



Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

Experimental de Sistemas de Controle Realimentado

Controlador PI Digital de um Aeropêndulo

Professora: Gabriela Vieira Lima

| | |
|--------------------------|-------------|
| Ana Carolina Coelho Robl | 12011EAU021 |
| Matheus Menezes Pedrosa | 11911EAU020 |
| Otávio Sousa Siqueira | 11911EEL010 |
| Rafael Dias Pereira | 11911EAU003 |

17/08/2022

Sumário

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | Objetivo | 1 |
| 2 | Montagem | 2 |
| 3 | Controle | 6 |
| 3.1 | Função de Transferência | 6 |
| 3.2 | Processo de Amostragem | 6 |
| 3.3 | Compensador PI | 8 |
| 4 | Resultados | 9 |
| 5 | Conclusão | 10 |

1 | Objetivo

O presente relatório visa apresentar a aplicação prática de um sistema de controle realimentado discreto. Em questão foi escolhido a regulação de posição de um aeropêndulo, no qual, sumariamente, consiste em uma haste suspensa com uma extremidade acoplada a um motor *brushed* de ímãs permanentes com hélice, o qual deve aumentar ou reduzir sua rotação de maneira autônoma, a fim de manter-se na posição pré-estabelecida mesmo sofrendo perturbações externas.

2 | Montagem

Para a estrutura, em madeira, foi utilizado uma base retangular com uma haste no centro. Nesta haste é anexado um potenciômetro, que atuará como um sensor de realimentação, sobre o qual há outra haste para acoplamento do motor bem como um gancho que será utilizado na anexação de pesos gerando perturbações. O mesmo pode ser visto a seguir:



Figura 2.1 – Estrutura do Aeropêndulo.

Para que a haste vertical possa ser colocada em uma determinada posição desejada, é anexada um motor *brushed* de corrente contínua de ímãs permanentes que é compacto, leve e possui alta rotação, podendo chegar a vinte e dois mil rotações por minuto.

Assim tem-se o seguinte arranjo:

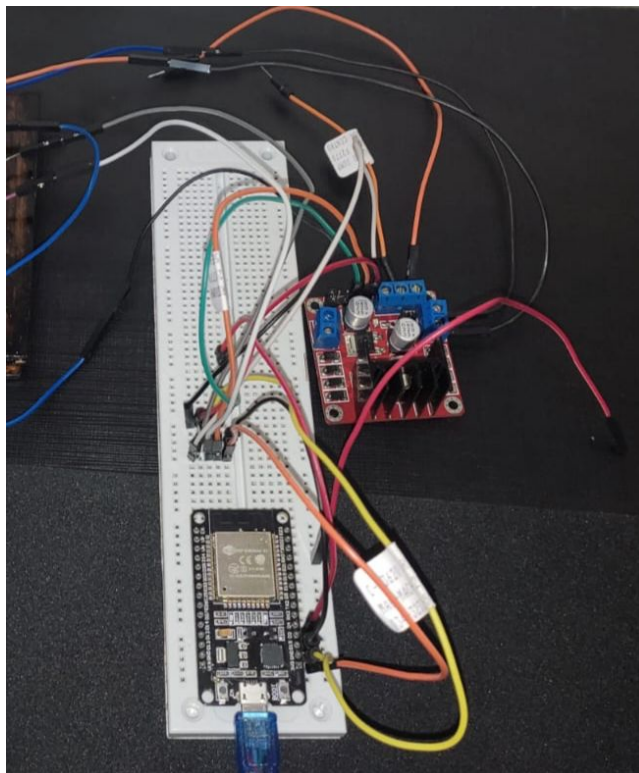


Figura 2.4 – ESP32 ligada à Ponte H.

Como fonte externa foi utilizada a própria fonte DC do laboratório de Sistemas de Controle Realimentado da Universidade Federal de Uberlândia:



Figura 2.5 – Fonte externa DC.

Assim foi possível o arranjo final a seguir:

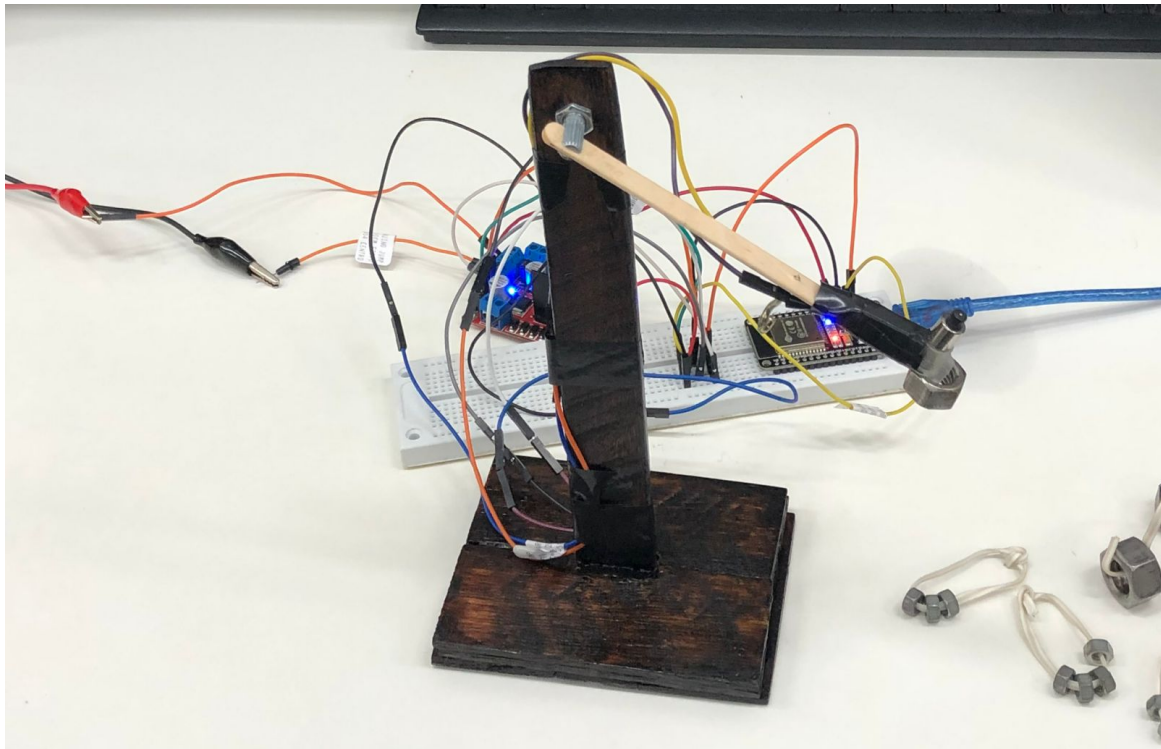


Figura 2.6 – Arranjo Final.

3 | Controle

3.1 Função de Transferência

A partir da montagem da planta e sendo feito as ligações necessárias, pudemos estimar a equação que descreve a função de transferência do sistema em malha aberta com valores de entrada $u(kT)$ e saída $y(t)$, para um período de amostragem $T = 50ms$,

onde:

$u(kT)$ – sinal PWM, de 0 a 4095;

$y(k)$ – sinal lido pelo conversor AD, de 0 a 4095.

A Imagem 3.1 a seguir ilustra o processo de forma teórica.

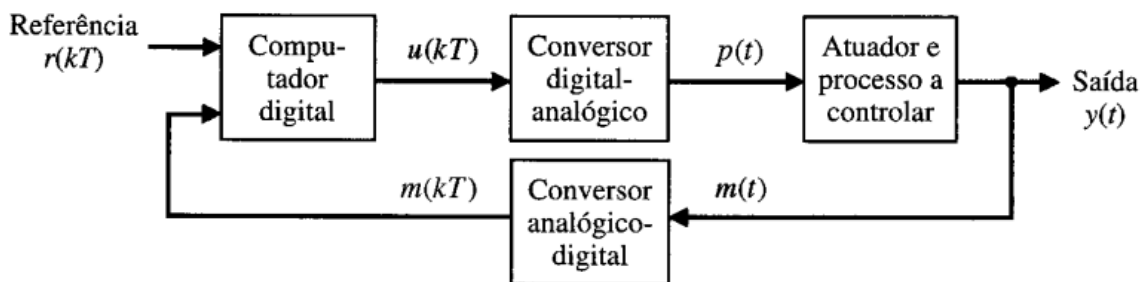


Figura 3.1 – Sistema de controle.

3.2 Processo de Amostragem

Antes de realizar a amostragem, tivemos que fazer uma breve conversão de escalas para os valores de entrada e saída. Sabemos que o potenciômetro possui um giro de aproximadamente 270 graus, representando o valor máximo da conversão AD (4095). Entretanto, a planta apresenta instabilidade quando o ângulo de saída é maior que 90 graus. Como alternativa para o problema, realizamos a medida com base na posição angular, conforme a seguinte conversão:

$$y(k)^* = \frac{y(k) \times 270^\circ}{4095} \quad (3.1)$$

em que $y(k)^*$ é a posição angular medida pelo potenciômetro.

Aplicando a mesma regra para a entrada, onde o valor máximo deve ser de 90° :

$$u(k)^* = \frac{u(k) \times 90^\circ}{4095} \quad (3.2)$$

em que $u(k)^*$ é a posição angular desejada.

Feito as definições e correções de parâmetros. Iniciamos o processo de amostragem num intervalo de 70 segundos. Em seguida, estimamos a função de transferência através do *Matlab*. A Imagem 3.2 apresenta os resultados obtidos.

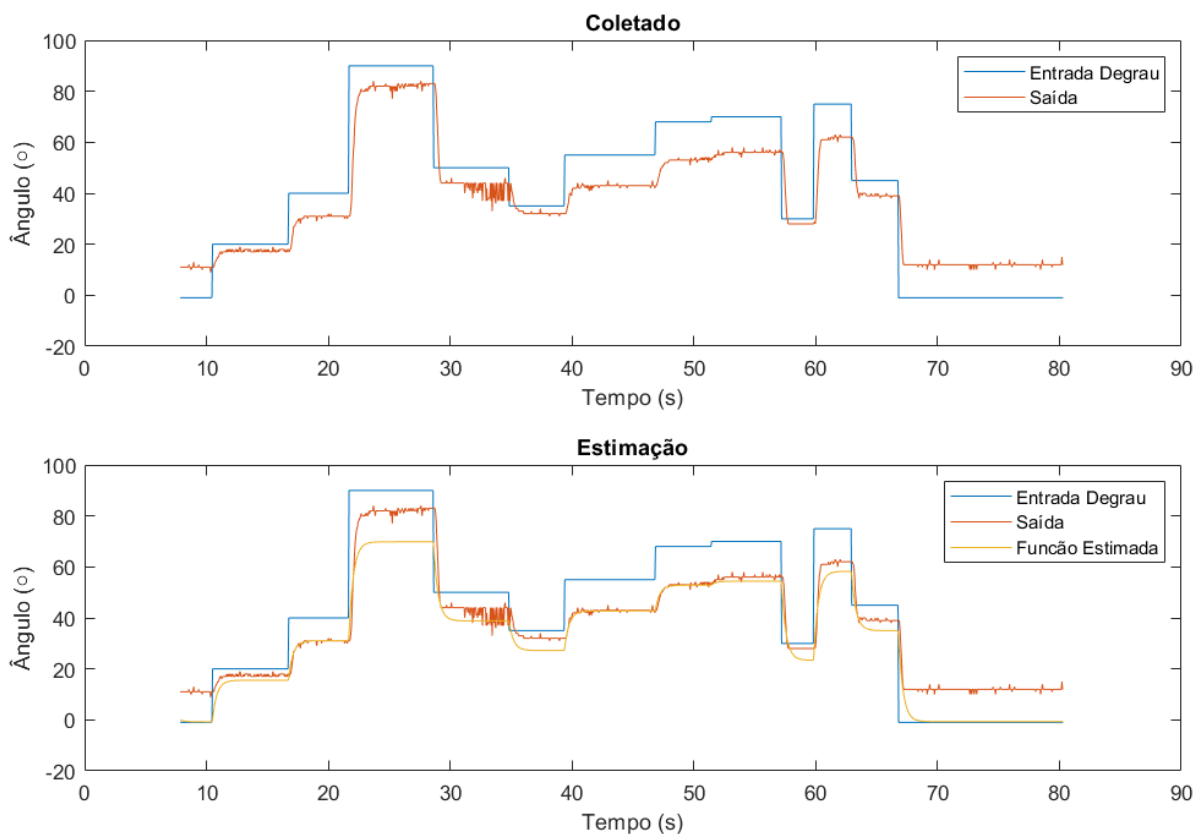


Figura 3.2 – Processo de amostragem e estimação.

A Equação 3.3 representa a função de transferência estimada.

$$G(s) = \frac{2.115s + 0.02492}{s^2 + 2.738s + 0.03197} \quad (3.3)$$

Convertendo para o domínio discreto, temos que

$$G(z) = \frac{0.09885z^{-1} - 0.0988z^{-2}}{1 - 1.872z^{-1} + 0.8721z^{-2}} \quad (3.4)$$

onde $G(z)$ representa a função de transferência da planta em tempo discreto, a uma taxa de amostragem $T = 50ms$. Seguimos com ela para determinar o compensador necessário para o controle.

3.3 Compensador PI

Utilizando a toolbox *rltool*, do *Matlab*, determinamos um compensador PI com um tempo de resposta mais lento. A razão dessa escolha foi para manter a estabilidade da planta e evitar overshoot na resposta transitória. A função do controlador PI estimada é dada pela Equação 3.5 a seguir:

$$C(z) = \frac{0.016381(z + 1)}{(z - 1)} \quad (3.5)$$

A Imagem 3.3 representa a resposta ao degrau do sistema em malha fechada, com o compensador encontrado.

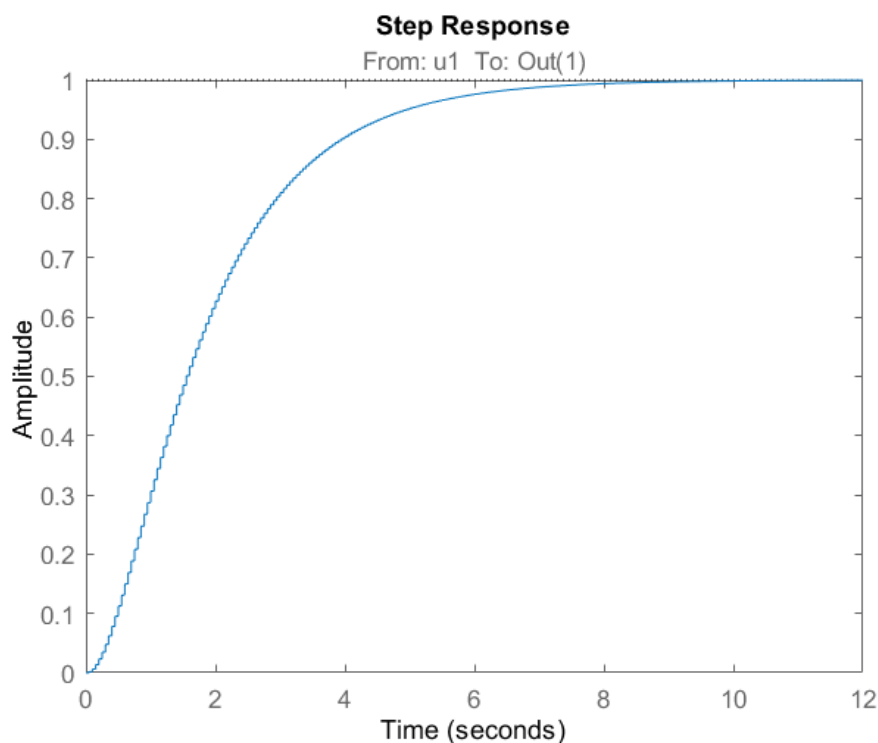


Figura 3.3 – Processo de amostragem e estimação.

A implementação digital do compensador foi feita utilizando a seguinte equação de diferenças (Eq. 3.6):

$$u[k] = u[k - 1] + 0.016381(e[k] + e[k - 1]) \quad (3.6)$$

4 | Resultados

Após o cálculo do compensador e a implementação digital, obtivemos os resultados a seguir, na Imagem 4.1.

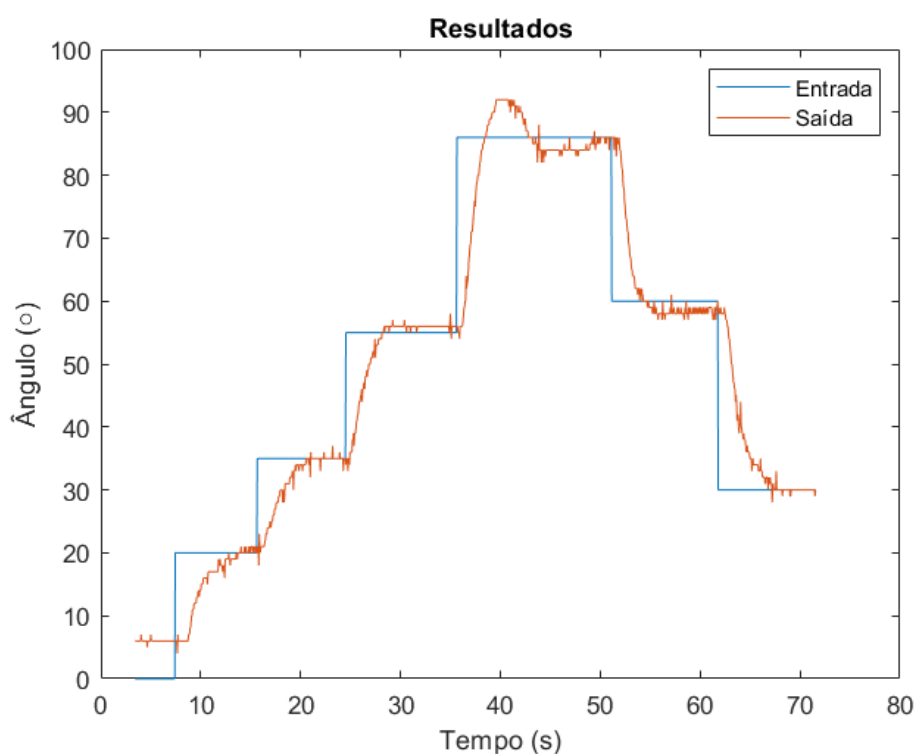


Figura 4.1 – Resultados em malha fechada

Nota-se que conforme ocorre uma alteração na entrada, a posição angular do aeropêndulo segue o seu percurso até se estabilizar nos respectivos valores degrau unitário, provando assim a eficácia do controlador PI para a planta.

5 | Conclusão

Conclui-se então que este trabalho possibilitou colocar em prática os conhecimentos prévios acerca de sistemas de controle realimentado e obter sucesso no controle de um aeropêndulo, haja vista que a planta adotada não convergia ao valor de entrada em malha aberta, contudo, com a adição de um controlador em malha fechada, a planta apresentou o valor desejado como resposta em regime permanente.

Além disso, pudemos comprovar e comparar a eficiência de um compensador PI em nosso ensaio, pois o erro em regime permanente do sistema foi zerado conforme a proposta do compensador proporcional integral, após a sua implementação digital.