

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE EM TANQUES DE NÍVEL DISPOSTOS DE FORMA NÃO-ITERATIVA

**Fernando Lopes Santana**<sup>1</sup> – fernandolopessantana@yahoo.com.br

**Luiz Fernando Gonçalves Pereira**<sup>1</sup> – luizfernandogoncalvespereira2@gmail.com

**Mario Luiz Pereira Souza**<sup>1</sup> – marioluiz198@gmail.com

**Renan Zuba Parrela**<sup>2</sup> – renan\_zuba@hotmail.com

**Saulo Fernando dos Santos Vidal**<sup>1</sup> – saulo.vidal@ifnmg.edu.br

<sup>1</sup> Instituto Federal de ciência e tecnologia do Norte de Minas Gerais, *campus* Montes Claros - Montes Claros, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil

**Resumo.** *O presente trabalho fundamenta-se na identificação e controle de um processo no qual foram realizadas perturbações, de diferentes magnitudes, nas bombas alimentadoras de dois tanques de nível dispostos de forma não-iterativa. Foram analisadas várias referências (livros, artigos científicos, revistas e sites) que demonstraram a importância da identificação e controle de processos em diversos setores industriais. Ademais, foi utilizado o software livre Scilab em comunicação com a placa Arduino Uno para realização das perturbações e aplicação de controle PI no sistema analisado. O trabalho desenvolvido tem como justificativa o interesse dos acadêmicos às formas existentes de identificação e controle de processos e a possibilidade da aplicação de um software livre como interface de comunicação controlador-sistema.*

**Palavras chave:** *Controle de Processos, Arduino, Scilab, Controle PI.*

### 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de redução de despesas operacionais e de tempo tem inserido na indústria química uma tendência para a realização de processos integrados, os quais se caracterizam pela variabilidade em reuso de massa e energia. Para tais processos, a validação da confiabilidade do projeto e a sua operabilidade prática requerem a simulação de toda planta com o uso de modelos rigorosos (SECCHI, 1995).

Com base no supracitado, a indústria moderna necessita, em consideráveis proporções, de sistemas automáticos no processo produtivo. Tais sistemas são de grande confiabilidade e precisão, sendo essenciais para manter a alta produtividade do setor em questão. Como parte

dos sistemas automáticos, tem-se os sistemas de controle, que visam manter certa variável de processo em um valor desejado.

Para tanto, deve-se dispor de sensores que forneçam o valor da variável de processo e de um controlador, o último compara o valor atual dessa variável com o valor desejado e aplica uma lógica em uma variável manipulada, a fim de que a variável de processo atinja o valor estabelecido previamente. Objetivando controlar de maneira mais eficiente um processo, pode-se obter um modelo matemático que represente os componentes do sistema de controle e, por consequência, o sistema global (FARIA, 2013).

O intuito do trabalho em questão é a utilização do software Arduino-UNO como interface de comunicação no controle de nível de um reservatório. Tem-se interesse, além dos citados anteriormente, na visualização e identificação do processo através de gráficos gerados na plataforma Xcos disponível no software Scilab com auxílio do software LibreOffice e a implementação do controle no sistema.

### 1.1. Controle PID

Consoante a Neto (2005), no meio industrial, quando existe a necessidade de se controlar uma determinada planta, através da utilização de controladores projetados a partir de um modelo matemático linear do processo a ser controlado, facilita-se tanto o projeto quanto a implementação do controlador a ser utilizado.

O controle PID é um dos controladores mais utilizados atualmente. Para Coelho (2006), é importante elencar que o controlador *PID* tem-se caracterizado mais popular, pelo fato de deter uma utilização de fácil implementação e, deste modo, possuir uma grande aceitação pelos operadores, destacando-se nos pólos industriais. Em relação às suas vantagens, dispõe de baixo custo, clareza na execução e, também, possibilita eficaz comportamento dinâmico ao processo controlado, caso seja sintonizado adequadamente.

No controle proporcional a razão dos sinais de saída  $U'(s)$  e de entrada  $E'(s)$  do sistema são relacionados entre si por meio de um ganho proporcional  $K_c$ . Caracteriza-se por ser um método simples e de resposta rápida pelos sistemas quanto ao aumento do ganho  $K_c$ . Seborg (2017) destaca que, uma desvantagem presente na aplicação do controle proporcional é que após uma mudança de set-point ou uma perturbação sustentada, a resposta do sistema apresenta um erro de estado estacionário (*off-sett*).

A ação de controle integral é proporcional a área do erro atual do controle e é comumente utilizada porque proporciona a eliminação do erro de estado estacionário. Contudo, complementam Dorf e Bishop (2011) que, se aumentado, o ganho integral  $K_I$  poderá vir a propiciar instabilidade a resposta do sistema.

A ação de controle gerada pelo termo derivativo é proporcional à taxa de variação do sinal de erro, ou seja, a sua derivada no tempo (PATANÉ, 2008), é também conhecida como ação antecipatória.

A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos do controle PID em paralelo. A Equação 1 descreve a ação de controle para este arranjo com sua função de transferência no domínio de Laplace.

$$G_C(s) = K_C + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

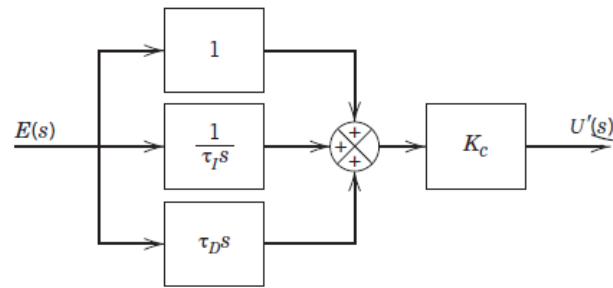


Figura 1: Diagrama de blocos de um controle PID.

## 1.2. Identificação e sintonia da planta de nível

Uma função de transferência de segunda ordem pode surgir fisicamente sempre que dois processos de primeira ordem estão conectados em série, cada um com uma função de transferência de primeira ordem, que relaciona a entrada com a saída do processo, pode ser fisicamente conectado para que a saída do primeiro processo seja utilizada como entrada do segundo processo (SEBORG, 2017). A Equação 2 exibe uma função de transferência de segunda ordem.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_{P1}K_{P2}}{(\tau_1s + 1)(\tau_2 + 1)} = \frac{K_p}{\tau^2s^2 + 2\xi\tau s + 1} \quad (2)$$

Onde  $K_p$  e  $\tau$  correspondem ao ganho do processo e o período natural de oscilação, respectivamente. Já o  $\xi$  fornece a medida de quantidade de amortecimento do processo.

Ziegler e Nichols propuseram regras para a determinação dos parâmetros de controle *PID* baseadas na resposta do sistema frente a uma perturbação (OGATA, 2010). A Figura 2 exibe uma curva de reação de um processo de segunda ordem após a aplicação de um degrau de magnitude  $A$ , que é aproximada para um processo de primeira ordem com tempo morto com intuito de melhorar o acordo entre modelo e respostas experimentais. Essa modificação é conhecida como modelo de primeira ordem com tempo de atraso (SEBORG, 2017) e esta apresentada na Figura 3.

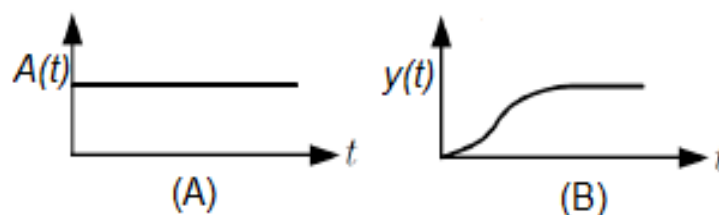


Figura 2: Resposta de um processo para um degrau de magnitude  $A$ . (A) Perturbação do tipo degrau e (B) curva de reação do sistema.

Uma tangente deve ser traçada no ponto de inflexão da resposta ao degrau. A interseção da reta tangente traçada com o eixo  $x$  (onde  $y = 0$ ) é o tempo de morto,  $td$ , do sistema. O ponto que a reta tangente cruza o valor do estado estacionário (onde  $y' = AK_p$ ) corresponde ao tempo  $t = td + \tau$ . Assim sendo, a constante de tempo do processo,  $\tau$ , pode ser encontrado subtraindo  $td$  do ponto de interseção (SEBORG, 2017). Essa aproximação resulta na Equação 3.

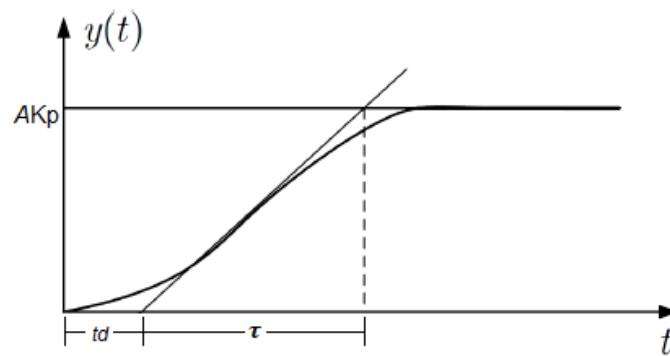


Figura 3: Análise gráfica da curva de reação do processo para obter parâmetros de um modelo de primeira ordem e atraso de tempo.

$$G(s) = \frac{Kp \cdot e^{-t_D s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (3)$$

Com a definição dos valores de  $Kp$ ,  $\tau$  e  $t_d$ , Ziegler e Nichols sugeriram determinar os parâmetros do controle *PID* de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta.

Tipo de controlador	$K_C$	$\tau_I$	$\tau_D$
<b>P</b>	$\frac{\tau}{t_D K_P}$	$\infty$	-
<b>PI</b>	$\frac{0,9\tau}{t_D K_P}$	$0,33t_D$	-
<b>PID</b>	$\frac{1,2\tau}{t_D K_P}$	$2t_D$	$\frac{t_D}{2}$

Fonte: Ziegler ( 1942)

## 2. MATERIAIS E METÓDOS

Para a realização do experimento de identificação do processo, utilizou-se uma planta de um sistema de nível de segunda ordem. Sua modelagem é efetuada por equações diferenciais lineares obtidas a partir da natureza física do sistema. Na Figura 4, é mostrado a estrutura física do Sistema utilizado nesse trabalho, possuindo os seguintes materiais:

- Placa Arduino UNO;
- Duas Pontes H L298N;
- Sensor de Nível por Pressão diferencial (MPX5010DP);
- Duas Bombas submersas de 12v;
- Fonte de 12v;

- Computador que possua o software Scilab (para realizar a comunicação serial com o Arduino).

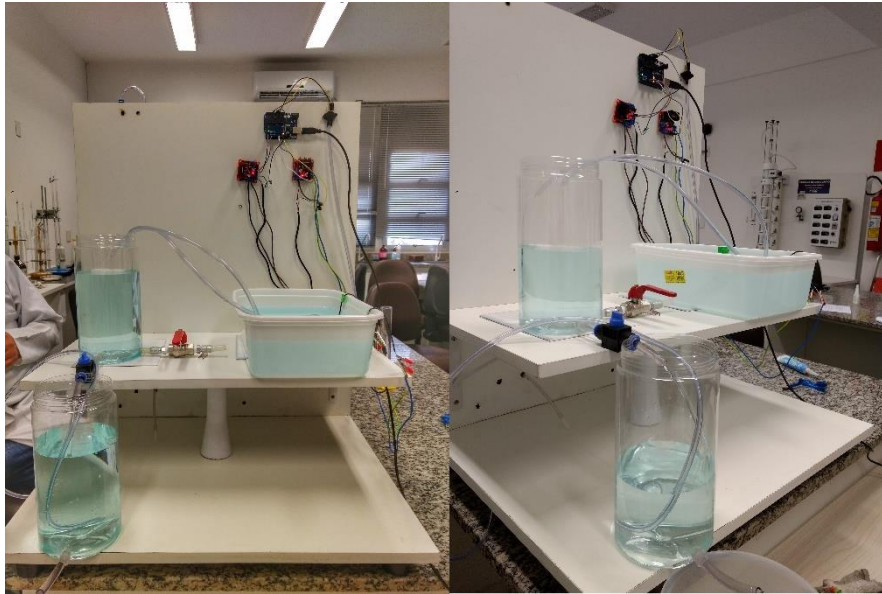


Figura 4 - Módulo de Controle de Nível.

O processo é composto por variável manipulada, controlada e distúrbio; a altura do segundo tanque ( $h_2'$ ) é a variável controlada, uma vez que esta é a grandeza ou condição que se deseja medir e controlar, para que o tanque nunca transborde ou esvazie, por exemplo. A variável manipulada é a grandeza ou condição modificada pelo controlador, que neste processo uma das bombas é entendida como variável manipulada. Por fim, o distúrbio é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável controlada do sistema, neste caso, o distúrbio é uma das vazões de entrada do primeiro tanque, sendo entendida como a outra bomba existente no sistema.

### 2.1. Calibração Do Sensor De Nível

- O sensor foi calibrado para adequar os valores de leitura de nível no sistema.
- Utilizando uma fita métrica mediu-se o nível de líquido em um dos recipientes utilizados na montagem do módulo de nível;
  - Simultaneamente, através do *Scilab (Xcos)* foram adquiridos dados de nível que eram indicados pelo sensor;
  - Através dos dados mensurados pela fita métrica e os dados obtidos por meio do indicador do sensor, traçou-se uma curva com ajuste, obtendo assim, a equação de calibração do sensor.

### 2.2. Identificação Do Sistema

O processo de identificação do Módulo de Controle de Nível foi realizado por meio de perturbações de diferentes magnitudes realizadas na variável de entrada do processo para se determinar a função de transferência do sistema.

As perturbações foram realizadas por meio do ajuste do valor do sinal de entrada das bombas. Para variável manipulada realizou-se as seguintes perturbações no sinal PWM enviado

para a bomba em relação ao valor inicial: +10%; +20%; -10% ; -20%, onde o valor de PWM varia de 0 a 255, onde 0 significa zero volts e 255 corresponde a 12 V. O valor inicial de funcionamento da bomba que faz o papel de variável manipulada no processo foi fixado em 35%.

Após a aquisição de dados experimentais realizada, a curva de identificação é encontrada via aproximação da função de segunda ordem para uma de primeira ordem com tempo morto. O *Solver*, ferramenta do *software LibreOffice*, é utilizado na identificação com intuito de encontrar os valores de  $\tau$ ,  $Kp$  e  $td$  minimizando o erro entre a curva de reação do sistema e a curva de identificação simulada.

### 2.3. Controle e sintonia do sistema

Para realização do controle e sintonia do sistema, optou-se pelo uso de técnicas já estabelecidas na literatura uma vez que, o intuito do trabalho é verificar se o módulo didático possa ser utilizado em aulas práticas e verificar a funcionalidade Arduino-Scilab aplicado em controle de processos.

Para que o processo exiba uma resposta desejada frente a uma perturbação, deve-se inserir um sistema de controle. Um passo importante ao aplicar o controle no sistema, é definir as características desejadas de desempenho do controlador, para que seja possível avaliar a aplicação do controle no sistema.

Apenas as ações proporcional e integral foram implementadas afim de que fosse possível eliminar o *off-set* no sistema e analisar a influência de cada ação na resposta de controle do processo.

O método de sintonia de Ziegler-Nichols foi escolhido pela facilidade de sintonia e pela característica do processo de segunda ordem, podendo assim, ser aproximado para um processo de primeira ordem com tempo morto.

Para avaliação de eficiência da aplicação do controle foram realizados dois testes: supervisorio e regulatório. No teste supervisorio, o valor de referência,  $y_{sp}$ , é alterado por meio de uma perturbação degrau inserida no sistema, o objetivo do controle é agir na variável manipulada afim de fazer a variável controlada alcançar o valor de referência,  $y_{sp}$ . Para o teste regulatório, o objetivo da malha de controle é eliminar todos os efeitos dos distúrbios do processo para manter o valor de referência do processo.

Inseridos os parâmetros do controlador *PI*, a resposta do sistema frente a um degrau de  $y'_{sp} = (2\text{ cm})/s$ , no distúrbio do processo de +10% no sinal de entrada do distúrbio do sistema.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Posteriormente, foi realizada a calibração do sensor de pressão diferencial MPX5010DP, usado como sensor de nível, instrumento fundamental para a aquisição de dados experimentais no sistema. A Figura 5 exibe a curva de ajuste utilizada para condicionar os dados de saída do sensor para realização dos experimentos.

A curva obtida através da aquisição de dados do sistema montado possui muitos ruídos, que podem ser causados por oscilações de carga no tanque, devido a sensibilidade do sensor, e pelos ruídos elétricos gerados pelo sistema. Esses ruídos dificultam a identificação do sistema. Com auxílio da ferramenta *Solver* do *software LibreOffice*, após a identificação do sistema por meio da aplicação dos dados experimentais na equação da curva característica para processos de primeira ordem com tempo morto, obteve-se os valores do ganho ( $Kp$  e  $Kd$ ), do tempo morto ( $td$ ) e da constante de tempo ( $\tau$ ) e se obteve a função de transferência proveniente das respostas geradas pelo sistema após as perturbações realizadas.

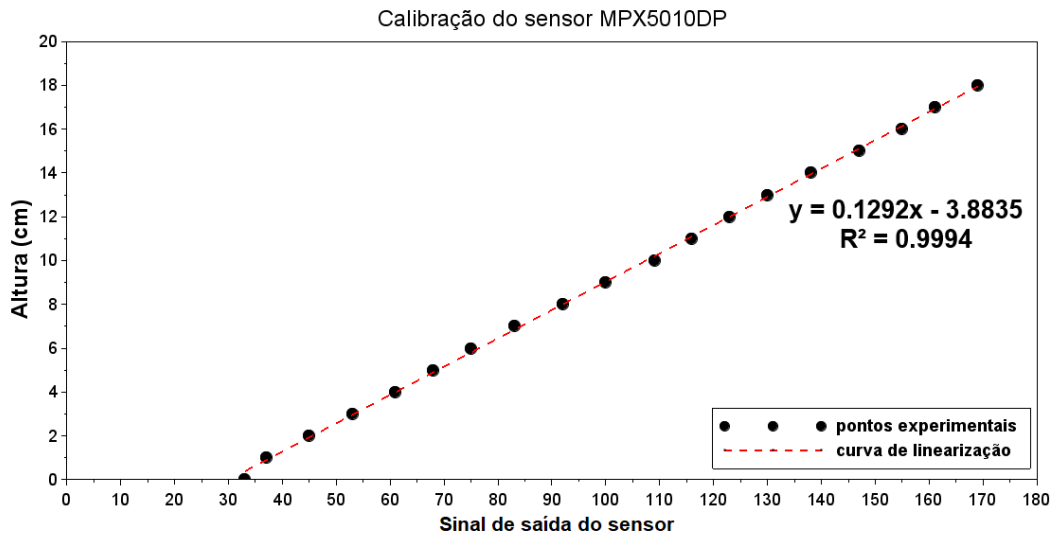


Figura 5: Curva de calibração do sensor de nível.

A Figura 6 apresenta os gráficos de resposta frente as perubações realizadas na bomba de entrada ( $h_2'$  vs tempo) e a Figura 7 mostra a comparação da curva de reação do sistema com a curva de identificação.

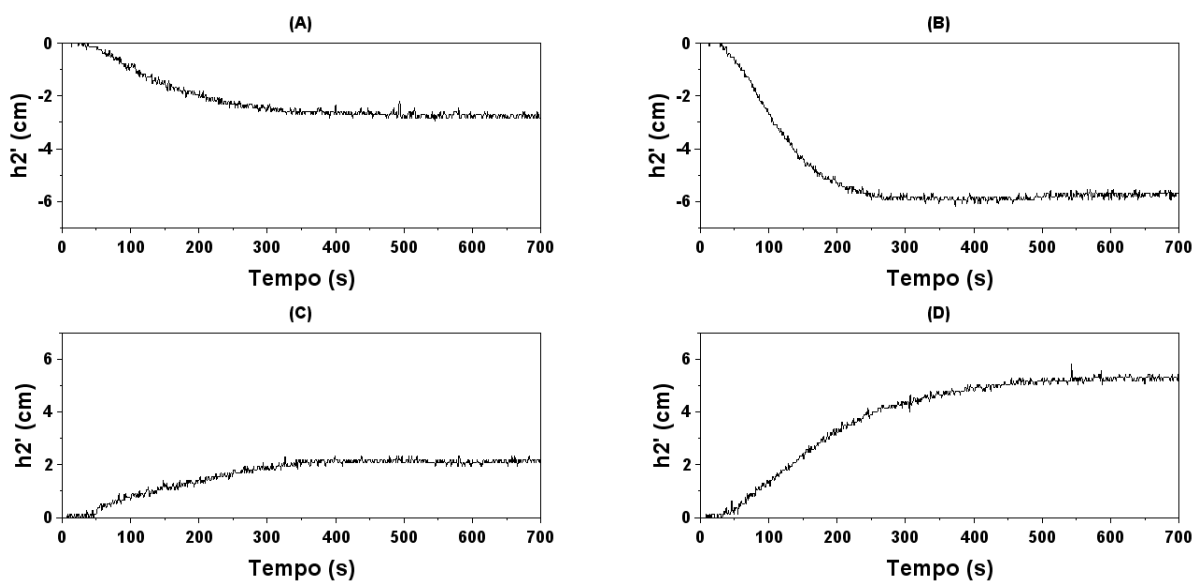


Figura 6: Curva de reação do sistema após perturbações na variável manipulada. (A) corresponde a perturbação -10%, (B) corresponde a perturbação -20%, (C) corresponde a perturbação +10% e (D) corresponde a perturbação +20%.

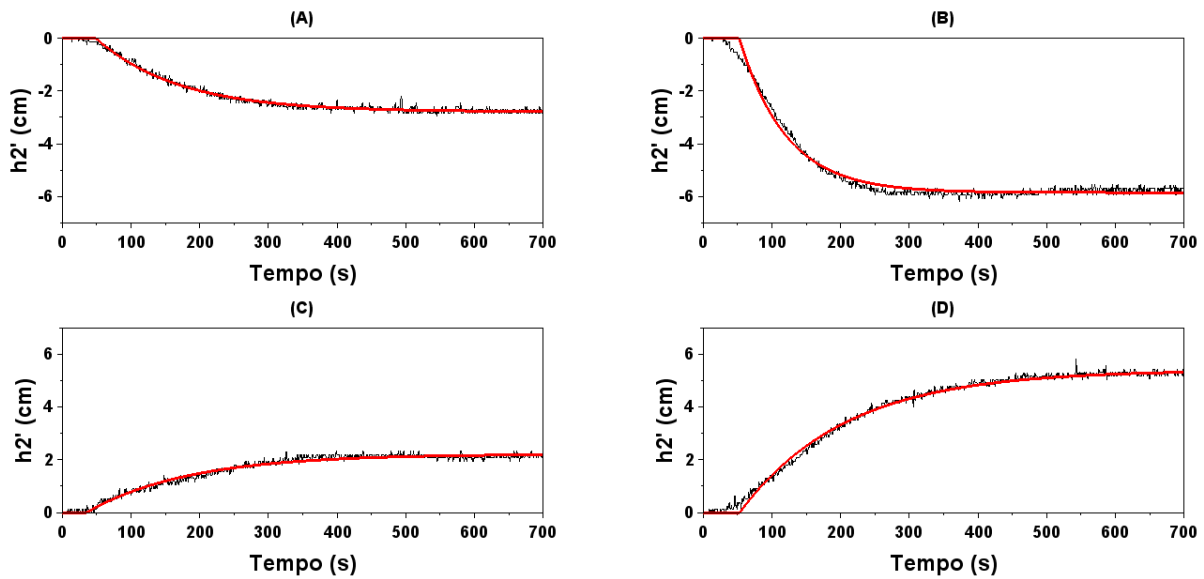


Figura 7: Curva de reação do sistema com a curva de identificação da variável manipulada. (A) corresponde a perturbação -10%, (B) corresponde a perturbação -20%, (C) corresponde a perturbação +10% e (D) corresponde a perturbação +20%.

Os resultados provenientes da identificação do processo após perturbações na variável manipulada estão expostos na Tabela 2.

**Tabela 2:** Parâmetros do sistema após perturbações na variável manipulada.

Perturbação	$\tau$	$Kp$	$td$
-10%	120,00	0,73	48,51
-20%	68,17	0,56	52,34
+10%	148,43	1,88	35,24
+20%	153,81	0,93	53,17

A função de transferência,  $G_P(s)$ , obtida através da média dos valores encontrados para as quatro perturbações realizadas, que determina o comportamento dinâmico do processo é descrita pela Equação 4.

$$\frac{h'_2(s)}{F'_M(s)} = G_P(s) = \frac{1,03 \cdot e^{-47,31 \cdot s}}{122,60 \cdot s + 1} \quad (4)$$

Após a identificação do processo ocorre e a seleção do tipo de controlador do processo em malha fechada, foram definidos os parâmetros do controlador por meio das regras de sintonia de Ziegler-Nichols. Os parâmetros de sintonia do controlador encontrados foram de  $K_C = 2,26$  e  $\tau_I = 157,54$ . Para este caso de aplicação é possível inferir que a diminuição do tempo de integração leva o processo a apresentar oscilações de menor amplitude, além de tornar o processo mais rápido. O termo integral elimina o *off-set* apresentado pelo controle proporcional, porém, como pode ser observado pela Figura 8, ao inserir-se o termo integral o



processo tornou-se oscilatório. Para o teste regulatório, o ação do controle eliminou os efeitos do distúrbio aplicado no processo, como exibe a Figura 9.

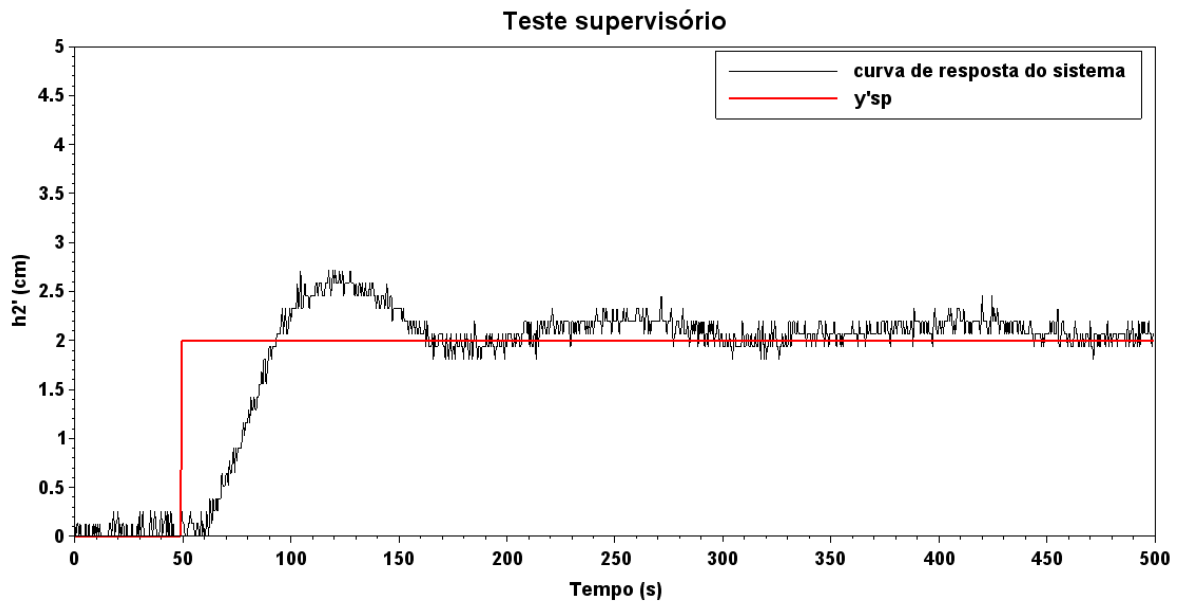


Figura 8: Teste supervisorio com controle *PI*.

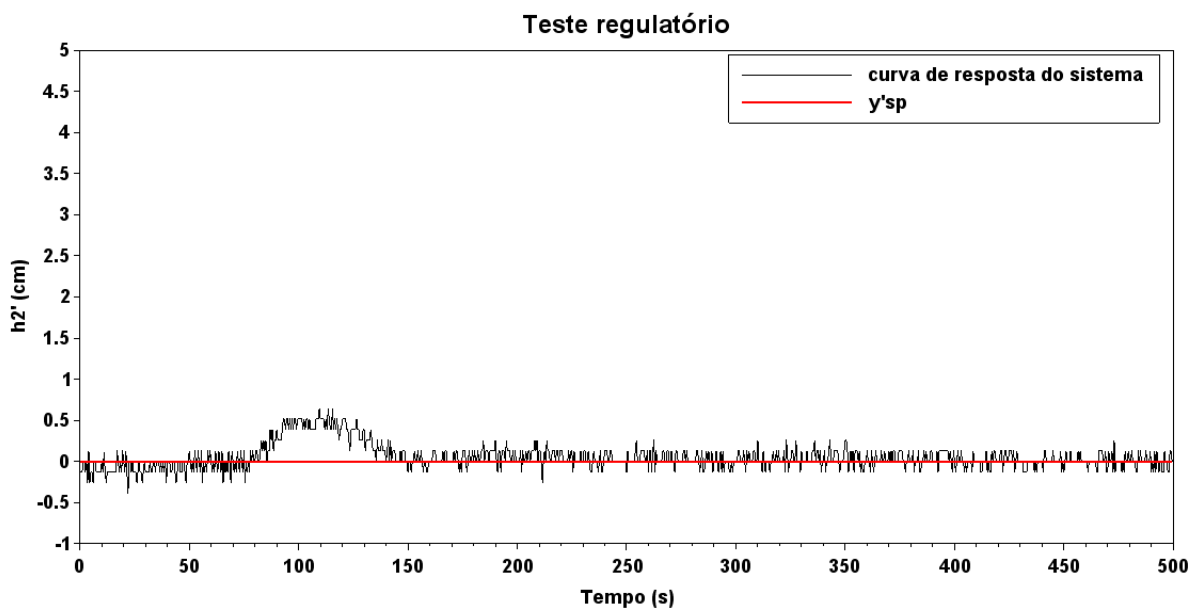


Figura 9: Teste regulatório com controle *PI*.

#### 4. CONCLUSÃO

A análise do trabalho realizado mostra que os objetivos foram atingidos e exibem que o Arduino possui um grande potencial de aplicação para construção de sistemas de controle de nível de baixo custo.

Os resultados se mostraram satisfatórios desde a identificação do processo até a resposta do controlador *PI* sintonizado pela regra de Ziegler-Nichols, nota-se uma resposta eficaz do sistema em malha fechada. As respostas frente as perturbações foram estáveis apresentando oscilações, naturais da implementação do termo integral no controle, apenas no teste supervisório, com o controlador sempre retornando a variável controlada ao seu valor de referência.

## REFERÊNCIAS

- COELHO, L.S.; MARIANI, V.C.; Sistema híbrido neuro-evolutivo aplicado ao controle de um processo multivariável. Revista Controle & Automação/Vol.17 no.1/Janeiro, Fevereiro e Março 2006.
- DORF, RICHARDS C.; BISHOP, ROBERT H. Sistemas de Controle Modernos. 12 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- FARIA, R. de O.(2013) Controle de Nível em um Tanque sujeito à Perturbações e Mudanças do Valor de Referência. UFRJ, Escola Politécnica. Rio de Janeiro.
- NETO, A. H. Técnicas ant-windup em estruturas de controle PID, RST E GPC. UFSC. Florianópolis, 2005
- SANTOS, C. M. M.; COSTA, B. L. G.; SILVA, R. A.; SCALASSARA, P. R.. Desenvolvimento de um módulo de controle de nível utilizando o kit arduino uno. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, p. 4091-4097. 2014
- OGATA, KATSUHIKO. Engenharia de controle moderno. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- PATANÉ, E. J.. Implementação de controle de velocidade em malha fechada para motores de corrente contínua utilizando sistema de aquisição de dados.Dissertação – Escola de Engenharia Mauá. São Caetano do Sul, 2008
- SEBORG, D. E., Process dynamics and control. Mellichamp – 4th ed. John Wiley & Sons, 2017.
- SECCHI, A.R.(1995) Modelagem e Simulação de Processos. UFRGS. Disponível em: &lt;[http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ790/Modelagem\\_Processos.pdf](http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ790/Modelagem_Processos.pdf)&gt;,. Acessado em 06 de abril de 2018
- ZIEGLER, J. G., NICHOLS, N. B., Optimum Settings for Automatic Controllers, Trans. ASME, 64, 759, 1942.

## APPENDIX A

### IDENTIFICATION AND CONTROL IN LEVEL TANKS NON-ITERATIVE

**Abstract.** *The present work is based on the identification and control of a process which disturbances, of different magnitudes, were realized in the feeding pumps of two level tanks arranged non-iteratively. Several references (books, scientific articles, magazines and websites) were analyzed and demonstrated the importance of the identification and control of processes in many industrial sectors. In addition, the Scilab free software was used in communication with the Arduino Uno board to perform perturbations and application of PI control in the studied system. The work developed has as justification the interest of the academic in the existing forms of identification and control of processes and the possibility of the application of a free software as interface of controller-system communication.*

**Keywords:** *Process Control, Arduino, Scilab, PI Control.*