



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UMA MAQUETE DE NÍVEL DE LÍQUIDO COM QUATRO TANQUES INTERLIGADOS

**Gustavo Amaral Ferreira de Melo
Mariana Costa Bernardes**

Brasília, março de 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UMA
MAQUETE DE NÍVEL DE LÍQUIDO COM
QUATRO TANQUES INTERLIGADOS**

**Gustavo Amaral Ferreira de Melo
Mariana Costa Bernardes**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecatrônico

Banca Examinadora

Prof. Geovany Araújo Borges, UnB/ ENE
(Orientador)

Prof. Lélío Ribeiro Soares Jr., UnB/ ENE

Prof. Marco Antônio F. do Egito Coelho, UnB/ ENE

Dedicatória

Decido este trabalho a todos que de alguma forma colaboraram com a minha formação, principalmente à minha família e aos professores que colaboraram para a realização do mesmo.

Gustavo Amaral F. de Melo

Dedico este trabalho a todos os que tornaram possível essa grande conquista, em especial aos meus pais, que demonstraram apoio incondicional.

Mariana C. Bernardes

Agradecimentos

Não poderia deixar de agradecer aos professores Geovany e Adolfo por todo o apoio e pela orientação que foi dada para a realização do trabalho e por todos os ensinamentos que adquiri durante estes três anos em que estive participando de projetos no LAVSI.

Agradeço aos meus familiares pela paciência que tiveram principalmente durante as maiores dificuldades, quando sempre me apoiaram.

Agradeço a minha namorada, Maria Helena, por todo carinho e paciência que me deu enquanto estive fazendo este trabalho, pois sei que foi necessária muita compreensão.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, especialmente a Alfredo Américo de Freitas, a Rodrigo Fontes Souto e a minha colega do projeto, Mariana, que sempre foram bastante prestativos.

Por fim, agradeço aos funcionários do GAT (Grupo de Apoio Técnico) do Departamento de Engenharia Elétrica, especialmente aos técnicos Célio Matos, Cícero e Algenor, que muito contribuíram e sempre foram muito prestativos para o sucesso do trabalho.

Gustavo Amaral F. de Melo

Agradeço também a todos os professores que de alguma forma contribuíram na minha formação, dando destaque especial aos professores Geovany e Adolfo, que tanto me ensinaram.

Não poderia também esquecer de deixar meu muito obrigado aos funcionários do GAT (Célio Matos, Algenor, Cícero... vocês foram essenciais).

No mais, agradecimentos aos familiares e amigos que deram o apoio necessário para superar as dificuldades e seguir em frente.

Mariana C. Bernardes

RESUMO

O presente trabalho vem apresentar um sistema de nível de líquidos desenvolvido para ser utilizado em estudos de diferentes estratégias de controle em um processo multivariável não-linear devido ao relativo baixo custo de implementação e facilidade de construção do sistema.

Foi projetado um sistema modular constituído de sensores de pressão para medição do nível de líquidos, módulo de controle com microcontrolador e módulo de acionamento com MOSFETs. Verificou-se que este sistema mostrou-se superior aos implementados anteriormente, principalmente no quesito de medição do nível da coluna de líquido devido ao tipo de sensor utilizado.

Para executar os experimentos, foi implementado um controlador PID e desenvolvida uma interface com o usuário em Matlab com animação da experiência durante a execução e confecção de gráficos para análise dos resultados experimentais. Foram também realizados diversos testes, com diferentes valores de parâmetros para o controlador e configurações para os tanques, de forma a se comprovar a eficiência do sistema desenvolvido.

Fez-se também uma identificação do sistema de nível de líquidos, propondo-se um modelo e obtendo-se estimativas para os parâmetros da planta.

Palavras-chave: instrumentação, sistema de nível de líquidos, controle digital

ABSTRACT

This manuscript describes a description of a control system developed to be used in the study of control strategies for non-linear multivariable processes. The advantage of its use is the low cost of the implementation and easiness of construction.

A modular system, containing pressure sensors for liquid level measurement, a control board with a microcontroller and a drive board with MOSFETs was designed. This system revealed itself better than other solutions implemented earlier, especially because of the higher precision of the new sensors employed.

In order to execute experiments, a PID controller was developed with Matlab interfacing, presenting an animation of the system and plotting of the results. Several tests have been carried out using different designs of the PID controller and different combinations of the tanks in order to prove the efficiency of the built system.

An identification of the liquid level system was performed, proposing a model and defining its parameters.

Keywords: instrumentation, liquid level system, digital control

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O PROBLEMA	1
1.2	A EVOLUÇÃO DOS PROJETOS	2
1.3	OBJETIVO	3
1.4	A NOVA PROPOSTA DO SISTEMA DE NÍVEIS DE LÍQUIDOS	4
1.5	DESCRIÇÃO DO RELATÓRIO	5
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1	SISTEMAS DE NÍVEL.....	6
2.1.1	MODELAGEM MATEMÁTICA NÃO-LINEAR	6
2.1.2	LINEARIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	7
2.2	SENSORES DE NÍVEL.....	8
2.3	ACIONAMENTOS	12
2.3.1	MOTO-BOMBAS AC	12
2.3.2	MOTO-BOMBAS DC	12
2.3.3	MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)	13
3	METODOLOGIA	14
3.1	O SISTEMA.....	14
3.2	MÓDULOS DE SENSORES	15
3.3	MÓDULO DE ACIONAMENTO	17
3.4	MÓDULO DE CONTROLE	19
3.5	INTERFACE COM O PC	23
3.6	MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS.....	23
3.7	PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DAS MOTO-BOMBAS DC	28
3.8	PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA.....	29
3.9	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS.....	31
4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	33
4.1	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO.....	33
4.2	IDENTIFICAÇÃO DAS MOTO-BOMBAS	35
4.3	IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA.....	37
4.4	CONTROLE DO SISTEMA	41
4.5	SIMULAÇÕES REALIZADAS COM OS PARÂMETROS ESTIMADOS	44
5	CONCLUSÕES	47
	ANEXOS.....	49
I.	PROGRAMA DE CONTROLE DO PIC 18F252.....	50
II.	PROGRAMA DO MATLAB PARA COMUNICAÇÃO COM O PIC.....	57
III.	ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS.....	61
IV.	LAYOUTS DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Primeiro Sistema de Nível de Líquidos do LAVSI (Sistema de Nível de Líquidos Multivariável).	2
Figura 1.2 – Segundo Sistema de Nível de Líquidos do LAVSI (Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem).	3
Figura 1.3 – Novo sistema de nível de líquidos do LAVSI (Sistema de Nível de Líquidos de Quarta Ordem).	4
Figura 2.1 – Procedimento de linearização em torno de um ponto de operação (H, Q)....	7
Figura 2.2 – Potenciômetro linear rotativo.	8
Figura 2.3 – Sensor capacitivo para medição de nível de líquidos não condutores (BENTLEY, 1988).	9
Figura 2.4 – Sensor de ultra-som à prova d'água do fabricante Murata.	10
Figura 2.5 – Sensor de pressão do fabricante Freescale, modelo MPXM2010GS.	11
Figura 2.6 – Sensor de pressão do fabricante Instronics.	11
Figura 3.1 – Foto do novo sistema de Nível de Líquidos do LAVSI.	14
Figura 3.2 – Esquemático dos módulos do sistema, em que S1, S2, S3 e S4 são os sensores e B1, B2, B3 e B4 são as bombas.	15
Figura 3.3 – Módulo de um sensor montado em sua caixa.	17
Figura 3.4 – Módulo de acionamento.	17
Figura 3.5 – Diagrama de blocos do módulo de acionamento.	18
Figura 3.6 – Diagrama do Módulo de Controle.	20
Figura 3.7 – Esquemático do circuito de proteção das entradas analógicas.	21
Figura 3.8 – Módulo de Controle montado.	22
Figura 3.9 – Animação gráfica apresentada durante a execução do sistema.	23
Figura 3.10 – Esquema do Sistema de Níveis de Líquidos.	24
Figura 4.1 – Curvas de calibração dos sensores de pressão. (a) Sensor 1; (b) Sensor 2; (c) Sensor 3; (d) Sensor 4.	34
Figura 4.2 – Curvas de calibração das moto-bombas. (a) Bomba 1; (b) Bomba 2; (3) Bomba 3; (4) Bomba 4	36
Figura 4.3 – Curva obtida no experimento de controle e esvaziamento do tanque 2 para a estimação do parâmetro K_{02}	37
Figura 4.4 – Curva obtida no experimento de controle e esvaziamento do tanque 4 para estimação do parâmetro K_{04}	37
Figura 4.5 – Gráfico utilizado para a estimação do parâmetro K_{02} que é obtido a partir da inclinação da reta que melhor aproxima os pontos.	38
Figura 4.6 – Gráfico utilizado para a estimação do parâmetro K_{04} , que é obtido a partir da inclinação da reta que melhor aproxima os pontos.	38
Figura 4.7 – Curva obtida no experimento de controle para estimação do parâmetro K_{23}	39
Figura 4.8 – Curva obtida no experimento de controle para estimação dos parâmetros K_{01} e K_{03}	40
Figura 4.9 – Gráfico utilizado para a estimação do parâmetro K_{01}	40
Figura 4.10 – Gráfico utilizado para a estimação do parâmetro K_{03}	41
Figura 4.11 – Curva obtida na experiência de controle PID dos tanques 1 e 3, com válvulas 1/2 e 3/4 abertas na posição 3 e válvula 2/3 fechada. Sinais de referência: onda quadrada (tanque 1) e triangular (tanque 3).	41
Figura 4.12 – Curva obtida na experiência de controle PID dos tanques 1 e 3, com válvulas 1/2 e 2/3 abertas na posição 3 e válvula 3/4 fechada. Sinais de referência: ondas senoidais em ambos tanques.	43
Figura 4.13 – Curva obtida na experiência de controle PID dos tanques 2 e 4, com válvulas 1/2 e 3/4 abertas na posição 3 e válvula 2/3 fechada. Sinais de referência: onda senoidal (tanque 2) e onda quadrada (tanque 4).	43
Figura 4.14 – Curva obtida na experiência de controle proporcional analógico do tanque 1 com todas válvulas fechadas. Sinal de referência em 20cm.	44

Figura 4.15 – Curva obtida na experiência de controle proporcional digital do tanque 1 com todas válvulas fechadas. Sinal de referência em 20cm.....	44
Figura 4.16 – Curva obtida na simulação do Sistema de Níveis de Líquidos de 1ª ordem.	45
Figura 4.17 – Curva obtida na simulação do Sistema de Níveis de Líquidos de 2ª ordem.	45
Figura III.1 – Esquemático do circuito da placa do sensor.....	61
Figura III.2 – Esquemático do circuito de acionamento das bombas.....	61
Figura III.3 – Esquemático do circuito do controlador analógico.	62
Figura III.4 – Esquemático das conexões elétricas entre os módulos do sistema.....	62
Figura III.5 – Esquemático do circuito da placa de controle.....	63
Figura IV.1 – <i>Layout</i> da placa dos sensores.	64
Figura IV.2 – <i>Layout</i> da placa de acionamento das moto-bombas.	65
Figura IV.3 – <i>Layout</i> da placa de controle.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 – Estimativas dos parâmetros K_{12} , K_{23} e K_{34}	39
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A_n	Área da secção transversal do tanque n	[cm ²]
C_n	Capacitância do tanque n	[cm ²]
R_{nm}	Resistência do tanque n para o tanque m	[s/cm ²]
h_n	Nível do tanque n	[cm]
H_n	Nível do tanque n no ponto de operação	[cm]
δh_n	Variação do nível do tanque n em torno do ponto de operação	[cm]
q_{nm}	Vazão do tanque n para o tanque m	[cm ³ /s]
Q_{nm}	Vazão do tanque n para o tanque m em regime permanente	[cm ³ /s]
δq_{nm}	Variação da vazão do tanque n para o m em torno do ponto de operação	[cm ³ /s]
Δh_{furos}	Diferença de altura entre os fundos dos tanques e do reservatório	[cm]
T	Período do sinal	[s]
t_H	Período em nível alto	[s]
t_L	Período em nível baixo	[s]
q_{in}	Vazão de entrada no tanque n	[cm ³ /s]
q_{on}	Vazão de saída no tanque n	[cm ³ /s]
q_{nm}	Vazão do tanque n para o tanque m	[cm ³ /s]
V_{ad}	Tensão do conversor A/D	[V]
V_n	Tensão aplicada sobre a bomba n	[V]
K_p	Ganho proporcional	[cm ² /s]
K_i	Ganho integral	[cm ² /s]
K_d	Ganho derivativo	[cm ²]

Símbolos Gregos

ε	Permissividade eletrostática do material	[C ² /N . m ²]
ε_o	Permissividade eletrostática do vácuo	[C ² /N . m ²]

1 INTRODUÇÃO

1.1 O PROBLEMA

Os sistemas de controle de nível de líquido são utilizados em aplicações em que há a necessidade de se controlar a altura da coluna de líquido de um tanque, a vazão do líquido ou ambos. Na indústria química, por exemplo, eles são utilizados devido à necessidade de se controlar a mistura entre duas substâncias. Nas residências, utiliza-se este tipo de controle em caixas d'água e em máquinas de lavar roupa.

Devido à sua vasta aplicação na vida prática, sistemas de tanques acoplados, em escala de laboratório, foram implementados no LAVSI (Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes) para que estudantes da área de Automação e Controle, tanto da graduação quanto da pós-graduação, pudessem realizar experiências com diversas técnicas de controle aplicáveis em sistemas de nível de líquidos.

Um processo de tanques acoplados construído em escala de laboratório é bastante adequado para ser utilizado em estudos de diferentes estratégias de controle em um processo multivariável não-linear devido ao relativo baixo custo de implementação e facilidade de construção do sistema. A modelagem matemática também é relativamente simples, permitindo que diversos tipos de controladores sejam projetados e testados de forma fácil e rápida. Com isso, a opção por um sistema de nível de líquidos se justifica por propiciar um Kit didático que atende amplamente aos objetivos das disciplinas em que será aplicado, propiciando a flexibilidade necessária para que as mais diversas técnicas de controle possam ser estudadas a cada semestre.

Sistemas de nível de líquidos já foram utilizados no LAVSI (Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes) com fins didáticos resultando em vários artigos e trabalhos publicados a partir dos experimentos realizados. Técnicas de espaço de estados, PID e *Fuzzy* já foram implementadas com sucesso (FILHO, 2002), e o sistema já foi utilizado tanto em experimentos de estimação de parâmetros com filtro de Kalman estendido (FREITAS, *et al.*, 2004) quanto remotamente para experimentos de controle através da Internet pelos alunos das disciplinas de Análise Dinâmica Linear e Controle Dinâmico (FREITAS, 2003), (JABUONSKI, *et al.*, 2003), (GUIMARÃES, *et al.*, 2002) e (BAUCHSPIESS, *et al.*, 2003).

Contudo, os sistemas de nível de líquido existentes atualmente no laboratório do LAVSI para realização de experimentos de controle, embora funcionem adequadamente, apresentam alguns inconvenientes que tornam os estudos limitados e algumas vezes com resultados insatisfatórios o que poderia ser suprido com a construção um novo projeto do sistema.

Foi então proposto o presente projeto de graduação, que visa à obtenção de um novo sistema de nível de líquidos mais robusto e eficiente, para que se atenda melhor aos alunos de graduação dos

curso de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecatrônica que cursam a disciplina Controle Dinâmico, assim como estudantes da pós-graduação.

1.2 A EVOLUÇÃO DOS PROJETOS

O sistema de nível de líquidos utilizado atualmente para experimentos no LAVSI (Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes) é resultado de uma evolução a partir dos sistemas desenvolvidos em projetos anteriores. Devido às melhorias acrescentadas a cada nova versão, espera-se com este trabalho, chegar a uma versão final do Kit didático que atenda de forma satisfatória às necessidades que foram observadas ao longo de alguns semestres de experimentos das disciplinas de controle.

O primeiro sistema construído consistia de três tanques interconectados por válvulas e alimentados por duas moto-bombas DC proporcionais (GOSMAN, 2002), que por sua vez eram acionadas por um *driver* de potência comandado com um sinal de tensão. O nível de líquido era monitorado por sensores elétricos (potenciômetros) acoplados a bóias por meio de uma haste metálica, como é mostrado na Figura 1.1.

Como alguns problemas deste sistema, temos os sensores, que apresentam grande variação de leitura com a trepidação da lâmina d'água, causando uma série de inconvenientes na realização dos experimentos. Outro detalhe é o fato de existirem bombas apenas para o enchimento dos tanques, sendo que o esvaziamento dá-se pelo escoamento natural do líquido, ou seja, apenas um sinal de controle positivo é possível de ser aplicado, nunca um sinal negativo, o que limita muito os experimentos realizados. Também existe certa limitação do sistema a experimentos de ordens mais elevadas e/ou variantes no tempo. Como a possibilidade de experimentos neste grau de complexidade é desejável para que o sistema atenda também aos alunos da pós-graduação, o sistema da Figura 1.1 mostrou-se incompleto.



Figura 1.1 – Primeiro Sistema de Nível de Líquidos do LAVSI (Sistema de Nível de Líquidos Multivariável).

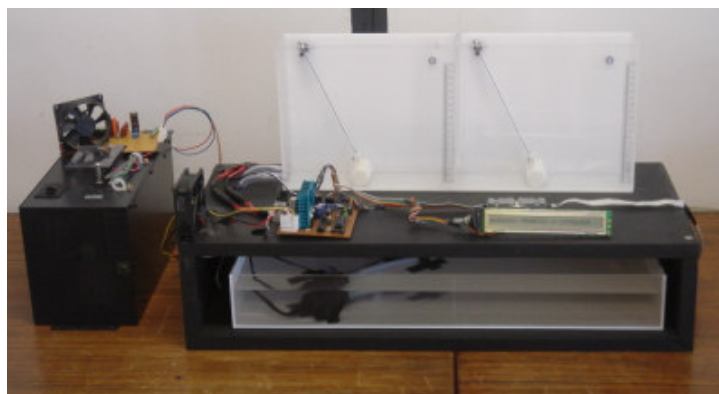


Figura 1.2 – Segundo Sistema de Nível de Líquidos do LAVSI
(Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem).

Um outro sistema de nível de líquidos, mostrado na Figura 1.2, foi construído por alunos de graduação do curso de Engenharia Mecatrônica (MENDES e TAMAYO, 2004), embora não tenha chegado a entrar em funcionamento para uso dos demais alunos. Neste novo sistema, alguns problemas do sistema anterior foram corrigidos. A não utilização de tubulações, por exemplo, diminuiu a perda de carga, tornando o sistema mais fiel ao modelo matemático e, conseqüentemente, possibilitando experimentos mais precisos. A construção dos tanques também foi pensada de forma a evitar o acúmulo de água nos tanques quando não está sendo realizado experimento, evitando assim o surgimento de larvas de mosquitos e sujeira nos tanques. O sistema também ficou mais compacto e desmontável, facilitando a manutenção, o transporte e a limpeza.

No entanto, os outros problemas levantados para o sistema antigo permaneceram ou foram até mesmo acentuados, caso da impossibilidade de experimentos mais complexos, visto que se diminuiu ainda mais a quantidade de tanques.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um Kit didático para experimentos de controle de sistemas de nível de líquidos a ser utilizado pelos alunos da área de Controle e Automação, tanto do curso de graduação, quanto da pós-graduação. A possibilidade de experiências com maior ou menor grau de complexidade será permitida pela configuração do Kit, modificando-se a quantidade de tanques utilizada, atuadores e saídas de água. Com isso, tem-se um sistema mais versátil e que atende às necessidades tanto da graduação quanto da pós-graduação.

Problemas dos sistemas anteriores, como a imprecisão dos sensores de nível, erros no modelamento matemático do sistema dentre outros, serão corrigidos, ou pelo menos amenizados com a proposta deste novo projeto.

1.4 A NOVA PROPOSTA DO SISTEMA DE NÍVEIS DE LÍQUIDOS

Dadas as limitações existentes nos projetos anteriores e as necessidades observadas ao longo dos semestres em que os sistemas estiveram em uso, o novo sistema proposto irá manter as características favoráveis do sistema da Figura 1.2 e implementará modificações de forma a resolver os problemas persistentes.

Propõe-se, então, a construção de um sistema com quatro tanques interconectados, mostrado na Figura 1.3, sendo um deles na forma trapezoidal, dois deles com duas bombas cada, uma responsável pelo enchimento e outra pelo esvaziamento do tanque, e a substituição dos sensores usados anteriormente por sensores de pressão, que apresentam leitura muito mais precisa e confiável.

O sistema consiste de um compartimento maior, subdividido internamente por chapas de acrílico em 4 compartimentos que serão considerados tanques independentes. Três desses tanques possuem dimensões de 49,5 x 10 x 6 cm. O quarto tanque tem forma trapezoidal. A chapa de acrílico que separa os compartimentos uns dos outros possui uma ranhura de 2 mm, interconectando os tanques. Uma chapa desliza em sentido vertical, controlando a abertura entre os tanques. 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). A eliminação de tubulações entre os tanques diminui a perda de carga e torna modelo matemático mais simples.

As chapas deslizantes também tornam possível obter diversas configurações de sistema, realizando-se experimentos de diferentes ordens e com a possibilidade de torná-los mais complexos se for feito uso do tanque trapezoidal, cujo volume não varia linearmente com a altura da coluna d'água, eliminando-se o inconveniente do projeto da Figura 1.2, bastante limitado quanto ao grau de dificuldade dos experimentos.

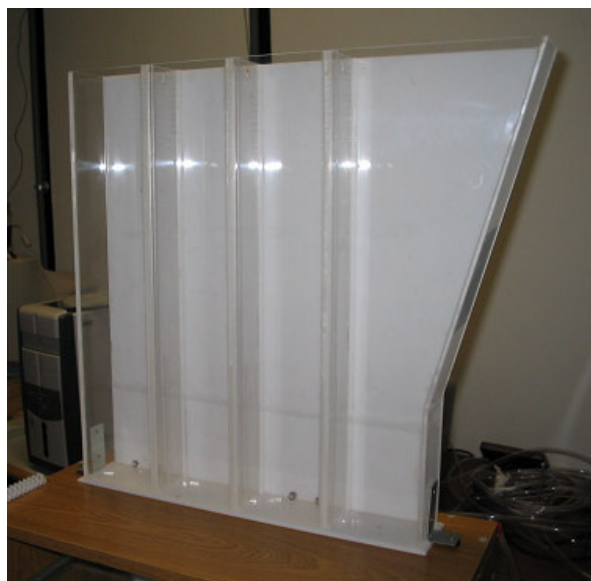


Figura 1.3 – Novo sistema de nível de líquidos do LAVSI
(Sistema de Nível de Líquidos de Quarta Ordem).

A medição do nível da coluna de líquido também foi alterada. Neste projeto, ao invés de potenciômetros, faz-se uso de sensores de pressão específicos para medição de nível de líquidos, aumentando a confiabilidade e a precisão dos dados obtidos.

Uma grande diferença no novo sistema implementado, comparando-o com os anteriores é a menor área dos tanques o que torna o sistema mais rápido.

1.5 DESCRIÇÃO DO RELATÓRIO

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordado neste trabalho. A seção 2.1 apresenta a teoria necessária para o entendimento dos Sistemas de Níveis de Líquidos, tratando da modelagem matemática dos mesmos. A seção 2.2 apresenta diversos tipos diferentes de sensores de níveis, mostrando seus princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens. A seção 2.3 trata dos atuadores que foram utilizados para o controle do sistema.

O capítulo 3 mostra como cada passo do projeto foi desenvolvido para a realização do mesmo. A seção 3.1 faz uma apresentação do sistema implementado. Na seção 3.2 tem-se uma descrição dos módulos dos sensores de nível. A seção 3.3 apresenta o módulo que realiza o acionamento das moto-bombas. Na seção 3.4 tem-se uma descrição do módulo de controle, que é o módulo central do sistema. A seção 3.5 traz uma descrição de como se realiza a comunicação com o computador conectado ao módulo de controle, como os dados são armazenados e apresentados ao usuário. A seção 3.6 apresenta um modelo matemático do sistema, apresentando suas características não-lineares. A seção 3.7 descreve o procedimento que foi realizado para a identificação das 4 moto-bombas, descrevendo a obtenção de modelos matemáticos para as mesmas. Na seção 3.8 tem-se uma descrição do procedimento para a identificação de todos os parâmetros do sistema. A seção 3.9 descreve a teoria necessária para realizar uma simulação computacional do funcionamento do sistema com os parâmetros que foram estimados.

O capítulo 4 traz a descrição e análise dos resultados que foram obtidos. Na seção 4.1 tem-se a apresentação dos resultados da calibração dos sensores. A seção 4.2 traz os resultados da identificação das moto-bombas. Na seção 4.3 apresentam-se os resultados da identificação dos parâmetros do sistema. A seção 4.4 traz os resultados obtidos nos diversos experimentos de controle do sistema que foram realizados. Finalizando o capítulo, a seção 4.5 apresenta os resultados das simulações do sistema.

O capítulo 5 apresenta considerações finais e a conclusão do trabalho.

Finalmente, nos anexos, encontram-se alguns códigos dos programas desenvolvidos, assim como os esquemáticos e os *layouts* das placas de circuito impresso que foram projetadas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 SISTEMAS DE NÍVEL

Sistemas de Níveis de Líquidos são importantes em diversas aplicações, como na indústria química, petroquímica, nuclear e de celulose (GOSMAN, 2002). O conhecimento e controle precisos do nível de um líquido são de suma importância na indústria, haja vista que, para fins de inventário e cálculo de custos, o controle desta grandeza se traduz diretamente em dinheiro, lucro e eficiência.

O controle do mesmo também possui um interesse teórico, pois como será mostrado mais à frente, trata-se de um sistema não linear, sendo possível a aplicação de técnicas de controle e identificação mais avançadas do que as tradicionais, utilizadas nos sistemas lineares.

O sistema proposto e implementado no presente trabalho, além da não linearidade, tem a possibilidade de se tornar multivariável, com os tanques acoplados através de válvulas.

A não linearidade vem do fato da vazão instantânea ser proporcional à raiz quadrada da altura do líquido no tanque e o fato de ser multivariável vem da possibilidade da medição e controle dos quatro níveis dos tanques.

2.1.1 MODELAGEM MATEMÁTICA NÃO-LINEAR

A modelagem de um sistema de Níveis de Líquidos pode ser realizada utilizando algumas simplificações para que as equações pertinentes possam ser aplicadas. Dentre elas pode-se citar a consideração de que a água é incompressível e que a perda de carga nos dutos que transportam a água é nula.

Como há a conservação da água, pois todas as entradas e saídas de água em cada tanque fazem parte do modelo, pode-se dizer que a variação no volume de um tanque em certo intervalo de tempo é igual à soma das vazões de entrada menos as vazões de saída, podendo ser representado pela seguinte expressão:

$$\frac{dv}{dt} = A \frac{dh}{dt} = \sum q_i - \sum q_o \quad [2-1]$$

Em que v é o volume do tanque, A é a área da seção transversal do líquido, h é a altura do nível [cm], q_i [cm³/s] representa as vazões de entrada de líquido e q_o [cm³/s] as vazões de saída.

Outra importante relação a ser observada que vem da equação de Bernoulli (OGATA, 2003) é a que determina a vazão instantânea de saída de líquido, dada pela seguinte expressão:

$$q = k \cdot \sqrt{h} \quad [2-2]$$

Em que q é a vazão de saída de líquido [cm^3/s], o coeficiente k [$\text{cm}^{2.5}/\text{s}$] depende de diversos fatores, como a aceleração da gravidade e da válvula de restrição e h é a altura no nível do tanque com relação à válvula.

Este tipo de modelo é amplamente aplicado na literatura, como visto em Ogata (2003).

2.1.2 LINEARIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A linearização do modelo descrito na seção 2.1.1 pode ser feita aproximando-se um ponto de operação escolhido por uma reta e considerando que erros no modelo para pequenas variações em torno do ponto de operação são desprezíveis. A Figura 2.1 ilustra este processo.

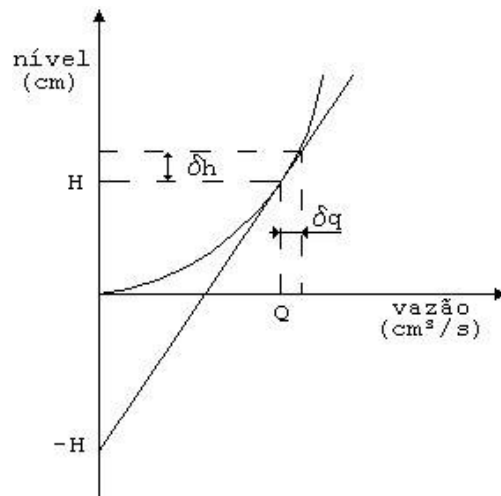


Figura 2.1 – Procedimento de linearização em torno de um ponto de operação (H, Q).

Para a linearização do modelo matemático do Sistema de Nível de Líquido, pode-se utilizar uma analogia com circuitos elétricos. O análogo à resistência R pode ser definida como a diferença de nível necessária para causar uma variação de vazão unitária. Desta forma, pode-se escrever em forma de equação a expressão mostrada na equação 2-3.

$$R = \frac{dH}{dQ} \quad [2-3]$$

Derivando a expressão 2-2, chega-se a

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \quad [2-4]$$

Daí vem (OGATA, 2003):

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q} = \frac{\delta h}{\delta q} \quad [2-5]$$

A capacitância C para um reservatório de líquido, assim como em um circuito elétrico, está associada ao armazenamento de potencial, que, neste caso, é a altura do nível de líquido. É definida como a variação no volume de líquido armazenado que resulta na variação unitária no nível. Desta forma, pode-se concluir que a capacitância é igual à área da superfície do líquido de cada tanque.

As linearizações descritas anteriormente são válidas para pequenas excursões em torno de um ponto de operação escolhido $(Q \pm \delta q, H \pm \delta h)$, em que Q é a vazão em regime estacionário, e H é a altura do nível em regime estacionário e δq e δh são as variações em torno do ponto de operação.

2.2 SENSORES DE NÍVEL

Basicamente, o monitoramento do nível pode ser efetuado de duas formas distintas: diretamente (onde o medidor observa a camada superior do fluido em questão) ou indiretamente (através do conhecimento de outra grandeza que possibilite uma relação entre o seu valor e o nível do reservatório). Bóias, por exemplo, são sensores de nível do tipo direto. Sensores de pressão podem ser considerados como medidores indiretos de nível.

Para a medição de níveis de líquidos há diversos tipos de sensores, cada um apresentando suas características, vantagens e desvantagens. A seguir serão comentados alguns tipos de sensores e em seguida será dada uma melhor explicação sobre o sensor escolhido.

POTENCIÔMETRO

Sensores resistivos são aplicados em diversos tipos de medições. No caso da medição de níveis de líquidos, utiliza-se um potenciômetro conectado através de uma haste a uma bóia, que acompanha o nível da linha d'água. Este tipo de sensor é utilizado, por exemplo, na medição do nível do combustível em automóveis.



Figura 2.2 – Potenciômetro linear rotativo.

Alguns sensores, como os que eram utilizados nos sistemas de níveis de líquidos anteriores no LAVSI, são potenciômetros lineares rotativos, como o mostrado na Figura 2.2. Desta forma, para cada posição angular da haste, está associado um nível da coluna de água. Um circuito simples pode ser montado para o condicionamento do sinal.

Uma característica indesejada observada neste tipo de sensor é o *slip-stick* (escorrega e cola), que é uma não-linearidade que torna a leitura menos confiável. Este comportamento ocorre devido ao atrito, sendo perceptível principalmente para pequenas variações na posição. O movimento da linha d'água pode não ser suficiente para o deslocamento do potenciômetro devido ao atrito. Quando finalmente o atrito for vencido, a haste se desloca bruscamente resultando em uma falsa leitura da posição lida. Desta forma, para uma mesma coluna d'água, o sensor poderá apresentar leituras diferentes, o que é extremamente indesejável.

Outro problema encontrado com este tipo de sensor foi à necessidade da haste que segura a bóia ser da altura que se deseja medir para que o potenciômetro não fique na água. Este fato não era relevante para os sistemas anteriores, mas para o novo sistema, tem-se que a altura é de 49,5 cm, o comprimento dos três tanques mais estreitos é de 10 cm e a largura é de 6 cm. Desta forma, torna-se praticamente inviável a utilização de potenciômetros, sendo necessária à utilização de vários em cada tanque.

SENSOR CAPACITIVO

Este tipo de sensor utiliza o princípio da variação da capacitância para medir a variável desejada. Pode-se, por exemplo, ter um capacitor de placas paralelas em que uma das placas é mantida constante, e a posição da outra varia, sendo possível à medição desta distância, pois a capacitância irá variar.

No caso da medição de níveis de líquidos, a variação da capacitância ocorre com a variação da altura do material dielétrico. Estando o tanque totalmente vazio, o único dielétrico será o ar. À medida que o tanque encher, haverá uma parte do capacitor com ar e outra parte com o líquido, como pode ser visto na Figura 2.3 (BENTLEY, 1988).

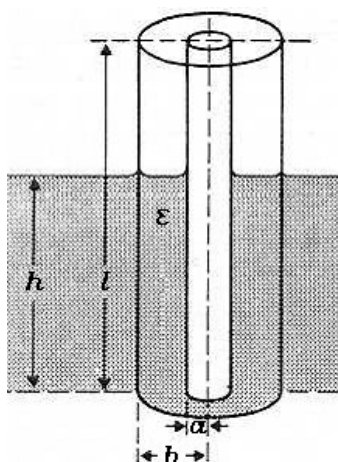


Figura 2.3 – Sensor capacitivo para medição de nível de líquidos não condutores (BENTLEY, 1988).

Para o sensor mostrado na Figura 2.3, a capacitância em função da altura h é dada pela expressão 2-6.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} \cdot (l + (\epsilon - 1) \cdot h) \quad [2-6]$$

Este tipo de sensor requer a medição da capacitância para a obtenção do nível. Há várias formas de se realizar isto, como por exemplo, através da utilização de uma ponte reativa. Para a medição de líquidos condutores, é necessária a adição de uma camada isolante entre as placas do sensor e o líquido.

SENSOR DE ULTRA-SOM

Sensores ultra-sônicos são utilizados em diversas aplicações de instrumentação. Entre elas está a medição de distâncias a obstáculos. Este sensor consiste em um transmissor e um receptor. Os sinais emitidos pelo transmissor são refletidos no obstáculo posicionado em sua direção, retornando ao receptor. Medindo-se o tempo entre a transmissão e a recepção do sinal, e conhecendo-se a velocidade da propagação do som, pode-se obter a distância. Um exemplo de sensor de ultra-som é mostrado na Figura 2.4.

No caso da medição de níveis de líquidos, utilizando tanto o transmissor quanto o receptor, posicionados sempre fora da água, direcionados para o fundo do tanque, tem-se que a linha d'água irá causar a primeira reflexão do som. Parte do sinal transmitido penetrará a água e atingirá o fundo gerando uma segunda reflexão, que não deve ser considerada pelo circuito de recepção.

Para a implementação da transmissão, pode-se utilizar tanto um circuito analógico independente quanto um acionamento através de um microcontrolador. Para reduzir efeitos de interferências pode-se utilizar uma frequência específica para a oscilação do sinal. O acionamento pode ser feito através de uma onda quadrada com uma frequência conhecida, gerando certa quantidade de pulsos por vez. Pode-se enviar um trem de pulsos e esperar um tempo fixo até se realizar novamente o envio de outro trem de pulsos, esperando um tempo suficiente para terminar a reflexão do sinal, não recebendo falsas leituras.



Figura 2.4 – Sensor de ultra-som à prova d'água do fabricante Murata.

Para a recepção, pode-se utilizar um circuito que simplesmente dê um pulso na sua saída quando for recebido um sinal, sendo necessária a utilização de um *software* no microcontrolador para a

medição do tempo e obtenção da distância. Outra abordagem é a utilização de um circuito analógico que apresente em sua saída uma tensão proporcional à distância, sendo necessária somente à leitura da mesma.

Para este sensor é necessária uma medição de tempo muito precisa, pois a velocidade de propagação do som no ar é de cerca de 340 m/s. Desta forma, considerando uma resolução desejada de 0,5 mm, seria necessária a medição de um tempo de aproximadamente 1,5 μ s.

SENSOR DE PRESSÃO

Para a medição de nível de líquido através da pressão, utiliza-se o princípio de que a pressão só depende da densidade do material e da altura do líquido acima do ponto de referência para um líquido uniforme.

Devido a este fato, uma medida de pressão que é comumente utilizada é a de metros de coluna d'água (mca). A conversão entre estas unidades é feita através da seguinte relação:

$$10 \text{ kPa} = 1 \text{ mca} \quad [2-7]$$

Desta forma, tem-se que o sensor descrito acima é capaz de medir níveis de água de até 1 metro, sendo mais que suficiente para a aplicação desejada.

Há diversas formas para a medição da pressão. Medições de forma visual podem ser feitas através de barômetros de mercúrio, por exemplo. Neste trabalho, deseja-se utilizar um método capaz de realizar a medida dos níveis dos líquidos sem a necessidade de inspeção humana, para estas aplicações pode-se utilizar, por exemplo, sensores piezoresistivos. A Figura 2.5 ilustra o sensor que foi utilizado no projeto e a Figura 2.6 mostra um outro tipo de sensor de pressão comercial.

Para a implementação da instrumentação deste trabalho optou-se pela utilização deste tipo de sensor devido a algumas vantagens encontradas, como a alta resolução e linearidade.

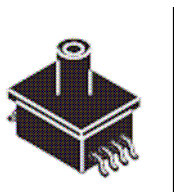


Figura 2.5 – Sensor de pressão do fabricante Freescale, modelo MPXM2010GS.



Figura 2.6 – Sensor de pressão do fabricante Instronics.

2.3 ACIONAMENTOS

2.3.1 MOTO-BOMBAS AC

As bombas utilizadas nos sistemas anteriores são barulhentas, incomodando os freqüentadores do laboratório a cada vez que um experimento é realizado. Estudou-se então a possibilidade de substituí-las por bombas de baixo custo e mais silenciosas, mas que fossem capazes de encher os tanques com a mesma rapidez das antigas, de forma a não aumentar o tempo de execução do experimento. Além do barulho, outro problema encontrado nas bombas utilizadas era o aquecimento das mesmas, assim como a sua constante quebra.

Procurou-se então por bombas de aquário, pois apresentam uma boa vazão e são bastante silenciosas. Por se tratarem de motores AC, para que se variasse a velocidade da bomba, seria necessário variar a freqüência da alimentação, ou seja, um inversor de freqüência se faria necessário.

Foram então realizados testes para verificar o intervalo de freqüências ao qual o motor de aquário respondia, e chegou-se à conclusão de que o intervalo de excursão de freqüência era demasiadamente pequeno, sendo insuficiente para a nossa aplicação.

Procurou-se então por novos motores AC, de diferentes marcas e modelos. Foram testados outras bombas de aquário e também um motor de máquina de lavar roupas. Em todos eles, não foram obtidos resultados satisfatórios. O intervalo de freqüências para o qual os motores eram capazes de responder era muito pequeno ou a capacidade de bombeamento era insuficiente para encher os tanques na velocidade necessária. Concluiu-se que os motores AC de baixo custo disponíveis no mercado e que possuíam capacidade de bombeamento adequada ao nosso experimento não foram projetados para trabalhar fora da freqüência padrão estabelecida pelo fabricante, o que torna impossível variar sua velocidade com eficiência fazendo uso de um inversor de freqüência. Como a variação da velocidade de enchimento é um fator crucial para o sistema de controle, estes motores foram descartados.

Decidiu-se então manter as bombas utilizadas nos outros dois Sistemas de Nível de Líquidos anteriores, sendo que apenas se projetou novamente o circuito de acionamento das mesmas.

2.3.2 MOTO-BOMBAS DC

As bombas escolhidas são moto-bombas DC proporcionais, normalmente utilizadas no reservatório de limpadores de pára-brisa de carros, que operam com tensões entre 0 e 12V e cerca de 3,5A na tensão máxima. Como esses atuadores foram projetados para funcionar sempre com um volume de água em seu interior, para seu correto funcionamento alguns fatores foram levados em conta na sua implementação no Sistema de Nível de Líquidos. Assim sendo, as bombas ficam posicionadas de tal forma que sempre se mantenha um pouco de água em seu interior, evitando que ao iniciar um experimento com os tanques vazios, as bombas trabalhassem sem água, ocasionando possíveis queimas de motores.

Para a realização do acionamento das bombas, por se tratarem de motores DC, pode-se utilizar o recurso do PWM, que entre outras vantagens facilita a eletrônica, já que não será necessário um amplificador analógico para tensões entre 0 e 12V, bastando apenas que a chave a ser utilizada trabalhe em dois estados: ligada e desligada. Este fato leva a uma outra vantagem da utilização do PWM, pois ocorre menor dissipação de energia sobre o circuito de acionamento.

Como é sabido, um motor DC pode ser modelado, com algumas simplificações, por um sistema de primeira ordem no domínio da frequência, funcionando como um filtro passa-baixas. Desta forma o motor não irá responder a entradas com frequências muito elevadas, atenuando as mesmas e respondendo apenas ao valor médio do sinal aplicado.

2.3.3 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)

Uma técnica comumente utilizada para a variação do valor médio aplicado a uma carga é a Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM). Esta técnica pode ser utilizada variando o valor da saída somente entre dois estados: ligado e desligado. O acionamento através de PWM pode ser utilizado quando a carga for lenta comparada com a frequência utilizada.

No caso do acionamento de motores DC, a resposta da rotação do motor será lenta comparada com a frequência utilizada no PWM, sendo percebido na saída somente o valor médio aplicado ao motor.

A saída a ser utilizada será uma onda retangular que, quando em nível alto, irá acionar o motor correspondente, aplicando sobre o mesmo uma tensão de 12 Volts e, quando em nível baixo, irá manter o motor desligado, com tensão de 0 Volt.

Uma definição importante a ser feita é a de ciclo de trabalho. Este é definido como o percentual do tempo em que a saída encontra-se em seu valor máximo, dado pela seguinte expressão:

$$DT = \frac{t_H \cdot 100\%}{t_H + t_L} = \frac{t_H \cdot 100\%}{T} \quad [2-8]$$

em que T é o período do sinal, t_H é o tempo em um período em que o sinal está no nível alto, e t_L é tempo em um período em que o sinal está no nível baixo.

Uma facilidade da utilização do acionamento através de PWM, é que o microcontrolador que será utilizado possui dois módulos PWM internos de fácil utilização, podendo ser configurados tanto o valor do ciclo de trabalho, como a frequência do PWM.

3 METODOLOGIA

3.1 O SISTEMA



Figura 3.1 – Foto do novo sistema de Nível de Líquidos do LAVSI.

O novo sistema de nível de líquidos (Figura 3.1) foi concebido em forma modular de maneira que se tivesse um projeto mais maleável, permitindo melhorias e alterações em mudanças futuras. Com isso, em caso de algum defeito, avaria de equipamento ou mudança de projeto, módulos podem ser reaproveitados, evitando desperdício de dispositivos, trabalho e tempo. As conexões elétricas necessárias entre os módulos para funcionamento do sistema estão descritas na Figura III.4, dos anexos.

Os principais módulos do sistema são: os módulos dos sensores, o módulo de acionamento e o módulo de controle. Em cada módulo de sensor tem-se um sensor de pressão para medida do nível de líquido de um dos tanques, um circuito de ajuste de ganho e de *offset*, e um capacitor para diminuição de ruído. No módulo de acionamento, têm-se os MOSFETS e diodos para o acionamento das bombas e opto-acopladores para evitar interferência do sinal de PMW nas leituras dos sensores. No módulo de controle, tem-se o microcontrolador PIC18F252, filtros para eliminação de ruídos dos sinais, comunicação serial para ligar o PIC ao computador e multiplexadores analógicos para aumentar a quantidade de entradas analógicas disponíveis no PIC.

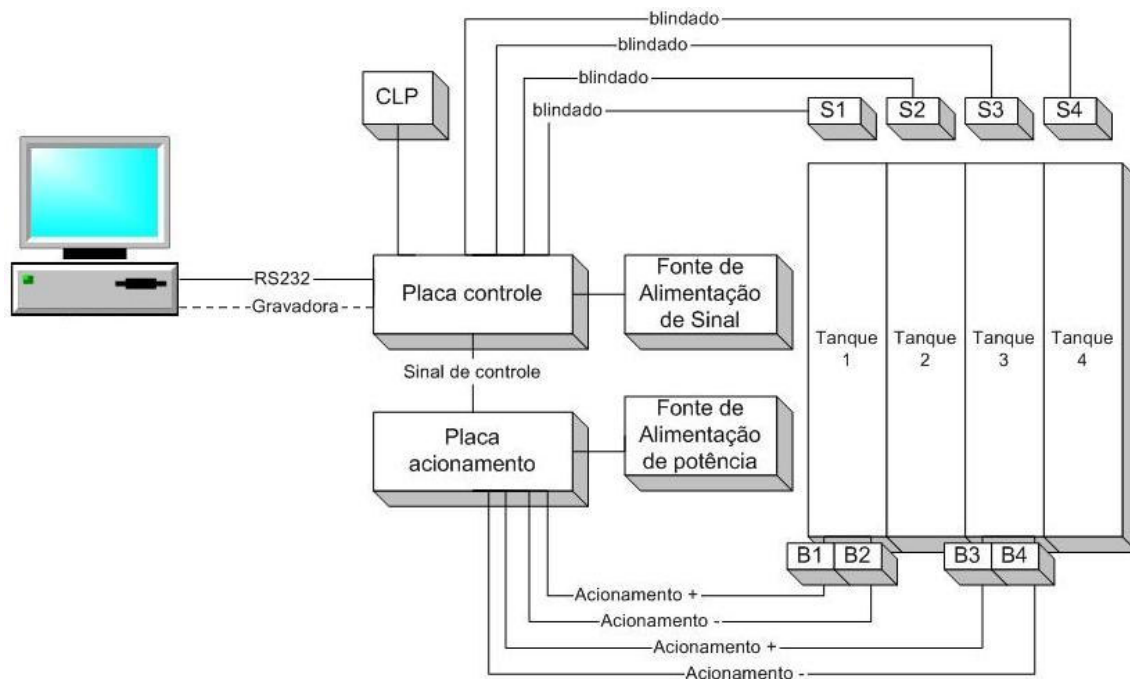


Figura 3.2 – Esquemático dos módulos do sistema, em que S1, S2, S3 e S4 são os sensores e B1, B2, B3 e B4 são as bombas.

Os módulos de sensores ficam sobre os tanques, de forma que os tubos conectados aos sensores fiquem imersos no líquido para medição do nível do mesmo. Destes módulos saem os sinais de medida através de cabos blindados em direção ao módulo de controle. No módulo de controle ficam conectados os terminais da comunicação serial RS232 para que dados do experimento sejam enviados para o computador. Dela também saem os sinais de controle que são enviados para o módulo de acionamento, responsável por ativar as bombas.

3.2 MÓDULOS DE SENSORES

Neste projeto optou-se por um sensor de pressão para medir o nível de líquido dos tanques ao invés dos sensores resistivos dos sistemas de nível de líquidos anteriores. Foram conseguidas amostras de um sensor (MPXM2010GS) com o fabricante Freescale, que consiste em sensor de pressão piezo-resistivo, com tensão de saída linear com relação à pressão (FREESCALE, 2004). Para realizar a medição do nível de um líquido utiliza-se um tubo que vai até o fundo do tanque. Assim, quando o tanque estiver vazio, a pressão medida será zero, e à medida que o tanque encher, a pressão irá crescendo linearmente.

O sensor é um circuito integrado que internamente possui um diafragma de silício, um extensômetro (*strain gauge*) e uma rede de resistores. Algumas das características apresentadas pelo fabricante são (FREESCALE, 2004):

- Medições de 0 a 10 Kpa;
- Sensibilidade típica de 2.5 mV/KPa;

- *Offset* de ± 1 mV;
- Compensação interna da variação de temperatura.

A saída do sensor é diferencial entre dois pinos de saída. Como o ganho em sua saída é baixo, foi utilizado um amplificador de instrumentação (INA 126) que facilita a aplicação de um alto ganho ao sinal pois o seu ganho só depende de um resistor externo, sendo bastante preciso. De acordo com o fabricante o ganho é dado pela expressão 3-1.

$$G = 5 + \frac{80.000}{R_g} \quad [3-1]$$

Em que R_g é o resistor externo que define o ganho (G).

Confeccionou-se uma placa de circuito impresso de 4,755 cm x 4,585 cm para receber o sensor, com um capacitor para a diminuição de ruídos e melhora da qualidade do sinal de saída e um circuito de ajuste de ganho e ajuste de *offset* para realizar a calibração do sensor de cada tanque. A Figura IV.1, nos anexos, apresenta o *layout* do circuito projetado.

O circuito para ajuste de ganho e *offset* foi projetado de forma que os ajustes são independentes. Uma mudança no ganho não acarreta em descalibração do *offset* e vice-versa. Com isso, o processo de ajuste dos sensores fica muito mais eficiente e prático. O *offset* foi projetado para variar entre aproximadamente -1 a +1 Volt. O ganho foi projetado para variar entre 357 e 1700. A Figura III.1, nos anexos, apresenta o esquemático do circuito projetado.

Os módulos foram condicionadas dentro de pequenas caixas plásticas de forma a se evitar contato dos sensores diretamente com o líquido dos tanques, prevenindo que os seus circuitos sejam danificados em algum acidente durante o experimento. A caixa possui orifícios que permitem ao acesso aos bornes, potenciômetros de ajuste de ganho e de *offset* e a saída de um tubo plástico conectado ao bocal do sensor. Este tubo plástico tem comprimento suficiente para chegar à base do tanque e fica protegido dentro de um cano oco de alumínio que serve para manter o tubo plástico na posição correta para realizar as medições. A Figura 3.3 mostra o módulo do sensor montado em sua caixa com a tampa aberta para a visualização do seu interior.

A saída do amplificador passa por um filtro de primeira ordem com frequência de corte de aproximadamente 1,6 KHz. O sinal filtrado sensor é levado para a o microcontrolador através de um cabo blindado, de forma a se evitar que ruídos e interferências prejudiquem as leituras, comprometendo a precisão do sensor de pressão.

Depois de implementada a estrutura física descrita, foram realizados testes para a medição de níveis de líquidos utilizando o sensor de pressão e o circuito de ajuste de ganho/*offset* já mencionados. Foi utilizado um microcontrolador PIC 18F252 para realizar a leitura das tensões analógicas do circuito. Seu conversor A/D é de 10 bits, resultando em 1024 níveis. Desta forma, como a medição é feita para até 50 cm, espera-se uma resolução de $500 \text{ mm}/1024 = 0,488 \text{ mm}$.

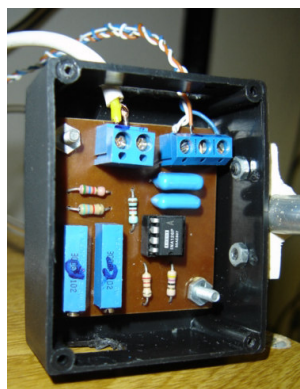


Figura 3.3 – Módulo de um sensor montado em sua caixa.

Ajustou-se o valor do ganho do sensor para que a leitura deste fosse próxima de 1023 para o valor de 50 cm de coluna de líquido. Assim, se garante que a saída da medida de altura do líquido nunca irá ultrapassar os 5V, o que poderia danificar a entrada do conversor A/D. Apesar deste ajuste, existe, por segurança, um circuito de proteção que limita a tensão de entrada para o conversor.

O processo de calibração consiste em primeiramente, com o tanque vazio, ajustar o *offset* para que o mesmo resulte em uma tensão de 0 Volt para o tanque vazio. Em seguida ajusta-se o ganho, enchendo o tanque até o seu limite e variando o mesmo até que a tensão na saída seja quase igual a 5 Volts. Realizou-se a coleta de dados para a calibração de cada sensor, amostrando-se pares de leitura do conversor A/D com a respectiva altura da coluna de líquido.

A partir das medições feitas, traçaram-se as curvas de calibração de cada sensor, obtendo-se as equações utilizadas no microcontrolador PIC para converter os dados obtidos no A/D em valores de altura da coluna de líquido.

3.3 MÓDULO DE ACIONAMENTO

Apesar das moto-bombas DC proporcionais utilizadas nos sistemas anteriores serem barulhentas, elas foram mantidas no projeto atual devido a não ter sido encontrado substituto que suprisse adequadamente as necessidades do sistema. Todas as alternativas testadas mostraram-se inviáveis devido à pequena capacidade de bombeamento.

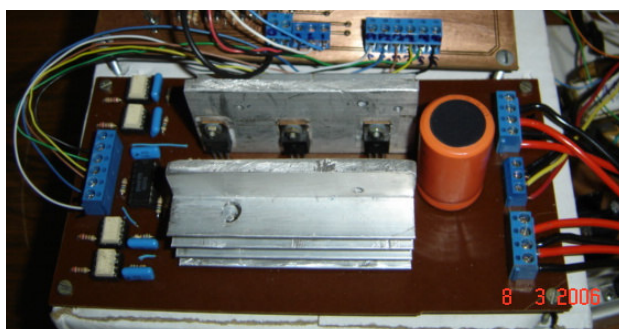


Figura 3.4 – Módulo de acionamento.

Decidiu-se então manter as bombas utilizadas nos outros dois sistemas de nível de líquidos anteriores, sendo que apenas se projetou novamente o circuito de acionamento das mesmas. As bombas escolhidas são moto-bombas DC proporcionais normalmente utilizadas no reservatório de limpadores de pára-brisa de carros, que operam com tensões entre 0 e 12V e cerca de 3,5A na tensão máxima.

O circuito de acionamento das bombas consiste em um MOSFET canal N (IRF 530) protegido por um diodo de acionamento rápido que fecha a alimentação do motor de acordo com o sinal de controle vindo de um PWM. Com isso, obtêm-se vazões variáveis através da modificação da largura de pulso do sinal de alimentação. Para evitar ruídos e interferências advindas do sinal de PWM na medição dos sensores de pressão, utilizaram-se opto-acopladores de modo a isolar eletricamente à parte de potência (acionamento dos motores) da parte de sinal (saída dos sensores). Foram utilizadas duas fontes de alimentação distintas, sendo uma para o circuito de mais alta potência (módulo de acionamento) e outra para a alimentação dos outros módulos. O esquemático elétrico do circuito do módulo de acionamento encontra-se na Figura IV.2, dos anexos.

Para tanto, confeccionou-se uma placa de acionamento dos motores (Figura 3.4) contendo entradas para os bornes de alimentação, entrada e saída de sinais e contendo todos os dispositivos descritos (opto-acopladores, MOSFETS e diodos). Por se tratar de um circuito pelo qual circula uma corrente de até 7A, a placa foi confeccionada com trilhas suficientemente largas para diminuir a resistência das trilhas e se evitar o aquecimento. O *layout* do circuito do módulo de acionamento encontra-se na Figura IV.2, dos anexos.

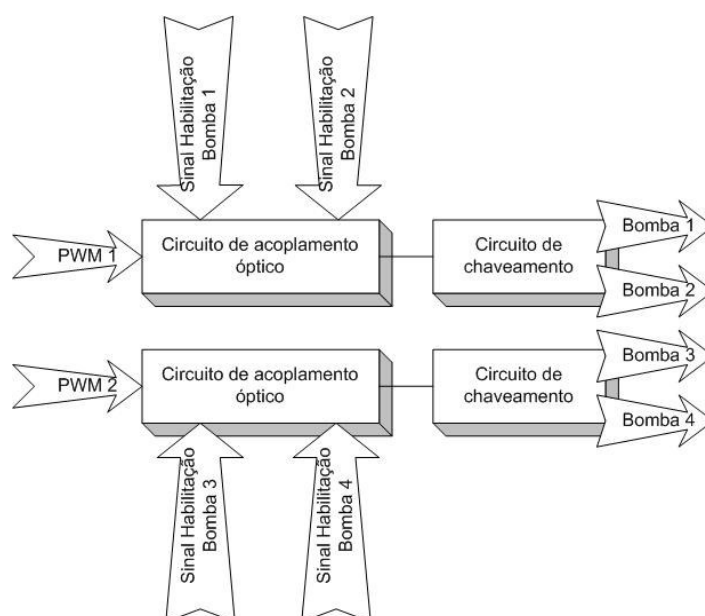


Figura 3.5 – Diagrama de blocos do módulo de acionamento.

Apesar da utilização dos opto-acopladores verificou-se após a montagem do módulo que o sinal dos sensores continuava sendo afetado pelo sinal do PWM, sendo provavelmente devido a algum ruído gerado no módulo de controle que estava afetando o sinal de alimentação da fonte que alimenta os sensores.

Um diagrama do módulo de acionamento é mostrado na Figura 3.5 para melhor entendimento do mesmo. O esquemático elétrico do circuito é mostrado na Figura III.2, dos anexos.

3.4 MÓDULO DE CONTROLE

Para a implementação do sistema de controle, faz-se necessária uma interface entre o computador e o sistema. Tal interface será feita através de um microcontrolador que além da comunicação com o computador, deverá ser responsável pela conversão dos sinais analógicos dos sensores e pelo envio do sinal de PWM adequado às bombas.

O sistema de Níveis de Líquidos proposto foi idealizado para ser flexível, podendo ser independente de um computador para realizar o acionamento. Desta forma, foram disponibilizadas saídas analógicas com os sinais dos sensores e entradas analógicas para receber algum comando externo vindo, por exemplo, de um PLC ou de um circuito externo de controle analógico.

O módulo de controle pode ser dividido em cinco partes:

- Microcontrolador PIC 18F252;
- Comunicação serial com o computador utilizando o padrão RS-232;
- Multiplexador analógico com proteção de excesso de tensão, para disponibilizar mais quatro entradas analógicas;
- *Buffers* com proteção e filtros para amplificar o sinal dos sensores e disponibilizá-los para um circuito externo;
- Saídas para o acionamento dos motores.

Um diagrama do módulo de controle é mostrado na Figura 3.6 para melhor entendimento do mesmo. O esquemático elétrico do circuito é mostrado na Figura III.5 e o *layout* da placa de circuito impresso é mostrado nos anexos, na Figura IV.3.

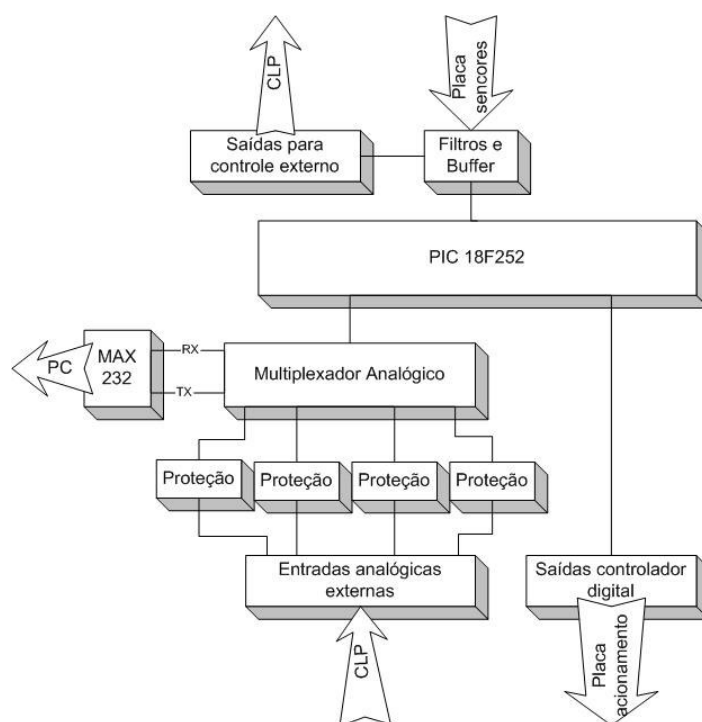


Figura 3.6 – Diagrama do Módulo de Controle.

O microcontrolador escolhido foi o PIC 18F252 do fabricante Microchip. Algumas de suas características são mostradas a seguir (MICROCHIP, 2005):

- Até 10 MIPS (Milhões de instruções por segundo), com arquitetura RISC;
- Memória Flash de 32 KBytes e RAM de 1536 Bytes;
- Vinte e oito pinos;
- Dois Módulos de PWM integrados;
- Um conversor A/D com cinco canais;

Este microcontrolador foi o escolhido por ser capaz de realizar todas as tarefas e por ser o mesmo já utilizado no LAVSI em outros projetos, sendo, desta forma, de fácil aprendizado.

Cabem ao microcontrolador todas as tarefas de leitura dos sinais dos sensores, atuação nas bombas através do PWM, comunicação com o computador para a recepção e envio de dados e acionar o sistema através de entradas analógicas externas.

Para a implementação da opção do controle a partir de sinais analógicos externos foi necessário o aumento do número de canais analógicos, pois o PIC18F252 possui somente cinco canais e quatro destes já deverão ser utilizados para a leitura dos sinais dos sensores.

Com isto, foi necessária a utilização de um multiplexador analógico. O componente escolhido foi o CD4051, que possui oito entradas analógicas, uma saída e três entradas digitais para a seleção de qual entrada deverá ser colocada na saída. Desta forma, foram disponibilizadas quatro entradas

analógicas que para serem lidas pelo microcontrolador, devem ser selecionadas através do programa que estará realizando o controle.

Para aumentar a flexibilidade do sistema foi colocado no módulo um *jumper* que permite selecionar se o controle deverá ser feito através dos parâmetros recebidos do computador ou se deverão ser utilizadas as entradas analógicas.

Para o caso deste último tipo de controle, as quatro entradas analógicas são os sinais que deverão ser aplicados às bombas. Cada bomba irá receber um sinal de tensão proporcional ao sinal de entrada correspondente. Vale ressaltar que somente uma bomba de cada tanque, é ligada por vez.

Para a proteção dos componentes do circuito foi decidido utilizar um circuito que limita a tensão para cada entrada analógica disponibilizada. O circuito de proteção é mostrado na Figura 3.7. O sinal de saída é limitado, aproximadamente, entre -0,7 e +5,7Volts.

Para os sinais dos sensores, além das proteções de limites de tensão na entrada, foram colocados filtros passa-baixas de primeira ordem, para reduzir o ruído que pode ter sido gerado na transmissão do sinal e para servir como *anti-aliasing*, evitando medições incorretas. Para estes filtros foram escolhidas freqüências de corte relativamente baixas, de aproximadamente 16Hz. Na saída dos módulos dos sensores há um filtro com freqüência de corte de 1,6 KHz.

Outra precaução utilizada para evitar ruídos foi a utilização de cabos blindados entre o sensor e o módulo de controle e os cabos utilizados para a alimentação dos módulos dos sensores foram trançados para evitar a indução de ruído eletromagnético sobre os mesmos.

Para realizar a comunicação serial com o computador foi utilizado o circuito integrado MAX232, que é responsável por converter os sinais do padrão RS232, entre +12 e -12 Volts, no padrão TTL, entre +5 e 0 Volts. Foi utilizada uma velocidade de comunicação de 19.200 bit/s.

Para disponibilizar o sinal dos sensores para um circuito externo foi colocado um *buffer* para cada sinal do sensor que é responsável por manter a mesma tensão enviada pelo sensor, sendo as saídas dos *buffers* disponibilizadas em um conector do tipo *borne*.

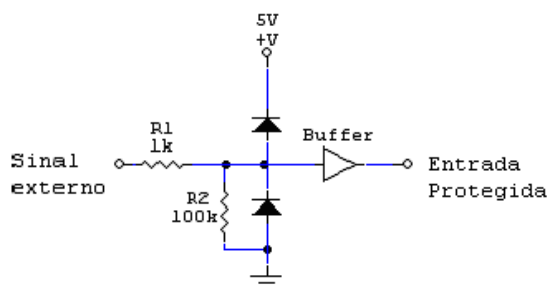


Figura 3.7 – Esquemático do circuito de proteção das entradas analógicas.

A gravadora do microcontrolador foi colocada em um outro circuito, sendo disponibilizada no módulo somente um conector para o recebimento dos sinais externos. Para realizar a gravação basta conectar a gravadora ao módulo e retirar um *jumper* que indica a gravação.

O cristal utilizado foi de 10MHz, utilizando internamente uma multiplicação do mesmo por 4 para obter-se 10 MIPS (Milhões de instruções por segundo).

Como o PIC 18F252 possui somente dois módulos de PWM, foi necessário o compartilhamento dos mesmos. Como há dois pares de motores, sendo um para retirar e outro para colocar água em cada tanque, tem-se que somente uma bomba de cada par irá ficar ligada e desta forma pode-se utilizar o mesmo sinal de PWM para as duas bombas, bastando utilizar uma seleção no programa do PIC que define qual bomba será acionada.

A frequência do PWM foi escolhida em 10 KHz. Para a configuração utilizada, o PIC possui uma resolução de 10 *bits*, sendo possível escolher 1024 níveis diferentes na saída (de 0 a 1023).

O PIC é responsável pelas tarefas de controle através de um programa que implementa um controlador PID. Foi implementado um programa no MATLAB que envia inicialmente os seguintes parâmetros para o PIC: K_p , K_i , K_d , o tipo de referência, o valor máximo e mínimo e o período da referência. O controlador foi implementado utilizando a técnica de *anti-windup* que é utilizada para inibir o canal integral quando o atuador se encontra saturado, diminuindo possíveis oscilações na saída devido a um excesso de integração do erro.

Como o sistema possui duas entradas de controle (q_{i1} e q_{i3}), foram implementados dois controladores independentes no PIC que funcionam simultaneamente, um para cada tanque controlável, obtendo-se, desta forma, um sistema MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas).

Foi utilizado o timer 1 para gerar interrupções a cada 20 ms, que é o período de amostragem do controle no PIC. O envio dos dados do PIC para o computador é realizado a cada dez interrupções, ou seja, a cada 200 ms, sendo enviados os dados da última leitura. O código do programa desenvolvido para o microcontrolador foi escrito em linguagem C e encontra-se listado no Anexo I. Na Figura 3.8 é mostrada uma imagem do módulo montado.

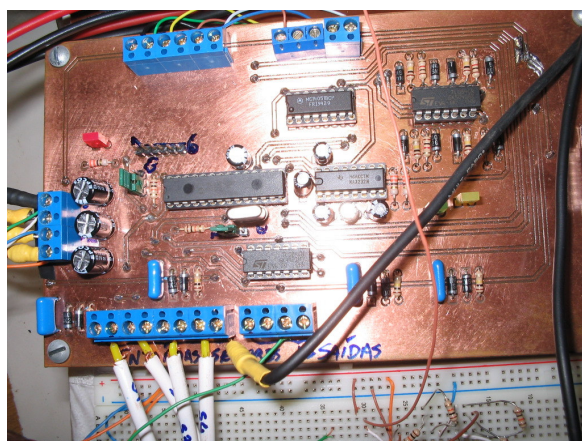


Figura 3.8 – Módulo de Controle montado.

3.5 INTERFACE COM O PC

Para realizar a comunicação entre o microcontrolador PIC e o PC, foi desenvolvido, em Matlab, um programa que envia e recebe dados pela saída serial do computador. Assim sendo, antes da realização de qualquer experimento, deve-se configurar nesse programa os valores dos parâmetros do controlador PID, o tipo e magnitude do sinal de referência (onda quadrada, triangular ou senoidal), seus períodos e o tempo de duração do experimento.

Isso permite que diversas configurações de experimentos sejam realizadas sem a necessidade de se reprogramar o microcontrolador, já que estes parâmetros são tidos como variáveis recebidas pelo PIC através da comunicação no início do experimento.

Tendo sido iniciada a execução do programa no Matlab e recebidos os parâmetros iniciais, o microcontrolador passa a realizar o controle dos tanques com base nos sinais de referência pré-determinados e envia para o PC, a cada 200 ms, os valores dos níveis dos tanques, o instante atual e o sinal de controle aplicado. Enquanto isso, o Matlab fornece uma animação do sistema, indicando o sinal de referência e o nível atual de líquido em cada tanque, como mostrado na Figura 3.9.

Finalizado o tempo de duração do experimento, o Matlab traça uma curva do experimento realizado e salva os dados recebidos junto com uma figura do gráfico obtido numa pasta pré-determinada do computador. O código do programa desenvolvido no Matlab encontra-se listado com comentários no Anexo II.

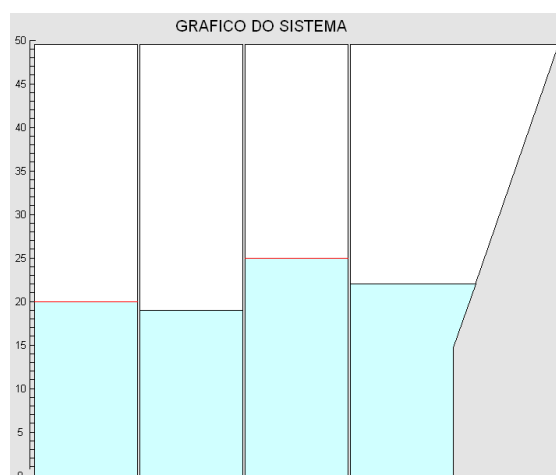


Figura 3.9 – Animação gráfica apresentada durante a execução do sistema.

3.6 MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS

Para um melhor entendimento das variáveis que serão utilizadas nesta seção, pode-se visualizar um esquema do sistema na Figura 3.10.

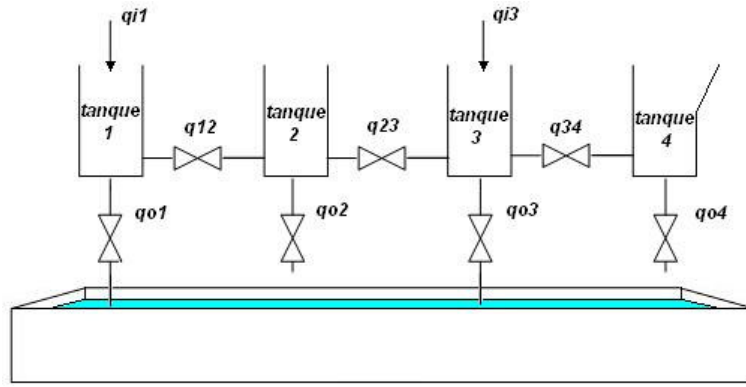


Figura 3.10 – Esquema do Sistema de Níveis de Líquidos.

Podem-se definir as seguintes variáveis referentes ao processo:

q_{i1} e q_{i3} : vazões de entrada de controle através das bombas nos tanques 1 e 3 respectivamente [cm^3/s];

q_{12} , q_{23} , q_{34} : vazões entre os tanques 1 e 2, 2 e 3 e 3 e 4, respectivamente, [cm^3/s];

q_{o1} , q_{o2} , q_{o3} e q_{o4} : vazões de saída nos tanques 1, 2, 3 e 4, respectivamente, [cm^3/s];

h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_0 : altura do nível de água nos tanques 1, 2, 3, 4 e reservatório, respectivamente [cm^3/s];

A_1 , A_2 , A_3 e A_4 : áreas das secções transversais dos tanques 1, 2, 3 e 4, respectivamente, [cm^2].

Aplicando a análise descrita na seção 2.1.1 para todos os tanques chegam-se às seguintes equações:

$$A_1(h_1) \frac{dh_1}{dt} = q_{i1}(t) - q_{o1}(t) - q_{12}(t) \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \quad [3-2]$$

$$A_2(h_2) \frac{dh_2}{dt} = q_{12}(t) \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) - q_{o2}(t) - q_{23}(t) \cdot \text{sign}(h_2(t) - h_3(t)) \quad [3-3]$$

$$A_3(h_3) \frac{dh_3}{dt} = q_{23}(t) \cdot \text{sign}(h_2(t) - h_3(t)) + q_{i3}(t) \dots \quad [3-4]$$

$$- q_{o3}(t) - q_{34}(t) \cdot \text{sign}(h_3(t) - h_4(t))$$

$$A_4(h_4) \frac{dh_4}{dt} = q_{34}(t) \cdot \text{sign}(h_3(t) - h_4(t)) - q_{o4}(t) \quad [3-5]$$

A função $\text{sign}(x)$ é definida da seguinte forma:

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \end{cases} \quad [3-6]$$

Esta função é utilizada para determinar o sinal das vazões entre os tanques que depende da diferença de altura dos níveis.

As áreas das secções transversais dos tanques 1, 2 e 3 podem ser consideradas constantes e iguais a 60 cm^2 . A largura do tanque 4 a partir de aproximadamente 14,7 cm de altura passa a aumentar linearmente chegando à altura máxima com aproximadamente 20,2 cm, como pode ser melhor observado na Figura 3.1. A área A_4 depende do nível h_4 de acordo com a seguinte relação:

$$A_4(h_4) = \begin{cases} 60 \text{ cm}^2, & \text{se } h_4 < 14,7 \text{ cm} \\ \left((h_4 - 14,7) \cdot \frac{20,2 - 10}{49,5 - 14,7} + 10 \right) \cdot 6 \text{ cm}^2, & \text{se } h_4 \geq 14,7 \text{ cm} \end{cases} \quad [3-7]$$

Como pode ser observado na expressão anterior, com h_4 valendo 14,7 cm, tem-se uma área de 60 cm^2 , e com h_4 igual a 49,5 cm, tem-se uma área de $121,2 \text{ cm}^2$, como era desejado.

A área dos tubos que são conectados aos sensores pode ser desprezada por ser inferior a $0,5 \text{ cm}^2$, não representando uma alteração significativa na área do tanque.

Os parâmetros q_{i1} e q_{i3} são determinados pela vazão fornecida pelas bombas que são utilizadas para o controle do sistema. Foram realizados experimentos para a calibração das bombas variando a tensão aplicada sobre as mesmas, obtendo, desta forma, um modelo que é utilizado pelo programa de controle para converter o sinal de controle de um valor em vazão para um valor em tensão e aplicá-lo sobre as bombas.

Para o Sistema descrito neste trabalho, as equações que determinam as vazões são as seguintes:

$$q_{o1}(t) = K_{o1} \cdot \sqrt{h_1(t) - h_0(t)} \quad [3-8]$$

$$q_{o2}(t) = K_{o2} \cdot \sqrt{h_2(t)} \quad [3-9]$$

$$q_{o3}(t) = K_{o3} \cdot \sqrt{h_3(t) - h_0(t)} \quad [3-10]$$

$$q_{o4}(t) = K_{o4} \cdot \sqrt{h_4(t)} \quad [3-11]$$

$$q_{12}(t) = K_{12} \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} \quad [3-12]$$

$$q_{23}(t) = K_{23} \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} \quad [3-13]$$

$$q_{34}(t) = K_{34} \cdot \sqrt{|h_3(t) - h_4(t)|} \quad [3-14]$$

Substituindo as equações das vazões dadas pelas expressões de 3-8 a 3-14 nas expressões do equilíbrio de massa do sistema, obtêm-se as seguintes equações:

$$A_1(h_1) \frac{dh_1}{dt} = q_{i1}(t) - K_{o1} \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_0(t)|} - \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot K_{12} \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} \quad [3-15]$$

$$A_2(h_2) \frac{dh_2}{dt} = \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot K_{12} \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - K_{o2} \cdot \sqrt{|h_2(t)|} \dots \dots - \text{sign}(h_2(t) - h_3(t)) \cdot K_{23} \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} \quad [3-16]$$

$$A_3(h_3) \frac{dh_3}{dt} = q_{i3}(t) + \text{sign}(h_2(t) - h_3(t)) \cdot K_{23} \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} + \dots \dots + K_{o3} \cdot \sqrt{|h_3(t) - h_o(t)|} - \text{sign}(h_3(t) - h_4(t)) \cdot K_{34} \cdot \sqrt{|h_3(t) - h_4(t)|} \quad [3-17]$$

$$A_4(h_4) \frac{dh_4}{dt} = \text{sign}(h_3(t) - h_4(t)) \cdot K_{34} \cdot \sqrt{|h_3(t) - h_4(t)|} - K_{o4} \cdot \sqrt{|h_4(t)|} \quad [3-18]$$

A obtenção do modelo linearizado do sistema (vide seção 2.1.2) pode ser feita para um ponto de operação. As resistências do Sistema são dadas pelas seguintes expressões:

$$R_{o1} = \frac{2 \cdot (\overline{H}_1 - \overline{H}_o)}{\overline{Q}_{o1}} = \frac{2 \cdot \sqrt{|\overline{H}_1 - \overline{H}_o|}}{K_{o1}} \quad [3-19]$$

$$R_{o2} = \frac{2 \cdot \overline{H}_2}{\overline{Q}_{o2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\overline{H}_2}}{K_{o2}} \quad [3-20]$$

$$R_{o3} = \frac{2 \cdot (\overline{H}_3 - \overline{H}_o)}{\overline{Q}_{o3}} = \frac{2 \cdot \sqrt{|\overline{H}_3 - \overline{H}_o|}}{K_{o3}} \quad [3-21]$$

$$R_{o4} = \frac{2 \cdot \overline{H}_4}{\overline{Q}_{o4}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\overline{H}_4}}{K_{o4}} \quad [3-22]$$

$$R_{12} = \frac{2 \cdot (\overline{H}_1 - \overline{H}_2)}{\overline{Q}_{12}} = \frac{2 \cdot \text{sign}(\overline{H}_1 - \overline{H}_2) \cdot \sqrt{|\overline{H}_1 - \overline{H}_2|}}{K_{12}} \quad [3-23]$$

$$R_{23} = \frac{2 \cdot (\overline{H}_2 - \overline{H}_3)}{\overline{Q}_{23}} = \frac{2 \cdot \text{sign}(\overline{H}_2 - \overline{H}_3) \cdot \sqrt{|\overline{H}_2 - \overline{H}_3|}}{K_{23}} \quad [3-24]$$

$$R_{34} = \frac{2 \cdot (\overline{H}_3 - \overline{H}_4)}{\overline{Q}_{34}} = \frac{2 \cdot \text{sign}(\overline{H}_3 - \overline{H}_4) \cdot \sqrt{|\overline{H}_3 - \overline{H}_4|}}{K_{34}} \quad [3-25]$$

Como o sistema está linearizado no ponto de operação, as equações lineares do sistema podem ser utilizadas para pequenas variações em torno do ponto de operação. Assim, tem-se:

$$\delta q_{o1} = \frac{\delta h_1 - \delta h_o}{R_{o1}} \quad [3-26]$$

$$\delta q_{o2} = \frac{\delta h_2}{R_{o2}} \quad [3-27]$$

$$\delta q_{o3} = \frac{\delta h_3 - \delta h_o}{R_{o3}} \quad [3-28]$$

$$\delta q_{o4} = \frac{\delta h_4}{R_{o4}} \quad [3-29]$$

$$\delta q_{12} = \frac{\delta h_1 - \delta h_2}{R_{12}} \quad [3-30]$$

$$\delta q_{23} = \frac{\delta h_2 - \delta h_3}{R_{23}} \quad [3-31]$$

$$\delta q_{34} = \frac{\delta h_3 - \delta h_4}{R_{34}} \quad [3-32]$$

As capacitâncias equivalem à área da seção transversal, desta forma, tem-se:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_2 = C_3 = A_1 = A_2 = A_3 \\ C_4 &= A_4(\overline{H}_4) \end{aligned} \quad [3-33]$$

Desta forma, obtém-se o modelo a seguir realizando a soma das vazões em cada tanque.

$$\frac{d\delta h_1}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot \left(\delta q_{i1} - \frac{\delta h_1 - \delta h_o}{R_{o1}} - \frac{\delta h_1 - \delta h_2}{R_{12}} \right) = \frac{1}{C_1} \cdot \left(u_1 - \frac{\delta h_1}{R_{o1}} - \frac{\delta h_1}{R_{12}} + \frac{\delta h_2}{R_{12}} + \frac{\delta h_o}{R_{o1}} \right) \quad [3-34]$$

$$\frac{d\delta h_2}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot \left(\frac{\delta h_1 - \delta h_2}{R_{12}} - \frac{\delta h_2 - \delta h_3}{R_{23}} - \frac{\delta h_2}{R_{o2}} \right) = \frac{1}{C_2} \cdot \left(\frac{\delta h_1}{R_{12}} - \frac{\delta h_2}{R_{12}} - \frac{\delta h_2}{R_{23}} - \frac{\delta h_2}{R_{o2}} + \frac{\delta h_3}{R_{23}} \right) \quad [3-35]$$

$$\begin{aligned}\frac{d\delta h_3}{dt} &= \frac{1}{C_3} \cdot \left(\delta q_{i3} + \frac{\delta h_2 - \delta h_3}{R_{23}} - \frac{\delta h_3 - \delta h_4}{R_{34}} - \frac{\delta h_3 - \delta h_o}{R_{o3}} \right) \\ &= \frac{1}{C_3} \cdot \left(u_3 + \frac{\delta h_2}{R_{23}} - \frac{\delta h_3}{R_{23}} - \frac{\delta h_3}{R_{34}} - \frac{\delta h_3}{R_{o3}} + \frac{\delta h_4}{R_{34}} + \frac{\delta h_o}{R_{o3}} \right)\end{aligned}\quad [3-36]$$

$$\frac{d\delta h_4}{dt} = \frac{1}{C_4} \cdot \left(\frac{\delta h_3 - \delta h_4}{R_{34}} - \frac{\delta h_4}{R_{o4}} \right) = \frac{1}{C_4} \cdot \left(\frac{\delta h_3}{R_{34}} - \frac{\delta h_4}{R_{34}} - \frac{\delta h_4}{R_{o4}} \right) \quad [3-37]$$

$$\begin{aligned}\frac{d\delta h_o}{dt} &= \frac{1}{C_o} \cdot \left(\frac{\delta h_1 - \delta h_o}{R_{o1}} + \frac{\delta h_2}{R_{o2}} + \frac{\delta h_3 - \delta h_o}{R_{o3}} + \frac{\delta h_4}{R_{o4}} - \delta q_{i1} - \delta q_{i3} \right) \\ &= \frac{1}{C_o} \cdot \left(-u_1 - u_3 + \frac{\delta h_1}{R_{o1}} + \frac{\delta h_2}{R_{o2}} + \frac{\delta h_3}{R_{o3}} + \frac{\delta h_4}{R_{o4}} - \frac{\delta h_o}{R_{o1}} - \frac{\delta h_o}{R_{o3}} \right)\end{aligned}\quad [3-38]$$

As equações de 3-34 a 3-38 podem ser reescritas na forma tradicional de um modelo de Espaço de Estados, sendo δq_{i1} e δq_{i3} os sinais de controle u_1 e u_3 respectivamente e considerando os níveis de cada tanque e do reservatório principal (δh_o) como sendo as variáveis de estado.

$$\begin{bmatrix} C_1 \cdot \dot{x}_1 \\ C_2 \cdot \dot{x}_2 \\ C_3 \cdot \dot{x}_3 \\ C_4 \cdot \dot{x}_4 \\ C_o \cdot \dot{x}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_{o1}} + \frac{1}{R_{12}}\right) & \frac{1}{R_{12}} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{o1}} \\ \frac{1}{R_{12}} & -\left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_{o2}}\right) & \frac{1}{R_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{23}} & -\left(\frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_{34}} + \frac{1}{R_{o3}}\right) & \frac{1}{R_{34}} & \frac{1}{R_{o3}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{34}} & -\left(\frac{1}{R_{34}} + \frac{1}{R_{o4}}\right) & 0 \\ \frac{1}{R_{o1}} & \frac{1}{R_{o2}} & \frac{1}{R_{o3}} & \frac{1}{R_{o4}} & -\left(\frac{1}{R_{o1}} + \frac{1}{R_{o3}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad [3-39]$$

Com este modelo do Sistema de Níveis de Líquidos do Laboratório podem ser estimados os diversos parâmetros para a utilização do modelo para simulações ou para o projeto de controladores, por exemplo. Como pode ser percebido na expressão 3-39, o sistema possui 5 variáveis de estados, sendo que 4 são medidas pelos sensores e a outra pode ser obtida conhecendo-se o nível inicial do reservatório principal do sistema. Na configuração atual é possível a realização de experimentos de até a 4ª ordem, utilizando como sinal de entrada o q_{i1} e como saída o nível h_4 .

Nas próximas seções serão descritos alguns experimentos que foram realizados para a identificação destes parâmetros.

3.7 PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DAS MOTO-BOMBAS DC

O sistema implementado possui quatro bombas, sendo duas ligadas ao tanque 1 e duas ao tanque 3. Para cada par de bombas, uma é utilizada para colocar água no respectivo tanque, fornecendo uma

vazão positiva, e a outra é utilizada para retirar água do respectivo tanque, fornecendo uma vazão negativa, considerando o sentido de vazão adotado no modelo do Sistema.

Sabendo-se que a dinâmica das moto-bombas é muito mais rápida que a dinâmica dos tanques, esta foi desprezada no processo de modelamento do sistema. Considerar-se-á que tais bombas estão sempre em regime permanente de funcionamento, desprezando-se os transitórios.

Como já foi descrito anteriormente, é desejável obter um modelo matemático que represente a vazão de saída de cada bomba dependendo da tensão aplicada sobre a mesma. Para a identificação das vazões, foi proposto um experimento no qual é aplicada uma tensão constante sobre a bomba que se deseja identificar, sendo medido o tempo que a mesma gasta para levar o nível do respectivo tanque entre dois valores escolhidos. Com o tempo medido, e medindo-se o volume de líquido que foi deslocado, pode-se obter a vazão média de acordo com a seguinte expressão:

$$q = \frac{dv}{dt} = A \cdot \frac{dh}{dt} \quad [3-40]$$

De posse dos dados, foram obtidas as curvas de calibração das moto-bombas. Vale observar que, devido às características construtivas das mesmas, existe uma zona-morta e uma zona de saturação. Na zona morta (valores de tensão entre 0 e 3 Volts), a vazão é igual a zero, enquanto na zona de saturação (valores de tensão maiores que 11 Volts) a vazão mantém-se constante.

3.8 PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Tendo sido obtidos os modelos para as vazões em cada bomba, resta a determinação dos parâmetros que relacionam a vazão com a altura de cada nível, ou seja, os diversos parâmetros “k” descritos anteriormente no modelo do Sistema. A seguir serão descritos os experimentos realizados para a determinação dos mesmos.

Inicialmente foram identificados os parâmetros K_{02} e K_{04} . Para tal, controlaram-se os níveis dos tanques 2 e 4 em aproximadamente 46 cm, mantendo as válvulas entre os tanques 1 e 2 e 3 e 4 abertas. Em seguida estas válvulas foram fechadas permitindo o esvaziamento dos tanques através das válvulas K_{02} e K_{04} . Com estes dados foi possível obter uma aproximação da vazão a cada amostra do tempo.

Relembrando a equação que relaciona a vazão do tanque com a sua altura, tem-se:

$$q = k \cdot \sqrt{h} \quad [3-41]$$

A equação anterior pode ser reescrita para fornecer k como função de q e h:

$$k = \frac{q}{\sqrt{h}} \quad [3-42]$$

Construiu-se um gráfico que relaciona a vazão (q) com a raiz da altura e o mesmo foi aproximado por uma reta através do método de mínimos quadrados. A inclinação desta reta é o parâmetro desejado, k .

Outros parâmetros de interesse são os coeficientes que determinam a vazão entre os quatro tanques do sistema. Como estes consistem em válvulas variáveis, foi necessária a calibração dos mesmos em diversos ajustes diferentes. Os parâmetros de interesse são denominados: K_{12} , K_{23} e K_{34} .

Para a determinação dos mesmos foi utilizada a expressão que determina a vazão entre dois tanques, como mostrado a seguir para os tanques 1 e 2, como exemplo:

$$q_{12}(t) = K_{12}(x) \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} \quad [3-43]$$

em que x é a posição da válvula, que pode ir de 0 a 11, variando da válvula totalmente fechada até estar totalmente aberta.

No experimento realizado foi controlado o nível do tanque 1 em um valor, e medida a diferença da altura entre os níveis dos tanques 1 e 2. Foi necessário fechar a saída de água do tanque 1 (q_{o1}) para que toda a vazão fornecida pela bomba passasse entre os tanques e saísse pelo tanque 2 (q_{o2}). Desta forma, tem-se:

$$q_{i1} = q_{12} = q_{o2} \quad [3-44]$$

Assim, utilizando a identificação realizada para as vazões das moto-bombas, pode-se obter o parâmetro desejado através da seguinte expressão:

$$K_{12}(x) = \frac{q_{12}(t)}{\sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}} \quad [3-45]$$

Finalmente, restam ser determinados os parâmetros que relacionam a vazão de saída de água nos tanques 1 e 3, através das suas bombas que se encontram desligadas. Como já foi descrito anteriormente, a vazão, neste caso, depende da diferença entre a altura do nível do tanque e a altura do nível do reservatório de água, sendo a bomba que se encontra desligada, uma válvula por onde passará a água.

Como no projeto inicial do sistema só foi prevista a medição de quatro níveis de líquidos, não foi possível a medição do nível do reservatório e para realizar esta identificação foi necessária a utilização de um modelo que determina a altura do reservatório, dependendo da quantidade de água que se encontra nos outros tanques. Foi observado que a influência da variação do nível do reservatório no comportamento da saída dos tanques 1 e 3 não é significativo e, portanto, aproximações são válidas.

Conhecendo-se a diferença entre as alturas do nível do tanque e do nível do reservatório, podem-se obter os parâmetros desejados, K_{o1} e K_{o3} , controlando o nível do tanque em um valor e obtendo a vazão que se fez necessária para realizar o controle. O modelo utilizado para o tanque 1 foi o seguinte:

$$q_{o1}(t) = K_{o1} \cdot \sqrt{h_1(t) + \Delta h_{furos} - h_0(t)} \quad [3-46]$$

Em que h_1 é o nível do tanque 1, h_0 é o nível do reservatório com relação ao seu próprio fundo e Δh_{furos} é a diferença de altura existente entre os fundos dos tanques.

Um ponto positivo dos experimentos utilizados para a identificação dos parâmetros do sistema é que foi necessária apenas a identificação dos motores para a realização da identificação dos outros parâmetros, evitando, desta forma, a propagação de possíveis erros na estimação dos parâmetros da planta, caso o método utilizado para determinar um parâmetro dependesse dos outros parâmetros identificados.

3.9 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Com o intuito de validar uma identificação e verificar o modelo matemático utilizado, pode-se realizar uma simulação do sistema no computador através das equações diferenciais que descrevem o mesmo.

A simulação consiste na aproximação das equações obtidas por equações no domínio discreto do tempo, sendo necessária a definição de um período de amostragem, escolhido igual ao utilizado no PIC (20 ms) para o controle do sistema.

A aproximação da derivada de um sinal digital pode ser feita através da fórmula de Euler (FRANKLIN, 1998):

$$\frac{dx}{dt} \cong \frac{x(k) - x(k-1)}{T} \quad [3-47]$$

em que k é o tempo discreto e T é o período de amostragem utilizado.

Neste caso, as expressões de 3-15 a 3-18 podem ser utilizadas para determinar o valor da saída na próxima amostra, chegando-se às seguintes expressões:

$$h_1(k) = \frac{T}{A_1} \cdot \left(q_{i1}(k-1) - K_{o1} \sqrt{h_1(k-1) + \Delta h_{furos} - h_o(k-1)} \dots \right. \\ \left. - \text{sign}(h_1(k-1) - h_2(k-1)) \cdot K_{12} \cdot \sqrt{|h_1(k-1) - h_2(k-1)|} \right) + h_1(k-1) \quad [3-48]$$

$$h_2(k) = \frac{T}{A_2} \cdot \left(K_{o2} \sqrt{h_2(k-1)} + \text{sign}(h_1 - h_2) \cdot K_{12} \cdot \sqrt{|h_1(k-1) - h_2(k-1)|} \dots \right. \\ \left. - \text{sign}(h_2(k-1) - h_3(k-1)) \cdot K_{23} \cdot \sqrt{|h_2(k-1) - h_3(k-1)|} \right) + h_2(k-1) \quad [3-49]$$

$$\begin{aligned}
h_3(k) = & \frac{T}{A_3} \cdot \left(q_{i3}(k-1) + K_{o3} \sqrt{h_3(k-1) + \Delta h_{furos} - h_o(k-1)} \dots \right. \\
& \left. sign(h_2 - h_3) \cdot K_{23} \cdot \sqrt{|h_2(k-1) - h_3(k-1)|} \dots \right. \\
& \left. - sign(h_3(k-1) - h_4(k-1)) \cdot K_{34} \cdot \sqrt{|h_3(k-1) - h_4(k-1)|} \right) + h_3(k-1)
\end{aligned} \tag{3-50}$$

$$\begin{aligned}
h_4(k) = & \frac{T}{A_4(h_4)} \cdot \left(sign(h_3(k-1) - h_4(k-1)) \cdot K_{34} \cdot \sqrt{|h_3(k-1) - h_4(k-1)|} \dots \right. \\
& \left. + K_{o4} \sqrt{h_4(k-1)} \right) + h_4(k-1)
\end{aligned} \tag{3-51}$$

Com o intuito de dar mais realidade à simulação, foi utilizado um modelo do nível de água no reservatório principal (h_0), que é necessário na simulação e que varia dependendo dos níveis atuais dos quatro tanques e da quantidade de água inicial. Também foi gerada uma perturbação aleatória para ser somada às estimativas realizadas e servir como um ruído nas estimativas realizadas, aproximando ainda mais a simulação do que foi obtido no sistema real.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO

Nos gráficos da Figura 4.1, a abscissa mostra o nível da água no tanque e a ordenada mostra o valor do número inteiro correspondente à tensão lida pelo microcontrolador no conversor AD, em que 1023 corresponde a 5 Volts. Como pode ser percebido, a resposta do sensor foi linear, como era esperado. As curvas obtidas foram aproximadas por uma reta, fornecendo modelos estimados de cada sensor. Observar que o *offset* das curvas obtidas foi suprimido, já que nesta calibração buscava-se obter apenas o valor do ganho, com *offset* tendo sido zerado em ajuste independente num momento anterior. A seguir são mostrados os modelos estimados obtidos para cada sensor:

$$V_{ad1} = 21,0109679.h_1 \quad [4-1]$$

$$V_{ad2} = 20,9889092.h_2 \quad [4-2]$$

$$V_{ad3} = 20,92606194.h_3 \quad [4-3]$$

$$V_{ad4} = 21,098982712.h_4 \quad [4-4]$$

Em que V_{ad} é o valor da tensão lida pelo conversor A/D e h é o nível do líquido.

Para, obter o nível do líquido a partir da leitura do conversor basta inverter a equação, obtendo-se:

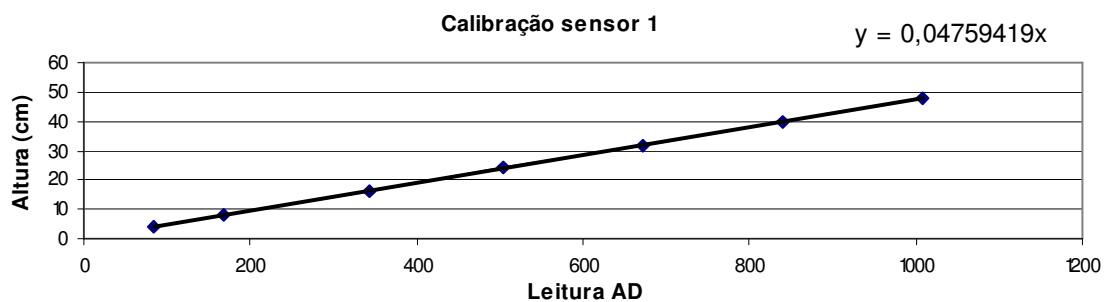
$$h_1 = 0,04759419.V_{ad1} \quad [4-5]$$

$$h_2 = 0,04764421.V_{ad2} \quad [4-6]$$

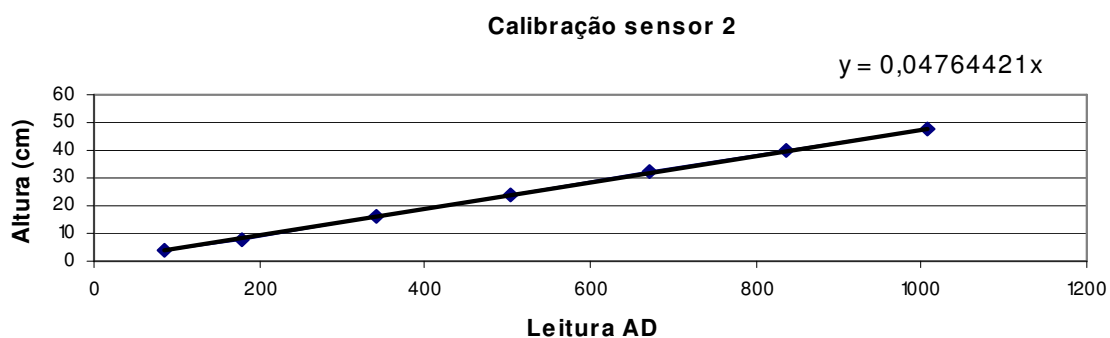
$$h_3 = 0,04778730.V_{ad3} \quad [4-7]$$

$$h_4 = 0,04739565.V_{ad4} \quad [4-8]$$

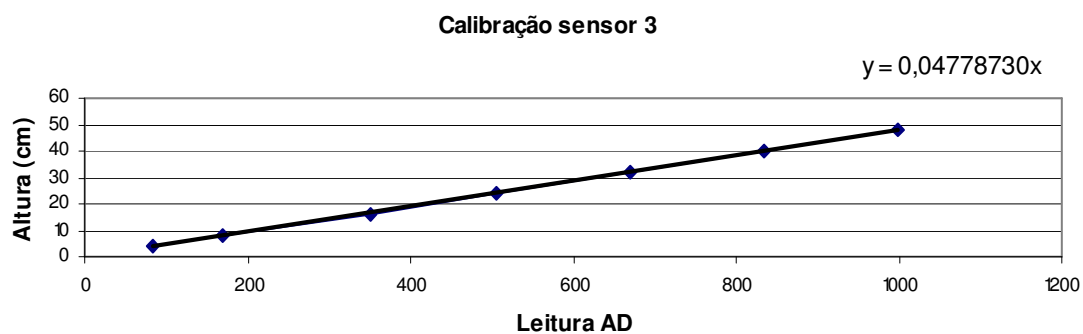
Após a calibração foram feitos testes que mostraram o correto funcionamento do sistema de medição. Um problema observado foi para níveis mais elevados, onde os sensores apresentaram um aumento do nível de ruído. Tal aumento deve-se, provavelmente ao fato de aumentar a turbulência da água próximo ao ponto de medição, no fundo do tanque, já que para níveis mais altos a vazão de entrada para realizar o controle é maior.



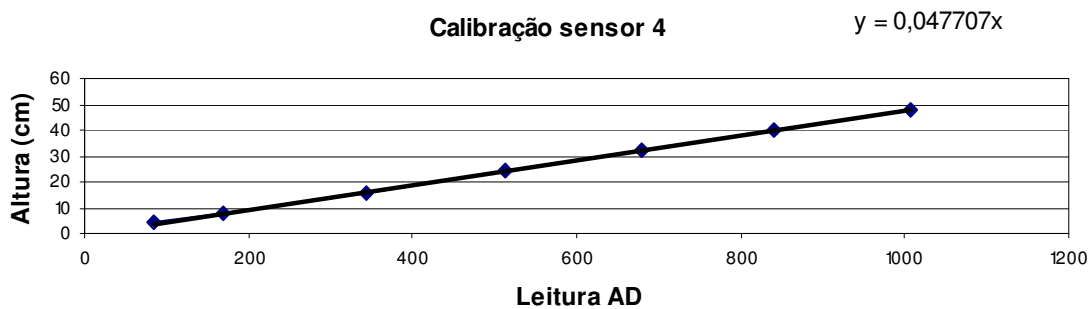
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.1 – Curvas de calibração dos sensores de pressão. (a) Sensor 1; (b) Sensor 2; (c) Sensor 3; (d) Sensor 4.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS MOTO-BOMBAS

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados das identificações das quatro bombas, variando a tensão aplicada de 3 a 12 Volts em intervalos de 1 Volt.

As curvas obtidas foram aproximadas por equações do segundo grau que aproximaram satisfatoriamente as vazões. Foi observado um comportamento de zona-morta das saídas para valores de tensão inferiores a 3 Volts e de saturação para valores superiores a 11 Volts e, por isso, estes pontos foram excluídos das curvas para uma melhor aproximação.

As equações que relacionam a tensão aplicada sobre cada bomba à sua vazão são mostradas a seguir:

$$V_1 = 0,0017.q_1^2 - 0,0065.q_1 + 2,7655 \quad [4-9]$$

$$V_2 = 0,0009.q_2^2 + 0,0612.q_2 + 0,6107 \quad [4-10]$$

$$V_3 = 0,001.q_3^2 - 0,0417.q_3 + 2,2312 \quad [4-11]$$

$$V_4 = 0,0007.q_4^2 + 0,0238.q_4 + 1,4161 \quad [4-12]$$

A partir das curvas obtidas, estimaram-se as equações de calibração das bombas, que serão utilizadas pelo microcontrolador PIC para converter os valores de tensão aplicados nas bombas em valores de vazão obtidos em suas saídas.

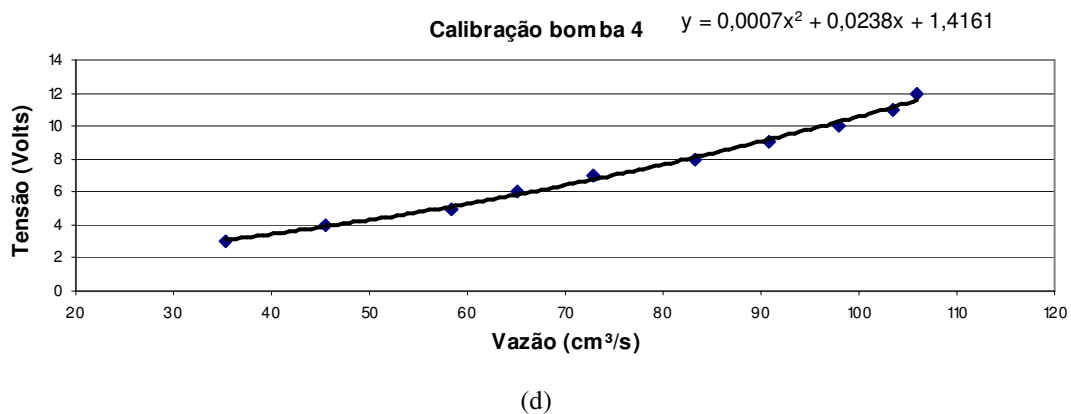
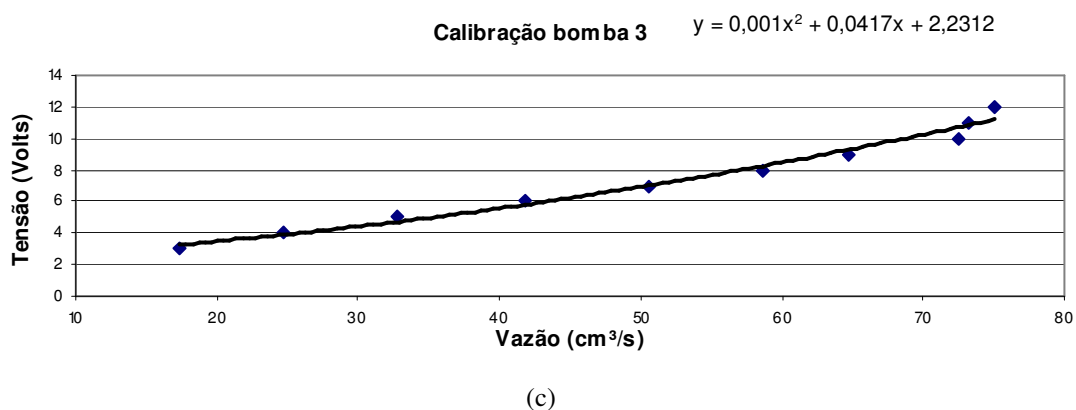
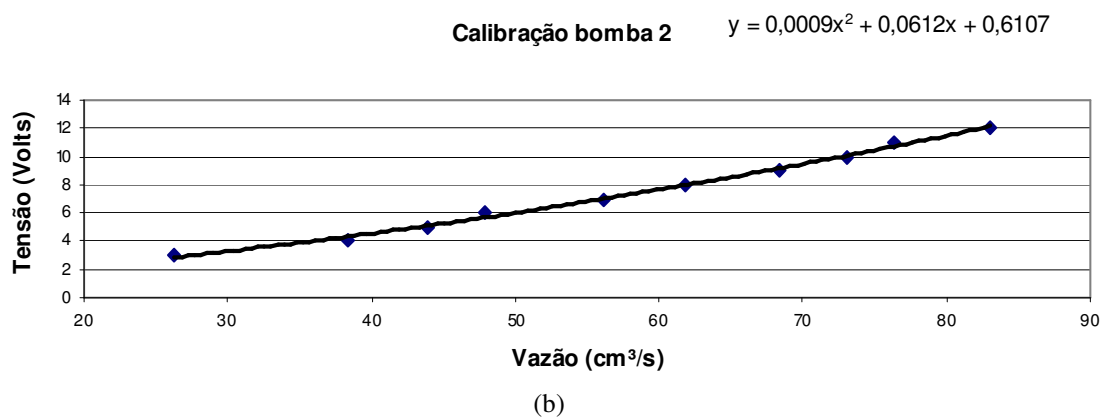
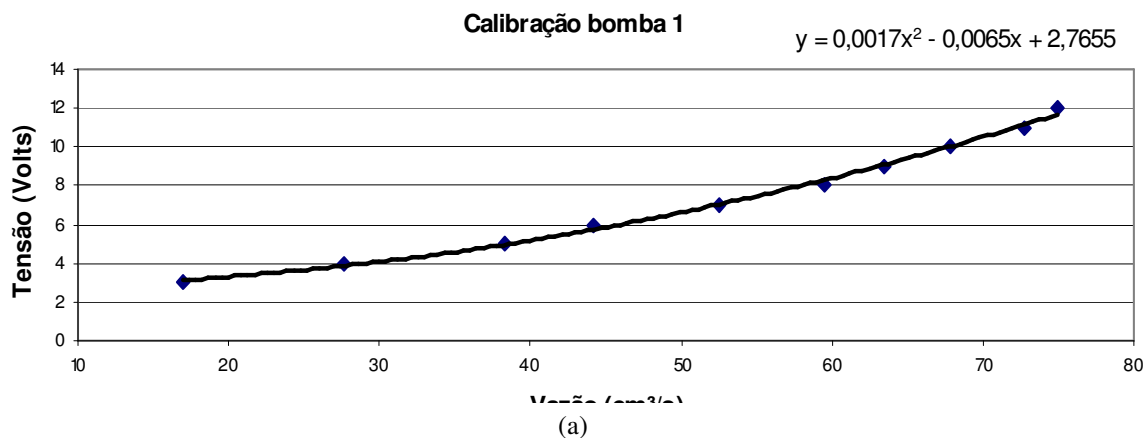


Figura 4.2 – Curvas de calibração das moto-bombas. (a) Bomba 1; (b) Bomba 2; (3) Bomba 3; (4) Bomba 4

4.3 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Foram realizados os experimentos descritos na seção 3.8 para a identificação dos parâmetros do modelo do sistema, utilizando a identificação das vazões de cada moto-bomba descritas na seção anterior.

Para os parâmetros K_{o2} e K_{o4} , como já foi descrito anteriormente, o experimento consistiu no controle dos tanques em um nível alto (46 cm), e em seguida foi permitido que os tanques esvaziassem independentemente dos outros. A Figura 4.3 e a Figura 4.4 mostram o comportamento do esvaziamento dos tanques 2 e 4.

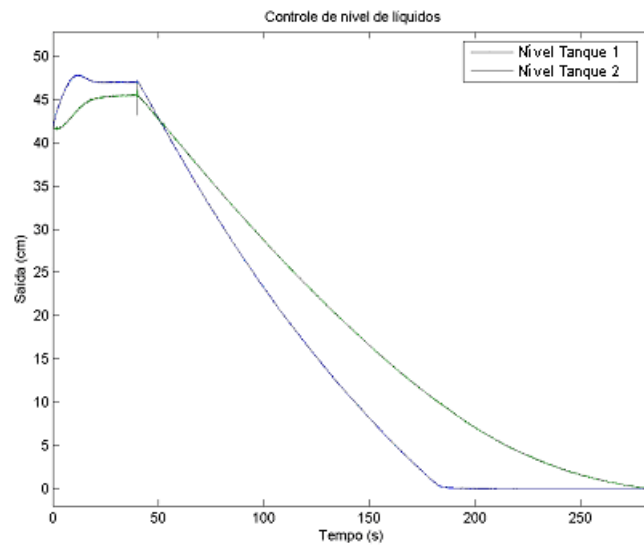


Figura 4.3 – Curva obtida no experimento de controle e esvaziamento do tanque 2 para a estimação do parâmetro K_{o2} .

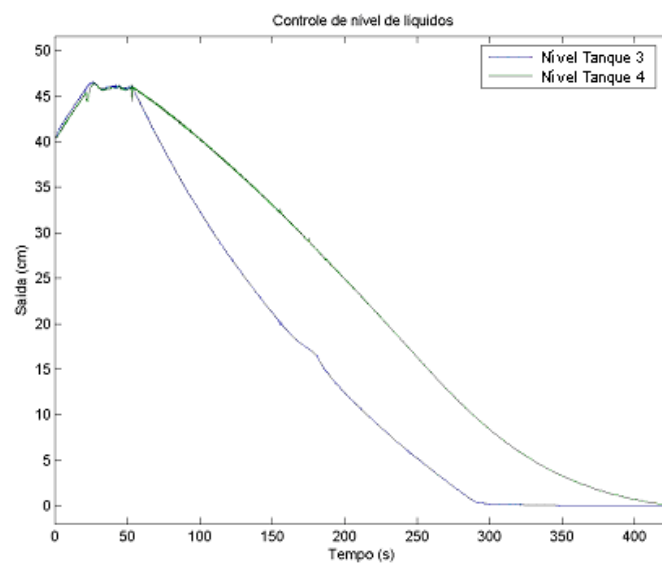


Figura 4.4 – Curva obtida no experimento de controle e esvaziamento do tanque 4 para estimação do parâmetro K_{o4} .

Utilizando os dados obtidos para aproximar a vazão e fazendo um gráfico da raiz quadrada da altura em cada ponto tem-se os resultados ilustrados na Figura 4.5 para K_{o2} e na Figura 4.6 para K_{o4} . Apesar de oscilar em torno da reta que aproxima os dados, os mesmos seguem uma tendência aproximada pela reta mostrando que o modelo aproximou o comportamento do esvaziamento dos tanques corretamente.

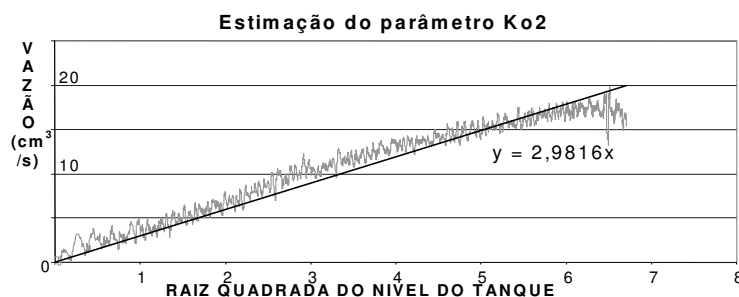


Figura 4.5 – Gráfico utilizado para a estimativa do parâmetro K_{o2} que é obtido a partir da inclinação da reta que melhor aproxima os pontos.



Figura 4.6 – Gráfico utilizado para a estimativa do parâmetro K_{o4} , que é obtido a partir da inclinação da reta que melhor aproxima os pontos.

Aproximando os gráficos por retas que passam pela origem, utilizando o Método de Mínimos Quadrados, obtêm-se os parâmetros desejados:

$$\hat{K}_{o2} = 2,9816 \left[\frac{cm^{2,5}}{s} \right]$$

$$\hat{K}_{o4} = 2,5057 \left[\frac{cm^{2,5}}{s} \right]$$

Na Figura 4.7 é apresentado o resultado do controle do nível do tanque 3 que foi realizado com a válvula entre os tanques 2 e 3 na posição 3, 2 e 4, variando a mesma manualmente durante o experimento após o nível do tanque três ter sido controlado corretamente e o nível do tanque 2 ter se estabilizado no seu novo valor.

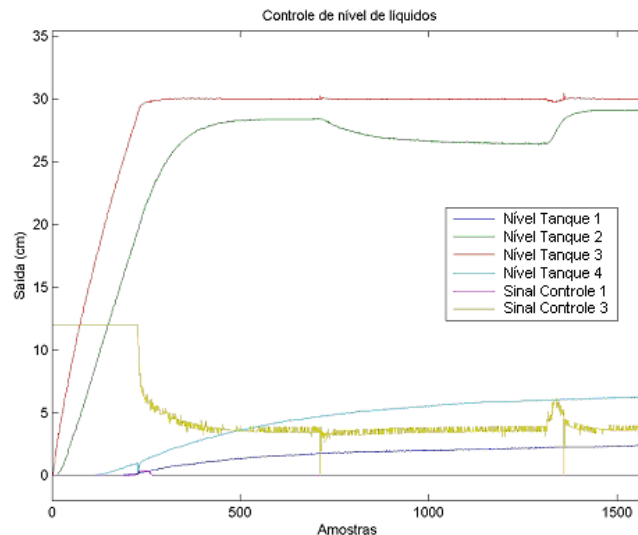


Figura 4.7 – Curva obtida no experimento de controle para estimação do parâmetro K_{23} .

Como pode ser percebido no gráfico da Figura 4.7, o controlador utilizado, devido ao canal integral, foi capaz de zerar o erro da saída, mesmo com a variação da válvula, assim como era esperado. Foi observada a grande capacidade dos controladores PI e PID em seguirem referências quadradas, mesmo utilizando uma calibração manual dos parâmetros do controlador e alterando parâmetros do sistema durante sua execução.

Foram realizados outros experimentos de controle variando a posição das válvulas e a aproximação obtida para os parâmetros é mostrada a seguir, lembrando que os parâmetros K_{12} , K_{23} e K_{34} foram considerados iguais para uma mesma posição da válvula devido às semelhanças observadas nos seus comportamentos durante os experimentos.

Tabela 4-1 – Estimativas dos parâmetros K_{12} , K_{23} e K_{34} .

<i>Posição da válvula</i>	$\hat{K}_{12} = \hat{K}_{23} = \hat{K}_{34} [cm^{2,5}/s]$
1	4,49
2	12,12
3	16,88
4	23,41
6	32,84

Outros experimentos de controle dos níveis foram utilizados para a obtenção de estimativas para os parâmetros K_{o1} e K_{o3} . Na Figura 4.8 é mostrado o resultado do experimento de controle dos níveis utilizado para a identificação.

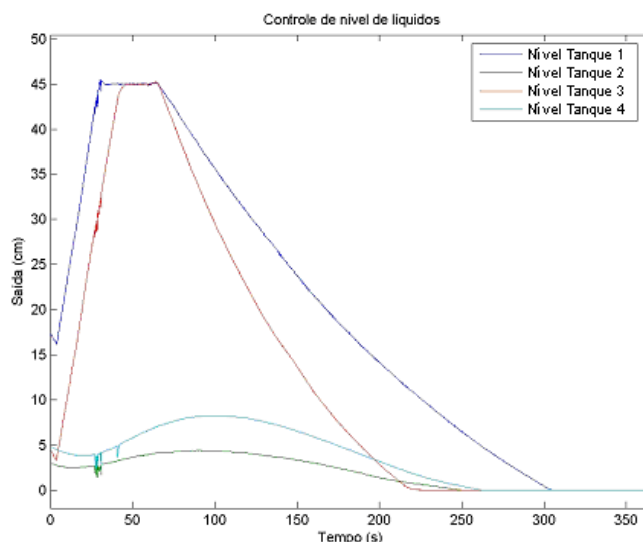


Figura 4.8 – Curva obtida no experimento de controle para estimação dos parâmetros K_{o1} e K_{o3} .

Utilizando o procedimento descrito na seção 3.8 para a identificação destes parâmetros, foram obtidos dois gráficos (Figura 4.9 e da Figura 4.10). Como pode ser percebido, as curvas destas figuras têm o formato de uma reta, mostrando que o modelo as descreve corretamente. Assim sendo, na Figura 4.9 e na Figura 4.10 têm-se retas cujas inclinações são os parâmetros K_{o1} e K_{o3} , respectivamente. É importante ressaltar que a altura inicial do reservatório principal de água era de 14,7cm, sendo este dado importante para estimar os parâmetros de interesse e, fazendo com que as estimativas sejam válidas para níveis iniciais do reservatório próximos ao utilizado.

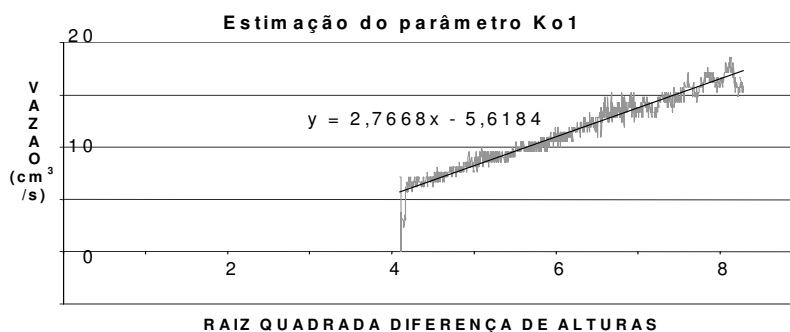


Figura 4.9 – Gráfico utilizado para a estimação do parâmetro K_{o1} .

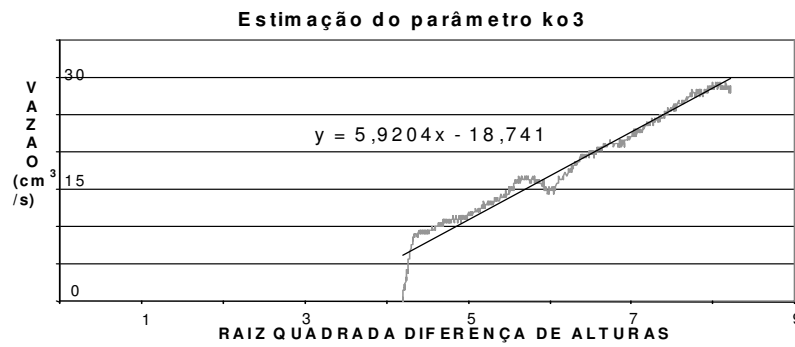


Figura 4.10 – Gráfico utilizado para a estimação do parâmetro K_{03} .

4.4 CONTROLE DO SISTEMA

A fim de testar o correto funcionamento do sistema desenvolvido e comprovar sua versatilidade, diversas experiências, nas mais diversas configurações, foram realizadas em laboratório.

No experimento da Figura 4.11 utilizou-se a abertura entre os tanques 1 e 2 e entre os tanques 3 e 4 como duas válvulas (válvulas 1/2 e 3/4 respectivamente), enquanto fechou-se a abertura entre os tanques 2 e 3 (válvula 2/3). As referências utilizadas foram uma onda quadrada para o tanque 1 e uma onda triangular para o tanque 3.

A referência do tanque 1 tem valor de máximo em 25 cm de coluna de líquido e mínimo em 20 cm. Já a referência do tanque 3 tem valor máximo de 20 cm e valor mínimo de 15 cm.

O controlador PID utilizado tinha, tanto para o tanque 1 quanto para o tanque 3, os seguintes valores das constantes: $K_p = 8$, $K_i = 0,08$ e $K_d = 0,5$. Observa-se que ambos os tanques foram controlados, apresentando um leve sobressinal nos transitórios.

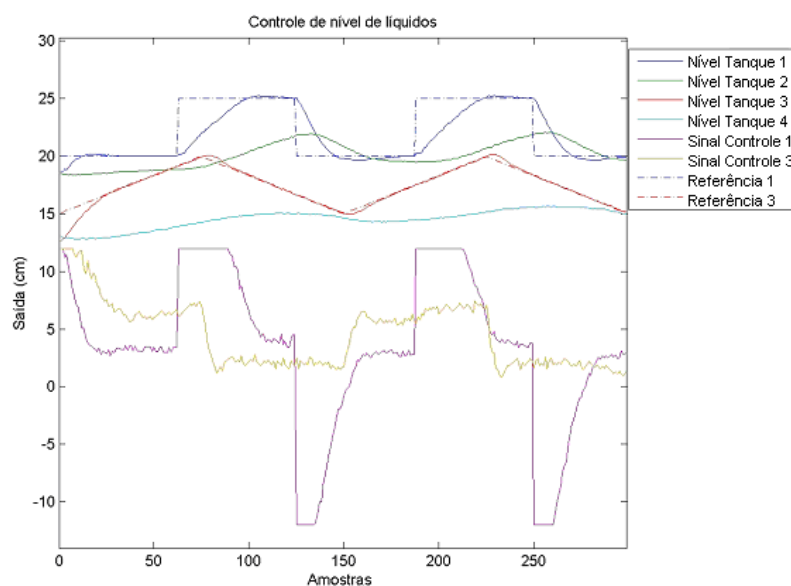


Figura 4.11 – Curva obtida na experiência de controle PID dos tanques 1 e 3, com válvulas 1/2 e 3/4 abertas na posição 3 e válvula 2/3 fechada. Sinais de referência: onda quadrada (tanque 1) e triangular (tanque 3).

Já no experimento da Figura 4.12, foi mantida a comunicação entre os tanques 1, 2 e 3, enquanto o tanque 4 permaneceu isolado. Ambas referências foram sinais senoidais, porém com *offsets* diferentes. Enquanto a onda de referência do tanque 1 oscila em torno de 25 cm, a referência do tanque 3 oscila em torno de 20 cm.

Percebe-se que mesmo com a presença do tanque 2 interconectando os tanques 1 e 3 (que possuem referências diferentes), o sistema pôde ser controlado utilizando um PID com $K_p = 8$, $K_i = 0,08$ e $K_d = 0,5$ para ambos os tanques.

Com uma pequena alteração na programação do PIC, pode-se configurar o sistema para controlar qualquer um dos tanques. No experimento da Figura 4.13, o controle foi realizado nos tanques 2 e 4, com as válvulas 1/2 e 3/4 abertas na posição 3 e a válvula 2/3 fechada.

As referências utilizadas foram uma onda quadrada para o tanque 2 e uma onda senoidal para o tanque 4. A referência do tanque 2 tem valor de máximo em 30 cm e mínimo em 25 cm. Já a referência do tanque 4 oscila em torno de 20 cm com pico a pico de 5 cm.

O controlador PID utilizado tinha para o tanque 2 $K_p = 12$, $K_i = 0,005$ e $K_d = 0,05$ enquanto para o tanque 4 os parâmetros foram $K_p = 12$, $K_i = 0,001$ e $K_d = 0,05$. Observa-se que ambos os tanques foram controlados, embora a saída do tanque 4 tenha oscilado um pouco antes de estabilizar. Neste caso, como a entrada de controle é feita nos tanques 1 e 3 e as saídas que estão sendo controladas são os tanques 2 e 4, tem-se dois sistemas de segunda ordem.

Também realizou-se uma experiência mostrada na Figura 4.14 utilizando as entradas analógicas externas para controle do sistema, disponibilizadas quando se muda a posição do *jumper* do pino 6 do PIC. Para isso, projetou-se um controlador proporcional num circuito analógico e um sinal de referência de 2,07V que equivale no conversor A/D a uma leitura de aproximadamente 20 cm de coluna de líquido. O esquemático do circuito do controlador analógico encontra-se na Figura III.3, nos anexos. O mesmo foi projetado para ter um ganho proporcional de aproximadamente 3,9.

Obteve-se uma resposta no regime permanente com um pequeno erro estacionário, que é característico do controle proporcional. Esse mesmo experimento foi realizado utilizando o PIC como um controlador proporcional digital com $K_p = 3,9$ e foram obtidos resultados muito semelhantes aos do experimento com a entrada externa, mostrado na Figura 4.15. Contudo, a implementação de um circuito analógico mostrou-se menos vantajosa que a implementação digital devido à dificuldade de se ajustar os valores dos potenciômetros de forma que sejam compatíveis com os parâmetros do controlador.

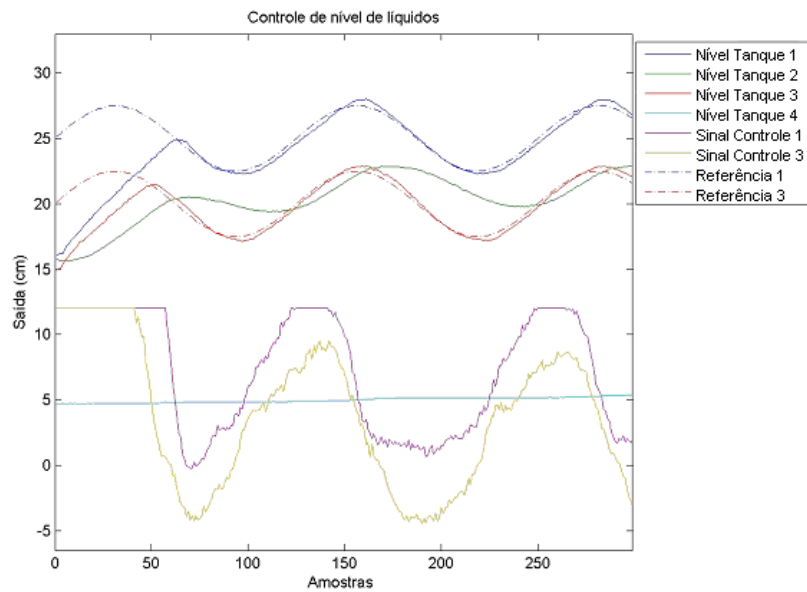


Figura 4.12 – Curva obtida na experiência de controle PID dos tanques 1 e 3, com válvulas 1/2 e 2/3 abertas na posição 3 e válvula 3/4 fechada. Sinais de referência: ondas senoidais em ambos tanques.

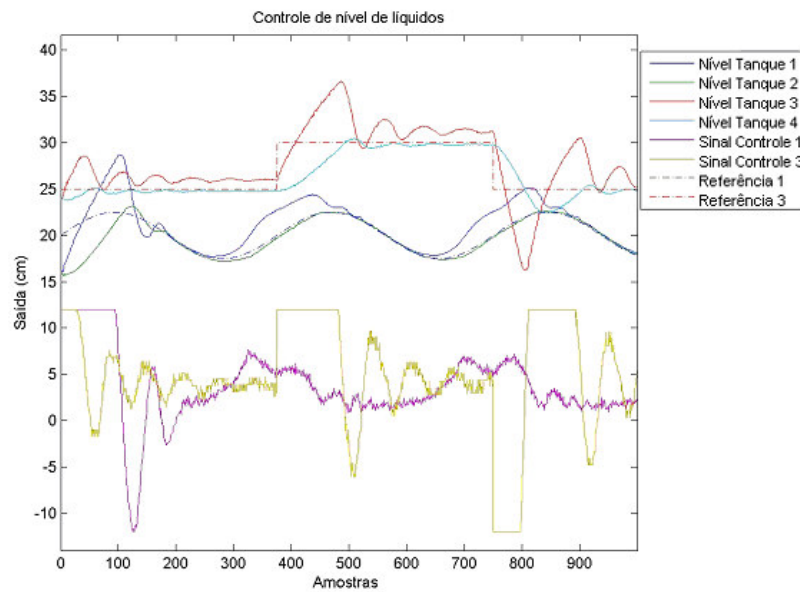


Figura 4.13 – Curva obtida na experiência de controle PID dos tanques 2 e 4, com válvulas 1/2 e 3/4 abertas na posição 3 e válvula 2/3 fechada. Sinais de referência: onda senoidal (tanque 2) e onda quadrada (tanque 4).

Com esses resultados, atestou-se que o módulo de controle além de suportar experimentos utilizando o PIC para realizar o controle, permite, com uma simples mudança de um *jumper*, trabalhar com um CLP ou um circuito analógico externo como controlador.

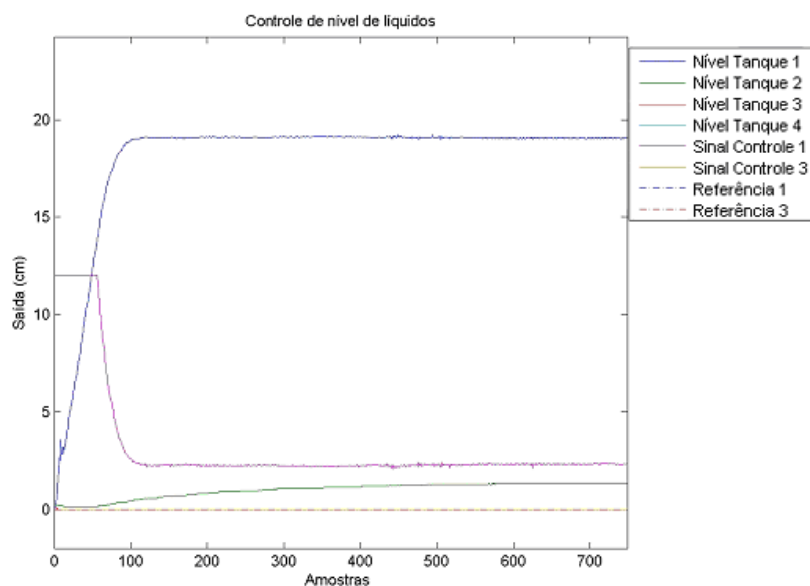


Figura 4.14 – Curva obtida na experiência de controle proporcional analógico do tanque 1 com todas válvulas fechadas. Sinal de referência em 20cm.

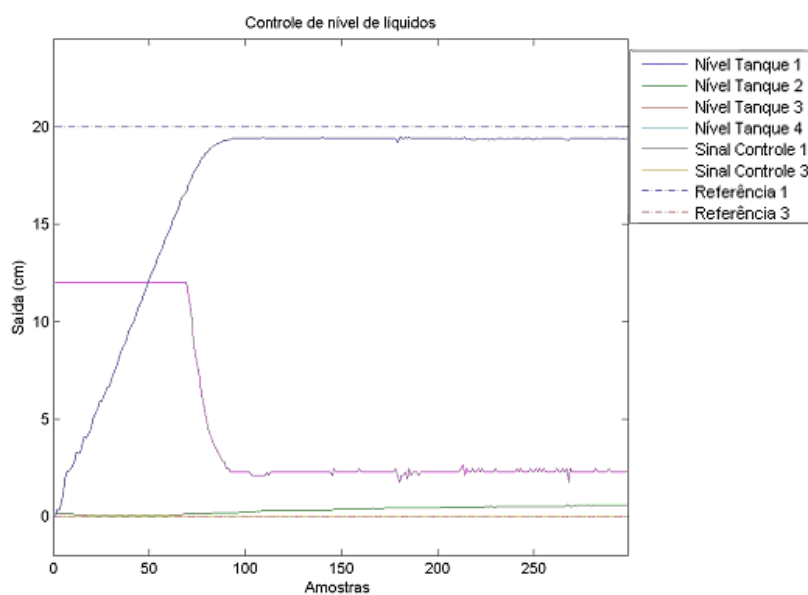


Figura 4.15 – Curva obtida na experiência de controle proporcional digital do tanque 1 com todas válvulas fechadas. Sinal de referência em 20cm.

4.5 SIMULAÇÕES REALIZADAS COM OS PARÂMETROS ESTIMADOS

Na Figura 4.16 e na Figura 4.17 são mostrados alguns resultados da simulação implementada, utilizando os parâmetros da planta que foram identificados nos procedimentos descritos na seção 4.3.

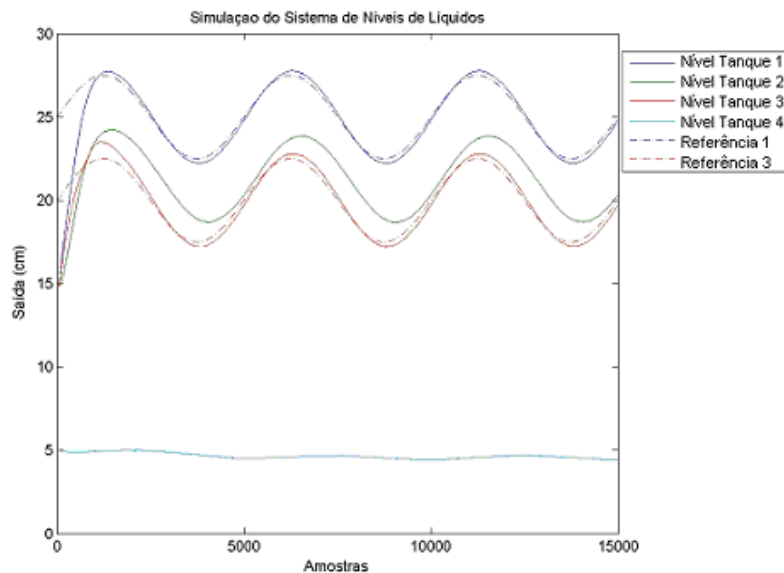


Figura 4.16 – Curva obtida na simulação do Sistema de Níveis de Líquidos de 1ª ordem.

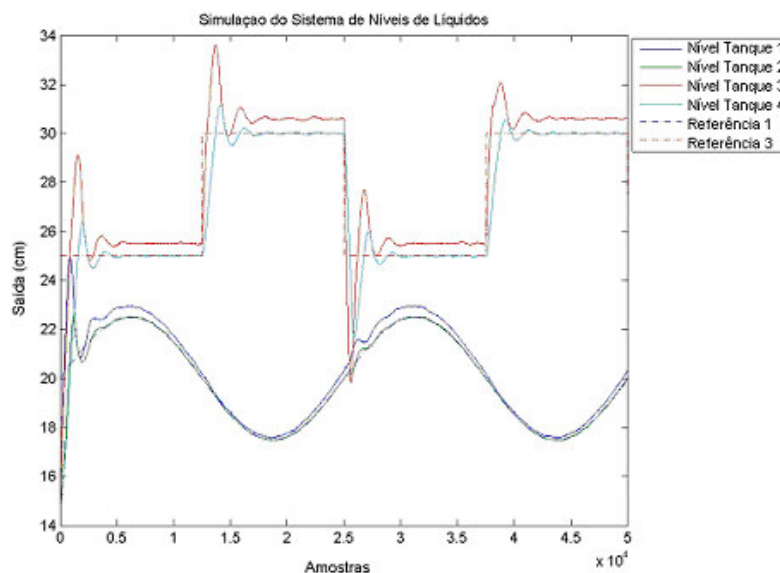


Figura 4.17 – Curva obtida na simulação do Sistema de Níveis de Líquidos de 2ª ordem.

O experimento da Figura 4.16 é semelhante ao realizado no sistema e descrito na Figura 4.12, utilizando-se na simulação os mesmos parâmetros que foram utilizados no experimento com a maquete. Como pode ser percebido, o modelo matemático e a identificação do sistema foram desenvolvidos corretamente, apesar das simplificações, tendo em vista que a simulação se aproximou do experimento real.

O gráfico da Figura 4.17 ilustra o resultado da simulação realizada semelhante ao experimento mostrado na Figura 4.13, utilizando, para a simulação, os mesmos parâmetros que haviam sido utilizados para o experimento realizado com o Sistema. Como pode ser percebido, novamente o

comportamento da simulação aproxima-se do que foi observado no Sistema real, novamente mostrando a validade do modelo.

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, verificou-se que o sistema desenvolvido é bastante eficiente na realização de experimentos e simulações das técnicas de controle em processos multivariáveis.

Graças à possibilidade de configurar tanto a quantidade de tanques presentes na experiência quanto a vazão existente entre eles, o sistema de nível de líquidos proposto e desenvolvido neste projeto mostrou-se bastante versátil, podendo atender às necessidades tanto dos alunos da graduação quanto da pós-graduação e permitindo sistemas de primeira, segunda, terceira e até quarta ordem e com a possibilidade de mais uma não-linearidade modelada, devido ao fato do tanque 4 ter uma área de seção variável com a altura.

As simulações realizadas tanto para o sistema configurado no caso de primeira ordem quanto para o caso de segunda ordem atestaram que o modelo proposto para o nível de líquidos é adequado e que os parâmetros identificados experimentalmente foram próximos o suficiente dos parâmetros reais do sistema.

Os resultados mostraram também que o novo sistema conseguiu implementar melhorias em relação aos anteriores, possibilitando controladores melhores e mais estáveis graças às medidas mais precisas dos sensores de pressão.

Contudo, apesar de se fazer uso de opto-acopladores, nota-se que o PMW ainda causa uma certa interferência na leitura, piorando um pouco a medição. Outro fator que se pode apontar como nocivo aos sensores de pressão é a turbulência nos furos do tanque para entrada e saída de água. Embora se tenha procurado colocar os bocais dos tubos do sensor de pressão o mais longe possível dessas aberturas, nota-se que para alturas de líquidos superiores a 40 cm a turbulência é suficiente para atrapalhar a leitura e conseqüentemente o desempenho do controlador.

Sugere-se estudar novas formas de posicionar os sensores para que este problema seja sanado, permitindo melhores resultados nos casos em que o controle é feito acima da zona de 40cm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FILHO, F. L; de M., BAUCHSPIESS, A; GOSMANN, H. L. “*Controle Fuzzy para Sistema de Nível de Líquidos*”, CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2002, Natal-RN.
- [2] FREITAS, A. A. de “Arquitetura de Laboratório Remoto com Banco de Dados e Controle no Espaço de Estados” Trabalho de Graduação, Universidade de Brasília, 2003.
- [3] GOSMANN, H. L. “Um Sistema Multivariável de Tanques Acoplados para Avaliação de Técnicas de Controle”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2002.
- [4] MENDES, R. G. da R; TAMAYO, S. “Sistema de Nível de Líquidos de Segunda Ordem Didático com Microcontrolador PIC 18F252 – Experimentos de Controle no Domínio da Frequência”. Relatório de Projeto de Graduação, Universidade de Brasília, 2004.
- [5] FREITAS, A. A; BORGES, G; BAUCHSPIESS, A. “*Avaliação do Filtro de Kalman Estendido para Estimação de Parâmetros de Processo de Nível de Líquidos*”, CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Gramado, Brasil, 2004.
- [6] JABUONSKI Jr., R. E; FERREIRA, L.V; GUIMARÃES, B; BAUCHSPIESS, A. *Sistema de experimentação remota configurável de controle de nível de líquidos multivariável*, VI SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2003, Bauru SP.
- [7] GUIMARÃES, B.; SOUZA, A.S.; GOSMANN, H.L.; BAUCHSPIESS, A. *Internet based remote laboratory: the level control of three coupled water reservoirs*. XV Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático, 2002, Santiago de Chile.
- [8] BAUCHSPIESS, A., GUIMARÃES, B; GOSMANN, H. L. *Remote Experimentation on a Three Coupled Water Reservoirs*. ISIE 2003 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2003, Rio de Janeiro RJ.
- [9] OGATA, K. “Engenharia de Controle Moderno”, 4ª ed., Prentice Hall, 2003, São Paulo.
- [10] BENTLEY, J.P. “*Principles of Measurement Systems*”, 2ª ed., Longman Scientific & Technical, 1988.
- [11] FREESCALE SEMICONDUCTOR, dados técnicos do componente MPXM2010, 2004.
- [12] MICROCHIP, dados técnicos do microcontrolador PIC 18F252, 2002.
- [13] FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D., WORKMAN, M.L. “*Digital Control of Dynamic Systems*” – 3rd Edition, Addison-Wesley Ed. , MA, 1998.

Anexos

I. PROGRAMA DE CONTROLE DO PIC 18F252

```

/*****
*      Universidade de Brasília
*
*      LAVSI - Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes
*
*      Trabalho de Graduação 2 - 2º/2005
*
*      Orientadores:
*          Prof. Geovany Araújo Borges
*          Prof. Adolfo Bauchspiess
*
*      Alunos:
*          Gustavo Amaral F. de Melo - 01/31784
*          Mariana Costa Bernardes - 02/37485
*****/

//definições básicas do programa
#define LED1      PIN_B4 //pino do led
#define EXECUTAR  PIN_A4 //pino da chave
#define MOTOR1    PIN_B0 //liga o motor 1
#define MOTOR2    PIN_B1 //liga o motor 2
#define MOTOR3    PIN_B2 //liga o motor 3
#define MOTOR4    PIN_B3 //liga o motor 4

#define SENSOR1    2      //definições do canal AD que cada sensor está
#define SENSOR2    3
#define SENSOR3    0
#define SENSOR4    1
#define AD_EXTERNO 4

#define AD_E1      0
#define AD_E2      1
#define AD_E3      2
#define AD_E4      3
#define MUX_MSBIt  PIN_C5 //bits de controle do multiplexador analógico
#define MUX_LSBIt  PIN_C4

#define LIGAMOTOR  0      //para ativar um motor deve-se zerar sua seleção
#define MAXPWM     1023
//#define ESCALAPWM (float)(MAXPWM/12) //converte o valor de PWM para tensão
#define ESCALAPWM  85.25 //converte o valor de PWM para tensão
#define INICIOTIMER1 40535 //20ms para XTL = 10MHZ e usando cfg. H4

#include <18F252.h> //biblioteca do PIC utilizado
#define DEVICE adc=10 //indica que o conversor A/D será utilizado com 10 bits

#fuses H4,NOWDT,NOLVP,PUT //fuses utilizados
#use delay(clock=4000000) //frequência do clock (XTL*4)
#use rs232(baud=19200, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7, parity=N, bits=8)

#include <stdlib.h>
#include <math.h>

char aux[10];
unsigned int16 tempo = 0; //no. de amostras que o experimento está executando

float potTanque1, potTanque3;
short positivo1, positivo3;
float nivel[4] = {0, 0, 0, 0};
long leitura[4] = {0, 0, 0, 0};

unsigned int16 adExterno[4] = {0, 0, 0, 0};

float erro1[2], r1, iErro1, Kp1, Ki1, Kd1;
float erro3[2], r3, iErro3, Kp3, Ki3, Kd3;

char tipoRef1 = 'a';
char tipoRef3 = 'a';
float refMax1, refMin1, deltaRef1;
```

```

float refMax3, refMin3, deltaRef3;
long periodo1, periodo3;

boolean flagEnviar, executando, auxRef1, auxRef3;

void inicializaVariaveis(void);
void mandaDados(void);
void leAdExterno(short entrada);
boolean enviaPotTanque1(void);
boolean enviaPotTanque3(void);

#include "leiturasensores.c" //inclusão da função que realiza a leitura dos sensores

void main(){

    setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_8);
    enable_interrupts(int_timer1);
    enable_interrupts(global);

    setup_ADC_ports(ALL_ANALOG);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

    //Configuração do PWM
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_4, 249, 2); //f=10Khz, resol = 1024 niveis
    setup_ccp2(CCP_PWM);
    set_pwm2_duty(0);
    setup_ccp1(CCP_PWM);
    set_pwm1_duty(0);

    //laço principal
    while(true) {
        inicializaVariaveis();
        if (input(EXECUTAR)) { //chave indicando execução através do PC

            gets(aux);
            Kp1 = atof(aux); //Kp, Ki, Kd, tipoRef, refMax, refMin, periodo;
            printf("%f\n", Kp1);
            gets(aux);
            Ki1 = atof(aux);
            printf("%f\n", Ki1);
            gets(aux);
            Kd1 = atof(aux);
            printf("%f\n", Kd1);
            gets(aux);
            tipoRef1 = aux[0];
            printf("%c\n", tipoRef1);
            gets(aux);
            refMax1 = atof(aux);
            printf("%f\n", refMax1);
            gets(aux);
            refMin1 = atof(aux);
            printf("%f\n", refMin1);
            gets(aux);
            periodo1 = atol(aux);
            printf("%lu\n", periodo1);

            gets(aux);
            Kp3 = atof(aux); //Kp, Ki, Kd, tipoRef, refMax, refMin, periodo;
            printf("%f\n", Kp3);
            gets(aux);
            Ki3 = atof(aux);
            printf("%f\n", Ki3);
            gets(aux);
            Kd3 = atof(aux);
            printf("%f\n", Kd3);
            gets(aux);
            tipoRef3 = aux[0];
            printf("%c\n", tipoRef3);
            gets(aux);
            refMax3 = atof(aux);
            printf("%f\n", refMax3);
            gets(aux);
            refMin3 = atof(aux);
            printf("%f\n", refMin3);
            gets(aux);
            periodo3 = atol(aux);
            printf("%lu\n", periodo3);

            r1 = refMin1;
            periodo1 = periodo1>>1;

```

```

//incremento para a onda triangular
deltaRef1 = (refMax1-refMin1)/periodo1;

r3 = refMin3;
periodo3 = periodo3>>1;
//incremento para a onda triangular
deltaRef3 = (refMax3-refMin3)/periodo3;

executando = true;
while(input(EXECUTAR)) {
    mandaDados();
}
}
else { //botao desligado
    while(!input(EXECUTAR)) {
        mandaDados();
    }
}
}
inicializaVariaveis();
}
}

//tratamento da interrupção do timer1
#define timer1 //ocorre a cada 20 ms
void trataTimer1() {
    static boolean led = false;
    static boolean saturou1 = false;
    static boolean saturou3 = false;
    unsigned short i;

    set_timer1(INICIOTIMER1 + get_timer1()); //atualiza o valor do timer

    led = !led; //pisca o led
    output_bit(LED1,led);

    if ((executando)&&(input(EXECUTAR))) {
        //execução do programa de controle caso esteja selecionada a execução
        //através do PC
        tempo++;
        if ((tempo%10)==0){ //envia os dados a cada dez interrupções
            flagEnviar = true;
        }
        //TRATAMENTO DA REFERÊNCIA DO TANQUE 1
        if((tempo % periodo1)==0){
            auxRef1 = !auxRef1; //passado metade de um período, mudar o valor
        }
        switch (tipoRef1) {
            case('q'): //quadrada
            case('Q'): //quadrada
                if (!auxRef1){
                    r1 = refMin1;
                }
                else {
                    r1 = refMax1;
                }
                break;
            case('t'): //triangular
            case('T'): //triangular
                if (auxRef1){
                    r1 -= deltaRef1;
                }
                else {
                    r1 += deltaRef1;
                }
                break;
            case('s'):
            case('S'):
                r1 = refMin1+refMax1*sin(tempo*2*pi/periodo1);
                break;
        }
        //CONTROLE PID DO TANQUE 1
        erro1[1] = erro1[0];
        leNivel(SENSOR2);
        leNivel(SENSOR1);
        erro1[0] = r1 - nivel[0];
        if (!saturou1){ //anti-windup
            iErro1 = iErro1 + erro1[0]*Kil;
        }
        potTanque1 = ((Kp1*erro1[0] + iErro1 + Kd1*(erro1[0]-erro1[1]))*ESCALAPWM);
    }
}

```

```

if(potTanque1<0){
    positivo1 = 0;
    potTanque1 = -potTanque1;
}
else{
    positivo1 = 1;
}
saturou1 = enviaPotTanque1();

//TRATAMENTO DA REFERÊNCIA DO TANQUE 3
if((tempo % periodo3)==0){
    auxRef3 = !auxRef3;
}
switch (tipoRef3) {
    case('q'): //quadrada
    case('Q'): //quadrada
        if (!auxRef3){
            r3 = refMin3;
        }
        else {
            r3 = refMax3;
        }
        break;
    case('t'): //triangular
    case('T'): //triangular
        if (auxRef3){
            r3 -= deltaRef3;
        }
        else {
            r3 += deltaRef3;
        }
        break;
    case('s'):
    case('S'):
        r3 = refMin3+refMax3*sin(tempo*2*pi/periodo3);
        break;
}
//CONTROLE PID DO TANQUE 3
leNivel(SENSOR4);
leNivel(SENSOR3);
erro3[1] = erro3[0];
erro3[0] = r3 - nivel[2];
if (!saturou3){ //anti-windup
    iErro3 = iErro3 + erro3[0]*Ki3;
}
potTanque3 = ((Kp3*erro3[0] + iErro3 +Kd3*(erro3[0]-erro3[1]))*ESCALAPWM);
if(potTanque3<0){
    positivo3 = 0;
    potTanque3 = -potTanque3;
}
else{
    positivo3 = 1;
}
saturou3 = enviaPotTanque3();

leAdExterno(AD_E1); //atualização das leituras dos canais A/D auxiliares
leAdExterno(AD_E2);
leAdExterno(AD_E3);
leAdExterno(AD_E4);
}
else { //não executando ou chave executar selecionando entrada AD externa
    if (!input(executar)){ //executar o controle a partir das entradas externas
        tempo++;
        if ((tempo%10)==0){
            //flagEnviar = true;
        }
        leNivel(SENSOR1);
        leNivel(SENSOR2);
        leNivel(SENSOR3);
        leNivel(SENSOR4);

        leAdExterno(AD_E1); //atualização das leituras dos canais A/D auxiliares
        leAdExterno(AD_E2);
        if ((adExterno[AD_E1])>=(adExterno[AD_E2])){
            potTanque1 = adExterno[AD_E1];
            positivo1 = 1;
        }
        else {
            potTanque1 = adExterno[AD_E2];
            positivo1 = 0;
        }
    }
}

```

```

    }
    saturou1 = enviaPotTanque1();

    leAdExterno(AD_E3);
    leAdExterno(AD_E4);
    if ((adExterno[AD_E3]) >= (adExterno[AD_E4])) {
        potTanque3 = adExterno[AD_E3];
        positivo3 = 1;
    }
    else {
        potTanque3 = adExterno[AD_E4];
        positivo3 = 0;
    }
    saturou3 = enviaPotTanque3();
}
else { //ainda não executando... desligar todos os motores
    set_pwm1_duty(0);
    set_pwm2_duty(0);
    output_bit(MOTOR1, !LIGAMOTOR);
    output_bit(MOTOR2, !LIGAMOTOR);
    output_bit(MOTOR3, !LIGAMOTOR);
    output_bit(MOTOR4, !LIGAMOTOR);
}
}
led = !led;
output_bit(LED1, led);
}

//Envia os dados desejados para o computador
void mandaDados() {
    if (flagEnviar) {
        printf("%lu\n", tempo);
        printf("%f\n", nivel[0]);
        printf("%f\n", nivel[1]);
        printf("%f\n", nivel[2]);
        printf("%f\n", nivel[3]);
        printf("%f\n", potTanque1);
        printf("%f\n", potTanque3);
        printf("%2.2f\n", r1);
        printf("%2.2f\n", r3);
        printf("%lu\n", adExterno[AD_E1]);
        printf("%lu\n", adExterno[AD_E2]);
        printf("%lu\n", adExterno[AD_E3]);
        printf("%lu\n", adExterno[AD_E4]);
        flagEnviar = false;
    }
}

//Leitura das entradas AD adicionais
void leAdExterno(short entrada) {
    set_adc_channel(AD_EXTERNO); //canal do AD ligado ao multiplexador analógico
    switch (entrada) { //seleção dos bits do multiplexador
        case AD_E1:
            output_bit(MUX_MSBIt, 1);
            output_bit(MUX_LSBIt, 0);
            break;
        case AD_E2:
            output_bit(MUX_MSBIt, 0);
            output_bit(MUX_LSBIt, 1);
            break;
        case AD_E3:
            output_bit(MUX_MSBIt, 0);
            output_bit(MUX_LSBIt, 0);
            break;
        case AD_E4:
            output_bit(MUX_MSBIt, 1);
            output_bit(MUX_LSBIt, 1);
            break;
    }
    delay_us(40);
    adExterno[entrada] = read_adc(); //leitura
}

//envio do valor do PWM ao motor do tanque 1 (motor 1 ou 2)
boolean enviaPotTanque1( void ) {
    boolean saturou = false;
    if (potTanque1 > MAXPWM) {
        potTanque1 = MAXPWM;
        saturou = true;
    }
}

```

```

    }
    if(potTanque1<=15){
        set_pwm2_duty(0);
        potTanque1 = 0;
        saturou = true;
    }
    if (positivo1){
        if (potTanque1>15.0) { //ligar motor1
            output_bit(MOTOR1, LIGAMOTOR); //ativa motor 1
            output_bit(MOTOR2, !LIGAMOTOR); //desativa motor 2
            if (nivel[0]<46.0){
                set_pwm2_duty((long int)potTanque1);
            }
            else{
                potTanque1 = 0;
                saturou = true;
                set_pwm2_duty(0);
            }
        }
    }
    else{
        //ligar motor2
        if(potTanque1>15.0){
            output_bit(MOTOR1, !LIGAMOTOR); //desativa motor 1
            output_bit(MOTOR2, LIGAMOTOR); //ativa motor 2
            if (nivel[0]>3.0){ //só liga o motor se o nível for maior que 3 cm
                set_pwm2_duty((long int)potTanque1);
            }
            else{
                set_pwm2_duty(0);
                potTanque1 = 0;
                saturou = true;
            }
        }
    }
    return saturou;
}

//envio do valor do PWM ao motor do tanque 3 (motor 3 ou 4)
boolean enviaPotTanque3( void ){
    boolean saturou = false;

    if (potTanque3 > MAXPWM){
        potTanque3 = MAXPWM;
        saturou = true;
    }
    if(potTanque3<=15){
        set_pwm1_duty(0);
        potTanque3 = 0;
        saturou = true;
    }
    //acionamento dos motores
    if(positivo3){
        if (potTanque3>15.0) { //ligar motor3
            output_bit(MOTOR3, LIGAMOTOR); //ativa motor 3
            output_bit(MOTOR4, !LIGAMOTOR); //desativa motor 4
            if (nivel[2]<46.0){
                set_pwm1_duty((long int)potTanque3);
            }
            else{
                set_pwm1_duty(0);
                potTanque3 = 0;
            }
        }
    }
    else{
        if(potTanque3>15.0){
            //ligar motor4
            output_bit(MOTOR3, !LIGAMOTOR); //desativa motor 3
            output_bit(MOTOR4, LIGAMOTOR); //ativa motor 4
            if (nivel[2]>3.0){ //só liga o motor se o nível for maior que 3 cm
                set_pwm1_duty((long int)potTanque3);
            }
            else{
                set_pwm1_duty(0);
                potTanque3 = 0;
            }
        }
    }
    return saturou;
}

```

```

//atribui os valores iniciais das variaveis
//util quando o programa vai reiniciar
void inicializaVariaveis( void ){
    tempo = 0;                flagEnviar = false;    executando = false;
    set_timer1(INICIOTIMER1); set_pwm1_duty(0);    set_pwm2_duty(0);
    potTanque1 = 0;           potTanque3 = 0;      iErro1 = 0;
    r1 = 0;                   Kp1 = 0;              Kil = 0;
    Kd1 = 0;                  auxRef1 = false;       refMax1 = 0;
    refMin1 = 0;              periodol = 0;          tipoRef1 = 'a';
    refMax1 = 0;              refMin1 = 0;           deltaRef1 = 0;
    iErro3 = 0;               r3 = 0;                Kp3 = 0;
    Ki3 = 0;                  Kd3 = 0;              auxRef3 = false;
    refMax3 = 0;              refMin3 = 0;          periodo3 = 0;
    tipoRef3 = 'a';           refMax3 = 0;          refMin3 = 0;
    deltaRef3 = 0;           erro1[0] = 0;          erro1[1] = 0;
    adExterno[0] = 0;         adExterno[1] = 0;    adExterno[2] = 0;
    adExterno[3] = 0;         potTanque1 = 0;    potTanque3 = 0;
    erro3[0] = 0;             erro3[1] = 0;      leitura[0] = 0;
    leitura[1] = 0;           leitura[2] = 0;    leitura[3] = 0;
}

```

II. PROGRAMA DO MATLAB PARA COMUNICAÇÃO COM O PIC

```
%*****
%      Universidade de Brasília
%
%      LAVSI - Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes
%
%      Trabalho de Graduação 2 - 2º/2005
%
%      Orientadores:
%      Prof. Geovany Araújo Borges
%      Prof. Adolfo Bauchspiess
%
%      Alunos:
%      Gustavo Amaral F. de Melo - 01/31784
%      Mariana Costa Bernardes - 02/37485
%*****

%Programa de interface com o PC
%Realiza o envio e recebimento dos parametros do controle
%Animação durante a execução do experimento e plotagem dos dados ao final

clear all;
close all;

%*****
%SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO EXPERIMENTO
%= Ajustar antes de iniciar o experimento =

TEMPOFINAL = 75000; %Tempo de execução do experimento
%*****TANQUE 1*****
%Parametros do controlador PID:
Kp1 = 12;           %Constante do canal proporcional
Kil = 0.005;        %Constante do canal integral
Kdl = 0.05;         %Constante do canal derivativo

%Parametros do sinal de referência:
tiporefl = 's';     %Tipo (q=quadrada, t=triangular e s=senoidal)
rmax1 = 2.5;        %Valor de máximo (p/ senoidal é a amplitude)
rmin1 = 20;         %Valor de mínimo (p/ senoidal é o offset)
periodo1 = 15000;   %Metade do periodo da onda

%*****TANQUE 3*****
%Parametros do controlador PID:
Kp1 = 15;           %Constante do canal proporcional
Kil = 0.001;        %Constante do canal integral
Kdl = 0.05;         %Constante do canal derivativo

%Parametros do sinal de referência:
tiporefl = 'q';     %Tipo (q=quadrada, t=triangular e s=senoidal)
rmax1 = 30;         %Valor de máximo (p/ senoidal é a amplitude)
rmin1 = 25;         %Valor de mínimo (p/ senoidal é o offset)
periodo1 = 15000;   %Metade do periodo da onda
%*****

%ANIMAÇÃO DO SISTEMA
%Inicialização das variáveis
y1 = 0;
y2 = 0;
y3 = 0;
y4 = 0;

r1 = 0;
r3 = 0;
%Desenho dos tanques
largura = 10;
```

```

altura = 49.5;
entreTanques = .2;
larguraFinal4 = 20.2;
alturaInicioInclinacao = 14.7;
COR_FUNDO = [0.8941 0.8941 0.8941];
COR_AGUA = [0.8157 1 1];

tanque1x = [0.5 0.5 largura+.5 largura+.5];
tanque1y = [0 altura altura 0];
tanque2x = [tanque1x(end)+entreTanques tanque1x(end)+entreTanques ...
    tanque1x(end)+entreTanques+largura tanque1x(end)+entreTanques+largura];
tanque2y = [0 altura altura 0];
tanque3x = [tanque2x(end)+entreTanques tanque2x(end)+entreTanques ...
    tanque2x(end)+entreTanques+largura tanque2x(end)+entreTanques+largura];
tanque3y = [0 altura altura 0];

tanque4x = [tanque3x(end)+entreTanques tanque3x(end)+entreTanques ...
    tanque3x(end)+entreTanques+larguraFinal4...
    tanque3x(end)+entreTanques+largura tanque3x(end)+entreTanques+largura];
tanque4y = [0 altura altura alturaInicioInclinacao 0];
hFigure = figure(1);
set(hFigure,'visible','off');
hTitle = title('GRAFICO DO SISTEMA');
set(hTitle,'position',[22.5 50.603 1.0000]);
set(hTitle,'fontSize',15);
hAxes = get(hFigure,'children');
set(hAxes,'xColor',COR_FUNDO);
set(hAxes,'color',COR_FUNDO);
set(hFigure,'color',COR_FUNDO);

patch([tanque1x tanque2x tanque3x tanque4x],[tanque1y tanque2y tanque3y tanque4y],[1 1 1])
hTanques = patch([tanque1x tanque2x tanque3x tanque4x(1) tanque4x(2) tanque4x(2)+largura4(y4)
tanque4x(4) tanque4x(5)],...
    [0 y1 y1 0 0 y2 y2 0 0 y3 y3 0 0 y4 y4 alturaInicioInclinacao 0 ],COR_AGUA);
hReferencial = patch([tanque1x(1) tanque1x(3)],[r1 r1],[1 0 0]);
hReferencia3 = patch([tanque3x(1) tanque3x(3)],[r3 r3],[1 0 0]);
set(hReferencial, 'edgeColor',[1 0 0]);
set(hReferencia3, 'edgeColor',[1 0 0]);

set(hAxes,'yTick',0:50);
tempYLabel = get(hAxes,'yTickLabel');
for (cont = 1:50)
    if (mod(cont-1,5)~=0)
        tempYLabel(cont,:) = ' ';
    end
end
set(hAxes,'yTickLabel', tempYLabel);

%COMUNICAÇÃO COM O PIC
%Fecha todas as portas seriais abertas
portasAbertas = INSTRFIND; %encontra os instrumentos
if (length(portasAbertas)>0)
    for cont = 1:length(portasAbertas)
        if (portasAbertas(cont).status(1)=='o') %testa se está aberta(open)
            fclose(portasAbertas(cont)) %fecha a porta
        end
    end
end
%Configura uma conexão com a porta serial COM1
try
    portaSerial = serial('COM1', 'BaudRate', 19200);
    portaSerial.InputBufferSize = 40960;
    fopen(portaSerial)
catch
    fclose(portaSerial);
    error('Erro com a porta serial');
end

valvula12 = input('Digite a posicao da valvula 1/2: ');
valvula23 = input('Digite a posicao da valvula 2/3: ');
valvula34 = input('Digite a posicao da valvula 3/4: ');
temp = input('Digite alguma tecla para enviar os dados e iniciar o experimento');

%Envio dos parametros para o PIC e confirmação de recebimento
fprintf(portaSerial,'%3.3f\r',Kp1)
Kp1 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial,'%3.3f\r',Kil)
Kil = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)

```

```

fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', Kd1)
Kd1 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%c\r', tiporef1)
tiporef1 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', rmax1)
rmax1 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', rmin1)
rmin1 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%d\r', periodo1)
periodo1 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', Kp3)
Kp3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', Ki3)
Ki3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', Kd3)
Kd3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%c\r', tiporef3)
tiporef3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', rmax3)
rmax3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%3.3f\r', rmin3)
rmin3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)
fprintf(portaSerial, '%d\r', periodo3)
periodo3 = str2num(fscanf(portaSerial))
pause(0.1)

display('Inicio do recebimento dos dados do PIC')

%Animação fica visível e em primeiro plano
set(hFigure, 'Position', [0 30 1024 688]);
set(hFigure, 'visible', 'on')

%Declaração das variáveis onde serão armazenados os dados do experimento
tempo = zeros(TEMPOFINAL, 1);
y = zeros(TEMPOFINAL, 4);
adExterno = zeros(TEMPOFINAL, 4);
pot = zeros(TEMPOFINAL, 4);
r = zeros(TEMPOFINAL, 4);
t = 1;

%Leitura e armazenamento dos dados enviados pelo PIC
while (t<TEMPOFINAL)

    aux = fscanf(portaSerial);
    tempo(t) = str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    y(t,1)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    y(t,2)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    y(t,3)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    y(t,4)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    pot(t,1)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    pot(t,3)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    r(t,1)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    r(t,3)= str2num(aux);

    aux=fscanf(portaSerial);
    adExterno(t,1)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    adExterno(t,2)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);
    adExterno(t,3)= str2num(aux);
    aux=fscanf(portaSerial);

```

```

adExterno(t,4)= str2num(aux);

%Atualização do desenho da animação
if (mod(t,3)==0)
    tempy = get(hTanques,'yData');
    tempx = get(hTanques,'xData');
    tempy (2:3) = y(t,1);
    tempy (6:7) = y(t,2);
    tempy (10:11) = y(t,3);
    if (y(t,4)<alturaInicioInclinacao)
        tempy (14:16) = y(t,4);
        tempx(15) = tanque4x(4);
    else
        tempy(14:15) = y(t,4);
        tempy(16) = alturaInicioInclinacao;
        tempx(15) = largura4(y(t,4))+tanque4x(1);
    end
    set(hTanques,'xData',tempx)
    set(hTanques,'YData',tempy)

    set(hReferencial,'yData',[r(t,1) r(t,1)])
    set(hReferencia3,'yData',[r(t,3) r(t,3)])

    drawnow()
end

%Imprime em segundo plano os dados que estão sendo colhidos
fprintf('t=%4.0d,tPIC=%4.0d,r1=%2.2f,y1=%2.2f,y2=%2.2f,p1=%1.4f
(V),e1=%2.2f,r3=%2.2f,y3=%2.2f,y4=%2.2f,p3=%1.4f (V),e3=%2.2f\n', t, tempo(t), r(t,1) , y(t,1)
, y(t,2), pot(t,1), r(t,1)-y(t,1), r(t,3) , y(t,3) , y(t,4), pot(t,3), r(t,3)-y(t,3));
    t = t + 1;
end

fprintf(portaSerial,'%lu\r',1);
fclose(portaSerial);

%TRATAMENTO DOS DADOS
%Configura o gráfico dos resultados experimentais e o exibe na tela
t = t - 1;
fig = figure(2);
set(fig,'Position',[0 30 1024 688])
set(fig,'Color','white')
plot(1:t,y(1:t,1),1:t,y(1:t,2),1:t,y(1:t,3),1:t,y(1:t,4),1:t,pot(1:t,1),...
    1:t,pot(1:t,3),1:t,r(1:t,1),'b-.',1:t,r(1:t,3),'r-.');
AXIS([0 t min(min(pot))-2 max(max(y))+5]);
title('Controle de nível de líquidos');
legend('Tanque 1','Tanque 2','Tanque 3','Tanque 4','Potencia 1', ...
    'Potencia 3','Referencia 1','Referencia 3','Location','BestOutside');
xlabel('Amostras ')
ylabel('Saída (cm)')
[a,b] = getframe(fig);

%Caminha onde os arquivos com os dados e o gráfico serão salvos
caminho = char(['F:\Documents and Settings\gafmelo\Meus documentos\Projeto
Final\controle\resultados finais 2006\controlePID_',datestr(now)]);
doispontos = find(caminho==':');
caminho(doisPontos(2:end))=' ';

%Salva o gráfico em formato jpeg
print(fig,'-djpegl00', caminho);
%Salva os dados em um arquivo de texto
arquivo = fopen([caminho, '.txt'],'w');
fprintf(arquivo, 'EXPERIMENTO DE CONTROLE\n');
fprintf(arquivo, 'Valvula 1/2: %d\n',valvula12);
fprintf(arquivo, 'Valvula 2/3: %d\n',valvula23);
fprintf(arquivo, 'Valvula 3/4: %d\n',valvula34);
fprintf(arquivo, 'Kp1: %f\n',Kp1);
fprintf(arquivo, 'Ki1: %f\n',Ki1);
fprintf(arquivo, 'Kd1: %f\n',Kd1);
fprintf(arquivo, 'Kp3: %f\n',Kp3);
fprintf(arquivo, 'Ki3: %f\n',Ki3);
fprintf(arquivo, 'Kd3: %f\n',Kd3);
fprintf(arquivo, 'Ordem dos dados: tempo, y1, y2, y3, y4, p1, p3\n');
for (k = 1 : t)
    fprintf(arquivo, '%d,%f,%f,%f,%f,%f,%lu\n' , tempo(k) ,y(k,1), y(k,2), y(k,3), y(k,4),
    pot(k,1), pot(k,3));
end
fclose(arquivo);

```

III. ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS

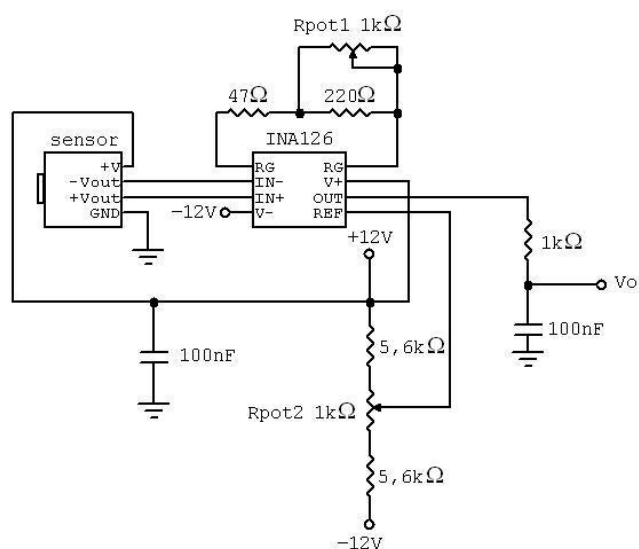


Figura III.1 – Esquemático do circuito da placa do sensor.

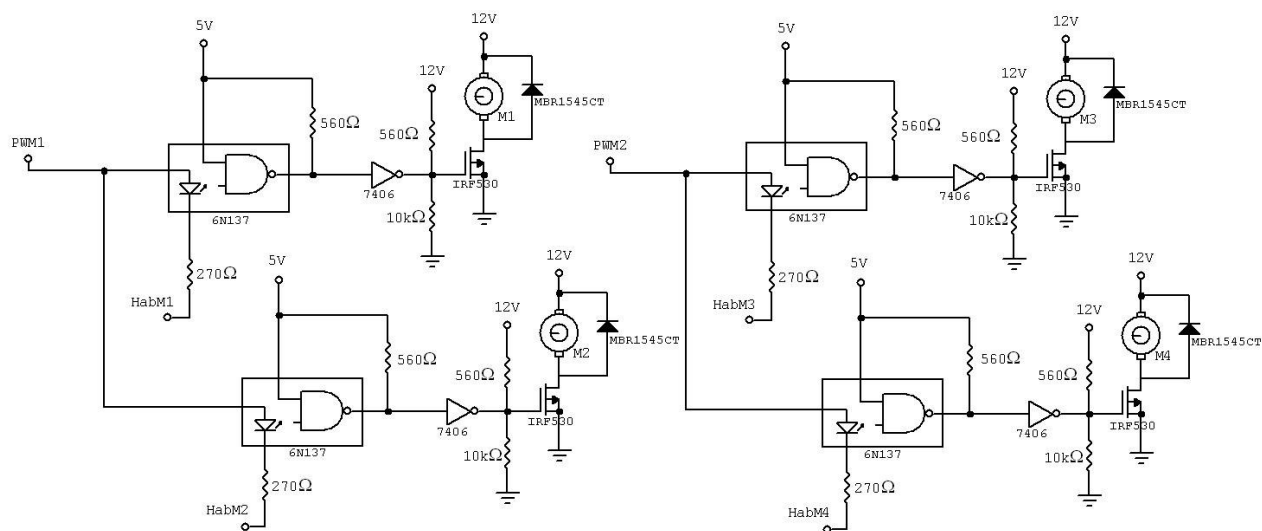
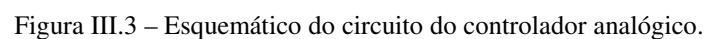


Figura III.2 – Esquemático do circuito de acionamento das bombas.



IV. *LAYOUTS* DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Na Figura IV.1 é mostrado o *layout* da placa dos sensores em tamanho real:

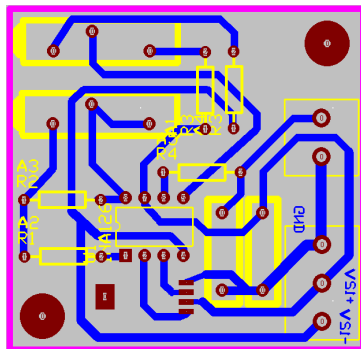


Figura IV.1 – *Layout* da placa dos sensores.

real:

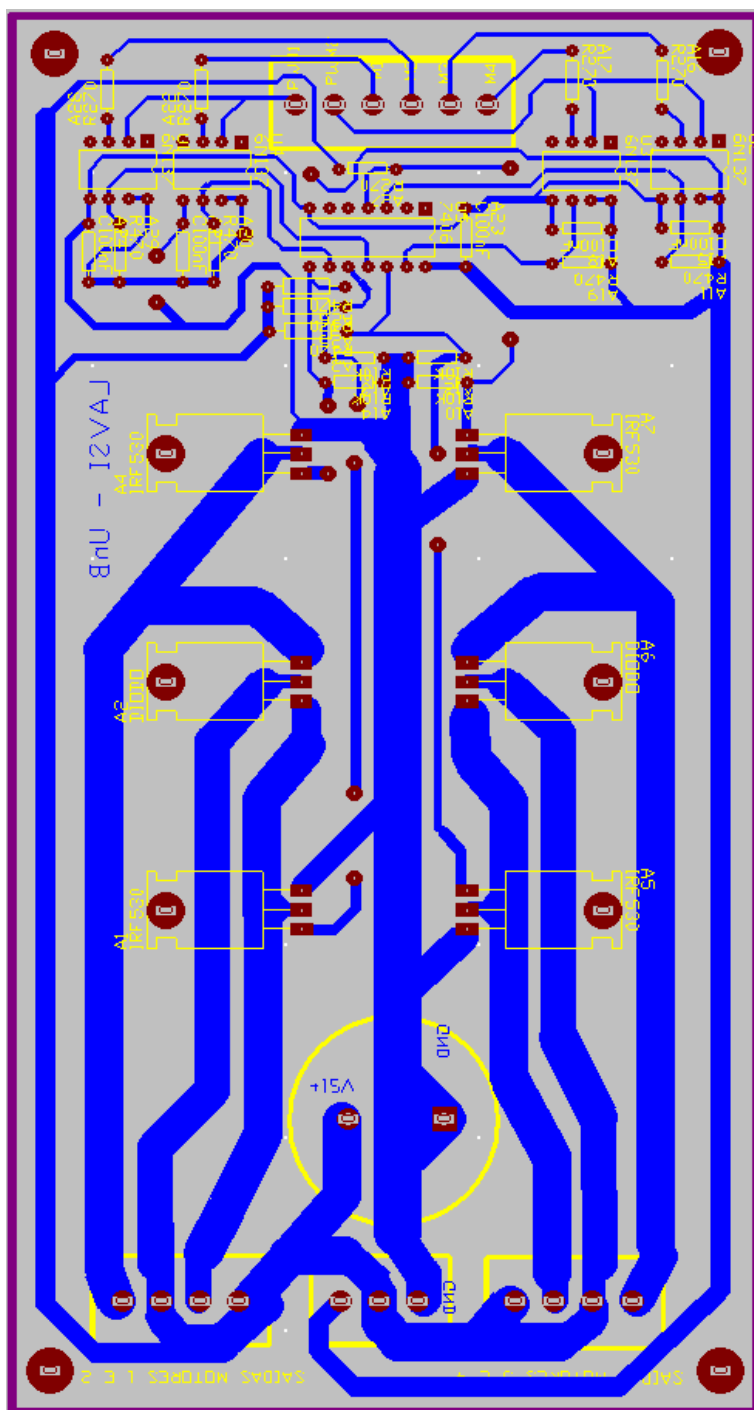


Figura IV.2 – *Layout* da placa de acionamento das moto-bombas.

Na Figura IV.3 é mostrado o *layout* da placa de controle em tamanho real:

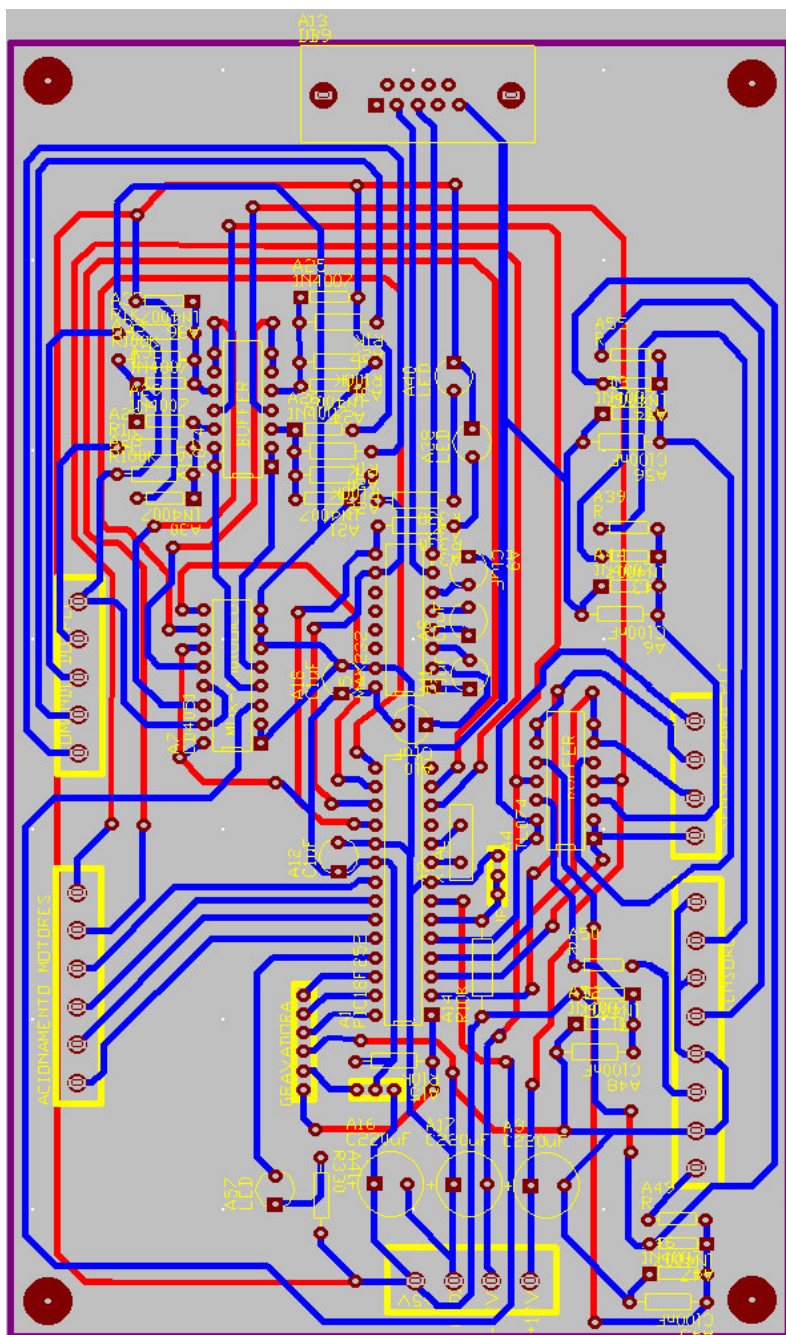


Figura IV.3 – *Layout* da placa de controle.