

EA722

Laboratório de Princípios de Controle e

Servomecanismos

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

Experimento 5

Controle Co-allocado

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

O objetivo desta experiência é realizar o controle P&D do sistema torcional quando este se apresenta na configuração chamada de dois graus de liberdade, utilizando dois discos com capacidade de rotacionar. Isso é feito com o objetivo de melhor analisarmos a influência dos ganhos proporcional e derivativo sobre um sistema como o utilizado, verificando seus efeitos sobre a rigidez do sistema e sua capacidade de controlarem a rotação dos discos de maneira “automática”. Perceberemos que isso será muito difícil, nos fazendo entender melhor as limitações do sistema em relação a esse modo de configuração.

Introdução

Nesta experiência, analisaremos a dinâmica que um sistema torcional com dois discos que possuem a capacidade de rotacionar em torno de um eixo, conectados entre si por meio de um sistema de mola torcional, a partir da definição de diferentes valores de ganhos proporcional e derivativo, analisando uma técnica conhecida como controle co-alocado e verificando a sua efetividade no controle do movimento desses discos. Além disso, avaliaremos os resultados encontrados a fim de também entender como interpretar e associar os resultados obtidos com características de rigidez associada ao movimento dos discos do sistema e a relação conjunta entre o movimento dos discos.

Itens Propostos

3.3.1 Procedimento experimental - parte 1

Itens 1 e 2)

Inicialmente, foi configurado o sistema torcional de acordo com os dados e configurações físicas expostas na seção 3.2 do roteiro deste experimento, implementando, em seguida, implementando o controlador criticamente amortecido que foi utilizado na Experiência 4, assim determinando ganhos proporcional e derivativo da seguinte forma: $K_p = 0.097$ e $K_d = 0.015$, com $K_i = 0$. Aplicando o restante dos parâmetros instruídos pelo enunciado do item 2, foi feita uma execução da máquina, sendo obtido o seguinte gráfico:

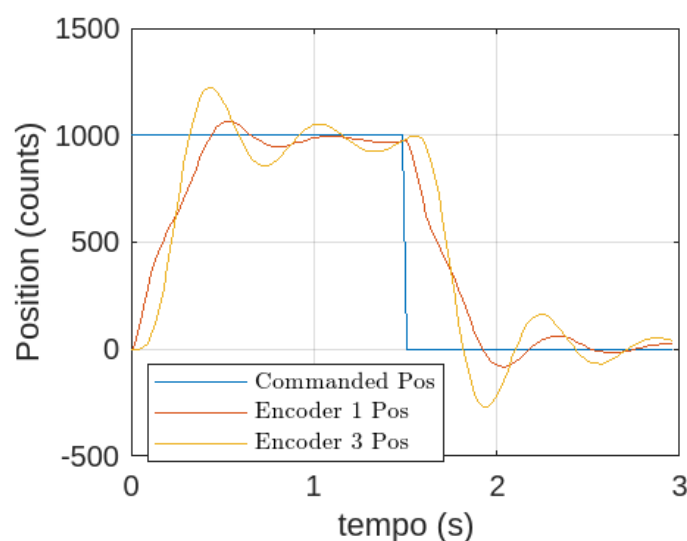


Figura 1: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, em função do tempo para o sistema criticamente amortecido.

Itens 3 e 4)

Em seguida, realizamos o ajuste iterativo e gradual dos ganhos K_p e K_d até que fosse possível obter um tempo de subida inferior a 0.4 segundos (para pelo menos 90% do valor esperado de regime) e overshoot menor que 10% em relação ao valor comandado de contagens, sem muitas oscilações.

Essa série de ajustes foi feita seguindo as regras expostas no enunciado deste item no roteiro da experiência. Entretanto, para encontrar um resultado bom, foi realizado um grande número de tentativas, considerando diferentes combinações de K_p e K_d . Desse modo, abaixo estão exibidos os gráficos mais significativos que foram obtidos durante as nossas tentativas, permitindo visualizar partes do processo de adequação feito no sistema (ou seja, alguns dos passos que passamos até chegar ao melhor resultado após as várias alterações dos parâmetros de ganho). Para permitir a visualização completa do processo iterativo para a obtenção dos ganhos, ficará anexada a seguir uma pasta contendo os arquivos obtidos durante esse processo do experimento. Além disso, frisamos também que os gráficos obtidos contém conjuntamente as posições medidas dos discos 1 e 3, ao invés de realizar isso separadamente. Assim, analisamos, inicialmente, a posição isolada do disco 1 em cada um deles para chegar a um resultado satisfatório para o item 3, e, posteriormente, verificamos as características do disco 3 para responder às questões do item 4.

Link para a pasta com gráficos em função os coeficientes de K_p e K_d tentados ao longo do experimento: [📁 Gráficos_Experimento5_Compartilhável](#)

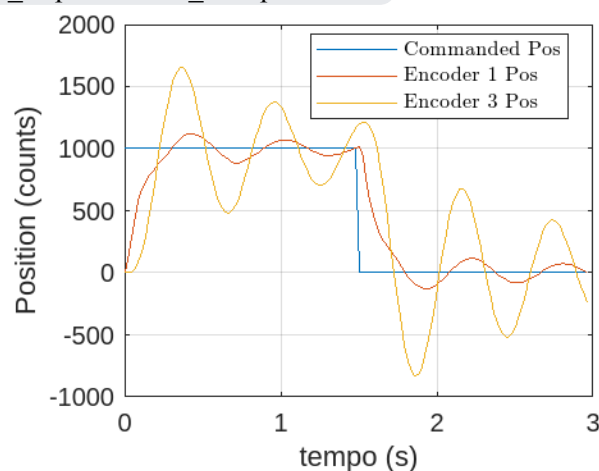


Figura 2: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.3$ e $K_d = 0.025$.

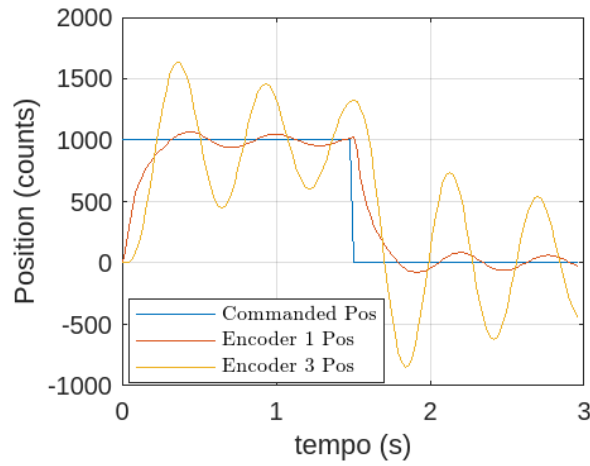


Figura 3: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.5$ e $K_d = 0.045$.

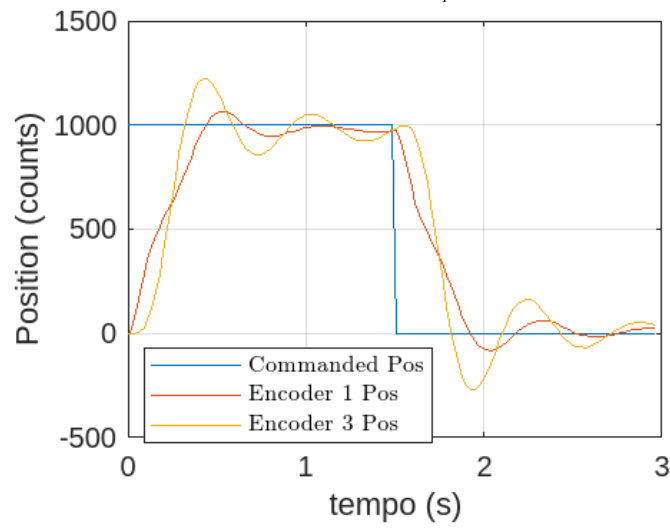


Figura 4: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.097$ e $K_d = 0.015$.

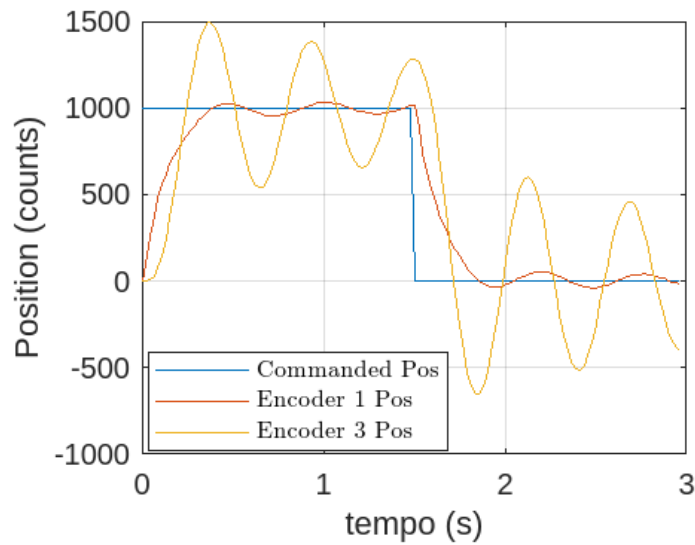


Figura 5: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.5$ e $K_d = 0.06$. Vemos que, para esses parâmetros, temos um resultado muito satisfatório para o disco 1, de acordo com as especificações informadas.

Em relação à obtenção do par (K_p, K_d) , o processo foi iterativo e baseado apenas na observação dos resultados, não seguindo nenhuma teoria matemática específica para obtê-los, além do processo de mudança gradual dos valores de ganho já especificados anteriormente. Observando os gráficos obtidos e os valores de K_p e K_d encontrados ao longo do experimento, passamos por uma grande variedade de comportamentos do disco 1, variando os valores em torno dos resultados que julgamos como sendo os melhores. Ao mesmo tempo em que realizamos essas alterações para encontrar um resultado bom para o comportamento do disco 1, também percebeu-se um certo “descontrole” em relação ao disco 3: conforme aumentamos o ganho K_p , mais vemos o crescimento do overshooting e caráter oscilatório da resposta ao degrau do disco 3. O aumento do coeficiente de ganho K_d consegue “restringir” um pouco essa característica, mas não é suficiente para estabilizar o seu comportamento sem prejudicar a resposta do disco 1. Desse modo, a característica oscilatória sub-amortecida do disco 3 é predominante para a maior parte dos ganhos testados. Essa grande diferença no comportamento dos dois discos pode também ser inferida a partir da análise das funções de transferência relativas a cada um deles: enquanto o disco 1 se relaciona com a função $N_1(s)$, de segunda ordem, estando relacionada a parâmetros não só dele mesmo, mas do outro disco envolvido na dinâmica, a função de transferência relativa ao movimento do disco 3 tem como numerador a função $N_3(s)$, a qual é dada por $N_3(s) = k_{eq}$. Ou seja, tem seu movimento muito fortemente atrelado a apenas a constante elástica produzida pela associação das molas no sistema, resultando em um comportamento oscilatório decorrente dessa associação.

Item 5)

Tendo terminado o processo de obtenção do par combinado de ganhos K_p e K_d para otimizar a resposta ao degrau do disco 1, vamos repetir o processo de iteração para o disco 3, visando reduzir o seu overshoot para menos de 10% em torno do seu valor de regime alcançável. Assim como foi feito nos itens anteriores, foram feitas alterações graduais nos valores dos ganhos até que se aproximasse de um resultado satisfatório. Pelo mesmo motivo já ressaltado anteriormente, estarão presentes abaixo apenas alguns dos gráficos mais significativos que mostram algumas das tentativas realizadas até encontrar a melhor resposta que conseguimos, com o restante das amostras presentes na pasta acessível a partir do link a seguir: [Gráficos_Experimento5_Compartilhável](#)

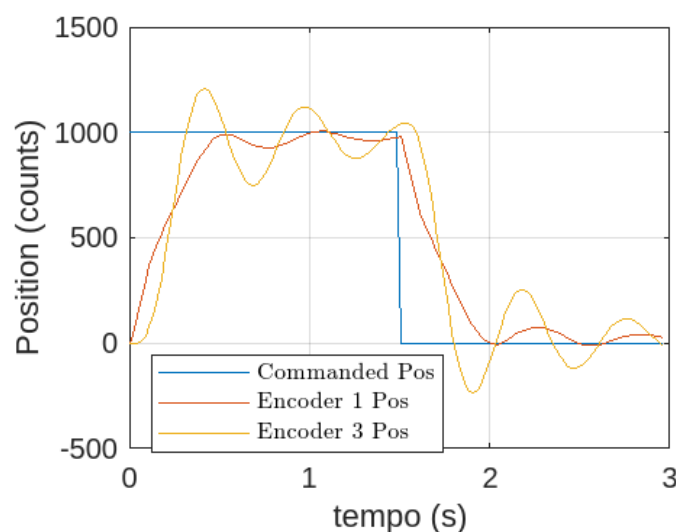


Figura 6: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.16$ e $K_d = 0.03$.

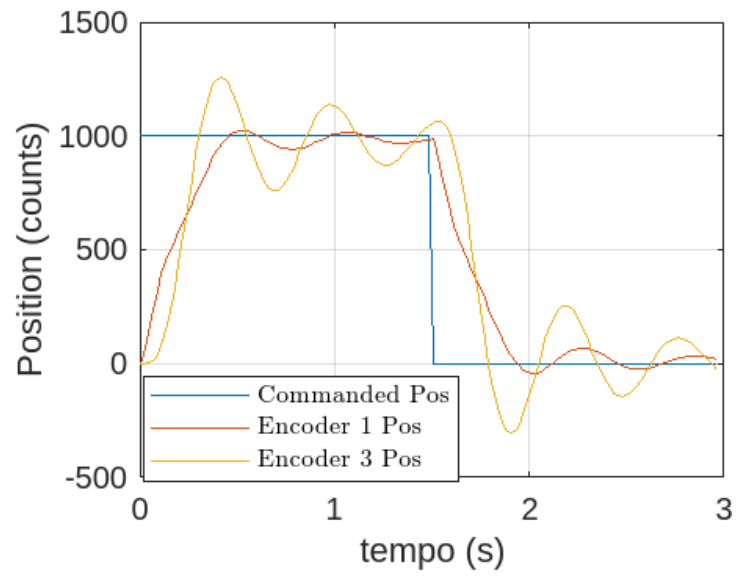


Figura 7: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.15$ e $K_d = 0.025$.

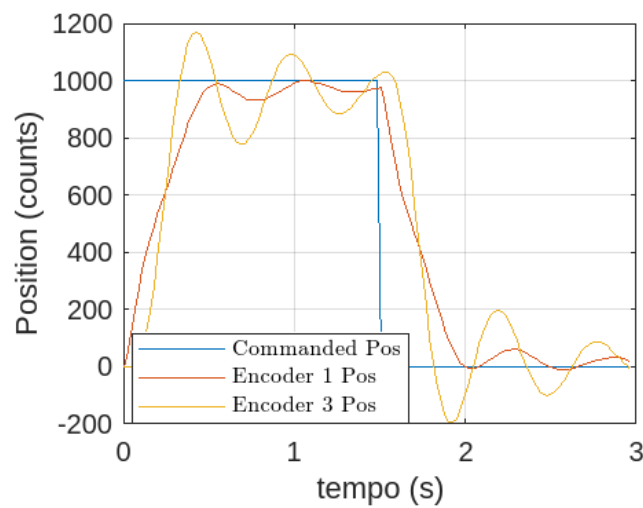


Figura 8: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.13$ e $K_d = 0.025$.

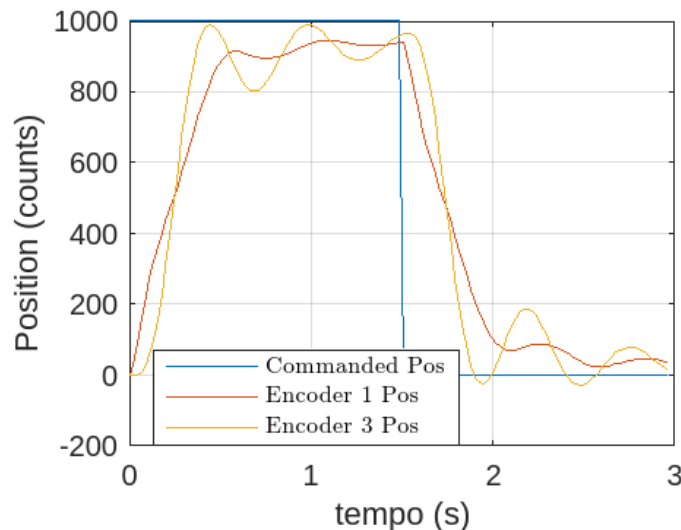


Figura 9: Gráfico de posição do disco 1 e posição do disco 3 em comparação com a posição comandada pelo sistema, utilizando $K_p = 0.1$ e $K_d = 0.025$. Apesar de verificarmos uma deficiência em relação ao valor de regime relativo ao movimento dos discos, esse foi o melhor resultado que conseguimos considerando a obtenção da menor porcentagem de overshooting para o disco 3.

Como podemos observar, um dos melhores resultados obtidos em relação à diminuição do overshooting do disco 3 está associado aos coeficientes de ganho proporcional $K_p = 0.1$ e ganho derivativo $K_d = 0.025$, apesar de detectarmos que as oscilações dos discos ocorrem abaixo do valor de regime esperado. Em relação à rigidez do sistema, ao realizar a movimentação manual do disco 1, percebeu-se um pequeno aumento, embora seja difícil mensurar a diferença detectada manualmente. Apesar disso, o erro em regime para a variável θ_1 é maior quanto à posição comandada pelo sistema, em comparação com o erro de regime obtido para os itens 3 e 4. Isso porque, com o aumento da rigidez do sistema, vemos, inclusive, que a posição dos discos não chega nem a atingir a posição comandada de 1000 contagens, com os seus estados de regime estando em volta de uma posição associada a menos contagens.

Item 6)

Neste item, foi calculada a servo-rigidez dos controladores encontrados para os itens 3 e 5. Tais valores foram de:

- Item 3 $\rightarrow 0.1138$
- Item 5 $\rightarrow 0.3792$

A diferença entre os valores de cada exercício se dá, por causa do valor menor de K_p no exercício 5, quando comparado àquele do exercício 3. Tal coeficiente assume um valor menor no item 5 como uma forma de tentar controlar o overshooting do sistema para a rotação do disco 3, que é muito mais alto que o do disco 1.

Os valores citados foram calculados conforme a figura a seguir, na qual se tem tanto a função de transferência entre θ_1 e T_d , como os valores de servo-rigidez citados, incluindo os coeficientes de ganho K_p e K_d encontrados previamente para os itens 3 e 5. Veja que a substituição numérica das variáveis da expressão para a servo-rigidez estática nos retorna os valores ressaltados acima.

$$\begin{aligned}\theta_1(s) &= \frac{N_1(s)}{D(s)} \left\{ T_d + K_{hw} [-K_p \theta_1 - K_d \theta_1 s] \right\} \\ \theta_1(s) &= \frac{N_1}{D} T_d - \frac{N_1}{D} K_{hw} \theta_1 (K_p + K_d s) \\ \rightarrow \theta_1(s) &= \frac{\frac{N_1(s)}{D(s)} T_d}{1 + \frac{N_1(s)}{D(s)} K_{hw} (K_p + K_d s)} = \frac{\frac{N_1(s)}{D(s)} T_d}{\frac{D(s) + N_1(s) K_{hw} (K_p + K_d s)}{D(s)}} \\ \rightarrow \theta_1(s) &= \frac{N_1(s) T_d}{D(s) + N_1(s) K_{hw} (K_p + K_d s)} \\ \rightarrow \frac{\theta_1(s)}{T_d} &= \frac{N_1(s)}{D(s) + N_1(s) K_{hw} (K_p + K_d s)} \\ S=0 \rightarrow \frac{\theta_1(0)}{T_d} &= \frac{\cancel{K_{hw}}}{\cancel{K_{hw}} K_{hw} K_p} = \frac{1}{K_{hw} K_p} \\ \rightarrow \text{Item 3:} \\ K_p &= 0,5 \rightarrow G_r(0) = \frac{1}{0,5 K_{hw}} = \frac{1}{0,5 \cdot 17,58} \approx 0,1138 \\ K_d &= 0,06 \\ \rightarrow \text{Item 5:} \\ K_p &= 0,15 \\ K_d &= 0,025 \rightarrow G_r(0) = \frac{1}{17,58 \cdot 0,15} \approx 0,3792\end{aligned}$$

Figura 10: Desenvolvimento da função de transferência entre θ_1 e T_d e, da servo-rigidez para os diferentes controladores.

Finalmente, deve-se ressaltar que os resultados estão condizentes com o que se observou em laboratório, uma vez que a rigidez percebida ao se mover o disco com a mão foi, também, maior quando consideramos o controlador projetado para o item 5 deste laboratório.

Itens 7)

Em seguida, realizamos os cálculos feitos no item 6 para encontrar também os valores de servo-rigidez estática para a variável θ_3 , referente à rotação do disco 3. Veja abaixo os cálculos realizados, que permitiram chegar na expressão que retorna o valor numérico do coeficiente de rigidez estática mediante substituição numérica dos coeficientes k_{hw} e K_p .

$$\frac{\Theta_3(s)}{\Theta_1(s)} = \frac{K_{eq}}{N_1} \rightarrow \Theta_3(s) = \frac{K_{eq}}{N_1} \cdot \Theta_1(s)$$

$$\rightarrow \Theta_3(s) = \frac{K_{eq} T_d}{D(s) + N_1(s) K_{hw} (K_p + K_d s)}$$

$$\rightarrow \frac{\Theta_3(s)}{T_d} = \frac{K_{eq}}{D(s) + N_1(s) K_{hw} (K_p + K_d s)}$$

$$s=0 \rightarrow \frac{\Theta_3(s)}{T_d} = \frac{K_{eq}}{K_{eq} K_{hw} K_p} = \frac{1}{K_{hw} K_p}$$

Figura 11: Desenvolvimento da função de transferência entre θ_3 e T_d e, da servo-rigidez para os diferentes controladores. Vejamos que a fórmula que retorna os valores de rigidez estática é igual em relação à obtida anteriormente, para θ_1 .

Como é possível perceber, chegou-se, mais uma vez, na expressão $1/(k_{hw} * K_p)$ para determinar o valor da servo-rigidez estática referente à variável θ_3 , a mesma obtida para encontrar o mesmo parâmetro referentes a θ_1 , como pode-se observar a partir do desenvolvimento mostrado na figura 10. Desse modo, teremos os mesmos valores de servo-rigidez estática tanto para θ_3 quanto para θ_1 , em ambos os casos implementados a partir dos itens 3 e 5. Apesar, de manualmente, constataremos, para os dois pares de valores K_p e K_d implementados, que o disco 3 parecia ser mais facilmente rotacionado, apresentando menor rigidez em relação ao disco 1, isso se deve não por causa do coeficiente de rigidez estática, que é igual (e sugeriria uma rigidez igual no momento em que tentássemos realizar o processo de movimentação dos discos), mas por causa do coeficiente de rigidez dinâmica, aparecendo quando adotamos um valor diferente de 0 para “s”. Desse modo, é este último parâmetro que atua de forma a fazermos perceber essa diferença no manuseio dos dois discos.

Conclusão

Com a realização dos experimentos propostos, foi possível ver como é difícil realizar o controle de um mecanismo cujo movimento é muito dependente de outro (neste caso, controlar a rotação do disco 3 a partir do ajuste de parâmetros que afetam mais diretamente o movimento do disco 1, o qual acaba “guiando” o movimento do disco 3), nos fazendo perceber que é necessário realizar outras técnicas de controle para conseguir garantir uma melhor previsibilidade do sistema para determinados valores de ganho. Além disso, foi possível também perceber como a influência dos parâmetros de rigidez podem influenciar na dinâmica e na interpretação de um sistema físico.