

# O Sistema de Controle de Nível de Tanques no Ensino de Graduação

J. A. N. J. Cocota, P. M. B. Monteiro, L. M. Viana e L.

V. Meireles

Dep. de Engenharia de Controle e Automação (DECAT)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto, Brasil  
cocota@em.ufop.br, pmemop@gmail.com,  
eng.lucasviana@live.com, leopiranga@hotmail.com

R. R. Costa e A. J. Peixoto

Programa de Engenharia Elétrica (PEE)  
COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, Brasil  
ramon@coep.ufrj.br, jacoud@coep.ufrj.br

**Resumo** — Atualmente, a evasão dos cursos de engenharia ocorre praticamente em todas as universidades do mundo. Ao longo dos últimos anos, a aprendizagem ativa tem sido reconhecida pela comunidade educacional como o método de aprendizagem mais eficaz. Nesse artigo vamos discutir a experiência educacional associada ao projeto e desenvolvimento de um sistema de controle de nível de tanques de baixo custo para motivar os alunos de Engenharia de Controle e Automação, que cursaram a disciplina de Controle Aplicado a Sistemas Térmicos e Fluidomecânicos no período de 2012 a 2013. Os principais objetivos de aprendizagem e os recursos utilizados para alcançá-los, bem como os resultados da avaliação dessa experiência pelos discentes serão detalhados.

**Palavras-chave** — aprendizagem ativa, ensino de engenharia de controle, modelagem de processos, identificação de parâmetros.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o ensino de engenharia associado à prática tornou-se uma metodologia indispensável na motivação dos estudantes de graduação. No entanto, a maioria das bancadas didáticas aplicáveis no ensino em nível de graduação, ou de pós-graduação, é muito cara ou possui uma arquitetura fechada de *hardware* e *software*. Além disso, o emprego exclusivo dessas bancadas suprime ao aluno a possibilidade de desenvolver uma das características mais importantes do profissional de engenharia, a de projetar, acompanhar e executar um projeto.

Neste contexto, pode-se citar que uma dificuldade no ensino da Engenharia de Controle é fornecer um equilíbrio entre a teoria e prática devido ao alto nível de abstração presente na teoria de controle. Um laboratório de controle é essencial para alcançar um duplo objetivo que consiste em fornecer aos alunos uma sólida base teórica e uma capacidade de engenhar para desenvolver sistemas que funcionem [1]. Esses objetivos vão de encontro com o pensamento do fundador da Escola de Minas, Claude-Henri Gorceix, de oferecer formação teórica de qualidade aliada ao saber prático [2].

Para alcançarmos esses objetivos, decidiu-se desenvolver uma bancada de laboratório que pudesse ilustrar todos os aspectos da engenharia de controle, ou seja, a modelagem, identificação de parâmetros, simulação, análise e projeto de controladores. A bancada escolhida para ser desenvolvida foi a do sistema de controle de nível de tanques, elaborada com base

nos trabalhos relatados na literatura, em particular [1] e [3]. Essa bancada permite a operação na configuração de dois tanques, com ou sem acoplamento, para práticas de controle de sistema monovariáveis - SISO (*Single Input, Single Output*), ou a operação na configuração de quatro tanques para práticas de controle de sistema multivariáveis - MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*), conforme apresentado na literatura por [4] e [5].

Este artigo descreve um caso bem sucedido de desenvolvimento de um processo de quatro tanques com alunos de graduação, que foi efetuado ao longo de três semestres. Será explicado como a metodologia adotada de aprendizagem ativa, contribuiu na formação acadêmica e profissional dos discentes. Finalmente, serão apresentados os resultados da avaliação dessa experiência pelos alunos de graduação.

## II. OBJETIVOS

O principal objetivo do projeto proposto aos alunos foi motivá-los através do desenvolvimento de um processo de laboratório que permitisse demonstrar conceitos básicos de engenharia de controle, tais como: sistemas realimentados, efeitos de perturbações e erros de medição, modelagem de processos e técnicas de projeto de controladores. Os outros objetivos específicos foram:

- Desenvolver trabalhos interdisciplinares, promovendo a integração de conceitos das áreas de matemática, física, eletrônica, programação, mecânica e controle.
- Desenvolver competências transversais, tais como: análise crítica, aprendizagem autônoma, resolução de problemas, trabalho em equipe, gestão de conflitos, tomada de decisão, avaliação, gestão de fluxo de trabalho.
- Motivar o estudo teórico dos conteúdos da disciplina.
- Fazer um levantamento das dificuldades dos alunos para identificar as áreas do curso que devem ser aprimoradas.

Acreditamos que esses objetivos podem ser alcançados por meio de uma experiência de graduação baseada em projeto-execução-teste, que tem como finalidade incentivar os alunos a

---

Este projeto contou com o apoio da Fundação Gorceix.

desenvolver pesquisas e habilidades para a solução problemas reais, que são fatores essenciais no projeto de engenharia.

### III. METODOLOGIA

Para a execução deste projeto com os alunos de graduação foi utilizado a metodologia de aprendizagem baseada em problemas (*Problem Based Learning - PBL*), na qual o aprendizado é centrado no aluno, que deixa de ser o receptor passivo, para ser o principal responsável pelo seu aprendizado.

As atividades relacionadas ao projeto e a execução da bancada do sistema de quatro tanques foram realizadas ao longo de três semestres por estudantes de graduação da disciplina de Controle Aplicado a Sistemas Térmicos e Fluidomecânicos da Escola de Minas (UFOP), que iniciaram as atividades no final de 2012. Ao todo, 30 discentes cursaram a disciplina no período supracitado, sendo 10 estudantes por semestre. As avaliações das atividades dos discentes foram divididas em duas etapas no semestre letivo.

Na primeira oferta da disciplina, no segundo semestre de 2012, os discentes foram inicialmente divididos em três grupos. Na primeira etapa os alunos ficaram responsáveis pelo desenvolvimento do processo de dois tanques acoplados, com a seguinte distribuição de tarefas: o grupo 1 desenvolveu o módulo de potência para acionamento da bomba e identificou a vazão da bomba; o grupo 2 desenvolveu as placas de circuito impresso de transmissores de nível, bem como identificou a histerese dos sensores; o grupo 3 programou o CLP utilizando a linguagem LADDER e desenvolveu um protocolo para aquisição de dados do sistema pelo MATLAB. O interfaceamento do CLP com o MATLAB foi possível com o uso do software KEPServerEX®, da Kepware Technologies. Na segunda etapa os discentes foram divididos em dois grupos, sendo responsáveis pela modelagem matemática do sistema, a identificação dos parâmetros do processo, a simulação do modelo linear e não-linear do sistema, o projeto do sistema de controle e a implementação dos controladores digitais para dois casos distintos: controle do nível do tanque inferior considerando o acoplamento dos tanques (modelo de segunda ordem); e desprezado o acoplamento dos tanques (modelo de primeira ordem).

No primeiro semestre de 2013, os discentes foram novamente divididos em três grupos no primeiro momento. Na etapa inicial, as atividades dos grupos 1 e 2 foram similares às desenvolvidas ao longo do semestre anterior. Por sua vez, o grupo 3 desenvolveu um sistema especialista e de supervisão em MATLAB para apoiar as atividades de identificação dos parâmetros da planta, bem como monitorar as práticas de controle de nível dos tanques. Após a conclusão das duas bancadas do processo de dois tanques acoplados, bem como implementado o sistema de controle do nível do tanque inferior (SISO), os discentes foram divididos em dois grupos. Esses grupos foram responsáveis pela modelagem do processo de quatro tanques (MIMO), para as configurações de fase mínima (FM) e não-mínima (FNM), identificação dos parâmetros do processo, simulação do modelo linear e não-linear do sistema, projeto do sistema de controle e implementação dos controladores digitais para as duas configurações de FM e FNM.

No semestre seguinte (2013/2), os discentes foram divididos em dois grupos. Na primeira etapa, ficaram responsáveis por analisar o desempenho de três sistemas de controle SISO, projetados por métodos analíticos (método do lugar das raízes, e *deadbeat*) e por método empírico (método da curva de reação, por Ziegler-Nichols). Na segunda etapa da disciplina, os discentes ficaram responsáveis por analisar o desempenho da estrutura de controle proporcional-integral (PI) descentralizada para a configuração MIMO, obtida pelos três métodos supracitados.

### IV. PROJETO

Nessa seção descrevemos as principais características da bancada que foi desenvolvida, bem como as atividades relacionadas ao projeto que foram efetuadas pelos discentes.

#### A. A Bancada do Processo de Quatro Tanques

O processo de laboratório de quatro tanques que foi desenvolvido (Fig. 1), possibilita a operação na configuração de dois tanques (SISO) ou de quatro tanques (MIMO). O arranjo dessas configurações estão ilustradas nos diagramas esquemáticos da Fig. 2 e 3, respectivamente.

A planta consiste em duas bomba com um reservatório e quatro tanques com secções transversais constantes. Os quatro tanques, que foram montados na parte frontal do painel de acrílico, encontram-se configurados de modo que o fluxo a partir do tanque superior possa fluir para dentro do tanque inferior. O nível da água em cada tanque é medido utilizando-se um sensor de pressão piezoresistivo situado na parte superior do tanque. Cada bomba alimenta um par de tanques utilizando um divisor de fluxo. Os tanques podem ser configurados com diferentes diâmetros dos drenos, permitindo assim a alteração da dinâmica de cada tanque em práticas com diferentes grupos de alunos. Outros parâmetros que podem ser alterados nas práticas com os discentes, são as parcela de fluxo direto das bombas para os tanques inferiores ( $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ ), resultantes dos estrangulamentos localizados no divisores de fluxo.

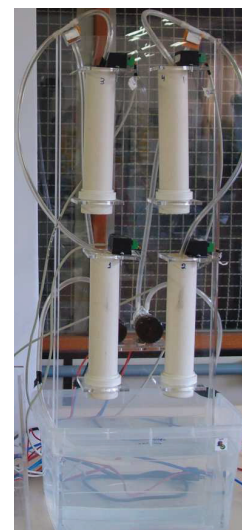


Fig. 1. Processo de quatro tanques que foi desenvolvido pelos estudantes.

Os tanques foram confeccionados com tubo de PVC com diâmetro interno de 47,6 [mm] e altura de 250 [mm]. Na parte inferior de cada reservatório foi fixado um *cap* com um anel de vedação. Dessa forma, os *caps* poderiam ser trocados, permitindo assim a alteração dos drenos dos tanques.

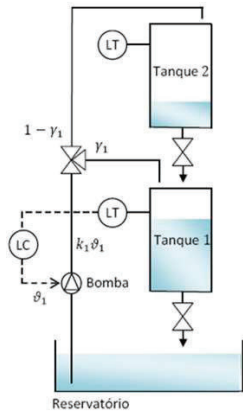


Fig. 2. Configuração adotada para sistema de dois tanques.

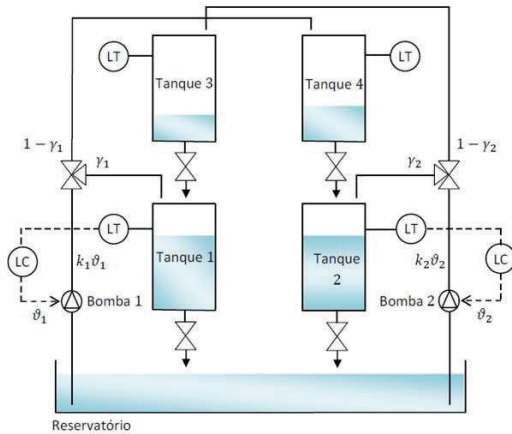


Fig. 3. Configuração adotada para sistema de quatro tanques.

Para o controle do processo, foi utilizado o controlador lógico programável (CLP) Versa-Max® da GE Fanuc, que ficou responsável pelo envio dos sinais de controle para a planta. Esses sinais são amostrados por um módulo de potência (Fig. 4), que acionam as bombas através de um sinal modulado por largura de pulsos (PWM).

**B. Transmissor de Nível**

Uma das atividades que foram desenvolvidas com os discentes foi a calibração e a aferição dos transmissores de nível, que permitiam a realização da medida indireta do nível dos tanques por um sensor de pressão diferencial (MPXM2010GS). Os transmissores de nível (Fig. 5) foram calibrados para fornecer um sinal analógico em suas saídas de 0-10 [Vcc] proporcional à faixa de medição de 0 a 230 [mm] de coluna de água. Após a calibração, os alunos realizaram a aferição dos transmissores de nível, e puderam identificar as histereses dos sensores (Fig. 6).

Essa atividade é importante de ser realizada com os alunos, pois permite demonstrar aos alunos, que dependendo da faixa de histerese do sensor, para um dado ponto de operação do processo, o sistema de controle projetado poderá ficar instável.

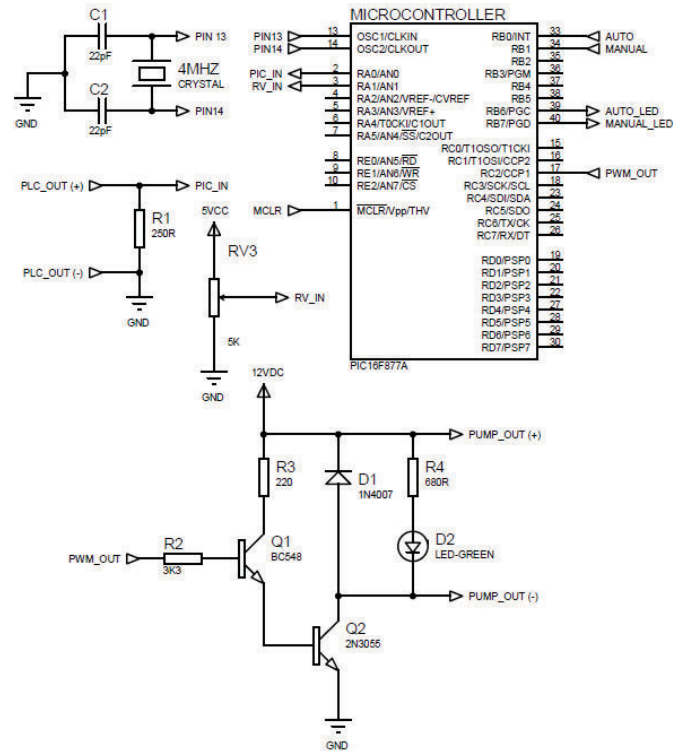


Fig. 4. Diagrama esquemático do módulo de potência.

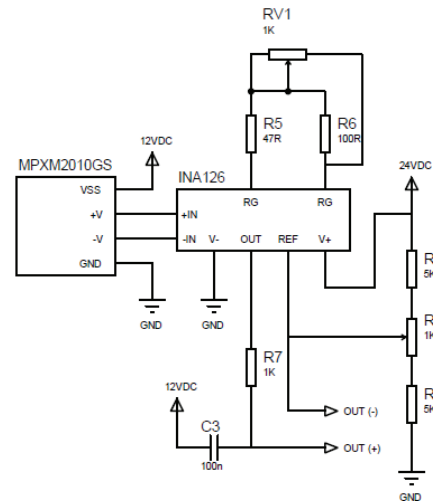


Fig. 5. Diagrama esquemático do transmissor de nível.

**C. Modelagem do Processo**

Neste trabalho, a modelagem matemática adotada, baseou-se no modelo caixa cinza. Dessa forma, alguns parâmetros do processo foram identificados e utilizados no modelo fenomenológico. Esse tipo de modelagem consiste em um processo intermediário entre a modelagem por caixa branca e

caixa preta. As técnicas dessa abordagem utilizam informações auxiliares que não estão incluídas no modelo fenomenológico. O tipo de informações auxiliares obtidas pela modelagem caixa cinza e a forma como são utilizadas podem variar dependendo do tipo de aplicação [6].

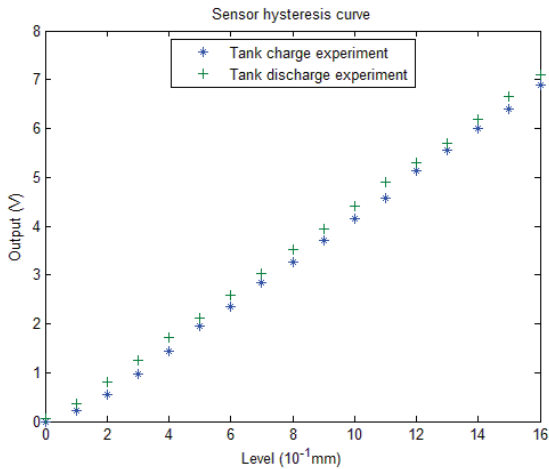


Fig. 6. Cursa de histerese do transmissor de nível.

Para simplificar a descrição do movimento de um fluido, foi considerado o escoamento unidimensional, permanente e irrotacional. O fluido então se torna ideal, não viscoso e incompressível. Além disso, foi o escoamento durante a descarga do tanque foi considerado sem atrito, de acordo com as considerações do trabalho [7]. Seguindo esse trabalho, quando um líquido em um tanque é submetido a uma descarga por um orifício de saída com área da seção transversal muito menor que a área da seção transversal do tanque, esta hipótese pode ser empregada.

Com base nessas informações, foi possível desenvolver um modelo matemático não linear cuja entrada é a tensão aplicada ao motor da bomba e a saída é a tensão do sensor de pressão diferencial que é proporcional ao nível do tanque inferior. Os resultados da simulação do modelo não-linear obtido, em torno de um dado ponto de operação, em comparação com os resultados experimentais estão apresentados na Fig. 7.

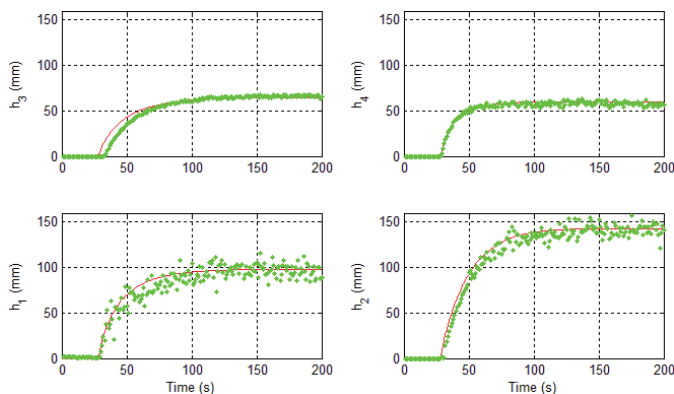


Fig. 7. Dados experimentais (em verde) e de simulação do modelo não-linear (em vermelho) obtido pelo método de modelagem por caixa cinza.

Uma vez encontrado o modelo não-linear, que representava bem a dinâmica real do sistema, os discentes linearizaram o modelo utilizando a série de Taylor. Como o modelo linear foi utilizado no projeto dos controladores PI que foram realizados por métodos analíticos, solicitamos aos discentes que simulassem os dois modelos na vizinhança do ponto de operação (Fig. 8). Dessa forma, eles puderam observar a importância de operação do sistema em torno do ponto de operação, uma vez que o modelo linear não representava bem a dinâmica do processo quando o sistema encontrava-se fora do ponto de operação.

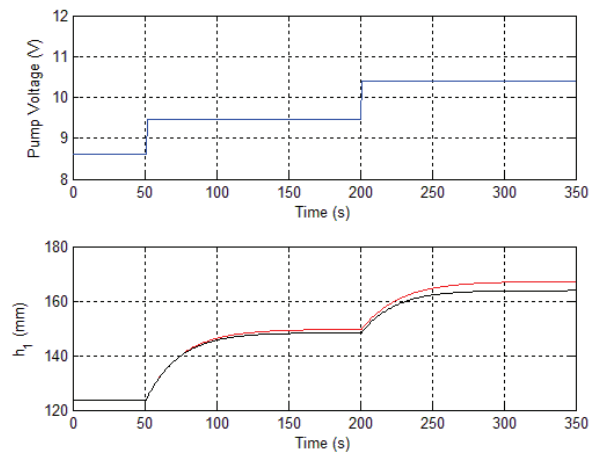


Fig. 8. Simulação do modelo linear (em preto) e não-linear (em vermelho) em torno do ponto de operação.

#### D. Interface Gráfica do Usuário em MATLAB

A interface gráfica do usuário (GUI) em MATLAB, que foi desenvolvida pelos alunos no primeiro semestre de 2013, permitiu aos discentes monitorar o processo, pelo sistema supervisor (Fig. 9), e orientá-los durante as atividades de identificação dos parâmetros do processo, por meio do sistema especialista (Fig. 10).

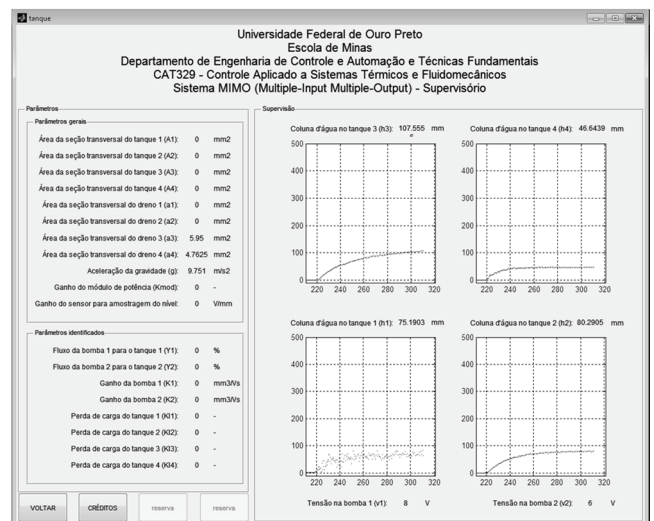


Fig. 9. Interface gráfica do sistema supervisor.

A programação do sistema supervisorio e especialista foi desenvolvida com base em apostilas de MATLAB® e GUIDE; em fóruns da Internet, principalmente os da própria MathWorks e Stack Overflow; e na ferramenta "help", do próprio MATLAB®.

Primeiramente, o sistema supervisorio foi desenvolvido, em seguida o sistema especialista, no MATLAB®. O supervisorio não possibilita a inserção ou modificação de variáveis na programação do CLP, ou seja, é apenas um monitoramento do processo. O sistema especialista, por sua vez, além de realizar a aquisição de dados, possibilita a atualização de algumas variáveis do programa em LADDER do CLP, e.g., as tensões a serem aplicadas nas bombas durante os ensaios para a identificação dos parâmetros do processo. Esse sistema opera em conjunto com: o supervisorio criado em ambiente MATLAB®; a simulação do modelo não-linear por meio do SIMULINK®; e a programação LADDER embarcada no CLP.

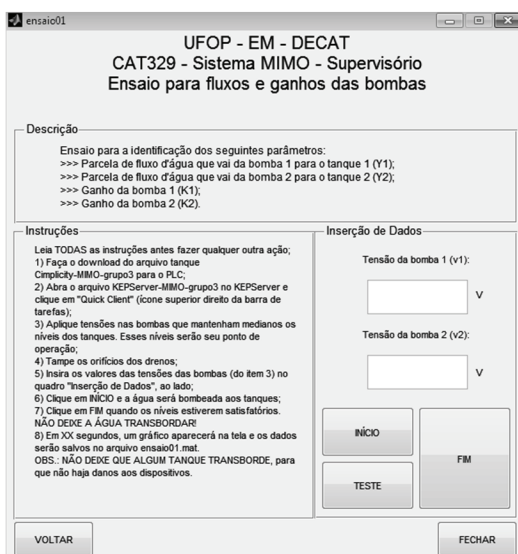


Fig. 10. Interface gráfica do sistema especialista para a identificação dos parâmetros obtidos pelo ensaio de carga de água.

### E. Controle

Nesse trabalho, os discentes projetaram os ganhos de controladores PI, para configurações SISO e MIMO do processo. O termo derivativo do controlador clássico não foi utilizado, pois o sistema apresentava uma dinâmica lenta, e se desejava evitar problemas de amplificação de ruídos provenientes dos sensores de nível dos tanques.

Os resultados experimentais e de simulação de controle de nível de um tanque (Fig. 2), cujo ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do controlador PI foram determinados pelos métodos da curva de reação (Ziegler-Nichols), lugar das raízes, e deadbeat, estão apresentados nas Figuras 11, 12 e 13, respectivamente. Para esses experimento, o nível do tanque 1 no ponto de operação foi de 160,2 [mm], dada uma tensão média de 7,56 [V] no motor da bomba 1.

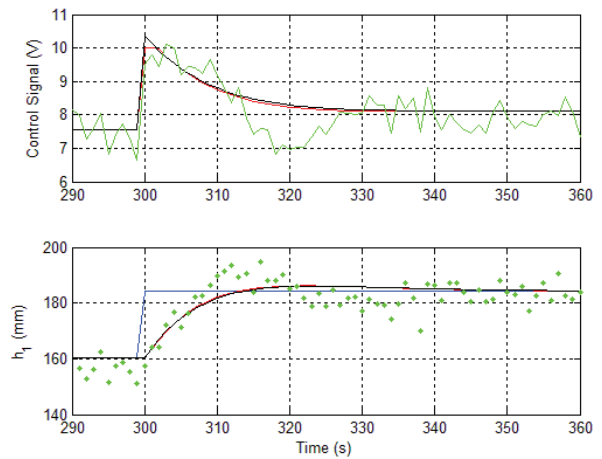


Fig. 11. Dinâmica do modelo não-linear (em vermelho), do modelo linear (em preto) e do processo real (em verde) em malha fechada, para o controlador PI ( $K_p=2.46$  e  $\tau_i=13.57$ ) obtido pelo método de Ziegler-Nichols, dado um degrau de 15% na referência (em azul) do ponto de operação.

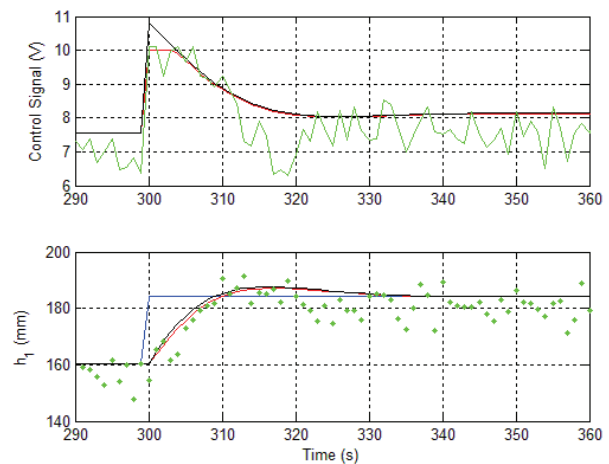


Fig. 12. Dinâmica do modelo não-linear (em vermelho), do modelo linear (em preto) e do processo real (em verde) em malha fechada, para o controlador PI ( $K_p=2.85$  e  $\tau_i=7.92$ ) obtido pelo método do lugar das raízes, dado um degrau de 15% na referência (em azul) do ponto de operação.

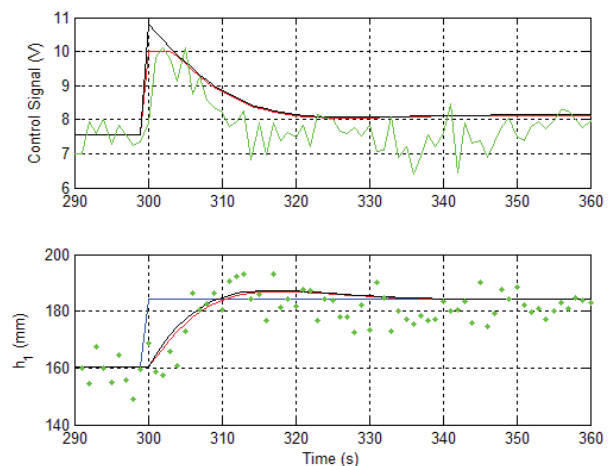


Fig. 13. Dinâmica do modelo não-linear (em vermelho), do modelo linear (em preto) e do processo real (em verde) em malha fechada, para o controlador PI ( $K_p=2.85$  e  $\tau_i=8.6$ ) obtido pelo método de deadbeat, dado um degrau de 15% na referência (em azul) do ponto de operação.

Na Fig. 14 encontra-se ilustrado os resultados experimentais e de simulação de controle PI descentralizado para uma configuração MIMO (Fig. 3), cujos ganhos dos controladores foram obtidos pelo método do lugar das raízes. Para esse experimento, o nível do tanque 1 no ponto de operação foi de 65,6 [mm], dada uma tensão média de 5,71 [V] no motor da bomba 1, e o nível do tanque 2 no ponto de operação foi de 112,7 [mm], dada uma tensão média de 6,95 [V] no motor da bomba 2.

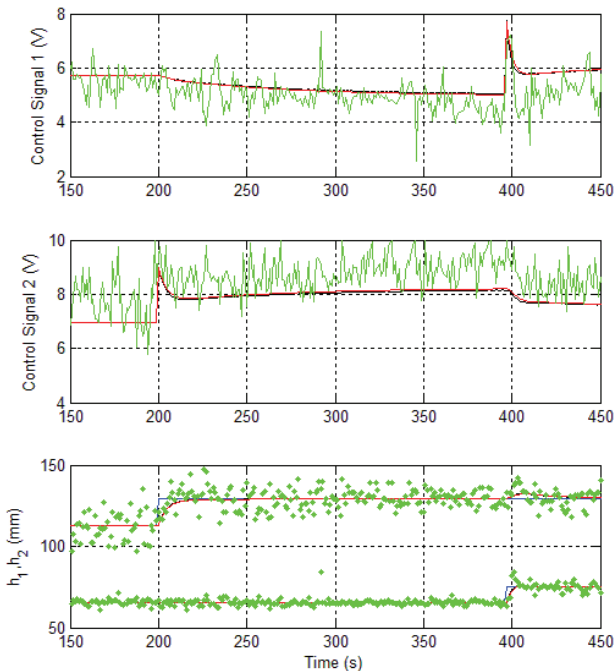


Fig. 14. Dinâmica do modelo não-linear (em vermelho), do modelo linear (em preto) e do processo real (em verde) em malha fechada, para o controlador PI descentralizado ( $K_{p1}=5.92$ ,  $\tau_{i1}=7.3$ ; e  $K_{p2}=2.7$ ,  $\tau_{i2}=16.09$ ) obtido pelo método de Ziegler-Nichols, dado um degrau de 15% na referência (em azul) do ponto de operação de cada um dos tanques inferiores.

## V. RESULTADOS

O principal resultado deste trabalho foi a motivação dos alunos uma vez que o desenvolvimento do processo de quatro tanques contemplou atividades interdisciplinares na área de formação dos discentes, contribuindo para a fixação do conteúdo teórico ministrado em sala de aula. Para a avaliação da metodologia proposta à disciplina e de suas possíveis contribuições, uma pesquisa com 9 questões foi respondida por 18 alunos que cursaram a disciplina no período de 2012 a 2013. O questionário foi respondido voluntariamente pelos discentes, e de forma anônima.

Quando questionamos aos alunos se participaram ativamente na execução do trabalho, todos afirmaram que sim. De acordo com os alunos, as tarefas mais difíceis estavam relacionadas à programação (33,3%) e a eletrônica (27,8%), seguida pela documentação do projeto (16,7%). Esse resultado nos sinalizou que é necessário o aprimoramento das disciplinas que abordam os conteúdos relacionados a programação e a eletrônica, bem como o acréscimo de atividades de documentação nas

disciplinas ofertadas ao curso. As demais respostas ao questionário estão agrupadas na Tabela I.

TABELA I. RESPOSTAS AO QUESTIONÁRIO

Respostas	A%	B%	C%	D%	E%
A execução do projeto contribuiu em minha motivação para a conclusão do curso.	61,1	38,9	0	0	0
O trabalho possui vínculo com o conteúdo teórico da disciplina.	83,3	16,7	0	0	0
A execução do trabalho me motivou no estudo da disciplina.	44,4	55,6	0	0	0
Eu recomendaria a outros discentes cursar a disciplina com a metodologia adotada.	50,0	38,9	11,1	0	0
O período para a execução dos trabalhos foi adequado.	55,6	22,2	0	22,2	0
O trabalho contribuiu no desenvolvimento de habilidades para minha formação profissional.	38,9	50,0	0	11,1	0
As habilidades desenvolvidas e o conhecimento adquirido no projeto irão contribuir na elaboração do meu trabalho de fim de curso.	33,3	44,4	0	22,2	0

A = Concordo Plenamente, B = Concordo, C = Neutro, D = Discordo, e E = Discordo Totalmente

No formulário do questionário também havia um campo disponível para eventuais comentários. Muitos dos discentes relataram que foi a primeira experiência prática de projeto de controladores, no qual o processo de aprendizagem foi centrado no aluno, e outros destacaram que as habilidades transversais desenvolvidas na disciplina iriam contribuir na formação profissional para o mercado de trabalho.

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho relatamos a experiência do emprego da metodologia de aprendizagem baseada em problemas (PBL) para o desenvolvimento de um processo de quatro tanques de baixo custo na disciplina de Controle Aplicado a Sistemas Térmicos e Fluidomecânicos. A execução desse trabalho com os discentes possibilitou explorar conceitos de engenharia de controle, e.g., projeto de controladores por métodos analíticos e empírico, modelagem e simulação de sistemas SISO e MIMO, análise do comportamento de sistemas de fase mínima e de fase não-mínima, os efeitos de perturbações, os ruídos de medição, a saturação do atuador e o efeito *windup*.

Os alunos se sentiram motivados com a experiência que tiveram. Além disso, a maioria dos discentes (88,9%) acreditam que o projeto contribuiu no desenvolvimento de competências transversais para a formação profissional. Os discentes também afirmaram (77,7%) que as habilidades desenvolvidas e os conhecimentos adquiridos ao longo do projeto iriam contribuir na elaboração do trabalho de fim de curso.

Em trabalhos futuros, deseja-se desenvolver um sistema que possibilite ao aluno o acesso remoto à planta, por meio da Internet, para a realização de práticas de controle. Dessa forma, será ampliada a disponibilidade de operação do equipamento, não sendo mais restrita à disponibilidade de funcionamento do laboratório.

Acreditamos que os objetivos foram alcançados e que o sucesso foi possível graças ao envolvimento dos alunos. Esperamos que essas experiências possam ser úteis a outros grupos de estudantes de graduação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a todos os alunos que se dedicaram ao desenvolvimento do projeto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] K. J. Åström and M. Lundh, "Lund control program combines theory with hands-on experience," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 12, no. 3, pp. 22–30, 1992.
- [2] P. Lemos, *A História da Escola de Minas*. Ouro Preto: Editora Graphar, 2<sup>a</sup> ed., 2013, (in Portuguese).
- [3] K. J. Åström and A.-B. Östberg, "A teaching laboratory for process control," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 6, pp. 37–42, 1986.
- [4] K. H. Johansson, B. James, G. F. Bryant, and K. J. Åström, "Multivariable Controller Tuning," in *Proc. American Contr. Conf.*, 1998, pp. 3514–3518.
- [5] K. H. Johansson, "The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 456–465, 2000.
- [6] L. A. Aguirre, *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1<sup>a</sup> ed., 2000, (in Portuguese).
- [7] J. N. Libii, "Mechanics of the slow draining of a large tank under gravity," *American Association of Physics Teachers*, vol. 71, no. 11, pp. 1204–1207, 2003.