



## X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

*“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”*

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Universidade Severino Sombra  
Vassouras – RJ – Brasil

### DESENVOLVIMENTO E AUTOMAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE TANQUES ACOPLADOS

FACHINI<sup>\*1</sup>, N. F. ; COSTA<sup>2</sup>, T. V.; da SILVA<sup>3</sup>, F. V.

<sup>1</sup>Aluna da FEQ/UNICAMP    <sup>2</sup>Doutorando da FEQ/UNICAMP    <sup>3</sup>Professor da FEQ/UNICAMP  
Faculdade de Engenharia Química - Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos -  
Universidade Estadual de Campinas  
Endereço - Albert Einstein, 500 - Cidade Universitária Zeferino Vaz  
Campinas - SP - CEP: 13083-852.  
email: flavio@feq.unicamp.br

**RESUMO** - Esse trabalho tem como objetivo a realização do estudo da aplicação das práticas de controle em tempo real num protótipo experimental de quatro tanques. Realizou-se a montagem de um protótipo com quatro tanques interativos, a configuração de um controlador lógico programável e a implementação de um sistema supervisor para monitorar e armazenar as variáveis de processo no experimento. Em seguida foi feito o reconhecimento da dinâmica do processo em malha aberta e a sintonia dos controladores através dos modelos clássicos de controle. Pôde-se notar a importância da realização de uma sintonia adequada a fim de se obter uma resposta de controle mais ágil e acurada. O protótipo de quatro tanques mostrou-se como uma ferramenta muito eficiente no estudo do controle e automação de sistemas, possibilitando uma ampla aplicabilidade de algoritmos de controle e permitindo a realização do estudo experimental de estruturas de controle clássico e avançado.

**Palavras chave:** sintonia de controladores, software livre, comunicação OPC.

### INTRODUÇÃO

Nas disciplinas de controle de processos voltados para engenharia química costuma-se enfatizar a teoria do conteúdo, resultando em uma menor aplicação prática dos métodos de controle. A prática laboratorial apresenta problemas reais, que acontecem no ambiente industrial, muitas vezes negligenciados durante a simulação, como: presença de ruído, falhas no equipamento e não linearidades do processo (GATZKE *et. al.*, 2000).

O protótipo de quatro tanques é um sistema que possui pequena complexidade de construção, mas permite uma ampla aplicabilidade de técnicas de controle. Ele tem sido empregado em muitos trabalhos com finalidade de análise e desenvolvimento de rotinas de controle. Pode-se citar, como exemplo, o uso de uma aplicação experimental para ilustrar as limitações de desempenho devidas as localizações de zeros em sistemas controle multivariáveis (JOHANSSON, 1997).

Neste trabalho foi realizada a aplicação do controle *feedback* através da

\*Bolsista CNPq.

implementação de controladores PID. Os controladores PID são atualmente a forma mais utilizada de controle *feedback*, mais de 90% dos controladores industriais implementados são baseados nesse algoritmo e possuem aplicação em muitas áreas, como: controle de processos, veículos aéreos, memórias magnéticas e óticas, automóveis, motores, etc (ÅSTRÖM *et. al.*, 2001).

Além disso, o controlador PID está presente na maioria dos *softwares* dos CLPs comercializados atualmente, possibilitando uma aplicação mais facilitada desse tipo de controle. Tal aprimoramento teve início na década de 1970 com a necessidade de uma interface entre os sistemas de controle e os CLPs, impulsionando o surgimento dos sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Essa interface foi sendo, então, aperfeiçoada, surgindo o padrão OLE (*Object Linking and Embedding*) para controle de processos (SAHIN *et. al.* 2009).

O padrão OPC foi desenvolvido pela Fundação OPC e baseia-se na tecnologia COM da Microsoft, que consiste em protocolos padronizados para facilitar a interoperabilidade e o fluxo de informação entre as malhas de controle, os sistemas de automação e os *softwares* proprietários (COSTA *et. al.*, 2009). Isso porque esse padrão define os formatos de objetos, métodos e interfaces para os elementos da rede que faz conexão (como instrumentos, CLPs e *softwares* matemáticos). Tornando-se desnecessário a conversão de protocolos segundo a codificação estabelecida pelo fornecedor de cada equipamento da malha de controle, como acontecia no passado. Pois a comunicação OPC permite a manipulação de objetos em ambientes diferentes daqueles onde foram implementados, não sendo, portanto, necessário o conhecimento de sua codificação.

Juntamente com os sistemas de supervisão, a aplicação de *softwares* matemáticos junto às malhas de controle nos permite a manipulação dos dados em tempo real e avaliação do desempenho das técnicas de controle implementadas. Nesse âmbito, a aplicação de *softwares* matemáticos privados mostra-se mais dispendiosa quando comparada com a alternativa de utilizar *softwares* livre como o Scilab, que podem efetuar as mesmas tarefas com um desempenho competitivo.

Criado no início da década de 90 por um grupo de seis pesquisadores franceses pertencentes ao INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*), o Scilab é um *software* livre que dá suporte a programações de linguagem de alto nível e inúmeras aplicações para resolução de problemas matemáticos e simulações<sup>[1]</sup>. Esse trabalho aborda a utilização do *software* livre Scilab para a aplicação de controladores PID em um protótipo experimental de tanques de nível através do uso comunicação OPC.

### Xcos/Scilab e a Comunicação OPC

O padrão OPC funciona na forma cliente-servidor e possibilita a transferência de dados do servidor para mais de um cliente na rede e vice-versa. Para se efetuar a comunicação OPC com o *software* Scilab foi necessária a compilação de funções para organizar e permitir a manipulação dos dados. Essas funções foram executadas em uma biblioteca de vínculo dinâmico do padrão OPC e ligadas com o Scilab através da interface de linguagens que esse *software* suporta. No presente trabalho foi empregado um conjunto de funções<sup>[2]</sup> em linguagem TCL, no qual após a conexão com o servidor OPC, um grupo responsável pela organização dos itens é adicionado ao *software*.

Através da ferramenta gráfica Xcos do Scilab, essas funções puderam ser utilizadas na leitura e manipulação dos valores das variáveis envolvidas. Isso foi realizado através da construção da malha de controle em forma de diagrama de blocos no simulador dinâmico Xcos. Nessa ferramenta, as variáveis envolvidas no processo são lidas/escritas através de blocos que recebem essas funções programadas em TCL. A Figura 1 representa uma esquematização de como essa comunicação ocorre.



**Figura 1 – Esquematização da conectividade entre o Scilab e CLP.**

<sup>1</sup> Scilab - Free and Open Source software for numerical computation: [www.scilab.org](http://www.scilab.org).

<sup>2</sup> Desenvolvidas pelo doutorando Thiago V. da Costa.

## Protótipo Experimental

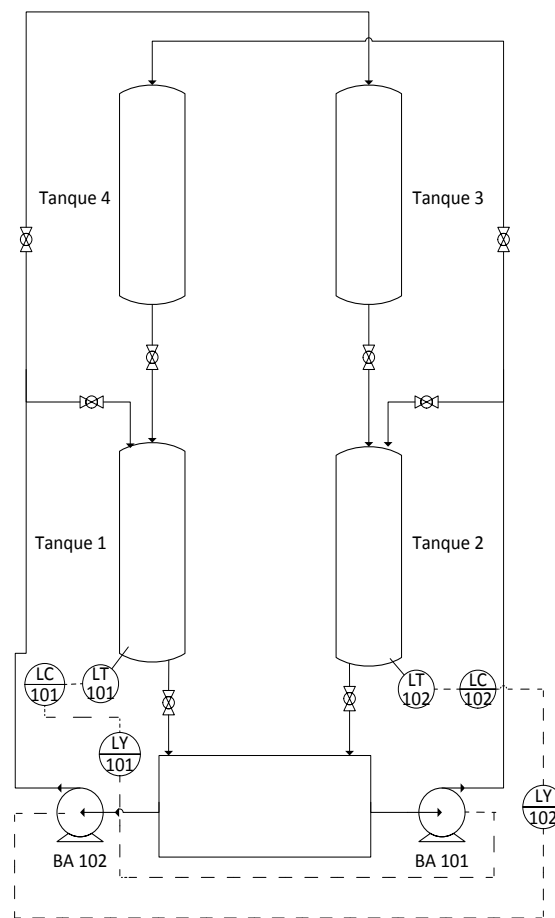
O protótipo experimental utilizado contém um tanque para armazenagem e abastecimento de água do sistema, um suporte construído com chapas de aço carbono, quatro tanques cilíndricos de acrílico com 1 m de altura e 16 cm de diâmetro, tubulações e conexões de PVC rígido e válvulas do tipo esfera também em PVC. Para impulsionar a água foram instaladas duas bombas centrífugas trifásicas e as medições dos níveis dos tanques foram realizadas através de sensores piezométricos. Montou-se um painel elétrico, no qual foram instalados: dois inversores de frequência para controlar a velocidade das bombas trifásicas, os módulos de entrada/saída do CLP modelo PP045 da marca B&R Automation (série X20 System) e as chaves para ligar e desligar os equipamentos. A Figura 2 mostra o diagrama de instrumentação do protótipo experimental montado. Desejou-se controlar os níveis dos tanques inferiores através das vazões das bombas.

A programação do CLP PP045 foi efetuada a partir da implementação de um programa em linguagem *Ladder* para a leitura dos dados de nível e acionamento das bombas no *software* Automation Studio. Visando uma simplificação na leitura dos dados, adotou-se que os dados de nível dos tanques e de vazão das bombas seriam manipulados em porcentagem, usando como referência uma altura definida como valor máximo. Além disso, considerando a segurança do processo, uma rotina foi instalada nesse programa para interromper o fornecimento de água aos tanques através do desligamento das bombas caso o nível de um dos tanques atingisse um valor crítico próximo do valor máximo convencional, evitando o transbordamento.

## Técnicas de Sintonia do PID

Neste trabalho foram utilizadas duas técnicas para a sintonia dos controladores PID: o método Aström–Hagglund e o método IMC (*Internal Model Control*). A escolha dos métodos foi feita de forma a comparar a eficácia de uma técnica de sintonia automática com uma técnica de sintonia baseada na modelagem sistema. O método Aström–Hagglund é uma técnica bastante robusta de auto sintonia de controladores, que tem sido

aplicada industrialmente com sucesso por mais de 15 anos (HANG *et. al.*, 2002).



**Figura 2 – Diagrama P&ID do sistema.**

Essa sintonia utiliza a frequência de resposta do sistema para perturbações de relé no atuador visando-se determinar o ponto crítico. A partir da amplitude de resposta e frequência das oscilações encontradas são calculados o ganho e o período crítico, com os quais a sintonia do controlador é feita através do uso das regras de Ziegler-Nichols.

O IMC (*Internal Model Control*) é um método de sintonia de controladores baseados na modelagem do processo. Esse método apresenta expressões para a configuração dos controladores, dada a função de transferência que representa o sistema (SEBORG *et al.*, 2004).

Para a sintonia e aplicação dos controladores foi utilizada a ferramenta Xcos, através da qual se realizaram a aplicação dos relés nos atuadores de sistema e os testes em malha aberta para a realização da modelagem.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente realizou-se a identificação do sistema a partir da aplicação de perturbações degrau para os dois atuadores do sistema. As respostas obtidas foram ajustadas para funções de transferência de primeira ordem com tempo morto através da função *datafit* do Scilab. Determinaram-se, então, para o sistema: as constantes de tempo, sua ordem e a presença de tempo morto. De posse dessas informações, as respostas obtidas foram ajustadas para funções de transferência que foram apresentadas na matriz abaixo.

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{3,21}{130,19s + 1} e^{-16,82s} & \frac{0,32}{618,52s + 1} e^{-70,30s} \\ \frac{0,72}{311,36s + 1} e^{-8,84s} & \frac{4,57}{181,68s + 1} e^{-18,36s} \end{bmatrix}$$

A partir da análise das funções de transferência é possível observar que o nível dos tanques é mais acentuadamente afetado por um dos atuadores, já que os ganhos para o atuador complementar são consideravelmente menores em ambos os casos. Dessa forma a bomba 1 terá um efeito maior no nível do tanque 1 do que no do tanque 2, o mesmo ocorre para o outro atuador.

Posteriormente os controladores foram sintonizados simultaneamente via relé (*auto-tunning*), através do Xcos ferramenta do Scilab. No ambiente do Xcos foi construído um diagrama de blocos da malha fechada do sistema, sendo que os controladores foram substituídos por relés, fazendo as bombas oscilarem com as vazões entre 40 e 55 % da sua capacidade. Esses limites foram escolhidos de maneira que 40% é a carga mínima da bomba necessária para que a água alcance aos tanques superiores e 55% é o máximo para que os tanques superiores não transbordem. Com as respostas obtidas os parâmetros dos controladores foram calculados baseados nas relações matemáticas estabelecidas pelas relações de Ziegler-Nichols (SEBORG *et. al.*, 2004). Foram utilizados controladores PI, pois a presença de ruídos interferiu significativamente no termo derivativo, podendo causar um maior desgaste aos atuadores.

Para efeitos comparativos e de validação dos modelos ajustados, foi realizada a sintonia

dos controladores através das relações matemáticas do método IMC, os valores encontrados para os parâmetros do controlador se encontram na Tabela 1.

Posteriormente, uma sintonia fina dos parâmetros encontrados foi realizada com o intuito de se obter parâmetros intermediários aos dos métodos anteriormente citados e testaram-se os controladores.

**Tabela 1 – Valores dos ganhos e elemento integral dos controladores<sup>3</sup>.**

Métodos	Controlador 1		Controlador 2	
	K	Ti	K	Ti
<b>Relé</b>	0,330	196,310	0,323	102,628
<b>IMC</b>	1,204	130,188	1,084	181,684
<b>Ajustado</b>	0,667	143,250	0,603	122,150

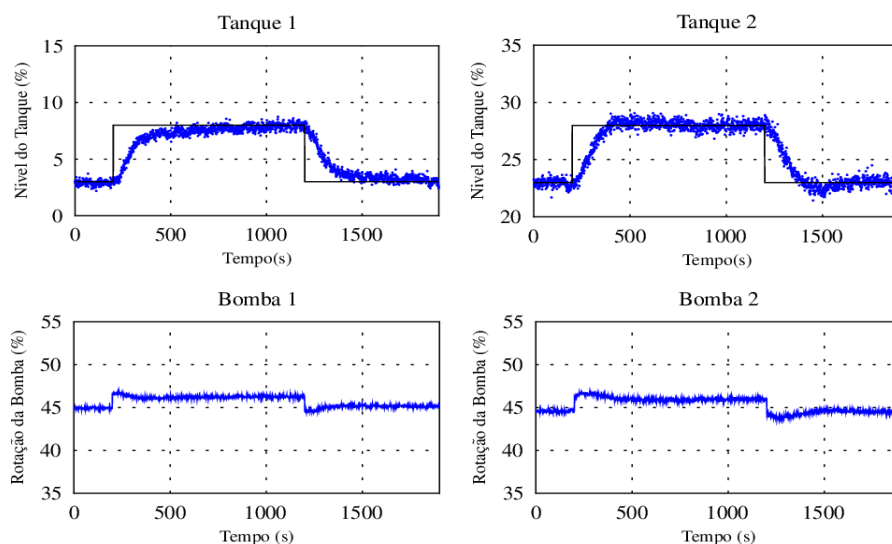
Os resultados obtidos para os controladores projetados mediante as alterações no *set point* estão apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, relacionados à sintonia *auto-tunning*, IMC e a ajustada respectivamente.

A partir da Figura 3 pode-se observar que a resposta dos controladores sintonizados pelo método *auto-tunning* foi satisfatória principalmente considerando o esforço de controle. A resposta para o Tanque 1 foi bastante demorada se comparada com os demais métodos.

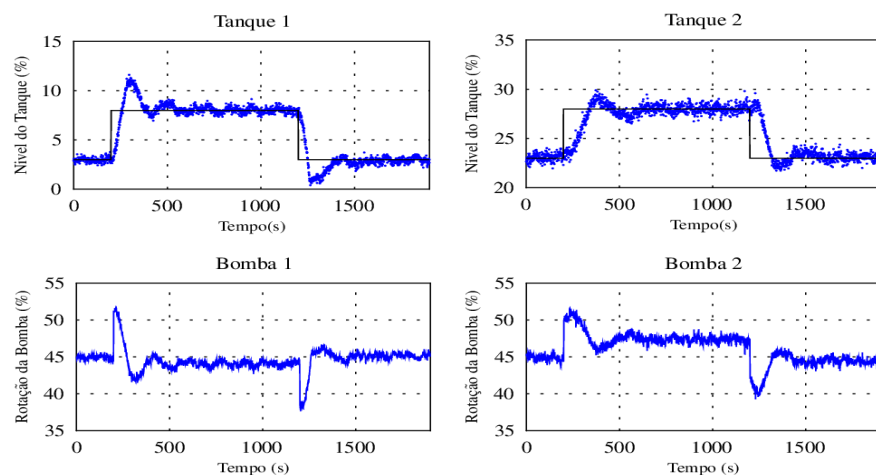
Pela Figura 4 nota-se que o método IMC resultou em respostas mais rápidas que o método anterior, porém mais oscilatórias, ficando evidente a presença de *overshoot*. Ainda com relação à Figura 4, pode-se observar que, das três sintonias testadas, o IMC foi o que exigiu um maior esforço por parte dos atuadores.

O teste do controlador com parâmetros ajustados a valores intermediários aos dos outros métodos (Figura 5) resultou na melhor estratégia de controle se comparado com os dois previamente discutidos, seu tempo de acomodação foi menor e apresentou menos caráter oscilatório que os controladores da Figura 4.

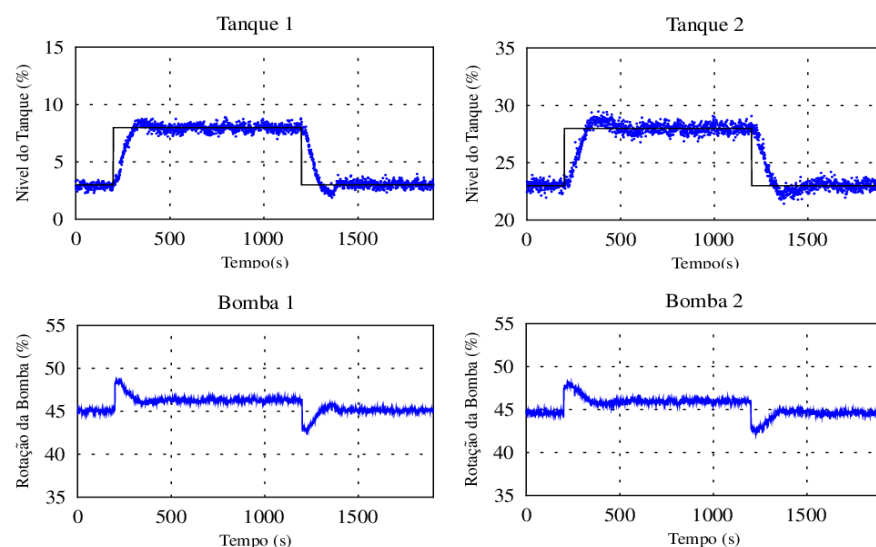
<sup>3</sup> Para:  $G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right)$ , com ganho em (% do nível do tanque/ % utilizada da bomba) e  $\tau_i$  em s.



**Figura 3 – Resposta a mudanças no *set-point* para os controladores sintonizados através do método *auto-tuning*.**



**Figura 4 – Resposta a mudanças no *set-point* para os controladores sintonizados através do método IMC.**



**Figura 5 – Resposta a mudanças no *set-point* para os controladores sintonizados com parâmetros intermediários.**

Uma comparação quantitativa do desempenho dos controladores através do cálculo dos índices de desempenho ISE (*Integral of the Square of the Error*), ITAE (*Integral of Time Weighted Absolute of the Error*) e IAE (*Integral of the Absolute Error*) é apresentada na Tabela 2 para cada um dos métodos: 1) *Auto-tuning*, 2) IMC e 3) Ajustado.

**Tabela 2 – Índices de desempenho.**

	IAE*(10 <sup>3</sup> )		ISE*(10 <sup>3</sup> )		ITAE*(10 <sup>6</sup> )	
	y1	y2	y1	y2	y1	y2
1)	1,15	1,50	2,29	3,95	0,95	1,27
2)	1,54	1,46	3,61	3,89	1,27	1,23
3)	0,93	1,21	2,07	2,74	0,78	1,01

Com os índices de desempenho pôde-se concluir que o controlador cujos parâmetros foram intermediários apresentou menores erros para os três índices.

## CONCLUSÃO

A utilização da comunicação OPC com o *software* Scilab permitiu a aplicação, sintonia e avaliação dos controladores, demonstrando o bom desempenho da ferramenta Xcos para práticas de controle. A prática experimental permitiu a familiarização com problemas como: presença de ruído e falhas no equipamento. Pôde-se observar em tempo real a eficácia de uma das técnicas de controle mais clássicas que é o controlador PI.

A sintonia realizada *on-line* no protótipo apresentou melhores resultados que a baseada no modelo empírico do sistema. Isso foi verificado pelos índices de desempenho calculados, nos quais os menores erros foram observados para o controlador com sintonia fina. O uso do protótipo com conectividade, a partir do padrão OPC, como *software* Scilab utilizado nesse trabalho pode ser aplicado em trabalhos posteriores para o estudo e aplicação de práticas de controle mais avançadas e também pode ser utilizado como ferramenta no ensino experimental de controle de processos.

A faixa de operação do atuador no sistema estudado foi limitada para evitar transbordos e o esgotamento dos tanques, aponta-se como possibilidade para trabalhos

futuros o estudo de adequação dos tanques e da tubulação do sistema, assim como a alteração da abertura das válvulas do protótipo a fim de se obter uma condição no qual sistema opere com uma faixa mais ampla de vazão e consequentemente da variável controlada do experimento.

## REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUNG, T. (2001), "The Future of PID Control", *Control Engineering Practice*, 9, 1163-1175.
- COSTA, T. V., FILETI, A. M. F., da SILVA, F. V., (2009), "Scilab/Scicos: Na Alternative Tool for Real Time Monitoring and Advanced Control of Fieldbus Industrial Systems", 10th International Symposium on Process Systems Engineering, Salvador-BA, 1617-1622.
- GATZKE, E.P., MEADOWS, E.S., WANG, C., DOYLE III, F.J., (2000), "Model based control of a four-tank system", *Computers and Chemical Engineering*, Volume 24, 1503-1509.
- HANG, C.C., ASTROMB, K.J., WANG, Q.G., (2002), "Relay feedback auto-tuning of process controllers — a tutorial review", *Journal of Process Control* Volume 12, 143–162.
- JOHANSSON, K. H., (2000), "The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero", *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, Volume. 8, nº 3, p. 456-465.
- SAHIN, C., BOLAT, E. D., (2009), "Development of remote control and monitoring of web-based distributed OPC system", *Computer Standards & Interfaces*, Volume 31, 984-993
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; *Process Dynamics and Control*, 2ª Edition, John Wiley & Sons, New York, 2004.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Marcos V. Estevom pelo suporte técnico e ao CNPq pelo auxílio financeiro cedido para o projeto.