Trabalho Computacional 2 de Sistemas Realimentados

Componentes do grupo: Amanda S. Bassani e João Paulo B. da Rocha

1.0 Inicialização

```
close all
clear all
clc
N = 11;
```

2.0 Projeto

A dinâmica do veiculo lunar (Sistemas de Controle Moderno 8ed. Dorf e Bishop. Capítulo 12 Sistemas de Controle Robusto. P12.10) é dada por:

$$G = \frac{100N}{(s + (25 - N))\left(s + \frac{25}{N}\right)} e^{-\mathrm{Ts}}$$

2.1 Projetar controlador PID, considerando dois casos, com e sem atraso de transporte. Utilizando a resposta em frequência para que o sistema tenha as seguintes especificações:

- Erro ao degrau e ao distúrbio de degrau menores ou iguais a 0.1;
- Largura de banda FTMA maior possível;

• Margem de fase maior ou igual a 60º.

Caso 1. Sem atraso de transporte. T=0.

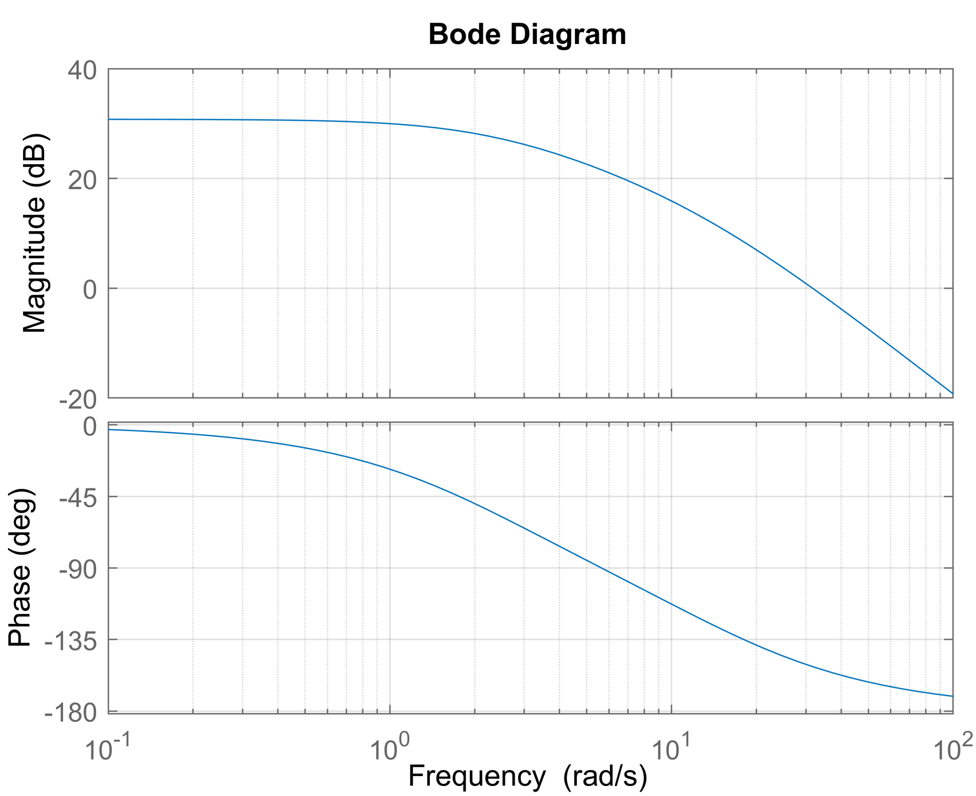
Caso 2. Com atraso de transporte. T=0.1/N.

Caso 1: T=0

```
syms s

T = 0; %Caso 1: T=0 | Caso 2: T=0.1/N
np = 100*N;
dp = conv([1 25-N],[1 25/N]);
gp = tf(np,dp,'InputDelay',T) % sistema tipo zero, erro ao degrau é diferente de zero e com atr
```

```
gp =

          1100
  ---------------------
  s^2 + 16.27 s + 31.82

Continuous-time transfer function.
```

```
figure
w = logspace(-1,2);
bode(gp,w)
grid on
```



```
% 20*log(Kp) pelo gráfico de bode vale 30.8 dB.

%-----------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
nps = poly2sym(np,s);
dps = poly2sym(dp,s);
gps = nps/dps;
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+gps);
ess = double(limit(sEs,s,0,'right'))
```

```
ess = 0.0281
```

```
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+gps);
essd = double(limit(sEd,s,0,'right'))
```

```
essd = 0.9719
```

```
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
```

Com o aumento de K, diminui o erro em regime a entrada e a margem de fase. O erro a entrada degrau da planta atende as especificações, então qualquer valor escolhido para Kp do PI vai atender também.

Etapa 1: Calcular MG, MF e LB

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gp)
```

```
Gm = Inf
Pm = 27.9459
Wgm = Inf
Wpm = 31.6788
```

```
%MF de gp = 27.95 e largura de banda = 31.68
```

Etapa 2: Nova frequência de cruzamento de ganho

```
FaseGp = 25 - 180
```

```
FaseGp = -155
```

Olhando no gráfico de bode, a nova frequencia de cruzamento de ganho (w_0dB) deve ser 36.1 rad/s e o módulo nessa frequência é -2.12

Etapa 3: Calcular o ganho proporcional do PI (K_P)

```
% de maneira que G_MA=G_P×K_P tenha a margem de fase PM proximo de 25 graus na  nova
% frequência de cruzamento de ganho (w_0dB).
syms kpi
eq = 20*log10(kpi)-2.12;
kpi = double(solve(eq))
```

```
kpi = 1.2764
```

```
% kpi encontrado foi de 1.2764
```

```
gma=gp*kpi;
[Gma,Pma,Wgma,Wpma]=margin(gma)
```

```
Gma = Inf
Pma = 24.7683
Wgma = Inf
Wpma = 36.1488
```

```
gmf = feedback(gma,1);
% A margem de fase obtida foi de 24.77.

%-----------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+gps);
ess(1) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+kpi*gps);
essd(1) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-----------------------------------------------------------------------------------------
```

Etapa 4: Escolher a frequência de corte do PI

```
% tal que o atraso de fase do PI ocorra um pouco abaixo da nova frequência de cruzamento de gar
% Em seguida, simular o PI com a planta, e verificar se a resposta é estável e rápida.

kii=kpi*Wpma/5;
pi=tf([kpi kii],[1 0])
```

```
pi =

  1.276 s + 9.228
  ---------------
         s

Continuous-time transfer function.
```

```
ggma=gp*pi;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(ggma)
```

```
Gm = Inf
Pm = 13.3366
Wgm = Inf
Wpm = 36.5229
```

```
%MF= 13.33 e LB=36.52 com PI
ggmf=feedback(ggma,1);
t=0.0:0.01:7;
y1=step(ggmf,t);
%step(ggmf); %resposta ao degrau
stepinfo(y1,t) % É rapida e estável
```

```
ans = struct with fields:
         RiseTime: 0.0304
    TransientTime: 0.8690
     SettlingTime: 0.8690
      SettlingMin: 0.5269
      SettlingMax: 1.7043
```

```
        Overshoot: 70.4252
       Undershoot: 0
             Peak: 1.7043
         PeakTime: 0.0900
```

```
%------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
pis = (kpi*s + kii)/s;

    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+pis*gps);
ess(2) = double(limit(sEs,s,0,'right'));

    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+pis*gps);
essd(2) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%------------------------------------------------------------------------------------------
```

Etapa 5: Projetar PD > 1+sKdd

```
kdd=1/Wpma;
npid=conv([kpi kii],[kdd 1]);
dpid=[1 0];
pid=tf(npid,dpid)
```

```
pid =

  0.03531 s^2 + 1.532 s + 9.228
  -----------------------------
                s

Continuous-time transfer function.
```

```
gggma=gp*pid
```

```
gggma =

  38.84 s^2 + 1685 s + 1.015e04
  -----------------------------
    s^3 + 16.27 s^2 + 31.82 s

Continuous-time transfer function.
```

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gggma)
```

```
Gm = Inf
Pm = 63.1787
Wgm = NaN
Wpm = 47.3504
```

```
gggmf=feedback(gggma,1);
y2=step(gggmf,t);
stepinfo(y2,t);

%------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
npids = poly2sym(npid,s);
```

```
dpids = poly2sym(dpid,s);
pids = npids/dpids;

    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+pids*gps);
ess(3) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+pids*gps);
essd(3) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-----------------------------------------------------------------------------------------

% Reprojetando o PD
kdd=5/Wpma;
npid=conv([kpi kii],[kdd 1]);
dpid=[1 0];
pid=tf(npid,dpid)
```

```
pid =

  0.1766 s^2 + 2.553 s + 9.228
  ----------------------------
               s

Continuous-time transfer function.
```

```
gc6 = pid;          %controlador utilizado na questão 2.6 - Armazenada em nova variável
gggma2=gp*pid
```

```
gggma2 =

  194.2 s^2 + 2808 s + 1.015e04
  -----------------------------
    s^3 + 16.27 s^2 + 31.82 s

Continuous-time transfer function.
```

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gggma2)
```

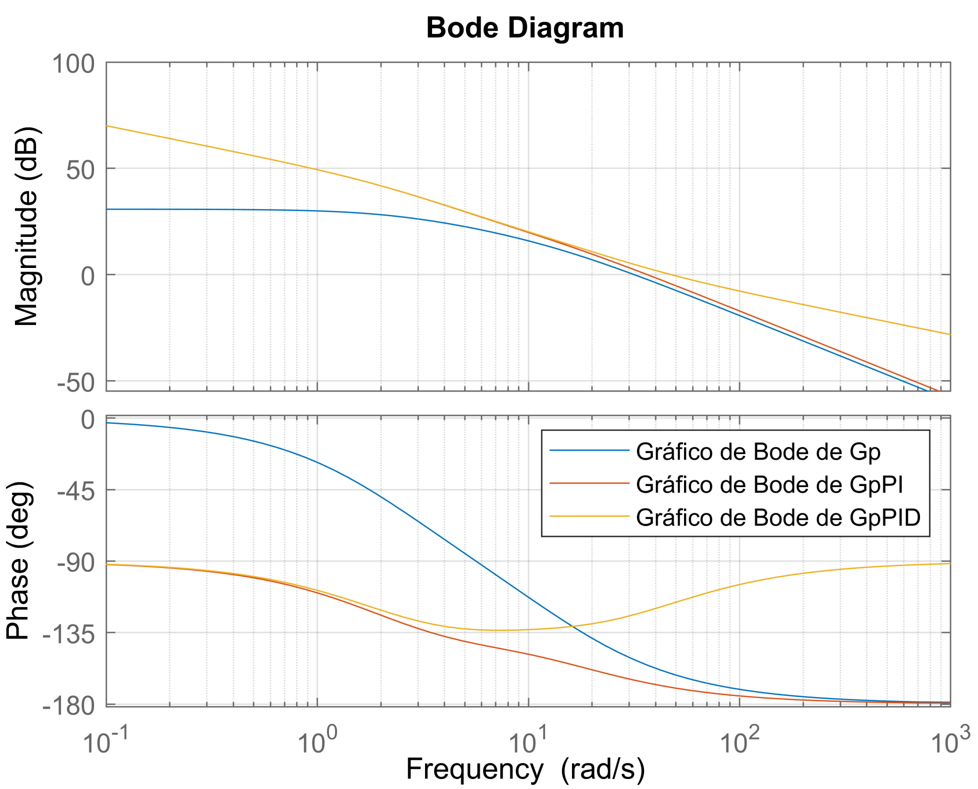
```
Gm = Inf
Pm = 90.5304
Wgm = NaN
Wpm = 193.9604
```

```
gggmf2=feedback(gggma2,1);
y3=step(gggmf2,t);
stepinfo(gggmf2)
```

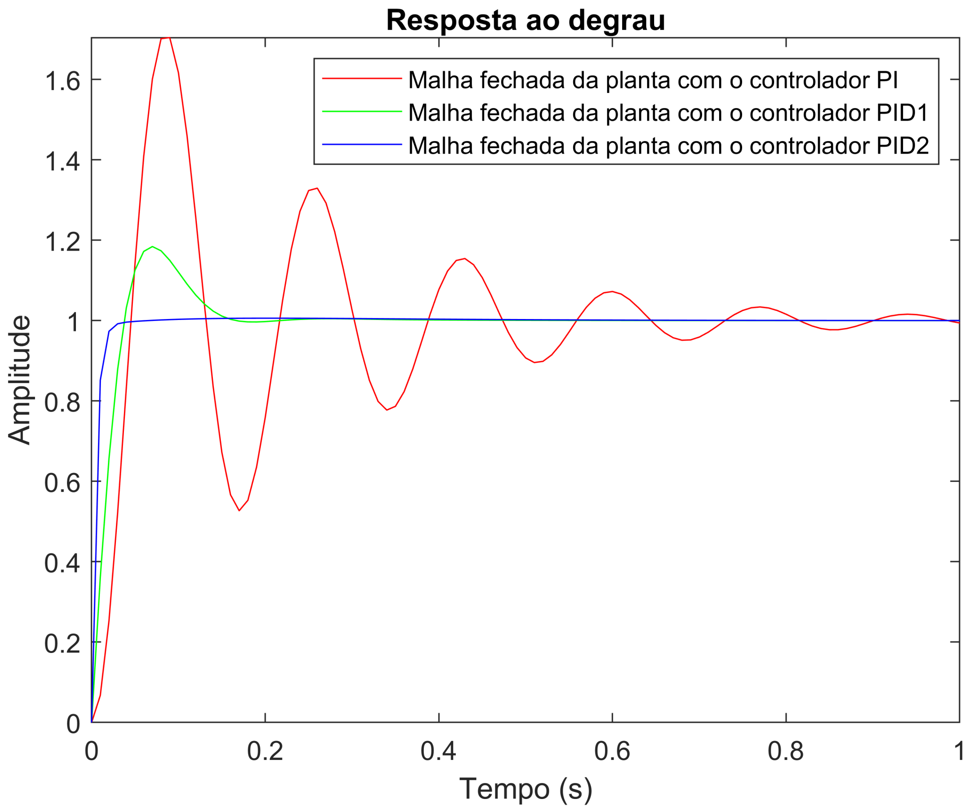
```
ans = struct with fields:
         RiseTime: 0.0116
    TransientTime: 0.0220
     SettlingTime: 0.0220
      SettlingMin: 0.9010
      SettlingMax: 0.9989
        Overshoot: 0
       Undershoot: 0
             Peak: 0.9989
         PeakTime: 0.0558
```

```
%-----------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
```

```
npids = poly2sym(npid,s);
dpids = poly2sym(dpid,s);
pids = npids/dpids;

    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+pids*gps);
ess(4) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+pids*gps);
essd(4) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-------------------------------------------------------------------------------
% Plots

figure
hold on
bode(gp);
bode(ggma);
bode(gggma);
grid on
legend('Gráfico de Bode de Gp','Gráfico de Bode de GpPI', 'Gráfico de Bode de GpPID');
```




```
figure
plot(t,y1,'r',t,y2,'g',t,y3,'b')
axis([0 1 0 inf])
title('Resposta ao degrau');
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend('Malha fechada da planta com o controlador PI','Malha fechada da planta com o controlado
```




```
MG=0;MF=0;LB=0;OS=0;RT=0;ST=0;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gma);
MG(1) = Gm;
MF(1) = Pm;
LB(1) = bandwidth(gmf);
OS(1)=stepinfo(gmf).Overshoot;
RT(1)=stepinfo(gmf).RiseTime;
ST(1)=stepinfo(gmf).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(ggma);
MG(2) = Gm;
MF(2) = Pm;
LB(2) = bandwidth(ggmf);
OS(2)=stepinfo(ggmf).Overshoot;
RT(2)=stepinfo(ggmf).RiseTime;
ST(2)=stepinfo(ggmf).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gggma);
MG(3) = Gm;
MF(3) = Pm;
LB(3) = bandwidth(gggmf);
OS(3)=stepinfo(gggmf).Overshoot;
RT(3)=stepinfo(gggmf).RiseTime;
ST(3)=stepinfo(gggmf).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gggma2);
MG(4) = Gm;
```

```
MF(4) = Pm;
LB(4) = bandwidth(gggmf2);
OS(4)=stepinfo(gggmf2).Overshoot;
RT(4)=stepinfo(gggmf2).RiseTime;
ST(4)=stepinfo(gggmf2).SettlingTime;


col_Kp = [OS(1) RT(1) ess(1) essd(1) MG(1) MF(1) LB(1)]';
col_PI = [OS(2) RT(2) ess(2) essd(2) MG(2) MF(2) LB(2)]';
col_PID1 = [OS(3) RT(3) ess(3) essd(3) MG(3) MF(3) LB(3)]';
col_PID2 = [OS(4) RT(4) ess(4) essd(4) MG(4) MF(4) LB(4)]';
col_PID_nodelay = col_PID2;
Tabela1=table(col_Kp,col_PI,col_PID1,col_PID2,'RowNames',{'Sobressinal (%)','T. Subida (s)','Er
```

Tabela1 = 7×4 table

	Gp*Kp	Gp*PI	Gp*PID1	Gp*PID2
1 Sobressinal (%)	50.1243	71.4849	18.4296	0
2 T. Subida (s)	0.0323	0.0305	0.0286	0.0116
3 Erro à entrada degrau	0.0281	0	0	0
4 Erro ao disturbio de degrau	0.7661	0	0	0
5 MG	Inf	Inf	Inf	Inf
6 MF	24.7683	13.3366	63.1787	90.5304
7 LB	56.9235	57.3283	63.0945	191.6867

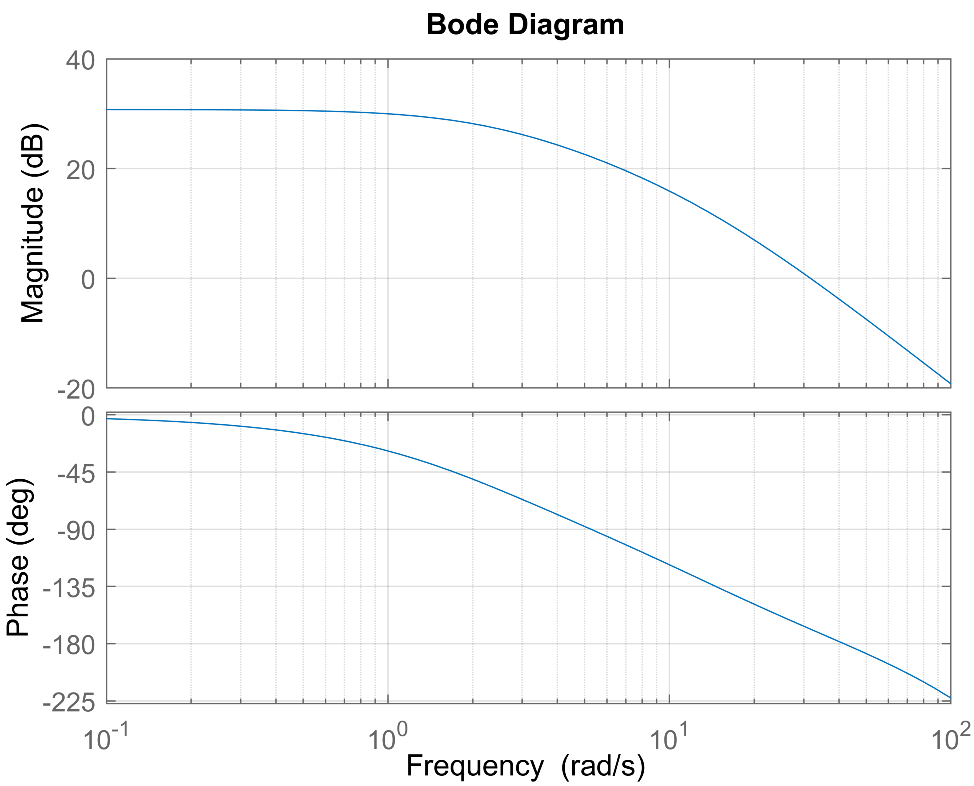
O melhor controlador obtido foi o PID2 considerando todos esses parametros mostrados na tabela, inclusive um dos critério era atender a maior largura de banda possível, o qual foi atendido com grande folga. Observa-se que a partir da inclusão da parte integrativa do controlador (polo na origem), o erro a entrada ao degrau e ao disturbio de degrau são reduzidos a zero, como esperado.

Caso 2: T=0.1/N

```
T = 0.1/N; %Caso 1: T=0 | Caso 2: T=0.1/N
np = 100*N;
dp = conv([1 25-N],[1 25/N]);
gpd = tf(np,dp,'InputDelay',T) % sistema tipo zero, erro ao degrau é diferente de zero e com at
```

```
gpd =

                             1100
  exp(-0.00909*s) * ---------------------
                    s^2 + 16.27 s + 31.82

Continuous-time transfer function.
```

```
w = logspace(-1,2);
figure
bode(gpd,w)
grid on
```




```
% 20*log(Kp) pelo gráfico de bode vale 30.8 dB.

%----------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
nps = poly2sym(np,s)*exp(-T*s);
dps = poly2sym(dp,s);
gps = nps/dps;
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+gps);
ess = double(limit(sEs,s,0,'right'))
```

```
ess = 0.0281
```

```
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+gps);
essd = double(limit(sEd,s,0,'right'))
```

```
essd = 0.9719
```

```
%----------------------------------------------------------------------------------------------

% O módulo não se altera, logo segue o modelo anterior.
% Kp = 10^(30.8/20)
% ess = 1/(Kp+1) % erro em regime ao degrau sistema tipo 0
```

Com o aumento de K, diminui o erro em regime a entrada e a margem de fase. O erro a entrada degrau da planta atende as especificações, então qualquer valor escolhido para Kp do PI vai atender também.

Etapa 1: Calcular MG, MF e LB

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gpd);
Pm
```

```
Pm = 11.4453
```

```
Wpm
```

```
Wpm = 31.6788
```

```
%MF de gp = 11.44 e largura de banda = 31.68
```

Etapa 2: Nova frequência de cruzamento de ganho

```
FaseGp = 25 - 180;
% Olhando no gráfico de bode, a nova frequencia de cruzamento de ganho (w_0dB)
% deve ser aproximadamente 24.4 rad/s e o módulo nessa frequência é 4.04
```

Etapa 3: Calcular o ganho proporcional do PI (K_P)

```
% de maneira que G_MA=G_P×K_Ptenha a margem de fase PM proximo de 25 graus
% na  nova frequência de cruzamento de ganho (w_0dB).

syms kpi
eq = 20*log10(kpi)+4.04;
kpi = double(solve(eq))
```

```
kpi = 0.6281
```

```
gma=gpd*kpi;
[Gma,Pma,Wgma,Wpma]=margin(gma);

gmf = feedback(gma,1);
%----------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+gps);
ess(1) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+kpi*gps);
essd(1) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%----------------------------------------------------------------------------------------
```

Etapa 4: Escolher a frequência de corte do PI

```
% tal que o atraso de fase do PI ocorra um pouco abaixo da nova frequência de cruzamento de gan
% Em seguida, simular o PI com a planta, e verificar se a resposta é estável e rápida.

kii=kpi*Wpma/5;
pi=tf([kpi kii],[1 0])
```

```
pi =
```

```
  0.6281 s + 3.069
  ----------------
         s

Continuous-time transfer function.
```

```
ggma=gpd*pi
```

```
ggma =

                             690.9 s + 3376
  exp(-0.00909*s) * -------------------------
                    s^3 + 16.27 s^2 + 31.82 s

Continuous-time transfer function.
```

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(ggma)
```

```
Gm = 1.8271
Pm = 10.7464
Wgm = 34.3215
Wpm = 24.7003
```

```

ggmf=feedback(ggma,1);

t=0.0:0.01:7;
y1 = step(ggmf,t); % resposta ao degrau
stepinfo(y1,t) % É rapida e estável
```

```
ans = struct with fields:
         RiseTime: 0.0429
    TransientTime: 1.6313
     SettlingTime: 1.6313
      SettlingMin: 0.4439
      SettlingMax: 1.7846
        Overshoot: 78.4617
       Undershoot: 0
             Peak: 1.7846
         PeakTime: 0.1300
```

```

%-----------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
pis = (kpi*s + kii)/s;

    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+pis*gps);
ess(2) = double(limit(sEs,s,0,'right'));

    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+pis*gps);
essd(2) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-----------------------------------------------------------------------------------------
```

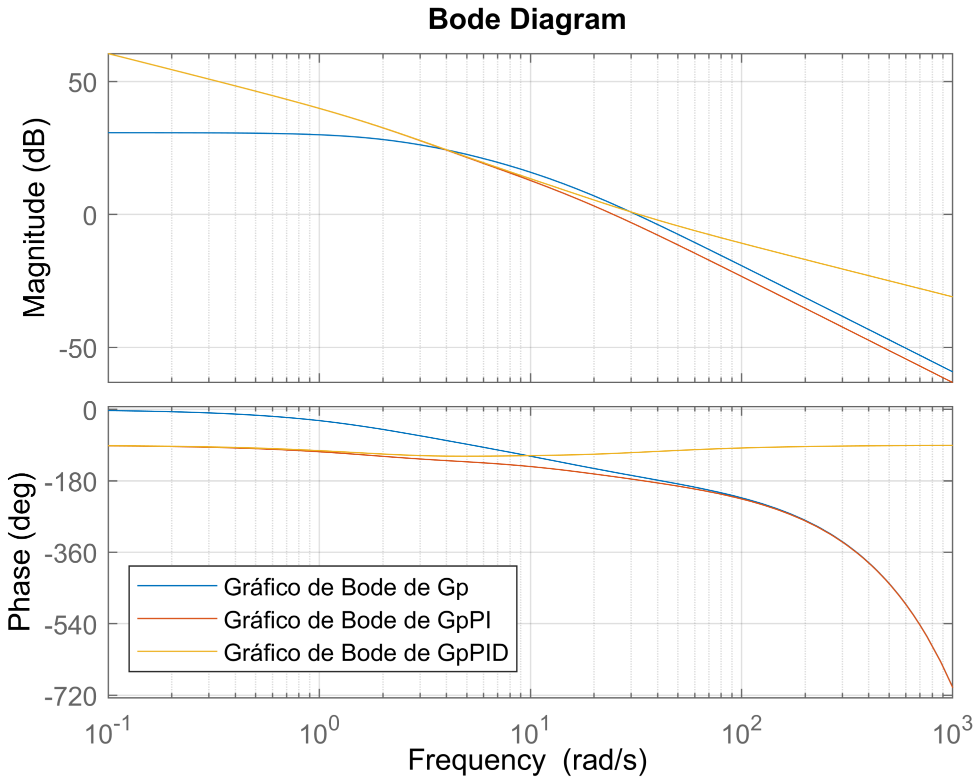
Etapa 5: Projetar PD > 1+sKdd

```
kdd=1/Wpma;
npid=conv([kpi kii],[kdd 1]);
```

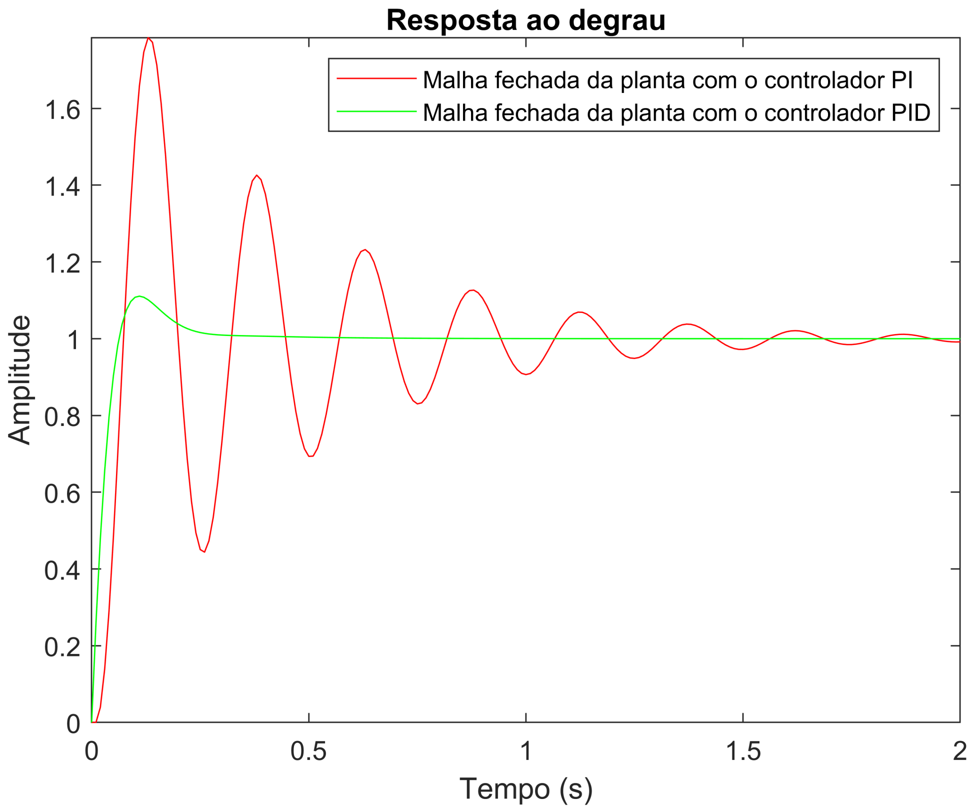
```
dpid=[1 0];
pid=tf(npid,dpid);
gggma=gp*pid;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gggma)
```

```
Gm = Inf
Pm = 71.9005
Wgm = NaN
Wpm = 32.7266
```

```

gggmf=feedback(gggma,1);
y2=step(gggmf,t);
stepinfo(y2,t);

%------------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
npids = poly2sym(npid,s);
dpids = poly2sym(dpid,s);
pids = npids/dpids;

    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+pids*gps);
ess(3) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+pids*gps);
essd(3) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%------------------------------------------------------------------------------------------------

%-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-
% Plots

figure
hold on
bode(gpd);
bode(ggma);
bode(gggma);
grid on
legend('Gráfico de Bode de Gp','Gráfico de Bode de GpPI', 'Gráfico de Bode de GpPID','Position
```




```
figure
plot(t,y1,'r',t,y2,'g')
axis([0 2 0 inf])
title('Resposta ao degrau');
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend('Malha fechada da planta com o controlador PI','Malha fechada da planta com o controlado
```




```
MG=0;MF=0;LB=0;OS=0;RT=0;ST=0;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gma);
MG(1) = Gm;
MF(1) = Pm;
LB(1) = bandwidth(gmf);
OS(1)=stepinfo(gmf).Overshoot;
RT(1)=stepinfo(gmf).RiseTime;
ST(1)=stepinfo(gmf).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(ggma);
MG(2) = Gm;
MF(2) = Pm;
LB(2) = bandwidth(ggmf);
OS(2)=stepinfo(ggmf).Overshoot;
RT(2)=stepinfo(ggmf).RiseTime;
ST(2)=stepinfo(ggmf).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gggma);
MG(3) = Gm;
MF(3) = Pm;
LB(3) = bandwidth(gggmf);
OS(3)=stepinfo(gggmf).Overshoot;
RT(3)=stepinfo(gggmf).RiseTime;
ST(3)=stepinfo(gggmf).SettlingTime;


col_Kp = [OS(1) RT(1) ess(1) essd(1) MG(1) MF(1) LB(1)]';
```

```
col_PI = [OS(2) RT(2) ess(2) essd(2) MG(2) MF(2) LB(2)]';
col_PID = [OS(3) RT(3) ess(3) essd(3) MG(3) MF(3) LB(3)]';
Tabela1=table(col_Kp,col_PI,col_PID,'RowNames',{'Sobressinal (%)','T. Subida (s)','Erro à entra
```

Tabela1 = 7×3 table

	Gp*Kp	Gp*PI	Gp*PID
1 Sobressinal (%)	55.4731	77.6577	11.0855
2 T. Subida (s)	0.0450	0.0426	0.0461
3 Erro à entrada degrau	0.0281	0	0
4 Erro ao disturbio de degrau	1.5221	0	0
5 MG	2.6539	1.8271	Inf
6 MF	22.4051	10.7464	71.9005
7 LB	40.1701	39.7858	40.8244

O controlador obtido PID atendeu todas as especificações estabelecidas. Como o sistema possui atraso, um alto ganho para aumentar a largura de banda iria prejudicar muito a margem de fase para que depois o controlador derivativo conseguisse corrigir essa queda na margem de fase e se pudesse conseguir uma margem de fase maior que 60. Por isso, em geral, os sistemas com atraso apresentam baixas largura de banda para que possuam uma boa margem de fase.

2.2 Para o caso em que T=0 seg, multiplique o controlador projetado pela FT G do veículo lunar e determine a equação de estados deste sistema em malha aberta. Em seguida, desenvolva um código no matlab, semelhante ao fornecido para simular o avião (programa "simulaviao.m" fornecido em anexo), para simular o sistema de controle de direção do veículo lunar em malha fechada no espaço de estados. Considere nas simulações os seguintes casos:

Caso 1. Sistema de controle sem o ruído de medição.

Usando o Controlador PID:

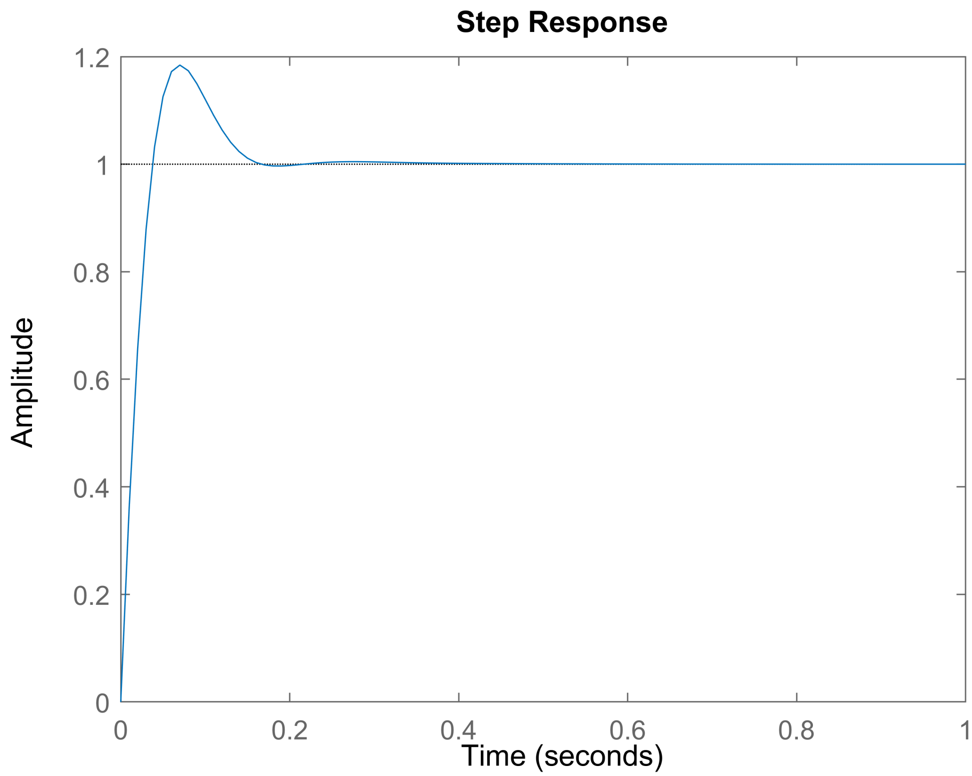
Usando a função transferência de malha aberta encontrada no item 1.1 ao multiplicar o controlador PID1 pela planta:

```
num = [38.84 1685 10150];
den = [1 16.27 31.82 0];

gg2 = tf(num,den)
```

```
gg2 =

  38.84 s^2 + 1685 s + 10150
  --------------------------
  s^3 + 16.27 s^2 + 31.82 s

Continuous-time transfer function.
```

O que se espera após os passos que se seguem é obter uma curva nesse estilo:

```
gg2f = feedback(gg2,1);
figure
t=0.0:0.01:1;
step(gg2f,t)
```



Utilizando o modelo de formato de entrada com ação à frente (feedforward):

Usando a função de malha aberta do controlador vezes a G da planta, identificamos seus coeficientes:

$$C(s)G_p(s) = \frac{38.84s^2 + 1685s + 10150}{s^3 + 16,27s^2 + 31,82s} = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^3 + a_2s^2 + a_1s}$$

```
b2 = 38.84;
b1 = 1685;
b0 = 10150;
a2 = 16.27;
a1 = 31.82;
```

Para montar o diagrama de fluxo de sinais, dividimos numerador e denominador por s^3:

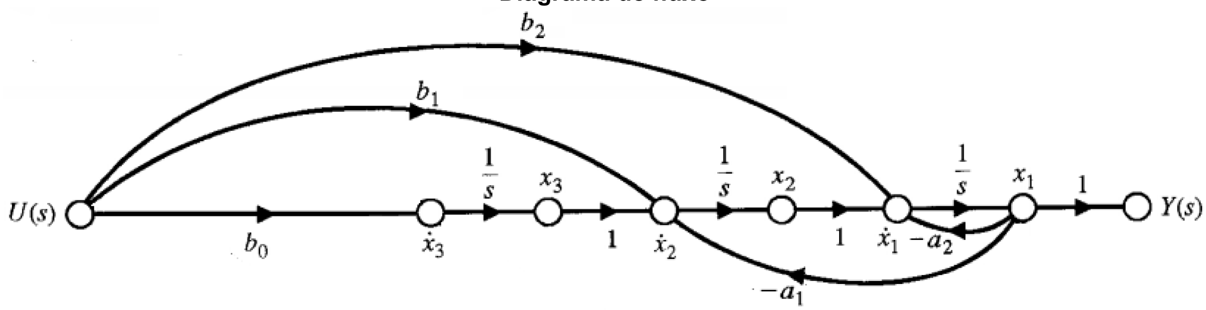
$$C(s)G_p(s) = \frac{b_2s^{-1} + b_1s^{-2} + b_0s^{-3}}{1 + a_2s^{-1} + a_1s^{-2}}$$

O diagrama de fluxo terá 3 caminhos diretos e 2 loops de realimentação:

```
figure
```

```
imshow("diagrama_fluxo_item2.png")
title('Diagrama de fluxo')
```

Diagrama de fluxo



A partir do diagrama de fluxo, obtem-se o sistema de equações diferenciais de primeira ordem:

$\dot{x_1} = -a_2 x_1 + x_2 + b_2 u$ $\dot{x_2} = -a_1 x_1 + x_3 + b_1 u$ $\dot{x_3} = b_0 u$

Portanto as matrizes A, B, C e D serão:

```
global F A B
A = [-a2 1 0; -a1 0 1; 0 0 0];
B = [b2; b1; b0];
C = [1 0 0];
D = 0;
```

A confirmação de que o métodos foi feito corretamente pode se dar utilizando o comando ss2tf e encontrando a mesma função transferencia usada no processo inicial:

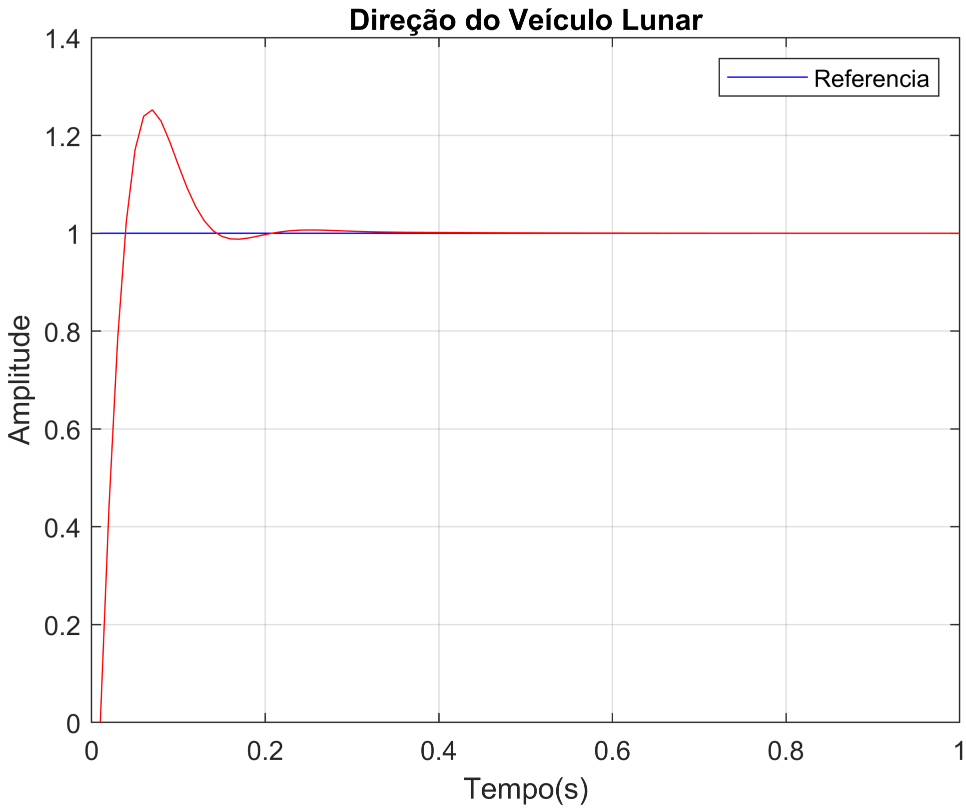
```
[num,den] = ss2tf(A,B,C,D);
tf(num,den)
```

```
ans =

  38.84 s^2 + 1685 s + 1.015e04
  -----------------------------
    s^3 + 16.27 s^2 + 31.82 s

Continuous-time transfer function.
```

Realimentando o sistema utilizando como referência o código simulaviao.m

```
% vetor estados inicial
Xs = [0 0 0];
F = 0;

% Inicialização de variáveis
tfinal = 1; % Tempo total de simulação
ref = 1; % Referência
passo = 0;
tempo = 0;
```

```
dT = 0.01; % tempo de amostragem

while (tempo < tfinal)

    passo = passo + 1;
    ts = passo*dT;

    % simulação da equação diferencial
    [T1,X] = ode45('modelo_linear3',[tempo ts], Xs);

    % Armazenamento de variaveis
    n = length(T1);
    tempo = ts;
    Xs = X(n,:);
    F = ref-C*Xs';

    vetout(passo,:) = [X(n,1) X(n,2) X(n,3)];
    vettime(passo) = T1(n,:);
    vetvref(passo,:) = ref;

end

% Plotagem dos gráficos
figure
plot(vettime, vetvref,'b');
hold on;
plot(vettime,vetout(:,1),'r');
xlabel('Tempo(s)');title('Direção do Veículo Lunar');
ylabel ('Amplitude');
legend('Referencia');
grid;
```




```
y = vetout(:,1);
stepinfo(y,vettime)
```

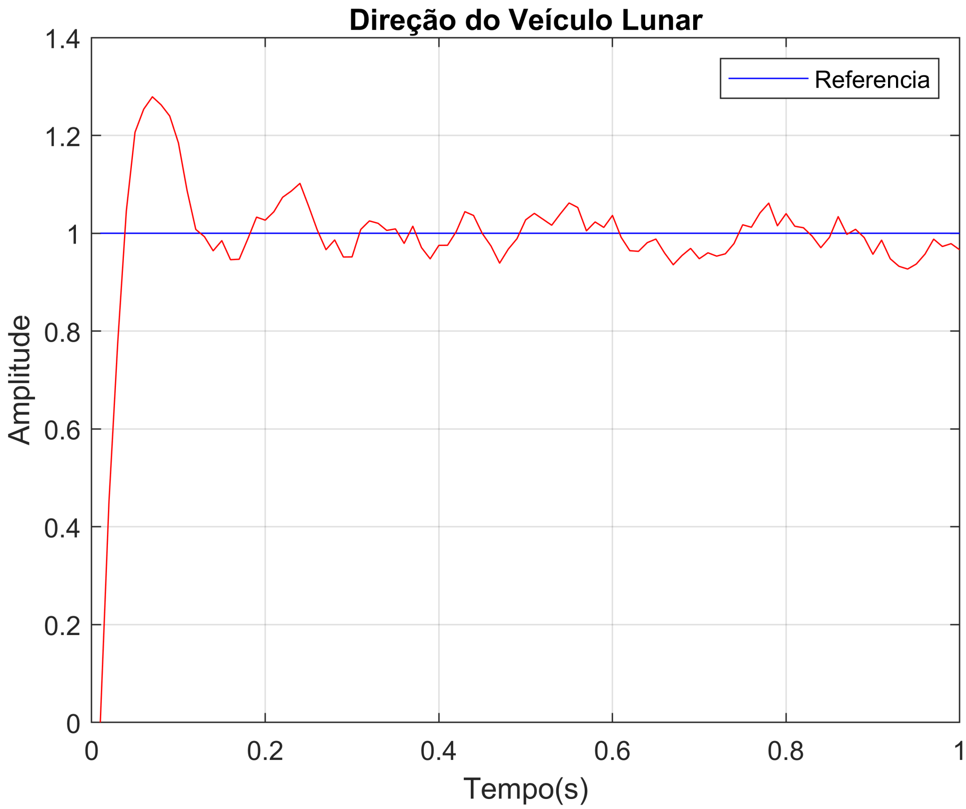
```
ans = struct with fields:
           RiseTime: 0.0226
      TransientTime: 0.1325
       SettlingTime: 0.1325
        SettlingMin: 0.9879
        SettlingMax: 1.2523
          Overshoot: 25.2273
         Undershoot: 0
               Peak: 1.2523
           PeakTime: 0.0700
```

Caso 2. Adicionar ruído Gaussiano na saída do sistema de controle, referente ao sensor do veículo lunar.

Para simular com ruído, adicionamos à saída o ruído utilizando o comando rand, dessa forma o valor realimentado no processo será alterado.

```
% vetor estados inicial
Xs = [0 0 0];
F = 0;

% Inicialização de variáveis
tfinal = 1; % Tempo total de simulação
ref = 1; % Referência
passo = 0;
tempo = 0;
```

```
dT = 0.01; % tempo de amostragem

while (tempo < tfinal)

    passo = passo + 1;
    ts = passo*dT;

    % simulação da equação diferencial
    [T1,X] = ode45('modelo_linear3',[tempo ts], Xs);

    % Armazenamento de variaveis
    n = length(T1);
    tempo = ts;
    Xs = X(n,:);
    F = ref-(C*Xs'-0.1+(0.1+0.1)*rand(1));

    vetout(passo,:) = [X(n,1) X(n,2) X(n,3)];
    vettime(passo) = T1(n,:);
    vetvref(passo,:) = ref;

end

% Plotagem dos gráficos
figure
plot(vettime, vetvref,'b');
hold on;
plot(vettime,vetout(:,1),'r');
xlabel('Tempo(s)');title('Direção do Veículo Lunar');
ylabel ('Amplitude');
legend('Referencia');
grid;
```



2.3 Compare a resposta ao degrau obtida usando o simulador desenvolvido no item 1.2 (sem o ruído de medição), com a resposta ao degrau (sobressinal, tempo de subida) obtida no item 1.1 para T=0 s.

A função de transferência da planta que descreve a dinâmica do veículo lunar, foi submetida a um controlador PID na questão 1 que melhora muito seu desenpenho, considerando as condições de projeto do controlador Erro a entrada ao degrau e erro ao distúrbio de degrau menor que 0.1, largura de banda em malha aberta maior possível e a margem de fase igual ou superior a 60º.

Para a função de malha aberta da planta do veículo lunar, e o controlador projetado, foi desenvolvido atraves de simulação um sistema que controla a direção do veículo lunar em malha fechada no espaço de estados.

Ambos projetos proporcionaram uma resposta, que a seguir será avaliado item a item suas características transitórias e erro em regime.

Considerando a Sobreelevação:

PID: 0%

Simulador: 25.22%

Considerando o tempo de subida:

PID: 0.0116 s

Simulador:0.0226 s

Considerando o tempo de estabelecimento:

PID: 0.022 s

Simulador:0.1325 s

Considerando as características transitórias das respostas, além da análise gráfica, fica evidente que o controlador PID tem um resposta melhor em relação a simulação realizada no item 2.2 sem ruído. É importante comentar a grande diferença observada da sobreelevação da simulação do item 2.2 em 25%, que em geral é muito alta para os tipos de respostas estudadas, entretanto depende muito das demandas e condições de projeto.

2.4 Controlador Avanço-Atraso

Caso 1: T=0

Etapa 1: Determinar ganho k1 para atender as especificações do erro em regime e da largura de banda

```
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
T = 0;
nps = poly2sym(np,s);
dps = poly2sym(dp,s);
gps = nps/dps;
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+gps);
ess = double(limit(sEs,s,0,'right'));
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+gps);
essd = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
% 20*log(Kp) pelo gráfico de bode vale 30.8 dB.
Kp = 10^(30.8/20)
```

```
Kp = 34.6737
```

```
ess = 1/(Kp+1) % erro em regime ao degrau sistema tipo 0
```

```
ess = 0.0280
```

Com o aumento de K, diminui o erro em regime a entrada e a margem de fase. O erro ao disturbio será reduzido em passos adiante quando pudermos aumentar a margem de fase.

```
% Calculo de k para atender erro em regime
syms k_at
```

```
sEs = 1/(1+k_at*gps);
eq = limit(sEs,s,0,'right') == 0.1;
k_atraso = double(solve(eq))
```

```
k_atraso = 0.2603
```

```
sEd = gps/(1+k_at*gps);
eq = limit(sEd,s,0,'right') == 0.1;
k_atraso = double(solve(eq))
```

```
k_atraso = 9.9711
```

```
k_atraso = 12;
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)

    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+k_atraso*gps);
ess(1) = double(limit(sEs,s,0,'right'))
```

```
ess = 0.0024
```

```
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+k_atraso*gps);
essd(1) = double(limit(sEd,s,0,'right'))
```

```
essd = 0.0831
```

```
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
```

Etapa 2: Projetar o controlador atraso de fase

Passo 2: MG, MF, frequências de cruzamento de ganho e de fase e a largura de banda

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(k_atraso*gp);
Pm
```

```
Pm = 8.1116
```

```
Wpm
```

```
Wpm = 114.4503
```

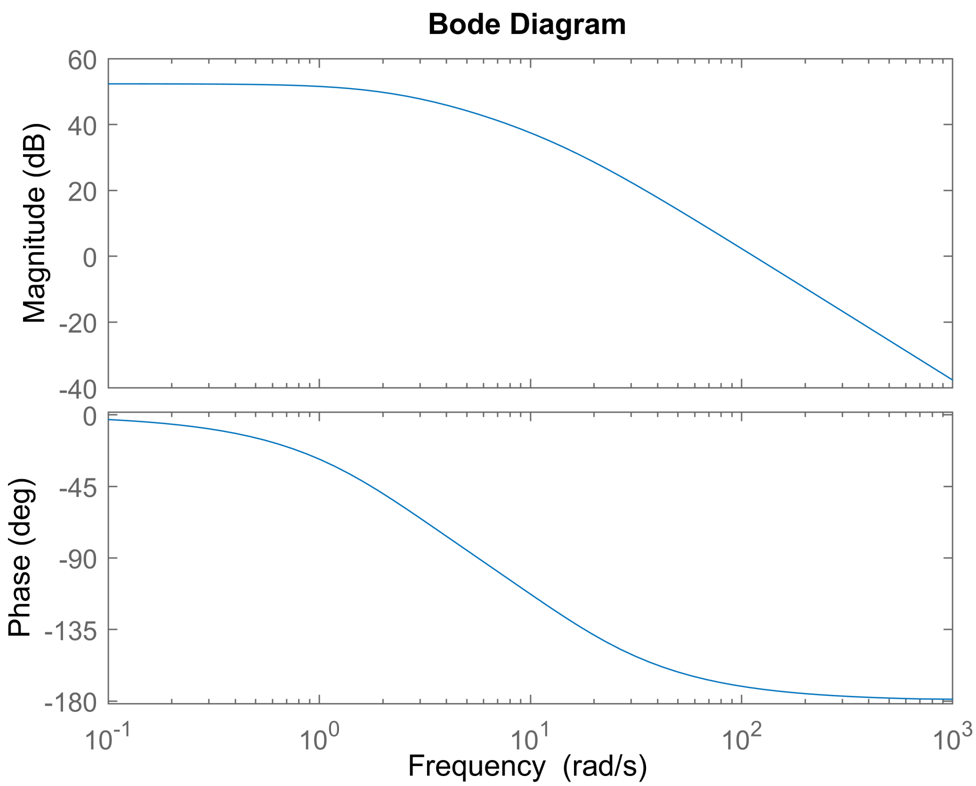
```
% MF de gp = 8.11 e largura de banda = 114.45
```

Passo 3: Nova frequência de cruzamento de ganho

```
FaseGp = 20 - 180
```

```
FaseGp = -160
```

```
figure
bode(k_atraso*gp)
```




```
% Olhando no gráfico de bode, a nova frequencia de cruzamento de ganho (w_0dB)
% deve ser 46.05 rad/s e o módulo nessa frequência é 15,5.
mod = 15.5;
```

Passo 4: Obter a constante alpha resolvendo a equação

```
syms alpha1
eq = 20*log10(mod) + 20*log10(alpha1);
alpha1 = double(solve(eq))
```

```
alpha1 = 0.0645
```

Passo 5: Escolher a frequência de corte do zero do compensador uma década abaixo (46.06/10 = 4.6) da nova frequência de cruzamento de ganho e encontrar a frequência de corte do polo do compensador

```
syms tau1
eq = 1/(alpha1*tau1) - 4.6;
tau1 = double(solve(eq))
```

```
tau1 = 3.3696
```

```
1/(alpha1*tau1) % freq de corte do zero do compensador
```

```
ans = 4.6000
```

```
1/(tau1) % freq de corte do polo do compensador
```

```
ans = 0.2968
```

```
syms jw
g_atrasos = k_atraso*(1+jw*alpha1*tau1)/(1+jw*tau1);

%------------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
g_atrasos = subs(g_atrasos,jw,s);
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+g_atrasos*gps);
ess(1) = double(limit(sEs,s,0,'right'));

    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+g_atrasos*gps);
essd(1) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%------------------------------------------------------------------------------------------------
[num,den]=numden(g_atrasos);
g_atraso = tf(sym2poly(num),sym2poly(den))
```

```
g_atraso =

  120 s + 552
  -----------
  155 s + 46

Continuous-time transfer function.
```

Etapa 3:

```
gma_linha = g_atraso * gp;
[Gm,Pm1,Wgm,Wpm]=margin(gma_linha)
```

```
Gm = Inf
Pm1 = 22.6808
Wgm = Inf
Wpm = 27.7109
```

```
gmf_linha = feedback(gma_linha,1);
y1 = 0;
t=0:.001:1;
y1 = step(gmf_linha,t);
% Margem de fase alcançada foi de 22.68
```

Etapa 4:

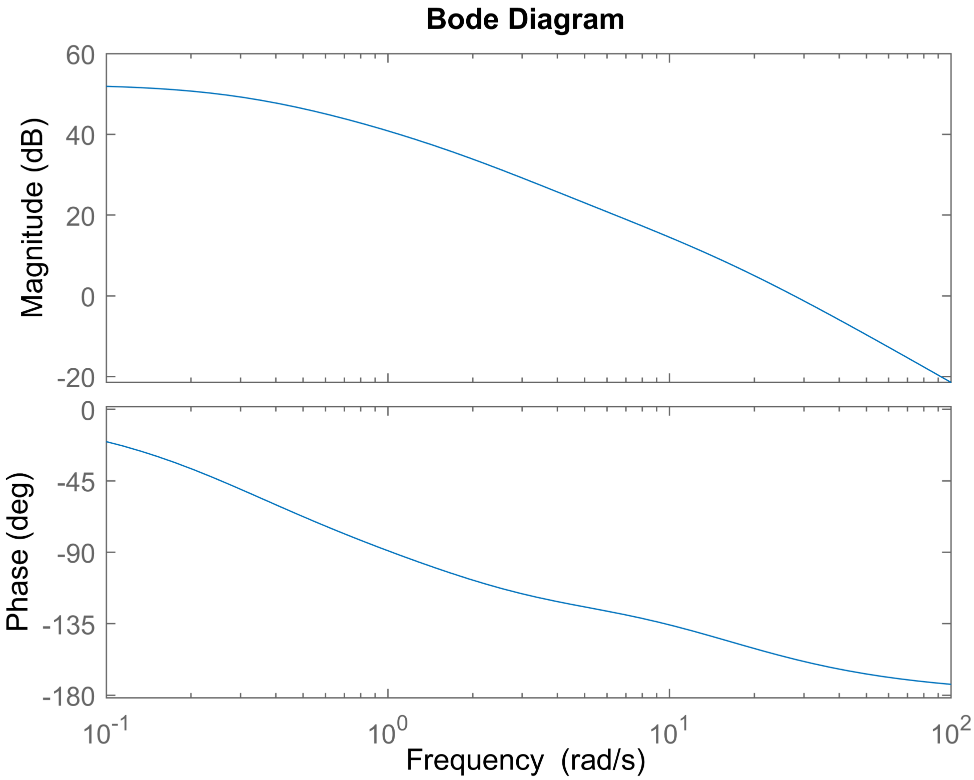
```
k_avanco = 1;
FaseGma = 70 - Pm1; % margem de fase especificada 60, +10 de folga
syms alpha2
eq=(alpha2-1)/(2*sqrt(alpha2))==tand(FaseGma);
alpha2 = double(solve(eq))
```

```
alpha2 = 6.5512
```

```
% 5:
mod = -10*log10(alpha2)
```

```
mod = -8.1632
```

```
figure
bode(gma_linha,w)
```




```
% Olhando no diagrama de Bode, wm será 45,5 rad/s.
wm = 45.5;
% 6:
tau2 = 1/(wm*sqrt(alpha2));
1/(alpha2*tau2) % freq de corte do zero do compensador
```

```
ans = 17.7767
```

```
1/(tau2) % freq de corte do polo do compensador
```

```
ans = 116.4588
```

```
g_avancos = k_avanco*(1+jw*alpha2*tau2)/(1+jw*tau2);

%------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
g_avancos = subs(g_avancos,jw,s);
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+g_avancos*g_atrasos*gps);
ess(2) = double(limit(sEs,s,0,'right'));

    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+g_avancos*g_atrasos*gps);
essd(2) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%------------------------------------------------------------------------------------------
```

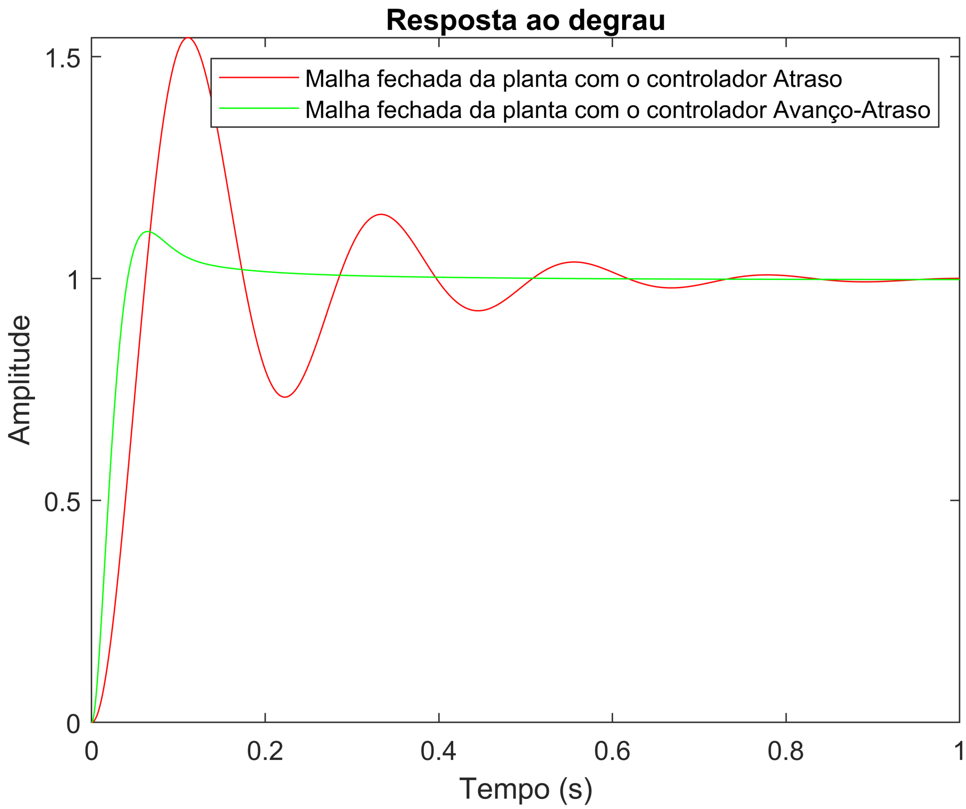
```
[num,den]=numden(g_avancos);
g_avanco = tf(sym2poly(num),sym2poly(den))
```

```
g_avanco =

  9.128e30 s + 1.623e32
  ---------------------
  1.393e30 s + 1.623e32

Continuous-time transfer function.
```

```
gma = g_avanco * g_atraso * gp;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gma)
```

```
Gm = Inf
Pm = 61.7659
Wgm = Inf
Wpm = 45.8888
```

```
gmf = feedback(gma,1);
up5(2) = stepinfo(gmf).Overshoot; %vetor para questão 5
tr5(2) = stepinfo(gmf).RiseTime;  %vetor para questão 5
t=0:.001:1;
y2 = 0;
y2 = step(gmf,t);
%-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-
% Plots
figure
plot(t,y1,'r',t,y2,'g')
axis([0 1 0 inf])
title('Resposta ao degrau');
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend('Malha fechada da planta com o controlador Atraso','Malha fechada da planta com o contro
```




```
MG=0;MF=0;LB=0;OS=0;RT=0;ST=0;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gma_linha);
MG(1) = Gm;
MF(1) = Pm;
LB(1) = bandwidth(gmf_linha);
OS(1)=stepinfo(gmf_linha).Overshoot;
RT(1)=stepinfo(gmf_linha).RiseTime;
ST(1)=stepinfo(gmf_linha).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gma);
MG(2) = Gm;
MF(2) = Pm;
LB(2) = bandwidth(gmf);
OS(2)=stepinfo(gmf).Overshoot;
RT(2)=stepinfo(gmf).RiseTime;
ST(2)=stepinfo(gmf).SettlingTime;

col_atraso = [OS(1) RT(1) ess(1) essd(1) MG(1) MF(1) LB(1)]';
col_avancoatraso = [OS(2) RT(2) ess(2) essd(2) MG(2) MF(2) LB(2)]';
col_avancoatraso_nodelay = col_avancoatraso;
Tabela1=table(col_atraso,col_avancoatraso,'RowNames',{'Sobressinal (%)','T. Subida (s)','Erro à
```

Tabela1 = 7×2 table

	Gp*Atraso	Gp*Avanço-Atraso
1 Sobressinal (%)	54.5782	10.8817

	Gp*Atraso	Gp*Avanço-Atraso
2 T. Subida (s)	0.0413	0.0278
3 Erro à entrada degrau	0.0024	0.0024
4 Erro ao disturbio de degrau	0.0831	0.0831
5 MG	Inf	Inf
6 MF	22.6808	61.7659
7 LB	43.8205	72.3659

O controlador avanço-atraso obtido atendeu as especificações de projeto em relação aos erros e a margem de fase, inclusive foi obtida uma alta largura de banda.

Caso 2: T=0.1/N

Etapa 1: Determinar ganho k1 para atender as especificações do erro em regime e da largura de banda

```
% bode(gpd)
% 20*log(Kp) pelo gráfico de bode vale 30.8 dB.
%------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
T = 0.1/N; %Caso 1: T=0 | Caso 2: T=0.1/N
nps = poly2sym(np,s)*exp(-T*s);
dps = poly2sym(dp,s);
gps = nps/dps;
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+gps);
ess = double(limit(sEs,s,0,'right'))
```

```
ess = 0.0281
```

```
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+gps);
essd = double(limit(sEd,s,0,'right'))
```

```
essd = 0.9719
```

```
%------------------------------------------------------------------------------------------
% Com o aumento de K, diminui o erro em regime e a margem de fase e aumenta a largura de banda

% Calculo de k para atender erro em regime
syms k_at

sEs = 1/(1+k_at*gps);
eq = limit(sEs,s,0,'right') == 0.1;
k_atraso = double(solve(eq))
```

```
k_atraso = 0.2603
```

```
sEd = gps/(1+k_at*gps);
eq = limit(sEd,s,0,'right') == 0.1;
k_atraso = double(solve(eq))
```

```
k_atraso = 9.9711
```

Escolhe-se o k_atraso de 10 pois a margem de fase da planta já é muito baixa, quanto maior o K escolhido, piorará ainda mais a margem de fase e ficará dificil de compensar depois no estágio de avanço. Com k_atraso = 10, temos o máximo de erro ao distúrbio permitido.

```
k_atraso = 10;

%-----------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
    % Entrada degrau
sEs = 1/(1+k_atraso*gps);
ess(1) = double(limit(sEs,s,0,'right'))
```

```
ess = 0.0029
```

```
    % Disturbio degrau
sEd = gps/(1+k_atraso*gps);
essd(1) = double(limit(sEd,s,0,'right'))
```

```
essd = 0.0997
```

```
%-----------------------------------------------------------------------------------------
```

Etapa 2: Projetar o controlador atraso de fase

Passo 2: MG, MF, frequências de cruzamento de ganho e de fase e a largura de banda

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(k_atraso*gpd);
```

```
Warning: The closed-loop system is unstable.
```

```
Pm
```

```
Pm = -45.4932
```

```
Wpm
```

```
Wpm = 104.3986
```

```
% MF de gp = -45.5 e largura de banda = 104.4
```

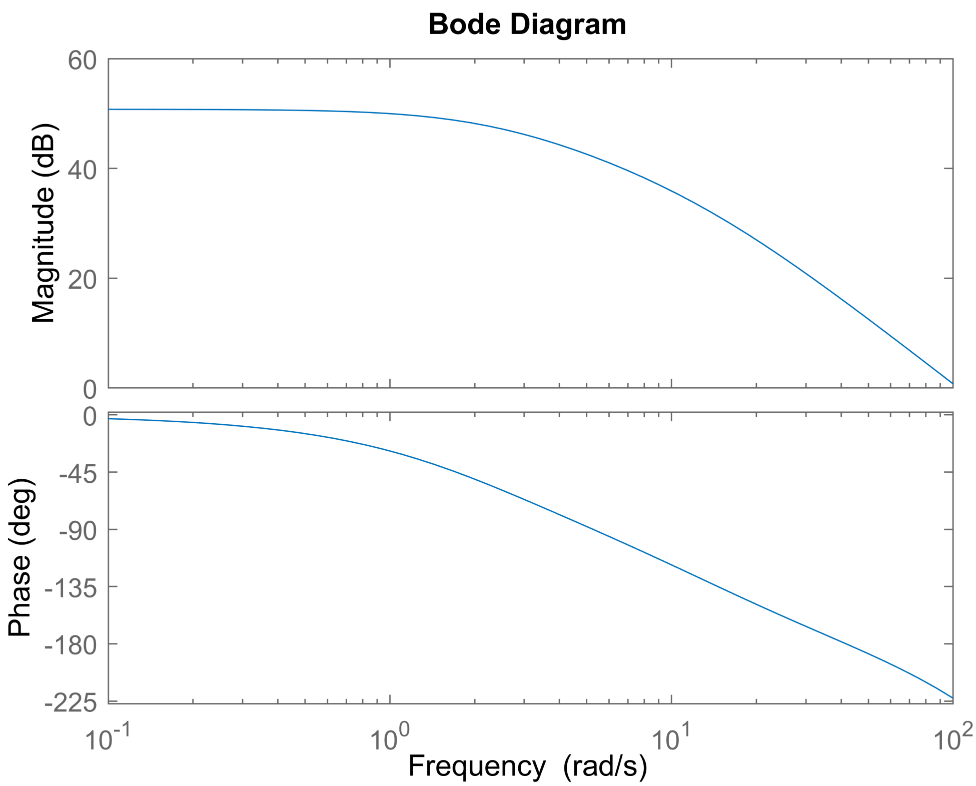
Apenas com o k no sistema, ele fica instavel.

Passo 3: Nova frequência de cruzamento de ganho

```
FaseGp = 20 - 180
```

```
FaseGp = -160
```

```
figure
bode(k_atraso*gpd,w)
```




```
% Olhando no gráfico de bode, a nova frequencia de cruzamento de ganho (w_0dB)
% deve ser 25.9 rad/s e o módulo nessa frequência é 23.1.
mod = 23.1;
```

Passo 4: Obter a constante alpha resolvendo a equação

```
syms alpha1
eq = 20*log10(mod) + 20*log10(alpha1);
alpha1 = double(solve(eq))
```

```
alpha1 = 0.0433
```

Passo 5: Escolher a frequência de corte do zero do compensador uma década abaixo (23.1/10 = 2.31) da nova frequência de cruzamento de ganho e encontrar a frequência de corte do polo do compensador

```
syms tau1
eq = 1/(alpha1*tau1) - 2.31;
tau1 = double(solve(eq))
```

```
tau1 = 10
```

```
1/(alpha1*tau1) % freq de corte do zero do compensador
```

```
ans = 2.3100
```

```
1/(tau1) % freq de corte do polo do compensador
```

```
ans = 0.1000
```

```
syms jw
g_atrasos = k_atraso*(1+jw*alpha1*tau1)/(1+jw*tau1);
%-------------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
g_atrasos = subs(g_atrasos,jw,s);
% Entrada degrau
sEs = 1/(1+g_atrasos*gps);
ess(1) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
% Disturbio degrau
sEd = gps/(1+g_atrasos*gps);
essd(1) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-------------------------------------------------------------------------------------------------
[num,den]=numden(g_atrasos);
g_atraso = tf(sym2poly(num),sym2poly(den))
```

```
g_atraso =

  1000 s + 2310
  -------------
  2310 s + 231

Continuous-time transfer function.
```

Etapa 3:

```
gmad_linha = g_atraso * gpd;
[Gm,Pm1,Wgm,Wpm]=margin(gmad_linha)
```

```
Gm = 3.3157
Pm1 = 25.3141
Wgm = 38.5231
Wpm = 19.7044
```

```
% Margem de fase alcançada foi de 25.31
gmfd_linha = feedback(gmad_linha,1);
y1 = 0;
t=0:.001:2;
y1 = step(gmfd_linha,t);
```

Etapa 4:

```
k_avanco = 1;
FaseGma = 70 - Pm1; % margem de fase especificada 60, +10 de folga
syms alpha2
eq=(alpha2-1)/(2*sqrt(alpha2))==tand(FaseGma);
alpha2 = double(solve(eq))
```

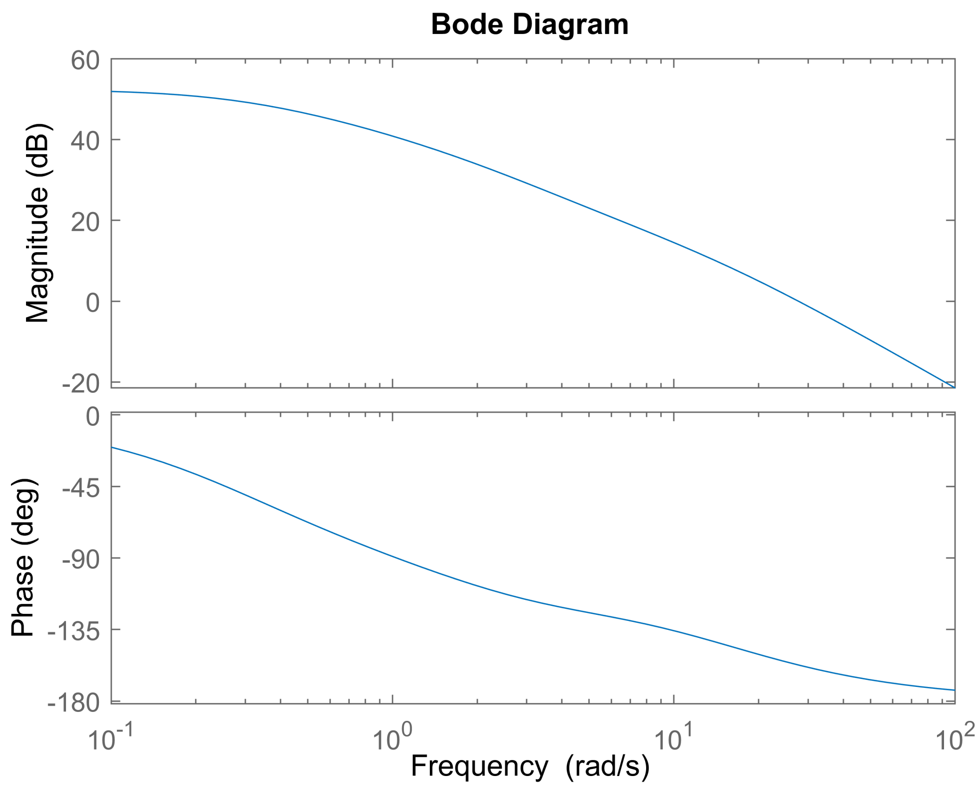
```
alpha2 = 5.7390
```

Etapa 5:

```
mod = -10*log10(alpha2)
```

```
mod = -7.5883
```

```
figure
bode(gma_linha,w)
```




```
% Olhando no diagrama de Bode, wm será 44.14 rad/s.
wm = 44.14;
```

Etapa 6:

```
tau2 = 1/(wm*sqrt(alpha2));
1/(alpha2*tau2) % freq de corte do zero do compensador
```

```
ans = 18.4253
```

```
1/(tau2) % freq de corte do polo do compensador
```

```
ans = 105.7425
```

```
g_avancos = k_avanco*(1+jw*alpha2*tau2)/(1+jw*tau2);
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
g_avancos = subs(g_avancos,jw,s);
% Entrada degrau
sEs = 1/(1+g_avancos*g_atrasos*gps);
ess(2) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
% Disturbio degrau
sEd = gps/(1+g_avancos*g_atrasos*gps);
essd(2) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-----------------------------------------------------------------------------------------------
[num,den]=numden(g_avancos);
g_avanco = tf(sym2poly(num),sym2poly(den))
```

```
g_avanco =

  1.761e31 s + 3.245e32
  ---------------------
  3.069e30 s + 3.245e32

Continuous-time transfer function.
```

```
gmad = g_avanco * g_atraso * gpd;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gmad)
```

```
Gm = 4.5357
Pm = 54.9094
Wgm = 90.0256
Wpm = 26.9281
```

```
gmfd = feedback(gmad,1);
t=0:.001:2;
y2 = 0;
y2 = step(gmfd,t);
```

Refazendo o controlador pois a margem de fase obtida não atendeu a especificação de margem de fase:

```
k_avanco = 1;
FaseGma = 80 - Pm1; % margem de fase especificada 60, +20 de folga para tentar atender a margem
syms alpha2
eq=(alpha2-1)/(2*sqrt(alpha2))-tand(FaseGma);
alpha2 = double(solve(eq))
```

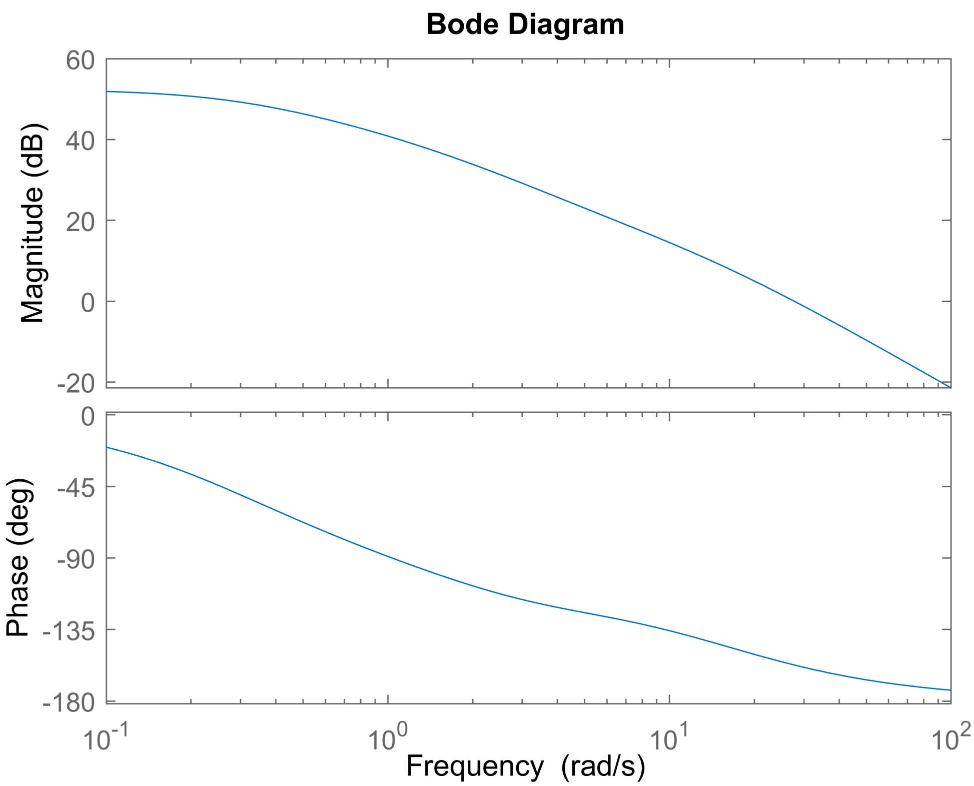
```
alpha2 = 9.8693
```

Etapa 5:

```
mod = -10*log10(alpha2)
```

```
mod = -9.9428
```

```
figure
bode(gma_linha,w)
```




```
% Olhando no diagrama de Bode, para mod = -9.94, wm será 50.85 rad/s.
wm = 50.85;
```

Etapa 6:

```
tau2 = 1/(wm*sqrt(alpha2));
1/(alpha2*tau2) % freq de corte do zero do compensador
```

```
ans = 16.1863
```

```
1/(tau2) % freq de corte do polo do compensador
```

```
ans = 159.7472
```

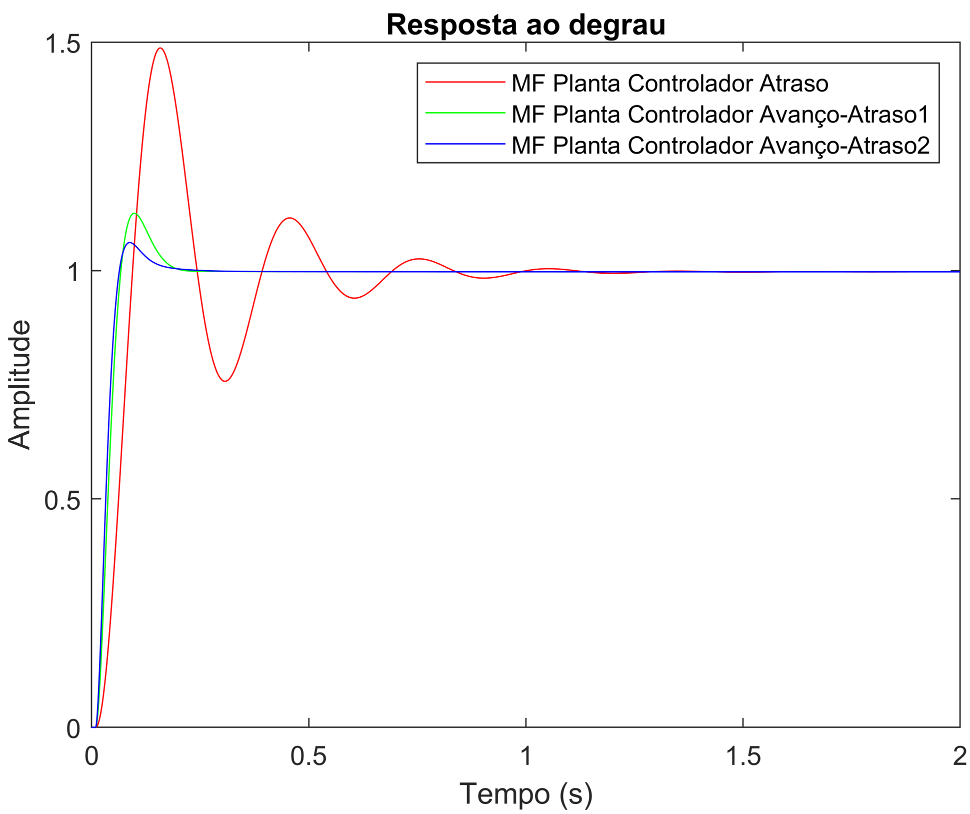
```
g_avancos = k_avanco*(1+jw*alpha2*tau2)/(1+jw*tau2);
%-----------------------------------------------------------------------------------------
% Calculo do erro em regime (s -> 0)
g_avancos = subs(g_avancos,jw,s);
% Entrada degrau
sEs = 1/(1+g_avancos*g_atrasos*gps);
ess(3) = double(limit(sEs,s,0,'right'));
% Disturbio degrau
sEd = gps/(1+g_avancos*g_atrasos*gps);
essd(3) = double(limit(sEd,s,0,'right'));
%-----------------------------------------------------------------------------------------
[num,den]=numden(g_avancos);
g_avanco = tf(sym2poly(num),sym2poly(den))
```

```
g_avanco =

  2.005e31 s + 3.245e32
  ---------------------
  2.031e30 s + 3.245e32

Continuous-time transfer function.
```

```
gmad2 = g_avanco * g_atraso * gpd;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gmad2)
```

```
Gm = 4.3184
Pm = 60.6942
Wgm = 106.1266
Wpm = 29.7911
```

```
gmfd2 = feedback(gmad2,1);
t=0:.001:2;
y3 = 0;
y3 = step(gmfd2,t);

%-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-_-
% Plots
figure
plot(t,y1,'r',t,y2,'g',t,y3,'b')
title('Resposta ao degrau');
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend('MF Planta Controlador Atraso','MF Planta Controlador Avanço-Atraso1','MF Planta Control
```



```
MG=0;MF=0;LB=0;OS=0;RT=0;ST=0;
[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gmad_linha);
MG(1) = Gm;
MF(1) = Pm;
LB(1) = bandwidth(gmfd_linha);
OS(1)=stepinfo(gmfd_linha).Overshoot;
RT(1)=stepinfo(gmfd_linha).RiseTime;
ST(1)=stepinfo(gmfd_linha).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gmad);
MG(2) = Gm;
MF(2) = Pm;
LB(2) = bandwidth(gmfd);
OS(2)=stepinfo(gmfd).Overshoot;
RT(2)=stepinfo(gmfd).RiseTime;
ST(2)=stepinfo(gmfd).SettlingTime;

[Gm,Pm,Wgm,Wpm]=margin(gmad2);
MG(3) = Gm;
MF(3) = Pm;
LB(3) = bandwidth(gmfd2);
OS(3)=stepinfo(gmfd2).Overshoot;
RT(3)=stepinfo(gmfd2).RiseTime;
ST(3)=stepinfo(gmfd2).SettlingTime;

% Reorganização de dados
col_atraso = [OS(1) RT(1) ess(1) essd(1) MG(1) MF(1) LB(1)]';
col_avancoatraso = [OS(2) RT(2) ess(2) essd(2) MG(2) MF(2) LB(2)]';
col_avancoatraso2 = [OS(3) RT(3) ess(3) essd(3) MG(3) MF(3) LB(3)]';
Tabela1=table(col_atraso,col_avancoatraso,col_avancoatraso2,'RowNames',{'Sobressinal (%)','T. S
```

Tabela1 = 7×3 table

	Gp*Atraso	Gp*Avanço-Atraso	Gp*Avanço-Atraso2
1 Sobressinal (%)	49.0505	12.8609	6.4454
2 T. Subida (s)	0.0567	0.0395	0.0360
3 Erro à entrada degrau	0.0029	0.0029	0.0029
4 Erro ao disturbio de degrau	0.0997	0.0997	0.0997
5 MG	3.3157	4.5357	4.3184
6 MF	25.3141	54.9094	60.6942
7 LB	32.4309	50.9446	57.4695

O controlador Avanço-Atraso2 alcançou as especifcações de projeto em relação aos erros e a margem de fase, inclusive uma largura de banda aceitável. Observa-se que a largura de banda alcançada é menor que o controlador Avanço-Atraso obtido na planta sem atraso, isso muito se justifica no uso do valor mínimo de K para atender o erro em distúrbio, assim deixando a largura de banda desde o primeiro passo baixa, pois sabe-se que o aumento de K aumenta também a largura de banda e diminui o erro.

2.2 Para o caso em que T=0 seg, multiplique o controlador projetado pela FT G do veículo lunar e determine a equação de estados deste sistema em malha aberta. Em seguida, desenvolva um código no matlab, semelhante ao fornecido para simular o avião (programa "simulaviao.m" fornecido em anexo), para simular o sistema de controle de direção do veículo lunar em malha fechada no espaço de estados. Considere nas simulações os seguintes casos:

Caso 1. Sistema de controle sem o ruído de medição.

Usando Avanço-Atraso:

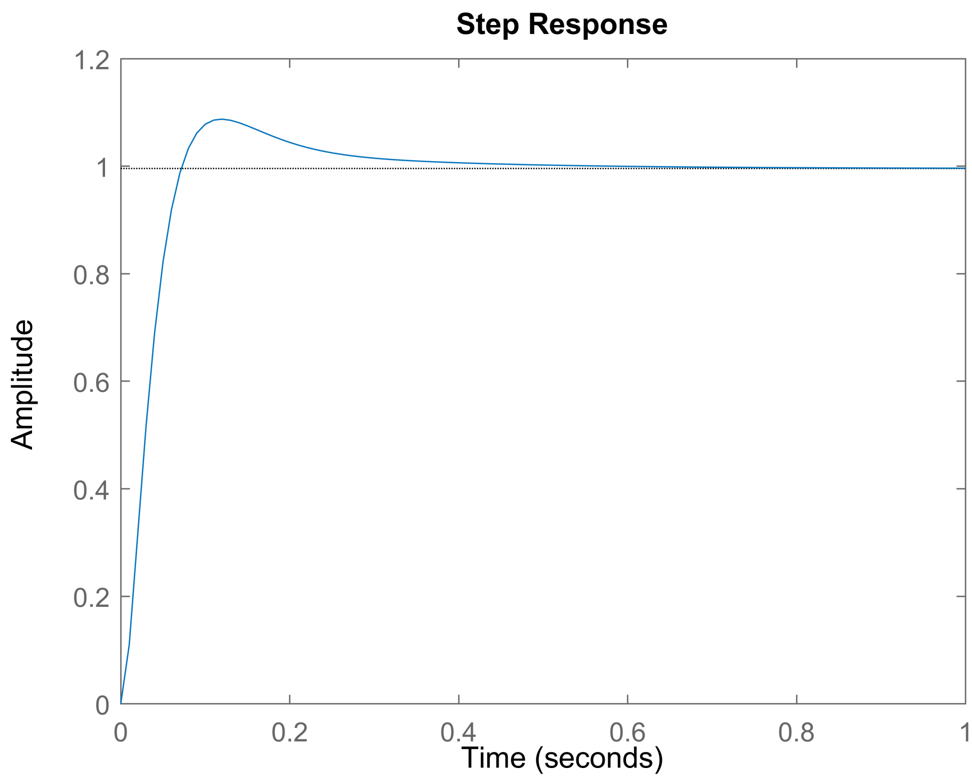
Usando a função transferência de malha aberta encontrada no item 1.1 ao multiplicar o controlador avanço-atraso pela planta:

```
num = [1.205e36 2.696e37 9.852e37]/3.866e32;
den = [2.16e32 2.873e34 4.246e35 9.237e35 2.375e35]/2.16e32;

gg2 = tf(num,den)
```

```
gg2 =

      3117 s^2 + 6.974e04 s + 2.548e05
  ---------------------------------------
  s^4 + 133 s^3 + 1966 s^2 + 4276 s + 1100

Continuous-time transfer function.
```

O que se espera após os passos que se seguem é obter uma curva nesse estilo:

```
gg2f = feedback(gg2,1);
figure
t=0.0:0.01:1;
step(gg2f,t)
```



Utilizando o modelo de formato de entrada com ação à frente (feedforward):

Usando a função de malha aberta do controlador vezes a G da planta, identificamos seus coeficientes:

$$C(s)G_p(s) = \frac{3117s^2 + 69740s + 254800}{s^4 + 133s^3 + 1966s^2 + 4276s + 1100} = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

```
b2 = 3117;
b1 = 6.974e04;
b0 = 2.548e05;
a3 = 133;
a2 = 1966;
a1 = 4276;
a0 = 1100;
```

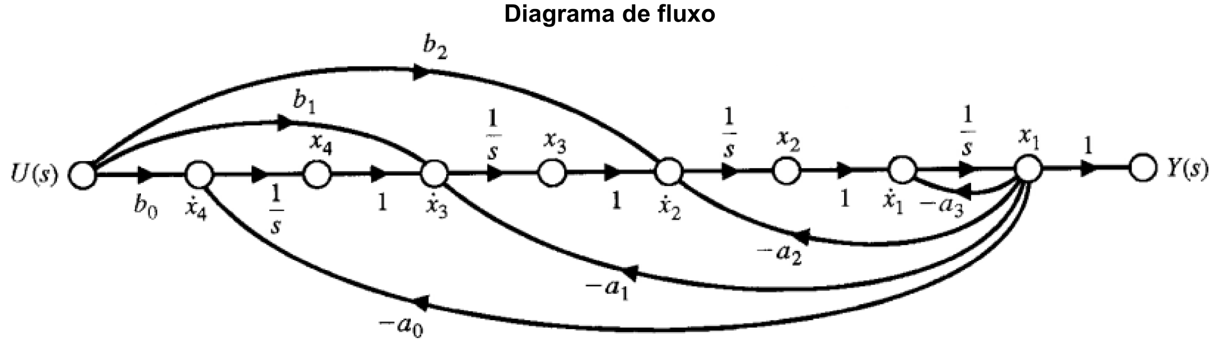
Para montar o diagrama de fluxo de sinais, dividimos numerador e denominador por s^4:

$$C(s)G_p(s) = \frac{b_2s^{-2} + b_1s^{-3} + b_0s^{-4}}{1 + a_3s^{-1} + a_2s^{-2} + a_1s^{-3} + a_0s^{-4}}$$

O diagrama de fluxo terá 3 caminhos diretos e 4 loops de realimentação:

```
figure
imshow("diagrama_fluxo_item22.png")
title('Diagrama de fluxo')
```

Diagrama de fluxo



A partir do diagrama de fluxo, obtem-se o sistema de equações diferenciais de primeira ordem:

$\dot{x_1} = -a_3x_1 + x_2$ $\dot{x_2} = -a_2x_1 + x_3 + b_2u$ $\dot{x_3} = -a_1x_1 + x_4 + b_1u$ $\dot{x_4} = -a_0x_1 + b_0u$

Portanto as matrizes A, B, C e D serão:

```
global F A B
A = [-a3 1 0 0; -a2 0 1 0; -a1 0 0 1;-a0 0 0 0];
B = [0; b2; b1; b0];
C = [1 0 0 0];
D = 0;
```

A confirmação de que o métodos foi feito corretamente pode se dar utilizando o comando ss2tf e encontrando a mesma função transferência usada no processo inicial:

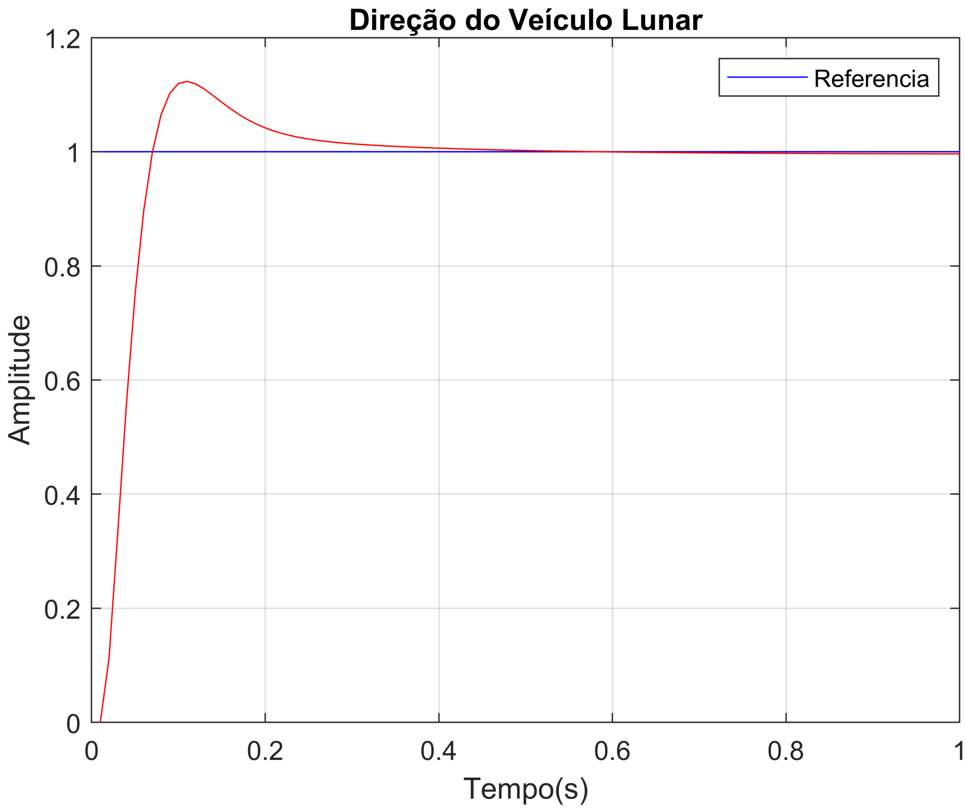
```
[num,den] = ss2tf(A,B,C,D);
tf(num,den)
```

```
ans =

      3117 s^2 + 6.974e04 s + 2.548e05
  ---------------------------------------
  s^4 + 133 s^3 + 1966 s^2 + 4276 s + 1100

Continuous-time transfer function.
```

Realimentando o sistema utilizando como referência o código simulaviao.m

```
% vetor estados inicial
Xs = [0 0 0 0];
F = 0;

% Inicialização de variáveis
tfinal = 1; % Tempo total de simulação
ref = 1; % Referência
passo = 0;
tempo = 0;
dT = 0.01; % tempo de amostragem
```

```
while (tempo < tfinal)

    passo = passo + 1;
    ts = passo*dT;

    % simulação da equação diferencial
    [T1,X] = ode45('modelo_linear',[tempo ts], Xs);

    % Armazenamento de variaveis
    n = length(T1);
    tempo = ts;
    Xs = X(n,:);
    F = ref-C*Xs';

    vetout(passo,:) = [X(n,1) X(n,2) X(n,3)];
    vettime(passo) = T1(n,:);
    vetvref(passo,:) = ref;

end

% Plotagem dos gráficos
figure
plot(vettime, vetvref,'b');
hold on;
plot(vettime,vetout(:,1),'r');
xlabel('Tempo(s)');title('Direção do Veículo Lunar');
ylabel ('Amplitude');
legend('Referencia');
grid;
```




```
y = vetout(:,1);
stepinfo(y,vettime)
```

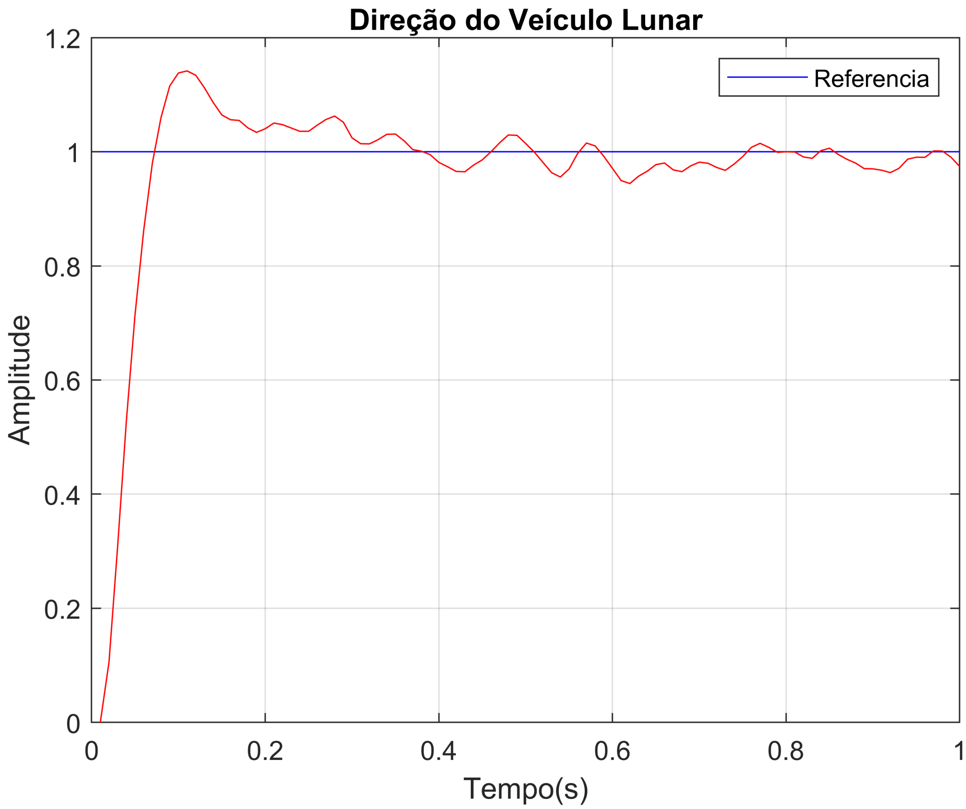
```
ans = struct with fields:
         RiseTime: 0.0411
    TransientTime: 0.2821
     SettlingTime: 0.2821
      SettlingMin: 0.9963
      SettlingMax: 1.1233
        Overshoot: 12.7497
       Undershoot: 0
             Peak: 1.1233
         PeakTime: 0.1100
```

Caso 2. Adicionar ruído Gaussiano na saída do sistema de controle, referente ao sensor do veículo lunar.

Para simular com ruído, adicionamos à saída o ruído utilizando o comando rand, dessa forma o valor realimentado no processo será alterado.

```
% vetor estados inicial
Xs = [0 0 0 0];
F = 0;

% Inicialização de variáveis
tfinal = 1; % Tempo total de simulação
ref = 1; % Referência
passo = 0;
tempo = 0;
```

```
dT = 0.01; % tempo de amostragem

while (tempo < tfinal)

    passo = passo + 1;
    ts = passo*dT;

    % simulação da equação diferencial
    [T1,X] = ode45('modelo_linear',[tempo ts], Xs);

    % Armazenamento de variaveis
    n = length(T1);
    tempo = ts;
    Xs = X(n,:);
    F = ref-(C*Xs'-0.1+(0.1+0.1)*rand(1));

    vetout(passo,:) = [X(n,1) X(n,2) X(n,3)];
    vettime(passo) = T1(n,:);
    vetvref(passo,:) = ref;

end

% Plotagem dos gráficos
figure
plot(vettime, vetvref,'b');
hold on;
plot(vettime,vetout(:,1),'r');
xlabel('Tempo(s)');title('Direção do Veículo Lunar');
ylabel ('Amplitude');
legend('Referencia');
grid;
```



2.3 Compare a resposta ao degrau obtida usando o simulador desenvolvido no item 1.2 (sem o ruído de medição), com a resposta ao degrau (sobressinal, tempo de subida) obtida no item 1.1 para T=0 s.

A função de transferência da planta que descreve a dinâmica do veículo lunar, foi submetida a um controlador Avanço-Atraso na questão 4 que melhora muito seu desempenho, considerando as condições de projeto do controlador erro a entrada ao degrau e erro ao distúrbio de degrau menor que 0.1, largura de banda em malha aberta maior possível e a margem de fase igual ou superior a 60º.

Para a função de malha aberta da planta do veículo lunar, e o controlador projetado, foi desenvolvido atraves de simulação um sistema que controla a direção do veículo lunar em malha fechada no espaço de estados.

Ambos projetos proporcionaram uma resposta, que a seguir será avaliado item a item suas características transitórias.

Considerando a Sobreelevação:

AA: 6.44%

Simulador: 25.22%

Considerando o tempo de subida:

PID: 0.036 s

Simulador:0.0226 s

Considerando o tempo de estabelecimento:

PID: 0.1439 s

Simulador:0.1325 s

Considerando as características transitórias das respostas, além da análise gráfica, fica evidente que o controlador Avanço-Atraso tem um resposta melhor em relação a simulação realizada no item 2.2 sem ruído. Assim como na comparação feita com o PID, o controlador avanço-atraso tem características transitórias melhores que o simulador. O que mostra que os resultados obtidos no simulador com espaço de estados, não tiveram bom resultado em relação aos outros dois controladores, olhando para as principais caracteristicas das respostas o único ponto desequilibrado é a sobreelevação, que para o simulador é de 25% e para o Avanço-Atraso é de 6%, os ts e tr são bem próximos, com ligeira vantagem para o simulador. a grande discrepância de UP penaliza muito o controlador e o torna bastante ruim.

2.5 Compare as respostas à entrada degrau (sobressinal, tempo de subida) e o erro em regime às entradas degrau para os dois sistemas com os controladores obtidos nos itens 1.1 e 1.4 para T=0.0 s.

```
Tabela1=table(col_PID_nodelay,col_avancoatraso_nodelay,'RowNames',{'Sobressinal (%)','T. Subida
```

Tabela1 = 7×2 table

	Gp*PID	Gp*Avanço-Atraso
1 Sobressinal (%)	0	10.8817
2 T. Subida (s)	0.0116	0.0278
3 Erro à entrada degrau	0	0.0024
4 Erro ao disturbio de degrau	0	0.0831
5 MG	Inf	Inf
6 MF	90.5304	61.7659
7 LB	191.6867	72.3659

A função de transferência que descreve a dinâmica do veículo lunar sem atraso e sem ruído de medição, foi submetida a dois controladores diferentes (PID e Avanço-Atraso) e projetados para que os erros a entrada ao degrau e os erros ao distúrbio ao degrau fossem menores que 0.1, a largura de banda em malha aberta fosse a maior possível e a margem de fase igual ou superior a 60º.

Considerando o erro entrada ao degrau, ambos atenderam às condições de projeto. Ess < 0.1

PID: 0

AA: 0.0024

Considerando o erro ao distúrbio de degrau, ambos atenderam às condições de projeto. Edss < 0.1

PID: 0

AA: 0.0831

Considerando a margem de fase, ambos atenderam às condições de projeto. MF >= 60º

PID: 90.53º

AA: 61.76º

E a largura de Banda foi a maior possível, considerando as condições de projetos acima.

PID: 191.68

AA: 72.36

Levando em conta todos os parâmetros e características acima, o controlador PID é o que obteve melhor resultado, onde além de apresentar os pontos acima, teve um melhor tempo de subida e tambem melhor sobreelevação. Porém, sabemos que em sistemas reais uma elevada largura de banda não é tão requisitada, já que há passagem de ruidos indesejáveis em frequências não requeridas em seu projeto. Mesmo assim, como no trabalho foi pedido uma alta largura de banda, podemos dizer que esse é o controlador que melhor atende as especificações.

2.6 – Considerando o item 2.5, escolha o melhor controlador obtido e determine os polos da FT em malha fechada. A partir destes polos, projete um controlador usando a realimentação de estados para controlar a dinâmica deste sistema.

No item 2.5 foi realizado uma comparação entre os dois controladores projetados, PID e Avanço-Atraso, para a função Gp, que modela a dinâmica do veículo lunar, sem atraso de transporte. Considerando a resposta ao degrau de cada controlador e da planta, o que obteve melhor resultado foi o PID.

Etapa 1. Pólos da FTMF - Gma = Gc*Gp.

A função de transferência utilizada, destacada no enunciado é utilizando a função de malha aberta que multiplica o controlador PID (Gc6) e a função de transferência da planta (Gp). Utilizando essa nova função, fechamos a malha com realimentação negativa e aplicamos o comando pole, para obter os 3 pólos da FTMF, que nesse caso é de ordem 3.

```
gp;     %planta sem atraso de transporte
gc6;    %Controlador PID
gmf = feedback(gc6*gp,1)        %FTMF ordem 3
```

```
gmf =

     194.2 s^2 + 2808 s + 1.015e04
```

```
  ----------------------------------
  s^3 + 210.5 s^2 + 2840 s + 1.015e04

Continuous-time transfer function.
```

```
pmf = pole(gmf)
```

```
pmf = 3×1 complex
10^2 ×
  -1.9628 + 0.0000i
  -0.0710 + 0.0113i
  -0.0710 - 0.0113i
```

Etapa 2. Obter a Matriz de EE na Forma Canônica Controlável, A partir de Gma = Gp.

A etapa 2 é transformar a função de transferência da planta (Gp) em uma matriz de estados, na forma canônica controlável (FCC). Tal etapa é necessário para que possamos realizar a realimentação de estados, usando a forma padrão FCC.

```
global A B F
[A B C D] = tf2ss(gp.num{1},gp.den{1})
```

```
A = 2×2
  -16.2727  -31.8182
    1.0000         0
B = 2×1
     1
     0
C = 1×2
         0        1100
D = 0
```

O comando "tf2ss" converte uma função de transferência nas matrizes de estado, (A, B, C, e D), já na forma canônica controlável.

Etapa 3. Aproximação da FTMF para Ordem 2

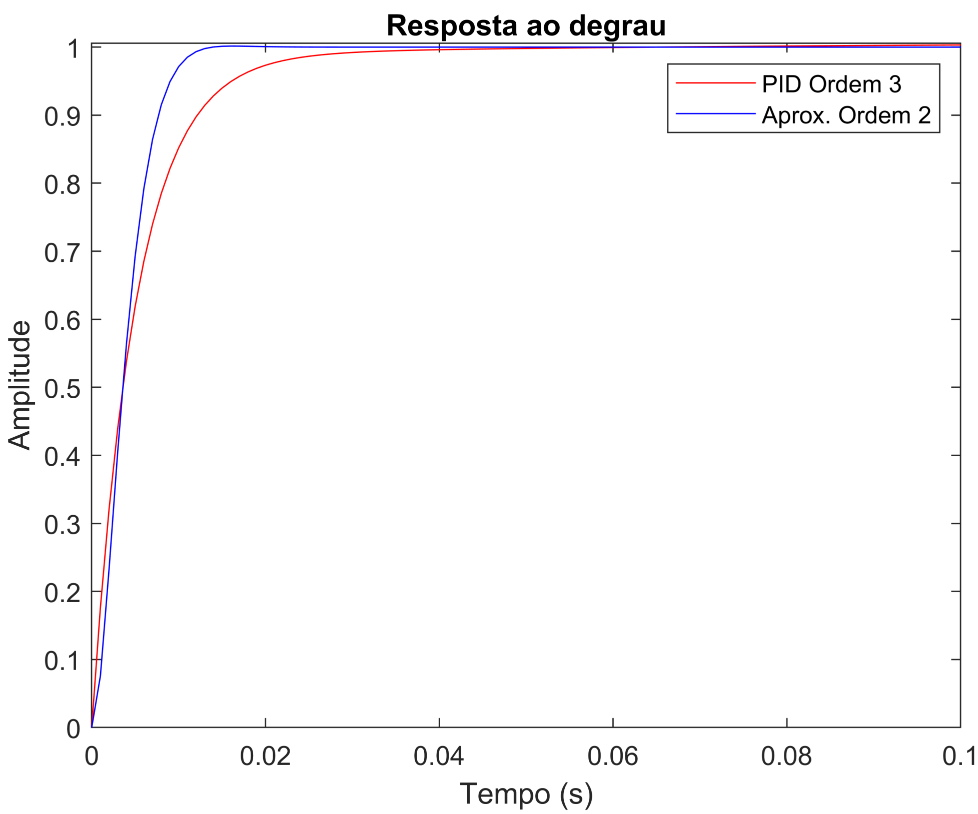
Como a função de de transferência de malha fechada é de ordem 3, ou seja, existem 3 pólos, e como a função de malha aberta da planta (Gp) é de ordem 2. Faz-se neessário compatibilizar o número de estados da matriz com o número de realimentaões dos estados, a partir dos pólos de malha fechada. A próxima etapa é aproximar a função de malha fechada da planta e controlador (Gmf) de ordem 3, para uma similar de ordem 2, com os mesmos parâmetros de resposta ao degrau.

```
up = stepinfo(gmf).Overshoot;
tr = stepinfo(gmf).RiseTime;
% ts = stepinfo(gmf).SettlingTime; % tempo de subida = 0.022
ts = 0.01;
zeta = 0.9;      % como o sistema está no limiar da sobreelevação, zeta = 1 aproximadamente
wn=4/(ts*zeta);         %considerando 2% para assentamento
gap = tf(wn^2,[1 2*zeta*wn wn^2])       % função aproximada
```

```
gap =

         1.975e05
  ----------------------
```

```
  s^2 + 800 s + 1.975e05

Continuous-time transfer function.
```

```
t=0.0:0.001:7;
y1 = step(gmf,t);
y2 = step(gap,t);
repgap(1) = stepinfo(gap).Overshoot;
repgap(2) = stepinfo(gap).RiseTime;
repgap(3) = stepinfo(gap).SettlingTime;


figure
plot(t,y1,'r',t,y2,'b')
axis([0 0.1 0 inf])
title('Resposta ao degrau');
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend('PID Ordem 3','Aprox. Ordem 2')
```



Com respostas bem parecidas, extraimos os novos pólos, para a realimentação de estados.

```
pmf = pole(gap);                          % novos polos para função de ordem 2
```

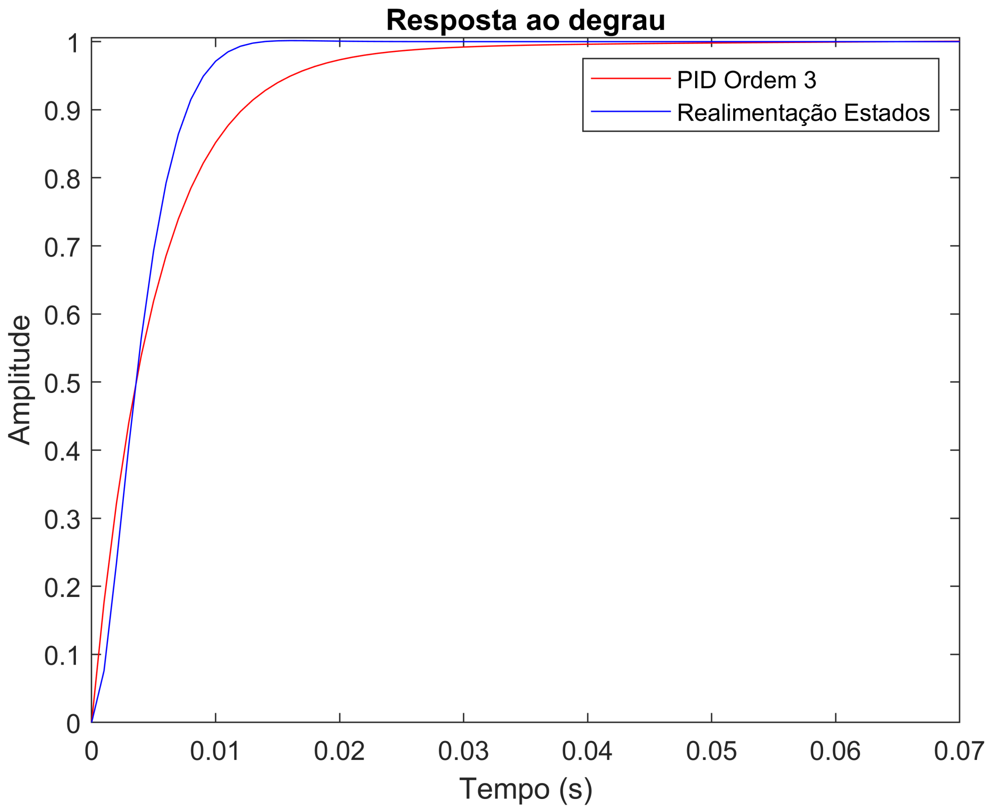
Etapa 4. Realimentação de Estados

```
K=place(A,B,pmf);
```

```
m=ss(A-B*K,B,C,D) % FT de MF
```

```
m =

  A =
                x1          x2
   x1         -800  -1.975e+05
   x2            1           0

  B =
       u1
   x1   1
   x2   0

  C =
         x1    x2
   y1     0  1100

  D =
       u1
   y1   0

Continuous-time state-space model.
```

```
y3 = step(m,t);
ref=1/mean(y3(end-10:end));
y3 = step(ref*m,t);
figure
plot(t,y1,'r',t,y3,'b')
axis([0 0.07 0 inf])
title('Resposta ao degrau');
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend('PID Ordem 3','Realimentação Estados')
```




```
stepinfo(ref*m)
```

```
ans = struct with fields:
        RiseTime: 0.0065
   TransientTime: 0.0106
    SettlingTime: 0.0106
     SettlingMin: 0.9024
     SettlingMax: 1.0015
       Overshoot: 0.1524
      Undershoot: 0
            Peak: 1.0015
        PeakTime: 0.0162
```

2.7 Compare as respostas ao degrau e o respectivo erro à entrada degrau dos sistemas realimentados projetados no 2.1 e 2.4 para T=0.0 s com o sistema realimentado projetado no item 2.6.

A função de transferência da planta que descreve a dinâmica do veículo lunar, foi submetida a dois controladores, PID e Avanço-Atraso nas questões 1 e 4, que melhoram muito seu desempenho, considerando as condições de projeto do controlador, Erro a entrada ao degrau e erro ao distúrbio de degrau menor que 0.1, largura de banda em malha aberta maior possível e a margem de fase igual ou superior a 60º.

Por último na questão 1.6 foi proposto um controlador que a partir da função que descreve a direção do veículo lunar, colocasse os pólos da função de malha fechada do melhor controlador projetado nos itens acima.

Definindo o controlador PID como o melhor, na questão 1.5. E desenvolvesse uma resposta com realimentação de estados

Os três projetos proporcionaram uma resposta e a suas características transitórias serão avaliadas item a item:

Considerando a Sobreelevação:

PID: 0%

AA: 6.44%

RE: 0.15%

Considerando o tempo de subida:

PID: 0.0116 s

AA: 0.036 s

RE: 0.0065 s

Considerando o tempo de estabelecimento:

PID: 0.022 s

AA: 0.1439 s

RE: 0.0106 s

Considerando o erro em regime:

PID: 0

AA: 0.0029

RE: 0

Os controladores PID e a Realimentação de Estados foram os que tiveram melhor resultado. Entretanto, a Realimentação de Estados proporcionou melhor tempo de subida e melhor tempo de estabelecimento que o PID, sobreelevação e erro em regime foram muito semelhantes, com isso a melhor resposta é do controlador que surge na Realimentação de Estados.

2.8 Desenvolver um projeto do observador de estados para o sistema realimentado projetado no item 1.6. Simule este sistema em malha fechada considerando realimentação de estados, e compare o seu desempenho com as respostas à entrada degrau obtidas no item 1.7.

Projeto do observador

```
polos_obs=4*pmf
```

```
polos_obs = 2×1 complex
10^3 ×
  -1.6000 + 0.7749i
  -1.6000 - 0.7749i
```

```
L=place(A',C',polos_obs); % Projeto do observador de estados
L=L'
```

```
L = 2×1
10^3 ×
    2.8260
    0.0029
```

```
[n1,d1] = ss2tf(A-L*C-B*K, B, -K, 1);
[n2,d2] = ss2tf(A-L*C-B*K, L, K, D);
C1= tf(1,1)-tf(n1,d1)
```

```
C1 =

    783.7 s + 2.693e06
  -----------------------
  s^2 + 3984 s + 5.853e06

Continuous-time transfer function.
```

```
C2= tf(n2,d2)
```

```
C2 =

   2.786e06 s + 5.674e08
  -----------------------
  s^2 + 3984 s + 5.853e06

Continuous-time transfer function.
```

```
(C1*feedback(gp,C2)) % observador com o sistema realimentado
```

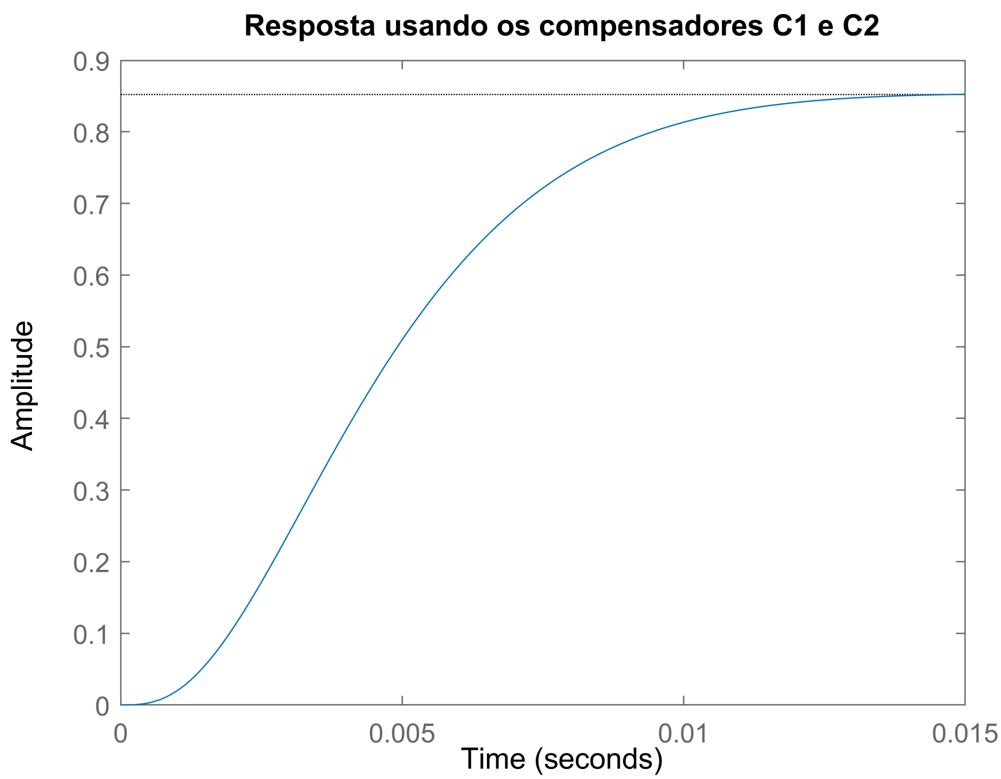
```
ans =

                  8.621e05 s^3 + 6.396e09 s^2 + 1.685e13 s + 1.734e16
  ---------------------------------------------------------------------------------
  s^6 + 7984 s^5 + 2.771e07 s^4 + 5.015e10 s^3 + 4.785e13 s^2 + 2.099e16 s + 3.654e18

Continuous-time transfer function.
```

```
m=minreal(C1*feedback(gp,C2))
```

```
m =
```

```
              8.621e05 s + 2.962e09
  ----------------------------------------------------
  s^4 + 4000 s^3 + 5.918e06 s^2 + 3.16e09 s + 6.243e11

Continuous-time transfer function.
```

```
figure;
step(ref*m);yline(ref); % multiplicar m
title('Resposta usando os compensadores C1 e C2');
```




```
stepinfo(ref*m)
```

```
ans = struct with fields:
         RiseTime: 0.0066
    TransientTime: 0.0114
     SettlingTime: 0.0114
      SettlingMin: 0.7697
      SettlingMax: 0.8532
        Overshoot: 0.1477
       Undershoot: 0
             Peak: 0.8532
         PeakTime: 0.0170
```

Ambos controladores apresentaram otimos resultados, tanto utilizando o somente a realimentação de estados quanto utilizando o projeto do observador. Porém com o observador o sobressinal foi menor, enquanto o tempo de subida não foi alterado.