

## DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE DE SUPERVISÃO E CONTROLE PARA UM SISTEMA *BALL BALANCER*

Leonardo Caetano de Sousa Bassaga<sup>1</sup>, Diogo Ramalho de Oliveira<sup>1</sup>, Edson Italo Mainardi Junior<sup>1</sup>, Lucas Rangel de Oliveira<sup>1</sup>, Estelio da Silva Amorim<sup>1</sup>, Luciano de Souza da Costa e Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas-MS

leonardo.bassaga@estudante.ifms.edu.br, diogo.ramalho@ifms.edu.br

### Resumo

A utilização de equipamentos didáticos desempenha um papel fundamental no ensino de engenharia, pois proporciona uma experiência prática e tangível aos estudantes, complementando a teoria aprendida em sala de aula. A tecnologia de impressão 3D emerge como uma ferramenta valiosa para a criação de recursos educacionais inovadores. Nesse contexto, este projeto trata do desenvolvimento de um sistema de supervisão e controle para um sistema *ball balancer* com 6 graus de liberdade, construído utilizando impressão 3D. O *ball balancer* tem o objetivo de equilibrar uma esfera sobre uma placa. O algoritmo de controle foi implementado em um esp32 que se comunica com o sistema de supervisão e controle desenvolvido utilizando o Elipse Scada. A interface do sistema permite monitorar a posição da esfera, alterar a referência que guia a movimentação da esfera e ajustar o controlador PID.

**Palavras-chave:** Impressão 3D, elipse scada, esp32.

### Introdução

O controle automático de processos desempenha um papel fundamental no desenvolvimento sustentável do nosso planeta. Em um mundo cada vez mais conectado e dependente de sistemas de automação, a capacidade de monitorar e regular processos industriais, ambientais e tecnológicos se torna crucial. O controle automático não apenas otimiza a eficiência dos sistemas, reduzindo o desperdício de recursos, mas também contribui significativamente para a mitigação de impactos ambientais.

O ensino de controle e automação é essencial para preparar as futuras gerações de engenheiros e tecnólogos. No entanto, a complexidade desses conceitos muitas vezes representa um desafio para professores e estudantes. Uma abordagem inovadora para superar esse desafio envolve a utilização de sistemas construídos em impressora 3D como ferramentas educacionais. Esses sistemas permitem a criação de modelos físicos interativos que ilustram conceitos de controle e automação de forma tangível.

Muito utilizado para o ensino e pesquisa em controle e automação, o sistema *ball balancer* tem o princípio de funcionamento similar a um sistema bola-viga. Um sistema bola-viga, que possui apenas um grau de liberdade, tem

como objetivo equilibrar uma esfera em cima de uma viga. Já um sistema *ball balancer* possui dois graus de liberdade, dessa forma, tem como objetivo equilibrar uma esfera em cima de uma placa. Por se tratar de um sistema não linear e instável em malha aberta, diversas pesquisas científicas utilizam esse sistema para validar suas metodologias (ALVES et al., 2015; BUZETTI et al., 2014; CAMATA et al., 2013; CAMATA et al., 2014; LOUZANO et al., 2015; SANTOS et al., 2015; SOUZA et al., 2013; VIEIRA et al., 2014).

Os sistemas de supervisão e controle (SCADA) desempenham um papel fundamental nas indústrias modernas, no qual proporciona um ambiente de monitoramento e controle altamente eficiente e confiável. Devido à automação dos processos nas indústrias estes sistemas se tornaram essenciais para garantir o desempenho otimizado, a segurança operacional e a eficiência dos procedimentos industriais. Um sistema supervisorio é uma solução tecnológica sofisticada que possibilita a supervisão, aquisição e análise de dados em tempo real provenientes de uma ampla gama de equipamentos e processos industriais. Ele age como uma ponte de comunicação, conectando os sistemas que monitoram os processos complexos aos engenheiros e operadores encarregados de tomar decisões críticas, por meio de redes de comunicação avançadas. Essa capacidade de proporcionar informações em tempo real é essencial para permitir uma tomada de decisão rápida e precisa, contribuindo significativamente para o funcionamento suave e eficiente das operações industriais.

A empresa canadense Quanser é referência na produção de equipamentos para a área de controle e automação aplicados ao ensino e pesquisa [1-8]. No sistema *ball balancer* desenvolvido pela empresa, existe a possibilidade de comunicar o sistema com o *software MatLab* e *Simulink* para realizar a supervisão e controle do sistema. Entretanto, a aquisição desse tipo de equipamento muitas vezes é inviável em virtude do valor financeiro a ser investido. Dessa forma, esse trabalho tem o objetivo de desenvolver um sistema *ball balancer* fabricado em impressão 3D e com *hardware* de fácil acesso no mercado nacional. Além disso, objetiva-se desenvolver um sistema de supervisão e controle utilizando tecnologias encontradas em aplicações industriais, como é o caso do Elipse SCADA. O protótipo desenvolvido nesse trabalho será utilizado em atividades de pesquisa futuras do grupo e, em virtude do valor final do

produto, será possível desenvolver outras unidades para a utilização em sala de aula.

## Metodologia

O desenvolvimento do projeto foi dividido nas seguintes etapas:

- Construção do protótipo utilizando impressora 3D;
- Especificação do hardware a ser utilizado;
- Programação do controlador (esp32);
- Desenvolvimento da interface de supervisão e controle;

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa na internet em busca de um modelo 3D de um sistema ball balancer. O modelo escolhido foi de um sistema ball balancer com seis graus de liberdade, disponível de forma gratuita em: [www.thingiverse.com/thing:2038246](http://www.thingiverse.com/thing:2038246). O modelo 3D foi impresso utilizando filamento ABS da cor preta.

Para a montagem do restante do protótipo foram utilizados os seguintes componentes apresentados na Tabela 1, sendo que os valores apresentados são do ano de 2022 e os componentes foram encontrados em sites de empresas nacionais.

**Tabela 1.** Descrição dos componentes utilizados para a construção do protótipo.

Item	Descrição	Valor Unitário	Qtd	Valor Total
1	esp32	R\$ 59,90	1	R\$ 59,90
2	Tela <i>touchscreen</i>	R\$ 349,90	1	R\$ 349,90
3	Servomotor mg90s	R\$ 26,90	6	R\$ 161,40
4	Fonte de tensão contínua	R\$ 29,90	1	R\$ 29,90
Valor Total =				R\$ 601,10

**Fonte:** dos autores.

O valor total do protótipo não levou em consideração alguns insumos utilizados para a construção do protótipo, como o filamento de impressora 3D, mdf 3mm, placa perfurada para circuito impresso, etc, pois são insumos que foram utilizados em baixa quantidade e possuem um valor irrisório em comparação com o restante dos componentes.

Optou-se por escolher o esp32 ao invés do Arduino, em virtude do esp32 possuir maior capacidade de processamento. Além disso, o esp32 possui wi-fi e bluetooth embutidos, que serão utilizados em versões futuras desse protótipo.

A escolha da tela *touchscreen* levou em consideração a logística de utilizar produtos disponíveis no mercado nacional. Dessa forma, foi escolhida uma tela resistiva de

10,1 polegadas no formato 16:9 e com quatro vias para comunicação, da empresa playtix.

O servomotor mg90s foi escolhido em virtude das suas engrenagens de metal. Já a fonte de tensão foi especificada para fornecer energia para o esp32 e servomotores, sendo selecionada uma fonte bivolt com saída de 5V-3A.

Em seguida, foi realizada a montagem do hardware fundamental para a implementação do sistema de controle do ball balancer. Utilizando o esp32, definimos os pinos para a tela *touchscreen* e os servomotores, que desempenham a função de detectar a posição da esfera e movimentar a placa, respectivamente.

Para o desenvolvimento do sistema de supervisão e controle, utilizou-se *software* Elipse Scada. Para uma integração eficaz das variáveis do código do esp32 com as variáveis internas do Elipse Scada (*tags*), foi utilizado o *driver* Modbus e a biblioteca "Modbusino.h". Essa abordagem permitiu a alocação das variáveis em registradores específicos, e a partir disto endereçar as *tags* com sua respectiva variável. Para realizar a comunicação entre o esp32 e o supervisor, é necessário conectar o esp32 via cabo USB que é utilizado para a sua programação.

As telas do sistema de supervisão e controle foram projetadas para facilitar a utilização do *software* por estudantes das disciplinas de controle. Para isso, foram desenvolvidas seis telas, denominadas: "diagrama de blocos", "referência", "técnica de controle", "gráfico x-y", "gráficos eixo x" e "gráficos eixo y".

Na tela "diagrama de blocos" objetivou-se apresentar o esquema de controle em malha fechada utilizado para o controle do sistema.

A tela "referências" permite que o estudante escolha um tipo de referência para a esfera seguir, sendo elas: constante, degrau e rampa. A referência é fundamental para determinar a trajetória da esfera sobre a placa. Além disso, o estudante pode ajustar a amplitude da referência escolhida. Tanto a referência, quanto a amplitude, podem ser controlados individualmente para cada um dos dois eixos.

Na tela "técnica de controle", o estudante pode ajustar os parâmetros do controle PID, que incluem: o ganho proporcional ( $K_p$ ) responsável por ajustar a resposta do sistema em relação ao erro atual; o ganho integral ( $K_i$ ) usado para corrigir o erro acumulado ao longo do tempo; e o ganho derivativo ( $K_d$ ) que previne oscilações no sistema. Dessa forma o estudante consegue visualizar em tempo real a influência da variação de cada parâmetro na resposta dinâmica do sistema.

O estudante consegue visualizar a movimentação da esfera de uma forma ampliada, nos eixos x-y, x e y, nas telas "gráfico x-y", "gráficos eixo x" e "gráficos eixo y", respectivamente.

## Resultados e Discussão

Na Figura 1 é possível observar o protótipo completo, com os componentes da Tabela 1 já instalados. Na base do protótipo, para dar maior sustentação ao sistema e alocar o esp32 de forma fixa, foi construída uma base em mdf de 3mm. Já no topo do protótipo foi projetado e impresso na ABS branco um suporte para a placa *touchscreen* com proteções laterais, para evitar que a tela quebre caso o protótipo caia no chão, pois ao longo do desenvolvimento do projeto uma tela foi danificada.



**Figura 1.** Protótipo completo, com todos os componentes instalados. **Fonte:** dos autores.

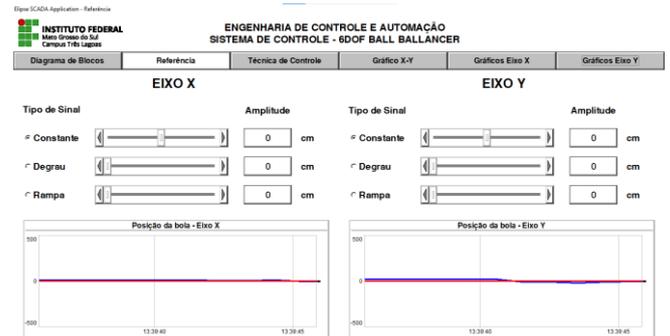
Como apresentado anteriormente, o sistema supervisor é dividido em seis telas. Exemplos das telas “diagrama de blocos”, “referência”, “técnica de controle”, “gráfico x-y”, “gráficos eixo x” e “gráficos eixo y” podem ser visualizadas nas Figura 2, 3, 6, 7, 8 e 11.

A Figura 2 apresenta a tela inicial do sistema de supervisão e controle. Note que no centro da tela é apresentado o diagrama de blocos do sistema em malha fechada. Na parte superior da tela é apresentada uma identificação da instituição (IFMS campus Três Lagoas) e do curso de Engenharia de Controle e Automação. Logo abaixo, existem 6 retângulos cinza com o nome de cada uma das telas. O usuário pode mudar de tela clicando com o mouse em cada um desses retângulos.

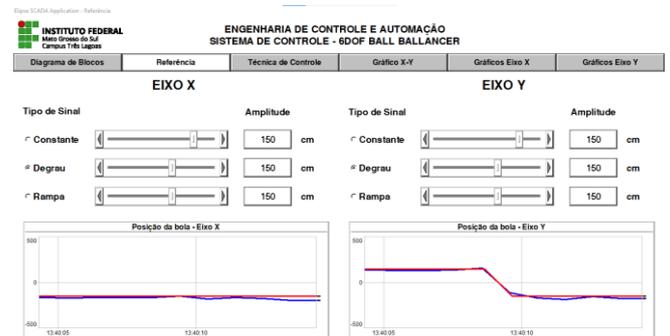


**Figura 2.** Tela “Diagrama de Blocos”. **Fonte:** dos autores.

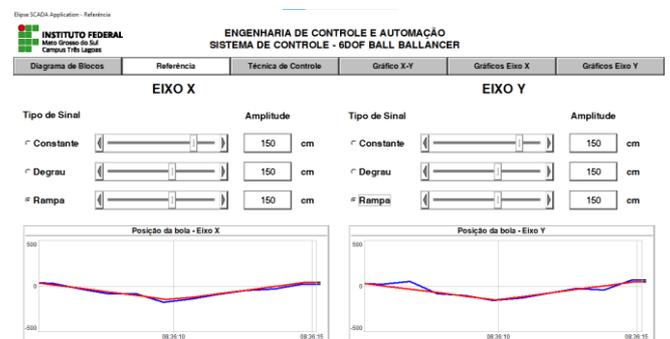
Na Figura 3, o usuário pode escolher para cada um dos eixos separadamente o tipo de referência que a esfera deve seguir, sendo elas: constante, degrau e rampa. Além disso, é possível ajustar a sua respectiva amplitude através do cursor ou inserindo o valor diretamente no local indicado. Na parte inferior da tela, existem dois gráficos para monitorar a posição da esfera em tempo real (linha azul) e a referência escolhida (linha vermelha). Nas telas “Gráfico Eixo X” e “Gráfico Eixo Y” são apresentados esses mesmos gráficos com um tamanho maior.



**Figura 3.** Tela “Referência” para o sinal do tipo constante. **Fonte:** dos autores.



**Figura 4.** Tela “Referência” para o sinal do tipo degrau. **Fonte:** dos autores.



**Figura 5.** Tela “Referência” para o sinal do tipo rampa. **Fonte:** dos autores.

Para ilustrar cada um dos tipos de sinal de referência, nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentados os resultados para referência constante, degrau e rampa, respectivamente.

Na Figura 6 é possível observar a tela “Técnica de Controle”. Nessa tela é possível ajustar o controle PID, através da alteração dos ganhos proporcional, integral e derivativo:  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , respectivamente. Novamente, na parte inferior da tela, existem dois gráficos para monitorar a posição da esfera em tempo real (linha azul) e a referência (linha vermelha).

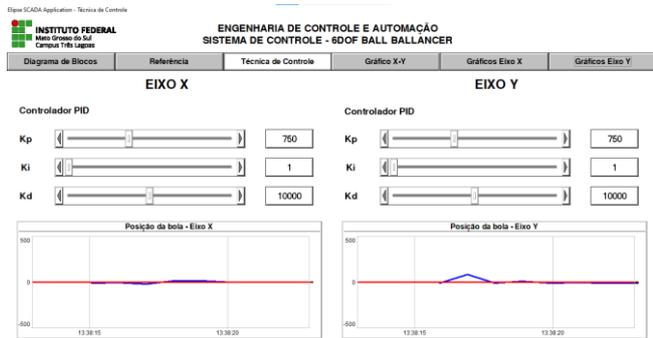


Figura 6. Tela “Técnica de Controle”. Fonte: dos autores.

Na Figura 7 é apresentada tela X-Y. Nessa tela é possível visualizar a posição da esfera ao longo de placa *touchscreen*. O resultado apresentado ilustra a movimentação da esfera para uma referência do tipo constante e igual a zero. Note que de fato a esfera fica posicionada próxima a origem.



Figura 7. Gráfico X-Y para a referência do tipo constante. Fonte: dos autores.

Nas Figuras 8, 9 e 10 é possível visualizar as telas do “Gráfico Eixo X” para as referências do tipo constante, degrau e rampa, respectivamente. Assim como nas Figura 11, 12 e 13 é possível visualizar as telas do “Gráfico Eixo Y” para as referências do tipo constante, degrau e rampa, respectivamente.

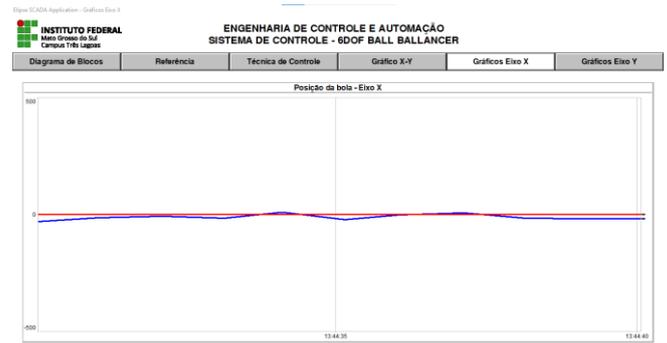


Figura 8. Gráficos Eixo X Constante. Fonte: dos autores.

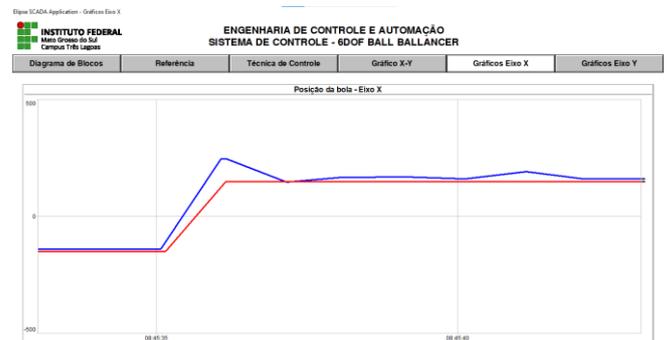


Figura 9. Gráficos Eixo X Degrau. Fonte: dos autores.

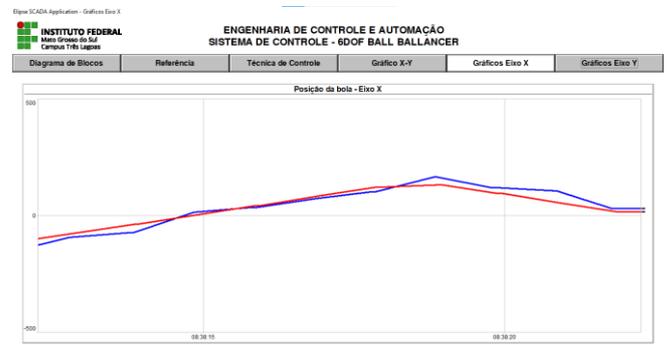


Figura 10. Gráficos Eixo X Rampa. Fonte: dos autores.

Avaliando os resultados das Figura 8, 9 e 10 fica nítido que a esfera segue a referência escolhida. Em virtude do intervalo de tempo escolhido para apresentar os gráficos, a referência do tipo degrau parece ter uma pequena inclinação. Além disso, ainda é necessário converter para centímetros os valores das amplitudes da posição e referência da esfera. Nas próximas versões do sistema de supervisão e controle, essas adequações serão realizadas.

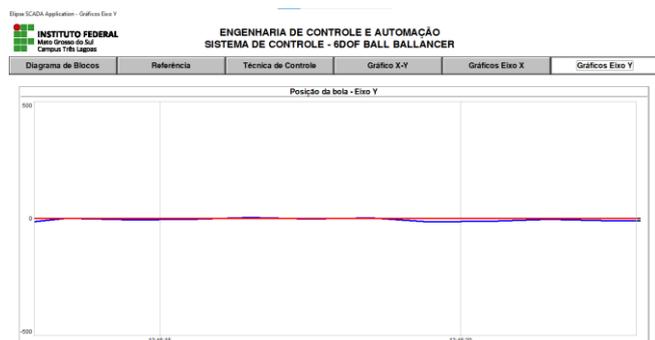


Figura 11. Gráficos Eixo Y Constante. Fonte: dos autores.

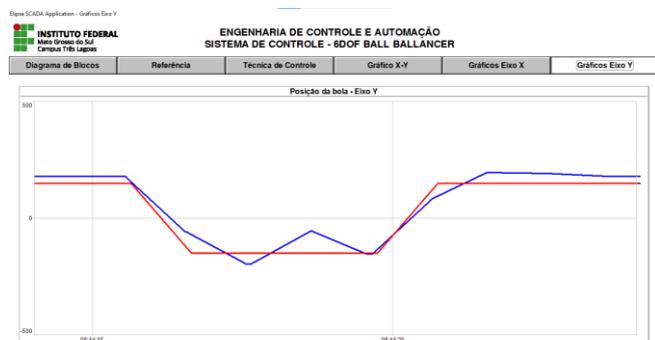


Figura 12. Gráficos Eixo Y Degrau. Fonte: dos autores.

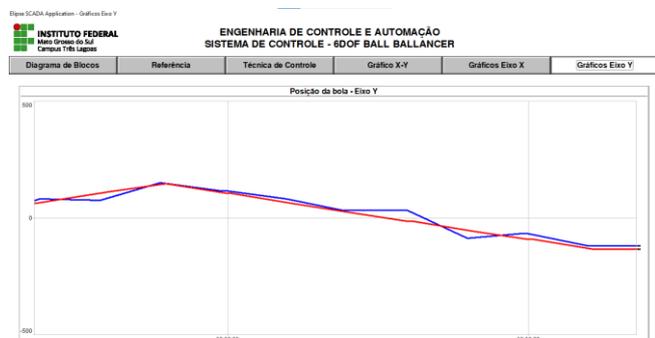


Figura 13. Gráficos Eixo Y Rampa. Fonte: dos autores.

## Considerações Finais

Este projeto contribuiu para aplicações educacionais e de pesquisa em engenharia através da integração de tecnologia de impressão 3D, sistemas de controle utilizando *hardware* acessíveis nacionalmente, e sistemas de supervisão e controle (SCADA). A utilização de equipamentos didáticos desempenha um papel importante no ensino de engenharia, pois proporciona aos estudantes uma experiência prática e tangível que complementa a teoria aprendida em sala de aula.

A integração do Elipse SCADA e do *hardware* esp32 no sistema de supervisão e controle oferece uma plataforma robusta e acessível para monitorar e controlar o sistema *ball*

*balancer*. Isso não apenas enriquece a experiência de aprendizado dos estudantes, permitindo que eles visualizem e ajustem as variáveis de controle em tempo real, mas também facilita a condução de experimentos práticos que ilustram conceitos de controle, como o uso do controlador PID.

Além disso, o desenvolvimento de um sistema *ball balancer* acessível e fabricado em impressão 3D é um passo importante para tornar a educação em controle e automação mais acessível a um público mais amplo. Isso reduz as barreiras financeiras para aquisição de equipamentos educacionais e permite que mais instituições de ensino e estudantes explorem os princípios do controle automático de processos.

Por fim, este projeto destaca a importância dos sistemas SCADA nas indústrias modernas, destacando sua capacidade de fornecer monitoramento em tempo real e controle eficiente. O uso do Elipse SCADA como parte integrante deste projeto demonstra como as tecnologias industriais podem ser adaptadas para fins educacionais e de pesquisa, ampliando ainda mais seu valor.

Em resumo, a fusão de impressão 3D, controle automático, SCADA e educação representa um avanço promissor no campo do ensino de controle e automação. Espera-se que esse trabalho sirva como um trampolim para pesquisas futuras e para aprimorar a qualidade da educação em engenharia, capacitando estudantes a enfrentar os desafios complexos do controle automático de processos e da automação industrial.

## Agradecimentos

Ao IFMS e CNPq pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto (Edital de Iniciação Científica e Tecnológica 029/2022 – ID1539 – Plano de Trabalho 2).

## Referências

- ALVES, U. N. L. T. ; OLIVEIRA, D. R. ; CARNIATO, ALEXANDRE ATAIDE ; TEIXEIRA, M. C. M. . **Controle de Sistema Ball Balancer utilizando LMIs no Projeto do Controlador**. In: III Mostra Científica, Cultural e Tecnológica - IFSP - Campus Presidente Epitácio, 2015, Presidente Epitácio. III Mostra Científica, Cultural e Tecnológica - IFSP - Campus Presidente Epitácio, 2015. v. 1. p. 53-54.
- BUZETTI, A. S. ; TEIXEIRA, M. C. M. ; OLIVEIRA, D. R. ; VIEIRA, A. R. . **Controle de um Ball-Balancer utilizando modelos fuzzy Takagi-Sugeno com planta não linear**. In: XXVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2014, Ilha Solteira. XXVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2014.
- CAMATA, R. P. ; ASSUNCAO, E. ; SILVA, E. R. P. ; OLIVEIRA, D. R. ; ALVES, U. N. L. T. . **Influência de Falhas no Desempenho do Sistema Ball Balancer**. In:

XXV Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2013, Ilha Solteira. CIC, 2013.

CAMATA, R. P. ; ASSUNCAO, E. ; SILVA, E. R. P. ; BUZACHERO, L. F. S. ; ALVES, U. N. L. T. ; OLIVEIRA, D. R. . **Implementação de Controlador Robusto Para o Sistema Ball Balancer Sujeito a Falhas Estruturais.** In: XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte. XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014.

LOUZANO, A. R. ; TEIXEIRA, M. C. M. ; SANTOS, G. F. ; OLIVEIRA, D. R. . **Projeto e implementação de um controlador para o sistema Ball Balancer utilizando o método do lugar das raízes.** In: XXVII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2015, Ilha Solteira. XXVII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2015.

SANTOS, G. F. ; TEIXEIRA, M. C. M. ; LOUZANO, A. R. ; OLIVEIRA, D. R. . **Um método simples para controlar um sistema Ball Balancer.** In: XXVII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2015, Ilha Solteira. XXVII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2015.

SOUZA, W. A. ; TEIXEIRA, M. C. M. ; OLIVEIRA, D. R. ; VIEIRA, A. R. ; ASSUNCAO, E. ; RIBEIRO, J.M. S. ; SILVA, E. R. P. . **Projeto e Implementação de um Controlador Robusto Chaveado para um Sistema 2D Ball Balancer.** In: XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2013, Fortaleza. SBAI, 2013.

VIEIRA, A. R. ; TEIXEIRA, M. C. M. ; ASSUNCAO, E. ; OLIVEIRA, D. R. ; BUZETTI, A. S. . **Projeto de Controladores via LMIs em uma Mesa Estabilizadora 2DOF Ball Balancer utilizando os solvers Sedumi e LMILab do software Matlab.** In: XXVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2014, Ilha Solteira. XXVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2014.