

# SISTEMA DE EXPERIMENTAÇÃO REMOTA CONFIGURÁVEL DE CONTROLE DE NÍVEL DE LÍQUIDOS MULTIVARIÁVEL

Rafael E. Jabuonski Jr., Luís V. Ferreira, Bruno Guimarães, Adolfo Bauchspiess

www.ene.unb.br/lavsi - ENE-FT-UnB  
Caixa Postal 4386  
CEP 70919-970 – Brasília DF

**Resumo** A experimentação remota permite, principalmente no ambiente universitário, que experimentos caros, complexos e/ou dos quais só existam uma unidade, sejam compartilhados por meio da Internet. No presente trabalho apresenta-se um sistema de controle de nível de líquidos em que, por meio de quatro motores de passo, se configuram experimentos envolvendo até três reservatórios de água. Experimentos remotos de linearização em diferentes pontos de operação, controle PID para um, dois e três reservatórios acoplados e projeto de compensadores avanço-atraso no domínio da frequência foram realizados.

**Palavras Chaves:** Ensino à distância, Controle de Nível de Líquidos, PID, Internet.

**Abstract:** Remote laboratories allow, mainly in the university environment, that expensive or complex experiments could be shared through the Internet. This paper presents a level control system where four step motors are used to configure experiments involving one, two or three water reservoirs. Remote experiments clarifying linearization around different operating points, PID control for one to three coupled reservoirs and design of lead-lag compensators in the frequency domain have been implemented.

**Keywords:** Remote Laboratory, Fluid Level Control, PID, Internet.

## 1 INTRODUÇÃO

A disciplina Controle Dinâmico é oferecida no 7º semestre para alunos dos cursos de Engenharia Mecatrônica e Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. Atualmente são 50 ou mais alunos por semestre cursando esta disciplina. Os conceitos vistos em sala de aula precisam ser verificados em laboratório para que haja uma boa fixação dos princípios envolvidos. Não há, no entanto, no cenário atual, recursos financeiros nem humanos que permitam equipar de forma adequada laboratórios “in-loco”. Visando contrapor esta situação e melhorar a oferta de experiências foi desenvolvido um sistema que oferece via WWW uma interface para a experimentação remota de um sistema de nível de líquidos.

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 uma forma esférica. É proposto um controle digital de baixo custo para este sistema. Luiz et al (1997), Gambier e Unbehauen (1999) e Zeilmann et al (2001) apresentam sistemas interessantes de controle de nível de líquido. Vicino et al (2003) disponibilizaram na Internet um ambiente conhecido por *Automatic Control Telelab* que permite realizar experimentos remotos em um sistema de nível de líquido, porém trata-se de um sistema mono-tanque.

Guimarães et al (2002) apresenta uma sistema anterior de experimentação remota para três reservatórios. O que distingue o presente trabalho deste e de outros disponíveis na Internet é a sua grande versatilidade no sentido de permitir configurar, via WWW, experimentos com um, dois ou três reservatórios. Pode-se utilizar uma ou duas entradas, o que permite configurar diferentes experimentos escalares e/ou vetoriais.

## 2 SISTEMA CONFIGURÁVEL DE CONTROLE DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

O sistema de nível de líquidos apresenta um grande apelo didático e facilita assim a compreensão de conceitos como por exemplo: variáveis de estado (os níveis de líquido em cada tanque), que são “vistas” diretamente pelo usuário.

Duas moto-bombas permitem injetar água no primeiro e no segundo tanque. O terceiro tanque (o do meio) recebe água pelas conexões com os outros dois. Fig. 1.

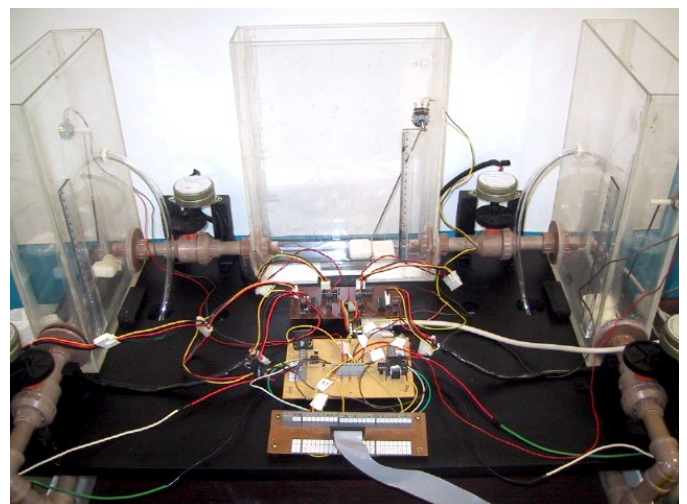


Fig. 1- Sistema multivariável de nível de líquidos

As variáveis utilizadas para descrever o sistema estão indicadas na figura 2.

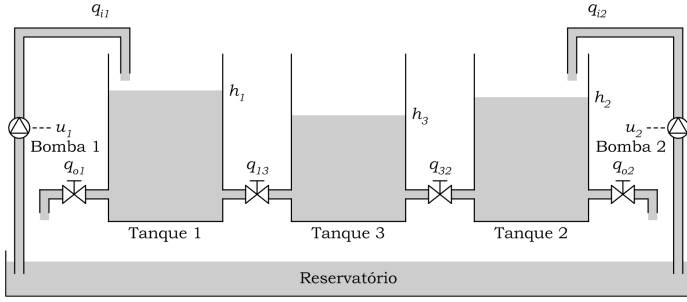


Fig. 2- Variáveis utilizadas no Sistema de nível de líquidos

O reservatório fornece água suficiente para que os três tanques possam, num caso extremo, serem completamente enchidos. Por meio de motores de passo é possível configurar diferentes experimentos (figura 3), isto é, pode-se fechar válvulas ou mantê-las parcialmente abertas, o que configura diferentes resistências equivalentes da perda de carga.

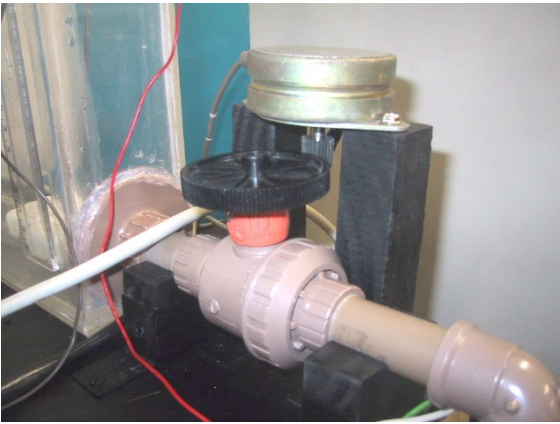


Fig. 3- Detalhe do motor de passo utilizado para controlar as válvulas

## 2.1 Modelo Matemático do Sistema

Considerando o processo da figura 2, tem-se as seguintes variáveis:

$q_{i1}, q_{i2}$  = vazão de entrada [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] nos tanques 1 e 2;  
 $q_{13}, q_{32}$  = vazão [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] entre tanques 1-3 e 3-2;  
 $q_{o1}, q_{o2}$  = vazão de saída [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] dos reservatórios 1 e 2;  
 $h_1, h_2$  e  $h_3$  = nível de líquido [cm] nos reservatórios 1, 2 e 3.

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

$$\begin{aligned} A dh_1/dt &= q_{i1} + \text{signal}(h_3-h_1)q_{13} - q_{o1}, \\ A dh_2/dt &= q_{i2} + \text{signal}(h_3-h_2)q_{32} - q_{o2}, \\ A dh_3/dt &= -\text{signal}(h_3-h_1)q_{13} - \text{signal}(h_3-h_2)q_{32}, \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $A$  é a seção transversal dos reservatórios e  $\text{signal}()$  é uma função que retorna  $-1$  se o sinal do argumento for negativo,  $0$  se for zero e  $1$  se for positivo.

A característica da válvula, considerando fluxo turbulento, foi obtida experimentalmente (Aguirre,2000),  $k = 8.2094$ :

$$\begin{aligned} q_{o1} &= k\sqrt{h_1}, \\ q_{o2} &= k\sqrt{h_2}, \\ q_{13} &= k\sqrt{|h_3 - h_1|}, \\ q_{32} &= k\sqrt{|h_3 - h_2|}. \end{aligned} \quad (2)$$

Substituindo as equações (2) em (1) tem-se a seguinte representação não-linear no espaço de estados do sistema:

$$\begin{aligned} A \frac{dh_1}{dt} &= q_{i1} + \text{signal}(h_3 - h_1)k\sqrt{|h_3 - h_1|} - k\sqrt{h_1}, \\ A \frac{dh_2}{dt} &= q_{i2} + \text{signal}(h_3 - h_2)k\sqrt{|h_3 - h_2|} - k\sqrt{h_2}, \\ A \frac{dh_3}{dt} &= -\text{signal}(h_3 - h_1)k\sqrt{|h_3 - h_1|} \\ &\quad - \text{signal}(h_3 - h_2)k\sqrt{|h_3 - h_2|}. \end{aligned} \quad (3)$$

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

$Q_{i1}$  e  $Q_{i2}$ : vazão de entrada nos tanques 1 e 2;  
 $Q_{13}$  e  $Q_{32}$ : vazões entre os tanques 1/3 e 3/2, respectivamente;  
 $Q_{o1}$  e  $Q_{o2}$ : vazões de saída dos tanques 1 e 2 para o reservatório  
 $H_1, H_2$  e  $H_3$ : nível de líquido nos tanques 1, 2 e 3. [cm]

Usa-se, então, uma analogia com um sistema elétrico, relacionando os parâmetros do sistema hidráulico com os parâmetros "R" e "C" de um circuito elétrico. A resistência (R) é a capacitância (C) são calculadas da seguinte maneira:

$$R = \frac{dH}{dQ_o}, \quad C = \frac{dV}{dH} \quad (4)$$

A capacitância (C) representa a área do tanque e a resistência (R) 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 linearizado em torno de um ponto de operação, pode-se demonstrar que (sistema mono-tanque):

$$\frac{H_1(s)}{Q_{i1}(s)} = \frac{R_1}{R_1Cs + 1} \quad (5)$$

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

$$\frac{H_3(s)}{Q_{i2}(s)} = \frac{R_2}{R_{32}R_2s^2 + C(R_{32} + 2R_2)s + 1} \quad (6)$$

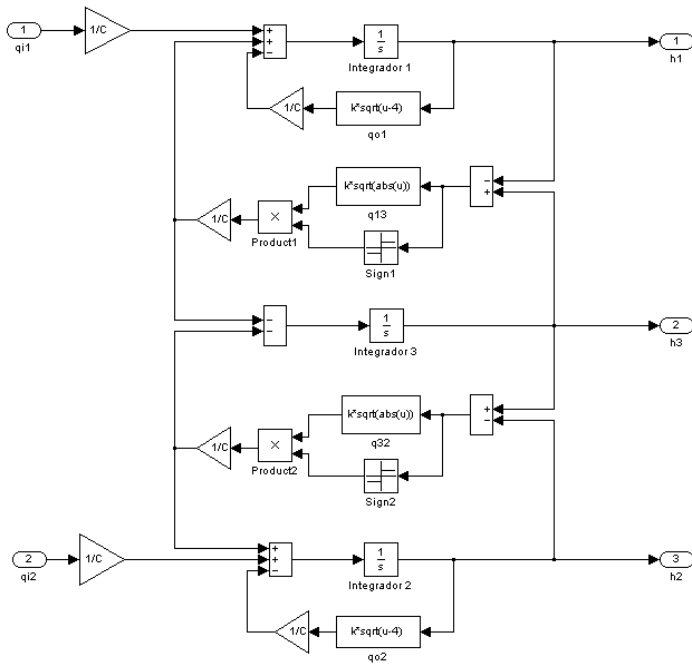
As equações apresentadas servem como modelo linearizado do processo, possibilitando o projeto de controladores lineares para este sistema.

Os parâmetros "R" do sistema são determinados experimentalmente, enquanto que o valor da capacitância dos tanques é determinado pela área da seção transversal do tanque.

## 3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA

A simulação é uma boa prática que deve ser estimulada entre os estudantes de engenharia de controle. O modelo de simulação pode ser utilizado para testes preliminares antes de se ocupar o sistema remoto.

O sistema de nível de líquidos foi simulado no SIMULINK® pelo seguinte modelo, figura 4:



**Fig. 4- Simulação do Sistema de nível de líquidos**

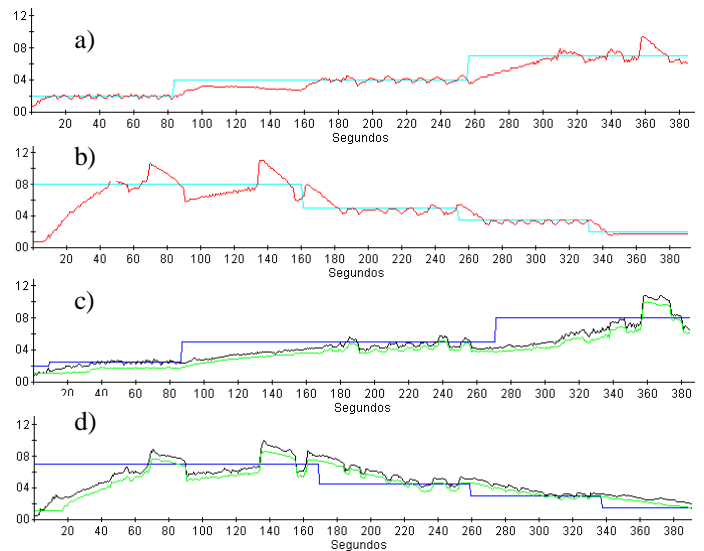
Na figura 4 à direita aparecem os níveis h1, h2 e h3. À esquerda aparecem as entradas qi1 e qi2. O modelo da figura 4 pode ser agrupado para facilitar a visualização. Na figura 5 aparece um controlador PID para os níveis h1 e h2. A resposta do sistema para uma variação na referência h1 é mostrada na figura 6.

## 4 EXPERIMENTOS REMOTOS

Nesta seção são apresentados os experimentos que são propostos aos alunos da disciplina Controle Dinâmico, assim como também disponíveis para a comunidade através da Internet. Pela natureza configurável do sistema é desnecessário dizer que vários outros experimentos podem ser realizados.

### 4.1 Linearização em diferentes pontos de operação

Neste caso considera-se o sistema operando com um ou dois reservatórios. Faz-se necessário trabalhar em malha fechada para obter a estabilização do nível de líquido em torno do ponto de operação desejado. Um controlador proporcional pode ser utilizado para este fim. Para o sinal ascendente utilizou-se  $K_p=500$  e para o sinal descendente  $K_p=1000$ , conforme as figuras a seguir.



**Fig. 7 – Resposta do sistema de 1ª (a e b) e 2ª ordem (c e d) a alterações do ponto de operação**

Conforme pode ser visto na figura 7 o tempo de resposta e o erro em regime permanente variam bastante de acordo com o ponto de operação. A proposta didática é que se levante a função de transferência para cada um dos pontos de operação mostrados na figura 7. A partir da função de transferência em malha fechada ( $K,T$ ) e o ganho proporcional utilizado é possível calcular a função de transferência em malha aberta. Para o sistema de segunda ordem, o ajuste de ganho para uma resposta subamortecida, permite procedimento similar.

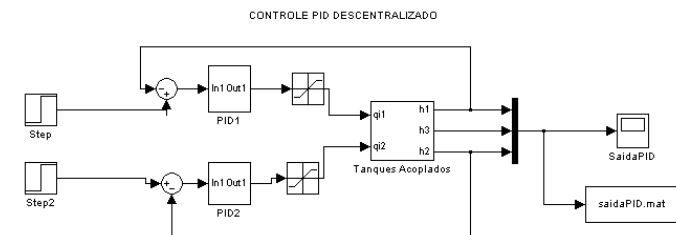
### 4.2 Controle PID para sistemas de 1ª e 2ª ordem - LGR

O controlador PID é o controlador mais utilizado na indústria. Merece desta forma especial atenção na formação de engenheiros de controle e automação.

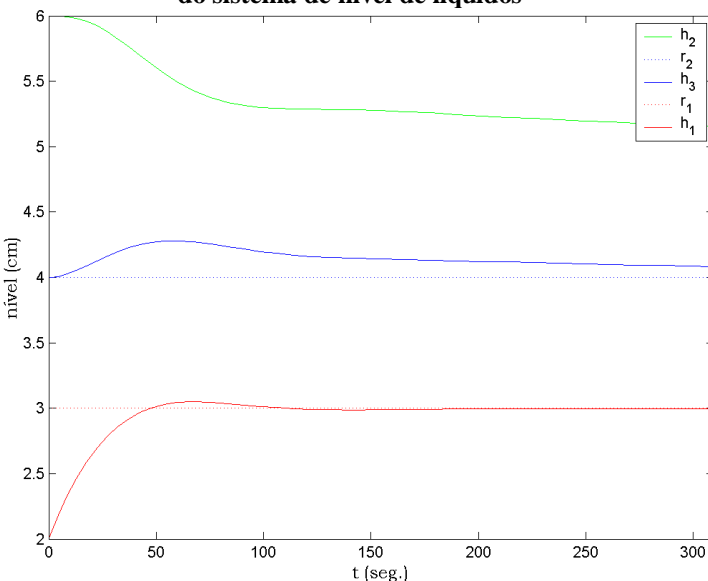
O objetivo deste experimento é realizar o projeto de controladores PID via método do Lugar Geométrico das Raízes (LGR).

A especificação dinâmica no domínio do tempo leva a uma região no plano  $s$  que os pólos em malha fechada devem ocupar (figura 8).

$$\begin{matrix} t_a \leq 150s \\ M_p \leq 10\% \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \sigma \geq 0.033 \\ \zeta \geq 0.6 \end{matrix}$$

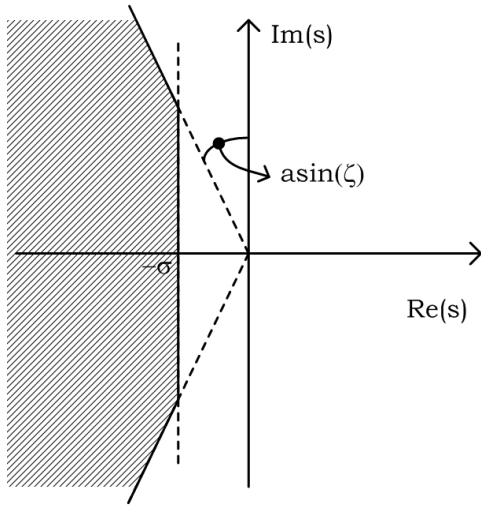


**Fig. 5- Simulação do Controle PID do sistema de nível de líquidos**



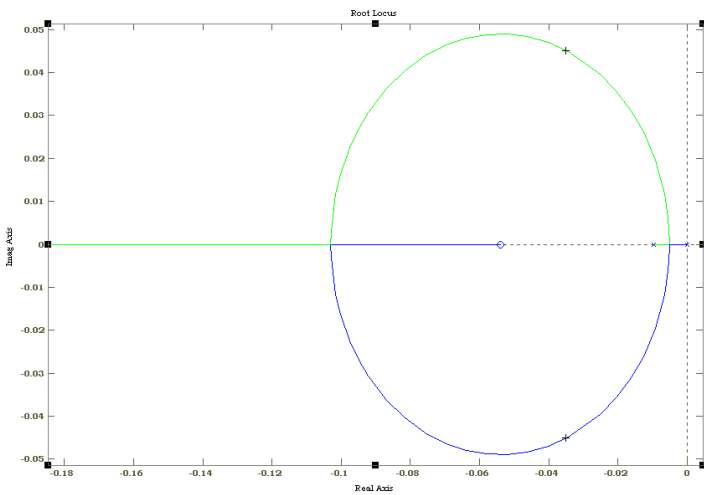
**Fig. 6- Controle PI - Simulação de degrau em h1**

Na figura 6 pode ser visto como a mudança na referência h1 é seguida depois de aproximadamente 50 s. Devido ao acoplamento entre os reservatórios ocorrem alterações significativas nos níveis h2 e h3.

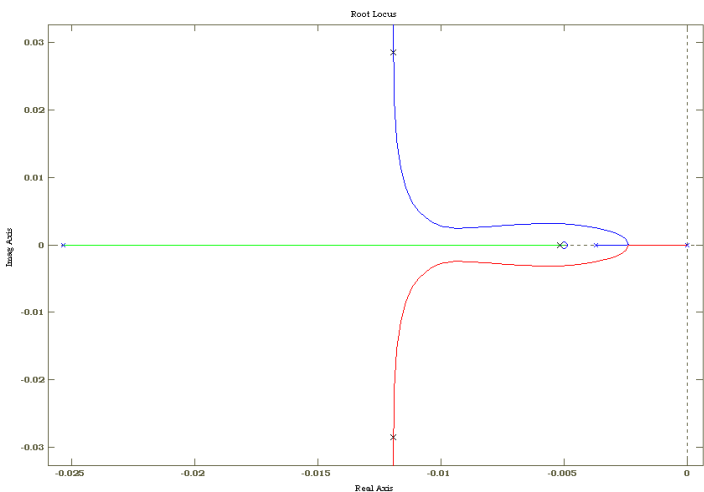


**Fig. 8- Região no plano-s dos pólos em malha fechada correspondente à especificação dinâmica**

Com a região no plano-s que os pólos devem ocupar pode-se obter os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do controlador PID. Nas figuras a seguir ilustra-se o LGR para o subsistema de 1ª e 2ª ordem considerando um controlador PI.

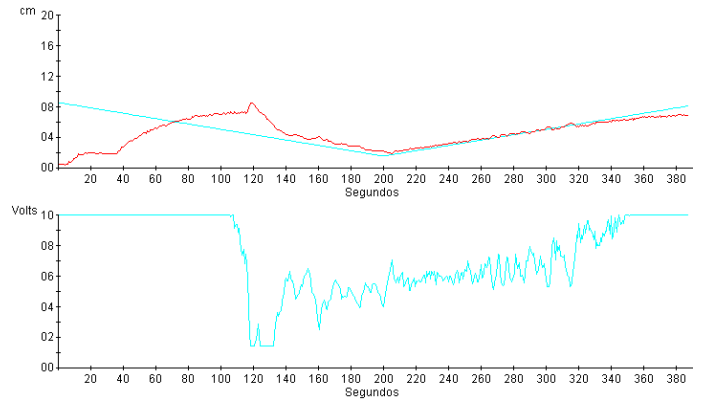


**Fig. 9- LGR do subsistema de 1ª ordem – controle PI**



**Fig. 10- LGR do subsistema de 2ª ordem – Controle PI**

A figura a seguir mostra o sistema real operando com um controlador PID. A referência é uma onda triangular. Neste caso  $K_p= 50$ ,  $K_i=0,5$  e  $K_d=1,2$ .



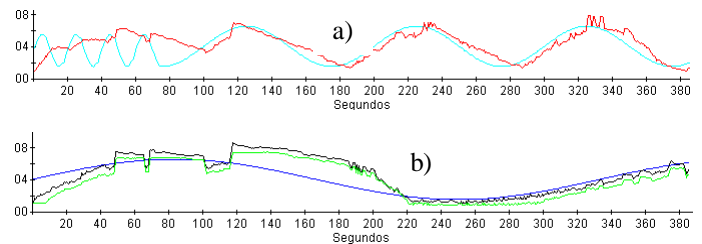
**Fig. 11- Resposta do subsistema de 1ª ordem – PID**

Nota-se nesta resposta uma clara diferença entre o enchimento e esvaziamento do tanque. O enchimento é feito pela ação da bomba, enquanto o esvaziamento é realizado apenas pela força da gravidade.

### 4.3 Controlador Avanço-Atraso via resposta em frequência

Aplicando-se uma entrada senoidal, para vários valores de frequência, obtém-se a resposta em frequência em malha fechada (diagrama de Bode) do sistema. O objetivo didático é aqui projetar um controlador de avanço ou de avanço-atraso de modo a garantir uma Margem de Ganho e uma Margem de Fase adequados.

A figura 12 mostra experimentos para a obtenção a resposta em frequência. Em a) temos um subsistema de 1ª ordem e a senoide (final) tem frequência de 0,01 Hertz, Amplitude 2,5 e um *offset* de 4cm. Em b) tem-se a resposta para o subsistema de 2ª ordem. Em a) vê-se também claramente que frequências elevadas não podem ser acompanhadas pelo sistema.



**Fig. 12- Resposta em frequência para os subsistemas de 1ª (a) e 2ª (b) ordem**

## 5 ARQUITETURA DO LABORATÓRIO REMOTO

Um laboratório remoto consiste na utilização à distância de experimentos físicos reais. Diferentemente, um laboratório virtual consiste estritamente em simulações por meio de software.

A idéia principal de um laboratório remoto é usar a World Wide WEB como plataforma de comunicação e o WEB Browser como sua interface (Röring e Jochheim - 1999). A Internet provê a plataforma para transmissão de informações enquanto o WEB Browser é o próprio ambiente para rodar o software cliente. O servidor WEB é o intermediário entre o cliente e o experimento.



## 5.1 Análise dos requisitos

Um laboratório remoto, por natureza, exige certos requisitos mínimos para atender uma qualidade satisfatória de eficiência no processo de ensino. Consequentemente, do ponto de vista da arquitetura de comunicação, a arquitetura proposta deseja maximizar e atender as seguintes características:

- Alta portabilidade: Permitir compatibilidade máxima com o emprego mínimo de recursos do usuário remoto.

- Atualização do sistema: Arquitetura auto-suficiente, ou seja, a atualização do sistema não deve depender do usuário e toda modificação deve ser imediatamente disponibilizada para o mesmo.

- Robustez: Ferramentas computacionais de proteção contra qualquer eventual dano físico ou avaria na integridade do sistema. Capacidade reiniciar sua operação se necessário.

- Identificação do usuário/limite de uso: O uso da Internet exige que o sistema controle e/ou registre o acesso do usuário ao experimento, pois a experimentação é individual. Uma vez em andamento, demais usuários conectados devem ser restritos quanto ao ajuste de parâmetros de controle. A implementação de tempo limite de uso é fundamental para a equidade no uso público do laboratório remoto.

- Eficiência Educacional: Promover alta interatividade/iniciativa do usuário, facilidade de uso, informações técnicas sobre o experimento, permitir aprendizagem modular, etc. Em especial, os dados do experimento vigente devem ser disponibilizados para o usuário ao término do experimento. Consequentemente, devem ser armazenados no servidor durante a fase de execução e para que ao final, o usuário possa efetivar o download.

## 5.2 Estrutura de comunicação

São três os computadores envolvidos no sistema como um todo: Cliente (usuário remoto), controlador de processo e servidor WEB. Consequentemente, dois trechos de comunicação em rede são necessários e também ocorrem em paralelo durante a execução do sistema. O primeiro encontra-se entre o computador de controle do processo até o servidor WEB, através da LAN. O segundo entre o servidor WEB e o cliente, através da Internet.

A figura 13 exibe a estrutura de comunicação do sistema. Esta estrutura é baseada na arquitetura cliente/servidor e escrita basicamente em linguagem Java. O servidor WEB é a única interface com o experimento. Inicialmente, uma página HTML chega até o usuário. Mediante a solicitação para início do experimento, um formulário HTML em conjunto com JavaScript e PHP registra os dados de identificação. Caso válidos, os Applets Java responsáveis pelo controle do experimento são baixados do servidor WEB até o usuário.

A estrutura de comunicação exibida pela figura 13 é genérica e consequentemente pode ser usada por diferentes experimentos.

Após configurar os parâmetros de controle e as funções de referência (degrau, senoidal, triangular, quadrada ou *piece-wise*) para os reservatórios 1 e 2 e também a abertura das válvulas, o experimento é liberado. O Applet Java abre uma conexão TCP/IP com o servidor WEB. Durante a experimentação, o usuário pode modificar os parâmetros de controle o quanto desejar e ao término, obtém os dados resultantes de seu experimento completo.

O computador de controle do processo utiliza sistema operacional em tempo real e o software de controle foi desenvolvido em C++. A rede Ethernet foi utilizada para interagir o controle e servidor WEB. A forma pela qual o servidor WEB recebe dados e envia parâmetros para o computador controlador de processo é a leitura/escrita em arquivos ASCII localizados no próprio servidor WEB. Uma estrutura de dados pertinente facilita a interação entre os softwares comunicantes.

Dado que aplicações de controle podem requisitar altas taxas de transmissão, qualquer dependência cíclica de escrita/leitura em disco rígido (alta latência) é inaceitável. Com o intuito de evitar tal situação, utilizou-se um RAMDRIVE (disco virtual proveniente da memória RAM) no servidor WEB para abrigar os arquivos ASCII, implicando assim em uma estrutura de comunicação na qual em momento algum requer acesso ao disco rígido, melhorando significativamente o desempenho do sistema.

Caso o usuário interrompa ou exceda o seu tempo limite (finalização da experimentação remota), um *script* PHP gera uma cópia do arquivo de dados no servidor WEB e este é colocado à disposição para download.

Aproveitando a informação disponível no cliente, uma representação gráfica é proposta no sentido de realçar a exibição em tempo real dos níveis de fluido nos reservatórios.

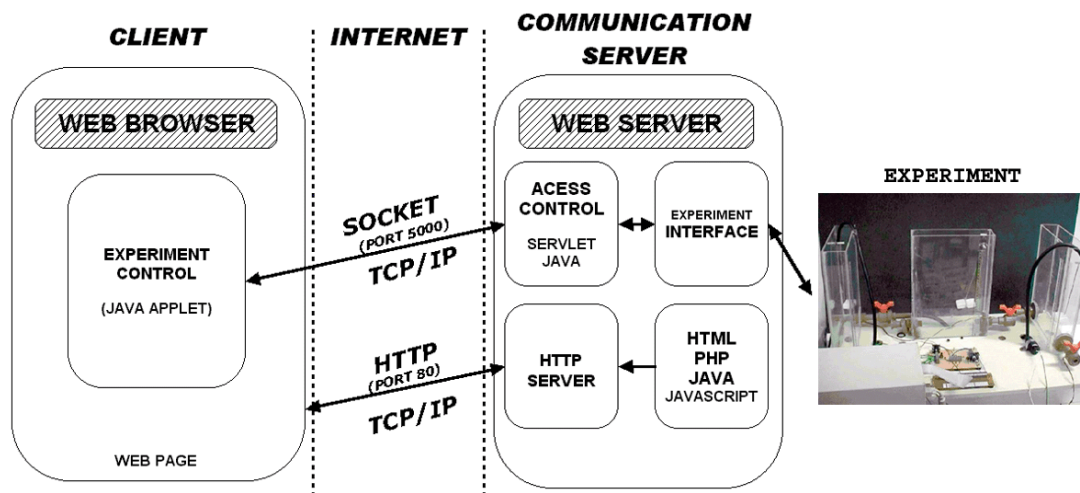


Fig. 13 – Arquitetura de comunicação adotada no laboratório remoto

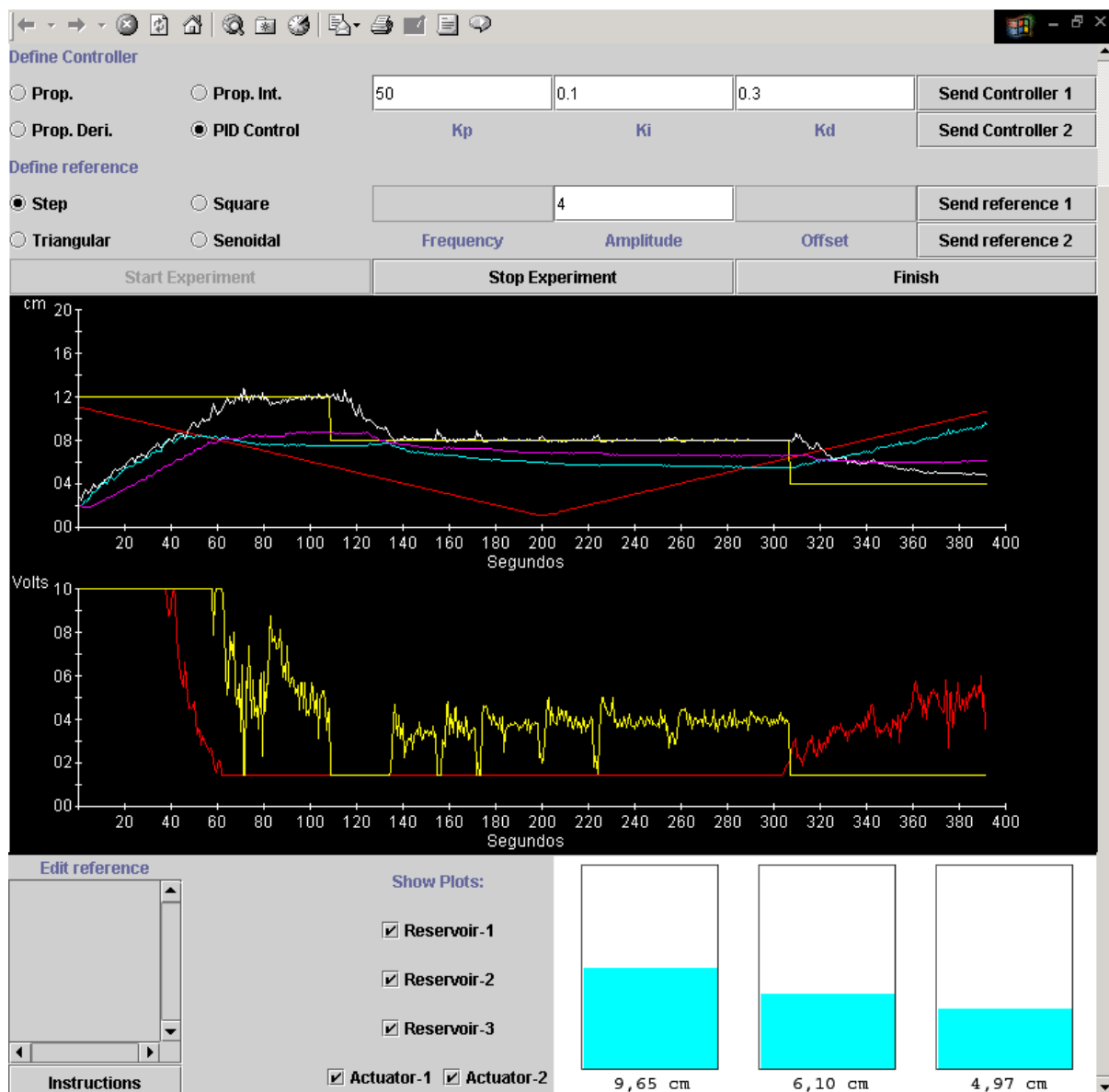


Fig. 14-Web Browser operando o laboratório remoto. <http://164.41.49.94>

## 6 CONCLUSÕES

O sistema de ensino de engenharia de controle proposto neste artigo permite que a grande demanda por experimentos de qualidade seja em grande parte suprida através do uso da Internet. A capacidade de substituir de forma didática experimentos reais começou agora a ser avaliada. No 1º semestre de 2003 47 alunos da disciplina Controle Dinâmico utilizaram o experimento. Foram realizados 5 experimentos presenciais (servomotor) e dois remotos (linearização do ponto de operação e controle PID). A interface remota foi bem aceita. A maior queixa foi quanto à disponibilidade dos experimentos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao CNPq e à FINATEC que apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, L. A. (2000) Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Editora UFMG, Belo Horizonte.
- Gambier, A. e Unbehauen, H. (1999) Adaptive predictive state-space control of a multivariable 3-tank system. Em 38th

Conference on Decision & Control, pp 1234–1239, Phoenix, Arizona.

- Grega, W. e Maciejczyk, A. (1994) Digital control of a tank system. IEEE Transactions on Education, Vol. 37, No. 3; pp. 271–276.

- Guimarães, B., Souza, A.S., Gosmann, H.L., Bauchspiess, A. (2002) Internet based remote laboratory: the level control of three coupled water reservoirs. ACCA 2002 – Santiago, Chile

- 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.

- Vicino, A. et al (2003) Automatic Control Telab. URL: <http://www.dii.unisi.it/~control/act/home>.

- Röring, C. e Jochheim, A. (1999) The Virtual Lab for Controlling Real Experiments via Internet. IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design. Kohala Coast-Island of Hawaii, USA

- Zeilmann, R.P., Silva Jr, J.M.G., Pereira, C.E., Bazanella, A.S. (2001) Uma Estratégia para Controle e Supervisão de Plantas Industriais através da Internet, V SBAl, Canela