Trabalho 6 - Realimentação de estados

Nome: Guilherme Goes Zanetti

Data limite para entrega: 13/12, 6h

Importante lembrar:

- Entrega após a data/horário acima: a nota será multiplicada por $1 - e^{-30/h}$, onde h são as horas em atraso (Exemplo: 24h, multiplica por 0.71).
- O trabalho não é recebido por email
- Cabe a vocês garantir que o documento entregue é um arquivo pdf legível, e que não foi entregue com erro. Para isto, basta depositar e abrir para conferir.
- Código é apenas uma informação complementar, e não é considerada parte da solução para fins de avaliação.
- Caso não haja tempo de fazer todo o trabalho, entregue no prazo o que estiver pronto.

```
I=16;
[G,ts0,sat]=init_t6(I);
```

Atividade 1) Obtenha a realimentação de estados tal que a saída tenha sobreelevação $UP \leq 4.3\%$ e o tempo de estabelecimento $t_s \leq ts_0$. Deve-se ajustar o ganho da FT de malha fechada de modo que a saída tenda para a referência unitária.

Faz parte da resposta:

- Explicar como escolheu os polos de malha fechada.
- Mostrar e explicar a saída de malha aberta e a de malha fechada, o sinal de controle, a FT de malha fechada.
- Comentar o sinal de controle e seu valor em regime.

```
ts0
```

```
ts0 = 0.6446
```

```
UP=4.3;
Ts=ts0
```

```
Ts = 0.6446
```

```
a=log(UP/100);
zeta=sqrt(a^2/(pi^2+a^2))
```

```
zeta = 0.7077
```

```
wn=4/(Ts*zeta)
```

```
wn = 8.7691
```

```
polos=roots([1 2*zeta*wn wn^2])
```

```
polos = 2×1 complex
  -6.2056 + 6.1958i
  -6.2056 - 6.1958i
```

```
p3=-15;
polos=[-6.5+6.6i;-6.5-6.6i; p3]
```

```
polos = 3×1 complex
  -6.5000 + 6.6000i
  -6.5000 - 6.6000i
 -15.0000 + 0.0000i
```

```
%Converter função de transferência para Espaço de Estados
Gstate = ss(G)
```

```
Gstate =

  A = 
          x1     x2     x3
   x1  -12.5   -6.5  -1.25
   x2      4      0      0
   x3      0      2      0

  B = 
        u1
   x1  0.5
   x2    0
   x3    0

  C = 
           x1      x2      x3
   y1       0       0  0.8333

  D = 
       u1
   y1   0

Continuous-time state-space model.
Model Properties
```

Realimentação de estados

```
K=place(Gstate.A,Gstate.B,polos)
```

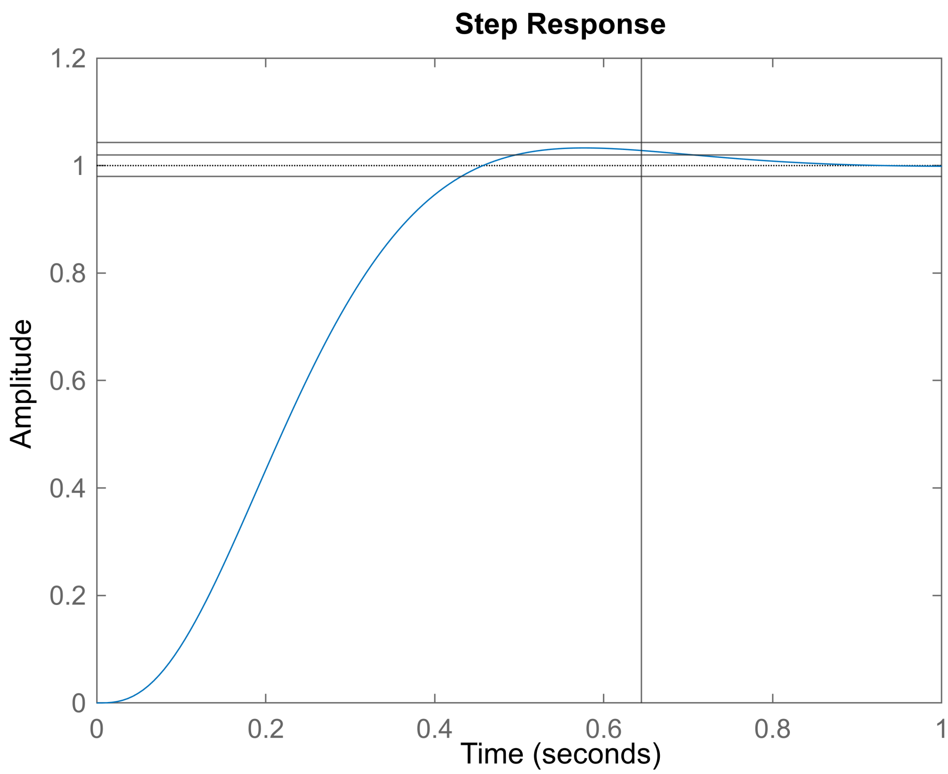
```
K = 1×3
   31.0000  127.4050  319.2875
```

Sistema em malha fechada

```
s1mf=ss(Gstate.A-Gstate.B*K,Gstate.B,Gstate.C,Gstate.D);

p1=dcgain(s1mf)
```

```
p1 = 0.0026
```

```
figure;
step((1/p1)*s1mf);yline(1.02);yline(0.98);yline(1+UP/100);xline(ts0);
```

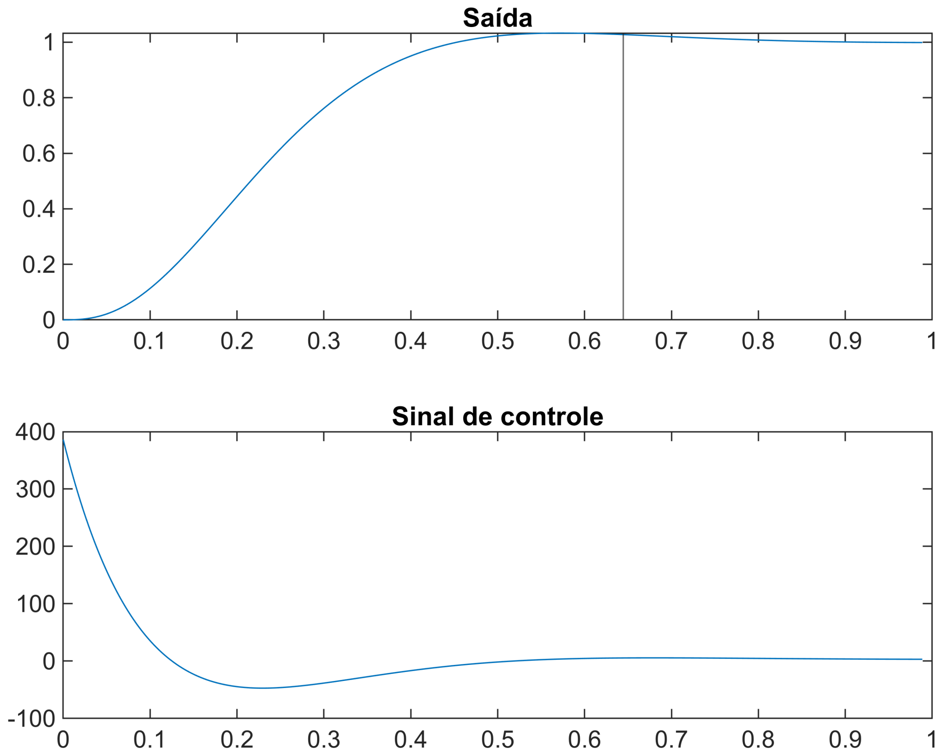



```
[y,t,x]=step((1/p1)*s1mf); % Gera os estados
sat
```

```
sat = 40
```

```
[y,t,u] = simula_t6(Gstate,K,p1,1000);
```

```
figure
subplot(211);plot(t,y);title('Saída');xline(ts0);
subplot(212);plot(t,u);title('Sinal de controle');
```



Resposta:

Para escolher os polos de malha fechada, foi usado de base um modelo de segunda ordem com wn=8.76 e zeta=0.7077 para atingir o UP = 4.3% e ts0 = 0.644s. Esse sistema possui dois polos complexos conjugados em -6.2+-6.2j , que serão dois dos polos de malha fechadas a serem escolhidos levemente ajustados para -6.5+-6.6j. Como o sistema é de ordem 3, é necessário escolher mais um polo que afete pouco a resposta, para isso foi escolhido um polo mais a esquerda, em -15. Foi necessário aumentar o sinal de referência em 1/0.0026, que é o ganho do sistema em malha fechada, para deixar o erro estacionário pequeno.

Como visto acima, após escolher esses polos de malha fechada, o sistema tem uma saída ao degrau dentro do especificado, com ts e UP menores do que o pedido. Já o sinal de controle assume valores muito altos, de até 400 e valor estacionário de 5.

Atividade 2) Nesta atividade usa-se o controlador anterior mas o sinal de controle está limitado por uma saturação **sat.** Use a função [y,t,u] = simula_t6(s1,K,p1,sat) para simulação com a saturação e obter os valores de y,u,t. Verifique se sob saturação a especificação é atendida. Caso não, altere a localização dos polos de malha fechada, lembrando que respostas mais rápidas exigem um sinal de controle de maior amplitude.

Na função simula_t6:

- s1 : sistema em variáveis de estado utilizado em malha aberta
- K: realimentação de estados calculada para s1

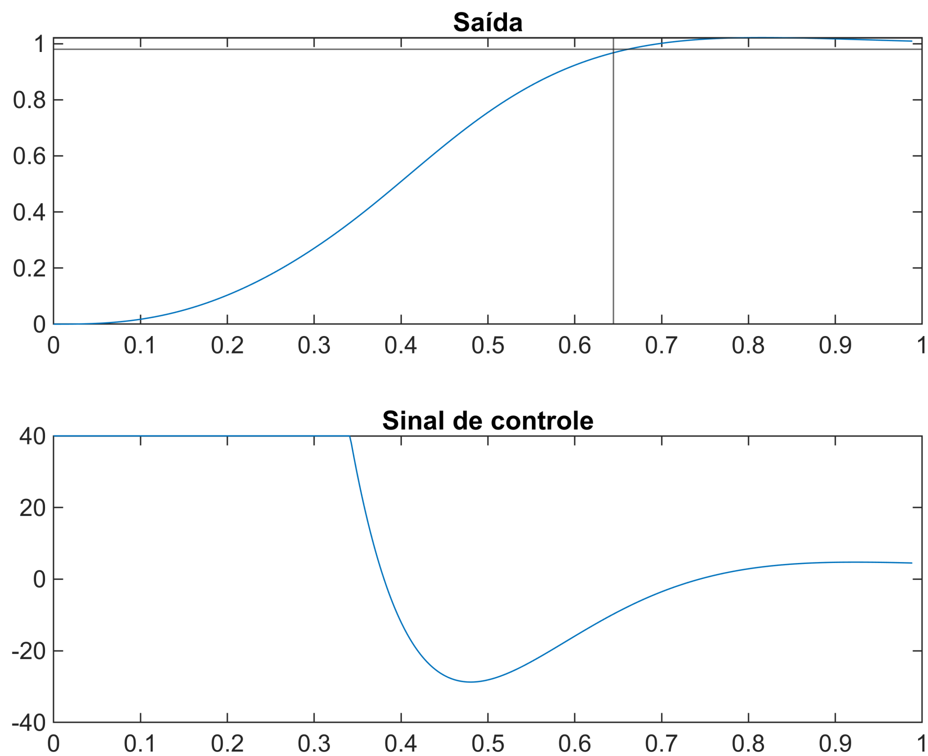
- p1: ganho multiplicado pela referência para fazer a saída tender a 1 em regime
- sat: valor máximo (em módulo) que o sinal de controle pode assumir.

Faz parte da resposta:

- Plotar a saída sem e com saturação mostrando o atendimento da especificação
- Plotar e interpretar o sinal de controle sem e com saturação
- Explicar o efeito da saturação e como foi resolvido.

```
[y,t,u] = simula_t6(Gstate,K,p1,sat);
```

```
figure
subplot(211);plot(t,y);title('Saída');xline(ts0);yline(1.02);yline(0.98);
subplot(212);plot(t,u);title('Sinal de controle');
```



Após ajustar o controlador projetado, foi possível fazer com que o sistema atenda as especificações mesmo com a saturação em 40. Podemos ver que o sinal de controle é capado quando chega em 40, mas ainda assim, vemos que o sistema chega dentro dos 2% do sinal de referência em aproximadamente 0,64 segundos, que é o tempo de estabelecimento pedido.

Atividade 3) Projetar uma realimentação integral de estados de forma que o erro para entrada degrau seja zero com a mesma especificação de UP e Ts do item 1. Neste caso, usa-se p1=1, pois a realimentação integral resolve o problema do erro em regime.

Faz parte da resposta:

- Plotar e interpretar a saída, o sinal de controle e os estados, mostrando o atendimento da especificação.
- Comentar o sinal de controle e seu valor em regime.
- Apresentar a FT de malha fechada e explicar por que o erro em regime para entrada degrau torna-se nulo.

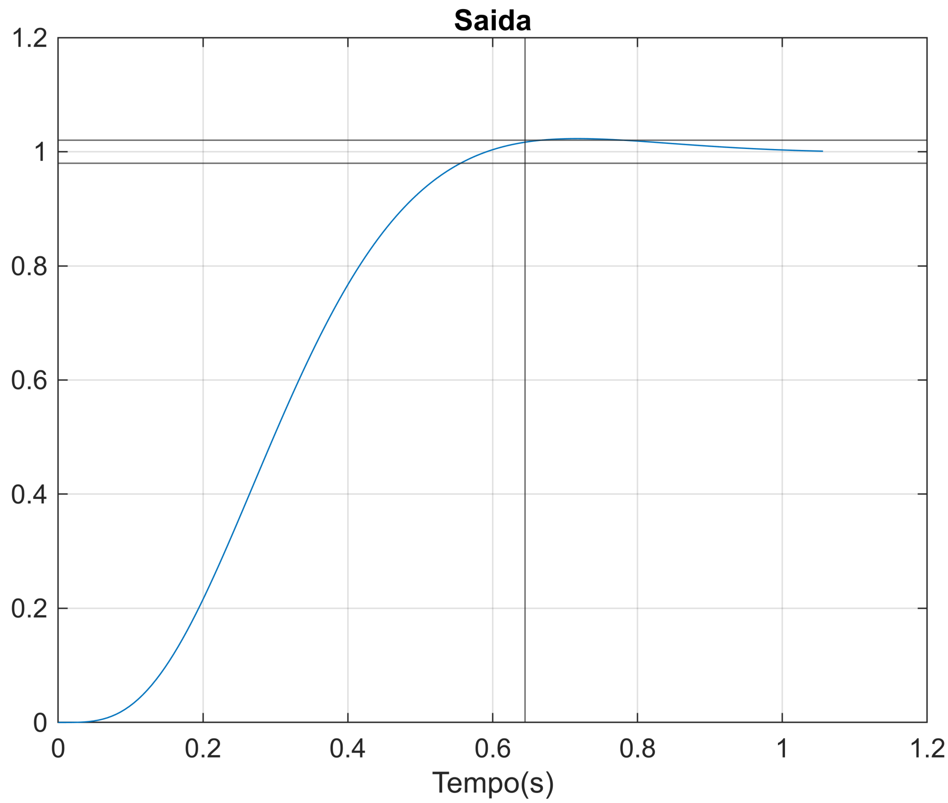
```
A1=[Gstate.A [0;0;0];[-Gstate.C 0]];
B1=[Gstate.B;0];
Br=[0;0;0;1];
C1=[Gstate.C 0];
D1=Gstate.D;
sima=ss(A1,B1,C1,D1);

polos=roots([1 2*zeta*wn wn^2]);
polos = [polos;-15];
p4=-14;

polos4=[polos;p4]
```

```
polos4 = 4×1 complex
  -6.2056 + 6.1958i
  -6.2056 - 6.1958i
 -15.0000 + 0.0000i
 -14.0000 + 0.0000i
```

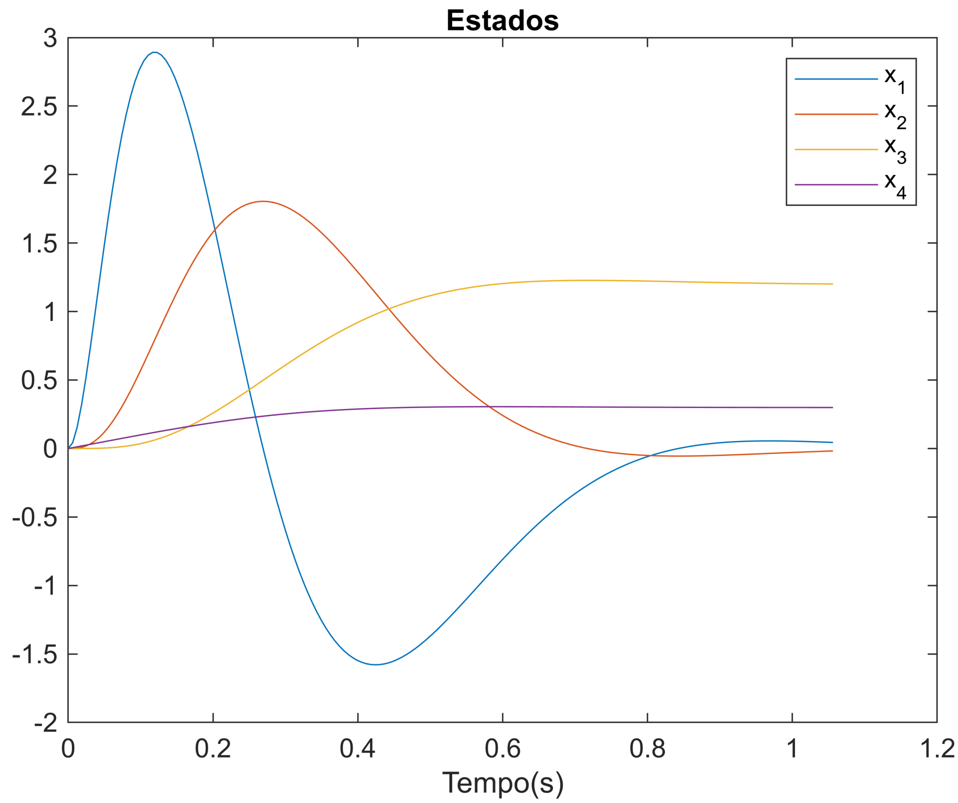
```
K1=place(A1,B1,polos4)
```

```
K1 = 1×4
10^3 ×
    0.0578    0.3104    1.2066   -4.8445
```

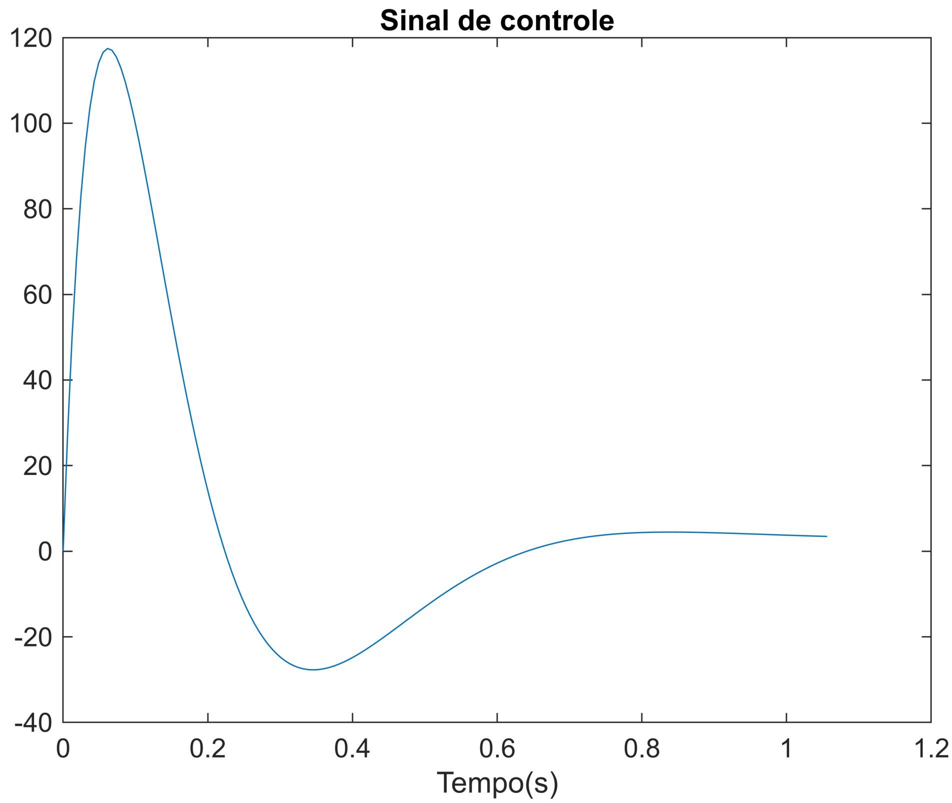
```
simf=ss(A1-B1*K1,Br,C1,D1);
[y,t,x]=step(simf);
u=-K1*(x');
figure;plot(t,y);xline(ts0);grid;
title('Saida');xlabel('Tempo(s)');yline(1.02);yline(0.98);
```




```
figure;
plot(t,x);legend('x_1','x_2','x_3','x_4');
title('Estados');xlabel('Tempo(s)');
```




```
figure;
plot(t,u);
title('Sinal de controle');
xlabel('Tempo(s)');
```




```
%FT de malha fechada
tf(simf)
```

```
ans =

                  1.615e04
  ----------------------------------------------
  s^4 + 41.41 s^3 + 646.8 s^2 + 4836 s + 1.615e04

Continuous-time transfer function.
Model Properties
```

Para a realimentação integral de estados, foram escolhidos os polos de malha fechada da função de segunda ordem, mas dois polos a esquerda em -15 e -14. A saída sem saturação desse sistema atende as especificações de tempo de estabelcimento e sobreelevação, entretando tem valores altos do sinal de controle, acima de 100.

Podemos ver que a função de transferência de malha fechada ainda é de tipo 0, entretanto, seu ganho é extremamente alto, na ordem de 10^4, portanto o erro em regime é muito próximo de zero.

Atividade 4) Nesta atividade usa-se o controlador anterior mas o sinal de controle está limitado pela saturação **sat.** Use a função [y,t,u] = simula_t6(s1a, KI,1,sat) para simulação com a saturação e obter os valores de y,u,t, sendo que s1a é o sistema aumentado e KI é a realimentação integral de estados. Verifique se sob saturação a especificação é atendida. Caso não, altere a localização dos polos de malha fechada, lembrando que respostas mais rápidas exigem um sinal de controle de maior amplitude.

Faz parte da resposta:

- Plotar a saída sem e com saturação mostrando o atendimento da especificação
- Plotar e interpretar o sinal de controle sem e com saturação
- Explicar como foi feita a escolha dos polos de malha fechada tendo em vista a saturação.

```
polos4=[-6.2+6.2i;-6.2-6.2i; -8.4; -8.5]
```

```
polos4 = 4×1 complex
  -6.2000 + 6.2000i
  -6.2000 - 6.2000i
  -8.4000 + 0.0000i
  -8.5000 + 0.0000i
```

```
K1=place(A1,B1,polos4)
```

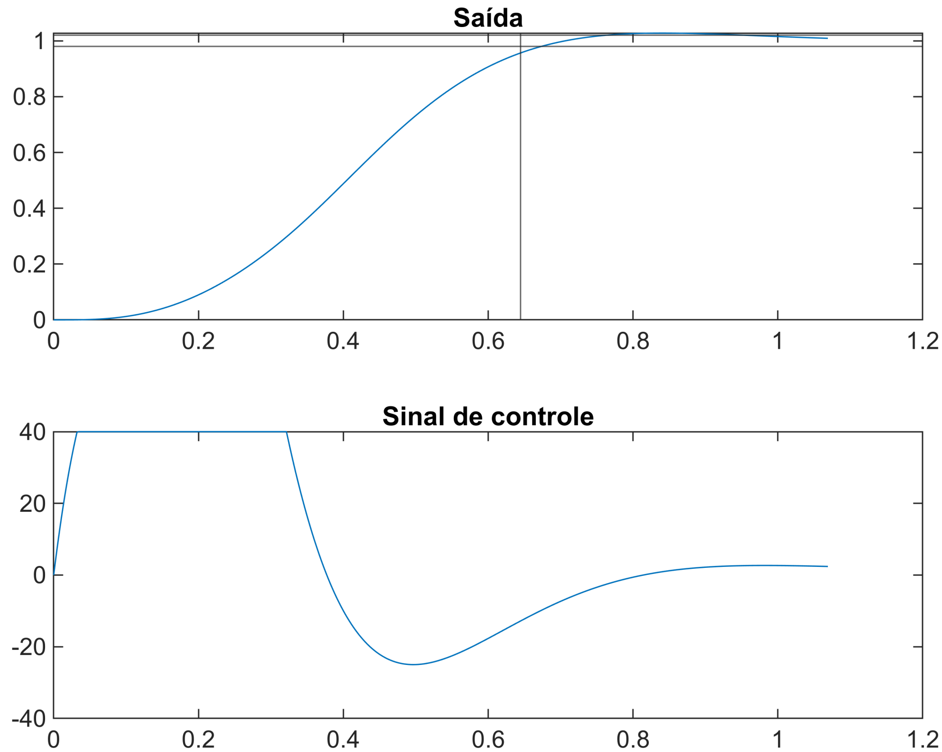
K1 = 1×4

10^3 ×

```
    0.0336    0.1659    0.5437   -1.6468
```

```
[y,t,u] = simula_t6(sima,K1,1,sat);
```

```
figure
subplot(211);plot(t,y);title('Saída');xline(ts0);yline(1.02);yline(0.98);
subplot(212);plot(t,u);title('Sinal de controle');
```



Para adequar o controlador à saturação de 40, os polos mais a esquerdas foram aproximados da origem, indo de -15 e -14 para -8.4 e -8.5. Desse modo, o sistema ficou mais lento porém com melhor resposta considerando a saturação. Vemos no gráfico que mesmo com a saturação, o tempo de estabelecimento de 0.64 segundos é alcançado.