

CONSTRUÇÃO E PROJETO DE CONTROLE PARA UM SISTEMA *BALL BALANCER* COM SEIS GRAUS DE LIBERDADE

Felipe Prado Araujo¹, Diogo Ramalho de Oliveira¹, Edson Italo Mainardi Junior¹, Lucas Rangel de Oliveira¹, Estelio da Silva Amorim¹, Luciano de Souza da Costa e Silva¹

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

felipeprado020020@gmail.com, diogo.ramalho@ifms.edu.br

Resumo

A incorporação de equipamentos didáticos desempenha um papel fundamental no ensino de engenharia, enriquecendo a formação dos estudantes com uma experiência prática e tangível que complementa o conhecimento teórico adquirido em sala de aula. Nesse contexto, a tecnologia de impressão 3D emerge como uma ferramenta de grande valor na criação de recursos educacionais inovadores, permitindo a concepção e produção de modelos e protótipos personalizados. Um exemplo concreto desse avanço educacional é ilustrado por meio deste projeto, que se concentra na construção e no projeto de controle de um sistema *ball balancer* com seis graus de liberdade. O protótipo tem como objetivo equilibrar uma esfera em uma placa e para isso utiliza técnicas de controle clássico, como o controle PID. Esse exemplo ilustra como a integração de tecnologias educacionais avançadas, como a impressão 3D, pode enriquecer o aprendizado prático em engenharia.

Palavras-chave: Controle PID, Impressora 3D, Tela *touchscreen*.

Introdução

A utilização de módulos didáticos para o ensino de controle é uma abordagem eficiente para ilustrar de forma concreta os princípios teóricos e práticos subjacentes aos sistemas de controle. Esses módulos oferecem aos alunos a oportunidade de experimentar e compreender os conceitos complexos de controle de maneira tangível, promovendo uma aprendizagem mais profunda e significativa.

Além de serem utilizados em sala de aula, esses módulos podem ser empregados em trabalhos científicos para validar novas metodologias de controle e automação. A Figura 1 ilustra o sistema *2DOF ball balancer* fabricado pela Quanser (QUANSER, 2008). Esse equipamento foi utilizado em diversos trabalhos científicos (SOUZA et al., 2013; CAMATA et al., 2013; BUZETTI et al., 2014; CAMATA et al., 2014; VIEIRA et al., 2014; ALVES et al., 2015; LOUZANO et al., 2015; SANTOS et al., 2015).

O sistema *2DOF ball balancer* da Figura 1 é composto por dois conjuntos de motores, responsáveis pela movimentação do sistema no eixo x e y. No topo do sistema existe uma câmera, responsável por medir a posição de uma esfera, que se move livremente sobre uma placa. De acordo com a

posição de esfera e a referência que ela deve seguir, os motores movimentam a placa que por sua vez movimentam a esfera. Diferentes técnicas de controle podem ser empregadas para realizar o controle desse sistema, como por exemplo o controle PID. O sistema *2DOF ball balancer* é bastante estudado pois se trata de um sistema não linear e instável em malha aberta.



Figura 1. *2DOF Ball Balancer* fabricado pela Quanser.
Fonte: Adaptado de Quanser (2008).

A tecnologia de impressão 3D e o uso de hardware de baixo custo desempenham um papel fundamental na construção de módulos didáticos acessíveis e eficazes para o ensino de controle. A impressão 3D permite a fabricação de componentes personalizados de maneira eficiente e econômica, tornando possível a criação de modelos realistas e funcionais. O uso de hardware de baixo custo amplia a acessibilidade desses módulos, permitindo que instituições educacionais e estudantes tenham acesso a recursos de alta qualidade sem comprometer seus orçamentos. Essa combinação de tecnologias abre portas para a inovação no ensino de controle, capacitando a próxima geração de engenheiros e tecnólogos.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe a construção e o projeto de controle para um sistema *ball balancer*. O sistema escolhido possui o modelo 3D disponível para download de forma gratuita na internet: www.thingiverse.com/thing:2038246. Esse sistema possui seis graus de liberdade, pois é composto por seis conjuntos de atuadores com servomotores e será denominado: *6DOF ball balancer*. Para a aquisição da posição da esfera é utilizada uma tela resistiva sensível ao toque acoplada à placa impressa do projeto. Todo o processamento dos dados

é realizado por um Arduino UNO. A técnica de controle utilizada para equilibrar a esfera é o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

Metodologia

Como observado na Figura 1, o sistema *2DOF ball balancer* possui dois conjuntos de motores/engrenagens, os quais ficam responsáveis pela movimentação da placa no eixo x e y . A posição da esfera é obtida através de uma câmera posicionada no topo do equipamento fazendo a captação dos sinais e com isso fazendo o controle da placa.

A seguir é apresentado o esquema de controle do *2DOF ball balancer* fabricado pela Quanser (2008), composto por dois dispositivos *rotary servo base* (SRV02) e a uma mesa simétrica. Assume-se que a dinâmica de cada eixo é igual, portanto, o sistema é modelado como se fosse dois sistemas de "bola-viga" desacoplados. Na Figura 2, é possível observar o diagrama de corpo livre da esfera e da viga que seria a representação da placa.

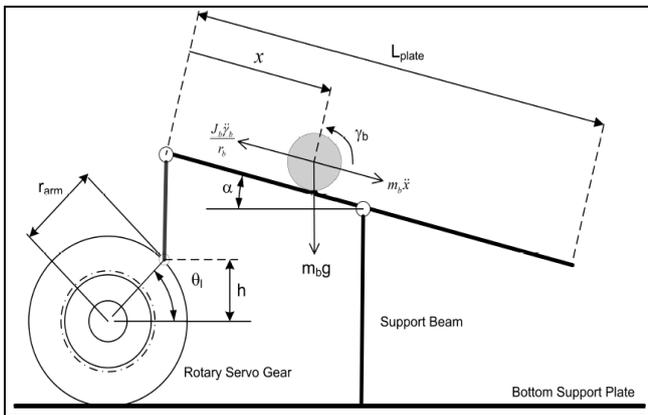


Figura 2. Diagrama de corpo livre do eixo x do sistema *2DOF ball balancer*. Fonte: Adaptado de Quanser (2008).

Por serem considerados dois eixos desacoplados, o esquema de controle é igual para cada eixo e pode ser representado de forma genérica, assim como apresentado na Figura 3. Esse sistema está em malha aberta e representa que uma tensão aplicada ao servomotor é responsável por alterar a inclinação da placa, que por sua vez altera a posição da esfera.

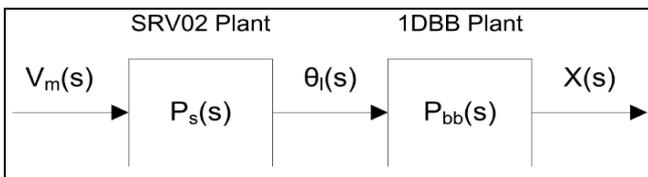


Figura 3. Diagrama de blocos de malha aberta de um eixo do *2DOF ball balancer*. Fonte: Adaptado de QUANSER (2008).

Por se tratar de um sistema instável em malha aberta, ou seja, não é possível equilibrar a esfera sobre a placa sem realizar uma realimentação no sistema, é implementado o seguinte esquema de controle em malha fechada apresentado na Figura 4.

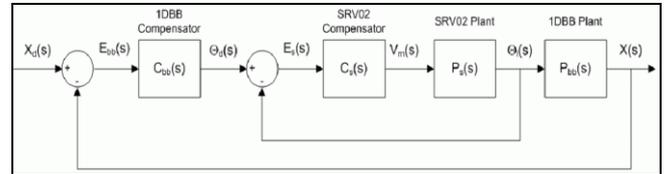


Figura 4. Controle em cascata para o controle de um eixo do *2D ball balancer*. Fonte: Adaptado de Quanser (2008).

Resultados e Discussão

O protótipo do sistema *6DOF ball balancer* foi fabricado em PLA utilizando uma impressora 3D. A localização da esfera é medida através da tela resistiva *touch screen* de 10,4" com 4 vias, do fabricante Playtix®. O controle implementado em um Arduino UNO tem como objetivo posicionar a esfera em um ponto determinado como referência ou rastrear uma rota determinada pelo usuário. A movimentação da placa se dá através de seis atuadores que transformam o movimento angular do servomotor em movimento linear.

Na Figura 5, é apresentada uma foto do sistema *ball balancer* com seis graus de liberdade (*6DOF ball balancer*) implementado no Laboratório de Pesquisa do IFMS.

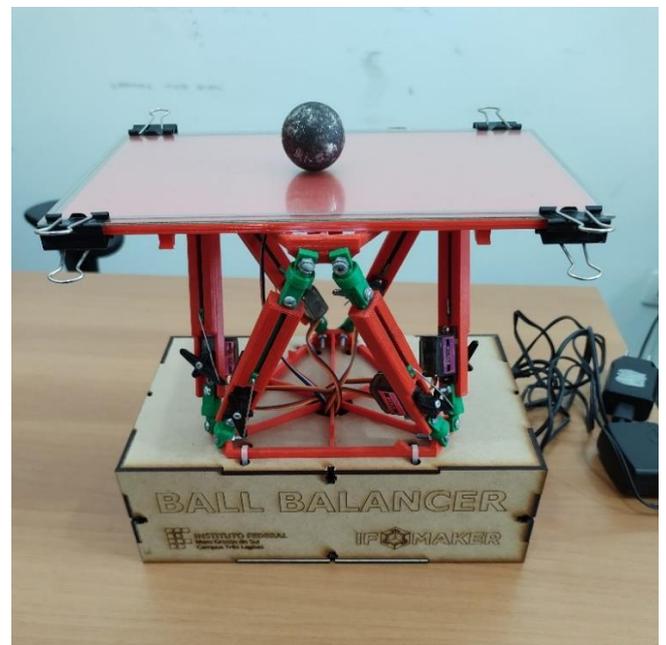


Figura 5. Sistema *6DOF ball balancer* construído no IFMS. Fonte: Próprio autor (2022).

Com todas as peças fabricadas na impressora 3D, o próximo passo foi fazer a montagem do módulo *6DOF ball balancer*.

1º Passo

Neste passo foi feita a montagem do sistema que iria compor o atuador, juntamente já com a montagem dos servomotores. Na parte de junção foi utilizada uma cola instantânea. Na Figura 6 é apresentada a foto de um atuador montado. Ao todo foram montados seis atuadores. Para conectar o servo motor ao bastão verde, foram utilizados clips de papel.

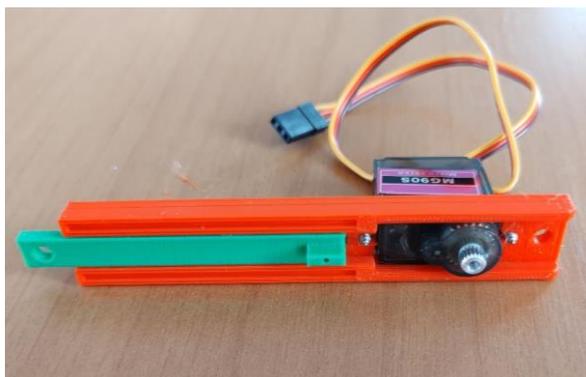


Figura 6. Atuador montado do sistema *6DOF ball balancer*.
Fonte: Próprio autor (2022).

2º Passo

O próximo passo foi fazer a montagem dos seis atuadores na base do protótipo, onde a fixação dos componentes foi feita com porcas e parafusos, para uma fixação correta. Na Figura 7, é apresentada a foto dos componentes fixados na base do módulo.

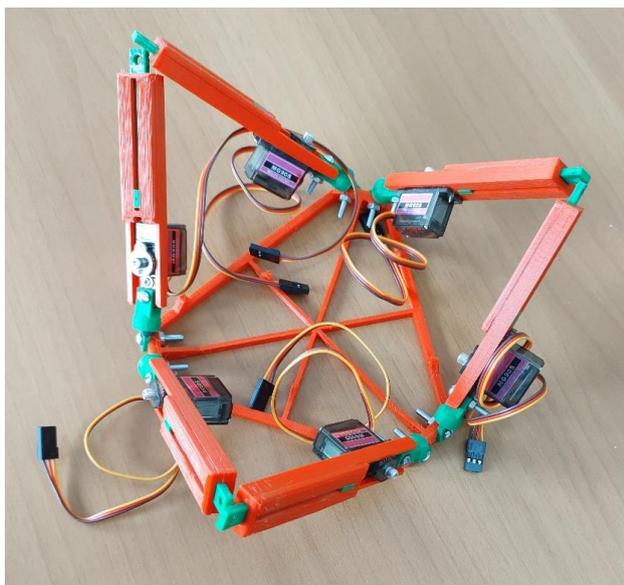


Figura 7. Atuadores fixados juntamente a base do sistema.
Fonte: Próprio autor (2022).

3º Passo

No terceiro passo a parte superior foi colada juntamente a plataforma superior onde futuramente iria se fazer a fixação da placa resistiva. Juntamente com essa parte superior, foram fixados os atuadores formando assim o sistema quase que completo. As juntas que foram acopladas nos atuadores com ajuda de um soprador térmico para se ter um encaixe perfeito. Na Figura 8, é apresentada uma foto do sistema *6DOF ball balancer* com sua estrutura montada.



Figura 8. Estrutura do *6DOF ball balancer* montada.
Fonte: Próprio autor (2022).

4º Passo

Após toda a estrutura fabricada na impressora 3D estar montada, foi preciso construir uma caixa de mdf (ver Figura 9), utilizando uma cortadora a laser. Essa caixa tem como objetivo dar maior sustentação ao protótipo, assim como alocar os componentes elétricos de forma organizada, como por exemplo o Arduino UNO.



Figura 9. Sistema *6DOF ball balancer* construído no IFMS.
Fonte: Próprio autor (2022).

Como apresentado na Figura 10, a tela *touch screen* resistiva foi instalada junto a estrutura do *6DOF ball balancer*, fazendo assim as medições dos pontos onde a esfera está posicionada e enviando a informação ao Arduino UNO.

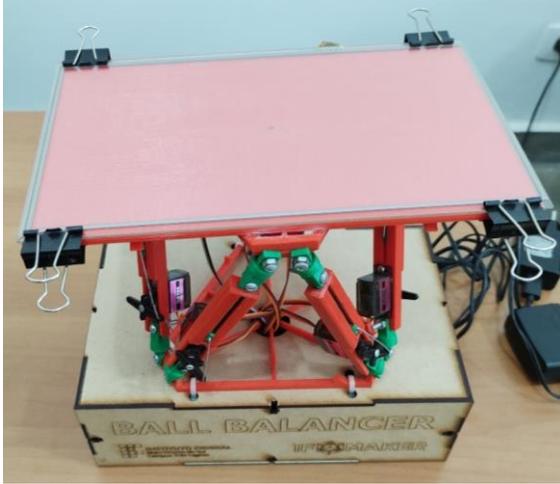


Figura 10. Sistema *6DOF ball balancer*. Fonte: Próprio autor (2022).

5º Passo

O código escrito para o controle do sistema foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE. Como apresentado na Figura 11, de início declara-se as bibliotecas de servomotor e logo depois são declarados os pinos do *touch screen*.

```
#include <Servo.h>
#define x_gnd A1
#define y_gnd A2
#define x_5v A3
#define y_5v A4
```

Figura 11. Código do sistema *6DOF ball balancer*. Fonte: Próprio autor (2023).

Já na Figura 12 tem-se a declaração dos pinos dos servos e depois o objeto para controlar o servomotor dos eixos X e Y.

```
#define servo1pin 3
#define servo2pin 5
#define servo3pin 6
#define servo4pin 9
#define servo5pin 10
#define servo6pin 11
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
Servo servo6;
```

Figura 12. Código do sistema *6DOF ball balancer*. Fonte: Próprio autor (2023).

Em seguida como visto na Figura 13, são declarados o ângulo inicial da plataforma com a esfera, onde iniciamos com ela plana dentro do sistema.

```
double theta1=30;
double theta2=30;
double theta3=30;
double theta4=30;
double theta5=30;
double theta6=30;
double Output_SM_1, Output_SM_2, Output_SM_3,
Output_SM_4, Output_SM_5, Output_SM_6; //ângulo
motor
```

Figura 13. Código do sistema *6DOF ball balancer*. Fonte: Próprio autor (2023).

Na Figura 14 observa-se a declaração das variáveis relacionadas à posição da esfera, a referência, valor do erro, variação do erro e integral do erro. Depois foram declaradas as variáveis do PID (ganho proporcional, integral e derivativo): Kp, Ki e Kd. Além disso, também foi declarado os tipos de referência da esfera, podendo ser um ponto fixo, um quadrado ou uma circunferência sobre a placa.

```
double pos_x_bola;
double pos_y_bola;

double ref_x;
double ref_y;
double erro_x;
double erro_y;
double i_erro_x;
double i_erro_y;
double d_erro_x;
double d_erro_y;
double da_erro_x;
double da_erro_y;
double kp=0.75;//0.15;
double ki=0.0010;
double kd=10;
int tipo_referencia;
int cont_ref_quad;
int cont_ref_sen;
void setup() {
  Serial.begin(230400);
```

Figura 14. Código do sistema *6DOF ball balancer*. Fonte: Próprio autor (2023).

Na Figura 15, é apresentada as variáveis relacionadas ao posicionamento dos seis servomotores.

```
servo1.attach(servo1pin); //Servo1 ao pino digital 2
Output_SM_1 = theta1; //Posicionando o servo1(eixo
Horizontal)
servo1.write(Output_SM_1); //no ângulo inicial(plano)

servo2.attach(servo2pin); //Servo1 ao pino digital 3
Output_SM_2 = theta2; //Posicionando o servo2(eixo
Horizontal)
servo2.write(Output_SM_2); //no ângulo inicial(plano)
```

```

servo3.attach(servo3pin); //Servo1 ao pino digital 4
Output_SM_3 = theta3; //Posicionando o servo3(eixo
Horizontal)
servo3.write(Output_SM_3); //no ângulo inicial(plano)

servo4.attach(servo4pin); //Servo1 ao pino digital 5
Output_SM_4 = theta4; //Posicionando o servo1(eixo
Horizontal)
servo4.write(Output_SM_4); //no ângulo inicial(plano)

servo5.attach(servo5pin); //Servo1 ao pino digital 6
Output_SM_5 = theta5; //Posicionando o servo5(eixo
Horizontal)
servo5.write(Output_SM_5); //no ângulo inicial(plano)

servo6.attach(servo6pin); //Servo1 ao pino digital 7
Output_SM_6 = theta6; //Posicionando o servo6(eixo
Horizontal)
servo6.write(Output_SM_6); //no ângulo inicial(plano)

```

Figura 15. Código do sistema 6DOF ball balancer. Fonte: Próprio autor (2023).

Na Figura 16 é possível observar que o referencial inicial de x e y é igual a 512, que está relacionado ao ponto central da tela resistiva. Já no final do código, é possível observar o código responsável por identificar o posicionamento da esfera. Por se tratar de uma tela com quatro vias, com duas vias do eixo x e duas vias do eixo y, tem-se que enviar GND-5V para duas vias de um eixo para poder ler a posição do outro eixo. Feita essa rotina de forma sequencial, é possível se obter a posição de x e y.

```

ref_x=512;
ref_y=512;
erro_x=0;
erro_y=0;
i_erro_x=0;
i_erro_y=0;
d_erro_x=0;
d_erro_y=0;
da_erro_x=0;
da_erro_y=0;

tipo_referencia=1;
cont_ref_quad=1;
cont_ref_sen=4001;
}
void loop() {

//Leitura posição-x
pinMode(x_gnd,INPUT); //Xb - gnd
pinMode(x_5v,INPUT); //Xa - 5V
pinMode(y_gnd,OUTPUT); //Yb - gnd
pinMode(y_5v,OUTPUT); //Ya - 5V
digitalWrite(y_gnd,LOW); //yb
digitalWrite(y_5v,HIGH); //aplicando 5volts no eixo Y
delay(6);
pos_x_bola=analogRead(x_5v); //lê coordenada Y
Serial.print("X: ");

```

```

Serial.println(pos_x_bola);
Serial.print(",");

//Leitura posição-y
pinMode(x_gnd,OUTPUT); //Xb - gnd (prepara sinais da tela p/
pinMode(x_5v,OUTPUT); //Xa - 5V leitura da coordenada X)
pinMode(y_gnd,INPUT); //Yb - gnd
pinMode(y_5v,INPUT); //Ya - 5V
digitalWrite(x_gnd,LOW); //xb
digitalWrite(x_5v,HIGH); //xa //aplicando 5volts no eixo X
delay(6);
pos_y_bola=analogRead(y_5v); //lê coordenada X
Serial.print("Y: ");
Serial.println(pos_y_bola);

```

Figura 16. Código do sistema 6DOF ball balancer. Fonte: Próprio autor (2023).

Na Figura 17, é apresentado o código utilizado para cada tipo de referência, responsável pela alteração da movimentação da esfera.

```

// Referência Central
if (pos_y_bola>=1000){

}else{

if(tipo_referencia==1){
ref_x=512;
ref_y=512;
}

// Referência Quadrada
if(tipo_referencia==2){
Serial.println("Quad");
if(cont_ref_quad<=4000){
ref_x=412;
ref_y=412;
Serial.println("ponto1");
}
if(cont_ref_quad<=3000){
ref_x=612;
ref_y=412;
Serial.println("ponto2");
}
if(cont_ref_quad<=2000){
ref_x=612;
ref_y=612;
Serial.println("ponto3");
}
if(cont_ref_quad<=1000){
ref_x=412;
ref_y=612;
Serial.println("ponto4");
}
if(cont_ref_quad>4000){
cont_ref_quad=1;
}
}
cont_ref_quad=cont_ref_quad+1;

//Referência Senoidal

```

```

if(tipo_referencia==3){
  Serial.println("SEN");
  if((cont_ref_sen<=1200) && (cont_ref_sen>900)){
    ref_x=ref_x+1;
    ref_y=ref_y-1;
    Serial.println("quadrante3");
  }
  if((cont_ref_sen<=900)&&(cont_ref_sen>600)){
    ref_x=ref_x-1;
    ref_y=ref_y-1;
    Serial.println("quadrante2");
  }
  if((cont_ref_sen<=600)&&(cont_ref_sen>300)){
    ref_x=ref_x-1;
    ref_y=ref_y+1;
    Serial.println("quadrante1");
  }
  if(cont_ref_sen<=300){
    ref_x=ref_x+1;
    ref_y=ref_y+1;
    Serial.println("quadrante4");
  }
  if(cont_ref_sen>1200){
    cont_ref_sen=1;
    ref_x=512;
    ref_y=212;
  }
}
cont_ref_sen=cont_ref_sen+1;
Serial.println(cont_ref_sen);

```

Figura 17 – Código do sistema 6DOF ball balancer. Fonte: Próprio autor (2023).

Na Figura 18 é apresentado o código responsável por medir o valor do erro, da integral do erro e da variação do erro. Com esses valores, em seguida é calculado o sinal de controle para cada eixo, usando o controle PID. O valor do sinal de controle é enviado para cada servomotor.

```

//Sinal de Erro
erro_x=ref_x-pos_x_bola;
erro_y=ref_y-pos_y_bola;

//Integral
i_erro_x=i_erro_x+erro_x;
i_erro_y=i_erro_y+erro_y;

//Derivada
d_erro_x=erro_x-da_erro_x;
d_erro_y=erro_y-da_erro_y;

da_erro_x=erro_x;
da_erro_y=erro_y;

//servomotor
servo3.write(map((kp*erro_x+kd*d_erro_x+ki*i_erro_x),-
512,512,0,90));
servo4.write(map((kp*erro_x+kd*d_erro_x+ki*i_erro_x),-
512,512,0,90));

```

```

servo1.write(map((kp*erro_x+kd*d_erro_x+ki*i_erro_x),-
512,512,90,0));
servo6.write(map((kp*erro_x+kd*d_erro_x+ki*i_erro_x),-
512,512,90,0));
servo2.write(map((kp*erro_y+kd*d_erro_y+ki*i_erro_y),-
512,512,0,90));
servo5.write(map((kp*erro_y+kd*d_erro_y+ki*i_erro_y),-
512,512,90,0));
}
}

```

Figura 18. Código do sistema 6DOF ball balancer. Fonte: Próprio autor (2023).

Considerações Finais

As considerações finais deste projeto destacam a viabilidade e o impacto positivo da utilização de tecnologia de impressão 3D e hardware acessível na construção de um sistema *ball balancer* com seis graus de liberdade para fins educacionais. A implementação do sistema de controle, incluindo o algoritmo PID, enriqueceu a compreensão prática dos conceitos teóricos de controle automático. Além disso, a relação com o sistema bola-viga ressaltou sua aplicabilidade em pesquisas mais amplas. Em resumo, este projeto demonstrou a eficácia de abordagens acessíveis e inovadoras no ensino e pesquisa em controle e automação, capacitando estudantes e promovendo o avanço tecnológico. Para trabalhos futuros, pretende-se: aplicar outras metodologias para o cálculo do controle PID, como por exemplo: sintonia via método de Ziegler-Nichols e algoritmos evolutivos; implementar outras técnicas de controle, como realimentação do vetor de estado ou realimentação da saída; projetar observadores de estado para estimar a posição angular da placa.

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 1).

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.

QUANSER. **2D Ball Balancer Control using QUARC – Instructor Manual**. Canadá: 2008, 87 p.

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.