

**EA722**  
**Laboratório de Princípios de Controle e**  
**Servomecanismos**

Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação  
Prof. Marconi Kolm Madrid

**Experimento 2**  
**Fundamentos de Realimentação: Sistemas ECP**  
**em malha aberta e fechada**

**Equipamento utilizado:** Sistema Torcional

**Turma D**

**Participantes:**

Nicolas Pereira da silva (RA:247298)

Pedro Nicolás Sampaio Gomes (RA: 247333)

Vinícius Esperança Mantovani (RA: 247395)

## **Motivação**

Este experimento foi motivado pela busca por uma compreensão mais profunda das propriedades fundamentais de sistemas de controle em malha aberta e fechada. No relatório anterior, focamos na obtenção de resultados teóricos, e agora buscamos comparar esses resultados com os valores experimentais obtidos do sistema torcional. Essa comparação é fundamental para validar os conceitos teóricos e entender, na prática, as vantagens da realimentação, tanto no rastreamento de sinais de referência (comportamento servo) quanto na atenuação de distúrbios (comportamento regulador). Ademais, o experimento explora, também, o impacto de um pré-filtro adicional na resposta ao degrau, oferecendo uma visão mais completa da dinâmica do sistema quando controlado por um controlador proporcional.

## **Introdução**

Sistemas de controle desempenham um papel vital em diversas aplicações de engenharia, e a eficácia desses sistemas depende do entendimento detalhado a respeito de como diferentes configurações de controle influenciam seu desempenho. No trabalho anterior, evidenciou-se a importância da realimentação para melhorar a resposta a distúrbios e o rastreamento de sinais de referência. Além disso, ainda no experimento 1, calculamos resultados teóricos que agora servem como base de comparação para os valores experimentais obtidos do sistema torcional real. Este sistema permite uma análise prática dos efeitos da realimentação e do amortecimento, elementos cruciais para o entendimento e a melhoria da estabilidade e da resposta do sistema. Nesse sentido, almejando-se compreender a implementação de um controlador proporcional e de um pré-filtro adicional, cujas metodologias estão a tempos consagradas, buscou-se fazer uma análise das diferenças entre sistemas em malha aberta e fechada, e uma validação dos conceitos estudados teoricamente.

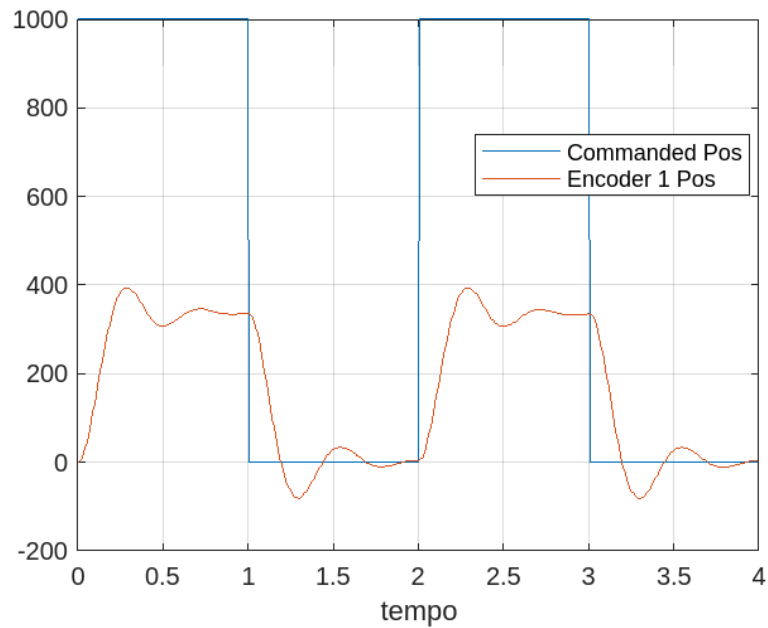
## **Procedimento Experimental**

### **1, 2, 3 e 4. Execução do experimento no sistema da bancada**

Nestas etapas do laboratório presente, foi organizado o sistema torcional com os devidos discos, travados ou não, de acordo com as instruções e, foram ajustados os valores em software responsáveis pela organização da execução do sistema. Assim, foi possível prosseguir com os seguintes exercícios, nos quais o experimento foi efetivamente executado no sistema torcional de maneiras variadas.

### **5. Resultado da execução (malha aberta)**

Neste exercício, buscou-se analisar o comportamento do controle em malha aberta do sistema torcional. Desse modo, obteve-se o gráfico apresentado abaixo:

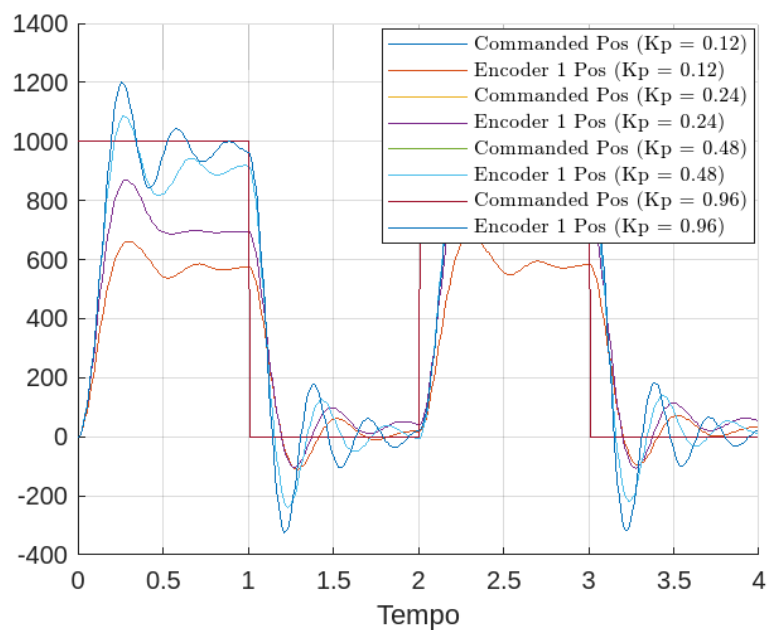


*Figura 1: Gráfico de comparação entre posição do disco 1 e posição comandada (ambos em counts) em função do tempo (segundos)*

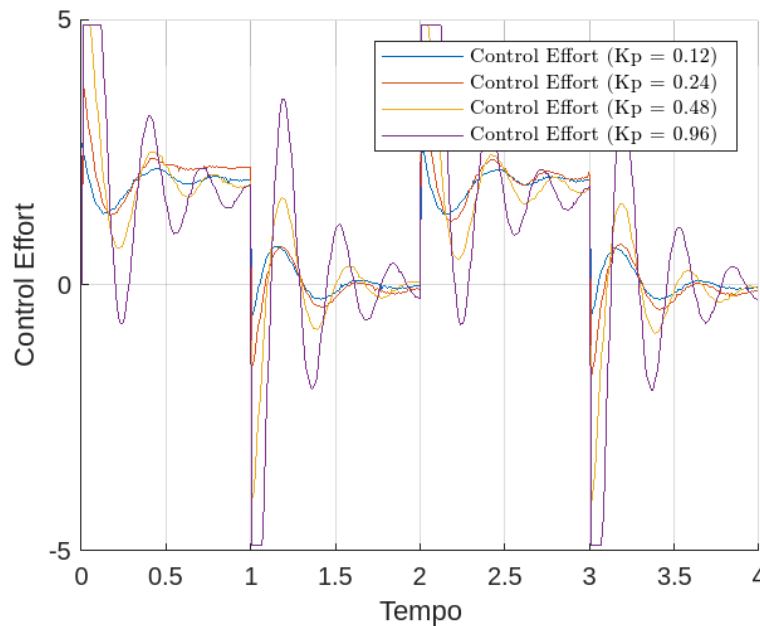
Neste gráfico, vê-se a diferença gritante entre a posição comandada ao sistema e a saída efetiva do sistema. Tal fato, indica uma fraqueza bastante grande no método de controle em malha aberta, uma vez que este, conforme se nota no gráfico, não consegue gerar um comportamento de saída ao sistema que seja realmente aproximado àquele que se deseja (posição comandada muito diferente da posição efetiva).

## 6. Resultado da execução (malha fechada)

Seguindo, neste exercício, foram traçados dois gráficos para facilitar a análise do caso. Esses gráficos são os que se seguem.



*Figura 2: Gráfico de comparação das posições efetivas do disco 1 para diferentes valores de  $K_p$  e suas posições comandadas respectivas (todos em counts) em função do tempo (segundos)*



*Figura 3: Gráfico de comparação entre valores de Control Effort para cada valor de  $K_p$  usado (todos em Volts), em função do tempo (segundos)*

Então, com base nos gráficos apresentados, pode-se analisar como são destoantes as saídas para cada valor do coeficiente  $K_p$  atrelado ao controlador proporcional. Isso se dá, de modo que, conforme se percebe no primeiro gráfico, por apresentar um ganho maior, o valor de  $K_p$  que proporcionou melhor proximidade entre a posição comandada e a efetiva do disco, foi o de  $K_p = 0,96$ , de maneira que, essa proximidade decresce quanto menor o  $K_p$ . No entanto, na contra-mão de tal benefício trazido por valores maiores de  $K_p$ , tem-se a possibilidade de o movimento atingir uma amplitude maior que a desejada, conforme se nota no gráfico da *Figura 2*, em que a posição efetiva do disco (Encoder 1) acaba extrapolando a posição comandada de 1000 counts no começo da oscilação tanto para  $K_p = 0,96$  como para  $K_p = 0,48$ . Além disso, outro ponto importante que vem de encontro ao benefício do  $K_p$  maior se apresenta no gráfico da *Figura 3*, no qual se observa uma maior oscilação da Voltagem usada pelo controlador no caso do  $K_p = 0,96$ , que é acompanhada por uma maior amplitude máxima em Volts para o controlador quando comparadas, oscilação e amplitude, às dos controladores proporcionais com  $K_p$  menor. Por fim, vale ressaltar que estes dois últimos problemas citados também têm seus efeitos reduzidos quanto menor for o valor de  $K_p$  e, que eles estão diretamente relacionados com o primeiro problema (de se extrapolar, possivelmente, a amplitude da posição comandada), conforme se evidencia nos dois gráficos citados neste parágrafo (comparando-se os comportamentos em cada gráfico para cada  $K_p$ ).

## 7. Resultados sem disco 2 e com disco 3 travado

Refazendo os dois experimentos indicados em 5 e 6, agora sem o disco 2 e com o disco três, estando este travado, obteve-se o que se nota nos seguintes gráficos.

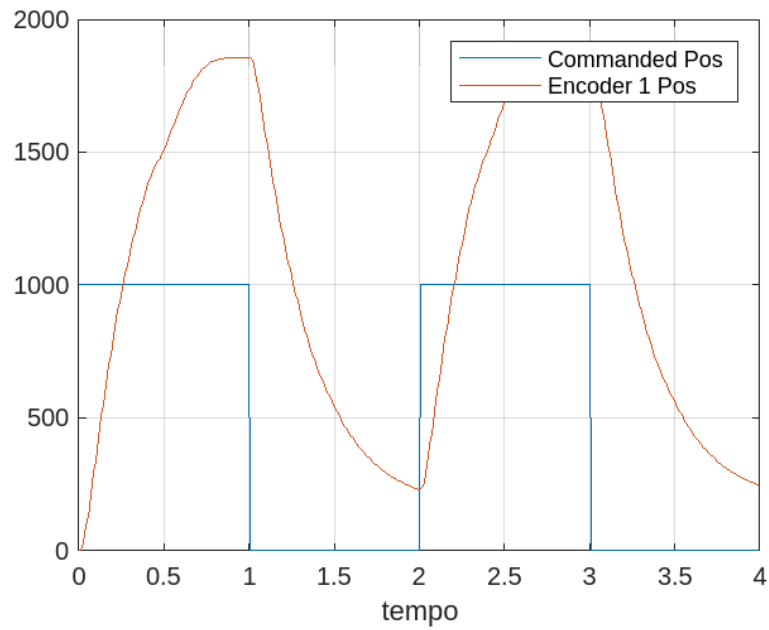


Figura 4: Gráfico igual ao da Figura 1, mas com disco 2 retirado e 3 colocado (travado)

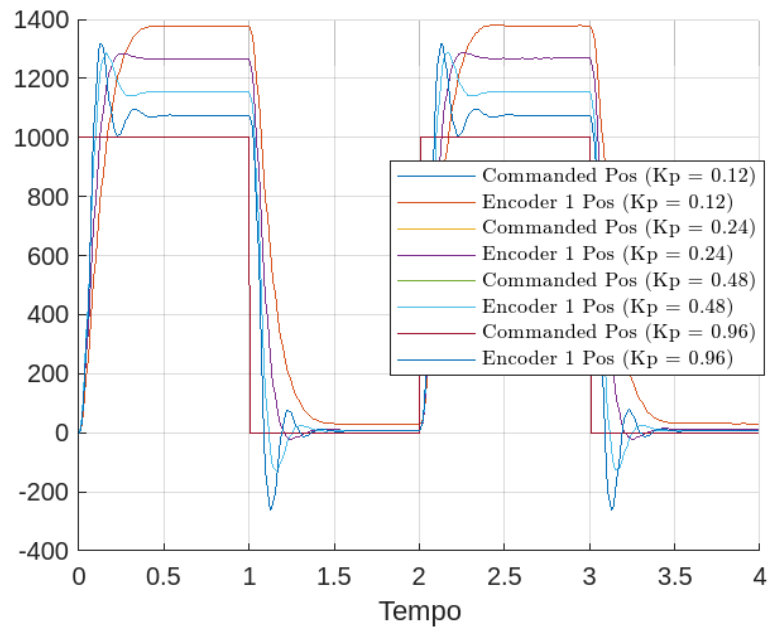


Figura 5: Gráfico igual ao da Figura 2, mas com disco 2 retirado e 3 colocado (travado)

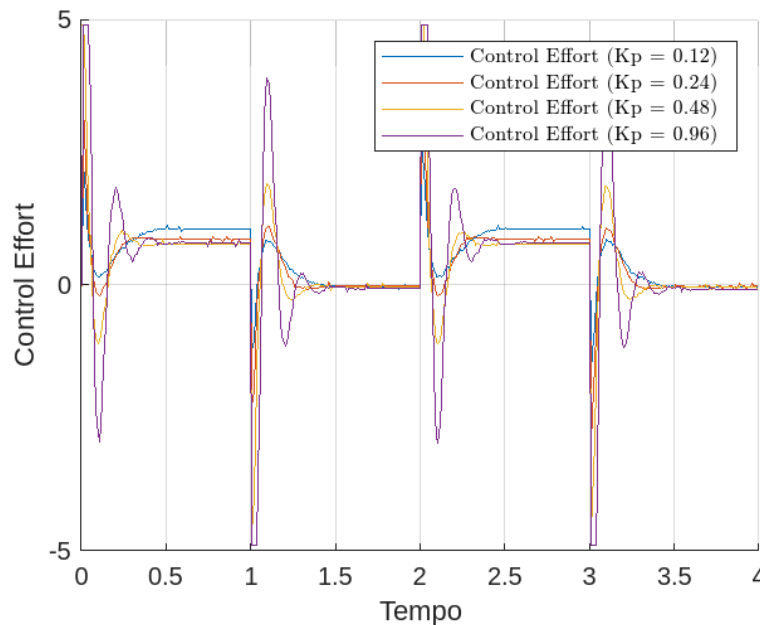


Figura 6: Gráfico igual ao da Figura 3, mas com disco 2 retirado e 3 colocado (travado)

Neste novo caso de estudo, analisando-se inicialmente o controle em malha aberta, observa-se que houve o problema contrário àquele evidenciado no caso de malha aberta com o disco 2 travado, de modo que, no presente caso, a posição efetiva do disco 1 acabou extrapolando muito a posição comandada. Isso se deu, por causa do fato de que o valor de  $K_{pf}$  do pré-filtro não foi feito para a situação em que se tem o disco 3 travado, sem o disco 2. Dessa maneira, por conta de a resistência ao movimento, causada pela torção ocasionada pelo movimento do disco 1 com o disco 3 travado, ser menor do que aquela para o disco 2 travado, ao se aplicar o mesmo pré-filtro, com o mesmo comportamento de controle, a potência aplicada ao disco 1 extrapola a necessária, fazendo com que a posição efetiva do disco seja quase o dobro da comandada.

Ademais, do mesmo modo como no caso de malha aberta, para a malha fechada, como a resistência ao movimento do disco 1 foi reduzida pela troca de travamento do disco 2, removido do sistema, pelo travamento do disco 3, adicionado ao sistema, teve-se uma extrapolação da potência necessária a ser exercida sobre o disco. Desse modo, mesmo para valores menores de  $K_p$ , o disco 1 foi mantido a uma posição maior que a comandada. Além disso, ainda pelo motivo citado, os valores de Control Effort foram exagerados, uma vez que, se o design do pré-filtro fosse feito para o sistema presente e não para o sistema com o disco 2, esses valores seriam menores, pois a posição na qual o disco 1 seria mantido, seria de fato a posição comandada.

## 8. Avaliações teóricas

a) Analisando os resultados deste experimento com relação ao sistema em malha fechada, pode-se concluir que obteve-se algo bastante coerente com o que se esperava teoricamente. Isso porque, o controle em malha fechada foi muito satisfatório para ajustar a saída para valores próximos daqueles comandados, conforme já se esperava por uma análise teórica.

Comparando-se, então, respostas transitórias e em regime do sistema em malha aberta com relação àquele em malha fechada, pode-se afirmar que a malha fechada permite maior precisão no que tange a se tentar chegar a um valor de saída próximo ao esperado. Isso se dá, por conta, principalmente, do fato de que a realimentação provida ao controle pela malha fechada permitir o reconhecimento por ele daquilo que é necessário se passar de sinal para que o valor de saída seja o

mais próximo possível do que se deseja. Além disso, no caso de se ter distúrbio na carga do sistema, é possível ainda se usar o valor de  $K_p$  do sistema em malha fechada para buscar um resultado melhor (conforme se explica no item “b” a seguir). Sendo assim, mais friamente, em análise mais diretamente ligada aos gráficos analisados, pode-se concluir que na fase transitória a oscilação nos dois casos não é muito diferente, embora as amplitudes sejam, no geral, maiores para o caso de malha fechada e, que em regime, ambas se comportam como linha reta, mesmo que em valores bastante destoantes entre si. Por fim, com relação à esses valores destoantes, pode-se afirmar que ocorrem por conta de a malha aberta ser muito mais suscetível a distúrbios, conforme se nota pelo aumento abrupto no valor máximo de posição efetiva do disco 1 no caso em que se usa o disco 3 quando comparado ao caso em que se usa o disco 2 e, por ela não ser, por definição, retroalimentada, o que não a permite “reconhecer” as necessidades do sistema para que tenha uma boa saída.

**b)** Conforme explicado nas análises dos gráficos feitas em cada um dos exercícios anteriores, o aumento progressivo do valor de  $K_p$  ocasiona o aumento das oscilações da posição e da voltagem aplicada no controlador e, da amplitude dessas oscilações. No entanto, como fator positivo, no caso do uso do disco 2, em que o pré-filtro é de fato feito para atender o sistema, o aumento de  $K_p$  permite que a posição efetiva do disco 1 seja mais próxima da posição comandada para ele. Sendo assim, o comportamento regulador do sistema frente ao distúrbio na carga aplicada pode ser controlado pela alteração do  $K_p$ , de modo que, com um possível distúrbio, pode ser que um valor de  $K_p$  diferente, que não o maior, possa trazer uma proximidade maior da posição efetiva do disco 1 à posição comandada. Isso porque, tem-se a possibilidade de se excursionar entre valores maiores de  $K_p$  que trazem resultados maiores de posição efetiva e, valores menores, que trazem resultados menores de posição efetiva, o que permite que a escolha entre possíveis valores possa trazer maior semelhança, conforme citado, entre a posição comandada e a posição de saída do sistema. Em suma, a variação do  $K_p$  ocasiona a variação do valor de saída do sistema para um mesmo valor comandado.

## **Conclusão**

Este experimento permitiu validar, na prática, os conceitos teóricos discutidos anteriormente sobre o controle em malha aberta e fechada, permitindo a verificação dos conceitos previamente discutidos e analisados, unicamente, por meio de processos teóricos e de simulação, a partir do experimento 1. Observou-se como a definição adequada do valor de ganho  $K_p$  mostra-se fundamental para o bom desempenho do sistema de controle de sistemas físicos reais a fim de minimizar erros destes sistemas, suscetíveis a fenômenos e variações que, muitas vezes, fogem dos resultados esperados, obtidos teoricamente. Além disso, foi possível também notar, na prática, as discrepâncias entre o desempenho de sistemas em malha aberta e fechada, ressaltando a importância de implementar a lógica de realimentação em sistemas dinâmicos visando diminuir o impacto de influências não consideradas nas saídas.