

EA722
Laboratório de Princípios de Controle e
Servomecanismos

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

Experimento 7
Realimentação de Estados

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

Visando finalizar o trabalho com o sistema torcional, escolhido para as demais atividades da disciplina, além também de conhecer e desenvolver atividades relacionadas com a técnica de Realimentação de Estados para realizar o controle de máquinas físicas, foram conduzidas algumas tarefas teóricas, utilizando o Matlab e a base construída a partir do PR7, e práticas em meio laboratorial a fim de entender melhor o uso desse ferramental.

Introdução

Este trabalho pressupõe o estudo sobre técnicas de alocação de pólos de um determinado sistema em malha fechada, definida por meio de um vetor de ganhos de realimentação associados a variáveis de estados do sistema torcional, o que será utilizado para o desenvolvimento das atividades presentes no roteiro do experimento. Desse modo, trabalhando com a técnica de realimentação partindo das variáveis de estado do sistema, será possível observar diferentes dinâmicas do sistema a partir da definição de seus parâmetros, descobertos a partir, justamente, desse processo.

Procedimento Experimental

Exercício 1)

Neste exercício, seguindo, de maneira similar, ao que já havia sido implementado no pré-relatório, foram feitas algumas poucas modificações no código usado anteriormente e, ainda com o uso da função “ctrb” do Matlab, foi encontrada a matriz de controlabilidade do sistema da planta representado em estados. Assim, conforme é possível notar pela matriz C_o que se apresenta abaixo, pode-se concluir que todos os estados são controláveis:

```
Co =  
  
1.0e+05 *  
      0      0.0163     -0.0115     -2.0619  
0.0163     -0.0115     -2.0619      2.9250  
      0          0          0          2.1728  
      0          0          2.1728     -1.8191
```

Figura 1: Matriz de controlabilidade do sistema Torcional (código enviado juntamente com o relatório presente)

Seguindo a mesma lógica para saber a controlabilidade da matriz adotada no PR7, verificou-se se o “rank” da matriz C_o foi igual ao número de estados do sistema, dimensão dada pelo tamanho da matriz A , que representa o sistema e nos foi passada através do enunciado. Ou seja, devido à diferença nula entre essas duas variáveis, (“rank(C_o) = size(A ,1)”), então podemos, de fato, assumir que o sistema, considerando a configuração adotada para o experimento, é controlável, uma vez que essa diferença está associada com o número de estados não controláveis (e, como já dito, neste caso, elas são 0).

Exercício 2)

a) Foram usados dois conjuntos de polos da tabela de escolha de polos do sistema em malha fechada, presente na página 16 do roteiro do experimento para permitir melhor análise do sistema. Os polos escolhidos estão associados aos casos de escolha 1 e 3, para os valores de “r” iguais a 1000 e 20, respectivamente. Disso, plotando no plano complexo os pólos escolhidos da tabela, obteve-se os gráficos a seguir:

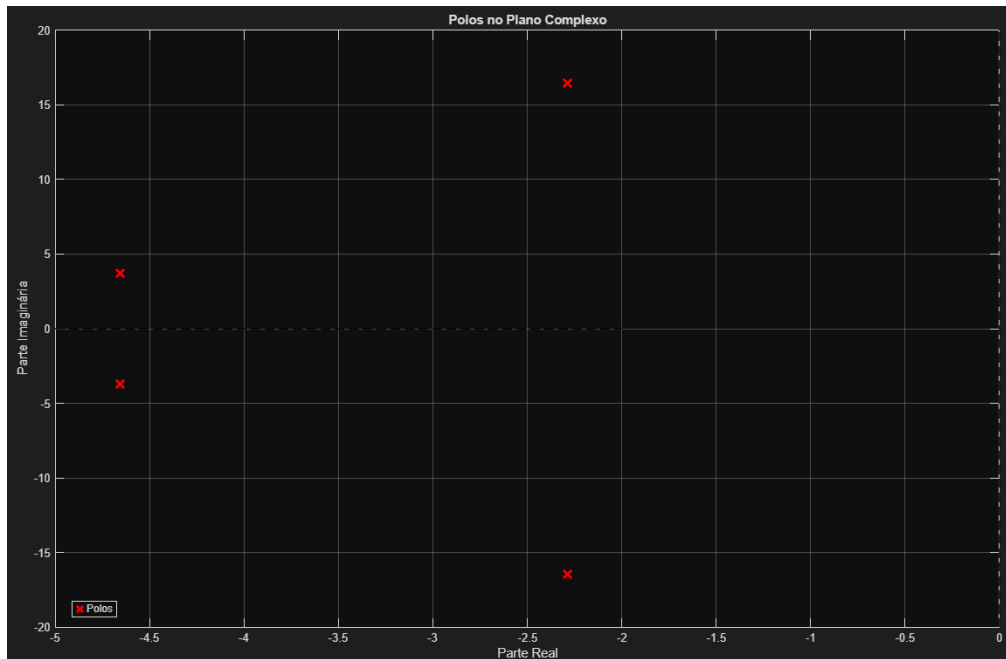


Figura 2: Pólos associados ao caso 1, da primeira linha da tabela. Os polos exibidos graficamente são $-2.287+16.443i$, $-2.287-16.443i$, $-4.6543+3.6957i$, e $-4.6543-3.6957i$.

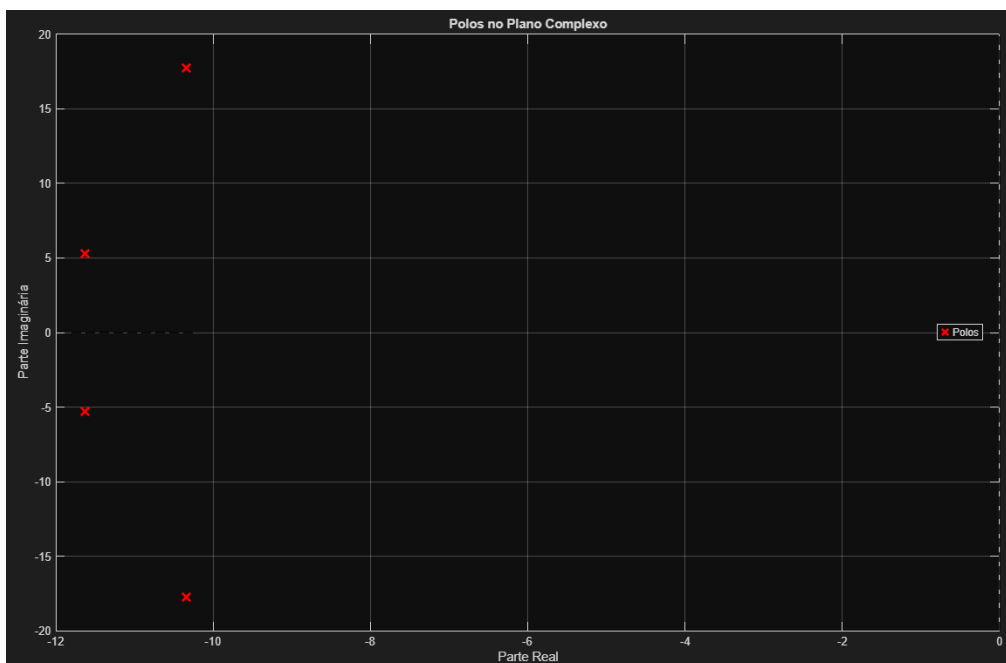


Figura 3: Pólos referentes ao caso 3, para “r = 20”. Os polos deste caso são $-10.335+17.753i$, $-10.335-17.753i$, $-11.626+5.2852i$, e $-11.626-5.2852i$.

b) Observando os dois casos, já podemos perceber alguns detalhes importantes: para o caso 1, os polos dominantes, isto é, os polos que possuem menor magnitude na parte real, possuem partes reais, em módulo, relativamente baixas, quando comparamos-as com os polos do caso 3, por exemplo. Isso vai indicar que o sistema possui respostas mais lentas, com maior demora na estabilização da saída, destacando e mantendo eventuais oscilações do sistema por mais tempo. Para o caso 3, o esperado é justamente o contrário, uma vez que os polos dominantes possuem parte real quase 5 vezes maior em relação aos polos do caso 1, indicando um sistema mais rápido que é capaz de se estabilizar em períodos de tempo mais curtos. Já em relação à parte imaginária dos polos dominantes do sistema para os dois casos, será possível observar valores mais elevados, em módulo. Isso indica frequências de oscilação mais elevadas, resultando em respostas transitórias com oscilações mais perceptíveis, além de ser possível observar vibrações rápidas em resposta à altas frequências. Em suma, veremos mais processos oscilatórios nos sistemas para os dois casos, mas no caso 3, teremos atenuação e acomodação mais efetiva, quando comparado com o caso 1. Tais relações podem ser indicadas ainda pelos valores de “ r ” associados a cada um dos casos, mas isso será melhor explicitado no item seguinte.

c) A variável “ r ”, que temos citado durante essa questão, referente ao peso relativo do esforço de controle quando o sistema está suscetível a desvio das variáveis de estado, é utilizada para o cálculo de minimização de custo de operação a partir da expressão presente na página 16 do roteiro, sendo essa a expressão que também é utilizada para descobrir os polos. Desse modo, está diretamente relacionada com a localização dos polos do sistema que estamos utilizando. Para valores elevados de “ r ”, como no primeiro caso, em que adotados “ $r = 1000$ ”, o esforço de controle do sistema é altamente penalizado. Isto é, como calculamos menores ganhos para a minimização do custo de operação, o sistema de controle vai atuar com menos “efetividade”, com os polos se localizado mais próximos em relação ao eixo imaginário, resultando nos efeitos já citado no item “b)”, além de menor consumo de energia de controle devido a respostas mais suaves. Em contrapartida, ao adotarmos valores inferiores para “ r ”, temos, justamente, o contrário. Com o controlador mais “agressivo” devido ao cálculo de ganhos maiores, temos polos localizados mais à esquerda do eixo imaginário, com maior rapidez para a estabilização do sistema e respostas mais “bruscas”, com maior consumo de energia de controle. Desse modo, temos um aspecto de “trade-off” com base na escolha de “ r ” para o nosso sistema: valores muito pequenos de para essa variável podem levar a esforços de controle excessivos, enquanto que valores muito grandes resultam em controle ineficaz e lento. Daí, destaca-se a importância de escolher um valor adequado para a variável “ r ”.

Exercício 3)

Utilizando, agora, a função “acker” do Matlab, foi encontrado o ganho de realimentação correspondente às alocações utilizadas da tabela. Essa rotina, que recebe como parâmetros as matrizes A e B relativos ao sistema torcional e um vetor que contém os polos da tabela de acordo com os casos adotados, permite o cálculo da matriz K de ganhos para a realimentação de estados, de forma que os polos do sistema em malha fechada fiquem nos locais adequados no sistema físico, permitindo assim o projeto do controlador a ser aplicado para a máquina torcional que utilizaremos para os testes práticos. Portanto, utilizando a rotina para calcular a matriz de ganhos considerando tanto os polos do caso 1, quanto para o caso 3, encontramos os seguintes resultados:

```
K_linha1 =
    0.0561    0.0080   -0.0113    0.0040
```

Figura 4: Ganhos de realimentação para a alocação da primeira linha da tabela, adotando os polos para quando $r = 1000$.

```
K_linha3 =
    0.4905    0.0264   -0.1737    0.0333
```

Figura 5: Ganhos de realimentação para o caso 3, considerando os polos quando $r = 20$.

Nos dois casos, vemos que os valores encontrados respeitam os limites para os valores k_1 e k_3 menores que 1 e k_2 e k_4 menores que 0.12. Desse modo, como ambos os resultados satisfazem essas limitações, realizamos testes com ambos, verificando se encontraremos os aspectos gráficos relativos às respostas dos sistemas que diferenciam o efeito dos polos, nos dois casos, de acordo com o que foi descrito na questão anterior.

Exercício 4)

Com os ganhos obtidos e adotando a configuração do parâmetro de pré-filtro K_{pf} como sendo $k_1 + k_3$, podemos realizar as configurações de controle do sistema torcional de acordo com o orientado através do roteiro. Desse modo, vamos verificar, para os dois casos, as respostas do sistemas a uma entrada degrau, avaliando suas diferenças e aspectos principais. A seguir, ambas as representações gráficas da saída do sistemas referentes aos casos 1 e 3:

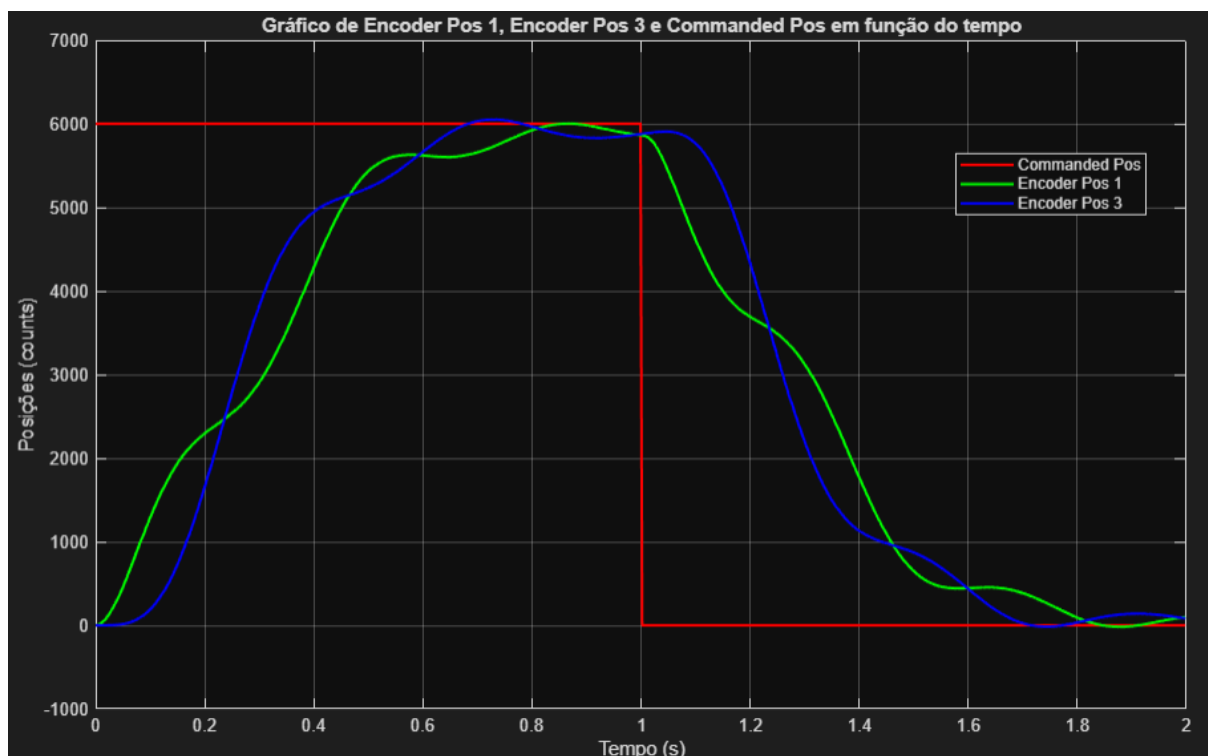


Figura 6: Resposta do sistema com controlador, considerando os polos da primeira linha da tabela, para o caso onde $r = 1000$.

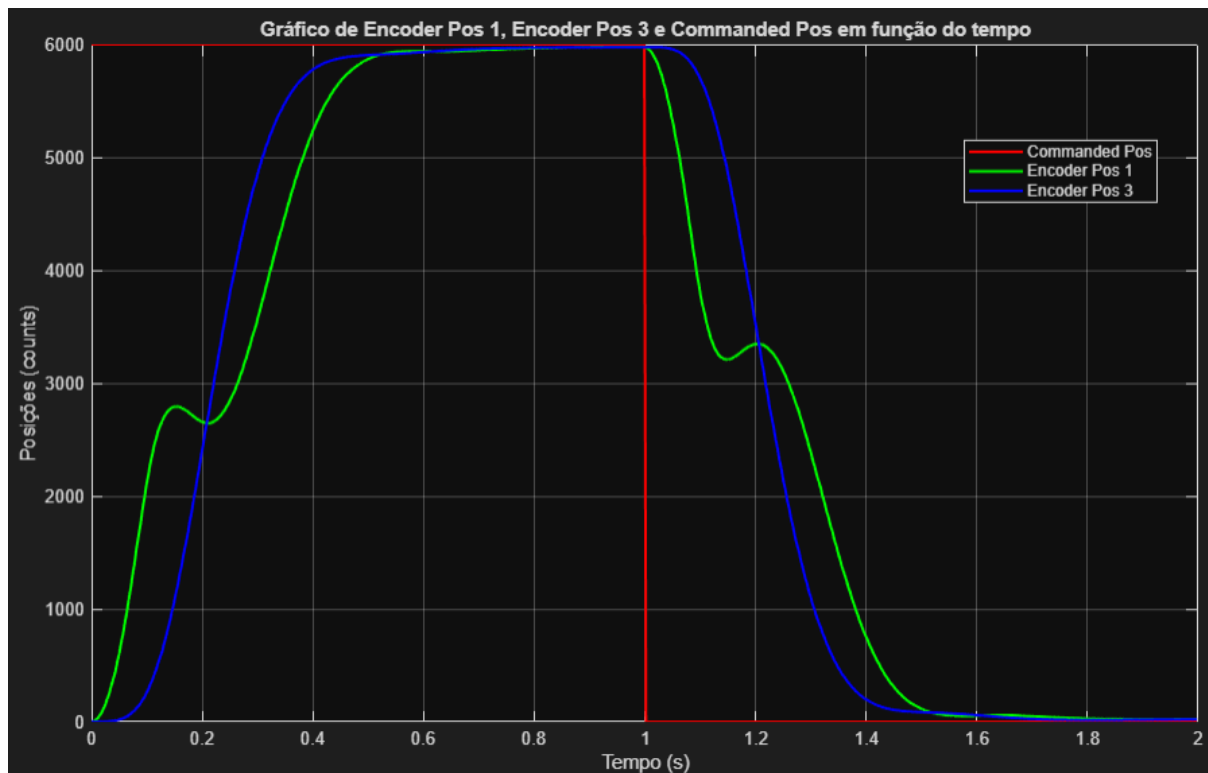


Figura 7: Resposta do sistema com controlador cujos polos são referentes ao caso 3, onde adotou-se valor de $r = 20$.

Como podíamos esperar, em decorrência das reflexões teóricas que foram feitas no exercício 2, a eficácia do sistema baseado nos polos do caso 1 foi consideravelmente menor que o sistema relativo ao caso 3: devido aos fatores relativos à posição dos polos dominantes, vemos que a resposta do sistema na figura 6 possui um caráter oscilatório que não é bem controlado, além da demora para a estabilização do sistema em momentos de transição de níveis, possuindo tempo de subida elevado de, aproximadamente, 0,8 segundos, além de que o erro de regime também é consideravelmente grande. A resposta é tão suave que, ainda que haja oscilações devido à dificuldade do controlador em ajustar a resposta do sistema, o fenômeno de overshooting é discreto, assim como a sobre-elevação, sendo observado menos que 5% de máximo overshoot e sobre-elevação, nesse caso. Em contraste com essa resposta, a saída do sistema quando utilizou-se os parâmetros calculados a partir do caso 3 foram bem mais positivos, com tempo de subida mais rápido, totalizando apenas cerca de meio segundo, com oscilações basicamente inexistentes para o disco 3, e oscilações controladas para o disco 1, com erro de regime consideravelmente menor, além da quase nulidade de percentuais relativos à sobre-elevação e ao overshooting.

Todos os fatores citados, de certa forma, foram previstos a partir da análise feita a respeito da localização dos polos nos itens anteriores, sendo possível entender como suas posições afetam o comportamento do sistema e ajudam a moldar suas respostas.

Exercício 5)

Após a aquisição dos dados expostos, permitindo as plotagens acima, foram feitas tentativas de alteração dos pólos para chegar a resultados melhores. Assim, chegou-se, arbitrariamente (após algumas tentativas), a pólos que geram uma resposta menos oscilatória do sistema, conforme se nota nas figuras abaixo:

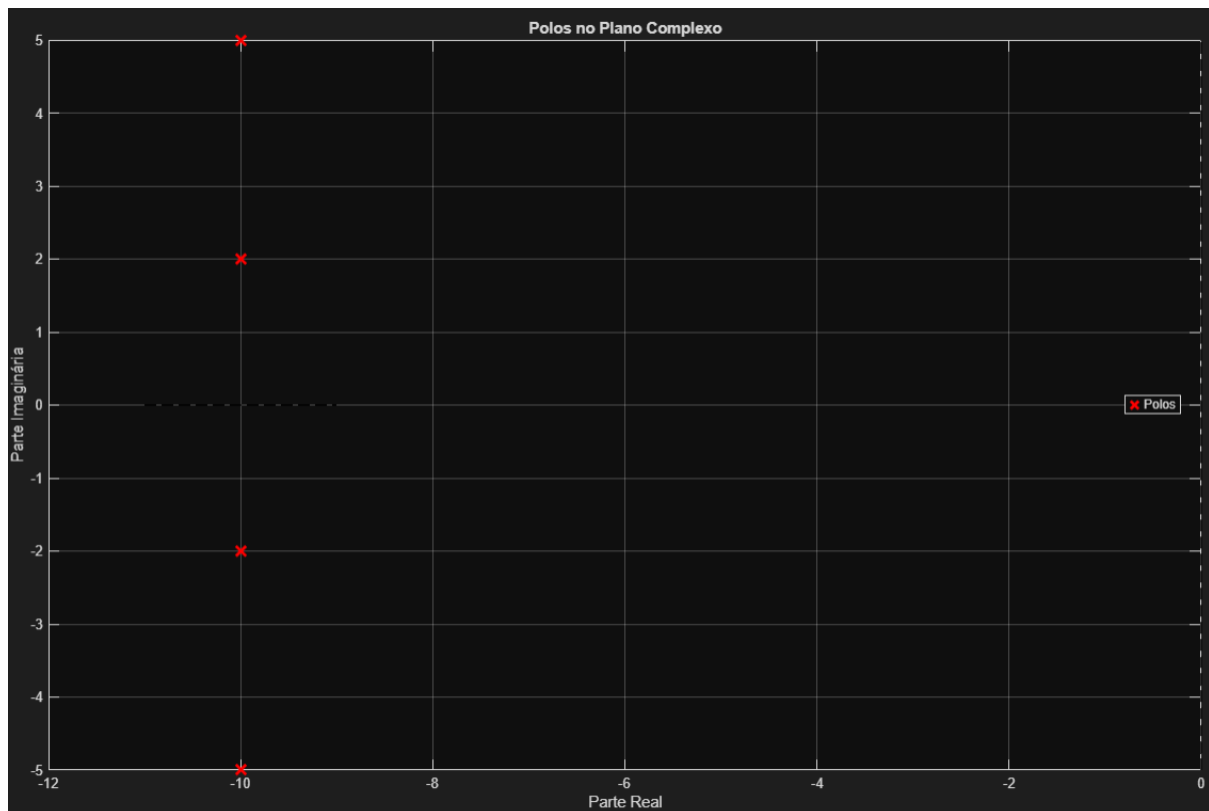


Figura 8: Pólos arbitrários usados para o controlador no plano imaginário.

```
K_polos_arbitrarios =  
  
0.2230    0.0240   -0.1632   -0.0037
```

Figura 9: Ganhos de realimentação para os pólos escolhidos arbitrariamente.

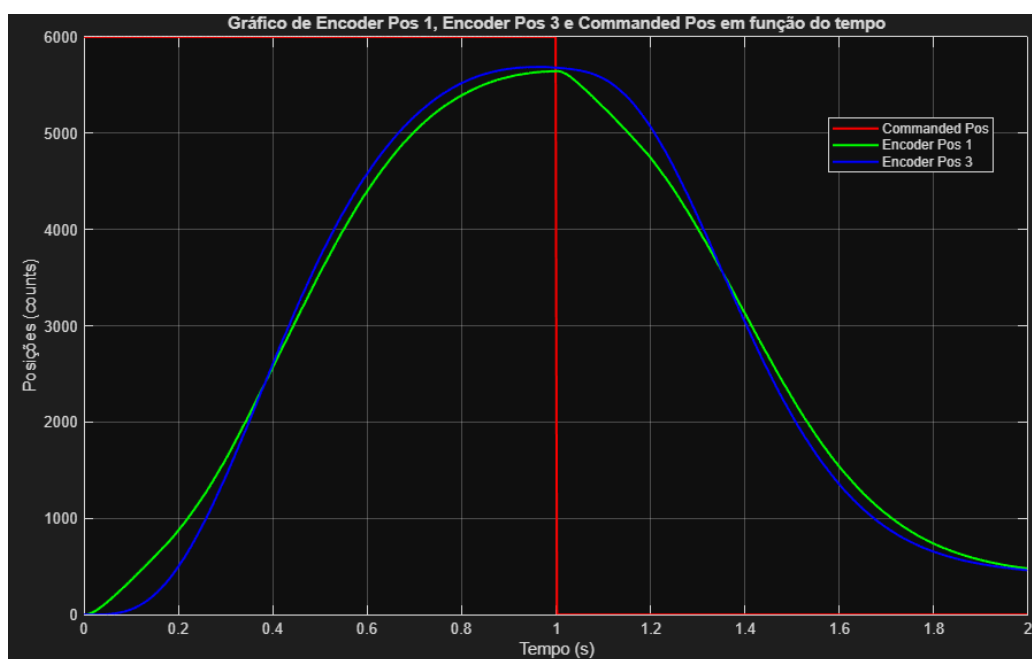


Figura 10: Resposta do sistema com pólos escolhidos arbitrariamente.

Vale ressaltar que, para se chegar ao conjunto de pólos de comportamento exposto acima $(-10+5i, -10-5i, -10+2i, -10-2i)$, focamos na ideia de se partir de polos com partes reais próximas às dos polos da primeira linha, referente ao caso 1, focando na melhora da questão das oscilações, que nos pareceu ser o principal problema relacionado com o sistema para esse caso. Para tanto, foram reduzidos de maneira mais radical os valores das partes imaginárias dos polos dominantes, aproximando-os do eixo real e, por consequência, reduzindo a característica oscilatória da resposta do sistema. Após o processo de busca pelos polos desejados, foram encontradas as mesmas informações a respeito dos sistemas com controlador de polos das primeira e terceira linhas, agora para o sistema com controlador contendo os parâmetros de ganho encontrados para o vetor de polos arbitrários escolhido.

Evidentemente, ao comparar os resultados obtidos no exercício 4 e neste exercício, é possível notar que, embora no último caso o tempo para chegar ao estado de regime seja maior, uma vez que o sistema ainda apresenta resposta bastante suave, assim como o erro de regime também o parece ser, tem-se, de fato, muito menos oscilações, sendo possível, assim, remover o principal efeito negativo observado no caso 1. Apesar disso, outros ajustes melhores poderiam ser feitos com mais tempo, realizando mais cálculos e tentativas, a fim de reduzir o tempo de subida e erro de regime do resultado observado.

Conclusão

Durante o experimento documentado neste relatório, foi possível finalizar o estudo do sistema por nós escolhido para este semestre, o Torcional, de modo a conhecê-lo, não só no domínio transformado, mas também em representação por variáveis de estado. Dessa maneira, foi possível realizar experimentos práticos com a máquina e, finalmente, conseguiu-se entender parte da sua dinâmica, permitindo a realização de experimentos e análises sobre seu funcionamento.

Embora tenha sido um processo bastante orientado, conseguiu-se, com sucesso, implementar um controlador com polos tabelados e, em seguida, com polos arbitrários de modo a melhorar características específicas da resposta ao degrau do sistema. Logo, o laboratório aqui apresentado foi extremamente interessante para praticar os conhecimentos de controle moderno aprendidos na disciplina de controle teórica, em adição com os conhecimentos a respeito dos outros tipos de controladores e das técnicas para sua melhor adequação e reconhecimento.