



SISTEMA DE QUATRO TANQUES DE BAIXO CUSTO PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO

Marco Aurelio Lage Duarte – aurelio-duarte@hotmail.com
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus III, Faculdade de Engenharia de Controle e Automação
Rua José Peres 558 – Centro,
36.700-000 – Leopoldina – Minas Gerais

Janito dos Santos Ramos – janitodossanto23@gmail.com

Accacio Ferreira dos Santos Neto – accacio@leopoldina.cefetmg.br

Resumo: *As disciplinas de laboratório representam um meio fundamental para a formação do aluno, permitindo que o mesmo desenvolva habilidades e competências necessárias para a formação de um profissional de qualidade. Neste contexto, observa-se a necessidade cada vez maior de propiciar meios aos futuros engenheiros de vivenciarem situações próximas ao de um ambiente industrial através de plantas e de equipamentos industriais. Nesta direção, este trabalho apresenta um sistema de quatro tanques clássico de pequeno porte e baixo custo para a utilização no ensino das disciplinas de Controle Automático. Composto por elementos de fácil acessibilidade no mercado (válvulas, sensores, atuadores, microcontrolador etc.), o sistema de quatro tanques permite o estudo de sistemas do tipo SISO (Single-Input Single-Output) e MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) através da proporção de abertura e/ou fechamento de válvulas que controlam o grau de interatividade entre os tanques. No período de teste, os resultados experimentais mostraram-se satisfatórios devido a funcionalidade e aplicabilidade do sistema para o ensino de conceitos da teoria de controle automático: resultados condizentes com a teoria, o funcionamento adequado da estrutura física, do sistema de medição, controle e eletrônico foram observados. Adicionalmente serão expostos no decorrer do trabalho, os resultados experimentais da aplicação do protótipo no desenvolvimento de uma prática de um projeto e implementação de controlador digital para controle de uma malha de nível SISO.*

Palavras-chave: *Ensino de Controle Automático, SISO, MIMO, Quatro Tanques.*

1. INTRODUÇÃO

Observa-se de forma geral que o processo de ensino passa por um período de intensa reformulação devido a necessidade de acompanhar as transformações provenientes da internet e informática, dos dispositivos eletrônicos etc. Particularmente, no contexto da engenharia brasileira, levando em consideração apenas a ABENGE ("Associação Brasileira de Educação

Organização



Promoção





em Engenharia”), vemos que a entidade já divulga a realização de vários eventos de grande porte, em várias partes do mundo, cujo tema principal remete justamente à educação em engenharia (ABENGE, 2017). Ocorrências que indicam um movimento de reformulação que favorece o desenvolvimento de “*inovação*” no que tange às metodologias de ensino-aprendizagem e a construção de conhecimentos mais fundamentados (MILLS & TREAGUST, 2003; MASSON *et al.*, 2012; ANDRADE, 2012).

Refletindo sobre os significados inerentes a essas novas metodologias, apreende-se que um de seus aspectos mais essenciais consiste na busca pela construção do conhecimento a partir da experiência, que aproxima os estudantes da realidade, tornando-os mais aptos para seu papel na sociedade. Nesta direção surge a motivação deste trabalho, que busca contribuir especialmente com o ensino de controle de processos por meio do desenvolvimento de um módulo didático de baixo custo e de pequeno porte, em face da carência e dificuldade de obtenção recursos de muitas instituições federais (DAVIES, 2008).

A planta desenvolvida consiste em um sistema multivariável de quatro tanques de nível (JOHANSSON *et al.*, 1999; DORMIDO *et al.*, 2003), cujo propósito é o controle simultâneo de duas malhas de nível com interação entre si. Adicionalmente, neste projeto buscou-se possibilitar tanto o estudo do sistema multivariável denominado MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), quanto dos sistemas do tipo SISO (*Single-Input Single-Output*) que o compõe; fato que amplia e permite a abordagem e o estudo amplo das técnicas do controle clássico e moderno.

Em sequencia, o artigo segue dividido na seguinte forma: seção 2 – Planta didática: sistema de quatro tanques; seção 3 – Proposta de utilização da planta; seção 4 – Aplicação prática; seção 5 – Considerações finais.

2. A PLANTA DIDÁTICA: SISTEMA DE QUATRO TANQUES

2.1. Descrição do protótipo e princípio de funcionamento

O sistema desenvolvido visto na Figura 1 foi constituído pela composição de elementos de baixo custo e de pequeno porte a fim de que pudesse ser utilizado para aplicação e desenvolvimento de práticas pedagógicas voltadas para o ensino de Controle Automático, especificamente para controle de sistemas SISO e MIMO.

Figura 1 - Planta de quatro tanques de nível



Fonte: Elaborado pelo autor



A planta, a princípio, é composta por quatro subsistemas: medição, atuação, controle e estrutura física. O sistema de medição é composto de dois sensores ultrassônicos, responsáveis por mensurar o nível de cada reservatório cilíndrico e enviar esse sinal medido para o controlador; o sistema de atuação por duas eletrobombas, uma fonte de alimentação, um circuito eletrônico de interface entre o atuador e o controlador, cujo papel é de intervir no sistema de acordo com o sinal enviado pelo controlador; o sistema de controle por um microcontrolador Arduino, responsável pela intervenção na planta por meio do tratamento dos sinais enviados pelo sistema de medição e posterior influência nos atuadores; a estrutura física, composta por quatro tanques cilíndricos principais e um reservatório auxiliar, duas *válvulas de controle* e outros componentes adicionais. Os componentes principais utilizados para a montagem do sistema são mostrados na Tabela 1:

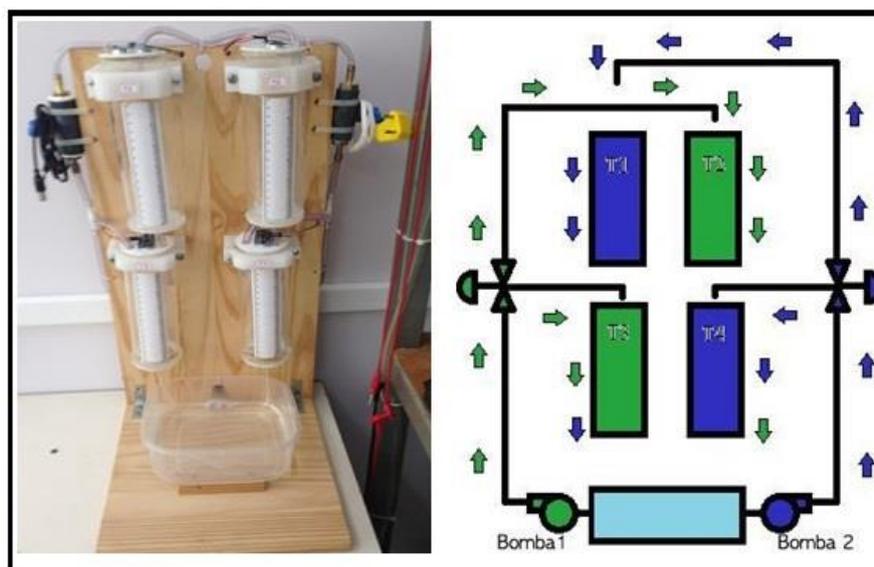
Tabela 1 – Componentes Principais do sistema de quatro tanques.

Medição	4 x Ultrassônico HC-SR04
Atuação	2 x Bomba Centrífuga CC 12V
Controlador	1 x Arduino Mega
Alimentação	1 x Fonte CC (12V/10A)

Fonte: Elaborado pelo autor

Adicionalmente quanto ao funcionamento do sistema (ver Figura 2) vale ressaltar que: os tanques superiores servem para dispersar o fluxo nos tanques inferiores, proporcionando a interação entre as duas malhas de controle através da abertura/fechamento das válvulas de controle de fluxo; a bomba 1 envia líquido para os tanques 2 e 3, e a bomba 2 envia líquido para os tanques 1 e 4; a proporção de abertura e/ou fechamento da válvula controla o grau de interatividade entre as malhas, possibilitando trabalhar tanto com um sistema MIMO ou dois sistemas SISO independentes.

Figura 2 - Fluxo de movimento de líquidos na planta



Fonte: Elaborado pelo autor

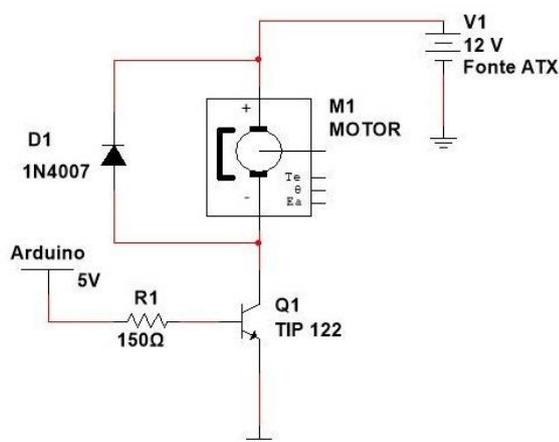


2.2. Circuito eletrônico do sistema

O circuito eletrônico, pouco descrito acima, é constituído de elementos necessários para realizar a interface entre o microcontrolador e os atuadores, já que os atuadores exigem correntes maiores que o próprio microcontrolador proporciona. Deste modo, para o devido funcionamento dos atuadores é preciso que a corrente de saída do microcontrolador seja amplificada para que seja capaz de acionar as eletrobombas.

Dessa forma, foi necessário o uso de um circuito de acionamento, para que seja possível integrar o Arduino ao sistema, utilizando um amplificador emissor-comum, além de um diodo de proteção para correntes reversas conhecido como diodo “roda livre”. Na Figura 3 mostra o esquemático para o acionamento dos atuadores.

Figura 3 – Circuito de acionamento do sistema físico



Fonte: Elaborado pelo autor

As especificações de cada elemento são dadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Especificações do circuito eletrônico

Materiais utilizados	Especificações	Motivação
2 Transistor	TIP 122	Máxima corrente de condução
2 Resistor	150Ω	Controle da corrente de base do transistor
2 Diodo	1N4007	Diodo de proteção
1 Fonte chaveada	12V/10A	Alimentação do atuador

Fonte: Elaborado pelo autor

3. PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA PLANTA

A planta didática, normalmente, é desenvolvida por vários motivos, a saber, (THOMAS *et al.*, 2010):

- Permitir ao aluno o contato com instrumentos normalmente encontrados nas industriais como sensores, controladores, atuadores, entre outras encontradas no chão de fábrica;



- Controlar e supervisionar os processos através de Interface Homem- Máquina (IHM), usando rede de comunicação;
- Aplicar vários conceitos de Controle Automático usando sistemas SISO e MIMO, demonstrando vários tipos de problemas e testar sistemas com características semelhantes ao sistema industrial: Saturação, atraso de transporte, não linearidade, entre outros.

Dentre os vários motivos expostos, pretende-se explorar algumas das aplicações citadas, de forma que o aluno desenvolva maior motivação e interesse e melhor entendimento da relação entre a teoria e a prática de Controle Automático. Neste contexto, algumas aplicações são expostas a seguir.

3.1. Sistema: SISO

A utilização do protótipo, como sistema SISO, pode ser feita pelo fechamento das duas válvulas, isolando os tanques inferiores dos superiores. Assim, a estudo dos dois sistemas SISO podem ser feitos em um dos tanques inferiores de forma independente. Verifica-se na Tabela 3 algumas técnicas de controle onde o mesmo poderia ser aplicado para o sistema SISO, bem como os experimentos a serem realizados.

Tabela 3 – Proposta de utilização: sistema SISO

Tópicos abordados	Experimentos
Modelagem e Identificação de Sistemas	Modelagem caixa preta, caixa branca e caixa cinza
Análise de Estabilidade	Levantamento do Lugar das Raízes e Diagramas de Bode
Técnicas de Filtragem	Implementação de Filtros Digitais e Analógicos
Projeto de Controladores	Implementação de Controladores (<i>Lead, Lag Lead-lag, P, PI, PD, PID etc.</i>)
Método de Avaliação das Malhas de Controle	Estudo dos índices de desempenho (IAE, ITAE, ISE, ITSE)
Controle digital	Métodos de implementação dos controladores digitais (<i>Forward, Backward, Tustin</i>)

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2. Sistema: MIMO

De forma similar ao sistema SISO, a utilização do protótipo como sistema MIMO é realizada pelo controle manual da abertura das duas válvulas, que atenua ou intensifica a relação entre o controle dos dois tanques inferiores (ver figura 02).

Ainda quanto ao sistema de quatro tanques, vale ressaltar que foi objeto de trabalho desenvolvido por (JOHANSSON, 2000) com o intuito didático de demonstrar os conceitos e propriedades de sistemas MIMO e que, atualmente, tanques tem sido usado nos laboratórios de controle em universidades em todo o mundo (JOHANSSON *et al.*, 1999; DORMIDO *et al.*, 2003). Verifica-se na Tabela 4 algumas técnicas de controle onde a planta poderia ser aplicada.



Tabela 4 – Possíveis aplicações do protótipo para sistema MIMO de controle automático.

Tópicos abordados	Experimentos
Controle descentralizado	Fase mínima e Fase não-mínima, Lugar das raízes, Método de modelo interno (IMC) etc.
Controle desacoplado	Desacoplador completo, simplificado e antecipatório
Controle baseado em realimentação de estado	Controle baseado na norma H_∞ e H_2 , Controle baseado em LMIS, Regulador Quadrático Linear

Fonte: Elaborado pelo autor

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

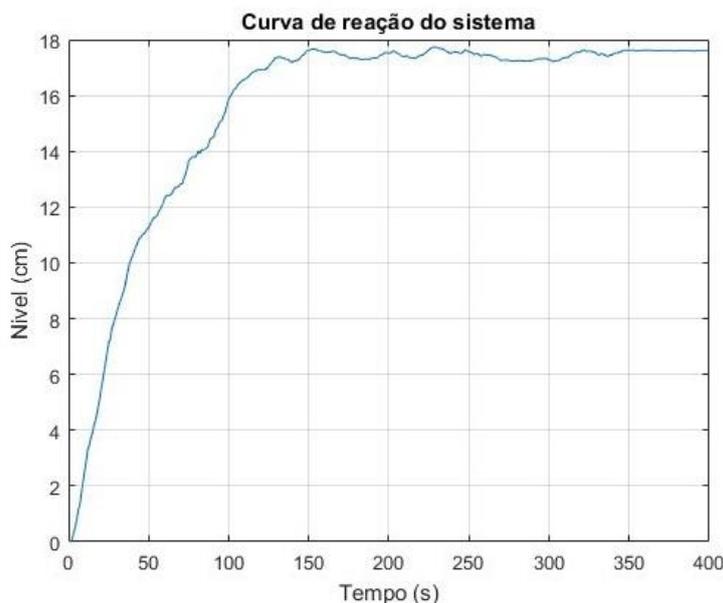
Para a validação do protótipo através de resultados experimentais elegeu-se a apresentação de um dos experimentos de trabalho com uma malha SISO do protótipo: “Métodos de implementação dos controladores digitais (*Forward, Backward, Tustin*)”.

A princípio para este objetivo apresentaremos algumas das etapas necessárias: identificação do modelo do sistema; análise e projeto do controlador; implementação do controlador no microcontrolador; resultados experimentais.

4.1. Identificação do modelo do sistema

Inicialmente para a modelagem do sistema, utilizou-se uma técnica muito usual do ensaio de identificação em malha aberta através da resposta ao Degrau (COELHO *et al.*,2001) apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Curva de reação do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após levantamento da curva é possível determinar a função de transferência que rege toda a dinâmica do sistema, por diversos métodos. A princípio utilizou-se a ferramenta “*ident*” do software Matlab que nos forneceu a Equação 1:

Organização

Promoção



$$G(s) = \frac{0,2525}{47,32 s+1} \quad (1)$$

4.2. Análise e Projeto do controlador

A partir da Função de transferência da Equação 2 inicia-se o estudo para projetar o controlador PID utilizando técnicas de controle variadas (ASTROM, 1995) ou mesmo técnica heurística. Utilizando o método heurístico, baseado nas experiências do próprio projetista, propôs-se o controlador PI, através da observação de vários testes, na seguinte função de transferência:

$$G_{PI}(s) = 10 + \frac{0,51}{s} . \quad (2)$$

4.3. Implementação do controlador

A partir da Função de transferência do controlador aplicou-se os métodos de discretização (NISE, 2012) que resultam na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado da discretização do controlador PID

Método	Função Discreta
Tustin	$\frac{10,26 z - 9,75}{z - 1}$
Backward	$\frac{10,51 z^2 - 10}{z^2 - z}$
Forward	$\frac{10 z - 9,49}{z - 1}$

Fonte: Elaborado pelo autor

De posse dos parâmetros da tabela 4, aplica-se a transformada z inversa para se obter as equações de diferença, que de fato serão implementadas no microcontrolador. Enfim, na Tabela 6 seguem as equações de diferença encontrados.

Tabela 6 – Equação de diferença do controlador

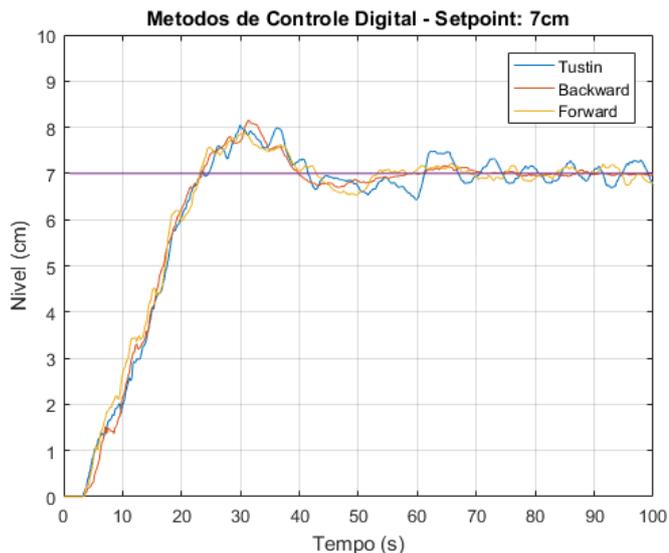
Método	Equação de diferença
<i>Tustin</i>	$\theta(n)=10,26*e(n) + 9,75 *e(n-1) + \theta(n - 1)$
<i>Backward</i>	$\theta(n)=10,51*e(n) + 10 *e(n-1) + \theta(n - 1)$
<i>Forward</i>	$\theta(n) =10*e(n) + 9,49*e(n-1) + \theta(n - 1)$

Fonte: Elaborado pelo autor

Obs.: $\theta(n)$ é a ação do controlador atual; $\theta(n - 1)$ a ação do controlador anterior; $e(n)$ é o erro atual; $e(n-1)$ é o erro anterior.

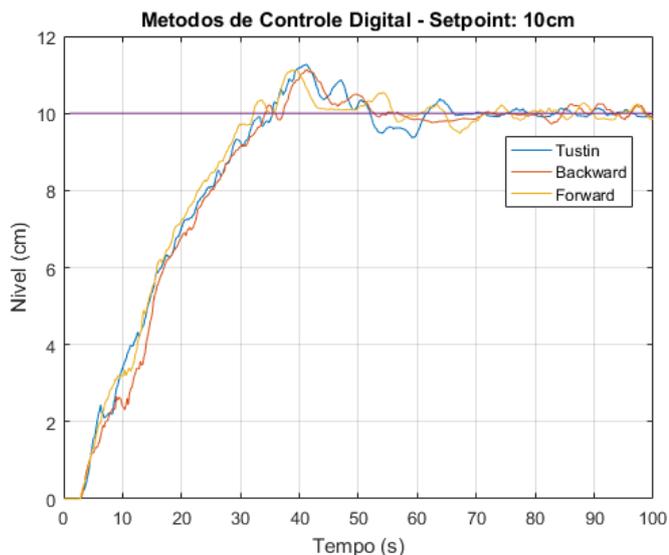


Figura 5 - Experimento 01



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 - Experimento 02



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4. Resultados experimentais

Os resultados dos experimentos realizados são apresentados a seguir para mostrar a funcionalidade do protótipo desenvolvido. As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas de resposta do controle PID digital para os três métodos de discretização anteriormente projetados.

Observa-se nas Figuras 5 e 6 que o nível do reservatório se estabilizou para os *Set Points* definidos. A partir deste experimento básico é possível verificar o funcionamento do protótipo, entretanto, esta prática representa apenas uma das possíveis aplicações em disciplinas de *Controle Automático* apresentadas nas Tabelas 3 e 4.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando alguns dos resultados experimentais exposto neste trabalho, percebe-se a potencialidade e a aplicabilidade da proposta para fins de ensino de controle automático. Ressalta-se, a versatilidade do sistema de quatro tanques em operar tanto para fins de análise de sistemas do tipo MIMO ou SISO, o que encontra-se em consonância com as necessidades do meio acadêmico.

Deste modo, acredita-se que a proposta incentiva o desenvolvimento de outros protótipos de base tecnológica semelhantes, como kits de baixo custo nos laboratórios das disciplinas dos cursos de engenharia.

Ademais, possibilitando ao estudante um maior estímulo de sua capacidade criativa e seu interesse pelas disciplinas relacionadas, melhorando, motivando-o no desenvolvimento pelo curso de graduação.

Por fim, espera-se que a motivação deste trabalho possa contribuir especialmente com o ensino de controle de automático a fim de incentivar o desenvolvimento de diversos outros processos que auxiliem o aprendizado de controle automático nas universidades brasileiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao MEC/SESu, FNDE, CAPES, CNPq, FAPEMIG, Fundação CEFETMINAS e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABENGE. Notícias. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/eventos>>, Acesso em: 08 de Jun. de 2017.
- ANDRADE, T. Project based learning activities in engineering education. Proceedings of 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Villach- Austria, September 2012 .
- ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. H. PID Controllers, Theory, Design and Tuning. ed. ISA, 1995.
- COELHO, R. A. A. et al. Da teoria à prática: Projeto motor taco-gerador. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. 2001.
- DAVIES, C. Learning and Teaching in Laboratories. Higher Education Academy Engineering Subject Centre, 2008.
- DORMIDO, S.; ESQUEMBRE, F. The quadruple-tank process: an interactive tool for control education. European Control Conference (ECC), pp. 3267 - 3272, 2003.
- JOHANSSON, K. The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero, pp. 456-465, Maio 2000.
- JOHANSSON, K.; HORCH, A.; WIJK, O; HANSSON, A. Teaching Multivariable Control Using the Quadruple-Tank Process. Decision and Control, vol. 1, pp. [807 – 812], 1999.



MASSON, T.; MIRANDA, L.; MUNHOZ, A.; CASTANHEIRA, A. Metodologia de ensino - aprendizagem baseada em projetos (PBL). Anais do XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, PA, Brasil, setembro 2012.

MILLS, E.; TREAGUST, D. Engineering education - is problem-based or problem-based learning the answer?. Australasian Journal of Engineering Education, 2003.

NISE, Norman S.; DA SILVA, Fernando Ribeiro. Engenharia de sistemas de controle. LTC, 2012.

THOMAS, G.; PASSOS, R.; QUADROS, L.; Modelagem de uma planta industrial didática multivariável e não linear. In; IEEE, São Paulo, 2010

FOUR TANKS SYSTEM OF LOW COST FOR AUTOMATIC CONTROL TEACHING

Abstract: *The laboratory disciplines represent a fundamental means for the formation of the students, allowing them to develop the skills and competences necessary for the formation of a professional of quality. In this context, there is an increasing need to provide the means for future engineers to experience situations close to an industrial environment through plants and industrial equipment. In this direction, this work presents a system of four classic tanks of small size and low cost for the use in teaching the disciplines of Automatic Control. Composed of elements of easy accessibility in the market (valves, sensors, actuators, microcontroller, etc.), the four-tank system allows the study of SISO (Single-Input Single-Output) and MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) through the ratio of opening and / or closing valves that control the degree of interactivity between the tanks. In the test period, the experimental results were satisfactory due to the functionality and applicability of the system for teaching concepts of automatic control theory: results consistent with theory, adequate functioning of the physical structure, measurement system, control and electronics also were observed. In addition, the experimental results of the application of the prototype in the development of a practice of a digital controller design and implementation to control of level loop will be presented.*

Key-words: *Automatic Control Teaching, SISO, MIMO, Four Tanks*

Organização



Promoção

