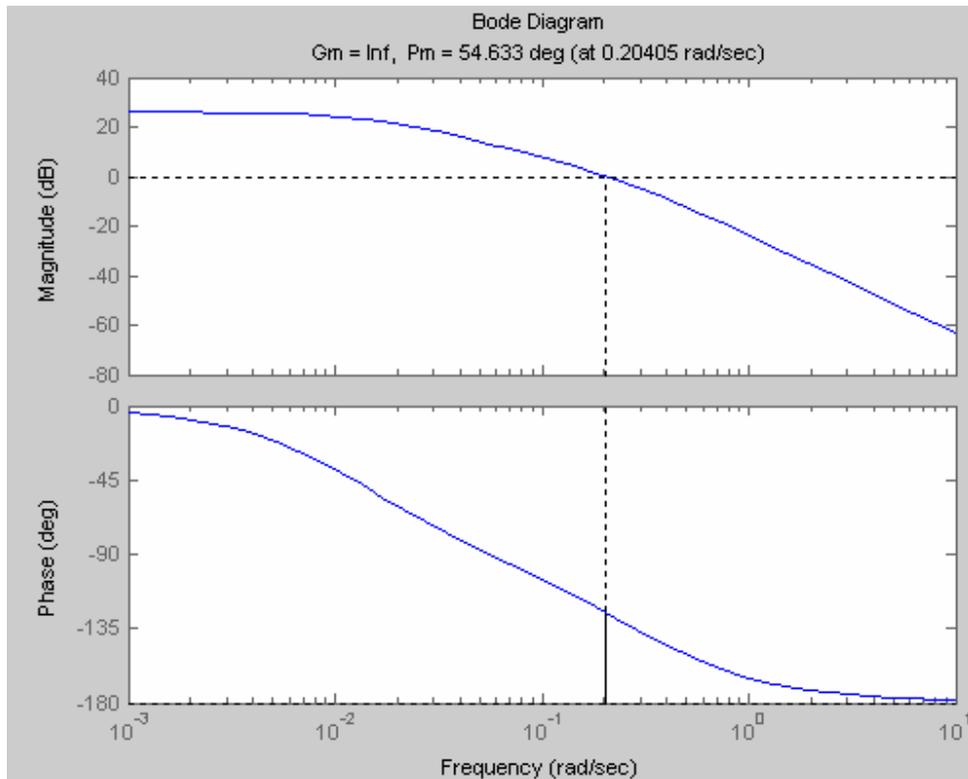
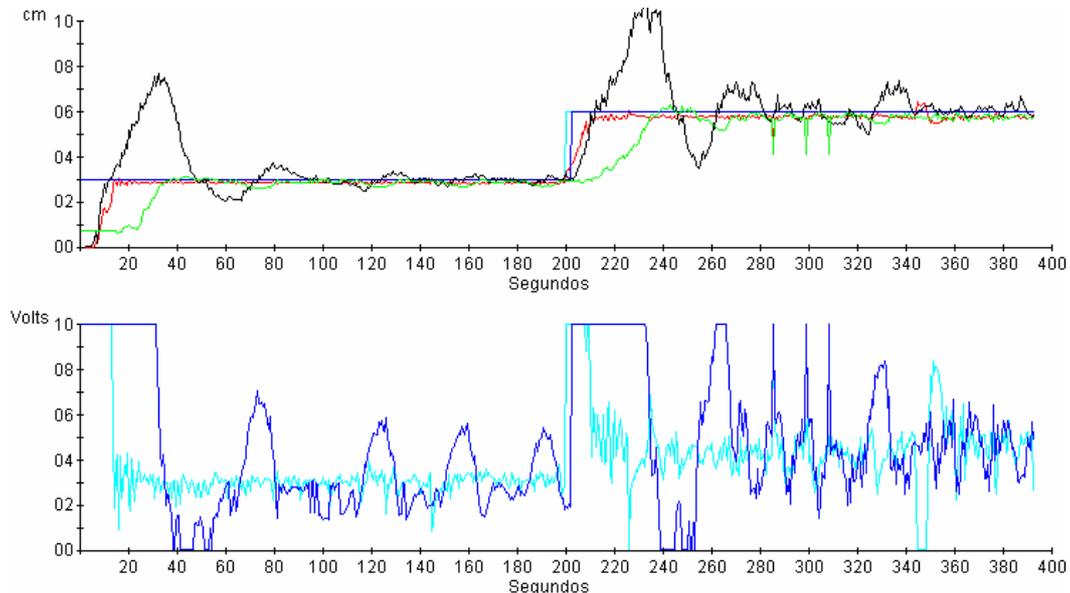


Figura 25 – Diagrama de Bode do Sistema Controlado em Avanço (Projeto experimental – Sistema Multivariável)

Com o intuito de validar experimentalmente o controlador projetado, observou-se a resposta ao degrau do sistema controlado em avanço. Esta resposta é visualizada na Figura 26 (curva verde).



**Figura 26 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado em Avanço (Projeto Experimental – Sistema Multivariável)**

Assim como na obtenção do modelo do sistema, utilizou-se o degrau entre os níveis 3cm e 6cm para obter as especificações do sistema controlado.

O degrau inicia em 2,9cm (referência). A resposta ao degrau se estabiliza em 5,8cm (2,9cm acima do nível inicial) e tem pico em 6,2cm (3,3cm acima do nível inicial). Portanto, o sobre-passo percentual é:

$$\%sp = 100 \cdot \frac{3,3 - 2,9}{2,9} = 14\%$$

O tempo de subida é:  $t_s = 20seg$

O coeficiente de amortecimento do sistema controlado é calculado a partir do sobre-passo percentual:

$$\%sp = 100 \cdot e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow \zeta = 0,53$$

O controlador foi projetado para obter um sistema com margem de fase de 50 graus, equivalente, no domínio do tempo, a um sobre-passo de 16% e um coeficiente de amortecimento de 0,5. Assim, os resultados encontrados foram coerentes e bastante satisfatórios.

Visando validar o funcionamento do sistema, foi realizado o mesmo procedimento utilizando o diagrama de Bode traçado no Matlab (Figura 23) a partir da função de transferência do sistema em malha aberta (18).

Os parâmetros do controlador, obtidos seguindo o procedimento descrito na seção 5.2, neste caso foram:

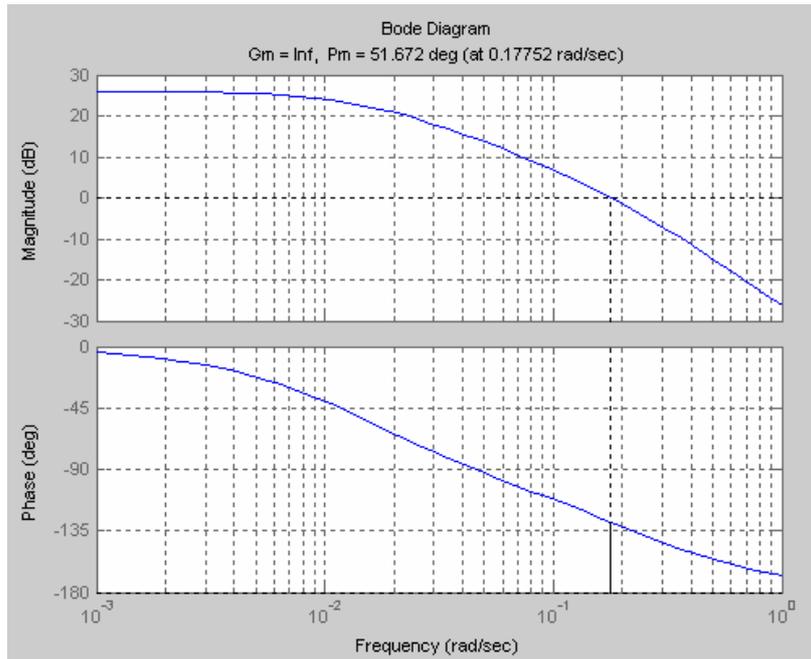
$$k_c = 91 ; T_1 = 10,66 ; T_2 = 4,37$$

As funções de transferência do controlador e do sistema controlado em malha fechada são:

$$G_c(s) = 91 \frac{10,66s + 1}{4,37s + 1} \quad (22)$$

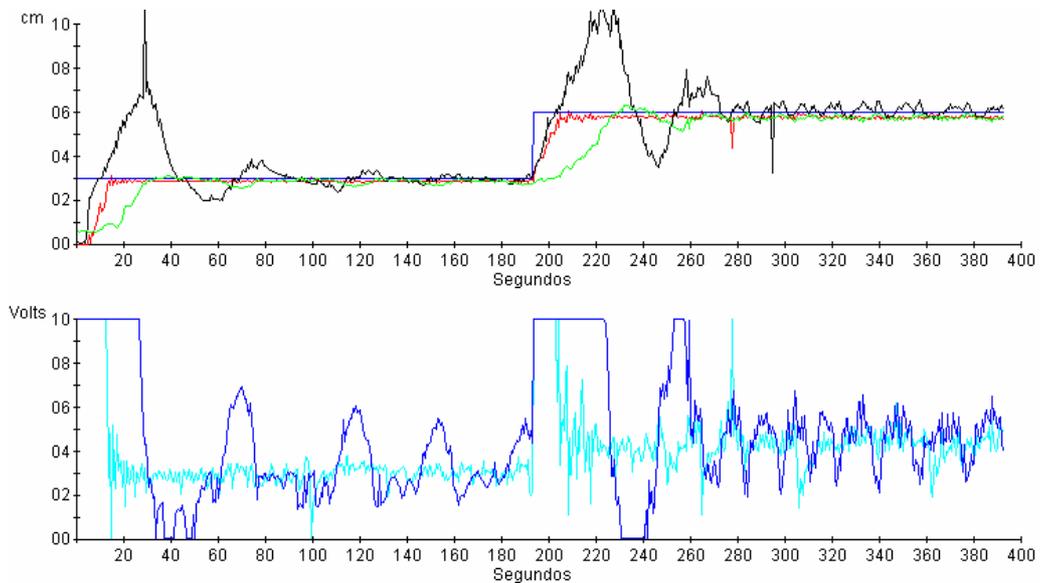
$$G_c(s)F_{MA}(s) = \frac{213,2s + 20}{4036s^3 + 1367s^2 + 91,84s + 1} \quad (23)$$

Levantando-se o diagrama de bode da função de malha aberta do sistema compensado obteve-se uma margem de fase de 51,672° e uma frequência de cruzamento com o eixo 0 db de 0,1775 rad/s, conforme apresentado na Figura 27 .



**Figura 27 – Diagrama de Bode do Sistema Controlado em Avanço (Projeto Teórico – Sistema Multivariável)**

Também foi observada a resposta ao degrau do sistema controlado por este controlador de avanço, obtendo a curva verde representada da Figura 28 .



**Figura 28 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado em Avanço (Projeto Teórico – Sistema Multivariável)**

O degrau entre os níveis 3cm e 6cm inicia em 2,8cm (referência). A resposta ao degrau se estabiliza em 5,7cm (2,9cm acima do nível inicial) e tem pico em 6,2cm (3,4cm acima do nível inicial).

Portanto, o sobre-passo percentual é:

$$\%sp = 100 \cdot \frac{3,4 - 2,9}{2,9} = 17\%$$

O tempo de subida é:  $t_s = 20\text{seg}$

O coeficiente de amortecimento do sistema controlado é calculado a partir do sobre-passo percentual:

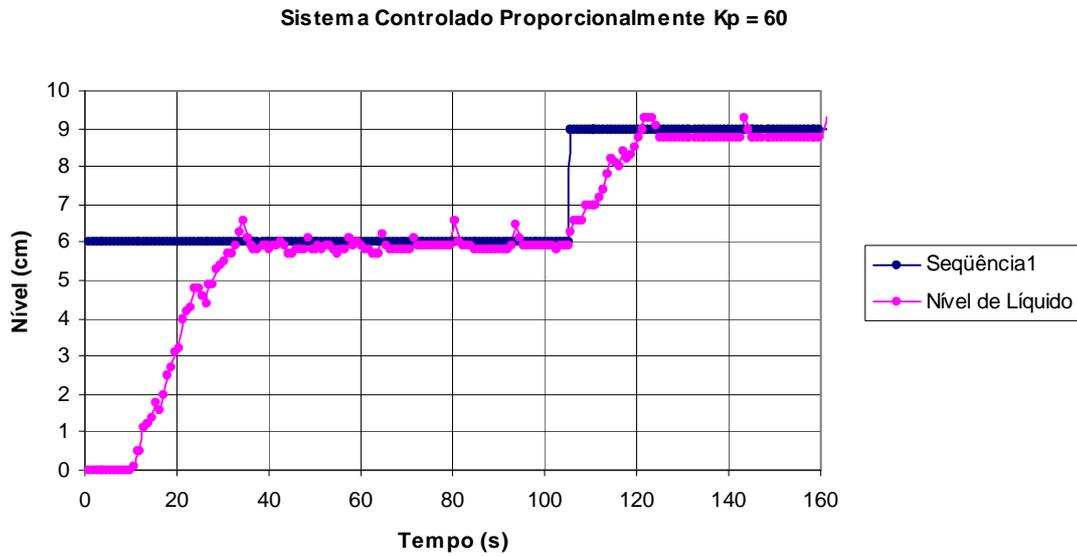
$$\%sp = 100 \cdot e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow \zeta = 0,49$$

Mais uma vez o sistema controlado apresenta um comportamento muito próximo ao especificado.

## 6.2. Resultados Obtidos no Sistema Escalar

### 6.2.1. Modelo Matemático Experimental do Sistema

Para a obtenção de uma função de transferência que representasse o sistema de nível de líquido de segunda ordem didático foi utilizado o mesmo método descrito na seção 6.1.1. Controlou-se o sistema proporcionalmente com ganho de 60 e observou-se a sua resposta a uma entrada degrau, obtendo assim os parâmetros da função de transferência em malha fechada. A curva obtida está representada na Figura 29.



**Figura 29 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado com  $k_p=60$  (Sistema Escalar)**

Desta curva, foram obtidos o ganho, o sobre-passo percentual e o tempo de subida do sistema em malha fechada.

$$A = \frac{2,8}{3,0} = 0,93$$

$$\%sp = 100 \cdot \frac{3,4 - 2,8}{2,8} = 21,4\%$$

$$t_s = t_{90\%} - t_{10\%} = 119 - 105 = 14s$$

A partir dos valores encontrados, é possível obter os parâmetros da função de transferência em malha fechada.

$$\%sp = 100 \cdot e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow \zeta = 0,44$$

$$t_s = \frac{\pi - \phi}{\omega_d} \Rightarrow \omega_n = 0,16$$

Assim, obteve-se a função de transferência do sistema em malha fechada:

$$F_{MF}(s) = \frac{0,0238}{s^2 + 0,141s + 0,0256}$$

O Diagrama de Bode desta função de transferência está representado na Figura 30 .

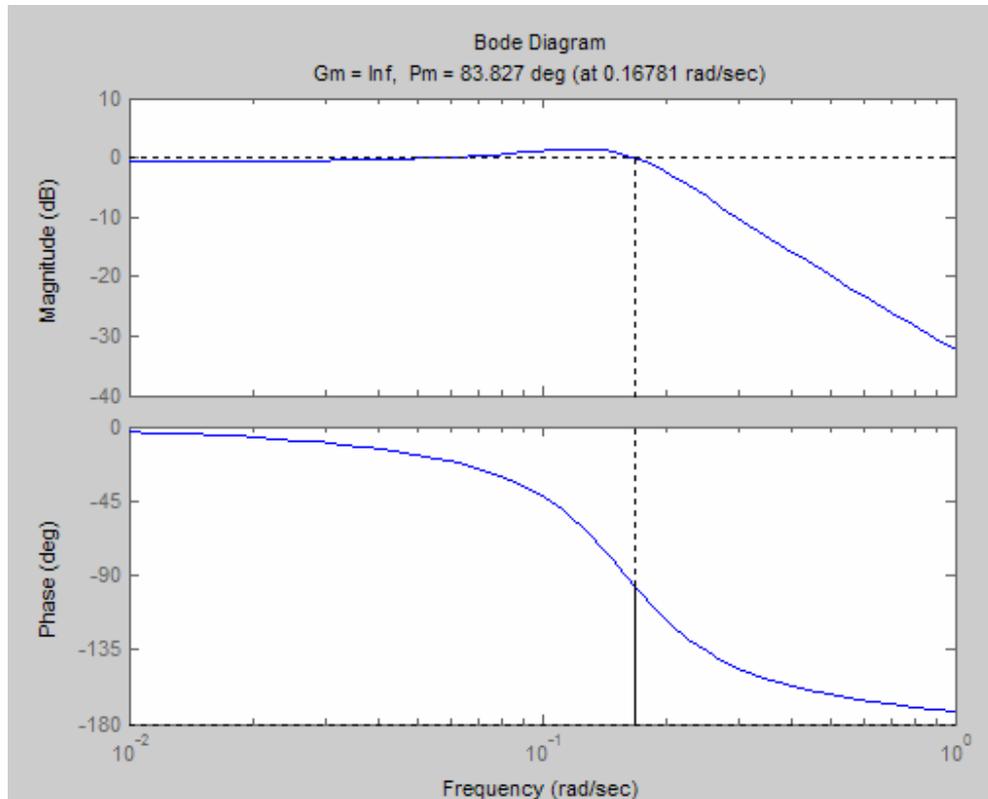


Figura 30 – Diagrama de Bode do Sistema de Malha Fechada (Sistema Escalar)

Partindo do valor de  $k_p$ , é possível encontrar os parâmetros  $k$ ,  $T_1$  e  $T_2$  da função de transferência do sistema de malha aberta, a partir da equação (16).

$$\begin{aligned} k &= 0,22 \\ T_1 &= 7,89 \\ T_2 &= 70,31 \end{aligned}$$

Assim, a função de transferência do sistema de nível de líquido de segunda ordem didático não-controlado é:

$$F_{MA}(s) = \frac{0,22}{(7,89s + 1)(70,31s + 1)} \quad (24)$$

### 6.2.2. Controle no Domínio da Frequência

Foi projetado um controlador de avanço a partir da função de transferência de malha aberta do sistema de nível de líquido de segunda ordem didático (24). Foi traçado o seu diagrama de Bode no MATLAB, a partir do qual foi feito o projeto do compensador.

Os parâmetros do controlador, obtidos seguindo o procedimento descrito na seção 5.2, neste caso foram:

$$k_c = 91 ; T_1 = 7,42 ; T_2 = 3,86$$

As funções de transferência do controlador e do sistema controlado em malha fechada são:

$$G_c(s) = 91 \frac{7,42s + 1}{3,86s + 1} \quad (25)$$

$$G_c(s)F_{MA}(s) = \frac{148,5s + 20,02}{2141s^3 + 856,5s^2 + 82,06s + 1} \quad (26)$$

Levantando-se o diagrama de bode da função de malha aberta do sistema compensado obteve-se uma margem de fase de  $53,152^\circ$  e uma frequência de cruzamento com o eixo 0 db de  $0,21082$  rad/s, conforme apresentado na Figura 31.

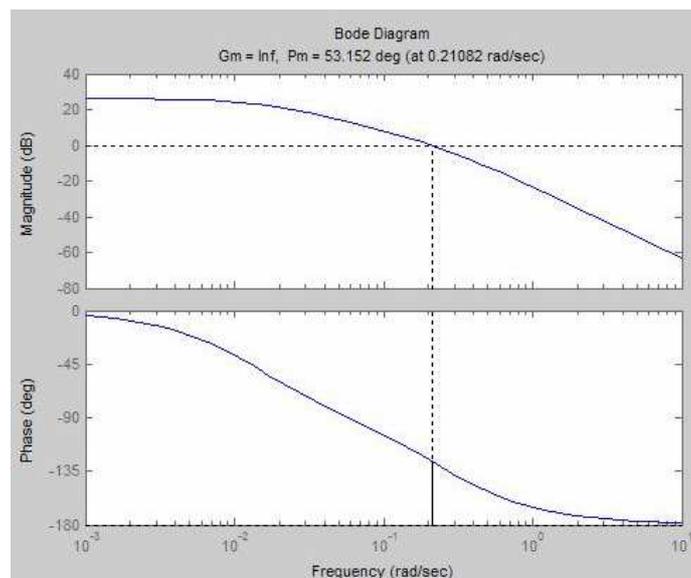
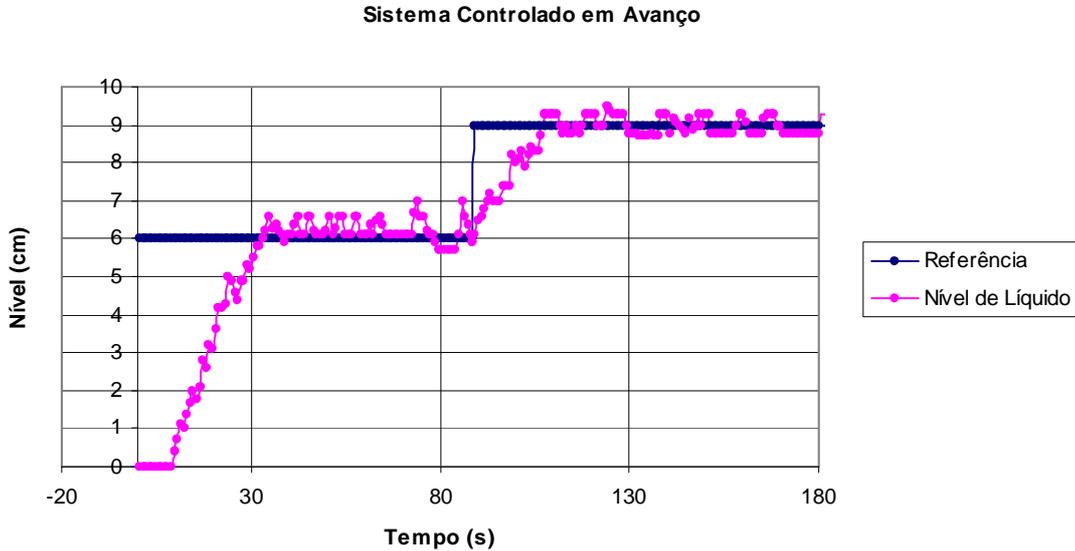


Figura 31 – Diagrama de Bode do Sistema Controlado em Avanço (Sistema Escalar)

A resposta ao degrau do sistema controlado pelo controlador de avanço projetado nesta seção está representada na Figura 32.



**Figura 32 – Resposta ao Degrau do Sistema Controlado em Avanço (Sistema Escalar)**

Foram encontrados os seguintes parâmetros para o sistema controlado:

$$\%sp = 100 \cdot \frac{3,3 - 2,9}{2,9} = 14\%$$

$$\%sp = 100 \cdot e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow \zeta = 0,53$$

Assim, pode-se concluir que o controlador projetado atendeu às especificações exigidas.

### 6.2.3. Validação do Funcionamento do Sistema

Com o intuito de validar o funcionamento do sistema implementado, verificando o comportamento do sistema de segunda ordem, de acordo com os resultados previstos para um sistema com sinais de entrada positivos ou negativos, foram levantadas as respostas do sistema à aplicação de sinais de entrada degrau de amplitudes positivas e negativas. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 33.

Degraus - Controlador Proporcional -  $K_p = 60$

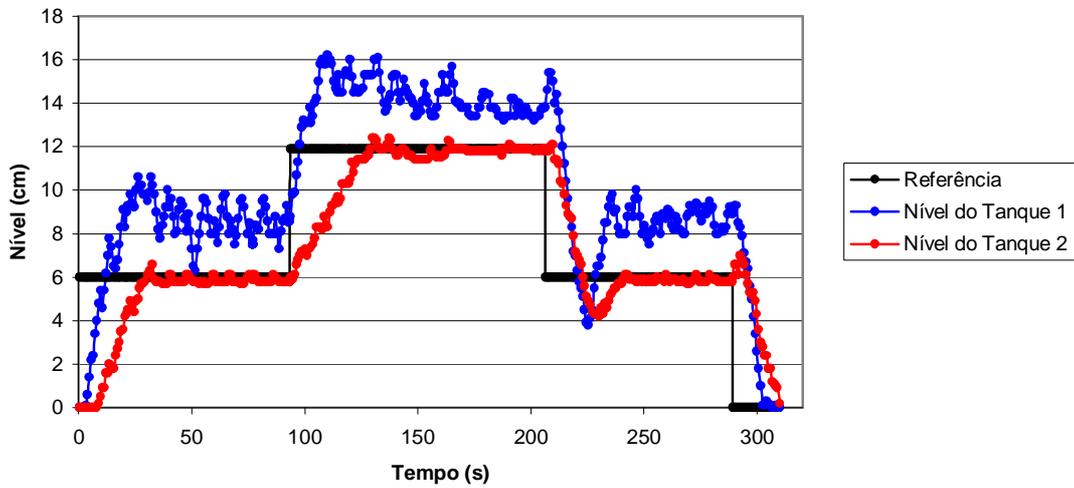


Figura 33 – Resposta do Sistema Escalar a Entradas Degrau de Amplitudes Positivas e Negativas

A Figura 34 apresenta os sinais PWM aplicados nos atuadores às entradas degrau representadas acima.

Acionamento das Bombas

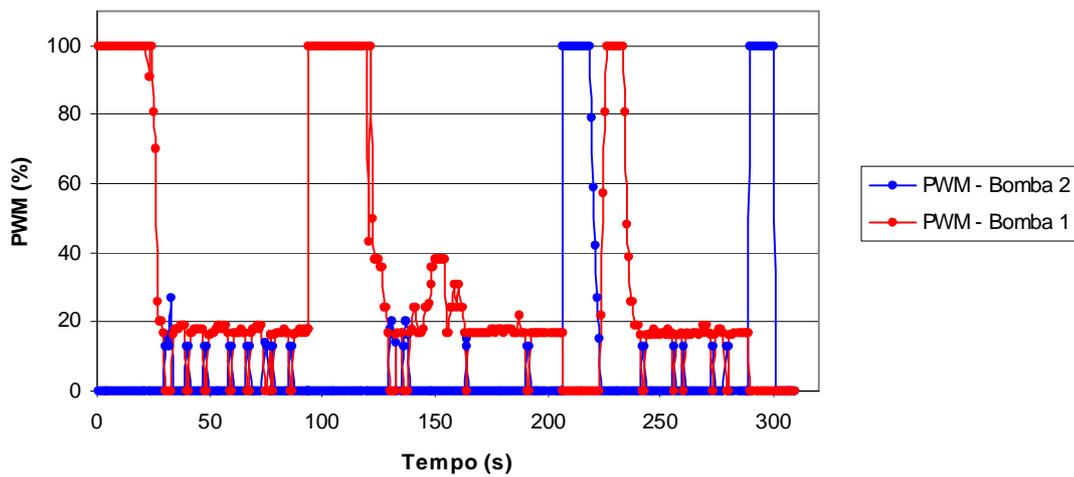
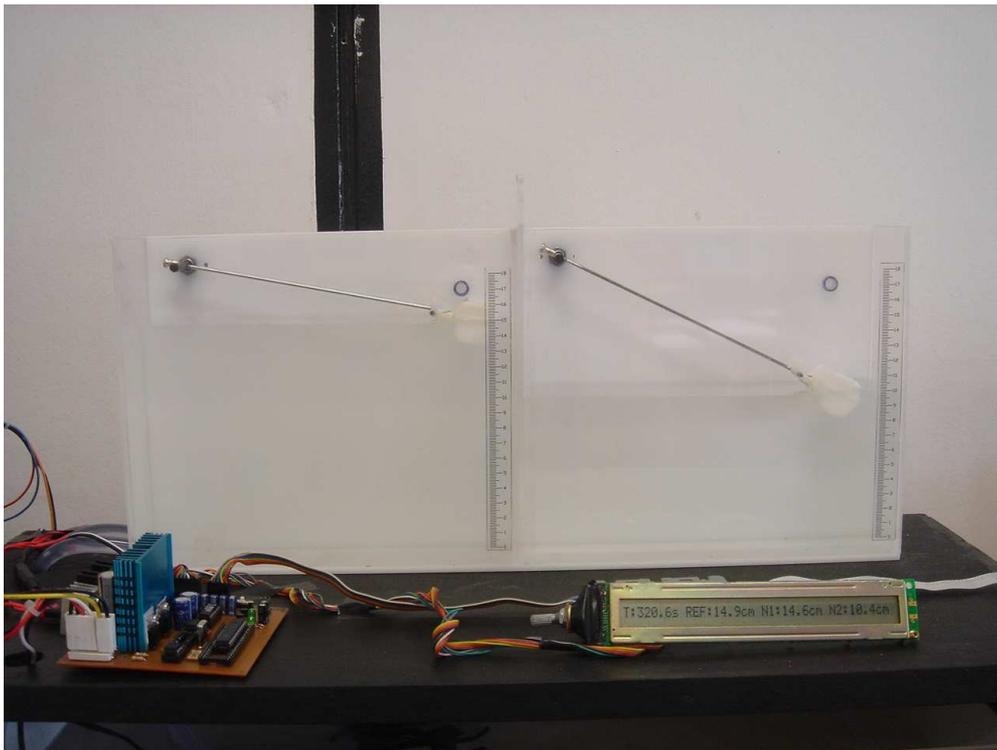


Figura 34 – Comportamento dos Sinais de PWM Aplicados nos Atuadores em Reposta a Entradas Degrau de Amplitudes Positivas e Negativas

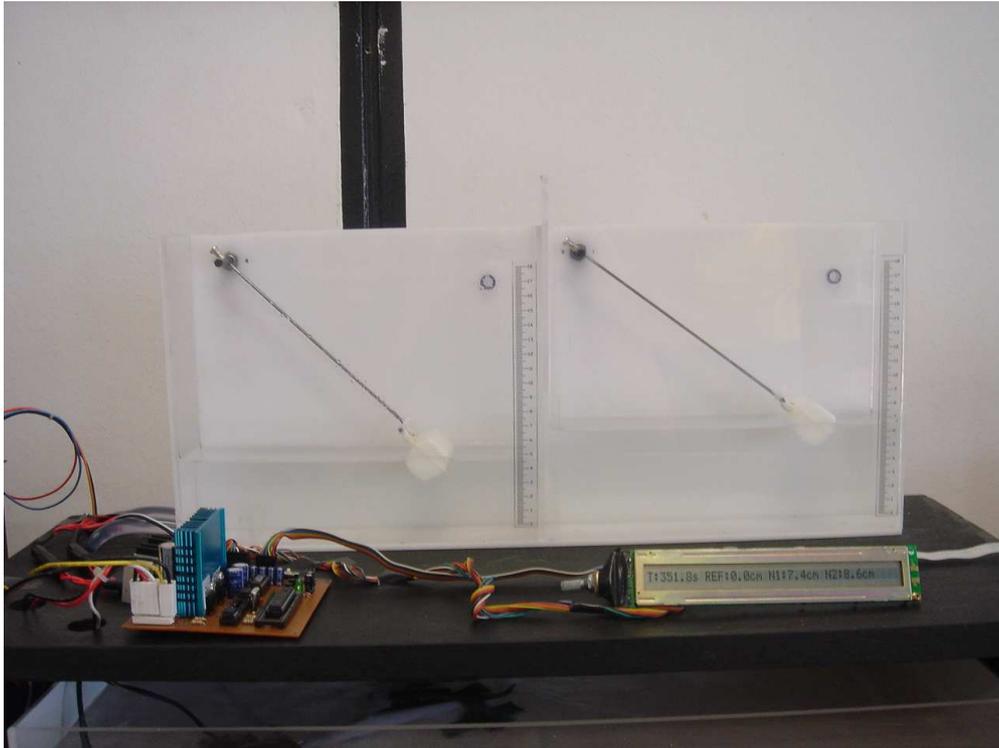
Observando o comportamento do sistema em resposta a sinais de entrada degrau com amplitudes positivas e negativas, verificam-se as características esperadas para um sistema de segunda ordem submetido a tal regime de funcionamento.

Pode-se observar que o sistema acompanha a referência aplicada na entrada, tanto no enchimento como no esvaziamento dos tanques, apresentando sobre-passos nos dois casos e uma estabilização satisfatória.

Outra característica esperada, de grande importância, foi a observação da inversão de diferença de nível entre os tanques na aplicação de sinais de entrada degrau com amplitude negativa. Esta inversão pode ser visualizada na Figura 33 nos instantes de cruzamento entre os níveis de líquidos nos tanques 1 e 2 durante a aplicação das entradas degrau negativas. Esta inversão pode ser observada também nas Figuras 35 e 36, que ilustram o sistema em funcionamento, em enchimento e esvaziamento, respectivamente.



**Figura 35 – Comportamento do Sistema em Funcionamento (Enchimento)**



**Figura 36 – Comportamento do Sistema em Funcionamento (Esvaziamento)**

Este comportamento observado no sistema implementado consiste em um dos principais objetivos deste projeto, visto que o sistema multivariável não apresentava tal característica, limitando o seu uso pelos usuários do sistema.

## 7. Conclusões e Perspectivas para Trabalhos Futuros

Inicialmente, os resultados do controle no domínio da frequência obtidos no sistema antigo validaram a implementação deste controle e do experimento elaborado. Foram obtidos resultados extremamente satisfatórios, comprovando a eficácia das técnicas de resposta em frequência. No primeiro semestre letivo de 2004, o experimento elaborado foi disponibilizado aos alunos de laboratório de Controle Dinâmico.

Neste trabalho foi projetado um novo sistema, com várias idéias novas, buscando trazer melhorias para os usuários do sistema de nível de líquido. Foram apresentadas várias soluções para problemas existentes no sistema anterior.

Este projeto foi implementado e pôde-se verificar a contribuição valiosa do trabalho. Dentre as melhorias no sistema, destacam-se a simplificação do sistema, a eliminação de válvulas e tubulações, a possibilidade de controle no esvaziamento dos tanques, a substituição do PC pelo microcontrolador PIC, o uso de sinal PWM para o acionamento dos atuadores e o uso de uma eletrônica mais robusta.

Os experimentos realizados com o sistema implementado forneceram resultados muito satisfatórios, visto que as especificações levantadas para a realização do experimento de controle no domínio da frequência foram atendidas e que o comportamento esperado do sistema foi verificado, evidenciando as melhorias pretendidas no projeto deste sistema.

Porém, deparou-se com uma dificuldade degradante do sistema. A falta de precisão dos sensores de nível de líquido consistem em uma limitação para a implementação de um controle eficaz do sistema, e conseqüentemente para o uso do sistema em laboratório. Sugere-se aqui um estudo da viabilidade da utilização de outros tipos de sensores que melhor venham a se adequar às características de funcionamento do sistema.

O sistema implementado também não conseguiu eliminar um inconveniente do sistema multivariável pré-existente. Os atuadores, quando em funcionamento, produzem um elevado ruído que, embora tenha sido reduzido, continua trazendo incômodo sonoro. No decorrer do trabalho estudou-se a possibilidade de substituir os atuadores atuais por bombas de aquário, silenciosas e submersas. No entanto, por tratarem-se de motores de

indução (e não motores de corrente contínua), exigiam o desenvolvimento de um inversor de frequência, feito inviável considerando o prazo para o término do trabalho quando a possibilidade foi levantada. Sugere-se para trabalhos futuros a substituição dos atuais motores por atuadores que não apresentem os inconvenientes evidenciados.

Os objetivos deste trabalho foram portanto atingidos, visto que o sistema foi implementado e apresentou respostas temporais satisfatórias. Ainda assim, existem possibilidades de aprimoramento deste projeto, visando um uso mais eficaz do sistema, como as sugeridas acima.

## 8. Referências Bibliográficas

[1] BAUCHSPIESS, A. - *Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes* - [on-line] URL: <http://www.ene.unb.br/lavsi>

[2] GOSMANN, H. L. - *Um Sistema Multivariável de Tanques Acoplados para Avaliação de Técnicas de Controle* - Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2002.

[3] FREITAS, A. A. de – *Arquitetura de Laboratório Remoto com Banco de Dados e Controle no Espaço de Estados* – Trabalho de Graduação, Universidade de Brasília – UnB, Dezembro de 2003.

[4] FRANKLIN, G. F. , POWELL, J. D. , WORKMAN, M.L. – *Digital Control of Dynamic Systems* – 3<sup>rd</sup> Edition, Addison-Wesley Ed. , MA, 1998.

[5] OGATA, K. - *Engenharia de Controle Moderno* - 3<sup>a</sup> Edição, Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

[6] PEREIRA, F. – *Microcontroladores PIC – Programação em C* – 1<sup>a</sup> Edição, Ed. Érica, São Paulo, Brasil, 2003.

[7] MICROCHIP – *PIC18F252 Datasheet* – Microchip Technology, 2001.

[8] <http://www.olimex.com/dev>

[9] <http://www.ic-prog.com>

## Apêndice I: Cálculos dos Projetos de Controladores

### Projeto do Controlador de Avanço para o Sistema Multivariável (Referente à seção 6.1.2)

Deseja-se obter um sistema com erro em regime permanente menor que 0,05 e uma margem de fase de aproximadamente 50 graus.

1. De modo a satisfazer a condição de erro em regime permanente, obteve-se um ganho  $k_p = 20$ .

2. O ganho  $k$  do sistema em malha aberta é de 0,22. Assim, o ganho do controlador de avanço é:

$$k_c = \frac{k_p}{k} = 91$$

3. Ao multiplicar a função de malha aberta pelo ganho do controlador, desloca-se verticalmente o gráfico de magnitude do diagrama de bode do sistema, levando este a apresentar margem de fase. Neste caso, o diagrama de magnitude é deslocado de 40dB para cima. Portanto, o eixo -40dB passa a ser o eixo 0dB. Assim, tem-se:

$$MF = 180 - 152,4 = 27,6^\circ$$
$$\omega_g = 0,125 \text{ rad/s}$$

4. Para obter um sistema controlado com margem de fase igual a 50 graus, deve-se introduzir um avanço de fase  $\phi$ :

$$\phi = (50^\circ - 27,6^\circ) + 10^\circ = 32,4^\circ$$

5. Assim, de (11), obtém-se o fator de atenuação do controlador:

$$\alpha = 0,30$$

6. Portanto, o valor do ganho em dB que levaria à nova frequência de cruzamento com a reta de 0dB do sistema compensado é:

$$|G(j\omega_c)| = -\frac{1}{\sqrt{\alpha}} = -1,83 \text{ db}$$

7. A frequência de cruzamento  $\omega_c$  é então aproximadamente:

$$\omega_c = 0,145 \text{ rad/s}$$

8. Por último, são obtidos, a partir das equações (12) e (13), os valores do zero e do pólo do controlador

$$T_1 = 12,59 ; T_2 = 3,78$$

### **Projeto do Controlador de Avanço para o Sistema Escalar (Referente à seção 6.2.2)**

Deseja-se obter um sistema com erro em regime permanente menor que 0,05 e uma margem de fase de aproximadamente 50 graus.

1. De modo a satisfazer a condição de erro em regime permanente, obteve-se um ganho  $k_p = 20$ .

2. O ganho  $k$  do sistema em malha aberta é de 0,22. Assim, o ganho do controlador de avanço é:

$$k_c = \frac{k_p}{k} = 91$$

3. Ao multiplicar a função de malha aberta pelo ganho do controlador, desloca-se verticalmente o gráfico de magnitude do diagrama de bode do sistema, levando este a apresentar margem de fase. Neste caso, o diagrama de magnitude é deslocado de 40dB para cima. Portanto, o eixo -40dB passa a ser o eixo 0dB. Assim, tem-se:

$$MF = 41,56^\circ$$

$$\omega_g = 0,16967 \text{ rad}; s$$

4. Para obter um sistema controlado com margem de fase igual a 50 graus, deve-se introduzir um avanço de fase  $\phi$ :

$$\phi = (50^\circ - 41,56^\circ) + 10^\circ = 18,44^\circ$$

5. Assim, de (11), obtém-se o fator de atenuação do controlador:

$$\alpha = 0,52$$

6. Portanto, o valor do ganho em dB que levaria à nova frequência de cruzamento com a reta de 0dB do sistema compensado é:

$$|G(j\omega_c)| = -\frac{1}{\sqrt{\alpha}} = -1,39 \text{ db}$$

7. A frequência de cruzamento  $\omega_c$  é então aproximadamente:

$$\omega_c = 0,187 \text{ rad/s}$$

8. Por último, são obtidos, a partir das equações (12) e (13), os valores do zero e do pólo do controlador

$$T_1 = 7,42 ; T_2 = 3,86$$

## Apêndice II: Roteiro elaborado para o experimento de controle no domínio da frequência



Universidade de Brasília  
Departamento de Engenharia Elétrica  
160032 - Controle Dinâmico 2º/2003 - Laboratório

### Experimento 7

#### Domínio da Frequência - Compensador Avanço de Fase (Sistema de Nível de Líquido de 2ª Ordem)

##### Objetivo:

Este experimento tem como objetivo a aplicação prática do controle no domínio da frequência. O aluno deverá obter e analisar o diagrama de Bode do sistema de Nível de Líquido do LAVSI para a operação em torno de um nível médio e considerando a saturação do atuador. Com base nestes dados, deverá ser projetado um controlador de avanço de modo a atender às especificações de desempenho desejadas.

##### Introdução:

Pelo termo resposta em frequência entende-se a resposta em regime estacionário de um sistema submetido a um sinal de entrada senoidal. Nos métodos de resposta em frequência, varia-se a frequência do sinal de entrada ao longo de uma faixa de interesse e estuda-se a resposta resultante. No caso do Sistema de Nível de Líquido aqui estudado, esta análise limita-se a frequências muito baixas, devido ao fato do sistema operar em malha aberta ao esvaziar os tanques.

Nos experimentos anteriores, foi estudado um tipo de controlador muito utilizado, o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). A compensação de sistemas dinâmicos também pode ser realizada pela utilização de compensadores de avanço e de atraso. Mais uma vez, para poder utilizar esta técnica de controle, é necessário que o sistema seja operado em torno de um ponto de operação e que a amplitude dos sinais seja tal que não ocorra saturação dos atuadores, para que o sistema possa ser considerado linear.

Para obter uma resposta transitória satisfatória, faz-se uso de compensadores de avanço. Já compensadores de atraso são eficazes quando visa-se melhorar a resposta em regime permanente do sistema. Também podem ser projetados e implementados compensadores compostos de dois avanços ou de um avanço e um atraso, dependendo das especificações a serem atingidas. Neste experimento, será utilizado apenas o compensador de avanço simples.

Controladores de avanço podem ser projetados seguindo dois métodos: pelo método do lugar das raízes, no qual o projeto é realizado a partir de parâmetros tais como coeficiente de amortecimento, tempo de subida, sobre-passo, coeficiente de erro em regime permanente, etc. O segundo método, que será utilizado neste experimento,

consiste no projeto no domínio da frequência. Neste caso, o projeto visa atender especificações definidas pelas margens de fase e de ganho. Este método tem como principal vantagem não necessitar da função de transferência do sistema. Apenas com a resposta em frequência do sistema é possível projetar um controlador de avanço que atenda às especificações desejadas.

Um controlador de avanço ou de atraso é composto por um pólo e um zero, dispostos de maneira a compensar eficientemente o sistema. Tais controladores podem ser representados pela seguinte função de transferência:

$$G_c(s) = k_c \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1}$$

onde  $-1/\tau_1$  é o zero do compensador e  $-1/\tau_2$  é o pólo. Caso o pólo esteja mais afastado da origem do que o zero ( $\tau_1 > \tau_2$ ), trata-se de um compensador de avanço.

### Descrição do experimento:

Neste experimento será utilizado o sistema de segunda ordem, que faz uso dos tanques 2 e 3. Este sistema já foi estudado nos experimentos anteriores.

Primeiramente, deverá obter-se o Diagrama de Bode para o sistema de segunda ordem em malha aberta. Utilizar um controlador proporcional de ganho 20 (controlador na frequência com as seguintes especificações:  $k_c = 20, \tau_1 = \tau_2$ ) e como sinal de teste um sinal senoidal de amplitude 1 em torno de 6cm. Obter a resposta do sistema para as seguintes frequências: 0,004Hz, 0,006Hz, 0,010Hz, 0,015Hz e 0,020Hz. Para cada frequência, obter o ganho e a defasagem para o sistema de malha fechada. A partir destes dados, obter o ganho e a defasagem em cada frequência para o sistema em malha aberta.

$$F(s) = \frac{k_c G(s)}{1 + k_c G(s)}$$

$$F(j\omega) = \frac{k_c G(j\omega)}{1 + k_c G(j\omega)}$$

Para cada frequência,  $F(j\omega)$  e  $G(j\omega)$  são números complexos e podem ser expressos na forma  $\text{Re} + j \text{Im}$ . Assim:

$$c + jd = \frac{k_c(a + jb)}{1 + k_c(a + jb)} \Rightarrow a + jb = \frac{c + jd}{k_c[1 - (c + jd)]}$$

Esboçar então o Diagrama de Bode para o sistema.

Projetar um controlador de avanço ou atraso de modo que:

- Erro em regime permanente:  $e_{ss} = \frac{1}{1 + k_c G(0)} < 0,05$

- Margem de Fase: MF = 50°

Introduzir os parâmetros do controlador projetado ( $k_c, \tau_1 e \tau_2$ ) e verificar a resposta no domínio do tempo do sistema controlado. Utilizar como sinal de teste: Onda quadrada,  $\pm 1$ cm em torno de 5cm, 0,008Hz. Manter a referência em 0 para o

primeiro tanque. (Obs: Utilizar apenas as transições de subida). Devem ser obtidos, aproximadamente, os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de amortecimento:  $\zeta = 0,5$
- Sobre-passo:  $\%SP = 16\%$

A partir da função de transferência do sistema controlado (obtida a partir da função de transferência do sistema em malha aberta obtida nos experimentos anteriores e do controlador projetado), traçar no Matlab o diagrama de bode do sistema em malha fechada. Verificar, no domínio da frequência, a validade do controlador projetado.

Relatório:

O relatório deverá conter:

- Diagrama de Bode experimental do sistema de 2<sup>a</sup> ordem em malha aberta.
- Projeto do compensador, obtendo o ganho e a posição do zero e do pólo.
- Resposta ao degrau do sistema controlado. Assinalar o tempo de subida e sobre-passo.
- Diagrama de bode (teórico) do sistema controlado.

### Apêndice III: Programa de Controle

```

/*****
/*
/*          UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
/*          DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
/*          LABORATÓRIO DE AUTOMAÇÃO, VISÃO E SISTEMAS INTELIGENTES
/* PROJETO : SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS DE 2ª ORDEM DIDÁTICO COM
/* MICROCONTROLADOR PIC 18F252 - EXPERIMENTOS DE CONTROLE
/* NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA
/*
/* ORIENTADOR : ADOLFO BAUCHSPIESS
/* ALUNOS : RAFAEL GUIMARÃES DA R. MENDES E SANDRO TAMAYO
/*
/*PROGRAMA CONTROLA_TANQUES: PROGRAMA DE CONTROLE DO SISTEMA DE NÍVEL
/*DE LÍQUIDOS DE SEGUNDA ORDEM, TAMBÉM DESENVOLVIDO NESTE MESMO PROJETO*/
/* - REALIZA CONVERSÃO A/D DOS SENSORES DE LEITURA DE NÍVEL DOS TANQUES;*/
/* - CONTROLA ATUADORES DE ENCHIMENTO E ESVAZIAMENTO DO SISTEMA;
/* - IMPLEMENTA CONTROLADORES:
/*
/*          * PROPORCIONAL;
/*          * PROPORCIONAL-INTEGRAL;
/*          * PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO;
/*          * NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (AVANÇO-ATRASO);
/*
/* BASEADO NOS ORIGINAIS DE RONALDO DE JESUS SANTOS E HUGO GOSMANN
*****/

```

```

#include <18f252.h>
#define adc=10
#include <delay.h>
#include <fuses.h>
#include <rs232.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <mod_lcd2.c>
#include <priority_timer1.h>

```

```

// FUNÇÕES UTILIZADAS NO PROGRAMA PARA GERAR REFERÊNCIA E SINAL DE
CONTROLE

```

```

float senooidal();

```

```

float quadrada ();

```

```

float triangular ();

```

```

void controle();

```

```

void referencia();

```

```

//DEFININDO VARIÁVEIS E CONSTANTES GLOBAIS DO PROGRAMA

```

```

BOOLEAN ESTADO = FALSE, MUDOU = FALSE, RECEBENDO = FALSE;
INT PWM1 = 0, PWM2 = 0, AUXT1=0, AUXT0=0, TCON = 0, TREF = 0;
INT ORDEM = 1, AUX = 0, CONTROLADOR = 0, ONDA = 0, ESCREVEU = 0;
INT16 CONT=0, TEMPO_0=0, TEMPO_1=0;
FLOAT N1 = 0, N2 = 0, TEMPO = 0, N1A = 0, N2A = 0;
FLOAT ADC1, ADC2, ADC13, ADC14, ADC12, ADC22, ADC23, ADC24;
FLOAT PARC1 = 0, PARC2 = 0, PARC3 = 0, PARR1 = 0, PARR2 = 0, PARR3 = 0;
FLOAT U = 0, UA1 = 0, CONT1 = 0, CONT2 = 0, CONT3 = 0;
FLOAT ERROA2 = 0, ERROA1 = 0, ERRO = 0, AMP = 0, OFFSET = 0, FREQ = 0;
FLOAT REF = 0;
CHAR TEMP[20]={0};

// LE OS CANAIS ANALOGICOS, OBTENDO OS NÍVEIS DE CADA TANQUE PELA CALIBRAÇÃO

void LE_NIVEL()
{
    FLOAT Nx1 = 0, Nx2 = 0;

    SET_ADC_CHANNEL(0); // SETA CONVERSOR A/D PARA LEITURA DO CANAL 0
    DELAY_US(30); // AGUARDA CARGA DO CAPACITOR
    ADC1 = (FLOAT)READ_ADC(); // CONVERTE PARA INTEIRO E CALCULA
    ADC12 = ADC1 * ADC1; // (ADC1)^2 E (ADC1)^3
    ADC13 = ADC12 * ADC1; // POLINÔMIO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES
    Nx2 = (0.00000000017461 * ADC13 + 0.00002310104326 * ADC12 - 0.00204546754186 * ADC1 -
        0.73105643567369);

    SET_ADC_CHANNEL(1);
    DELAY_US(30);
    ADC2 = (FLOAT)READ_ADC();
    ADC22 = ADC2 * ADC2;
    ADC23 = ADC22 * ADC2;
    Nx1 = (0.00000000367814 * ADC23 + 0.00002410499612 * ADC22 - 0.00826710199563 *
        ADC2 - 1.44258336304874);

    N1A = N1;
    N2A = N2;

    IF (Nx1 > (N1A + 0.2)) N1 = N1A + 0.2;
    ELSE IF (Nx1 < (N1A - 0.2)) N1 = N1A - 0.2;
    ELSE N1 = Nx1;
    IF (Nx2 > (N2A + 0.2)) N2 = N2A + 0.2;
    ELSE IF (Nx2 < (N2A - 0.2)) N2 = N2A - 0.2;
    ELSE N2 = Nx2;
    IF (N1 <= 0) N1 = 0;
    IF (N2 <= 0) N2 = 0;
}

//ROTINA DE TRANSMISSÃO DE DADOS PARA O SERVIDOR E ESCRITA NO DISPLAY LCD

VOID ESCREVE()
{
    // ENVIA PARA O SERVIDOR
    PRINTF ("%03.1f %02.1f %02.1f %02.1f %03u %03u\n", TEMPO, REF, N1, N2, PWM1, PWM2);
}

```

```

// ESCREVE NO LCD
    PRINTF (LCD_ESCREVE, "\fT:%03.1fs REF:%02.1Fcm N1:%02.1Fcm N2:%02.1Fcm", TEMPO,

    REF, N1, N2);

}
// RECEBE PARAMETROS DE CONTROLE

void REC_PAR()
{
    GETS(TEMP);
    ORDEM=atoi(TEMP); // RECEBE ORDEM DO SISTEMA (1ª OU 2ª ORDEM)

    GETS(TEMP);
    TCON=atoi(TEMP); // RECEBE TIPO DE CONTROLE (P, PI, PID OU AVANÇO-ATRASSO)

    GETS(TEMP);
    PARC1=atof(TEMP); // PARÂMETRO DE CONTROLE 1

    GETS(TEMP);
    PARC2=atof(TEMP); // PARÂMETRO DE CONTROLE 2

    GETS(TEMP);
    PARC3=atof(TEMP); // PARÂMETRO DE CONTROLE 3

    DISABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER1);
    GETS(TEMP);
    TREF=atoi(TEMP); // RECEBE TIPO DE REFERÊNCIA (DEGRAU, QUADRADA,

    TRIANGULAR OU SENOIDAL)

    GETS(TEMP);
    PARR1=atof(TEMP); // PARÂMETRO DE REFERÊNCIA 1

    gets(TEMP);
    PARR2=atof(TEMP); // PARÂMETRO DE REFERÊNCIA 2

    GETS(TEMP);
    PARR3=atof(TEMP); // PARÂMETRO DE REFERÊNCIA 3

    RECEBENDO = FALSE;
    ENABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER0);
    ENABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER1);
}

// LÊ ENTRADA SERIAL

void LER_SERIAL()
{
    GETS(TEMP);
    AUX=atoi(TEMP); // RECEBE PRÓXIMA AÇÃO
    PRINTF(LCD_ESCREVE, "\fCHEGOU DADO DO SERVIDOR");

    SWITCH(AUX) // SELECIONA QUAL MODO HABILITAR

```

```

{
CASE 3 :                                // TERMINA PROCESSO
ESTADO = FALSE;
DISABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER1);
CONT=0;
TEMPO=0;
PARC1=0;
PARC2=0;
PARC3=0;
PARR1=0;
PARR2=0;
PARR3=0;
ERROA2=0;
ERROA1=0;
ERRO=0;
AMP=0;
OFFSET=0;
FREQ=0;
REF=0;
U = 0;
UA1 = 0;
PWM1 = 0;
PWM2 = 0;
N1 = 0;
N2 = 0;
SET_PWM1_DUTY (PWM1);
SET_PWM2_DUTY (PWM2);
PRINTF(LCD_ESCREVE, "\fPIC AGUARDANDO PARAMETROS DO CONTROLADOR ");
BREAK;

CASE 2 :                                // ALTERA PARAMETROS DE CONTROLE
REC_PAR();
MUDOU = TRUE;
BREAK;

CASE 1 :                                // INICIA PROCESSO DE CONTROLE
ESTADO = TRUE;
REC_PAR();
TEMPO = 0;
MUDOU = TRUE;
ENABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER1);
BREAK;

DEFAULT :
PRINTF(LCD_ESCREVE, "\fOPÇÃO DE AÇÃO INVÁLIDA: %u", AUX);
BREAK;
}
}

// ROTINA TRATAMENTO DE INTERRUPTÃO DO TIMER 0 => TEMPO E ESCRITA

#INT_TIMER0
VOID TRATA_T0()
{
SET_TIMER0(256-GET_TIMER0());
TEMPO_0++;
}

```

```

IF (TEMPO_0 >= 500)
{
    TEMPO_0 = 0;
    IF (RECEBENDO)
    {
        PRINTF(LCD_ESCREVE, "\fRECEBENDO PARAMENTROS DO CONTROLADOR");
        DISABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER0);
    }

    ELSE IF (ESTADO) ESCREVE();

    ELSE
    {
        PRINTF(LCD_ESCREVE, "\fAGUARDANDO PARAMETROS DO CONTROLADOR");
        DISABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER0);
    }
}
}

```

```
// ROTINA TRATAMENTO DE INTERRUPÇÃO DO TIMER 1 => CONTROLE
```

```

#INT_TIMER1
VOID TRATA_T1()
{
    SET_TIMER1(53036-GET_TIMER1());
    TEMPO_1++;
    IF (TEMPO_1 >=20)
    {
        TEMPO_1 = 0;
        TEMPO+=0.2;
        ERROA2 = ERROA1;
        ERROA1 = ERRO;
        REFERENCIA();
        LE_NIVEL();

        IF (ORDEM == 1) ERRO = REF - N1;
        ELSE ERRO = REF - N2;

        CONTROLE();
    }
}

```

```
// ROTINA PRINCIPAL DO PIC
```

```

void main()
{
    lcd_ini();
    delay_ms(500);
}

```

```

SETUP_TIMER_0(RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_64 | RTCC_8_BIT);
SETUP_TIMER_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);
SET_TIMER0(256);
SET_TIMER1(53036);

ENABLE_INTERRUPTS(GLOBAL);
ENABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER0);

SETUP_ADC(ADC_CLOCK_DIV_8);
SETUP_ADC_PORTS(RA0_RA1_ANALOG_RA3_RA2_REF);

SETUP_TIMER_2 (T2_DIV_BY_16, 100, 16);
SETUP_CCP1 (CCP_PWM);
SETUP_CCP2 (CCP_PWM);
SET_PWM1_DUTY (0);
SET_PWM2_DUTY (0);

PRINTF(LCD_ESCREVE, "\f PIC AGUARDANDO PARAMETROS DO CONTROLADOR");
DELAY_MS(1000);

WHILE(TRUE)
{
    LER_SERIAL();
}
}

// FUNÇÕES DE REFERÊNCIA

FLOAT SENOIDAL()
{
    FLOAT AUX_SIN;
    AUX_SIN = 2 * 3.14159 * FREQ * TEMPO;

    IF (AUX_SIN > 6.2832) RETURN (AMP * SIN(6.2832 * FMOD(AUX_SIN, 6.2832)) + OFFSET);
    ELSE RETURN (AMP * SIN(AUX_SIN) + OFFSET);
}

FLOAT QUADRADA ()
{
    LONG INT TEMPQ, QUAD;
    TEMPQ = CEIL(TEMPO);
    QUAD = 2 * FREQ * TEMPQ;           // NÚMERO DE SEMI-PERÍODOS
    IF ((QUAD % 2) == 0)              // SE PAR
        RETURN (OFFSET - AMP);
    ELSE                               // SE IMPAR
        RETURN (OFFSET + AMP);
}

FLOAT TRIANGULAR ()
{
    LONG INT TEMPO_TRI;
    LONG INT TRI;
    TEMPO_TRI = TEMPO;
    TRI = FREQ * TEMPO_TRI;           // NÚMERO DE SEMI-PERÍODOS
    IF (TRI > 0)

```

```

    TEMPO_TRI = TEMPO_TRI - (TRI / FREQ);          // CORRIGE TEMPO_TRI DE ACORDO
    COM A DEFINIÇÃO
    IF ((TRI % 2) == 0)                            // SE PAR
        RETURN ((-2 * AMP * FREQ * TEMPO_TRI + AMP) + OFFSET);
    ELSE                                           // SE IMPAR
        RETURN ((2 * AMP * FREQ * TEMPO_TRI - AMP) + OFFSET);
}

VOID CONTROLE()
{
    INT32 PWM_1 = 0, PWM_2 = 0;

    IF(MUDOU)
    {
        CONTROLADOR = TCON;
        SWITCH(CONTROLADOR)                      // CÁLCULO DOS PARÂMENTROS DE CONTROLE
        {                                         // ECONOMIZA TEMPO COMPUTACIONAL NO CICLO
            CASE (1):                             // DE CONTROLE
                CONT1 = PARC1 + (0.2 * PARC2) + (PARC3 / 0.2);
                IF (PARC2 != 0) CONT2 = 10 * PARC2 - PARC1;
                ELSE CONT2 = 0;
                CONT3 = 10 * PARC2;
                MUDOU = FALSE;
                BREAK;

            CASE (2):
                IF (PARC2 == 0) PARC2 = 0.000000001;
                IF (PARC3 == 0) PARC3 = 0.000000001;

                CONT1 = EXP(-0.2 / PARC3);
                CONT2 = (PARC1 + 1 - (PARC3 / PARC2));
                CONT3 = PARC1 * CONT1;
                BREAK;
        }
    }

    UA1 = U;

    SWITCH(CONTROLADOR)
    {
        CASE (1):                                 // CONTROLE P, PI OU PID

            U = UA1 + (CONT1 * ERRO) + (CONT2 * ERROA1) + (CONT3 * ERROA2);

            BREAK;

        CASE (2):                                 // CONTROLE AVANÇO-ATRASSO

            U = (CONT1 * UA1) + (CONT2 * ERRO) + (CONT3 * ERROA1);

            BREAK;
    }

    IF (U > 0)

```

```

{
    PWM_2 = (INT32)(-0.00000434157953 * (U * U * U) + 0.01951276572677 * (U * U) -
        0.07754350722353 * U + 16.89554745684901);
    PWM_1 = 0;
}
ELSE IF (U < 0)
{
    U = -1 * U;
    PWM_1 = (INT32)(-0.00010361822132 * (U * U * U) + 0.02536081539480 * (U * U) -
        0.45874852929115 * U + 15.45419444120391);
    PWM_2 = 0;
}
ELSE IF (ESTADO)
{
    PWM_1 = 0;
    PWM_2 = 5;
}

IF (PWM_2 >= 100) PWM2 = 100;
ELSE IF (PWM_2 <= 0) PWM2 = 0;
ELSE PWM2 = PWM_2;

IF (PWM_1 >= 100) PWM1 = 100;
ELSE IF (PWM_1 <= 0) PWM1 = 0;
ELSE PWM1 = PWM_1;

IF (N1 < 2) PWM1 = 0;
IF (N1 > 17) PWM1 = PWM1/2;

SET_PWM1_DUTY(PWM1);
SET_PWM2_DUTY(PWM2);
}

VOID REFERENCIA() // GERA SINAL DE REFERÊNCIA
{
    IF (MUDOU)
    {
        ONDA = TREF;
        AMP = PARR1;
        FREQ = PARR2;
        OFFSET = PARR3;
    }

    SWITCH (ONDA)
    {
        CASE (1):
            IF ((AMP <= 16) && (AMP > 0)) REF = AMP;
            ELSE IF (AMP > 0) REF = 16;
            ELSE REF = 0;
            BREAK;

        CASE (2):
            IF ((QUADRADA() <= 16) && (QUADRADA() > 0)) REF = QUADRADA();
            ELSE IF (QUADRADA() > 0) REF = 16;
            ELSE REF = 0;
    }
}

```

```
BREAK;

CASE (3):
  IF ((TRIANGULAR() <= 16) && (TRIANGULAR() > 0)) REF = TRIANGULAR();
  ELSE IF (TRIANGULAR() > 0) REF = 16;
  ELSE REF = 0;
  BREAK;

CASE (4):
  IF ((SENOIDAL() <= 16) && (SENOIDAL() > 0)) REF = SENOIDAL();
  ELSE IF (SENOIDAL() > 0) REF = 16;
  ELSE REF = 0;
  BREAK;
}
}
```