

## Aula 10 - Laboratório de Controle - 2021/1

### Projeto do controlador via realimentação de estados+observador

Nome: Lucas Neves Gobbo

```
turma=5 ;
I=5 ;
Tempo=3;

M=[5 9 3 4 1 2 12 7 11 10 8 6
    2 4 5 11 10 1 9 8 7 3 6 12
    9 1 12 8 5 11 6 3 2 4 10 7
    7 6 9 2 11 5 8 4 3 10 12 1
    12 9 3 11 7 8 5 2 10 1 6 4]';

wn=M(I,turma);

arquivo='aula10_R2019.slx';

load dados.mat
i=wn*50;
ind=(i-20):(i+35);
y1=y1(ind);
u1=u1(ind);
t1=t1(ind);
Ref=mean(y1(end-10:end));
u0=mean(u1(1:10));

L=[0;0];
K=[0 0];
RI=0;
Ki=0;
p1=0;
y0=0;
```

### Atividade 1 - Obtenção do modelo em variáveis de estados e simulação em malha aberta

Modelo em variáveis de estado e função de transferência

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

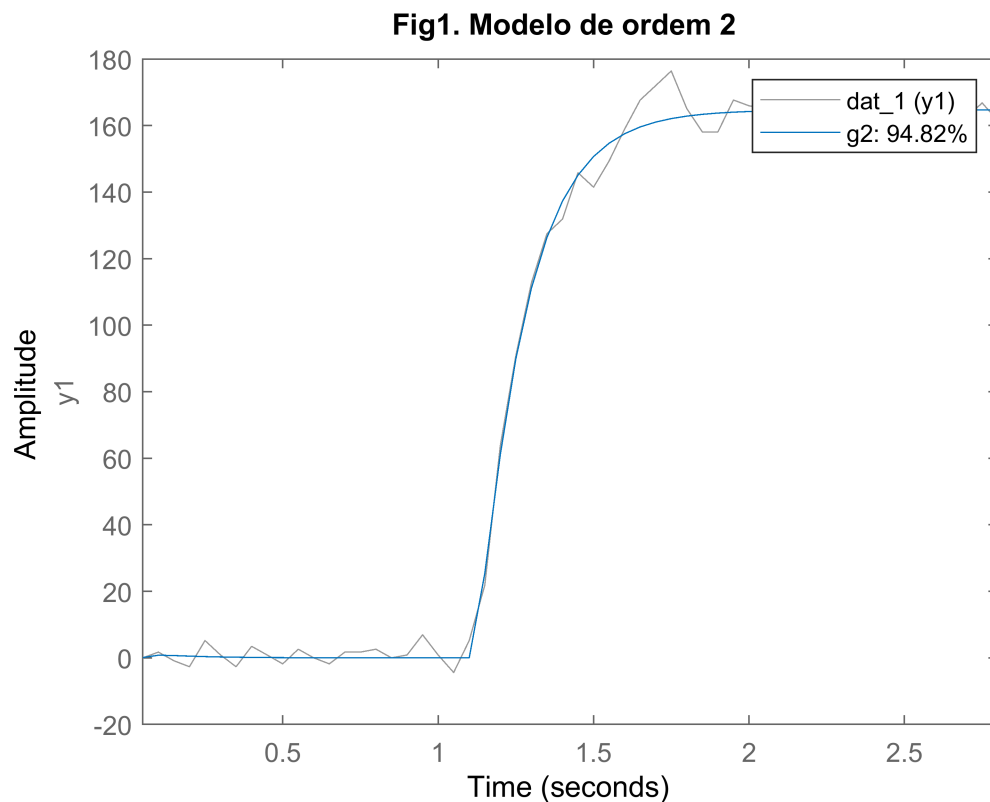
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B$$

```
dat=iddata(y1,u1,Ts);
dat_1=iddata(y1-y1(1),u1-u1(1),Ts);
g2=tfest(dat_1,2,0);
```

```

g2=tf(g2.Numerator,g2.Denominator);
Kp=freqresp(g2,0);
figure
compare(dat_1,g2);title('Fig1. Modelo de ordem 2 ');

```



```

[A,B,C,D]=tf2ss(g2.num{1},g2.den{1});
sys=ss(A,B,C,D);

```

```

Kp=freqresp(g2,0);
Ts=0.01;
s=stepinfo(g2);
ts_ma=s.SettlingTime;
Ref=mean(y1(end-10:end));
u0=mean(u1(1:10));
[Y,t]=simula_slx(arquivo,1);
i1=sum(t<2);
y0=mean(Y((i1-10):i1,3));
Tabela1=table(Ref,ts_ma,u0,y0)

```

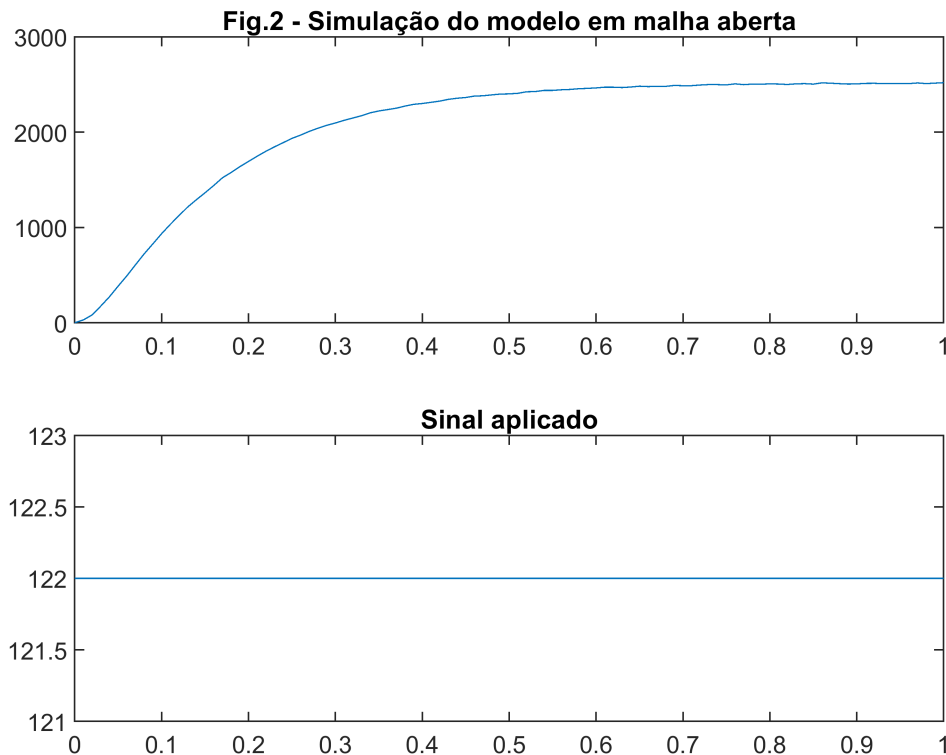
Tabela1 = 1×4 table

	Ref	ts_ma	u0	y0
1	2767	0.6157	122	2.5111e+03

```

figure
subplot(2,1,1);plot(t,Y(:,[3]));title('Fig.2 - Simulação do modelo em malha aberta');
subplot(2,1,2);plot(t,Y(:,2));title('Sinal aplicado');

```



1.1 Quantas entradas, quantas saídas, e quantos estados tem o modelo em variáveis de estados armazenado na variável sys?

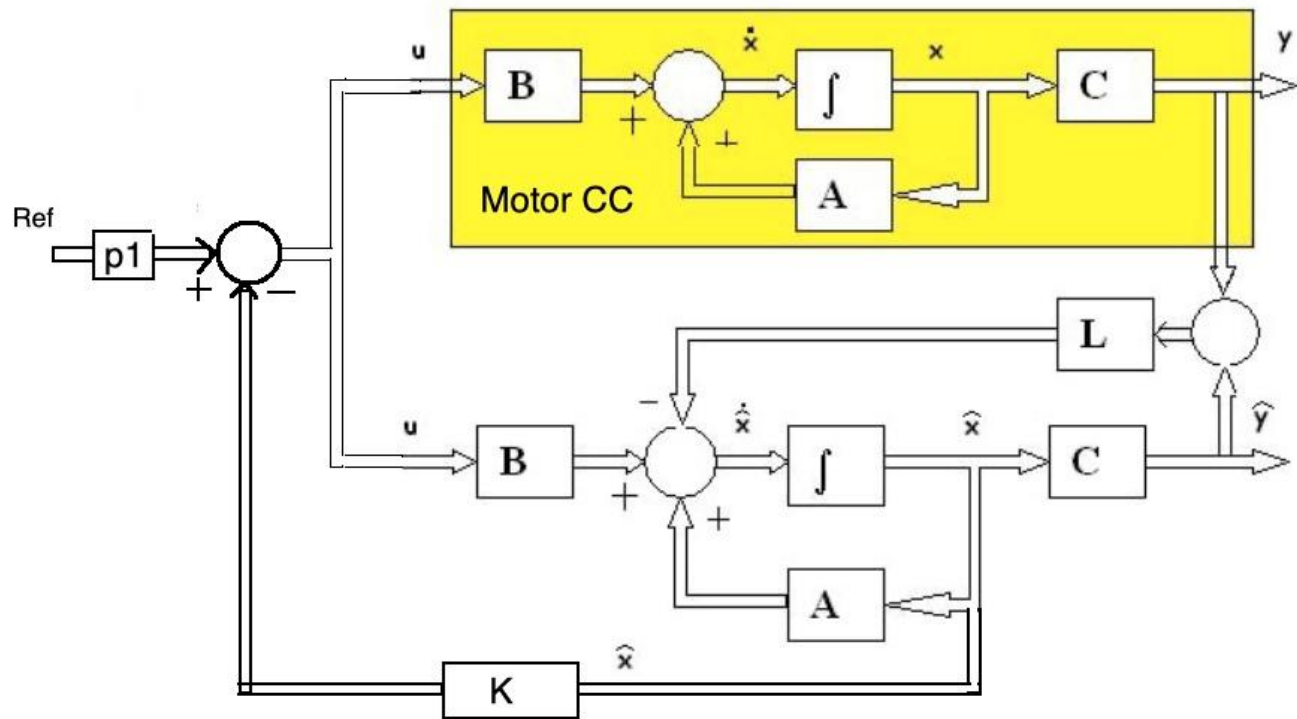
Explicar.

Temos uma variável de entrada, uma de saída e dois estados. Ao analisar 'A', vemos que o vetor de espaço  $x$  tem dimensão 2, logo dois estados. O vetor de saída  $y$  tem apenas uma dimensão, logo uma saída apenas. O vetor de entrada  $u$  tem apenas uma dimensão também, logo uma entrada.

## Atividade 2 - Projetar a realimentação de estados e o observador

A figura abaixo mostra a estratégia de controle utilizada. A realimentação de estados da forma  $u = Ref - K\tilde{x}$  precisa dos estados, mas apenas a saída  $y$  é medida. Para isto se constrói um observador, que envolve calcular o vetor de ganhos  $L$  tal que os autovalores de  $(A - L * C)$  tenham todos parte real negativa. Com isto, se substitui os estados  $x$  por sua estimativa  $\tilde{x}$  no controle. O vetor de ganhos da realimentação de estados  $K$  é calculado tal que os autovalores de  $(A - B * K)$  sejam os polos do modelo de referência, que tem uma sobreelevação  $U_p$  e um tempo de estabelecimento iguais aos desejados.

Usar o modelo de referência gesp definido por UPe e tse para definir os polos de malha fechada do controlador por realimentação de estados. Usar valores obtidos dos projetos anteriores.

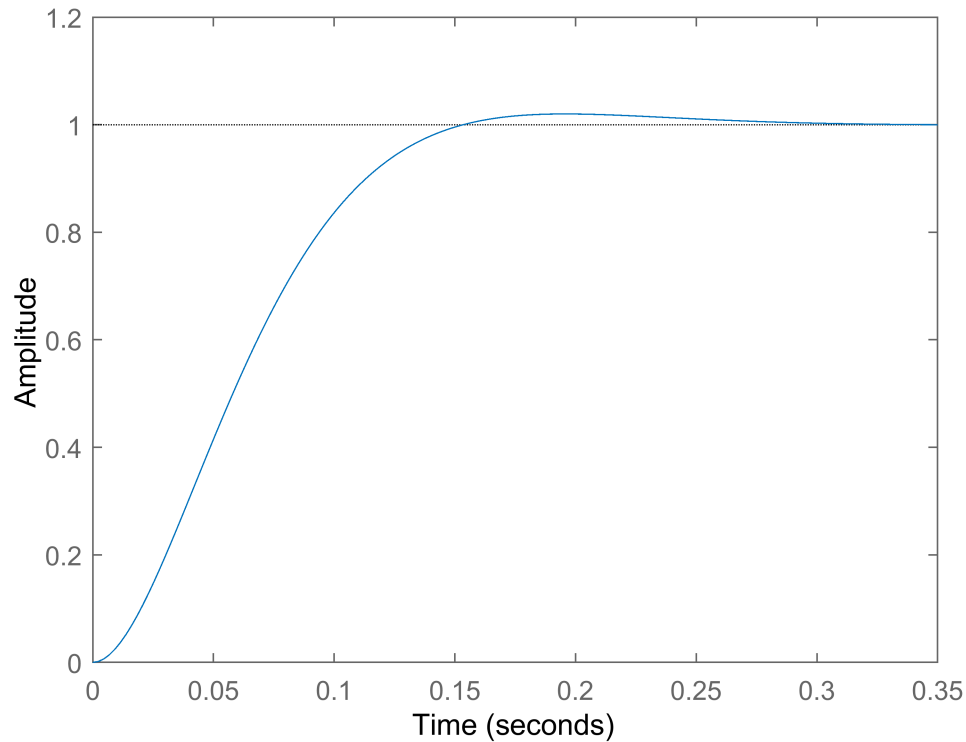


```

UPe=2 ;
tse=0.2 ;
a=log(UPe/100);
zeta=sqrt(a^2/(pi^2+a^2));
wn=4/(tse*zeta);
gesp=tf(wn^2,[1 2*zeta*wn wn^2]);
figure;
step(gesp);title('Fig3. Resposta ao degrau do modelo de referência');

```

**Fig3. Resposta ao degrau do modelo de referência**



Escolhendo agora os polos de malha fechada da realimentação de estados

```
polos_malhafechada=pole(gesp);
```

Escolhendo agora os polos do observador de estados, que devem ser n vezes mais rápidos que os polos do controlador da realimentação de estados

```
n=6;
polos_observador=n*polos_malhafechada;
```

Calculando as matrizes de ganho da realimentação de estados K e do observador de estados L

```
K=place(A,B,polos_malhafechada);Kt=K';
L=place(A',C',polos_observador);L=L';
```

Tabela com o resumo do projeto:

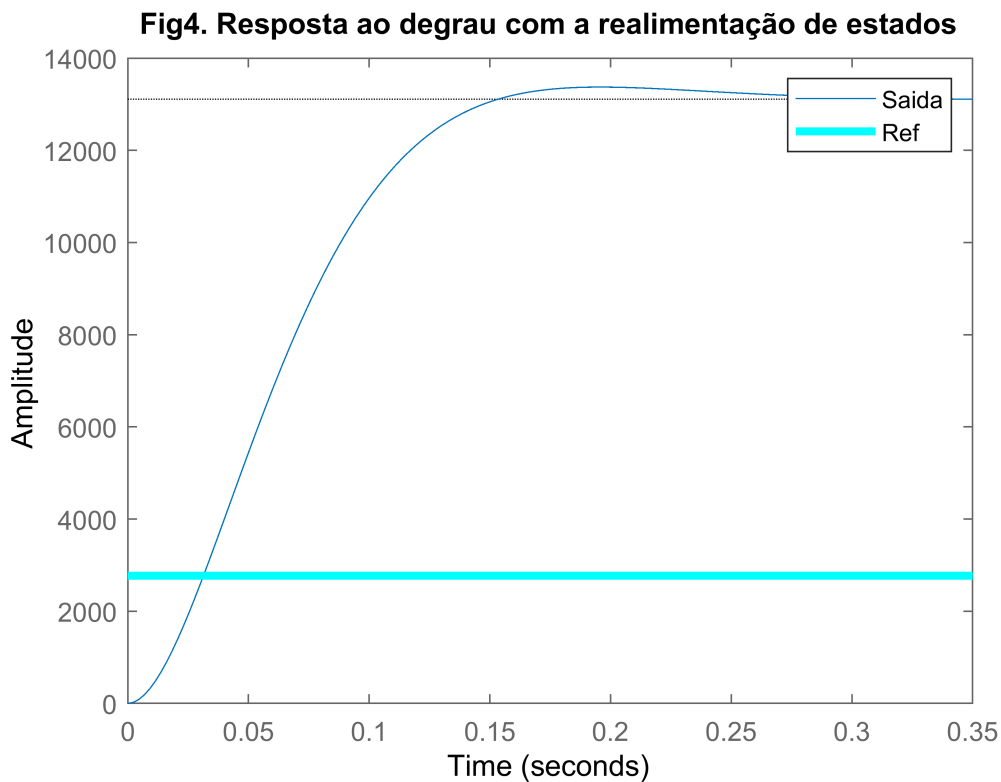
```
Tabela_polos_e_ganhos=table(polos_malhafechada,polos_observador,Kt,L)
```

```
Tabela_polos_e_ganhos = 2x4 table
```

	polos_malhafechada	polos_observador	Kt	L
1	-20.0000 +16.0612i	-1.2000e+02 + 9.6367e+...	-0.5499	4.9307
2	-20.0000 -16.0612i	-1.2000e+02 - 9.6367e+...	430.8175	0.0640

```
m=ss(A-B*K,B,C,D);
figure
```

```
step(Ref*m);title('Fig4. Resposta ao degrau com a realimentação de estados');
line([0 0.5],[Ref Ref], 'Color','c','LineWidth',3); legend('Saida','Ref');
```



2.1 Compare a resposta do modelo de referência e a obtida pela realimentação de estados (UP, ts, erro em regime). Dica: a referência a seguir está na Tabela 1.

Eles estão bem próximos, visto que o erro deu em torno de 0.2%, o UP deu 1.45% e uma resposta mais rápida de estabelecimento de 0.14s

```
K_gesp=freqresp(gesp,0);
K_m=freqresp(m,0);
tabela_ganhos=table(K_gesp,K_m)
```

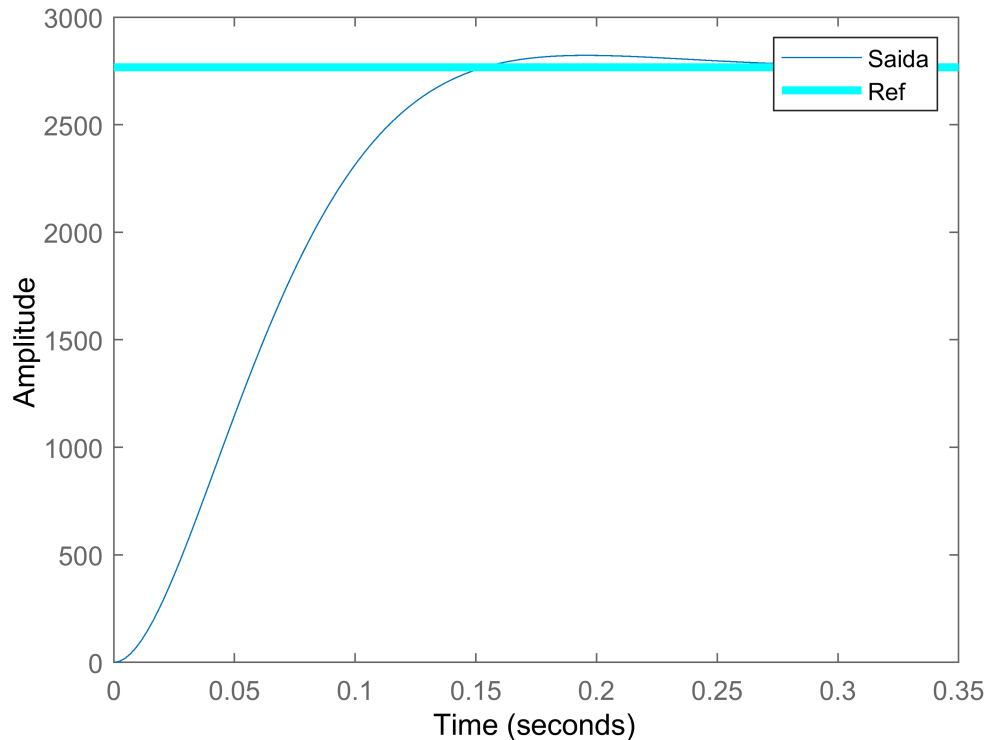
tabela\_ganhos = 1x2 table

	K_gesp	K_m
1	1	4.7382

2.2 Compare os ganhos do modelo de referência e do sistema de MF resultante e calcule  $p1$  para que  $p1*M(s)$  tenha o mesmo ganho que  $gesp$ . Explique o cálculo.

```
p1=1/K_m;
figure
step(Ref*p1*m);title('Fig5. Resposta ao degrau com realimentação de estados e p1 ajustado');
line([0 0.5],[Ref Ref], 'Color','c','LineWidth',3); legend('Saida','Ref');
```

**Fig5. Resposta ao degrau com realimentação de estados e p1 ajustado**



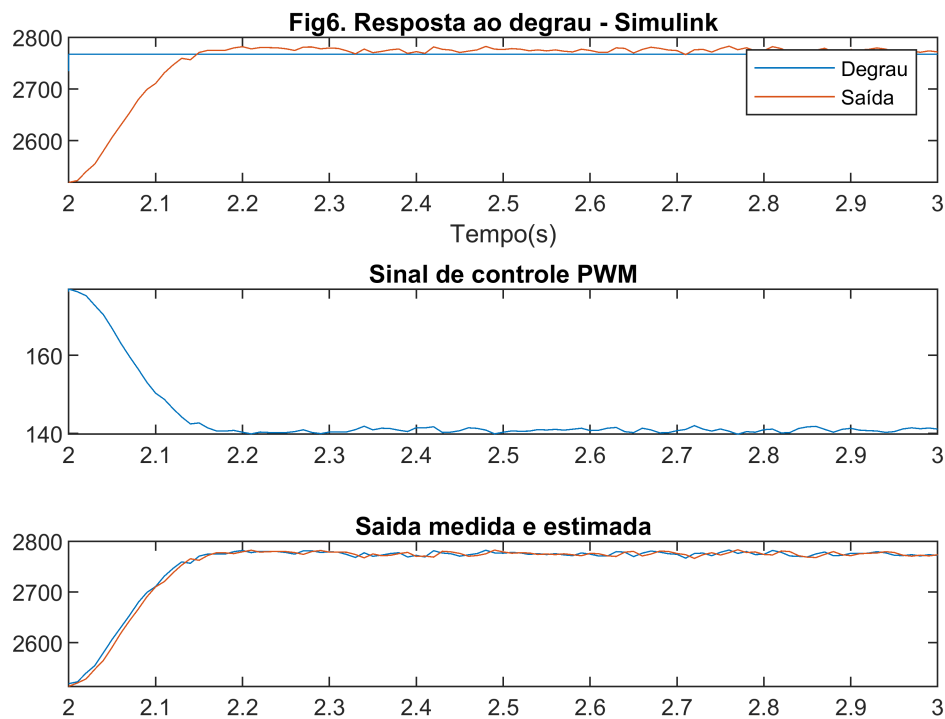
Simule o controlador no modelo do motor (slx).

```
p1=1/50;
[Y,t]=simula_slx(arquivo,Tempo);
[erro,UPp,SettlingTime] = desempenho(Y(:,[2,3]),t,Ref,2);
Tipo={'Especificacoes';'Obtido';};
UP=[UPe;UPp];ts=[tse;SettlingTime];Erro=[0;erro];
Tabela1=table(Tipo,UP,ts,Erro)
```

Tabela1 = 2×4 table

	Tipo	UP	ts	Erro
1	'Especificac...	2	0.2000	0
2	'Obtido'	1.4961	0.1444	0.2619

```
figure
subplot(3,1,1);plot(t,Y(:,[1,3]));legend('Degrau','Saída');xlabel('Tempo(s)');
title('Fig6. Resposta ao degrau - Simulink');xlim([2 Tempo]);
subplot(3,1,2);plot(t,Y(:,2));title('Sinal de controle PWM');xlim([2 Tempo]);
subplot(3,1,3);plot(t,Y(:,[3,4]));title('Saída medida e estimada');xlim([2 Tempo]);
```

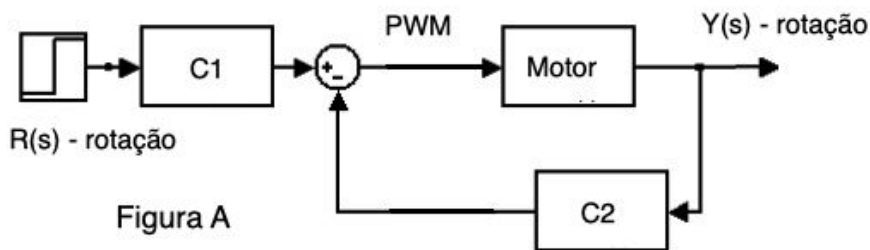


2.3 Compare a resposta das figuras 5 e 6, justifique as diferenças, e discuta formas de fazer com que a simulação obtida no motor (fig 6) se aproxime da desejada (modelo de referência), ajustando  $p1$ , por exemplo.

As figuras 5 e 6 mostram o efeito da resposta ao degrau com realimentação dos estados. Na Figura 5, temos usando o  $p1 = 1/K_m$  para poder ajustar o valor de saída para ficar o mais próximo possível da referência. Na Figura 6, o  $p1$  é estimado para o nosso caso real, para que tenhamos um bom sinal de controle no PWM e uma saída estimada bem próxima da saída medida. Para a figura 6 ficar o mais próxima possível da figura 5, devemos ajustar  $p1$  para controlar o ganho e ajustar o ' $n$ ' para aumentar a velocidade de resposta, mas não aumentar tanto a ponto de só ter ruído.

O ganho  $K$  da realimentação de estados e o ganho  $L$  do observador de estados podem ser transformados em compensadores  $C1$  e  $C2$  (figura abaixo) aplicados à FT do motor. Basta para isto aplicar a transformada de Laplace ao sistema em variáveis de estado. isto é feito nas linhas de código abaixo.





```
[NC1,DC1]=ss2tf(A-L*C-B*K,B,K,0,1);
[NC2,DC2]=ss2tf(A-L*C-B*K,L,K,0,1);
C1=1-tf(NC1,DC1)
```

C1 =

$$\frac{s^2 + 240 s + 2.369e04}{s^2 + 239.5 s + 2.401e04}$$

Continuous-time transfer function.

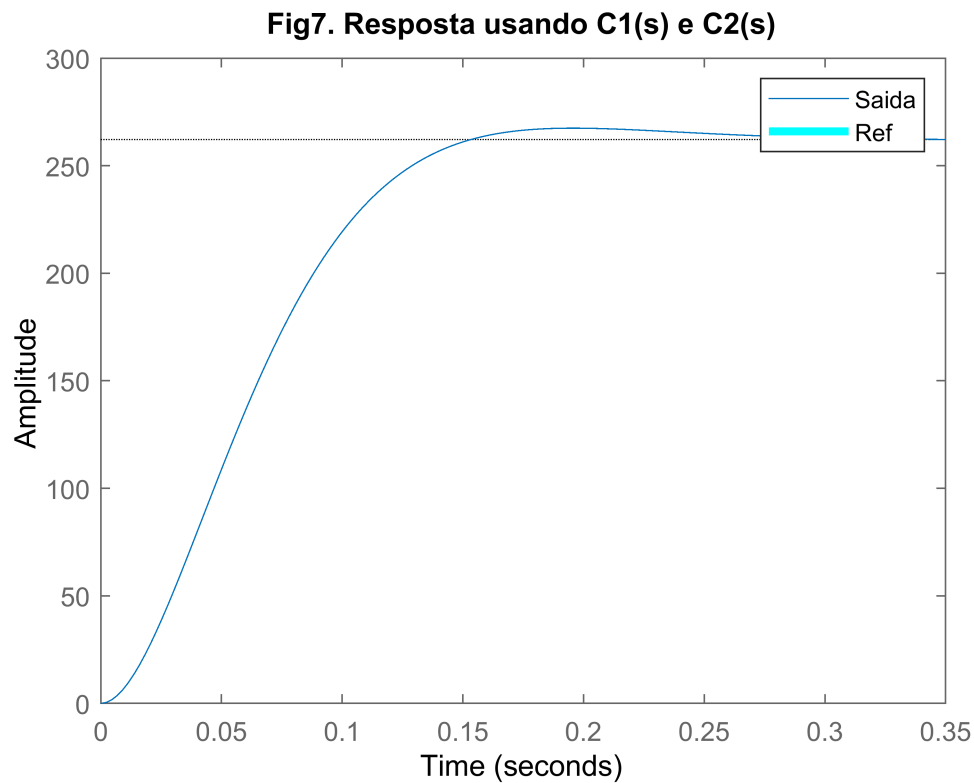
```
C2=tf(NC2,DC2)
```

C2 =

$$\frac{24.85 s + 3250}{s^2 + 239.5 s + 2.401e04}$$

Continuous-time transfer function.

```
M_re=C1*feedback(g2,C2);
M_re_minima=minreal(M_re);
figure
step(Ref*M_re_minima*p1);
line([0 1],[Ref Ref], 'Color','c','LineWidth',3);
title('Fig7. Resposta usando C1(s) e C2(s));legend('Saida','Ref');
```



2.4 Qual a ordem de  $Y(s)/R(s)$  na Figura B? Qual a ordem da FT  $M_{re\_minima}$ ? Explique a diferença. Dica: analise os polos e zeros das FTs.

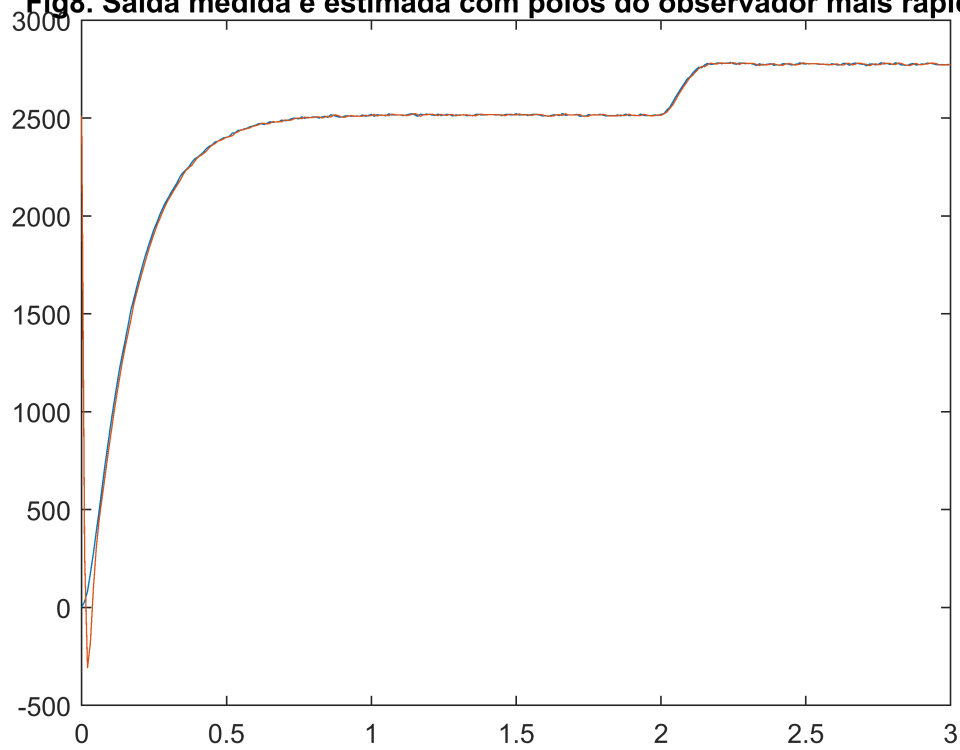
É de terceira ordem na figura B. A ordem da FT  $M_{re\_minima}$  é de segunda ordem. No primeiro, é adicionado um polo para poder ficar mais fácil de zerar o erro.

Varie os polos do observador tornando-os cada vez mais rápidos que os da realimentação de malha fechada, e refaça a simulação.

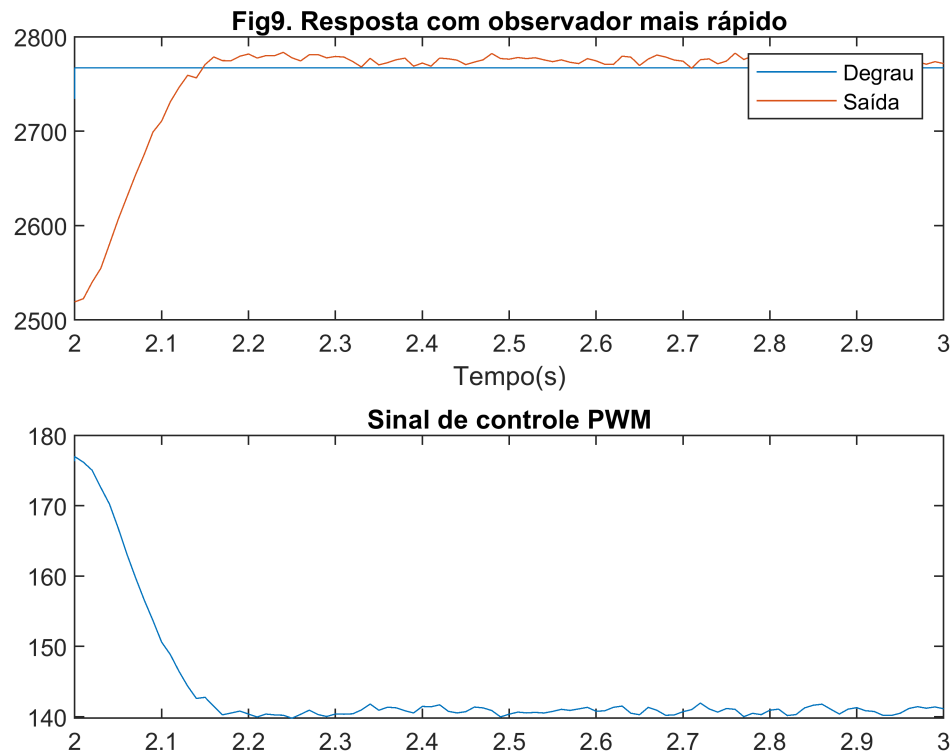
```
n=5;
polos_observador=n*polos_malhafechada;
L=place(A',C',polos_observador);L=L';

[Y,t]=simula_slx(arquivo,Tempo);
figure;
plot(t,Y(:,[3,4]));title('Fig8. Saida medida e estimada com polos do observador mais rápidos');
```

**Fig8. Saida medida e estimada com polos do observador mais rápidos**



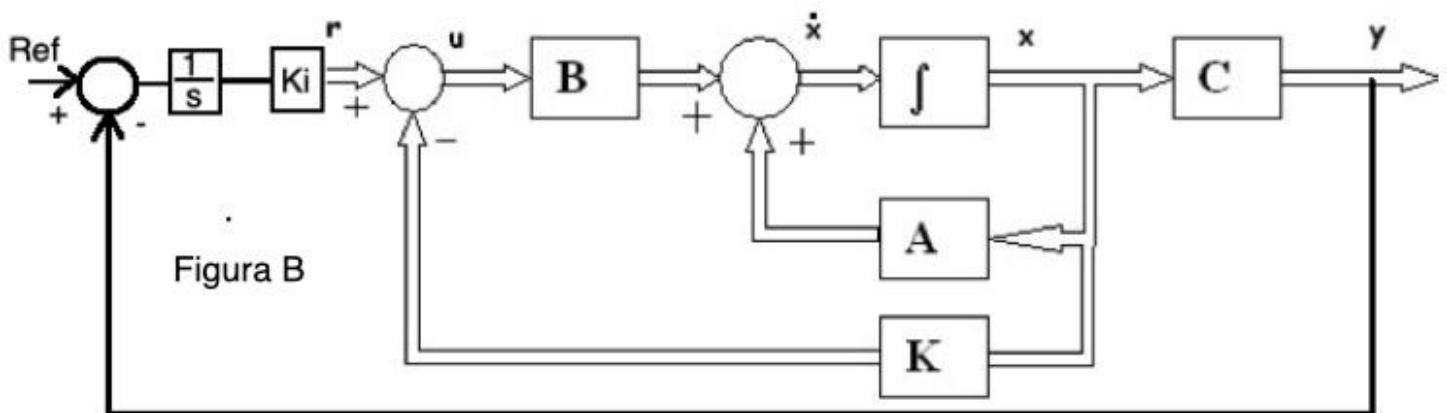
```
figure
subplot(2,1,1);plot(t,Y(:,[1,3]));legend('Degrau','Saída');xlabel('Tempo(s)');xlim([2 Tempo])
title('Fig9. Resposta com observador mais rápido');
subplot(2,1,2);plot(t,Y(:,2));title('Sinal de controle PWM');xlim([2 Tempo])
```



2.5 Compare o tempo para o erro da estimativa do estado tender a zero, bem como o comportamento do sinal de controle e da saída, quando varia a localização dos polos do observador.

### Atividade 3 - Realimentação integral de estados

A figura B mostra a configuração da realimentação integral de estados, com o vetor de ganhos  $K$  que realimenta os estados originais e o ganho adicional  $K_i$  que realimenta o novo estado introduzido pelo integrador. Para esta simulação, faz-se  $p_1=1$  e  $RI=1$  (habilita o integrador).



```
p1=1;
RI=1;
```

Sistema aumentado (adição do integrador)

```
Aa=[A [0;0]; -C 0];
Ba=[B;0];
B2=[0;0;1];
Ca=[C 0];
```

O terceiro polo p3 deve ser adequadamente escolhido. Teste valores menores e maiores que a parte real dos polos do modelo de referência.

```
p3=-10;
polos_malhafechada_i=[polos_malhafechada; p3];
K=place(Aa,Ba,polos_malhafechada_i);
Ki=K(3);
K=[K(1) K(2)];

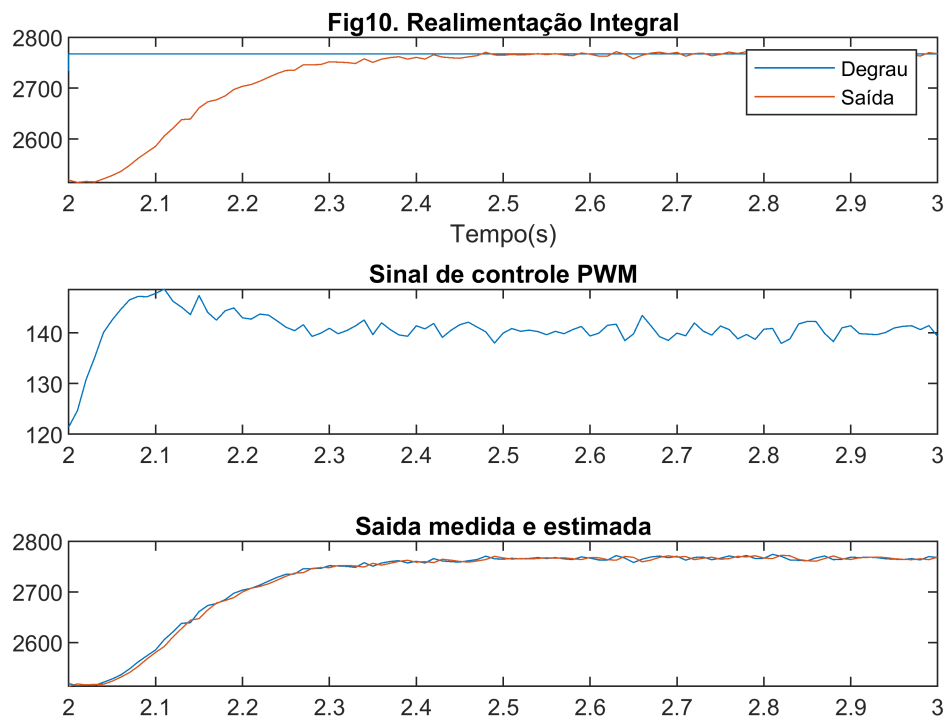
[Y,t]=simula_slx(arquivo,Tempo);

[erro_i,UP_i,SettlingTime_i] = desempenho(Y(:,[2,3]),t,Ref,2);
Tipo_de_controle={'Especificacoes';'Realimentação estados';'Integral'};
UP=[UPe;UPp;UP_i];ts=[tse;SettlingTime;SettlingTime_i];Erro=[0;erro;erro_i];
Tabela2=table(Tipo_de_controle,UP,ts,Erro)
```

Tabela2 = 3×4 table

	Tipo_de_controle	UP	ts	Erro
1	'Especificacoes'	2	0.2000	0
2	'Realimentação estados'	1.4961	0.1444	0.2619
3	'Integral'	0.1625	0.3587	0.0205

```
figure;
subplot(3,1,1);plot(t,Y(:,[1,3]));legend('Degrau','Saída');
xlabel('Tempo(s)');title('Fig10. Realimentação Integral');xlim([2 Tempo])
subplot(3,1,2);plot(t,Y(:,2));title('Sinal de controle PWM');xlim([2 Tempo])
subplot(3,1,3);plot(t,Y(:,[3,4]));title('Saída medida e estimada');xlim([2 Tempo])
```



3.1 Qual o efeito da localização do polo real da realimentação integral p3 sobre a resposta transitória e sobre o sinal de controle?

O efeito da localização de p3, se ele for muito à esquerda, pode causar instabilidades e oscilações na resposta transitória e no sinal de controle. Com p3 mais à direita, temos que tanto a resposta transitória fica melhor quanto o sinal de controle menos oscilatório.

3.2 Compare as Tabelas 2 e 3.

Vemos que o modo integral faz o erro ficar bem próximo de zero, mais próximo do que qualquer outro método, pois ele faz a integral do erro.

3.3 Compare o projeto do PID com o da realimentação integral de estados, destacando vantagens/desvantagens dos métodos

PID (Vantagens): Simples implementação para poder atuar sobre o erro transitório, overshoot, erro em regime, etc.

PID (Desvantagens): Dificuldade na sintonização de parâmetros, pois um acaba interferindo no outro

RIE (Vantagens): Simples ajustes na sintonização de parâmetros, pois não há tanta interferência entre eles.

RIE (Desvantagens): A complexidade de criar um observador para poder estimar o que um motor, neste caso, está fazendo.

```
datetime('now')
```

```
ans = datetime  
      28-Aug-2021 17:23:03
```

```
pwd
```

```
ans =  
'C:\Users\LucasGobbo\Desktop\LCA\Aula10'
```