



## SISTEMA DE CONTROLE FEEDBACK EM MICROCONTROLADOR DO NÍVEL DE LÍQUIDOS EM UNIDADE EXPERIMENTAL DE BANCADA

ROSS, Renan<sup>1</sup>; LORA, Pedro<sup>2</sup>; GIBIKOSKI, Carolina<sup>3</sup>; DUTRA PEREIRA, Renato<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [renan.ross@yahoo.com.br](mailto:renan.ross@yahoo.com.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [pedrohenrique\\_lora@hotmail.com](mailto:pedrohenrique_lora@hotmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [carinagibikoski@gmail.com](mailto:carinagibikoski@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [renatodutrapereira@gmail.com](mailto:renatodutrapereira@gmail.com)

### 1. INTRODUÇÃO

Nos processos industriais é indispensável o uso da automação para alcançar as exigências de segurança, eficiência, lucratividade e o atendimento das exigências da legislação. Dentre as alternativas de estratégias disponíveis, a escolha pelo controle por retroalimentação (*feedback*) responde por uma parcela muito significativa das malhas industriais.

Este trabalho teve por objetivos montar, testar, sintonizar e avaliar o desempenho do controlador automático em estratégia *feedback* proporcional-integral na forma velocidade, executado *stand alone* no microcontrolador ATMEGA 328P, para o controle regulatório de desnível de coluna de líquidos em um sistema de dois tanques conectados por duas bombas, em bancada, manipulando a vazão em uma das bombas elétricas, sujeita às perturbações provocadas pela outra bomba, para fins de teste e avaliação.

### 2. METODOLOGIA

A partir da concepção e projeto, foi montado (Figura 1) o sistema experimental em escala de bancada, para o controle de altura de coluna de líquido usando dois tanques de vidro, de 16 cm x 16,9 cm x 48 cm, duas bombas elétricas (12V) de esguicho de parabrisa veicular, dois relés dotados de optoacoplador, duas mangueiras, fonte ATX de tensão DC, sensores ultrassônicos de distância SRC-04, e uma placa Arduino Uno, com o microcontrolador ATMEGA 328P.

A seguir foi efetuada a calibração dos sensores ultrassônicos e a caracterização da vazão das bombas, através do uso de programa específico implementado na placa microcontrolada, para produzir desnível em cada tanque, com medição simultânea de tempo, distância e comparação com medidas externas feitas com régua.

Após a calibração foi realizada a identificação da dinâmica de resposta da variável desnível à perturbação degrau na vazão de uma das bombas, observando como a variável controlada respondia à variável manipulada, assumindo o modelo de primeira ordem com atraso de tempo (F.O.P.D.T. - *First Order Plus Delay Time*) e usando o procedimento de sintonia de Ziegler-Nichols em malha aberta, segundo SEBORG et. al. (2010), foram determinados os parâmetros de sintonia para os termos das equações de controle proporcional e proporcional-integral.

A fim de implementar tanto a atuação na bomba controladora como a perturbação na bomba perturbadora foi utilizada a técnica da modulação por largura de pulso, manipulando o tempo de ativação do relé com uma janela de 20s.

Os experimentos em malha fechada foram efetuados usando a implementação digital na forma velocidade da equação de controle proporcional e da proporcional-integral, para fins de compração, com perturbações na bomba não-controlada e após transcorrido o experimento foram determinados os parâmetros de desempenho integrais: ISE (integral do erro quadrático), IAE (integral do erro absoluto) e ITSE (integral do erro quadrático ponderado no tempo), conforme SEBORG et. al. (2010).

Figura 1 - Sistema em bancada do controle automático de desnível entre tanques conectados.



Fonte: os autores

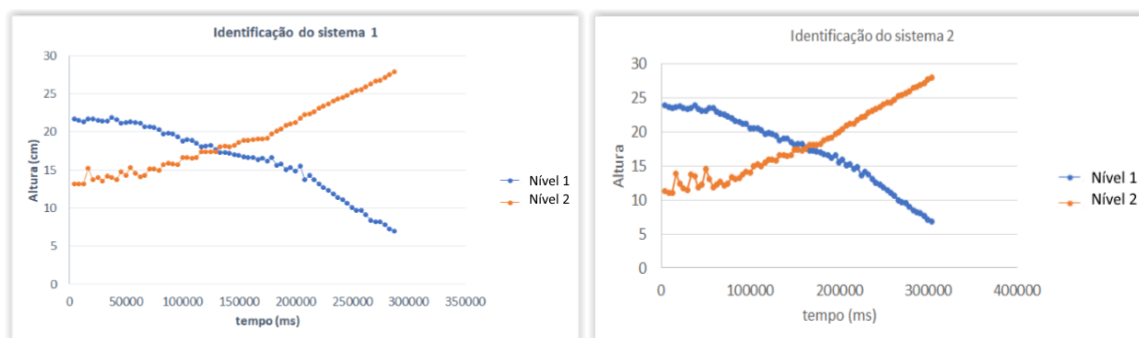
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de calibração dos sensores ultrassônicos tiveram como resultado  $3,5 \pm 0,2 \%$  e  $2,7 \pm 0,2\%$  de erro relativo, na faixa a ser usada no equipamento, ao longo de 500 medidas.

A partir da caracterização das bombas obteve-se o valor médio de vazão para as bombas de 2,13 L/min e 2,24 L/min. A bomba escolhida para implementar a atuação de controle foi aquela de capacidade de vazão maior, ficando a outra atuando como “bomba perturbadora”.

As corridas de identificação do sistema foram efetuadas em duplicata, gerando as duas curvas da Figura 2, em resposta à perturbação degrau, obtendo então os valores médios, referentes à Tabela 2. Como graficamente não foi possível determinar o atraso de tempo, usou-se a recomendação conservativa da literatura (SEBORG et. al., 2010) de adotar 10% do valor da constante de tempo.

Figura 2 - Curvas de identificação do sistema



Fonte: Os autores

Tabela 2 - Parâmetros do processo modelo F.O.P.D.T

Ganho - $K_p$	Constante de Tempo - $\tau_p$	Atraso de Tempo - $t_d$
13,38	4,06	0,41

Fonte: Os autores

Usando o procedimento de Ziegler-Nichols de sintonia de controladores em malha aberta, foram determinados os parâmetros dos controladores P e PI, obtendo os resultados da Tabela 3.

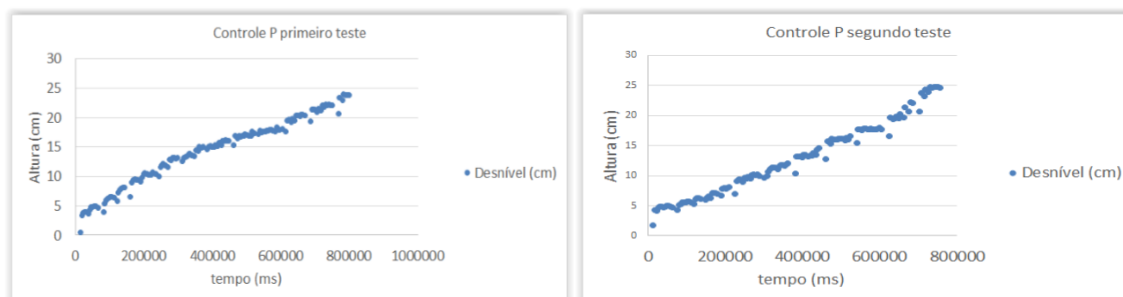
Tabela 3 - Parâmetros calculados dos controladores P e PI

Equação	$K_c$	$\tau_i$
Proporcional	0,75	-
Proporcional-Integral	0,67	1,35

Fonte: Os autores

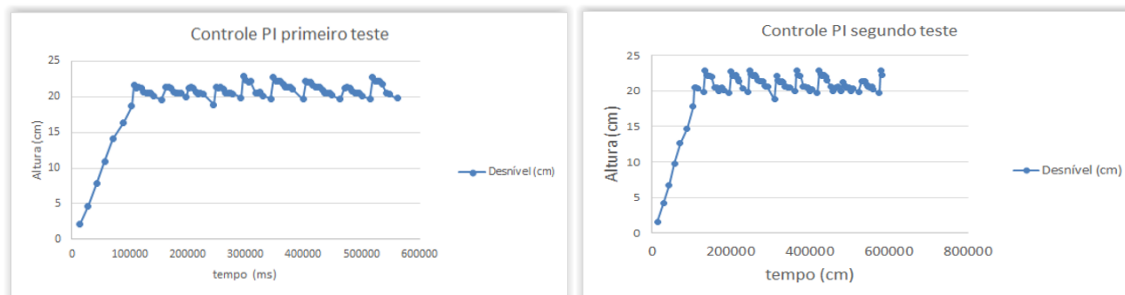
Executou-se então, o teste de desempenho dos controladores, usando a bomba perturbadora acionada por 4 segundos a cada 60 segundos de atuação. O setpoint utilizado foi uma diferença de nível de 20 cm. As curvas obtidas em cada corrida, em duplicata, são apresentadas na Figura 3 para o controle proporcional e na Figura 4 para o controle proporcional-integral.

Figura 3 – Comportamento Dinâmico do desnível sob controle proporcional



Fonte: Os autores

Figura 4 - Comportamento Dinâmico do desnível sob controle proporcional



Fonte: Os autores

Uma análise quantitativa é obtida através dos parâmetros IAE, ISE e ITSE, de acordo com a tabela 4:

Tabela 4 - Valores calculados de IAE, ISE, ITSE

Controlador	IAE (cm)	ISE (cm <sup>2</sup> )	ITSE (ms.cm <sup>2</sup> )
Proporcional	987,85	10517,33	1775912,40
Proporcional-Integral	160,77	1047,30	78450,75

Fonte: Os autores

## 4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento da unidade foi realizado com sucesso, além de ter sido possível calibrar os sensores ultrassônicos, caracterizar as bombas, dimensionar os parâmetros de controle pelo método Ziegler-Nichols de sintonia em malha aberta e comparar as equações de controle digital na forma velocidade proporcional e proporcional-integral, sendo executadas no ATMEGA 328P da placa microcontrolada Arduino Uno. Como mostram as curvas, a estratégia proporcional foi ineficaz, pois não conseguiu estabelecer o desnível ao redor do valor de setpoint, enquanto o controle feedback proporcional-integral foi satisfatório, com um desvio médio de 2,91cm, ou cerca de 14% do valor de referência, além de ter obtido um desempenho melhor na avaliação dos critérios integrais de desempenho do que aquele do proporcional puro.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SEBORG, D. **Process Dynamics and Control**. Hoboken: John Wiley and Sons Inc., 2010.

SPANDRI, Renato. **Sintonia De Controladores Regulatórios**. Bol. Téc. Petrobrás, Rio de Janeiro 46 (3/4) : 386-410, jul/dez. de 2003.