



## **CONSTRUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE PROTÓTIPO DIDÁTICO DE CONTROLE DE NÍVEL DE LÍQUIDOS NÃO-LINEAR MULTIVARIÁVEL.**

**José A. L. Barreiros** – [barreiro@ufpa.br](mailto:barreiro@ufpa.br)

UFPA/PPGEE

Rua Augusto Correa, 1

CEP 66075-110 – Belém – Pará

**José F. B. Andrade** – [jandrade1br@yahoo.com.br](mailto:jandrade1br@yahoo.com.br)

UFPA/PPGEE

Rua Augusto Correa, 1

CEP 66075-110 – Belém – Pará

**Resumo:** O presente trabalho disserta sobre o aprimoramento técnico e utilização didática do projeto denominado Sistema de Controle de Níveis de Líquidos em Tanques – SICONILI – modelado anteriormente por (Riker Jr, 2008). Plantas como esta têm grande relevância no estudo e aplicação de técnicas de controle uma vez que apresentam características não lineares e caráter multivariável. Nesta abordagem, descreve-se sobre o desenvolvimento do modelo teórico e construção do protótipo didático em escala real, a identificação da planta e um exemplo de implementação de técnica de controle durante a utilização prática como planta didática e experimental em trabalhos de laboratório na Universidade Federal do Pará - UFPA.

**Palavras-chave:** *Nível de Líquidos, Multivariável, Controle, Protótipo.*

### **1 INTRODUÇÃO**

O controle de nível de líquidos pode ser utilizado em diversas aplicações domésticas ou industriais. Em pequenos sistemas de nível como em caixa d'água, em misturadores aplicados a indústria e tanques, ou em grandes sistemas como eclusas, e represas em hidrelétricas.

O potencial regional dos recursos hídricos da região amazônica é um grande incentivo para tentar aprimorar e dominar as técnicas para as possíveis demandas e aplicação de projetos desta natureza. Esta foi a motivação para o apoio à realização deste projeto pelo Laboratório de Supervisão e Controle de Recursos Hídricos da Universidade Federal do Pará – UFPA.

O Sistema de Controle de Níveis de Líquidos em Tanques é um projeto pioneiro no Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação (LEEC) da UFPA, uma vez que possibilita o trabalho com sistemas de caráter multivariável em sistemas não lineares,

mencionado apenas em abordagens teóricas. É um projeto simples, de fácil implementação, baixo custo e de modelagem matemática simples o que o torna muito versátil.

O projeto já está sendo utilizado como bancada didática possibilitando vários estudos em disciplinas de controle na graduação e de pós-graduação. A flexibilidade do SICONILI sugere que outras formas de controladores podem ser desenvolvidas e, além disso, novas variáveis podem ser incluídas, como o controle de temperatura, ou novos tanques, válvulas e bombas adicionadas à planta.

Várias técnicas, como alocações de pólos por espaço de estados, PID, além do Fuzzy Takagi-Sugeno que foi realizado com sucesso por (Andrade *et al.*, 2009) e outros controle inteligentes, podem ser implementadas nesta planta facilmente, com poucas modificações incorporando grande valor e versatilidade ao protótipo.

O aprimoramento desta planta visa contribuir para diminuir a lacuna existente entre a teoria difundida em sala e a prática laboratorial em disciplinas que contemplem estes tópicos no Curso de Engenharia Elétrica.

## 2 O SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

Embora seja um sistema com constituição formal simples, este Sistema de Nível de Líquidos deve ser observado com bastante cautela. Em princípio, devido os líquidos armazenados em colunas, sob a análise da vazão instantânea, apresentar características não lineares. E, em seguida, devido esse sistema em particular apresentar comunicação de forma que um reservatório interfira diretamente no nível do outro. Isso acarreta na acentuação da não linearidade tornando o sistema bem mais complexo.

Como pode haver mais de um tanque na planta, a quantidade de variáveis para ser analisadas aumenta, o que o torna um sistema de características multivariáveis. Além disso, a quantidade de tanques interligados pode produzir sistema de ordem mais elevada, e de acordo com a configuração das comunicações entre tanques, a modelagem muda, pois entram novas variáveis a considerar, demandando novos cálculos.

Por essa natureza, que os sistemas de níveis de líquidos são tão interessantes de serem estudados. O controle desses sistemas possui um grande interesse teórico, pois é possível implementar técnicas de identificação e controle mais avançados, além do controle clássico.

### 2.1 Constituição do Protótipo

O projeto é composto por dois tanques de acrílico, cada um medindo 240 mm de altura sobre uma base de 150 x 200 mm. Estes tanques estão dispostos um sobre o outro, separadamente, e se comunicam através de orifícios na base de cada tanque para permitir o transporte de líquido de um para o outro. Os tanques são apoiados através de um suporte em madeira onde comporta os dois tanques mais o sorvedouro. O tanque mais abaixo depende da vazão do primeiro tanque e de uma válvula na sua entrada. O tanque mais ao alto depende somente da vazão de uma válvula na sua entrada.

Um outro tanque de maior volume é utilizado como sorvedouro para suprir a quantidade de líquido necessário para o funcionamento da planta e localiza-se abaixo dos outros dois tanques.

A Figura 2 mostra o sistema de forma simplificada. Esta configuração foi escolhida devido a interferência que um tanque pode causar no outro, o que torna o processo mais complexo, além da existência da não-linearidade de cada tanque.

O transporte de água para os dois tanques é realizado por motobombas da Marca Eberle® do tipo “on-off” atrelado a tubulações de transporte de líquidos que adquire líquido de um tanque auxiliar, que realiza o papel de sorvedouro. Para o controle da vazão, pode ser utilizado válvulas “on-off” ou proporcionais. Neste trabalho optou-se pela utilização destas últimas pois, podem atuar de forma mais precisa no controle da vazão, sem precisar “ligar e desligar” os dispositivos de forma intermitente.

Para medir o nível foi utilizado um sensor de pressão MPXM2010GS. Seu uso é motivado por sua versatilidade. É um sensor de baixo custo e de tamanho reduzido, podendo ser utilizado de diversas maneiras. O método de medição utilizado neste projeto denominado “ar no cano”. A extremidade de uma cânula é fixada no orifício do sensor enquanto a outra extremidade permaneça aberta. Foi utilizado um microcontrolador do tipo PIC 16F877 com duas portas AD e dois PWM's habilitados. O projeto utiliza dois conjuntos contendo uma válvula e uma motobomba cada, sendo um conjunto para cada tanque.



Figura 1 – Fotografia do protótipo.

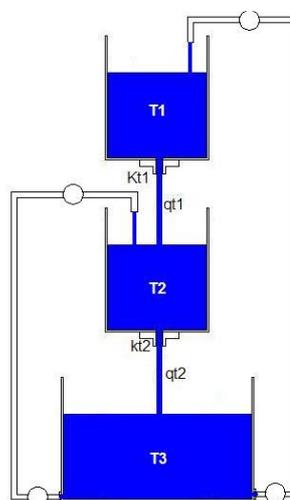


Figura 2 – Disposição formal dos elementos.

Para realizar o controle de vazão nas entradas dos tanques são utilizadas eletroválvulas proporcionais de corrente contínua da marca Burkert. São específicas para fluidos inertes como água e gases e podem suportar pressão até 10 bar, mas não necessitam de pressão diferencial para funcionar. A abertura da comporta é acionada por um solenóide e depende da tensão em corrente contínua nos terminais, variando de 0 a 24 V. A grande vantagem é que elas podem funcionar com Pulse Width Modulation – PWM – utilizando a tensão efetiva conforme o ciclo de trabalho (Duty Cycle) possibilitando estratégias de controle no uso com microcontroladores.

## 2.2 Modelagem Matemática

Para haver uma linha de raciocínio contínua o modelo será demonstrado de forma breve, apesar do estudo teórico das equações básicas sobre este trabalho já ter sido demonstrado exaustivamente em (Ogata, 1998) e (Aguirre, 2003). Para que possamos trabalhar em um sistema dessa natureza, de início, devemos considerar que o fluido seja genérico e o sistema ideal. Isto significa que consideramos o fluido incompressível e que não há perdas de carga nas tubulações do sistema. O sistema deve ter parâmetros concentrados e somente as variáveis relevantes entram no modelo.



A troca de material neste tanque pode ser equacionada através da equação de balanço ou troca de volume, considerando que sempre haverá a conservação do volume de líquido no sistema, que corresponde a soma de todas as vazões de entrada de líquido subtraído da soma de todas as vazões que saem do tanque. Generalizando, tem-se

$$\frac{dv}{dt} = \sum qi - \sum qo \quad (1)$$

Para o tanque T1, temos:

$$\frac{dv}{dt} = qv1 - qt1 \quad (2)$$

A variável  $v$  corresponde ao volume de água que permanece no tanque. Substituindo, temos:

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = qv1 - qt1 \quad \text{e} \quad \frac{dh}{dt} = \frac{qv1 - qt1}{A} \quad (3)$$

Desse modo, o controle pode simplesmente ser realizado com referência à altura da coluna de líquido do tanque uma vez que se torna fácil e rápido mensurar uma grandeza unidimensional. Observe que  $qv1$  e  $qt1$  são, respectivamente, vazão de entrada e vazão de saída do tanque T1, em  $\text{cm}^3/\text{s}$ , e  $A$  é a área da seção transversal do tanque. Logo, obteve-se um modelo que relaciona vazão de entrada e de saída com a altura do tanque, e que a equação (4) representa uma equação de estado do sistema, onde  $h$  é uma variável de estado.

Em (Andrade, 2009), considerando a ação da pressão da bomba ( $Pb$ ), altura da coluna d'água no encanamento ( $hc$ ), pressão atmosférica ( $Patm$ ), gravidade ( $g$ ) e a massa específica da água ( $\rho$ ), temos a equação de estado do tanque 1 é:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{kv1\sqrt{Pb - \rho \cdot g \cdot hc - 2 \cdot Patm} - kt1\sqrt{\rho \cdot g} \sqrt{h}}{A} \quad (4)$$

O cálculo para o tanque 2 é análogo, e a equação de estado é representada pela equação abaixo:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{kv2\sqrt{Pb - \rho \cdot g \cdot hc2 - 2 \cdot Patm} + kt1\sqrt{\rho \cdot g} \sqrt{h1} - kt2\sqrt{\rho \cdot g} \sqrt{h2}}{A} \quad (5)$$

Observa-se que a diferença entre as equações é que nesta última a inclusão de uma parcela referente a saída do tanque 1 que funciona como uma das entradas, somando vazão ao tanque 2. Para possibilitar que o sistema seja representado de forma mais simplificada, procedeu-se a linearização do sistema em através de Série de Taylor e definiu-se na forma de espaço de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{2.A.\sqrt{h_{o1}}} & 0 \\ \frac{k_1}{2.A.\sqrt{h_{o1}}} & -\frac{k_2}{2.A.\sqrt{h_{o2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{v1} \\ q_{v2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$$

A Figura 3 mostra o sistema em diagrama de blocos do sistema. O controlador adquire um valor de referência na entrada e realiza uma comparação do valor da referência com o valor adquirido pelo sensor de nível. Assim, o sistema ajusta a tensão de entrada das válvulas conforme o erro.

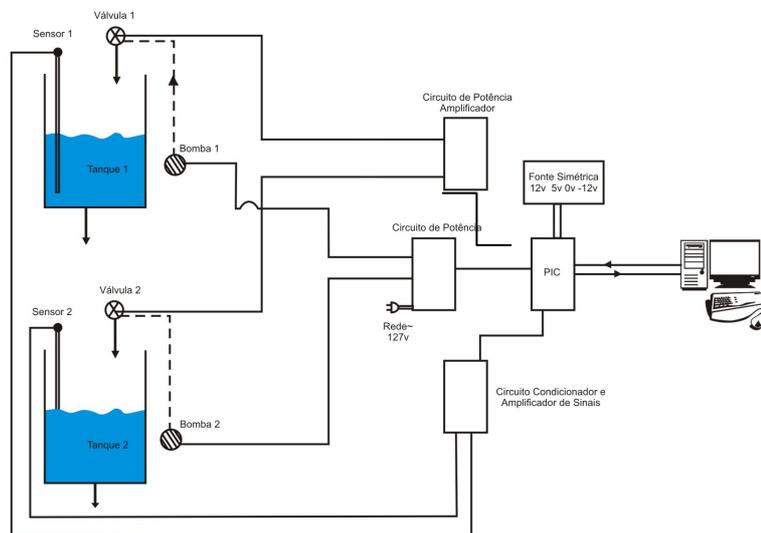


Figura 3 – Esquema em blocos do sistema de nível de líquidos.

### 3 ROTEIRO UTILIZAÇÃO A BANCADA DIDÁTICA

Para ajudar na didática para inclusão da bancada em aulas de controle, foi sugerido como trabalho de ensino em laboratório, um controlador por alocação de polos com integradores na saída. O projeto deste controlador é analítico e baseia-se em (Paraskevopoulos, 1996), que generaliza a técnica para sistemas multivariáveis.

O protótipo MIMO pode ser representado em diagrama de blocos através da Figura 4, onde A, B e C são vetores de estados e no integrador, I é uma matriz identidade.

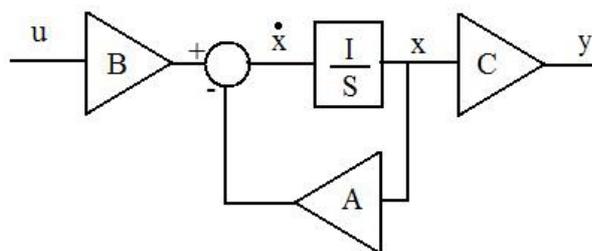


Figura 4 – SICONILI na representação em espaço de estados.



A técnica de alocação de pólos consiste em ajustar os pólos de malha fechada do sistema apenas ajustando os ganhos de realimentação dos estados do sistema. É interessante neste caso o conhecimento da estabilidade em malha aberta, e das propriedades de controlabilidade e da observabilidade, pois estão diretamente relacionadas com o uso de controladores no sistema.

A controlabilidade está relacionada com a capacidade do sinal de controle  $U$  transportar o sistema de um estado inicial  $x_i(k)$  para um estado final  $x_f(k)$  desejável. A observabilidade associa-se a possibilidade de encontrar o estado do sistema a partir de algumas observações de seus elementos.

No caso do SICONILI, não há necessidade de observadores de estados, pois é perfeitamente possível medir todos os estados pressupondo que podem ser controlados.

O roteiro de aula em laboratório inicia-se utilizando a representação por espaço de estados do sistema. A equação (7) em espaço de estados é mostrado abaixo:

$$\begin{bmatrix} \dot{h1} \\ \dot{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k1}{2.A.\sqrt{ho1}} & 0 \\ \frac{k1}{2.A.\sqrt{ho1}} & -\frac{k2}{2.A.\sqrt{ho2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h1 \\ h2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} qv1 \\ qv2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h1 \\ h2 \end{bmatrix}$$

É necessário realizar uma análise de estabilidade do sistema. O sistema é dito estável a partir dos autovalores da matriz de estados da matriz  $A$ , caso possuam parte real negativa. Considerando o sistema contínuo e inserindo os parâmetros, temos que:

$$A = \begin{bmatrix} -0.001844 & 0 \\ 0.001844 & -0.00305 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{300} & 0 \\ 0 & \frac{1}{300} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Com o objetivo de encontrar a equação característica e os autovalores, aplica-se a equação

$$|sI - A| = 0 \quad (9)$$

Onde tem-se

$$(s + 0.001844)(s + 0.00305) = 0 \quad (10)$$

É fácil verificar que os autovalores do modelo linear são:

$$s = [-0.001844 \quad -0.00305] \quad (11)$$

Concluindo assim que o sistema é estável dentro do seu ponto de operação.

### 3.1 Controlabilidade

A determinação da controlabilidade de um sistema pode ser dado pela matriz de controlabilidade, e é definida genericamente por:

$$C = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (12)$$

Onde n é a ordem do sistema considerado.

Um sistema é dito controlável se o rank (ou posto) da matriz de controlabilidade for igual a sua ordem. Assim para o SICONILI, tem-se:

$$C = [B \ AB]$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.0033 & 0 & -0.0000 & 0 \\ 0 & 0.0033 & 0.0000 & -0.0000 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{Rank}(C) = 2$$

### 3.2 Controlador por alocação de pólos com integrador na saída

Neste roteiro, a estratégia adotada para realizar um ajuste de compensação na saída, na tentativa de realizar uma correção para os valores em regime permanente, consiste em colocar um integrador na saída do sistema. A configuração do sistema é mostrada na Figura 5.

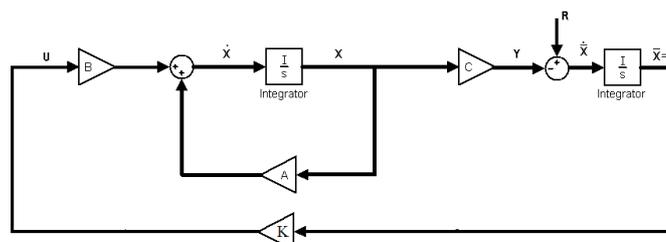


Figura 5 – Sistema com integrador na saída. Andrade, 2008.

Nesta configuração, nota-se que há a inclusão de mais dois pólos no sistema através do integrador que realimenta a entrada. A representação por espaço de estados do sistema é mostrada abaixo.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} R \quad (14)$$

$$Y' = [C \ 0] \begin{bmatrix} X \\ X' \end{bmatrix}$$

Onde define-se que:



$$\begin{aligned}
 (15) \quad Aa &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ -c_{11} & -c_{12} & 0 & 0 \\ -c_{21} & -c_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 B1 &= \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

O sistema agora apresenta 4ª ordem devido os 4 pólos apresentados pelo sistema. Da mesma forma, para encontrar os valores da matriz de realimentação de estados (K), o aluno agora pode escolher quatro valores para os pólos de malha fechada de acordo com as características desejadas pelo sistema. Pode-se supor os seguintes pólos:

$$P = [-0.39 \ -0.39 \ -0.001 \ -0.001] \quad (16)$$

Sendo os dois primeiro referindo-se à dinâmica do sistema e os dois últimos referindo-se ao integrador de saída, colocando-os convenientemente perto de zero, calcula-se o valor de K. Esses pólos podem ser escolhidos através de sintonia heurística ou de acordo com as características desejadas para o sistema. Calculando, tem-se que:

$$K = \begin{bmatrix} 116.1462 & 0 & -1.14 & 0 \\ 0.8538 & 115.9548 & 0 & -1.14 \end{bmatrix} \quad (17)$$

A saída simulada na interface LabView pode ser observada na figura abaixo. As referências para o nível do tanque 1 foram de 0,15 m de altura alterando-se para 0,10 m de altura. Para o tanque 2, o nível de referência foi 0,10 m e decresceu depois para 0,05 m.

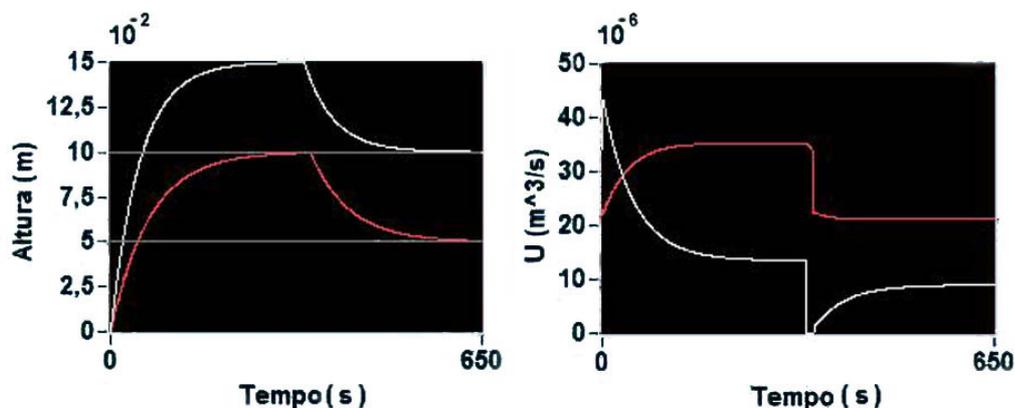


Figura 6 – Gráfico de simulação do Sistema.

Utilizando o mesmo valor de K, um ensaio foi realizado com o protótipo apresentando a resposta para o sistema mostrada na Figura 7.

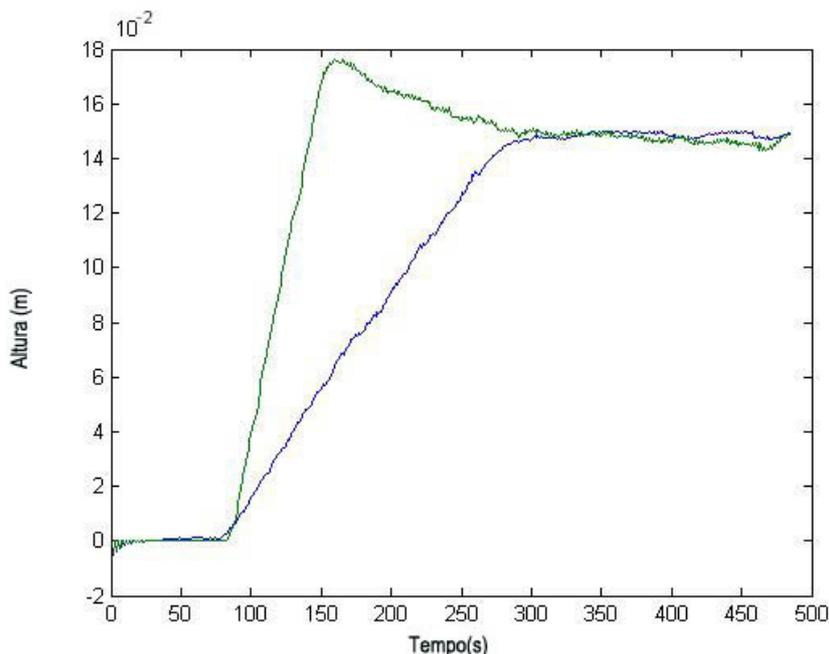


Figura 7 – Gráfico de ensaio real do Sistema de Nível de Líquidos.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste protótipo está constituindo uma das maneiras mais eficientes de realizar o ensino de sistemas multivariáveis em aulas das disciplinas de controle na medida em que se obtém valores reais em experimentos que antes eram vistos apenas na teoria ou por simulações. Contudo, os simuladores e interfaces ainda são recursos de grande auxílio para o aprimoramento desta bancada de controle e no melhor planejamento e desenvolvimento das aulas nas disciplinas de controle.

O Sistema de Controle de Níveis de Líquidos, embora simples em sua constituição, está agregando muito ao ensino nas aulas sobre técnicas de controle multivariável, ajudando no entendimento de alunos, na didática e desempenho de docentes e em pesquisas na área, auxiliando inclusive no programa de pós-graduação.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo apoio e infraestrutura, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará (FAPESPA) pelo apoio financeiro na execução deste trabalho.

#### 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

##### *Livros*

AGUIRRE, LUIS ANTONIO. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 2ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.



NISE, NORMAN S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.

PARASKEVOPOULOS, P.N. **Digital Control Systems**. United Kingdom. Prentice-Hall, 1996.

SEDRA, A. AND SMITH, K. **Microeletrônica**, Pearson Education do Brasil. 2000.

#### ***Capítulo de Livro***

FREIRE, R. C. S. **Instrumentação eletrônica**, Technical Report, Universidade Federal da Paraíba, 2002.

#### ***Monografia***

ANDRADE. J.F.B, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Controle Multivariável Em Sistemas de Nível de Líquidos com Tanques Interligados. Projeto de Conclusão de Curso.2008.

MELO, G.A.F, BERNARDES. M.C, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA Instrumentação e Controle de uma Maquete de Nível de Líquido com Quatro Tanques Interligados. Projeto de Conclusão de Curso. 2006.

RIKER JÚNIOR, F. M. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Desenvolvimento de um Protótipo Didático Multivariável: Sistema de Controle de Níveis de Líquidos. Projeto de Conclusão de Curso, 2008.

#### ***Manual***

FREESCALE SEMICONDUCTOR, **Liquid Level Control Using a Pressure Sensor**. Application Notes. 2007.

#### ***Trabalho em evento.***

ANDRADE, J.F.B., BARREIROS, J.A.L, et al. **Controle Fuzzy Takagi-Sugeno de Sistema de Nível de Tanques**. VI SNCA. Bahia, 2009.

## **CONSTRUCTION AND USE OF NONLINEAR MULTIVARIABLE CONTROL LIQUID LEVEL TEACHING PROTOTYPE.**

**Abstract:** *This paper talks about the technical improvement and use of teaching prototype called Control Liquid Levels System - SICONILI - modeled previously by (Riker Jr., 2008). This Project have high relevance in the study and application of control techniques because they present nonlinear and multivariable characteristics. This approach describe about the development of model and prototype construction in real scale, the plant*



identification and explain about an example of control technique during use of didactic plant in experiments at the Federal University of Pará - UFPA.

**Key-words:** *Liquid Level, Multivariable, Control, Prototype*