

Aula 10 - Laboratório de Controle - 2023/1

Projeto do controlador avanço-atraso para o motor CC

Nomes: João Gabriel Santos Custodio, Lucas da Rosa Tessari

Esta aula visa realizar o projeto dos controladores avanço e atraso de fase, avaliando-os em simulação e no motor CC.

Após obter o modelo do motor para uma dada rotação, avalia-se o efeito das escolhas dos projetos.

```
if ~exist('obj')
    z=seriallist;
    comPort=z{length(z)};
    obj=serial(comPort, 'BaudRate', 9600);
    obj.Terminator='CR';
    fopen(obj);
end
datetime
```

```
ans = datetime
      22-May-2016 07:07:50
```

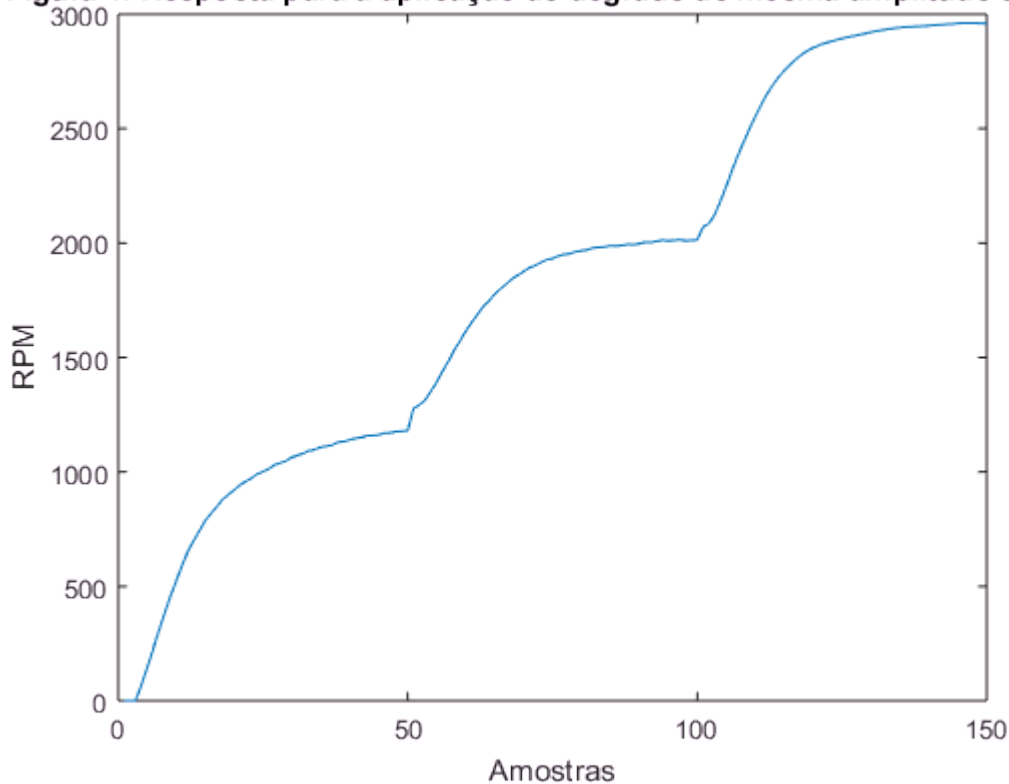
Obtenção da resposta de velocidade do motor CC

Este teste verifica o bom funcionamento do motor e fornece os parâmetros iniciais para definir a velocidade de operação.

Execute a seção abaixo.

```
Ts=20;
Tempo=1;
U0=[70 100 170];
[y,t, yr, tau] = arduino_coleta_motor(obj,U0,Tempo);
seta_saida_motor(obj,0);
figure;
plot(y);title('Figura 1. Resposta para a aplicação de degraus de mesma amplitude em MA');
xlabel('Amostras');ylabel('RPM')
```

Figura 1. Resposta para a aplicação de degraus de mesma amplitude em MA



```
RPM=yr;  
U00=U0;
```

Obtenção dos dados para o modelo que relaciona o sinal PWM com a velocidade em RPM

Escolha uma velocidade Ref em torno da qual o motor deverá operar, a partir da observação da Figura 1.

O próximo teste gerará dados (dat1) em torno da rotação escolhida para obter os modelos.

Basta executar a seção a seguir. Caso os dados fiquem ruins, repita a coleta de dados.

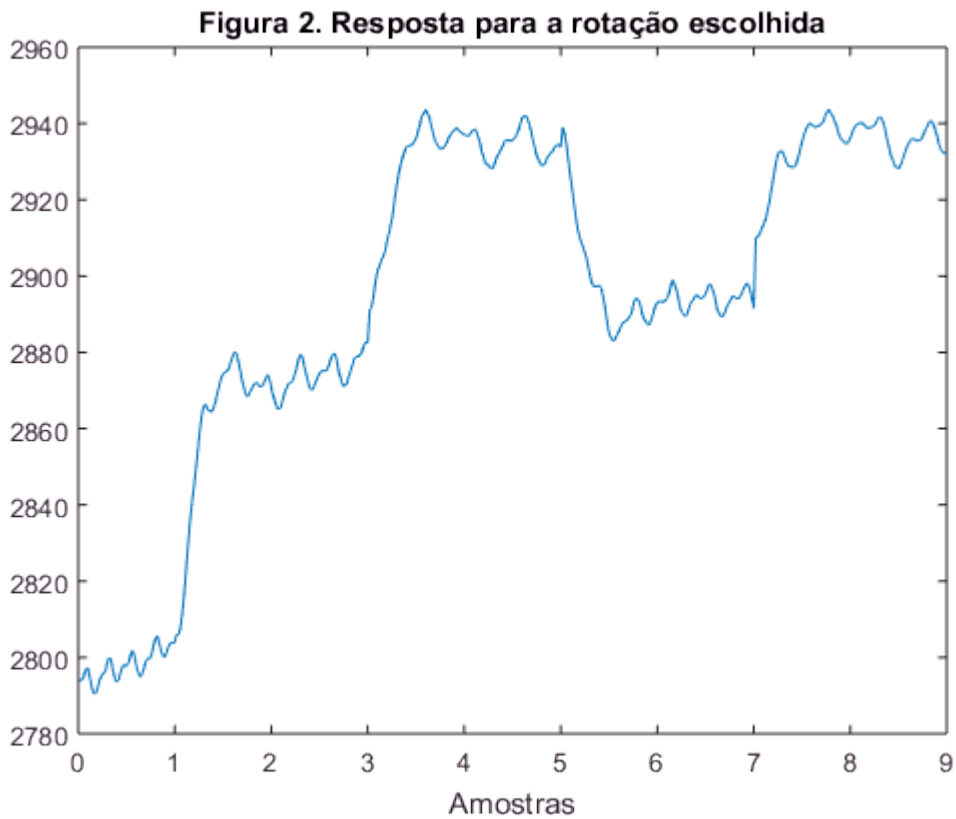
```
Ref=2500; % Escolha antes um valor de Ref para velocidade  
Ref1=Ref+200;  
Tempo=2;  
r0=floor(interp1(RPM,U00,Ref));  
if isnan(r0)  
    beep  
    disp('**** Escolha ruim de Ref ****')  
    return  
end  
d1=[0 0 5 10 5 8];  
U20=r0+d1;  
u0=ones(100,1);  
U2=[];  
for i=1:6  
    U2=[U2;u0*U20(i)];  
end  
[y,t,yr,tau] = arduino_coleta_motor(obj,U20,Tempo);  
seta_saida_motor(obj,0);
```

```

U2=U2(150:end);
Y2=y(150:end);
t=[0:(length(Y2)-1)]*Ts/1000;
y0=mean(Y2(1:50));
yn=Y2-y0;
dat1=iddata(yn,U2-U2(1),Ts/1000);

figure;
plot(t,Y2);title('Figura 2. Resposta para a rotação escolhida');
xlabel('Amostras');

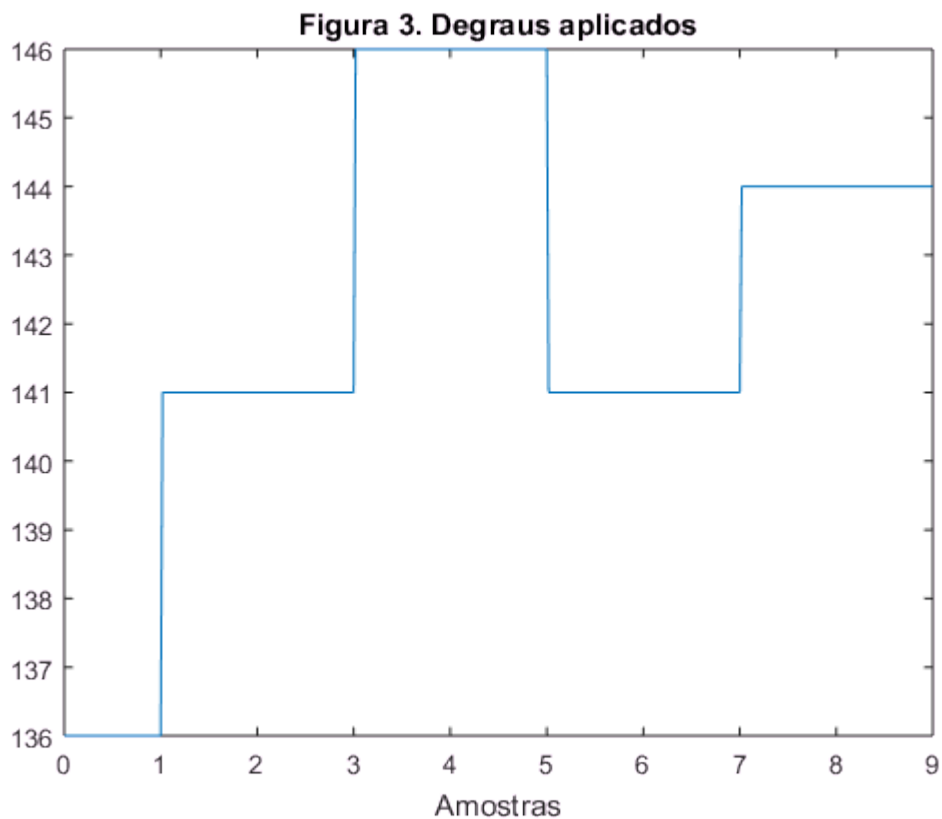
```



```

figure;
plot(t,U2);title('Figura 3. Degraus aplicados');
xlabel('Amostras');

```



Nesta seção são obtidos os modelos de ordem 1 e 2. Caso o modelo de ordem 2 fique ruim, outro método é proposto na próxima seção.

```
gle=procest(dat1,'P1');
g2e=procest(dat1,'P2');
polo_minimo=min(abs(pole(g2e)))
```

```
polo_minimo = 0.0097
```

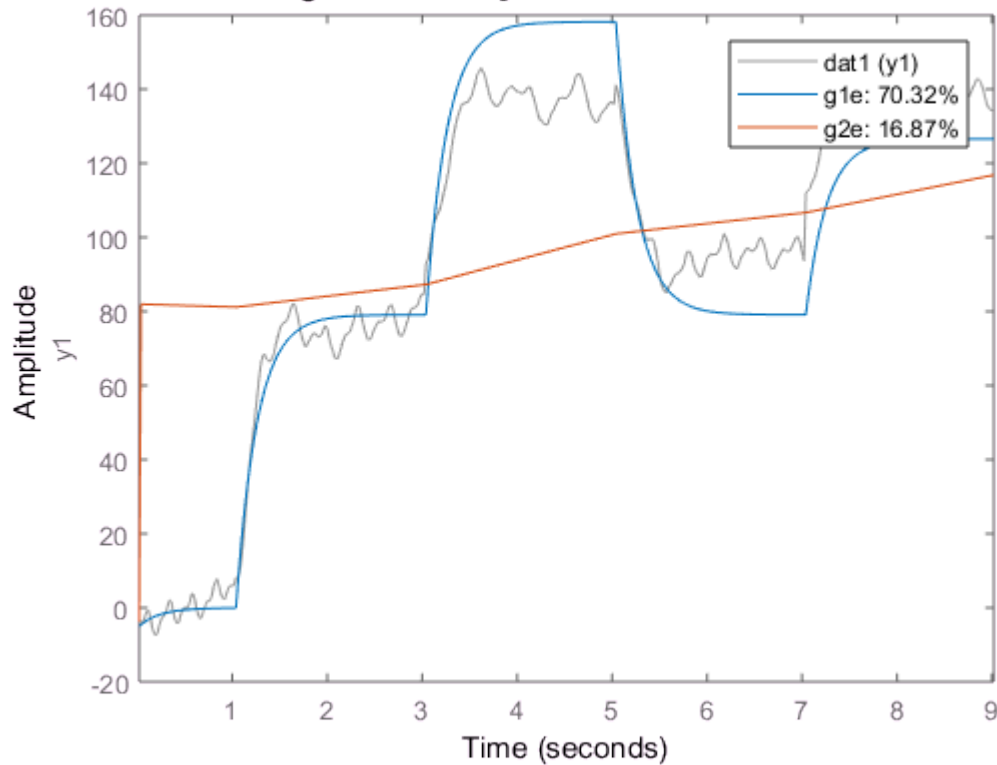
```
g1=tf(gle.Kp,[gle.Tp1 1])
```

```
g1 =
    15.82
    -----
    0.2215 s + 1
```

Continuous-time transfer function.

```
figure;
compare(dat1,g1e,g2e);
title('Figura 4: Avaliação dos modelos obtidos');
```

Figura 4: Avaliação dos modelos obtidos



Nesta seção há outra alternativa para estimar o modelo de ordem 2, caso o da seção anterior tenha ficado ruim.

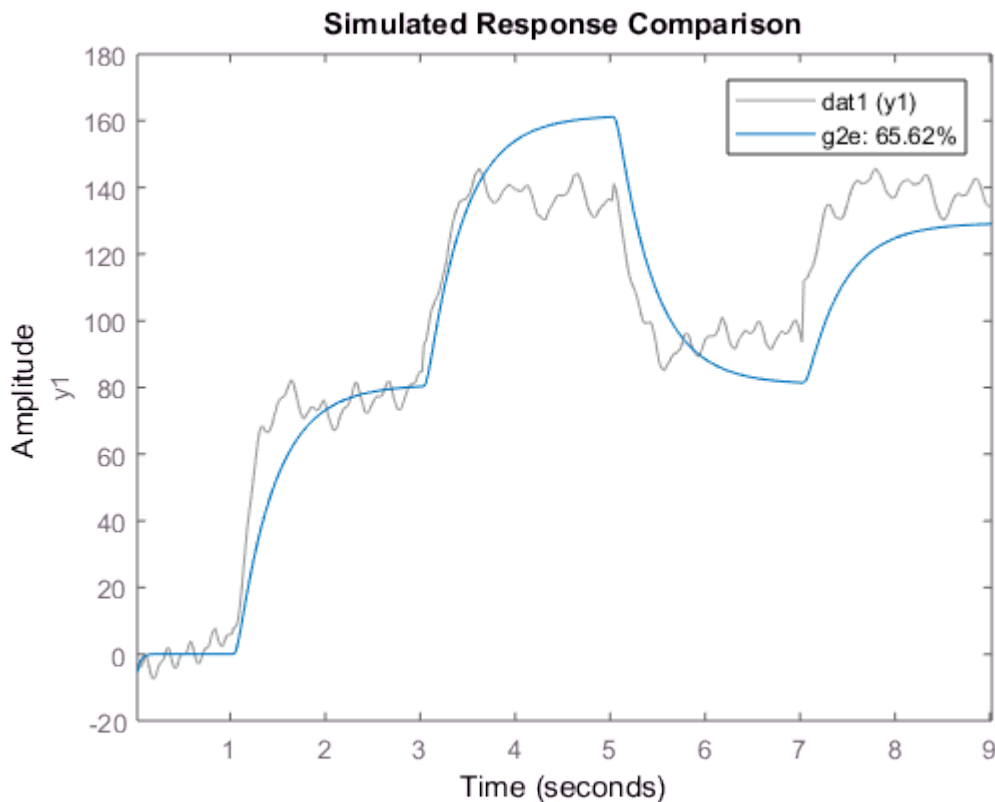
```
g2ea=arx(dat1,[2 2 1]);
ys=step(g2ea);
dat1s=iddata(ys,ones(size(ys)),Ts/1000);
g2e=procest(dat1s,'P2');
```

Warning: For transient data (step or impulse experiment), make sure that the change in input signal does not happen too early relative to the order of the desired model. You can achieve this by prepending sufficient number of zeros (equilibrium values) to the input and output signals. For example, a step input must be represented as `[zeros(nx,1); ones(N,1)]` rather than `ones(N,1)`, such that `nx > model order`.

```
polo_minimo=min(abs(pole(g2e)))
```

```
polo_minimo = 2.5495
```

```
figure;
compare(dat1,g2e);
```



Caso o modelo de ordem 2 tenha ficado bom agora, pode seguir. Se o modelo de ordem 2 anterior seja melhor, execute a seção anterior novamente.

Se um dos polos do modelo de ordem 2 for muito próximo de zero ($\text{polo_minimo} < 1e-3$), repita a identificação, podendo alterar um pouco Ref.

O projeto dos compensadores avanço e atraso será feito com o modelo de ordem 2.

Atividade 1: Obtenção de uma resposta de referência usando o método de sintonia lambda e o controlador PI.

Nós métodos de resposta em frequência, a margem de fase é utilizada para a escolha dos compensadores. Usaremos o projeto já realizado do controlador PI via método lambda para obter uma boa resposta a ser usada como referência para os projetos de resposta em frequência.

Para isso, escolha um valor adequado de lambda para obter uma boa resposta com um controlador PI.

O ganho K e a constante de tempo tau vem de g1.

1.1 Escolha lambda baseando-se na constante de tempo de malha aberta, como no relatório da aula 9, de modo a obter uma boa resposta.

```
feedback(g1e, 1)
```

ans =

From input "u1" to output "y1":

71.423

(s+75.94)

Continuous-time zero/pole/gain model.

%será utilizado o valor de lambda próximo 1/75.93

lambda= 0.05; % Escolher

if (lambda<=0)

beep;

disp('lambda deve ser > 0');

return

end

K=gle.Kp;

tau=gle.Tp1;

Kp=tau/(K*lambda);

Ki=1/tau;

[y,u,t] = arduino_controle_PI_motor(obj,Ref,Tempo, Kp, Ki);

[y,u,t] = arduino_controle_PI_motor(obj,Ref1,Tempo, Kp, Ki);

seta_saida_motor(obj,0);

nr=Ref1-mean(y(1:3));

iae=trapz(t,100*abs(Ref1-y)/nr);

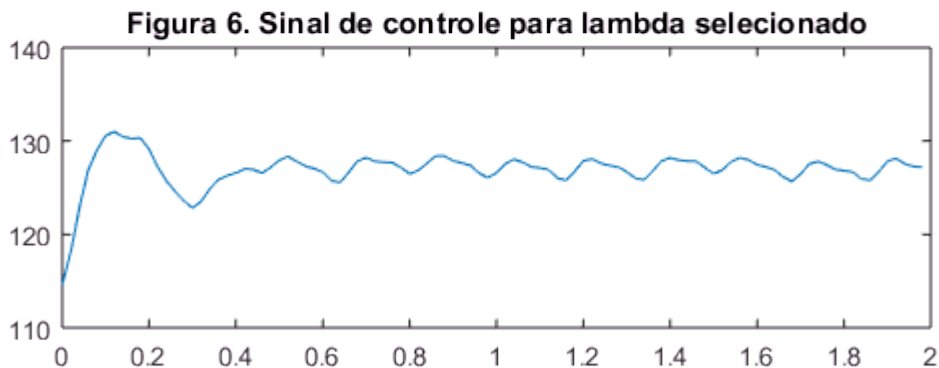
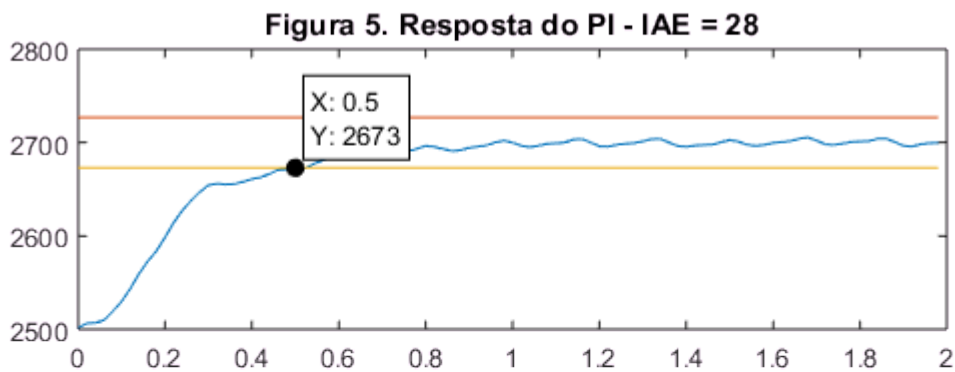
ss=sprintf('Figura 5. Resposta do PI - IAE = %.0f',iae);

r=Ref1*ones(size(y));

figure;

subplot(211);plot(t,[y 1.01*r 0.99*r]);title(ss);

subplot(212);plot(t,u);title('Figura 6. Sinal de controle para lambda selecionado');



As duas barras na figura mostram o limite do erro em regime (1%).

Como o modelo do motor é tipo 1 e os compensadores avanço e atraso não têm polo na origem (como o PI), deve-se obter um ganho para atender o erro em regime.

Esse ganho também deve conseguir uma resposta rápida como a obtida com o controlador PI.

Especificaremos para os controladores avanço e atraso $U_{Pe}=3\%$, que corresponde a $\zeta = 0.75$.

Também especificaremos um erro em regime menor que 1%.

1.2 Obtenha o tempo de estabelecimento aproximado da Figura 5 e substitua abaixo em tse.

Calcule o ganho K_c do controlador para atender o erro em regime, lembrando que ele é dado por

$$E = \frac{1}{K_c K}, \text{ onde } K \text{ é o ganho da FT de MA.}$$

IMPORTANTE: talvez esse ganho precise ser aumentado para atender a especificação de tempo de estabelecimento tse.

Observe abaixo o gráfico de Bode de $G(s)$ e as margens de fase e ganho correspondentes às especificações feitas. A margem de fase do gráfico de Bode de $G(s)$ será usada como referência para os projetos dos compensadores de avanço e atraso, em substituição ao amortecimento ζ usado nos projetos no tempo.

Resposta:

Tempo de estabelecimento (T_s) = 0.5s

Erro = 0.01

Erro = 0.0100

$K_c = 1/(\text{Erro} \cdot 15.819)$

$K_c = 6.3215$

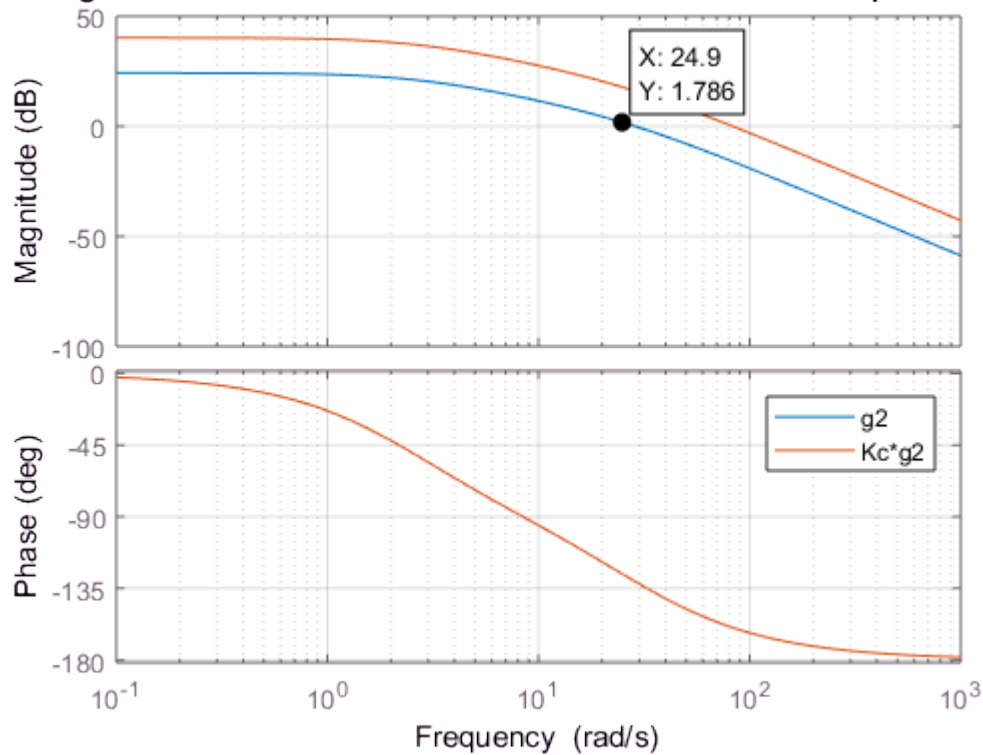
```
g2=tf(g2e.Kp,conv([g2e.Tp1 1],[g2e.Tp2 1]));
UPe=3;
tse=0; % Obter da figura 3
zeta=0.75;
figure
[~,MFg2]=margin(Kc*g2);
MFg2=floor(MFg2);
UP=UPe;ts=tse;
Especificacoes_1=table(UP,ts,zeta,MFg2, Erro)
```

Especificacoes_1 = 1x5 table

UP	ts	zeta	MFg2	Erro
3	0	0.75	20	0.01

```
figure;bode(g2,Kc*g2);legend('g2','Kc*g2');
title('Figura 7 - Gráfico de Bode de malha aberta do sistema especificado');grid
```


Figura 7 - Gráfico de Bode de malha aberta do sistema especificado



1.3 Verifique o efeito do ganho K_c na margem de fase, comparando a margem de fase antes e após a adição deste ganho.

Resposta:

$$Mf(G_2e(s)) = MF(K_c \cdot G_2e(s)) = 180 - 131.2 = 48.8^\circ, \text{ acontece em } \omega = 29.06 \text{ rad/s}$$

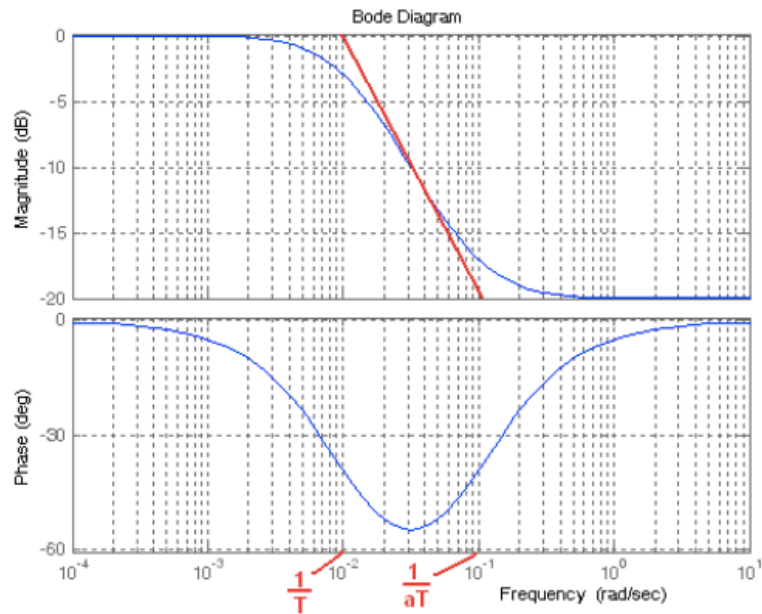
O ganho K_c não interfere com a fase de $G_2e(s)$.

Atividade 2: Projeto do controlador atraso

O projeto do controlador atraso é mostrado na figura abaixo. A curva de módulo deve ser reduzida de forma que cruze em 0dB na frequência onde a margem de fase será a desejada.

Use o gráfico de Bode de malha aberta de $K_c \cdot g_2$ mostrado na Figura 7 para ver quanto o módulo deve ser reduzido.

Resposta:



O script a seguir testa em simulação diferentes valores de margem de fase desejada (MFd) usando a função projat.

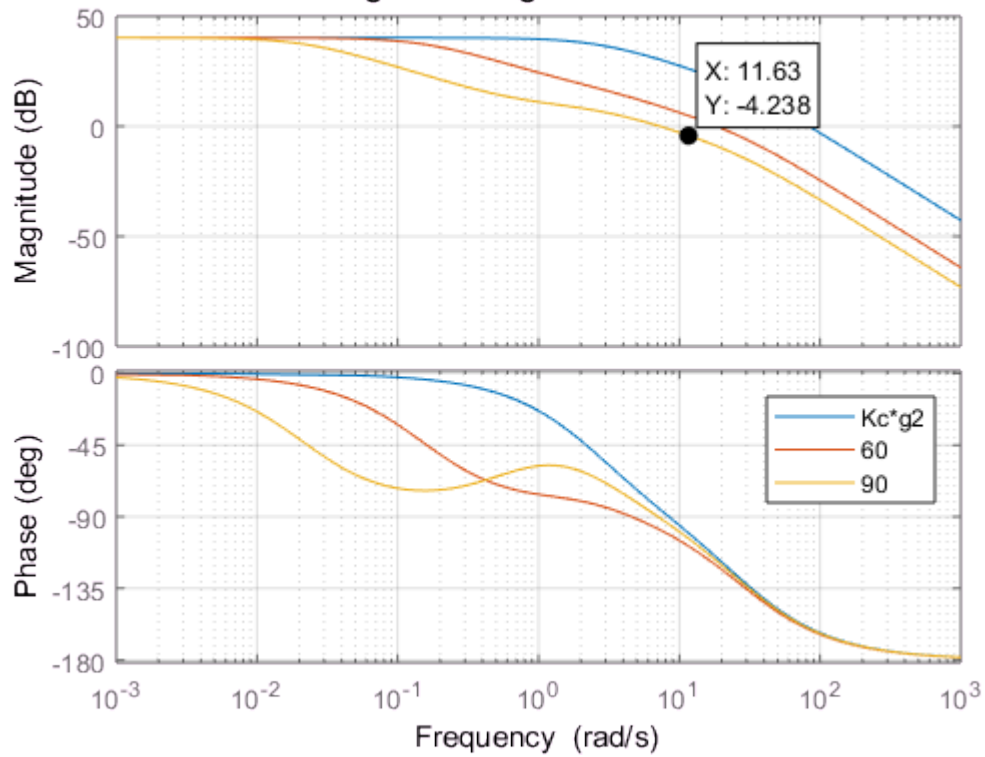
```
MFa=[48.8]; % Margem de fase obtida com o projeto
ts=[0.5];UP=[0.03]; % ts e UP obtidos com o projeto
MFd=linspace(MFg2+10,90,5); % Margem de fase desejada (altere se precisar)
for i=1:length(MFd)
    [c1,a1, T1]=projat(g2,Kc,MFd(i));
    [~,mf]=margin(c1*g2);
    S=stepinfo(feedback(c1*g2,1));
    MFa(i,1)=mf;
    UP(i,1)=S.Overshoot;
    ts(i,1)=S.SettlingTime;
end
MFd=floor(MFd');
MFa=floor(MFa);
Tabela1=table(MFd,MFa,UP,ts)
```

Tabela1 = 5x4 table

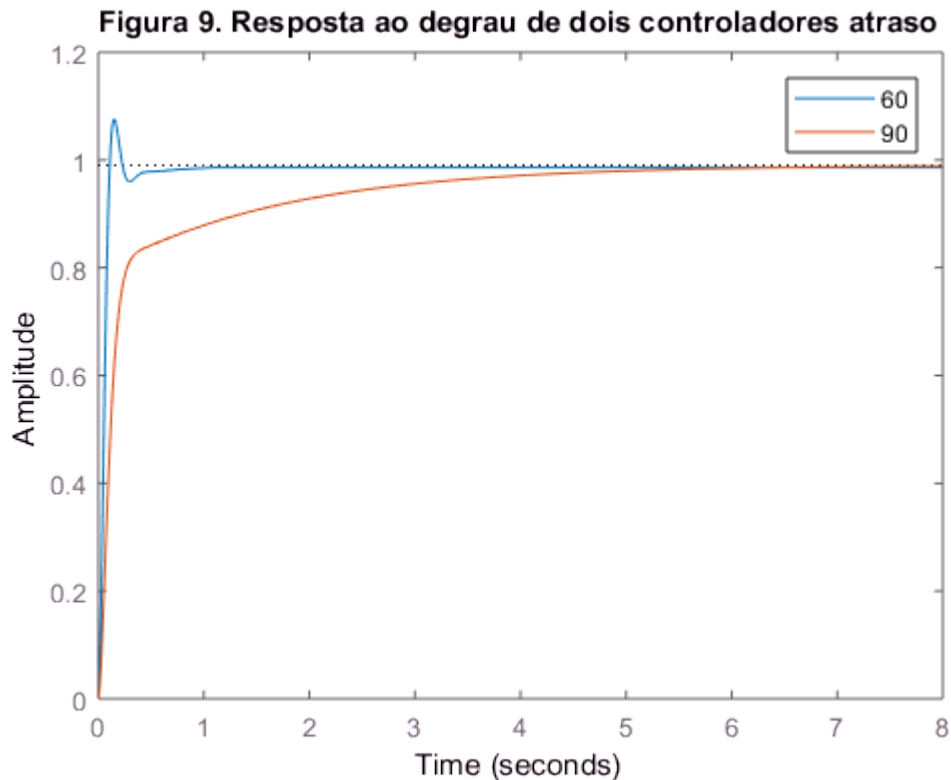
MFd	MFa	UP	ts
---	---	-----	-----
30	30	42.424	0.27391
45	43	25.349	0.24219
60	59	8.583	0.37222
75	69	0	1.0887
90	89	0	3.9567

```
c11=projat(g2,Kc,MFd(3));
c12=projat(g2,Kc,MFd(5));
figure;
bode(Kc*g2,c11*g2,c12*g2);title('Figura 8. Diagrama de Bode');grid;
legend('Kc*g2',num2str(MFd(3)),num2str(MFd(5)))
```

Figura 8. Diagrama de Bode



```
m1=feedback(c11*g2,1);
m2=feedback(c12*g2,1);
figure
step(m1,m2);title('Figura 9. Resposta ao degrau de dois controladores atraso')
legend(num2str(MFd(3)),num2str(MFd(5)));
```



2.1 Qual o efeito de aumentar MFd sobre o gráfico de Bode compensado?

Resposta:

Aumentar a MFd no diagrama de Bode faz com que ele cruze o eixo 0db mais rapidamente.

2.2 Qual o efeito de aumentar MFd sobre a resposta ao degrau?

Resposta:

Aumentar a MFd diminui o efeito oscilatório da resposta ao degrau, deixando a resposta mais lenta.

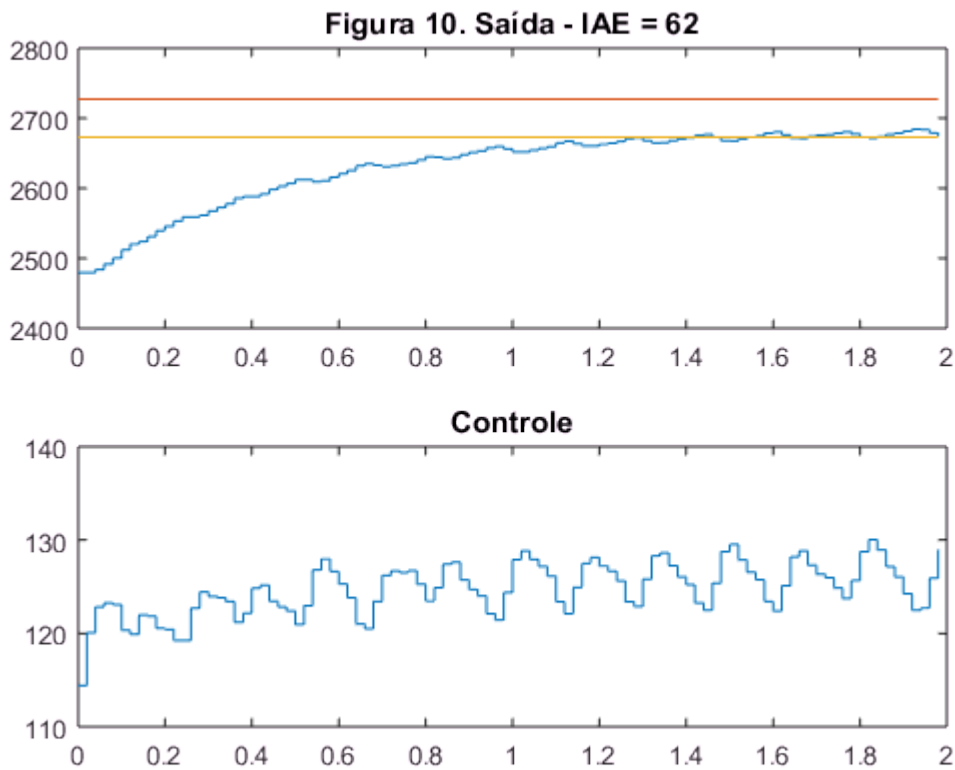
Atividade 3: Teste do compensador atraso projetado no motor

Selecione o compensador que achar mais adequado (ver Tabela 1) e teste no motor.

```
MFda=59; % Escolher um valor de MF desejada (MFda) de acordo com a Tabela 1
Kcat=1*Kc; % Reveja a escolha do ganho Kca do controlador se a resposta ficar lenta
[c1,a1, T1]=projat(g2,Kcat,MFda);
[y,u,t] = arduino_controle_av_ou_at_motor(obj,Ref,Tempo, a1, T1, Kcat);
[y,u,t] = arduino_controle_av_ou_at_motor(obj,Ref1,Tempo, a1, T1, Kcat);
seta_saida_motor(obj,0);

figure;
nr=Ref1-mean(y(1:3));
iae=trapz(t,100*abs(Ref1-y)/nr);
r=Ref1*ones(size(y));
ss=sprintf('Figura 10. Saída - IAE = %.0f',iae);
figure;
subplot(2,1,1);
stairs(t,[y 1.01*r 0.99*r]);title(ss);
```

```
subplot(2,1,2);  
stairs(t,u);title('Controle');
```



3.1 Verifique o atendimento das especificações (erro, UP, ts, IAE) e compare com o controlador PI.

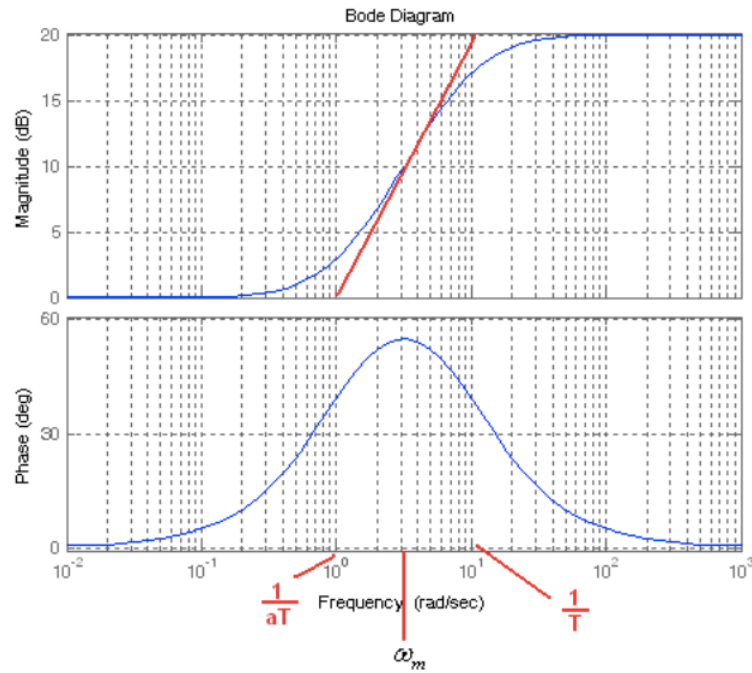
Resposta:

É observada uma piora em todos os fatores comparando o controlador de atraso com o controlador PI, é visível então a compromisso entre a performance do sistema e o atendimento de uma certa MF pelo controlador de atraso.

Atividade 4 - Projeto do controlador Avanço

O projeto do controlador avanço é mostrado na figura abaixo. Deve-se adicionar fase próximo a frequência em que o módulo cruza 0dB de modo que a margem de fase atual mais a adicionada seja igual à desejada.

Use o gráfico de Bode de malha aberta de $K_c \cdot g_2$ mostrado na Figura 7 para ver quanta fase deve ser adicionada.



O script a seguir testa diferentes valores de margem de fase adicionada (fi)

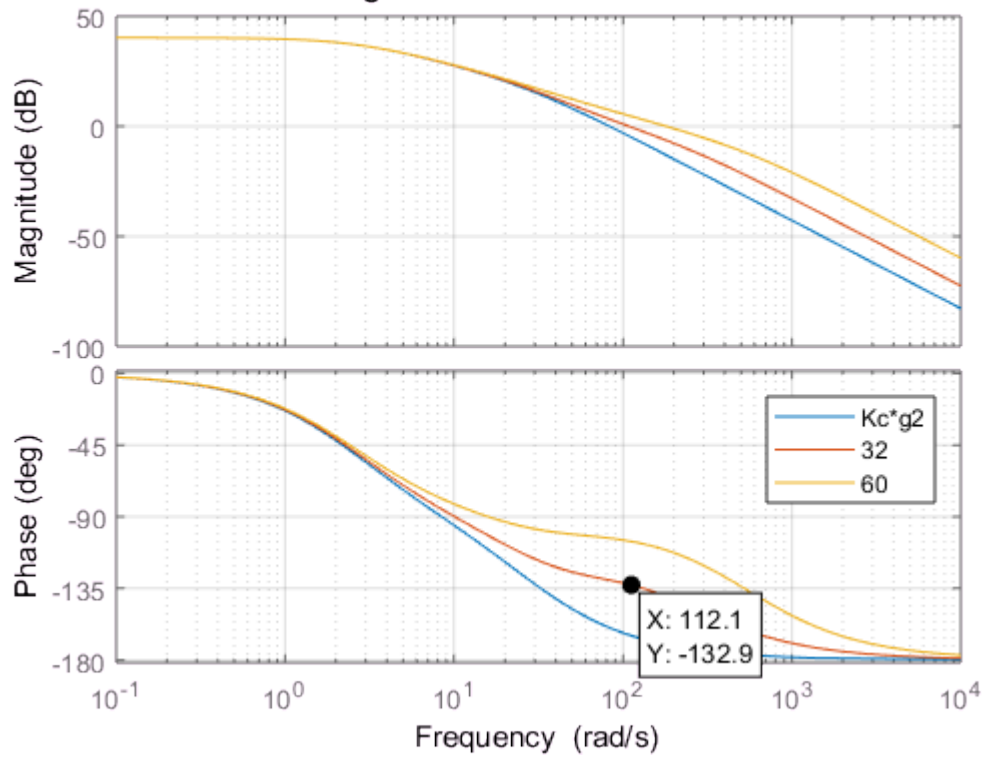
```
MFa=[48.8]; % Margem de fase obtida com o projeto
ts=[0.5];UP=[0.03]; % ts e UP obtidos com o projeto
fi=linspace(5,60,5); % Valores de fase a adicionar à margem de fase atual (altere se ficar mel
for i=1:length(fi)
    [c2,a2, T2]=projav(g2,Kc,fi(i));
    [~,mf]=margin(c2*g2);
    S=stepinfo(feedback(c2*g2,1));
    MFa(i,1)=mf;
    UP(i,1)=S.Overshoot;
    ts(i,1)=S.SettlingTime;
end
fi=floor(fi');
MFa=floor(MFa);
Tabela2=table(fi,MFa,UP,ts)
```

Tabela2 = 5x4 table

fi	MFa	UP	ts
5	24	51.723	0.18572
18	36	37.242	0.1035
32	47	24.551	0.047807
46	59	13.51	0.047361
60	69	4.5342	0.034765

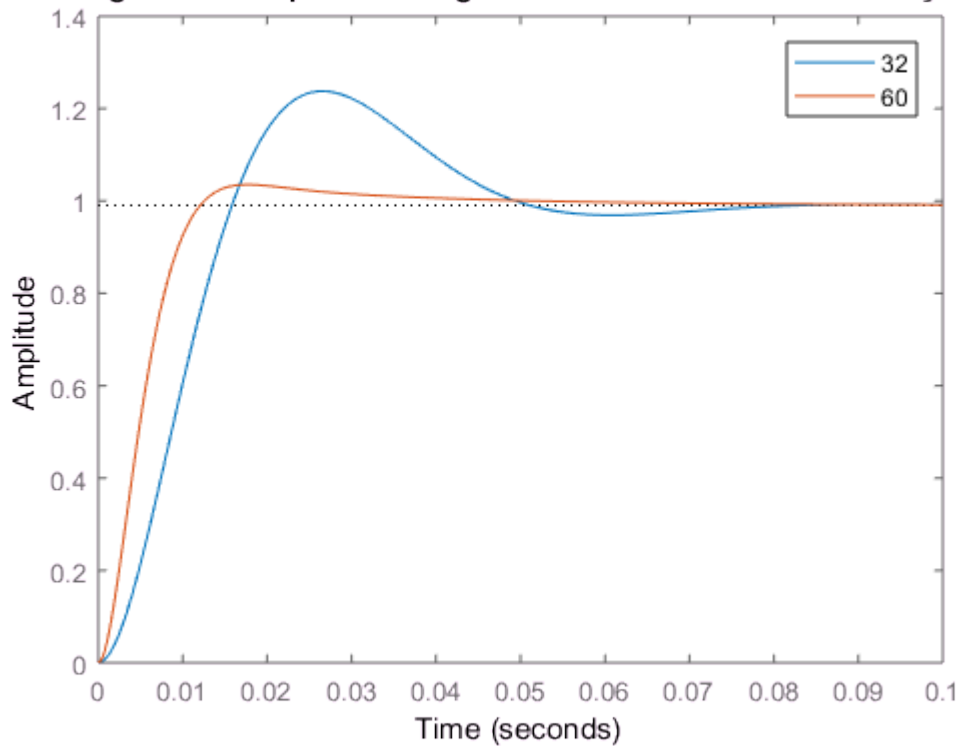
```
c21=projav(g2,Kc,fi(3));
c22=projav(g2,Kc,fi(5));
figure;
bode(Kc*g2,c21*g2,c22*g2);title('Figura 11. Gráficos de Bode')
legend('Kc*g2',num2str(fi(3)),num2str(fi(5)));grid;
```

Figura 11. Gráficos de Bode



```
m1=feedback(c21*g2,1);  
m2=feedback(c22*g2,1);  
figure  
step(m1,m2);title('Figura 12. Resposta ao degrau de dois controladores avanço')  
legend(num2str(fi(3)),num2str(fi(5)));
```

Figura 12. Resposta ao degrau de dois controladores avanço



4.1 Qual o efeito sobre o gráfico de Bode compensado ao se aumentar o valor da fase adicionada ϕ ?

Resposta:

Verifica-se uma relação diretamente proporcional entre ϕ e o cruzamento do eixo 0db pelo gráfico de bode, uma vez que um acréscimo de ϕ se traduz em uma frequência mais alta de cruzamento.

4.2 Qual o efeito sobre a resposta ao degrau ao se aumentar ϕ ?

Resposta:

O aumento de ϕ se traduz em uma resposta mais rápida com menos UP.

Atividade 5: Teste o compensador avanço projetado no motor

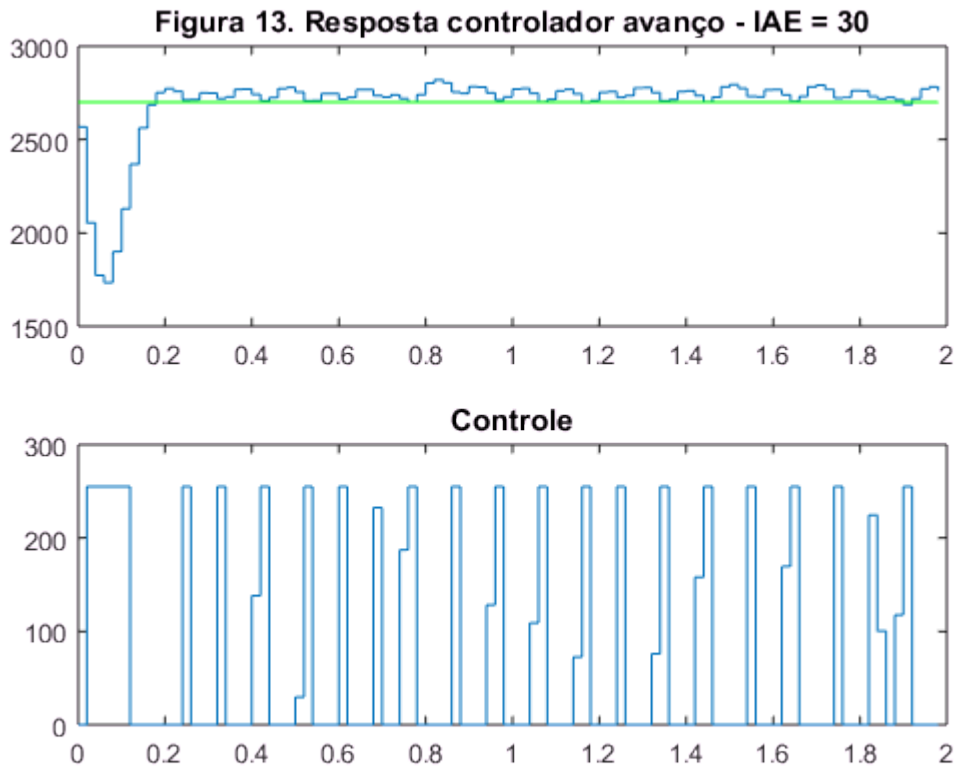
```

fi_a=32; % Escolher um valor de fi da tabela 2
Kcav=1*Kc; % Verifique se o ganho Kc deve ser maior para atender tse
[c2,a2, T2]=projav(g2,Kcav,fi_a);
[y,u,t] = arduino_controle_av_ou_at_motor(obj,Ref,Tempo, a2, T2, Kcav);
[y,u,t] = arduino_controle_av_ou_at_motor(obj,Ref1,Tempo, a2, T2, Kcav);
seta_saida_motor(obj,0);

figure;
nr=abs(Ref1-mean(y(1:3)));
iae=trapz(t,100*abs(Ref1-y)/nr);
r=Ref1*ones(size(y));
ss=sprintf('Figura 13. Resposta controlador avanço - IAE = %.0f',iae);
    
```



```
subplot(2,1,1);
stairs(t,y);hold on;plot(t, r, 'Color', 'g');title(ss);hold off
subplot(2,1,2);
stairs(t,u);title('Controle');
```



5.1 Verifique o atendimento das especificações (erro, UP, ts, IAE) comparando com o atraso e PI

Resposta:

Verifica-se uma melhora nos parâmetros de tempo de estabelecimento, IAE e no ts quando o controlador de avanço é comparado com o PI e o de atraso. É observado então que o avanço diminui a margem de fase a troco da melhora dos parâmetros.

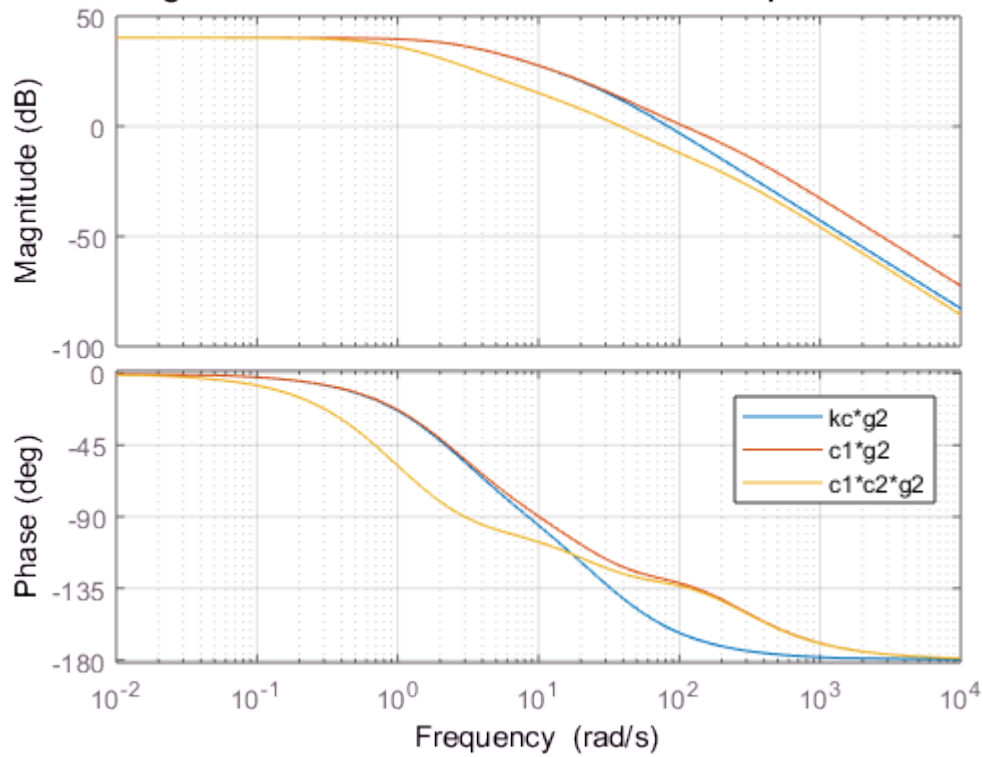
Atividade 7: Projeto do controlador avanço+atraso: apenas em simulação

Baseado nos projetos feitos, projete um controlador avanço +atraso para conseguir bom desempenho, testando o mesmo em simulação.

Escolha fi1 e MFd1 observando as tabelas 1 e 2, ou seja, combinando um pouco do avanço e do atraso para conseguir uma maior margem de fase.

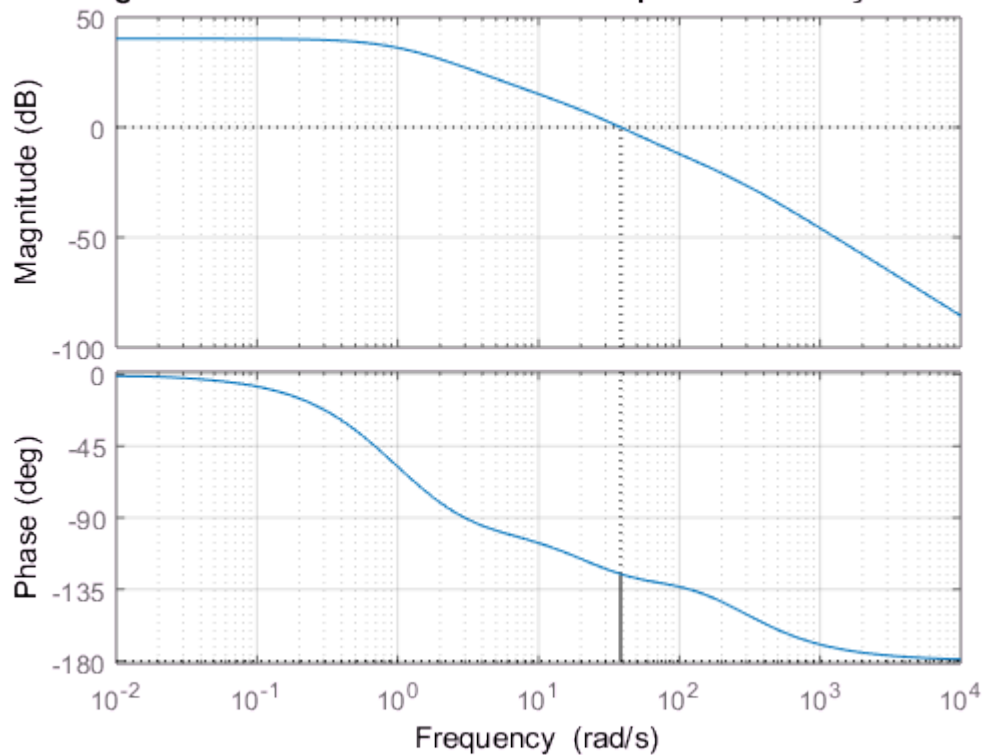
```
fi1=32;
MFd1=59;
[c1,a1, T1]=projav(g2,Kc,fi1); % Escolher fi1
[c2,a2, T2]=projat(c1*g2,1,MFd1); % Escolher MFd1
figure;
bode(Kc*g2,c1*g2,c1*c2*g2);legend('Kc*g2','c1*g2','c1*c2*g2');grid;
title('Figura 14. Gráficos de Bode sem e com compensadores');
```

Figura 14. Gráficos de Bode sem e com compensadores



```
figure;
margin(c1*c2*g2);title('Figura 15. Gráfico de Bode com o compensador avanço-atraso')
grid;
```

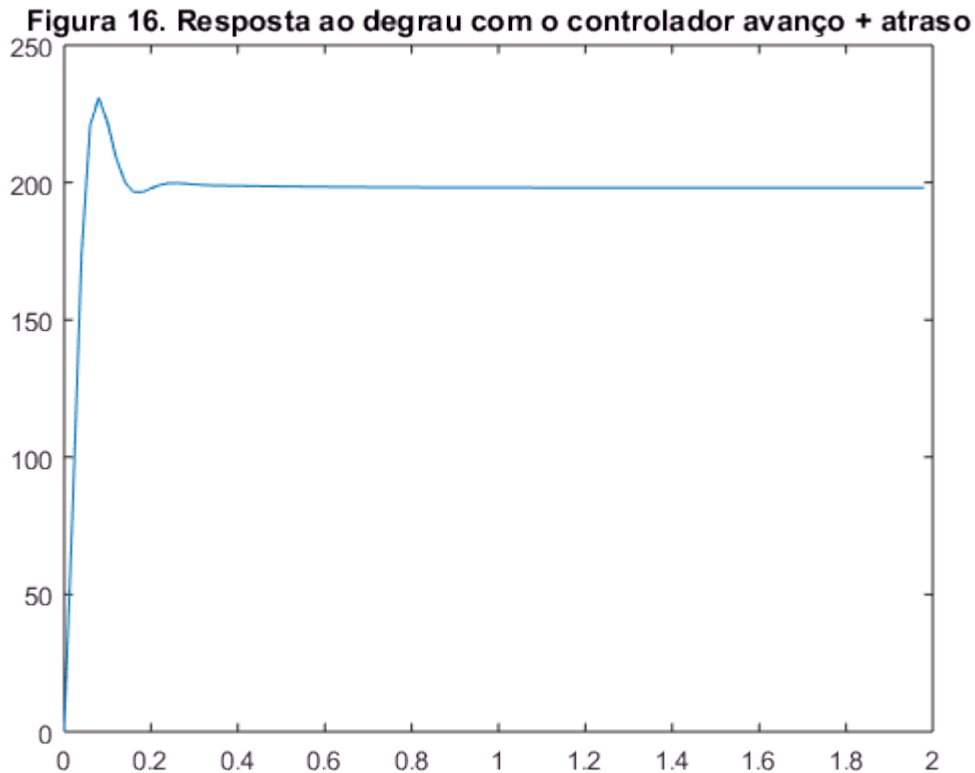
Figura 15. Gráfico de Bode com o compensador avanço-atraso



```

m=feedback(c1*c2*g2,1);
R1=Ref1-Ref;
figure;
y=step(R1*m,t);
plot(t,y);
title('Figura 16. Resposta ao degrau com o controlador avanço + atraso')

```



```

nr=abs(R1);
iae=trapz(t,100*abs(R1-y)/nr);
S=stepinfo(m);
UP=S.Overshoot;
ts=S.SettlingTime;
Tabela3=table(UP,ts,iae)

```

Tabela3 = 1x3 table

UP	ts	iae
16.655	0.13418	4.8656

7.1 Compare as figuras 9,12,16 (resposta ao degrau) e verifique se conseguiu um desempenho melhor do que o avanço ou atraso sozinhos. Explique também como escolheu ζ e M_d .

A escolha de ζ_1 e M_{d1} foi um teste empírico onde houve a tentativa de balancear a velocidade do sistema com o comportamento oscilatório e o melhor valor de IAE.

Comparando as figuras 9,12,16 verifica-se que o melhor desempenho é a da figura 16, uma vez que o IAE chegou a um valor bem baixo de 4,8656%, o t_s de 0,13s e um UP de somente 16.65%, valores que superam quaisquer tentativas de projetos de controladores anteriores.