

Implementação e Simulação de Estratégia De Controle Distribuído Aplicado em Plantas *Ball Balancer*

Rafael Máximo da Silva* Jean Marcos de Souza Ribeiro*

*UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP
Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Pesquisa em Controle,
Av. José Carlos Rossi, 1370, 15385-000 Ilha Solteira, São Paulo, Brasil,
(e-mail: rafael.maximo@unesp.br, jean.ribeiro@unesp.br).

Abstract: In this work, a study was carried out on the application of distributed control in Ball Balancer systems in Matlab® and Simulink®, as well as the implementation in workbench with two Ball Balancer, using classical control techniques and a selection process through the analysis of a performance index. To obtain cooperative control of the plants, the possibility of switching between controllers at each sampling instant was considered, for the system that is in a worse condition concerning the desired point of operation. In the implementation, the Arduino Mega with Ethernet shield was used to control the two plants and communicate with the Elipse E3® supervisory. In order to visualize the graphs and adjust the gains of the PID controller, a graphic interface was made in Elipse E3®, which communicates with the Arduino through the Modbus TCP protocol.

Resumo: Neste trabalho foi realizado um estudo sobre aplicação de controle distribuído em plantas *Ball Balancer* no Matlab® e Simulink®, bem como a implementação em bancada com dois *Ball Balancer*, usando técnicas clássicas de controle e processo de seleção de atuação através de análise de um índice de desempenho. Para obter o controle cooperativo das plantas, foi considerada a possibilidade de chaveamento entre controladores em cada instante de amostragem, para o sistema que está em pior condição em relação ao ponto de operação desejado. Na implementação, em bancada, foi utilizado o Arduino Mega, com *shield* Ethernet, para o controle das duas plantas e comunicação com supervisor Elipse E3®. Para visualização dos gráficos, e ajustes de ganhos do controlador PID, foi confeccionada uma interface gráfica em Elipse E3®, que se comunica com o Arduino através do protocolo Modbus TCP.

Keywords: Distributed Control; Ball Balancer; Proportional, Integral, and Derivative Control (PID); SCADA software; Arduino.

Palavras-chaves: Controle Distribuído; *Ball Balancer*; Controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID); Software SCADA; Arduino.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do uso de redes de comunicação, várias áreas da engenharia estão sendo integradas a um ambiente conectado através de uma rede. O controle via rede está sendo muito utilizado e compreende sistemas de controle no espaço distribuído, onde a comunicação entre sensores, atuadores e controladores ocorre através de uma rede compartilhada de múltiplo propósito (Gupta & Chow, 2010; Hespanha et al., 2007).

Devido à extensa troca de dados pela rede, existe possibilidade de perda de pacotes de dados (Cheng et al., 2013; Li & Shi, 2014), e geralmente uma rede compartilhada possui limitações de velocidade de transmissão, da quantidade de informação enviada em cada transmissão e a possibilidade da informação não ser entregue ao destino no tempo estabelecido, entre outros problemas (Chen et al., 2018; Qu et al., 2018; Souza, 2012).

Portanto, mitigar os efeitos dessas imperfeições no desempenho do sistema de controle em rede, tem recebido atenção considerável, nos últimos anos, por pesquisadores nas áreas de controle e comunicação (Zhang et al., 2019).

Na literatura existem métodos de controle robusto que permitem assegurar a estabilidade de um sistema de controle em rede. Em Sousa et al. (2015), é determinada uma estratégia dinâmica de distribuição dos recursos da rede que permite assegurar estabilidade, bem como otimizar índices de desempenho H_2 e H_∞ . Em Fadaei & Salahshoor (2008), foi investigado o efeito do atraso na transmissão de dados, sobre o controle via rede, em seguida, uma abordagem de controle PID *Fuzzy* foi proposta, para melhorar o desempenho do controle em rede.

Neste trabalho propõe-se o controle cooperativo de vários sistemas, através de uma rede de comunicação, considerando

uma estratégia para o seletor de controle e utilizando um controle do tipo PID clássico.

A grande contribuição está na estratégia simples, que exige pouco esforço computacional, para a seleção de qual planta estará sendo controlada em cada instante de amostragem.

2. PROPOSTA DO CONTROLE DISTRIBUÍDO

A proposta deste estudo é a diminuição do tráfego de dados numa rede e, por isso, foi proposta a utilização de um controlador que envia dados (sinal de controle) para apenas um sistema por vez. A decisão do sistema que receberá o sinal de controle é a maior contribuição deste trabalho e ela pode ser observada na Fig. 1.

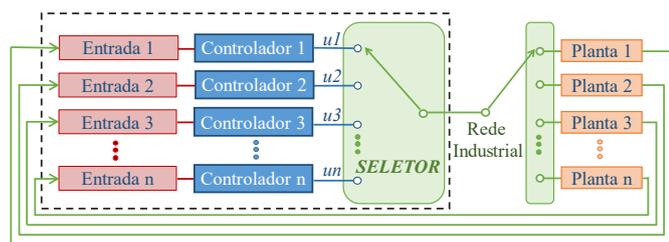


Fig. 1 Proposta do controle distribuído.

Para obter o controle cooperativo das plantas, foi considerado um seletor, através de um índice de desempenho, que fará o chaveamento de controle, em cada instante de amostragem, para a planta que está em condição de maior necessidade de esforço do controlador em relação ao ponto de operação. Assim, o tráfego na rede industrial conterá informações apenas para a planta selecionada.

3. PLANTA BALL BALANCER

O sistema *Ball Balancer*, esboçado na Fig. 2, consiste em uma tela *touch screen* retangular, que está acoplada a dois servomotores (um no eixo x e outro no eixo y). Uma esfera de aço é colocada sobre a tela e pode se movimentar nos dois eixos. A posição da esfera é medida através da tela *touch screen* resistiva de 4 vias, do fabricante Playtix®.

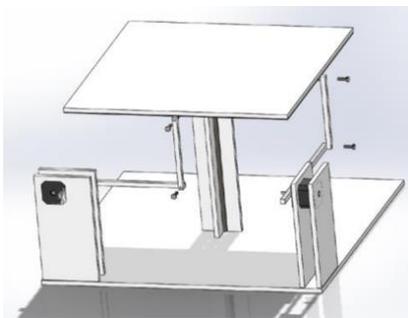


Fig. 2 Esboço do *Ball Balancer*.

Ao controlar a posição das engrenagens de carga do servomotor, o ângulo de inclinação da plataforma pode ser ajustado, assim, o controle tem como objetivo de posicionar a esfera em um ponto de referência ou rastrear uma rota determinada.

3.1 Modelagem do Sistema

Para a modelagem matemática deste sistema, foi considerado que cada eixo é independente do outro e que ambos têm a mesma dinâmica. A Fig. 3 apresenta o diagrama de blocos do sistema em malha aberta.

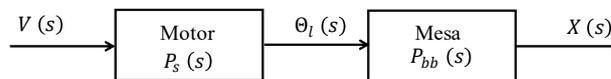


Fig. 3 Sistema em malha aberta.

Baseado em Quanser (2008) é apresentada a função de transferência do motor, conforme (1).

$$P_s(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)s} = \frac{\theta_l(s)}{V(s)}, \quad (1)$$

sendo K a constante de torque do motor e τ a constante mecânica.

Ao aplicar o diagrama de corpo livre, e a segunda Lei de Newton, na esfera, conforme Fig. 4, encontram-se as equações de movimento.

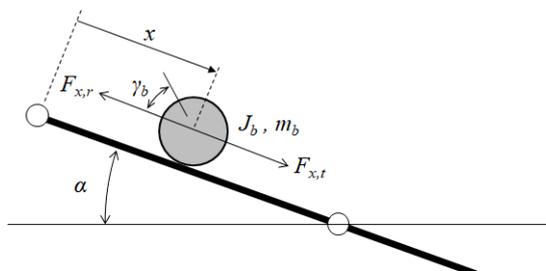


Fig. 4 Dinâmica de movimento da esfera.

Substituindo a força de translação, e força inercial da bola, obtém-se a equação não linear de movimento da bola conforme (2).

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{m_b g \sin(\alpha(t)) r_b^2}{m_b r_b^2 + J_b}, \quad (2)$$

sendo J_b a inércia da esfera e

$$\sin(\alpha(t)) = \frac{2 \sin(\theta_l(t)) r_{arm}}{L}. \quad (3)$$

Considerando que o ângulo α é próximo de zero tem-se (4).

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{2 m_b g \theta_l(t) r_{arm} r_b^2}{L (m_b r_b^2 + J_b)}, \quad (4)$$

sendo r_{arm} o raio do engaste do servo à haste que movimenta a tela.

Adotando

$$K_{bb} = \frac{2 m_b g r_{arm} r_b^2}{L (m_b r_b^2 + J_b)}, \quad (5)$$

tem-se (6), que é a função de transferência da mesa, representada na Fig. 3.

$$P_{bb}(s) = \frac{K_{bb}}{s^2}. \quad (6)$$

Na Tabela 1 são mostrados os parâmetros do sistema.

Tabela 1. Parâmetros da planta.

Constantes	Descrição	Valor
m_b	Massa da esfera (Kg)	0,110
r_{arm}	Distância do eixo do motor ao ponto de fixação da barra (cm)	6
r_b	Raio da bola (cm)	1,5
L	Comprimento da mesa (cm)	30

4. PROJETO DOS CONTROLADORES

Para a simulação, propõe-se o controle em cascata do sistema, conforme ilustrado na Fig. 5.

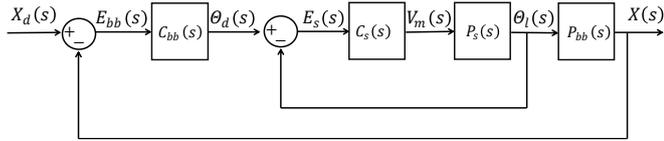


Fig. 5 Diagrama de controle em cascata.

sendo $X(s)$ a medida real da posição da bola, $X_d(s)$ a posição desejada e $E_{bb}(s)$ o erro entre a posição desejada e real. Na malha interna tem-se $\Theta_l(s)$ o ângulo real do motor, $\Theta_d(s)$ o ângulo desejado, gerado pelo controlador da planta $C_{bb}(s)$, e $V_m(s)$ a tensão aplicada no motor para que alcance o ângulo desejado, gerado pelo erro entre o ângulo desejado e real $E_s(s)$.

4.1 Projeto do Controle da Mesa

A partir do diagrama de blocos, do controlador proposto na Fig. 5, obtém-se (7), que relaciona $\Theta_d(s)$ em função das posições desejada $X_d(s)$ e posição real da bola $X(s)$.

$$\Theta_d(s) = K_{p,bb}(X_d(s) - X(s)) + \frac{K_{i,bb}}{s}(X_d(s) - X(s)) + K_{d,bb} s (b_{sd}X_d(s) - X(s)). \quad (7)$$

Considerando (6) e assumindo que o ângulo desejado $\Theta_d(s)$ é igual ao ângulo de carga $\Theta_l(s)$, tem-se (8).

$$\Theta_d(s) = \frac{s^2 X(s)}{K_{bb}}. \quad (8)$$

Substituindo (8) e (7) obtém-se (9).

$$\frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{s^2 b_{sd} K_{d,bb} K_{bb} + s K_{p,bb} K_{bb} + K_{i,bb} K_{bb}}{s^3 + s^2 K_{d,bb} K_{bb} + s K_{p,bb} K_{bb} + K_{i,bb} K_{bb}}. \quad (9)$$

A equação característica de (9), do sistema em malha fechada, é de terceira ordem, e quando comparada com a equação característica de terceira ordem na forma expandida (10), podem ser encontrado os ganhos do controlador, conforme as equações (11-13).

$$s^3 + (2\xi\omega_n + p_0)s^2 + (2\xi\omega_n p_0 + \omega_n^2)s + \omega_n^2 p_0 = 0, \quad (10)$$

$$K_{p,bb} = \frac{(2\xi\omega_n p_0 + \omega_n^2)}{K_{bb}}, \quad (11)$$

$$K_{d,bb} = \frac{(2\xi\omega_n + p_0)}{K_{bb}}, \quad (12)$$

$$K_{i,bb} = \frac{\omega_n^2 p_0}{K_{bb}}. \quad (13)$$

sendo p_0 a constante de decaimento.

4.2 Projeto do Controle do Motor

Para o controle do motor será abordado o projeto do controlador PD, que visa ser implementado para gerar o sinal de tensão $V_m(s)$ a ser aplicada no motor.

A função de transferência, em malha fechada, que relaciona o ângulo de carga, Θ_l , e o ângulo desejado, Θ_d , do motor é dada em (14).

$$\frac{\Theta_l(s)}{\Theta_d(s)} = \frac{\frac{K_p K}{\tau}}{s^2 + \left(\frac{1 + K_p K}{\tau}\right)s + \frac{K_p K}{\tau}}. \quad (14)$$

Para obter os ganhos K_p e K_v do controlador, deve-se encontrar o coeficiente de amortecimento do sistema ξ , e a frequência natural do controlador ω_n , e comparar o denominador da equação (14) com a equação característica do segundo grau.

5. CONTROLE DISTRIBUÍDO

Nesta seção, apresenta-se a estratégia de controle considerada, bem como os resultados de simulação, obtidos para as técnicas de controle PID para duas plantas.

5.1 Estratégia para o Seletor de Controle

Para obter o controle cooperativo das plantas, foi considerada uma estratégia para o índice de desempenho do chaveamento do controlador, conforme Fig. 6, com a ideia de chaveamento de controle em cada instante de amostragem, para a planta que está em pior condição em relação ao ponto de equilíbrio dos estados.

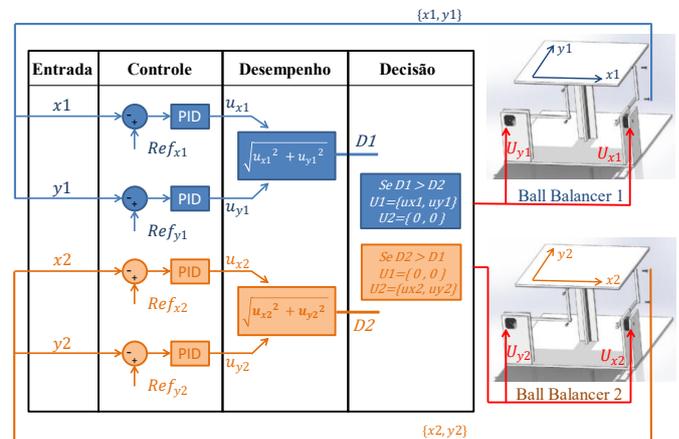


Fig. 6 Controle distribuído de duas plantas, através de seletor de controle.

O sinal de controle proveniente dos controladores foi utilizado para a verificação de pior desempenho, que será constatado através da maior norma $\sqrt{u_x^2 + u_y^2}$.

Na Tabela 2 são mostrados os ganhos obtidos para o controle distribuído.

Tabela 2. Ganhos do PID para dois sistemas *Ball Balancer*.

Ganhos	Descrição	Eixo (x, y)
K_{bb}	Constante da planta ($m/s^2/rad$)	1,29
K_p	Ganho K_p do motor (V/rad)	13,6
K_v	Ganho K_v do motor ($V.s/rad$)	-0,00612
$K_{p,bb}$	Ganho K_p do <i>Ball Balancer</i> (rad/m)	3,7
$K_{i,bb}$	Ganho K_i do <i>Ball Balancer</i> ($rad/m/s$)	0
$K_{d,bb}$	Ganho K_d do <i>Ball Balancer</i> ($rad.s/m$)	2,15

Na Fig. 7 é apresentado o resultado de simulação do controle distribuído de dois sistemas *Ball Balancer*, para o rastreamento em onda quadrada. Apresenta-se o controle de posição das coordenadas x e y de ambos os sistemas.

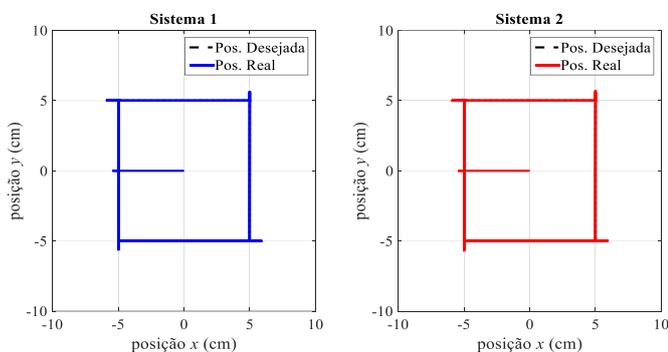


Fig. 7 Simulação do controle distribuído de duas plantas, para referência degrau.

Na Fig.8 são apresentadas as respostas de posição da esfera, ângulo da mesa e sinal de controle em tensão; essa figura mostra os resultados de controle do Sistema 1 (*Ball Balancer* 1).

Não será apresentada a resposta do Sistema 2, pois os resultados são semelhantes ao Sistema 1.

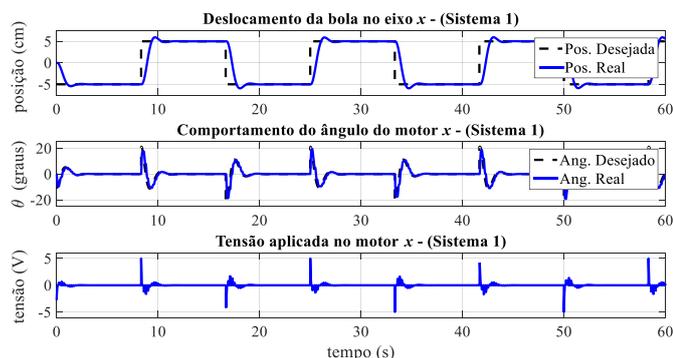


Fig. 8 Respostas e sinal de controle do Sistema 1 para referência degrau.

Percebe-se, nas figuras 7 e 8, que o controle PID responde adequadamente e com baixo sinal de controle.

Para comprovar que apenas um controle está em operação durante um período de amostragem, são apresentadas as tensões em cada servo motor, conforme Fig. 9.

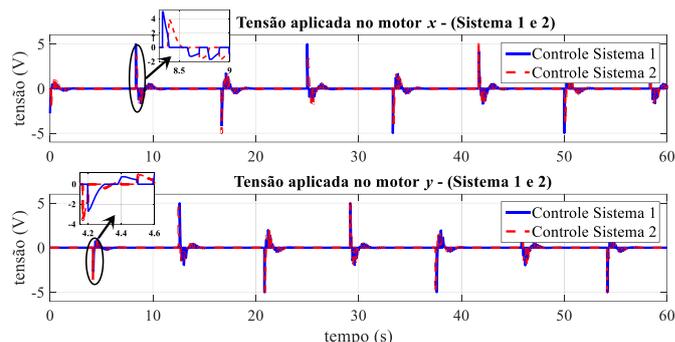


Fig. 9 Destaque dos sinais de controle em cada período de amostragem para referência quadrada.

Da mesma forma, foram realizadas simulações para o rastreamento de um sinal de referência senoidal, resultando nas Figuras 10-12.

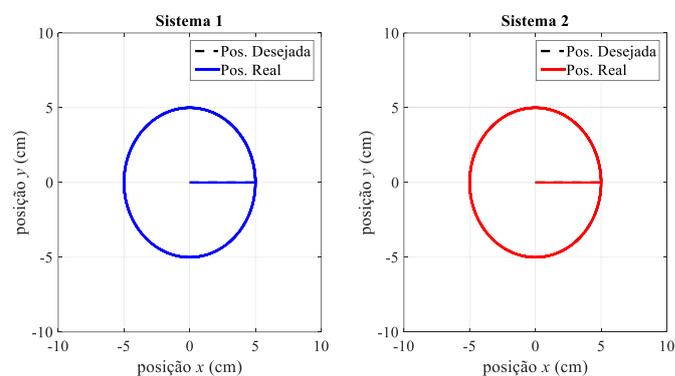


Fig. 10 Simulação do controle distribuído de duas plantas, para referência senoidal.

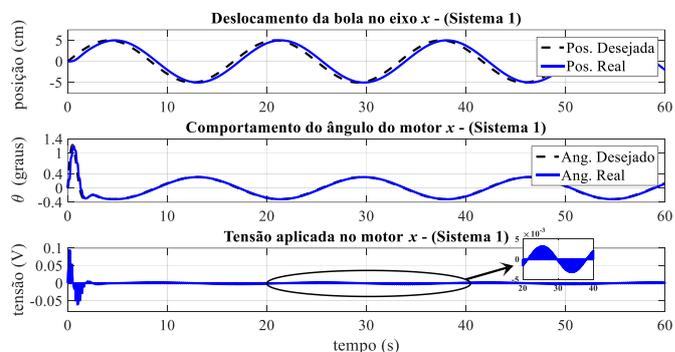


Fig. 11 Respostas e sinal de controle do Sistema 1 para referência senoidal.

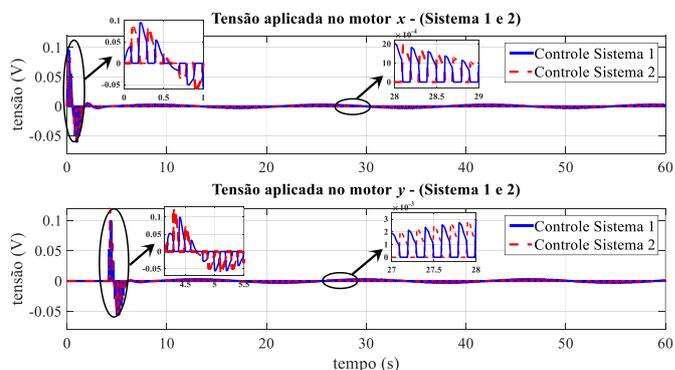


Fig. 12 Destaque dos sinais de controle em cada período de amostragem para referência senoidal.

5.2 Simulação Sem a Estratégia de Seleção Proposta

Para comprovar que a estratégia de controle do seletor apresenta bons resultados, foram realizadas simulações onde o controle trabalha alternadamente, em cada período de amostragem, sobre uma planta, ou seja, a decisão da seleção não é realizada através de uma análise de desempenho, mas sim através do tempo decorrido.

Para a simulação com as duas plantas sem o seletor proposto neste trabalho, foi considerado que um *Ball Balancer* será controlado por 400 ms e no próximo período o outro será controlado (nunca os dois serão controlados simultaneamente). Os resultados são apresentados nas Figuras 13 e 14.

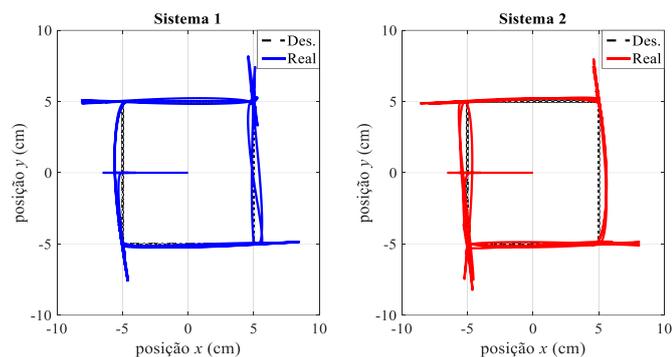


Fig. 13 Simulação do controle, sem o seletor proposto, para referência degrau.

Analisando as figuras 13 e 14, nota-se que apesar do sistema apresentar uma natureza cooperativa do sinal de controle, observa-se que o sistema apresenta um maior esforço de controle, e a resposta ao sinal degrau, não está similar quando se considera a estratégia de controle com seletor proposto neste trabalho (seletor através de índice de desempenho).

Embora não esteja apresentado, durante as simulações do sistema sem o seletor proposto, ao utilizar um período maior de que 450 ms o sistema ficou instável.

Com os resultados apresentados, nota-se a importância da estratégia de controle para dois sistemas *Ball Balancer*. Esse trabalho pode ser estendido para mais plantas.

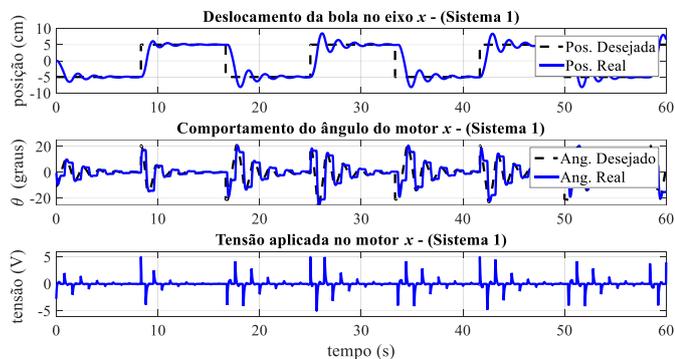


Fig. 14 Respostas e sinal de controle do Sistema 1 para referência senoidal, sem utilização do seletor proposto.

6. RESULTADOS PRÁTICOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos em implementação prática em bancada. As plantas e o sistema em operação podem ser observados no link <https://youtu.be/MuFVLBfAST0> e na Fig. 15 é mostrado o sistema.

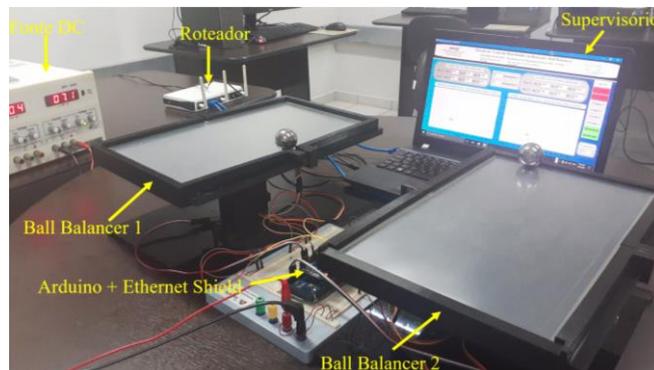


Fig. 15 Implementação em bancada.

Como apresentado na Fig. 15, foram utilizadas duas plantas, que foram controladas por um microcontrolador na plataforma de prototipagem Arduino. Foi utilizado um *shield* Ethernet, que comunica o controlador com a rede através do protocolo TCP/IP. Também, foi confeccionada uma aplicação em *software* supervisorio Elipse E3, para a realização da aquisição de dados.

A tela principal do supervisorio Elipse E3 pode ser observada na Fig. 16.

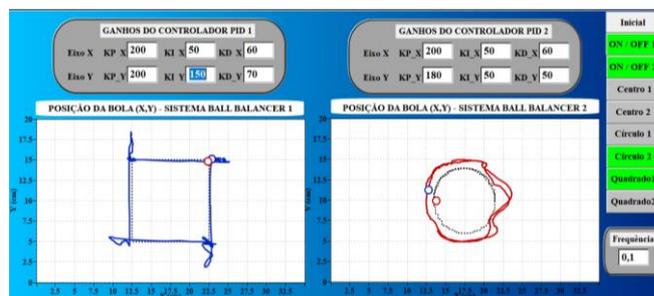


Fig. 16 Tela principal para interfacear o controle das plantas.

Foram realizadas várias aquisições práticas, contudo, para demonstrar a similaridade com os resultados obtidos em simulação (Fig. 7) é apresentado o rastreamento do sinal degrau das duas plantas na Fig. 17.

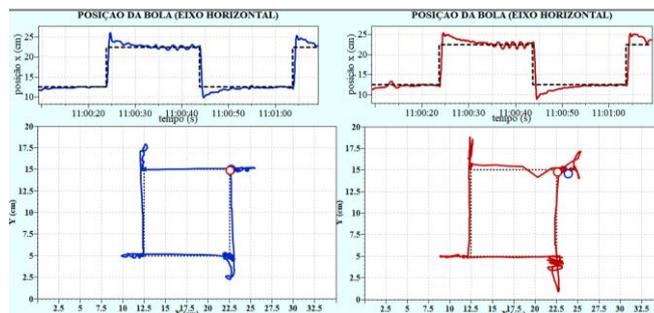


Fig. 17 Resultados práticos para o rastreamento do sinal degrau.

Em outra tela foi criada, também, uma interface que mostra a o sinal de controle, conforme pode ser observado na Fig. 18.

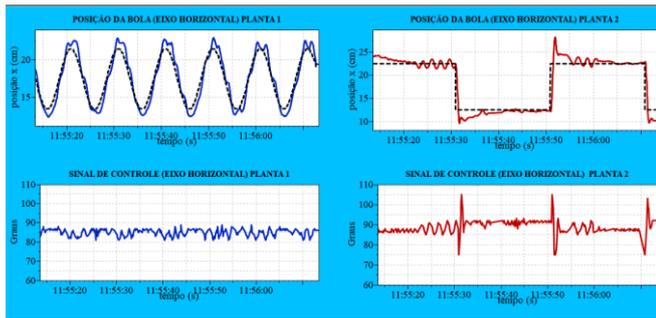


Fig. 18 Respostas para o Sistema 1 rastreando um sinal senoidal e o Sistema 2 rastreando um sinal degrau.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho uma estratégia de controle distribuído foi aplicada em nível de simulação e implementação em bancada para controlar sistemas *Ball Balancer*. Os resultados de simulação mostraram a eficiência da estratégia de controle distribuído adotado, quando comparado com uma estratégia que não leva em consideração o índice de desempenho.

Foi feito um estudo para a seleção da planta que irá atuar em cada instante de amostragem, utilizando um índice de desempenho, baseado na norma dos sinais de controle dos sistemas controlados. A estratégia de decisão para a escolha da planta que receberá o sinal de controle pareceu adequada e de fácil processamento, demonstrando que é factível ser implementada em um sistema microcontrolado. A validação de todas essas estratégias foi realizada através de implementação em bancada com 2 sistemas *Ball Balancer*.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Chen, Y., Wang, Z., Qian, W., and Alsaadi, F. E. (2018). Asynchronous observer-based H_∞ control for switched stochastic systems with mixed delays under quantization and packet dropouts. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 27 (2015), 225–238.
- Cheng, L., Wang, Y., Hou, Z., Tan, M., and Cao, Z. (2013). Sampled-data based average consensus of second-order integral multi-agent systems: Switching topologies and communication noises. *Automatica*, 49 (5), 1458–1464.
- Fadaei, A. and Salahshoor, K. (2008). Improving the control performance of networked control systems using a new fuzzy PID. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, CB*, 2066–2071.
- Gupta, R. and Chow, M. Y. (2010). Networked Control System Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (7), 2527–2535.
- Hespanha, J. P., Naghshtzbrizi, P., and Xu, Y. (2007). A survey of recent results in networked control systems. *Proceedings of the IEEE*, 95 (1), 138–172.
- Li, H. and Shi, Y. (2014). Network-based predictive control for constrained nonlinear systems with two-channel packet dropouts. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (3), 1574–1582.
- Qu, H., Yang, F., and Han, Q. (2018). Distributed H_∞ - Consensus Filtering for a Networked Time-Delay System with Switching Network Topology and Packet Dropouts. *Australian & New Zealand Control Conference, (ANZCC), Melbourne, VIC*, 334–339.
- Quanser (2008). *2D Ball Balancer Control using QUARC Instructor Manual*.
- Sousa, T. T., Geromel, J. C., and Deaecto, G. S. (2015). Switching control resource allocation in Networked Control Systems. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 54 (Cdc), 6862–6867.
- Souza, M. (2012). Controle de Sistemas Dinâmicos Através de Redes de Comunicação. *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC-UNICAMP), Campinas, SP*, 1–125.
- Zhang, X., Han, Q., Ge, X., Ding, D., Ding, L., Yue, D., and Peng, C. (2019). Networked Control Systems: A Survey of Trends and Techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7 (1), 1–17.