

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/370251821>

# PLANTA DIDÁTICA DE SUSPENSÃO POR FLUXO DE AR COMO FERRAMENTA DE ENSINO DE TÉCNICAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Conference Paper · September 2018

CITATIONS

0

4 authors, including:



**Diego Henrique de Souza Chaves**

18 PUBLICATIONS 9 CITATIONS

SEE PROFILE



**Marco Aurelio Souza Birchal**

Federal University of Minas Gerais

13 PUBLICATIONS 6 CITATIONS

SEE PROFILE



**Viviane Birchal**

Federal University of Minas Gerais

33 PUBLICATIONS 539 CITATIONS

SEE PROFILE

## **PLANTA DIDÁTICA DE SUSPENSÃO POR FLUXO DE AR COMO FERRAMENTA DE ENSINO DE TÉCNICAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**Diego Henrique de Souza Chaves** - diego1.diegoc@hotmail.com

**Marco Aurélio de Souza Birchal**<sup>1,2</sup> – birchal@ufmg.br

<sup>1</sup>PUC Minas – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Instituto Politécnico  
Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico  
30535-901 – Belo Horizonte – MG

**Matheus Bonavite dos Reis Cardoso** - matheusbonavite@gmail.com

**Viviane Santos Birchal** – vsbirchal@gmail.com

<sup>2</sup>UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia  
Av. Presidente Antônio Carlos, 6627- Campus Pampulha  
31270-901 – Belo Horizonte – MG

**Resumo:** *O trabalho apresenta uma planta didática de suspensão de uma bola por corrente de ar a ser utilizada como ambiente exploratório de importantes conceitos estudados em um curso de engenharia. Podem-se explorar aplicações de instrumentação, acionamentos elétricos, automação industrial e controle de processos. Além dos dispositivos eletrônicos de controle, a planta é monitorada por um sistema SCADA com comunicação OPC-DA, o que expande as possibilidades didáticas da mesma.*

**Palavras-chave:** *Controle. Automação. SCADA. Planta didática.*

### **1 INTRODUÇÃO**

A instrumentação, a automação e controle de processos são assuntos centrais em vários cursos de Engenharia. Entretanto, o estudo dessas técnicas de maneira dissociada e solitária, pode se tornar excessivamente teórico e pouco atrativo.

Uma planta didática pode ser usada para trazer uma visão de conjunto às matérias, apresentando a implementação de técnicas de instrumentação, automação e controle de processos de forma coerente e integrada, fornecendo uma motivação maior àqueles envolvidos no processo de aprendizado.

Ainda, e dependendo do momento em que o estudante se encontra no curso, a mesma planta pode fornecer interpretações qualitativas ou quantitativas consolidando o conhecimento sem priorizar uma ou outra, como dita Borrego et al. (2009). Tratar o ensino dessa forma é uma maneira de, por meio de uma abordagem qualitativa, interessar alunos em períodos iniciais a entender onde disciplinas do ciclo básico poderão ser usadas e a explicar, por meio de métodos quantitativos, como a aplicar a teoria de controle e técnicas de automação para solucionar problemas reais.

São apontados por Zammar *et al.* (2017) estudos feitos pelo Banco Mundial a respeito de investimentos feitos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D&I). Os autores reportaram que os setores que mais investem nesse âmbito dentre os países do grupo G20, no qual o Brasil faz parte, são o capital privado ou industrial. Bem como é abordado pelos autores que o QI (Coeficiente Inovador) das universidades brasileiras se encontra muito no âmbito teórico e não abrange áreas de proximidade com as práticas industriais.

Inserir plantas didáticas de sistemas de controle é uma tentativa de diminuir o impacto que estudantes sofrem na transferência do mundo acadêmico para a entrada no setor industrial, diminuindo-se a distância entre a academia e o mercado de trabalho, a exemplo da implementação de um sistema de controle de aquecimento de uma corrente de ar por Dittmar e Kahlcke (2016).

O atual estudo apresenta uma forma de abordar conceitos, utilizando como base educacional os estudos feitos por Borrego *et al.* (2009), que enaltecem a importância tanto do conhecimento qualitativo, tratando-o como ideias mais gerais e intuitivas, como do conhecimento quantitativo, expresso por modelos matemáticos e físicos, de forma complementar e construtiva. É possível introduzir aos estudantes em seus períodos iniciais, problemas práticos e noções de Engenharia e desafiá-los, qualitativamente, a localizarem questões e apontarem soluções para o projeto, mantendo-os interessados no curso. Num segundo momento, para alunos avançados, retorna-se ao mesmo problema, utilizando agora técnicas quantitativas de projeto na busca da melhor solução de Engenharia.

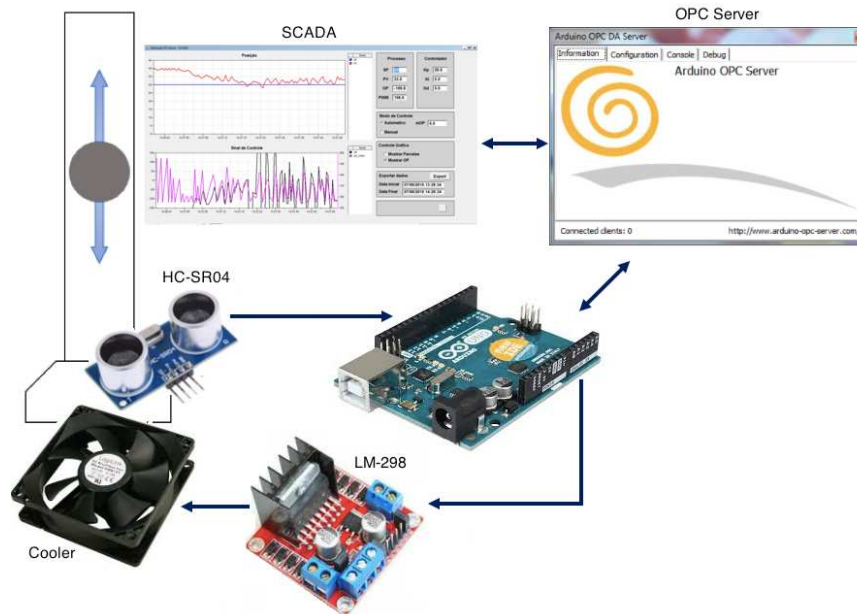
Este trabalho implementa um sistema flutuador que controla a posição vertical de uma bola de isopor manipulando a velocidade de um *cooler*. O sistema utiliza um controlador PID muito utilizado em processos industriais, já que esse tipo de controle possui estrutura robusta e eficiente. Aliado a isso, implementam-se ainda sistemas padrões de comunicação de dados como o OPC (LANGE *et al.*, 2010) e sistemas supervisórios para controles de processos industriais (ELIPSE, 2018).

## 2 A IMPLEMENTAÇÃO

O projeto implementado tem o propósito de servir a várias disciplinas e perpassa problemas de instrumentação, automação de sistemas e controle de processos, a exemplo de outros, encontrados em trabalhos de cunho didático tais como em Cooper e Dogherty (1999), Dittmar e Kahlcke (2016), Demirtas *et al.* (2013) e Teixeira e Hounsell (2017). Uma característica comum a todos esses trabalhos é a utilização de uma interface em que o usuário pode interagir com o processo por meio de um software de supervisão e aquisição de dados. Isso facilita a visualização do processo em escala de laboratório e permite o escalonamento para escala industrial quando necessário.

O sistema proposto neste trabalho implementa um controlador PID em malha fechada, numa plataforma de prototipação arduino, a qual possui um sensor de distância ultrassônico HC-SR04 e um circuito de controle de potência para motores de corrente contínua por ponte H, LM-298, que aciona um soprador do tipo cooler, com a intenção de manter uma bolinha de isopor em certa altura pré-determinada (setpoint). O projeto possui um sistema supervisório Elipse, ELIPSE (2018), capaz de monitorar as variáveis de processo em tempo real e gerar saída gráfica da posição da bola. A comunicação entre o sistema supervisório e o arduino é feita através de um servidor OPC, ST4MAKERS (2018). A Figura 1 traz um diagrama das partes do sistema e de suas interações.

Figura 1 – Processo Implementado



Fonte: Os autores (2018).

A variável de entrada do sistema é representada pela tensão aplicada (V) no *cooler*. Para diferentes valores de tensão, obtém-se diferentes alturas da esfera de isopor utilizada, essa altura (cm) é a saída. É importante ressaltar que entre o valor de altura e tensão existe uma relação dinâmica (não instantânea).

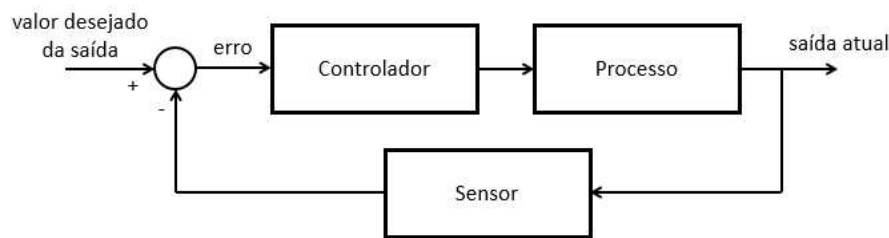
A característica dinâmica da resposta entre altura e tensão é evidenciada pela equação diferencial representativa do sistema. A função entre essas duas variáveis será uma Função de Transferência - FT(s) - que depende de s, sendo que para determinar a solução do problema faz-se necessário utilizar a transformada de Laplace salientando a importância da disciplina de Equações Diferenciais nos currículos de Engenharia.

Para o sistema apresentado, a leitura da posição vertical da bola é feita por meio de um sensor ultrassônico de baixo custo sendo que a distância entre o objeto e o sensor é diretamente proporcional ao tempo entre a emissão da onda sonora e a recepção da mesma pelo sensor.

De posse do valor desejado de saída e do valor real, pode-se fazer uma comparação em que a diferença algébrica entre esses valores representa o erro. Sabendo-se o erro, pode-se atuar no processo de forma a diminuir ou anular esse erro. Escreve-se o sinal de atuação como uma função do erro, sendo que essa função é a técnica de controle utilizada que é implementada dentro do controlador.

O controlador pode ter diferentes estruturas e utilizar variadas técnicas de controle. Para o caso em questão, utilizou-se uma implementação do controle PID em Arduino. É possível notar por meio da plana didática de baixo custo aqui apresentada que cada ação de controle (P, I e D) desenvolve uma função determinada. A ação proporcional (P) provoca reação rápida em função de perturbações ou variações da referência, a ação integral (I) é capaz de eliminar o erro de regime permanente, enquanto a ação derivativa (D) pode antecipar o comportamento do processo. O procedimento de controle da saída descrito é representado por um sistema malha fechada mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Sistema com controlador em malha fechada



Fonte: Ogata (2010).

### 3 EXPLORAÇÃO DA AUTOMAÇÃO DO SISTEMA

A exploração da automação do sistema traz uma visão ampla da pirâmide de automação, principalmente de seus níveis inferiores, em que se encontram o chão de fábrica, controle e supervisão. Podem-se explorar as interações entre estes níveis e os superiores, trazendo-se à prática uma das estruturas recorrentes em curso de controle de processos industriais.

#### 3.1 A Instrumentação

A planta oferece recursos de exploração da disciplina de instrumentação através do estudo do sistema de medição da altura da bola, utilizando-se um sensor ultrassônico. A análise da operação do sensor e do código implementado no Arduino para que o valor seja lido e convertido em medida de distância, oferece uma excelente forma de compreensão do mecanismo de aquisição de dados.

A observação sistemática das técnicas aplicadas fornece informações tanto de eletrônica quanto de programação de computadores que, juntas, implementam de forma completa um sistema transdutor de instrumentação.

#### 3.2 A Comunicação de Dados

Para estabelecer a comunicação entre o Arduino e o software de supervisão foi utilizado um servidor OPC-DA para Arduino. Para tanto, utiliza-se um servidor OPC para Arduino (ST4MAKERS, 2018), que, de um lado, se comunica com o Arduino via Serial/USB e, de outro, com o sistema supervisor através do padrão OPC (OPC FOUNDATION, 2018).

O estudo deste padrão de comunicação e das técnicas de instalação e configuração do sistema oferecem oportunidade ao estudante de entrar em contato com uma técnica atual e recorrente nas plantas industriais, diminuindo a distância entre teoria e prática e levando-o a compreender de forma completa uma funcionalidade que, na prática, é muitas vezes aplicada sem o devido conhecimento teórico.

#### 3.3 SCADA – Sistema Supervisório

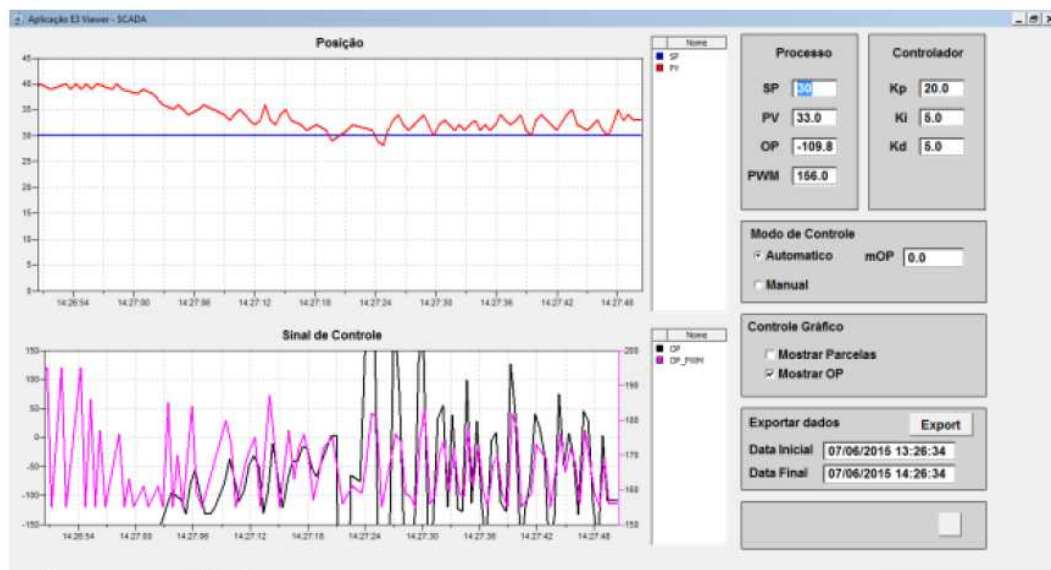
A planta emprega um sistema supervisor comercial, o Elipse, em seu sistema de supervisão. Este sistema foi escolhido por fornecer licença gratuita para utilização, com limitações de tempo de operação e por ser um sistema típico entre os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) comerciais.

Através deste sistema o aluno tem oportunidade de aprender sobre a configuração de sistemas supervisor, bem como de sua operação. O sistema fornece ainda uma técnica eficiente e moderna de interfaceamento com a planta, demonstrando a necessidade de uma boa

interface humano computador e das funcionalidades de dados de tempo real e históricos existentes numa planta de automação.

Diversos autores reportaram o benefício da utilização de plataformas e ferramentas visuais como auxílio no aprendizado (COOPER E DOGHERTY, 1999; DEMIRTAS et al., 2013; DITTMAR E KAHLCKE, 2016). Assim, foi desenvolvido um sistema de supervisão e aquisição de dados utilizando o software E3 fornecido pela Elipse, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Tela do sistema de supervisão e aquisição de dados



Fonte: Os autores (2018).

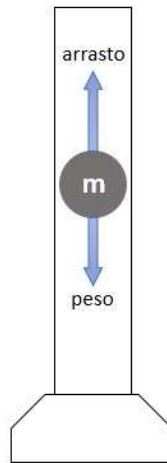
Utilizando a tela sinótica é possível monitorar o processo, assim como intervir no mesmo. Baseado no histórico das informações no banco de dados, é possível exportar os dados coletados e salvá-los em um arquivo. Há possibilidade de visualizar o valor desejado da posição (SP) e do valor real da variável de processo (PV), assim como o sinal de controle, sendo que este pode ser mostrado como uma soma de parcelas proporcional, integral e derivativas. Os valores dos parâmetros do controlador PID também podem ser ajustados pelo software em tempo real. Para armazenar as informações captadas da planta didática foi utilizado um gerenciador de banco de dados SQL Server 2008.

#### 4 EXPLORAÇÃO DO CONTROLE DE PROCESSOS

A identificação do sistema é realizada definindo-se *a priori* a estrutura do modelo. Dessa forma, para que os valores encontrados possam representar de fato parâmetros físicos, é preciso desenvolver a modelagem matemática antes da estimação dos parâmetros. A estrutura do modelo foi baseada no modelo matemático linearizado apresentado por Chacon *et al.* (2017).

As forças que agem no objeto são a força da gravidade e a força gerada pelo ar que ascende dentro do tubo, conforme a Figura 4. Para fazer a modelagem do sistema flutuador, aplica-se a segunda lei de Newton, conforme a Equação (1).

Figura 4 – Balanço das forças atuantes no objeto flutuante



Fonte: Os autores (2018).

$$m\ddot{z} = \sum F = \frac{1}{2} C_d \rho A (v_a - \dot{z})^2 - mg \quad (1)$$

em que  $m$  é a massa do objeto,  $z$  é a posição vertical do objeto no tubo,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área do objeto exposto ao fluxo ascendente de ar,  $v_a$  é a velocidade do ar dentro do tubo,  $g$  é a gravidade e  $C_d$  é o coeficiente de descarga. Este coeficiente é dependente do número de Reynolds que por sua vez depende da velocidade relativa entre o objeto e o fluxo de ar dentro do tubo. Entretanto, pode-se considerar  $C_d$  constante para baixas velocidades. Como o objeto utilizado é simétrico em torno de seu eixo, a área  $A$  exposta ao fluxo de ar é constante. A densidade do ar também é considerada constante, assim, pode-se definir uma constante  $\alpha = \frac{1}{2} C_d \rho A$ . Reescrevendo a Equação (1), obtém-se:

$$\ddot{z} = \frac{\alpha}{m} (v_a - \dot{z})^2 - g \quad (2)$$

Quando o sistema estiver em equilíbrio com um fluxo de ar de velocidade  $v_{eq}$ , a aceleração e a velocidade do objeto são nulas, ou seja  $\ddot{z} = \dot{z} = 0$ .

$$g = \frac{\alpha}{m} v_{eq}^2 \quad (3)$$

Pode-se, então, expressar a equação dinâmica como:

$$\ddot{z} = g \left[ \left( \frac{v_a - \dot{z}}{v_{eq}} \right)^2 - 1 \right] \quad (4)$$

Observa-se que a Equação (4) é não linear, mas pode ser linearizada utilizando uma aproximação por série de Taylor em torno do ponto  $z_0$  em que  $v_{eq} = v_a - \dot{z}$ .

$$\ddot{z} = \frac{2g}{v_{eq}} (v_a - \dot{z} - v_{eq}) \quad (5)$$

Para obter o modelo em forma de função de transferência, assumindo que o modelo linear representa bem o comportamento do sistema, trabalha-se com variáveis diferenciais  $\Delta z$  e  $\Delta v$ .

$$\frac{\Delta z(s)}{\Delta v(s)} = \frac{1}{s} \frac{a}{s+a} \quad (6)$$

em que  $a = 2g/v_{eq}$ . É necessário também modelar o atuador do sistema. A função de transferência do *cooler* pode ser representada por um sistema de primeira ordem como uma relação entre a velocidade e a tensão aplicada.

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{k_v}{\tau s + 1} \quad (7)$$

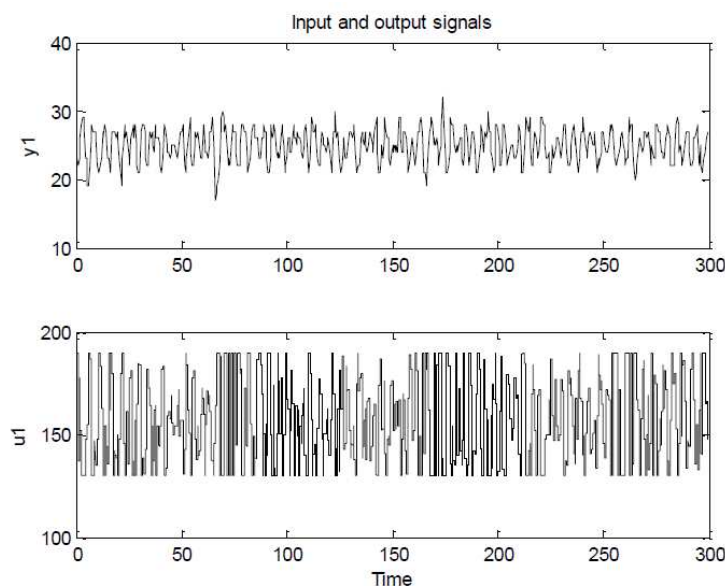
sendo  $k_v$  o ganho que relaciona tensão e velocidade em regime estacionário e  $\tau$  a constante de tempo. Assim, representa-se a relação entre posição do objeto e tensão aplicada ao *cooler* como:

$$z(s) = \frac{1}{s} \frac{ak_v}{s(s+a)(\tau s + 1)} \quad (8)$$

O sistema flutuador é instável em malha aberta em vista do polo na origem, então a identificação dos parâmetros não pode ser baseada em entrada de teste em degrau dado que isso poderia levar o objeto ao extremo do tubo, podendo inclusive sair da faixa de medição e controle.

Dados foram coletados para identificar o sistema considerando o ponto de operação como  $z_0 = 25\text{cm}$  e a entrada um sinal pseudoaleatório. A resposta da posição vertical da bola de isopor a partir de variações de tensão no cooler é mostrada na Figura 5. Para identificar o sistema, os dados coletados foram inseridos na ferramenta *Ident* do Matlab® (AGUIRRE, 2007) estimando os parâmetros considerando a estrutura do modelo como um sistema de terceira ordem com um polo na origem como informado pelo modelo matemático linearizado da Equação (8).

Figura 5- Dados utilizados na identificação do sistema



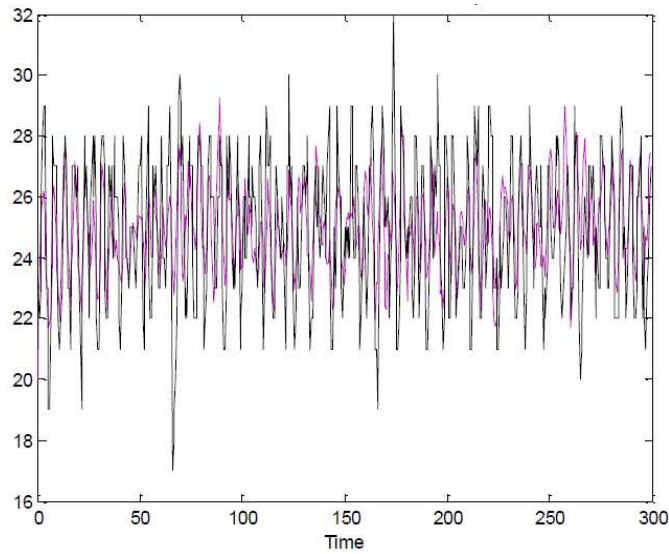
Fonte: Autores (2018).



Assim, a função de transferência que melhor adequa os dados à estrutura pré-determinada é mostrada na Equação (9) e a comparação entre os dados experimentais e os valores simulados é mostrada na Figura 6.

$$G(s) = \frac{3,895}{s(s^2 + 4,539s + 2,497)} \quad (9)$$

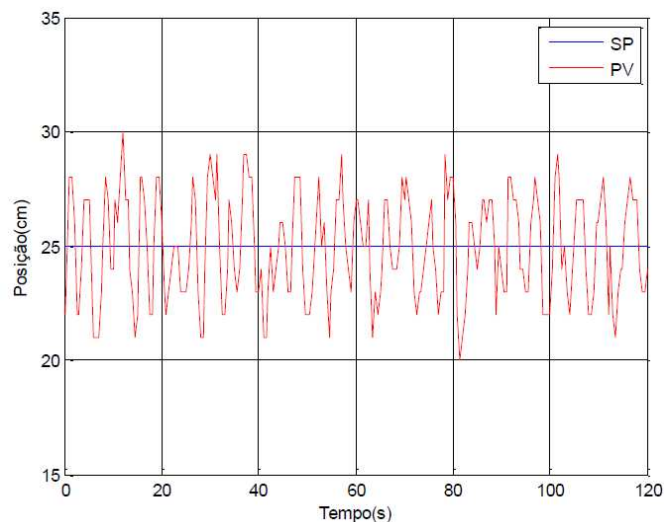
Figura 6 – Comparação entre o modelo e o sistema real



Fonte: Os autores (2018).

Encontrada a função de transferência que representa o processo, pode-se projetar o controlador utilizando conhecimentos teóricos obtidos em disciplinas teóricas relacionadas à Controle. A resposta do sistema em malha fechada para um setpoint de 25cm é mostrada na Figura 7 sendo que estas oscilações são dificilmente reduzidas pela característica de instabilidade em malha aberta.

Figura 7 – Controle da posição da bola suspensa na corrente de ar



Fonte: Os autores (2018).

O controlador PID deve ser projetado de tal maneira que atenda às especificações de desempenho requeridas. Utilizando a plataforma desenvolvida, pode-se manipular os ganhos do controlador de forma a verificar se esse é robusto a variações no valor nominal de seus ganhos

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho foi desenvolvido de forma a evidenciar a necessidade da intervenção prática em métodos pedagógicos e sua importância no processo de formação dos engenheiros. Para esse estudo acredita-se que não existe, necessariamente, a obrigação da criação de novos métodos de ensino, mas sim uma pesquisa acerca dos métodos ou teorias que encaixam em uma determinada situação, auxiliando a organização dos docentes e discentes, e para essa situação que o método escolhido seja testado.

A utilização da planta com alunos de engenharia nos períodos iniciais permite trazer à prática, conceitos que de outra forma seriam arduamente compreendidos mas que, de maneira qualitativa, se tornam mais facilmente tratáveis.

Escolheu-se a teoria elaborada por Borrego *et al.* (2009) para a implementação de um sistema PID de controle de altura de uma bola de isopor, por se acreditar que este método seja didaticamente interessante, embora outras plantas didáticas possam ser igualmente adaptados, aumentando-se o leque de sistemas físicos estudados. Conceitos envolvendo teoria de controle e técnicas de leitura e interpretação de dados, quantitativamente aplicados, nos períodos superiores, oferecem técnicas robustas e podem atuar como um facilitador para o aluno que irá na transitar da universidade para o mercado.

Acredita-se que o sistema discutido neste trabalho pode contribuir, não somente à nível de proposta, mas também de solução, para um ensino mais encadeado entre teoria e prática na Engenharia.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis A. *Introdução à Identificação de Sistemas*, 3ª Ed., Editora UFMG, Belo Horizonte: 2007.

BORREGO, Maura; DOUGLAS, Elliot P.; AMELINK, Catherine T. Quantitative, Qualitative, and Mixed Research Methods in Engineering Education. **Journal of Engineering Education**, v.98, n.1, p. 53-66, 2009.

CHACON, Jesus *et al.* Design of a Low-Cost Air Levitation System for Teaching Control Engineering, **Sensors**, v.17, n.10, 2321, 2017.

COOPER, Doug; DOUGHERTY, Danielle. Enhancing Process Control Education with the Control Station Training Simulator. **Computer Applications in Engineering Education**, v.7, n.4, p. 203-212, 1999.

DEMIRTAS, Metin; ALTUN, Yusuf; ISTANBULLU, Ayhan. Virtual Laboratory for Sliding Mode and PID Control of Rotary Inverted Pendulum. **Computer Applications in Engineering Education**, v.21, n.3, p.400-409, 2013.

DITTMAR, Rainer; KAHLCKE, Thomas. A Lab for Undergraduate Control Engineering Education Equipped with Industrial Distributed Control Systems. **Computer Applications in Engineering Education**, v.24, n.2, p. 288-296, 2016.

ELIPSE: Software. Disponível em <https://www.elipse.com.br/downloads>. Acesso em 10 de maio de 2018.

LANGE J.; IWANITZ F.; BURKE T. J. **OPC from data access to Unified Architecture**, 4th rev. Ed., OPC Foundation, Berlin: 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5<sup>a</sup> ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OPC FOUNDATION: Site. Disponível em <https://opcfoundation.org/>. Acesso em 10 de maio de 2018.

ST4MAKERS: Software. Disponível em: <https://www.st4makers.com/opc-server-for-arduino>. Acesso em 10 de maio de 2018.

TEIXEIRA, Jônatas Venâncio; HOUNSELL, Marcelo da Silva. Desenvolvimento de um simulador robótico educacional 3D com modos de treinamento. In: XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2017, Santa Catarina, **Anais**. Joinville, 2017.

ZAMMAR, Gilberto; RAMOND, Bruno; KOVALESKI, João Luiz. O quociente da inovação em uma instituição de ensino tecnológico no Brasil: orientações para melhorar o índice, buscando a aceleração na interação universidade-indústria. **Interciência**, v.42, n.10, p. 661-668, 2017.

## **DIDATIC PLANT OF SUSPENSION BY AIR FLOW AS LEARNING TOOL IN THE CONTROL AND AUTOMATION TECHNIQUES**

**Abstract:** This paper presents a didactic control and automation plant of suspension of a ball by air stream to be used as exploratory environment of important concepts studied in an engineering course. Applications of instrumentation, electrical drives, industrial automation and process control can be explored. In addition to the electronic control devices, the plant is monitored by a SCADA system with OPC communication, which expands the didactic possibilities of exploration.

**Key-words:** *control, automation, SCADA, didactic plant*

Organização:



Realização:

