

UNIDADE DE CONTROLE DIDÁTICA DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES DIGITAIS

Paulo Jose Hernandez

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M – Uberlândia-MG. CEP: 38400
pjhernandez@mecanica.ufu.br

José Francisco Ribeiro

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M – Uberlândia-MG. CEP: 38400
jribeiro@ufu.br

Resumo: *Este artigo apresenta a concepção e o projeto de uma unidade didática de baixo custo que permitirá a avaliação e testes experimentais de algoritmos de controle, tendo como objetivo auxiliar e complementar o ensino teórico de controle digital nos cursos de graduação e pós-graduação. A unidade consiste em quatro reservatórios, o primeiro terá uma bomba que fornecerá água aos demais. Os reservatórios estarão interligados por válvulas, que por sua vez serão controladas por motores de passo e cada reservatório terá seu volume sensoriado por uma bóia ligada a um potenciômetro. O sinal proveniente destes potenciômetros assim como os sinais que acionarão bomba e válvulas serão gerados e monitorados por um microcontrolador PIC. A interface do PIC com o usuário é implementada num PC, no qual haverá um programa gráfico, com interface simples onde o processo pode ser monitorado e os algoritmos de controle modificados.*

Palavras-chave: *Controle, PIC, didático, microcontrolador, experimental.*

1. INTRODUÇÃO

São oferecidas pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia as disciplinas de pós-graduação intituladas “Análise e Controle de Sistemas Lineares” e “Controle Digital de Sistemas Mecânicos”, para facilitar a fixação dos conhecimentos adquiridos em sala de aula nada mais eficiente que aplicar esses conhecimentos experimentalmente. Para implantar esta idéia seriam necessárias bancadas didáticas onde os alunos poderiam realizar testes e verificar conceitos. As bancadas didáticas encontradas no mercado costumam ter um preço relativamente elevado e atualmente as universidades publicas tem recursos limitados para este tipo de investimento. Surgiu então, a idéia de construir equipamentos de baixo custo, na própria faculdade, que poderiam ser usados para esta finalidade.

Alguns trabalhos sobre sistemas de nível de líquidos foram publicados recentemente. Grega e Maciejczyk (1994) apresentam um sistema com dois tanques em que um dos tanques num nível mais elevado alimenta o segundo tanque que tem forma esférica. É proposto um controle de baixo custo para este sistema. Luiz et al (1997) e Gambier e Unbehaen (1999) apresentam sistemas interessantes de controle de nível de líquido.

O presente trabalho apresenta um hardware supervisionado e controlado por um microcontrolador PIC16F877. O PIC fará a vez da nossa placa de aquisição de sinais (pois possui canais de conversão A/D) e gerenciará os atuadores do processo. O microcontrolador enviará os sinais coletados (que indicam os níveis dos reservatórios) devidamente digitalizados para um PC, no qual teremos o software que poderá aplicar diversos algoritmos de controle ao processo.

O PC, por sua vez, enviará a resposta do sistema ao PIC para que este gerencie de forma coerente cada atuador da bancada.

2. UNIDADE DE CONTROLE DIDÁTICA DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES DIGITAIS

A unidade de controle didática possibilita a compreensão de vários conceitos ligados ao controle como, por exemplo, controle não linear, sistema MIMO, observabilidade/controlabilidade, estimação de estado, etc., que poderão ser vistas diretamente pelo usuário.

Uma bomba permitirá injetar água no primeiro tanque, o segundo e terceiro tanques recebem água pelas conexões com o primeiro. O reservatório fornece água suficiente para que os três tanques possam, num caso extremo, ser completamente enchidos. Por meio de motores de passo é possível configurar diferentes experimentos, isto é, pode-se fechar válvulas ou mantê-las parcialmente abertas, variando assim as resistências equivalentes de perda de carga, e além disso podemos variar a vazão da água injetada no primeiro tanque através de uma variação do PWM da alimentação que alimenta a bomba. O esquema da bancada está descrito na Fig. (1).

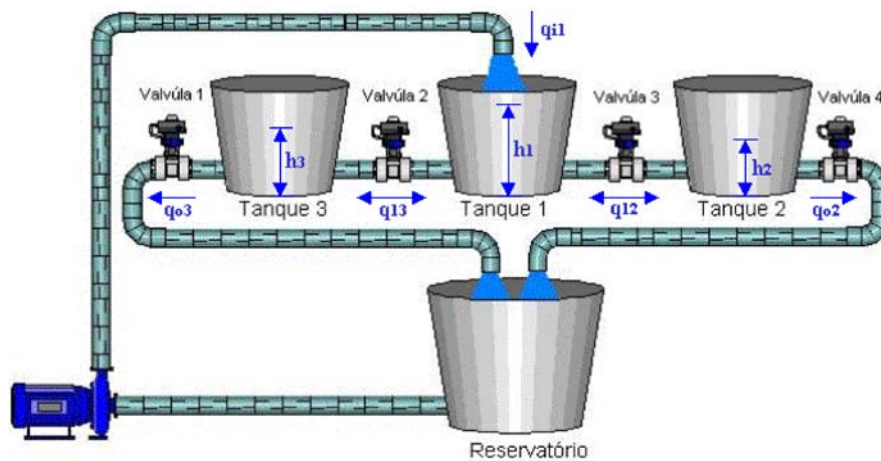


Figura 1: Unidade de Controle Didática de Baixo custo

Os sinais para acionamento dos motores de passo e o PWM da alimentação da bomba serão acionadas diretamente pelo PIC.

2.1 Modelo Matemático do Sistema

As variáveis que serão utilizadas para descrever o sistema estão indicadas na Fig. (1). Estas variáveis são descritas como:

- q_{i1} = vazão de entrada [cm^3/s] no tanque 1;
- q_{13} , q_{12} = vazões [cm^3/s] entre os tanques 1-3 e 1-2, respectivamente;
- q_{o3} , q_{o2} = vazões de saída [cm^3/s] dos tanques 2 e 3 para o reservatório;
- h_1 , h_2 , h_3 = nível de líquido [cm] nos tanques 1, 2 e 3.

Aplicando-se o balanço de massa a cada um dos reservatórios têm-se:

$$\frac{Adh_1}{dt} = q_{i1} + \text{signal}(h_3 - h_1) \cdot q_{13} + \text{signal}(h_2 - h_1) \cdot q_{12}$$

$$\frac{Adh_2}{dt} = -\text{signal}(h_2 - h_1) \cdot q_{12} - q_{o2}$$

$$\frac{Adh_3}{dt} = -\text{signal}(h_3 - h_1) \cdot q_{13} - q_{03} \quad (1)$$

Onde A é a seção transversal dos reservatórios (os reservatórios 1 2 e 3 terão as mesmas dimensões) e $\text{signal}()$ é uma função que nos retorna -1 se o sinal do argumento for negativo e 0 se for zero e 1 se for positivo.

A equação característica de cada válvula, considerando fluxo turbulento, tem que ser obtidas experimentalmente. O sistema poderá controlar a abertura e fechamento de cada válvula individualmente. Podemos definir que cada válvula terá seu fluxo regido pelas seguintes equações

$$\begin{aligned} q_{02} &= k_{02} \sqrt{h_2}, \\ q_{03} &= k_{03} \sqrt{h_3}, \\ q_{12} &= k_{12} \sqrt{|h_2 - h_1|}, \\ q_{13} &= k_{13} \sqrt{|h_3 - h_1|}. \end{aligned} \quad (2)$$

Os parâmetros k_{02} , k_{03} , k_{12} e k_{13} são variáveis controladas pelo usuário e dependem do valor de abertura das válvulas. Estes valores constituem as “entradas” do controlador.

Substituindo as Eq. (3) nas Eq. (2) tem-se a seguinte representação não linear no espaço de estados do sistema:

$$\begin{aligned} \frac{Adh_1}{dt} &= q_{i1} + \text{signal}(h_3 - h_1) \cdot k_{13} \sqrt{|h_3 - h_1|} + \text{signal}(h_2 - h_1) \cdot k_{12} \sqrt{|h_2 - h_1|} \\ \frac{Adh_2}{dt} &= -\text{signal}(h_2 - h_1) \cdot k_{12} \sqrt{|h_2 - h_1|} - k_{02} \sqrt{h_2} \\ \frac{Adh_3}{dt} &= -\text{signal}(h_3 - h_1) \cdot k_{13} \sqrt{|h_3 - h_1|} - k_{03} \sqrt{h_3} \end{aligned} \quad (3)$$

Para modelagem de pequenos sinais no domínio da frequência do sistema físico multi-tanques utilizamos as seguintes variáveis:

Q_{i1} = vazão de entrada no tanque 1;
 Q_{13} , Q_{12} = vazões entre os tanques 1-3 e 1-2, respectivamente;
 Q_{03} , Q_{02} = vazões de saída dos tanques 3 e 2 para o reservatório;
 H_1 , H_2 , H_3 = nível de líquido nos tanques 1,2 e 3. [cm]

Usaremos uma analogia com o sistema elétrico, que relacionará os parâmetros do sistema hidráulico com os parâmetros “R” e “C” de um circuito elétrico. A resistência hidráulica (R_H) e a capacitância hidráulica (C_H) podem ser calculadas da seguinte forma:

$$R_H = \frac{dH}{dQ}, \quad C_H = \frac{dV}{dH}. \quad (4)$$

A capacitância hidráulica (C_H) representa a área do tanque e a resistência (R_H) a perda de carga que o fluido sofre até chegar ao reservatório. Este valor de resistência é também usado para determinação da influência de um tanque sobre o outro, através de seus respectivos dutos de comunicação.

Com estes parâmetros do sistema linearizados em torno de um ponto de operação, pode-se demonstrar (Ogata, 1998) que para um sistema mono-tanque:

$$\frac{H_1(s)}{Q_{i1}(s)} = \frac{R_{H1}}{R_{H1}Cs + 1} \quad (5)$$

Para um sistema dois tanques acoplados, pode ser demonstrada a seguinte equação:

$$\frac{H_2(s)}{Q_{i1}} = \frac{R_{H1}}{R_{H12}R_{H1}s^2 + C_H(R_{H12} + 2R_{H1})s + 1} \quad (6)$$

As equações apresentadas servem como modelo linearizado do processo, possibilitando o projeto de controladores lineares para este sistema.

Os parâmetros R_H do sistema são determinados experimentalmente, enquanto que o valor da capacitância dos tanques é determinada pela seção transversal do tanque.

2. SIMULAÇÃO SISTEMA

A simulação é atualmente uma pratica imprescindível no estudo da engenharia de controle. O modelo de simulação pode e será utilizado para testes preliminares, onde verificaremos o comportamento do sistema e poderemos prever as respostas do sistema real estudado.

O sistema de tanques interligados pode ser representado no SIMULINK através do modelo apresentado na Fig. (2) .

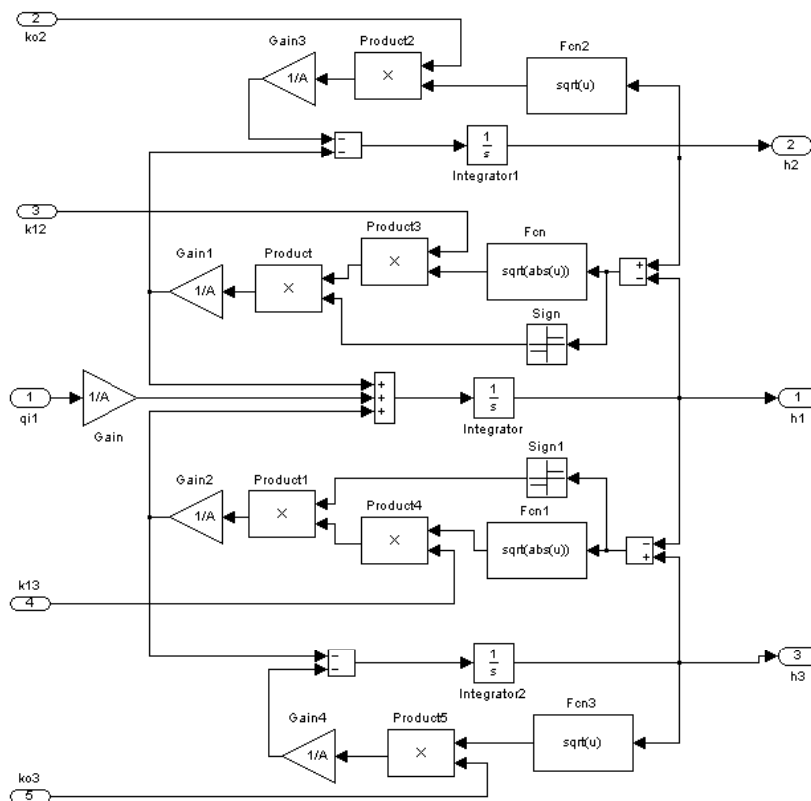


Figura 2: Modelo do Sistema de nível de líquidos estudado.

Neste modelo (Fig. 2) podemos observar que o sistema apresenta cinco entradas (k_{02} , k_{03} , k_{12} , k_{13} , q_{i1}) e três saídas (h_1 , h_2 , h_3). Para facilitar a visualização do sistema ele será reduzido a um bloco de programa que pode ser visto na Fig. (3).

O controle poderá ser feito por diversos algoritmos proporcionando diversos tipos de experimentos. O algoritmo será definido pelo usuário e assim poderá ser feita a verificação prática de conceitos de controle aplicados ao sistema.

Como exemplo dos diversos tipos de experimento que o usuário poderá conceber, temos o sistema da Fig. (3), que utiliza um controlador PID e um PI.

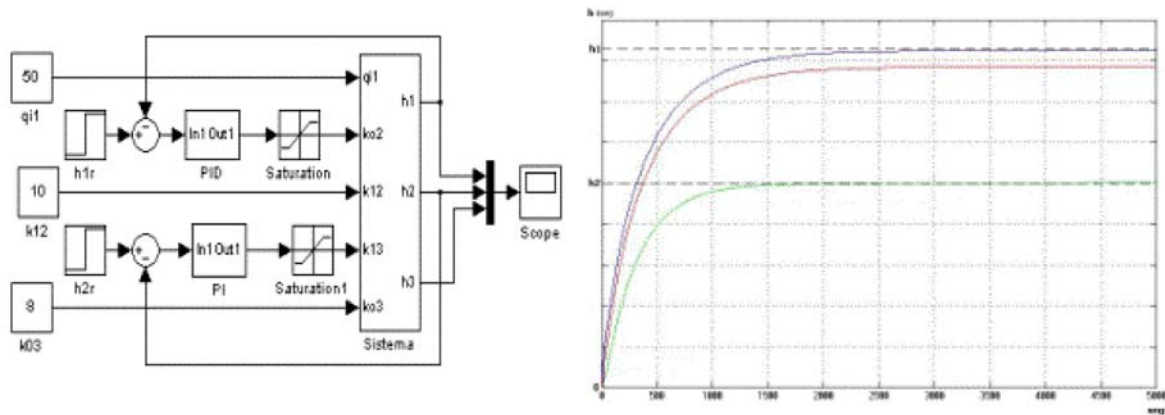


Figura 3: Outro exemplo de experiência

Neste exemplo tentamos controlar o valor das saídas h_1 e h_2 , aplicando um controlador PID à entrada K_{02} e um controlador PI à entrada k_{13} . A simulação da resposta do sistema ficaria como mostrado no gráfico da Fig. (3) :

3. O HARDWARE

Não menos importante que apresentar o funcionamento final do sistema, é apresentar o hardware que permitirá a correta captação dos dados (sinais de h_1 , h_2 e h_3) e propiciará a resposta do sistema podendo variar o fluxo de entrada g_{i1} (proporcional à potência da bomba) e os fluxos de saída g_{12} , g_{13} , g_{o2} e g_{o3} (proporcionais à abertura das válvulas que são acionadas por motores de passo).

3.1 A Coleta de dados (Sensores)

A altura da água no reservatório será captada através de um sinal de tensão proveniente de um potenciômetro que estará ligado a uma bóia, como mostrado na Fig. (4) .

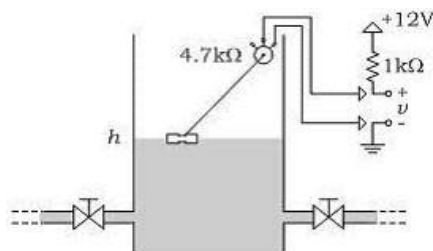


Figura 4: Ligação do potenciômetro para indicar altura dos tanques

Este sinal de tensão será digitalizado por um A/D de 10 bits, portanto a altura dos tanques estará dividida em $2^{10}=1024$ partes. Se o tanque possui 35 cm, teremos um erro menor que 0.35 mm.

Será necessário termos um filtro passa-baixa antes do digitalizador, para evitar possíveis interferências de alta frequência no sinal proveniente dos tanques, o filtro será de dois pólos com frequência de corte igual a 100 hz, o esquema de construção deste filtro pode ser encontrado no livro de Eletrônica do Malvino, P. M. (1997)

3.2 O acionamento das válvulas

As válvulas serão abertas e fechadas de acordo com o giro de seu respectivo motor de passo, que terá seu eixo ligado ao eixo da válvula. Os motores de passo serão acionados por apenas dois sinais (provenientes de duas portas do PIC16F877).

Foi necessária a construção de um driver que possibilitasse este acionamento, ele foi baseado na teoria de contadores que pode ser vista no Livro de Eletrônica Digital do Malvino, A. P.. Este driver necessita somente de um sinal que indique o sentido do giro (horário ou anti-horário) e de um trem de pulsos, cujo numero de pulsos indicam o ângulo de giro do motor (abertura da válvula). O driver pode ser visto na Fig. (5) .

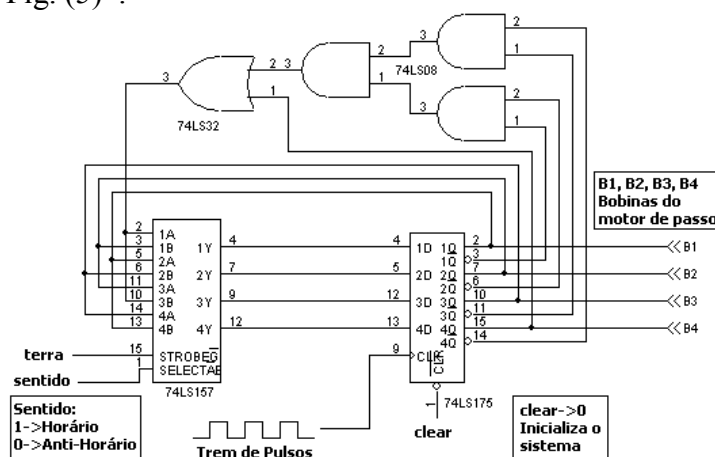


Figura 5: Driver para acionamento dos motores de passo

Logo após as saídas B1, B2, B3, B4 teremos mais um driver de corrente semelhante ao da Fig. (6) porem baseado em transistores TIP41.

3.2 O acionamento da bomba

A bomba será um a bomba DC, portanto podemos controlar sua rotação e potência através de da variação do PWM de sua alimentação. O PIC16F877 será encarregado de fornecer este sinal de PWM e variá-lo quando necessário. Como o microcontrolador não pode fornecer suficiente potência ao motor, foi necessário construir um driver de corrente para alimentar o motor, detalhes deste driver podem ser visto na Fig. (6) .

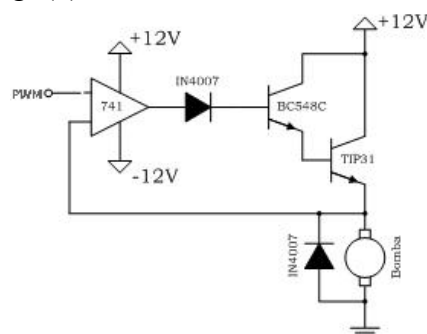


Figura 6: Driver para acionamento da bomba DC

3.2 O PIC16F873

O PIC16F873 é um microcontrolador, provido de 5 portas digitais, seu processamento pode chegar a 20 MHZ, possui até 8 canais A/D de 10 bits e pode fornecer um PWM de saída, além de possuir algoritmos internos para comunicações com a porta paralela de um PC.

Portanto este microcontrolador supre as necessidades de nosso hardware e será responsável pela aquisição de sinais da bancada, sendo também o responsável pelo acionamento das bombas e válvulas do sistema. As características técnicas do PIC16F877 podem ser vistas em manuais do fabricante e a sua programação acompanhada no livro de Pereira, F. (2003).

O esquema geral do hardware da bancada pode ser visto na Fig. (7).

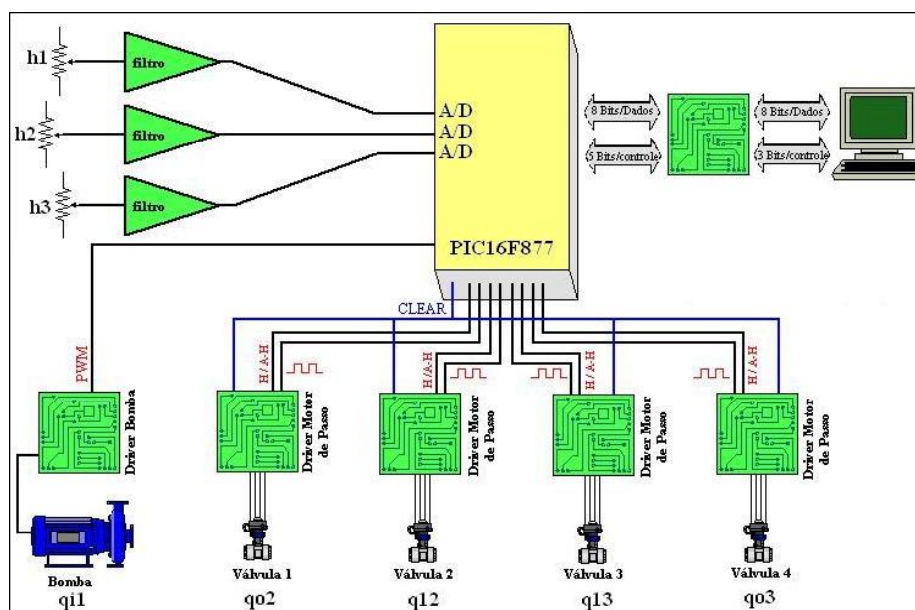


Figura 7: Hardware da Bancada com o PIC16F877

3.3 A Comunicação com o PC

O intercâmbio de dados entre o hardware e o PC será feito pela porta paralela no modo EPP (permite entrada e saída de dados) devido a sua versatilidade e velocidade. Será necessário apenas construir um driver de comunicação pois o microcontrolador não pode fornecer a corrente necessária à porta paralela e mais importante, teremos que diferenciar por hardware o envio e recebimento de dados, o hardware para comunicação será semelhante ao apresentado por Zelenovsky e Mendonça (1999).

4. A INTERFACE GRÁFICA

Finalmente é mostrado como será a interface gráfica do programa de controle para gerenciamento e manipulação do sistema (Fig. 9). Ao executarmos o programa será visualizada a tela *Controle de fluxo*, nesta tela poderemos escolher a algoritmo de controle. Como exemplo escolheremos um controlador PID (pressionariamos a opção PID).

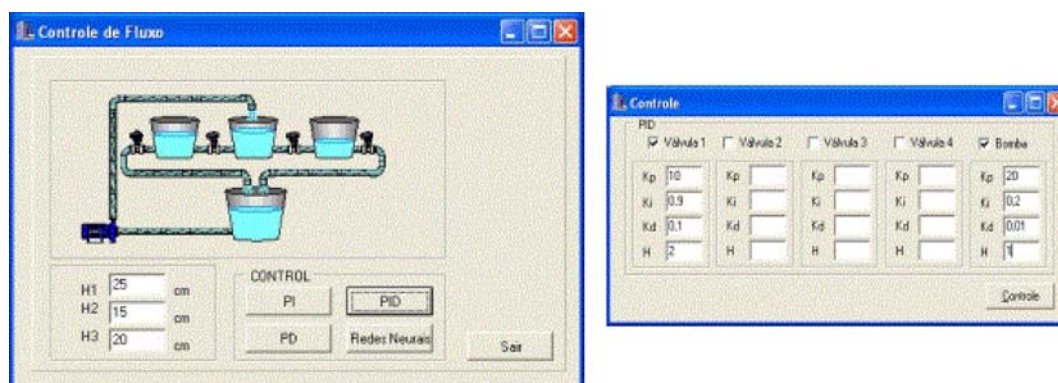


Figura 9: Software de Controle de Bancada

Após pressionada a opção PID surge a tela *Controle*, nesta tela estabelecemos quais variáveis serão controladas (Válvulas 1, 2, 3, 4 e/ou a bomba) e definimos os valores das constantes K_p, K_i e K_d aplicadas às respectivas variáveis, também selecionamos qual será a realimentação (h₁, h₂ ou h₃).

5. AGRADECIMENTOS

José Antonio Tumialan,
Patrick Cardoso,
José Francisco Ribeiro,
Faculdade de Engenharia Mecânica de Universidade Federal de Uberlândia.

6. REFERÊNCIAS

- Gambier, A. e Unbehauen, H. , 1999, “Adaptative predictive state-space control of multivariable 3-tank system”, em 38th Conference on decision & Control, pp 1234-1239, Phoenix, Arizona.
- Grega, W. ew Maciejczyk, A., 1994, “Digitla control of a tank system”, IEEE Transactions on Educations. Vol. 37. No. 3 pp. 271-276.
- Luiz, C. C., Silva, A. C., Coelho, A. A. R., e Bruciapaglia, A. H., 1997, “Controle adaptativo versus controle fuzzy, um estudo de caso em um processo de nível”, SBA Controle & Automação. Vol. 8 No.2; pp 43-51.
- Malvino, A. P. , 1995. “Eletrônica”, 4ª Ed. pp 266-267
- Malvino, P. M., 1987. “Eletrônica Digital”, Vol..2 , pp 454-528
- Pereira, F., 2003, “Microcontroladores PIC: Programação em C”. 1ª Ed.
- Zelenovsky, R., Mendonça, A. (1999), “ PC: Um Guia Prático de Hardware e Interfaceamento. 2ª Ed. pp 433-450, 735-743, 267-282

5. DIREITOS AUTORAIS

Paulo Jose Hernandez

LOW COST CONTROL DIDACTIC UNIT FOR DIGITAL CONTROLLERS ANALYSIS AND DESIGN

Paulo Jose Hernandez

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M – Uberlândia-MG. CEP: 38400
pjhernandez@mecanica.ufu.br

José Francisco Ribeiro

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M – Uberlândia-MG. CEP: 38400
jribeiro@ufu.br

Abstract: *This paper presents the conception and design of a low cost control didactic unit which will allow experimental tests and evaluations from control algorithms, looking for helping and complementing theoretical digital control teaching on graduate and undergraduate courses. Unit consists on four vessels, first of them will have a pump which will supply water to the three others. Vessels will be connected with valves, which will also be controlled by stepper motors and each vessel will have its volume sensed by a buoy connected to a potentiometer. Signals from these potentiometers and those which will action pump and valves will be generated and monitored by a PIC micro-controller. A interface between PIC and user will be implemented in a PC, which will have a graphic program, with a simple interface where the process can be monitored and control algorithms can be modified.*

Keywords: *Control, PIC, didactic, micro-controller, experimental.*