

## **AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE CONTROLE *VERRIDE* EM UM MÓDULO DIDÁTICO DE VAZÃO E NÍVEL**

GABRIEL RODRIGUES DOS SANTOS SILVA<sup>1</sup> e LUIS FILIPE FREITAS DA SILVA DE JESUS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Discente do curso de Engenharia Química, IFBA, Salvador-BA, gabrielrdss@gmail.com;

<sup>2</sup>Msc. em Engenharia Industrial, Prof. EBTT DEPEQ, IFBA, Salvador-BA, luisfilipe@ifba.edu.br;

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
Palmas/TO – Brasil  
17 a 19 de setembro de 2019

**RESUMO:** Este trabalho objetivou avaliar o desempenho da estratégia de controle *override* em um módulo didático de vazão e nível, visando a segurança de operação em seu reservatório a montante da bomba. Na metodologia, foram empregadas a identificação do sistema, as sintonias dos controladores pelo método IMC e a avaliação de características das respostas em malha fechada após degraus no *setpoint* de vazão. Os resultados demonstraram uma seleção correta dos controladores pelo algoritmo implementado, com o nível atuando sempre acima do *setpoint* estabelecido. Os índices de desempenho baseados nas integrais temporais em malha fechada demonstraram minimização adequada do erro nos dois casos, indicando performance satisfatória dos controladores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle, vazão, nível, *override*, PI.

### **PERFORMANCE ASSESSMENT OF PI-OVERRIDE CONTROL STRATEGY IN A LEVEL AND FLOW LEARNING SYSTEM**

**ABSTRACT:** This paper aimed to evaluate the performance of an override control strategy in a level and flow learning system, looking for process safety in the discharge reservoir. In the methodology section, system identification was done first, followed by the IMC tuning of both controllers and the evaluation of closed loop responses after steps were applied in the flow rate setpoint. The results showed a proper selection of the controllers, as the level was always kept above the established setpoint. The time-integral performance criteria of closed-loop responses showed adequate error minimization in both cases, indicating satisfactory performance of the controllers.

**KEYWORDS:** Control, flow, level, override, PI.

### **INTRODUÇÃO**

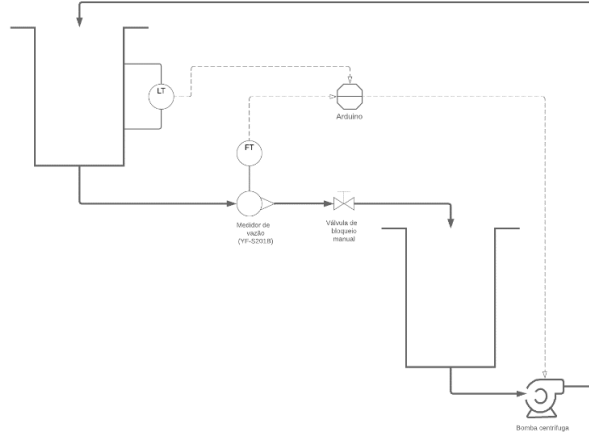
Desde os anos 1950, o campo da segurança de processo tem obtido grandes avanços, de forma que hoje possui o mesmo nível de importância da produção, se convertendo em uma disciplina altamente técnica e complexa de demanda crescente. Inicialmente, a prática tinha ênfase na segurança do trabalhador, que foi evoluindo para absorver conceitos como identificação de perigos, avaliação técnica e o design de novos recursos de engenharia para evitar perdas (Crowl & Louvar, 2011).

Para garantir o controle rigoroso da segurança de processo, especificações de produto e legislação ambiental, os sistemas de controle são criados para permitir que processos estejam dentro de uma janela de atuação. Para cada variável de processo, é possível estabelecer um range de operação, que pode ser controlado por sistemas de controle *override* ou sistemas de segurança por intertravamento, sendo o último uma camada de proteção superior que exige reestabelecimento manual, pois fecha etapas do processo, diferentemente do *override*, que promove ação corretiva gradual nas duas direções de atuação (Tsai et al., 2001).

Os controladores *override* permanecem controlando uma das variáveis manipuladas até que uma restrição esteja prestes a ser atingida ou excedida, fazendo-os assumir o controle de outra variável manipulada por meio de um seletor, o que permite que o processo opere dentro dos limites estabelecidos (Lipták, 2006).

Os sistemas de controle de vazão e nível representam uma grande aplicação do controle em *override*, em que o controlador de vazão é atuante até que o nível atinja a restrição definida pelo seu *setpoint*, ou seja, o controlador de nível anula o controlador de vazão quando a operação se aproxima da restrição. A necessidade da restrição se dá devido à segurança de operação da bomba, que deve possuir altura líquida positiva de sucção (NPSH) suficiente para evitar cavitação (Smith & Corripio, 2008), conforme ilustrado pela figura 1, que representa P&ID do sistema estudado.

Figura 1. P&ID do módulo didático de vazão e nível.



## MATERIAL E MÉTODOS

O módulo didático de controle de vazão e nível é composto por (Figura 2):

- 1 reservatório de sucção 2000 mL em formato tronco de cone com 18,8 cm de altura;
- 1 reservatório de descarga 2000 mL em formato tronco de cone com 18,8 cm de altura;
- 1 bomba com potência de 19 W, altura manométrica igual a 5 m, voltagem DC12V e vazão igual a 13,33 L/min;
- 1 sensor de nível ultrassônico;
- 1 sensor de vazão com range 1-30 L/min na tubulação de retorno ao reservatório de sucção;
- 1 placa Arduino Uno Rev3 R3 Atmega328 com alimentação em porta serial;
- 63 cm de trecho reto de tubulação 1/2'' com dois joelhos para retorno ao reservatório de sucção;
- 1 válvula esfera 1/2'';
- 1 mangueira 1/2'' de sucção com 18 cm de comprimento do reservatório de sucção até a bomba;
- 1 mangueira 1/2'' de descarga com 130 cm de comprimento da bomba até o reservatório de descarga.

O funcionamento do sistema ocorre com os sinais, medidos através dos sensores de vazão e nível, sendo enviados para o Arduino, que se comunica com software de engenharia de sistemas LabVIEW® através de uma porta serial. O código disposto na interface LabVIEW® é responsável pela estratégia de controle *override* e pelos indicadores de desempenho, que são a integral do erro absoluto (IAE – *Integral Absolute Error*) e a integral do erro absoluto ponderado no tempo (ITAE – *Integral Time Absolute Error*) das variáveis controladas (vazão e nível), com o sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) para a bomba sendo a variável manipulada. O PWM permite a obtenção de uma tensão analógica a partir de um sinal digital, com pulso da onda possuindo uma tensão fixa, porém com o valor médio de tensão variando em função do *duty cycle* (Futida & Romero, 2008).

Há a possibilidade de escolha de operação em malha aberta ou malha fechada. O painel frontal do código está disposto na figura 3.

Os controles de vazão e nível necessitam de parâmetros que precisam ser corretamente ajustados para um bom funcionamento da estratégia de controle adotada. Então, de acordo com o proposto por Åstrom & Hagglund (1995), desenvolveu-se, com o auxílio de um algoritmo de

otimização implementado no MATLAB®, o modelo matemático estático do sistema através de um teste de identificação em malha aberta com uma perturbação em degrau no PWM da bomba.

Figura 2. Foto do módulo didático de vazão e nível.

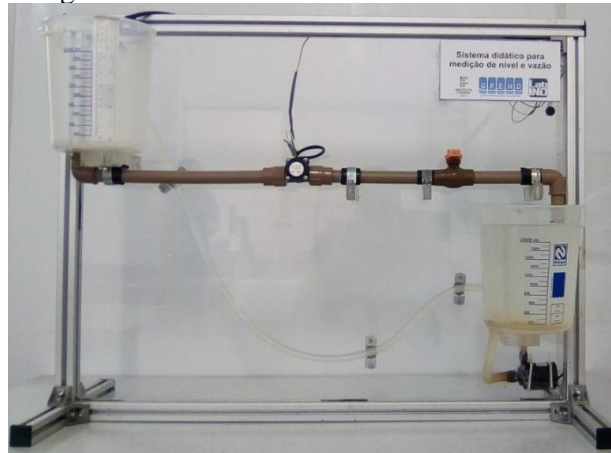
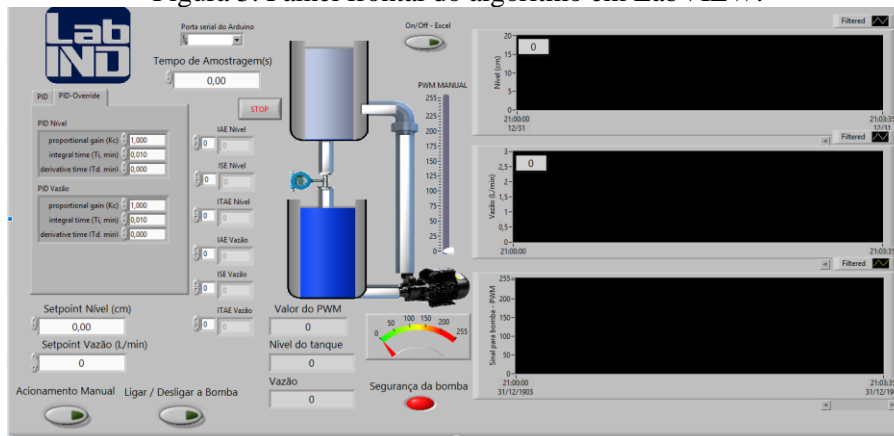


Figura 3. Painel frontal do algoritmo em LabVIEW.



A partir da função de transferência obtida em malha aberta, realizou-se a sintonia dos controladores PI através do método IMC (*Internal Model Control*), conforme proposto por Rivera (1999), utilizando o critério conservador, que iguala a constante de tempo em malha fechada ( $\lambda$ ) à constante de tempo do processo em malha aberta ( $\tau$ ). Os parâmetros sintonizados são o ganho proporcional ( $K_c$ ) e o tempo de integração ( $\tau_i$ ), que estão dispostos na tabela 1.

Tabela 1. Equações de sintonia IMC para controladores PI

Parâmetros	Equações de Sintonia
$K_c$	$\frac{2\tau + t_0}{K \cdot 2\lambda}$
$\tau_i$	$\tau + \frac{t_0}{2}$

Os controladores de vazão e nível são de ação reversa, pois um aumento no sinal do transmissor de vazão ou nível promove uma diminuição na saída do controlador, conforme descrito por Smith & Corripio (2008). Baseando-se nessa informação, foi escolhido um seletor de alta para o *override*, ou seja, a restrição imposta é a variável controlada estar muito abaixo do *setpoint*, o que eleva sensivelmente a saída do controlador.

Realizou-se a análise de desempenho dos controladores de vazão e nível, após degraus no *setpoint* de vazão, através de critérios baseados em toda resposta do processo, que são o IAE e o ITAE

(Stephanopoulos, 1984). As integrais do erro estão dispostas nas equações 1 e 2 e foram calculadas através do LabVIEW® nas regiões em que a restrição da variável controlada foi atingida, permitindo-a passar através do seletor.

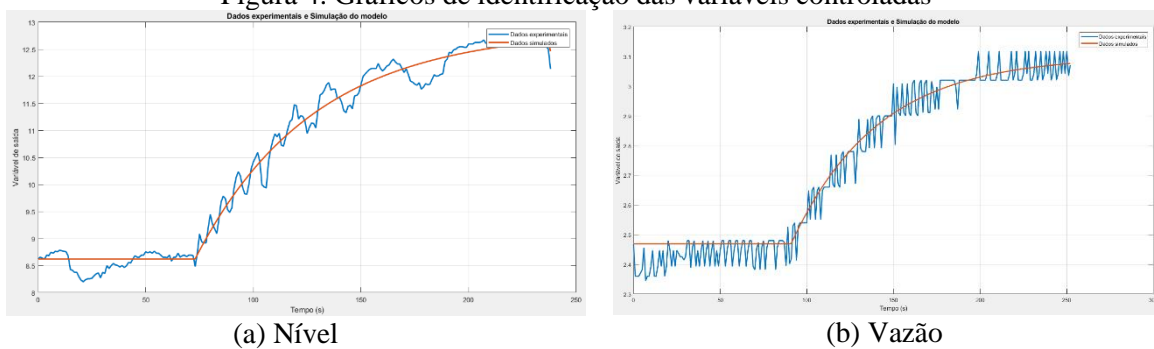
$$IAE = \int_0^{\infty} |\epsilon(t)| dt \quad (1)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |\epsilon(t)| dt \quad (2)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos de identificação de nível e vazão estão dispostos nas figuras 4a e 4b, respectivamente, em que as linhas azuis representam os dados experimentais e as linhas laranjas representam os dados simulados.

Figura 4. Gráficos de identificação das variáveis controladas



As funções de transferência obtidas e suas respectivas sintonias PI através do método IMC estão dispostas na tabela 2.

Tabela 2. Funções de transferência e sintonias IMC para as variáveis controladas.

Variável Controlada	Nível	Vazão
Função de Transferência	$\frac{0,1693}{54,8130s + 1}$	$\frac{0,0252 \cdot e^{-4,0240s}}{49,7560s + 1}$
$K_c$	5,9084	41,3052
$\tau_i$ (min)	0,9136	0,8628

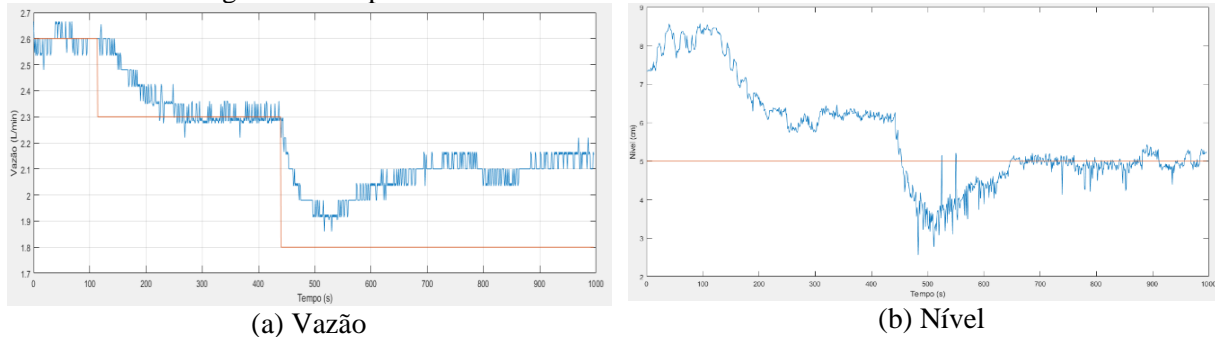
Aplicou-se uma perturbação em degrau no *setpoint* de vazão, após a sintonia dos controladores, indo de 2,6 L/min para 2,3 L/min no instante  $t = 113s$ . Analogamente, aplicou-se outra perturbação em degrau no *setpoint* de vazão, indo de 2,3 L/min para 1,8 L/min no instante  $t = 439s$ . Os gráficos das variáveis controladas (vazão e nível) estão dispostos nas figuras 5a e 5b, em que a linha azul representa a variável controlada e a linha laranja representa o *setpoint*.

Os gráficos da figura 5 permitem avaliar que, até o instante em que o degrau em  $t=113s$  é aplicado, o controlador de vazão (figura 5a) mantém a vazão controlada em torno do *setpoint* de 2,6 L/min, pois a saída do controlador de nível se situa abaixo da saída do controlador de vazão. Uma situação oposta ocorre após o degrau aplicado em  $t=439s$ , que faz a saída do controlador de nível superar a saída do controlador de vazão, anulado através do seletor, o que justifica o comportamento de malha aberta apresentado a partir da segunda perturbação em degrau. A figura 5b confirma esse resultado, pois o nível passou a buscar o *setpoint*, fixado em 5 cm, após a segunda perturbação em  $t=439s$ , mantendo a variável em torno dele a partir de aproximadamente  $t=650s$ .

Observa-se também, através da figura 5, uma resposta não-oscilatória dos controladores de vazão e nível, comportamento esperado para uma sintonia conservadora do método IMC, o que justifica a utilização de apenas critérios baseados em toda resposta do processo, como IAE e ITAE.

Os testes apresentados demonstraram a funcionalidade da malha *override*, pois a vazão permaneceu controlada até que a restrição de nível fosse atingida, ou seja, promoveu-se uma mudança de variável controlada para garantir a segurança de operação da bomba, não permitindo um valor de nível abaixo do *setpoint* estabelecido, apenas acima do mesmo.

Figura 5. Comportamento das variáveis controladas em malha fechada.



Os parâmetros de avaliação dos controladores de nível e vazão em *override* nas regiões em que foram selecionados, ou seja, nos intervalos  $113 < t < 439$  para vazão (*setpoint* = 2,3 L/min) e  $t > 439$  para nível (*setpoint* = 5 cm), estão disponíveis na tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros das respostas em malha fechada para vazão e nível

	Controlador de Vazão	Controlador de Nível
IAE	0,0170	0,0788
ITAE	12,2970	103,279

A minimização do erro para os dois critérios (IAE e ITAE) foi adequada nos dois controladores, mesmo com os valores maiores apresentados para o controlador de nível, pois observou-se as magnitudes das variáveis controladas, especialmente para o critério ITAE, que considera o efeito de erros persistentes na resposta.

## CONCLUSÃO

A estratégia de controle *override* é de extrema importância na área de segurança de processo e foi aplicada com sucesso no módulo de controle de vazão e nível. O controlador de vazão permaneceu selecionado até que a restrição de nível fosse atingida, não permitindo uma operação com nível abaixo do *setpoint* estabelecido. Os indicadores de desempenho (IAE e ITAE) permaneceram baixos nos dois controladores, garantindo a minimização do erro.

## REFERÊNCIAS

- Åström, K. J.; Hagglund, T. PID Controllers: Theory, Design & Tuning. 2.ed. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995. Cap. 4, p. 120-197.
- Crowl, D. A.; Louvar, J. F. Chemical Process Safety: Fundamentals with applications. 3. ed. Boston: Prentice Hall, 2011. Cap. 1, p. 1-32.
- Futida, I. T.; Romero, R. A. F. Desenvolvimento mecânico e de Controle PWM para sistema robótico. São Carlos: ICMC-USP, 2008. 28p.
- Lipták, B. G. Process Control and Optimization VOLUME II. 4. ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 2, p. 336-345.
- Rivera, D. A. Internal Model Control: A Comprehensive View. Tempe, AZ: [s. n.], 1999. 23p
- Smith, C. A.; Corripio, A. B. Princípios e prática do controle automático de processo. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Cap. 10, p. 295-326.
- Stephanopoulos, G. Chemical process control: an introduction to theory and practice. New Jersey: Prentice Hall, 1984. Cap. 16, p. 297-316.
- Tsai, Y.Y.; Cheng, Y.C.; Yu, C.C. Design and Analysis of Override Control Systems. IFAC Publications, Jejudo Island, South Korea, 2001. 6p.