Aula 9 - Laboratório de Controle - 2023/1

Controle de velocidade do motor CC usando controlador PI e PID

Nomes: João Gabriel Santos Custodio, Lucas da Rosa Tessari

IMPORTANTE: não dê o comando RUN nesta aula, pois pode perder tudo o que fez!!!!

Execute uma seção de cada vez.

Veja as notas no arquivo Sintonia_PID.pdf sobre a sintonia lambda.

Assista o video para orientações sobre o projeto do controlador PI via LR para um modelo de ordem 1.

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

```
ans = datetime
   17-May-2016 07:04:57
```

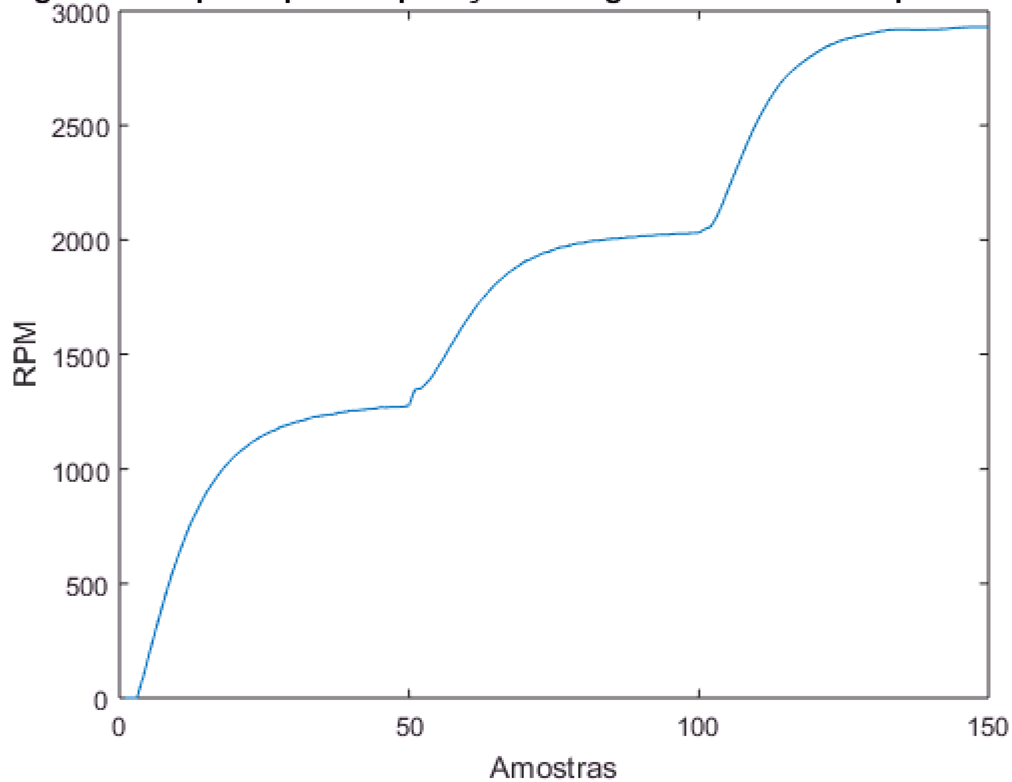
Obtenção da resposta de velocidade do motor CC

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

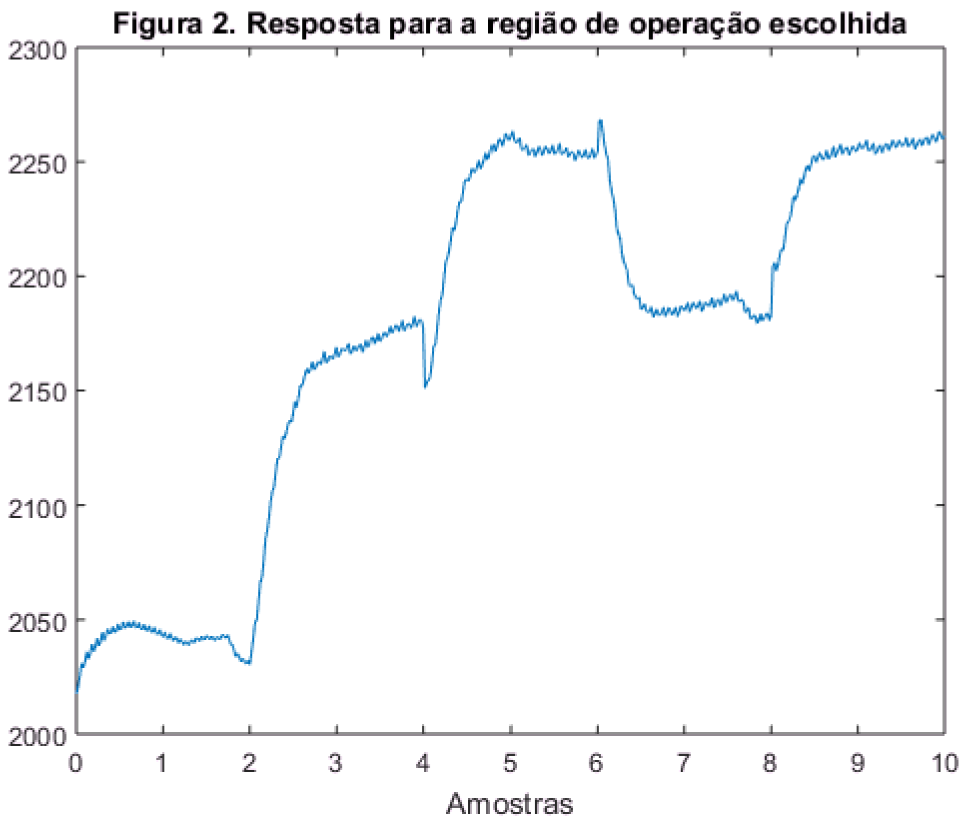
Escolha uma velocidade Ref em torno da qual o motor deverá operar, a partir da observação da Figura 1.

O próximo teste gerará dados (dat1) em torno deste ponto de operação para obter os modelos.

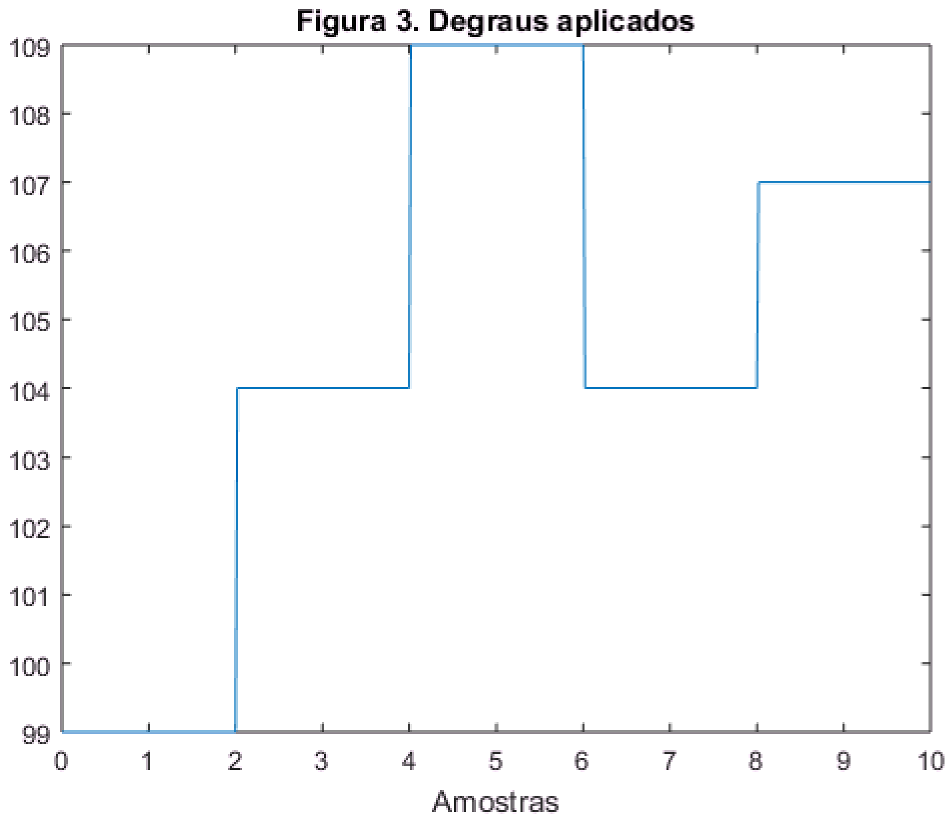
Basta executar a seção a seguir. Caso os dados fiquem ruins, repita a coleta de dados.

```
Ref=2000; % Escolha antes um valor de Ref para velocidade
Tempo=2;
r0=floor(interp1(RPM,U00,Ref));
if isnan(r0)
    beep
    disp('**** Escolha ruim ***')
    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(100:end);
```

```
Y2=y(100: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 região de operação escolhida');
xlabel('Amostras');
```




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

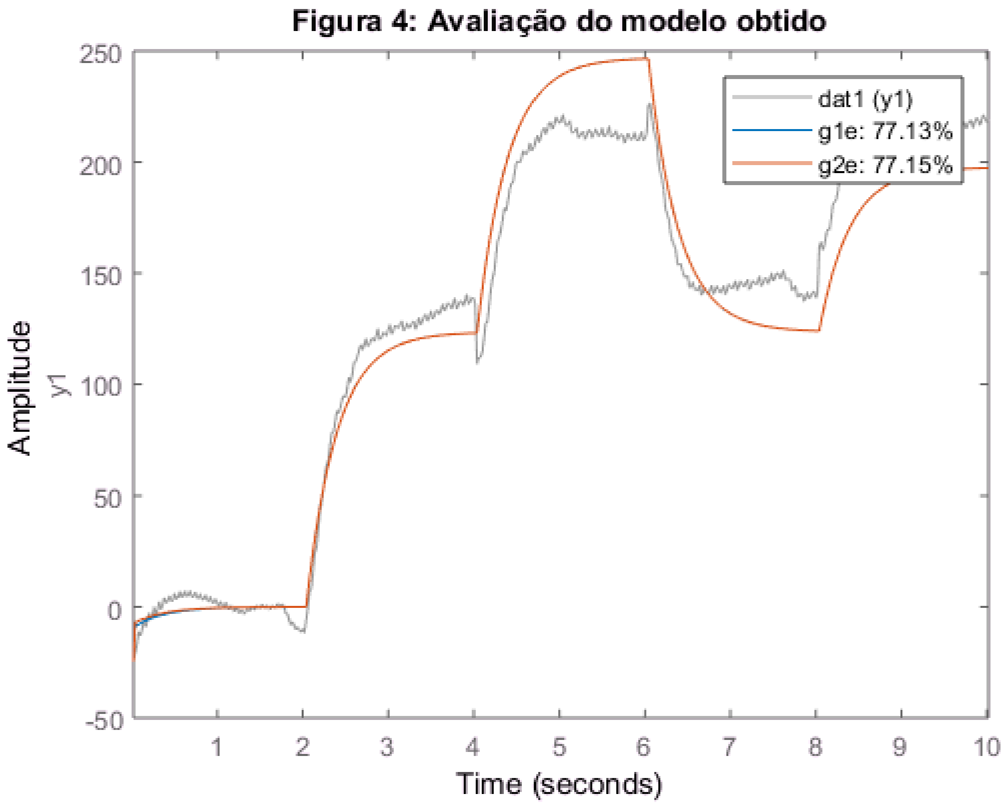


Nesta seção são obtidos os modelos de ordem 1 e 2.

```
g1e=procest(dat1,'P1');
g2e=procest(dat1,'P2');
g1=tf(g1e.Kp,[g1e.Tp1 1])
```

```
g1 =

      24.7
  ------------
  0.3563 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

```
figure;
compare(dat1,g1e,g2e);
title('Figura 4: Avaliação do modelo obtido');
```



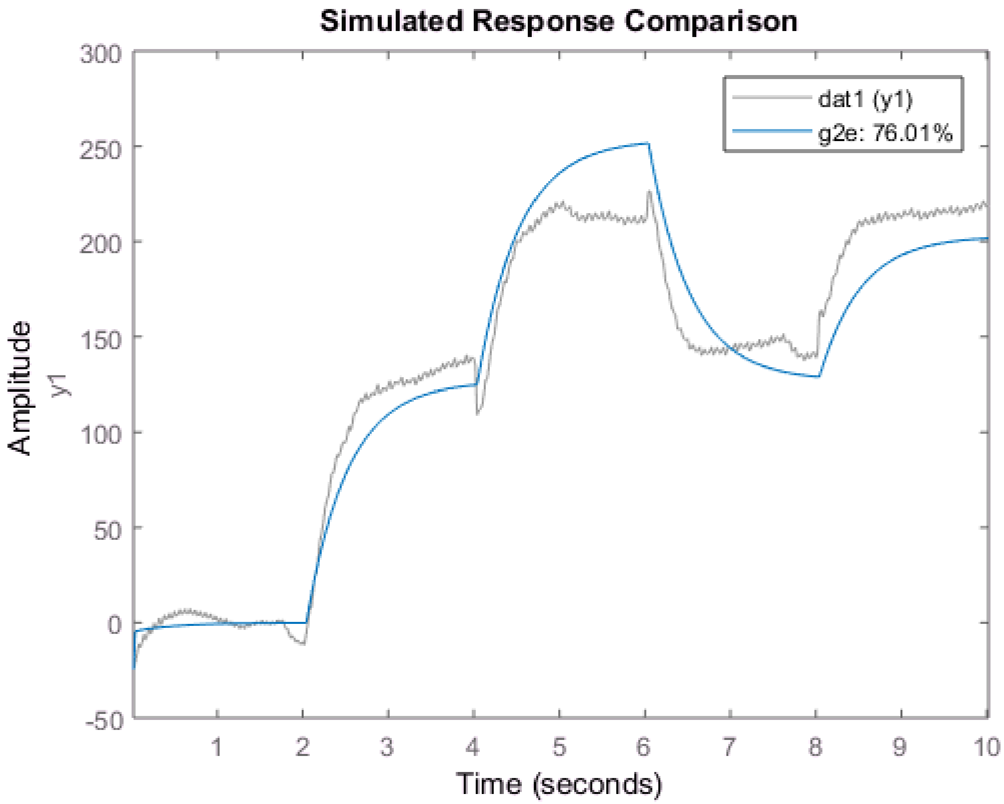
Na seção abaixo há outra alternativa para estimar o modelo de ordem 2, caso tenha ficado ruim.

Escolha uma das alternativas para obter este modelo.

```
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.
```

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



Atividade 1: Controle do motor CC com controlador PI obtido via sintonia lambda

Seja a FT de MA obtida (g1) e C o controlador cujos parâmetros são dados na tabela abaixo.

Para os três modelos de processos abaixo tem-se em malha fechada $M(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{1}{\lambda s + 1}$.

Ou seja, a resposta em malha fechada é dada pelo sistema de ordem 1 definido pelo modelo de referência $M(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}$, cuja constante de tempo de malha fechada é λ.

Tabela 6. Sintonia do PID segundo Rivera, Morari e Skogestad

Modelo do Processo	K_P	T_I	T_D
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K \times \lambda}$	τ	-
$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{(\tau_1 + \tau_2)}{K \times \lambda}$	$(\tau_1 + \tau_2)$	$\frac{\tau_1 \times \tau_2}{(\tau_1 + \tau_2)}$
$\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau \times s + 1}$	$\frac{2\xi\tau}{K \times \lambda}$	$2\xi\tau$	$\frac{\tau}{2\xi}$

Usaremos inicialmente um modelo de ordem 1, pois como se observa na Tabela, um modelo de ordem 2 requer um controlador PID para que a resposta em malha fechada seja dada por $M(s)$.

Assim, para $g_1(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$, usaremos o controlador PI dado por $C(s) = K_p + K_p K_I/s = K_p \frac{s + K_I}{s}$, um controlador PI série, em que K_p multiplica K_i

Comentários sobre o código abaixo:

Inicialização: quando executada, zera todos os testes.

Testar valor de lambda: escolha um valor de lambda e execute a seção. Este valor será usado para projetar o controlador PI e testá-lo no motor.

Incluir teste: caso deseje armazenar o resultado do teste para o valor de lambda escolhido, execute esta seção. Ao fazê-lo, os valores são armazenados e mostrados junto com os demais testes. Pode-se então voltar a testar novos valores de lambda.

Tabela com resultados: Mostra uma tabela que resume os valores de sobreelevação (UP), tempo de estabelecimento (ts) e IAE para cada valor de lambda testado.

Inicialização: zera todos os testes.

```
Tempo=2;
K=g1e.K;
tau=g1e.Tp1;
Ref1=Ref+200;
Y=[];
Uc=[];
leg=[];
UP=[];
ts=[];
IAE=[];
Lambda=[];
```

Testar valor de lambda

Verifique qual a constante de tempo de malha aberta de g1, e escolha valores para λ de modo que o controlador PI obtido gere respostas mais rápidas que em malha aberta, porém com uma sobreelevação limitada. Teste pelo menos 5 valores de lambda, com respostas mais e menos rápidas.

Escolher um valor para lambda e executar a seção.

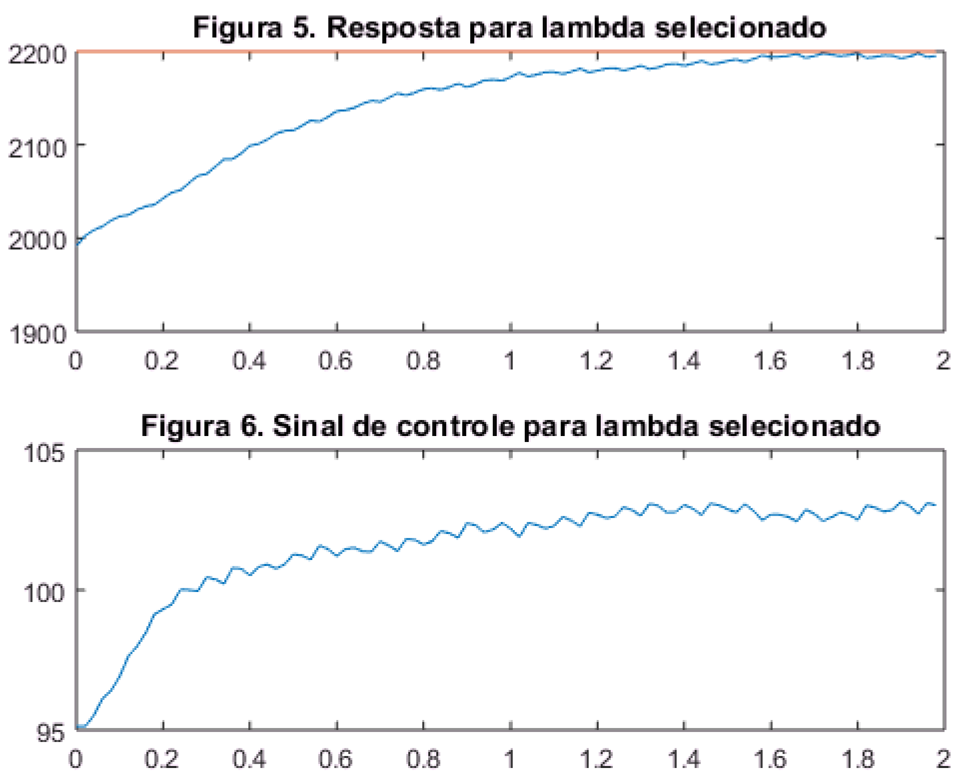
Cálculo para o valor de lambda

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

```
ans =
 
  From input "u1" to output "y1":
   69.322
  ---------
  (s+72.13)
 
Continuous-time zero/pole/gain model.
```

Vemos que lambda é 1/72.13 ou 0.01386.

```
lambda= 0.15;
if (lambda<=0)
    beep;
    disp('lambda deve ser > 0');
    return
end
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);
r=Ref1*ones(size(y));
figure;
subplot(211);plot(t,[y r]);title('Figura 5. Resposta para lambda selecionado');
subplot(212);plot(t,u);title('Figura 6. Sinal de controle para lambda selecionado');
```

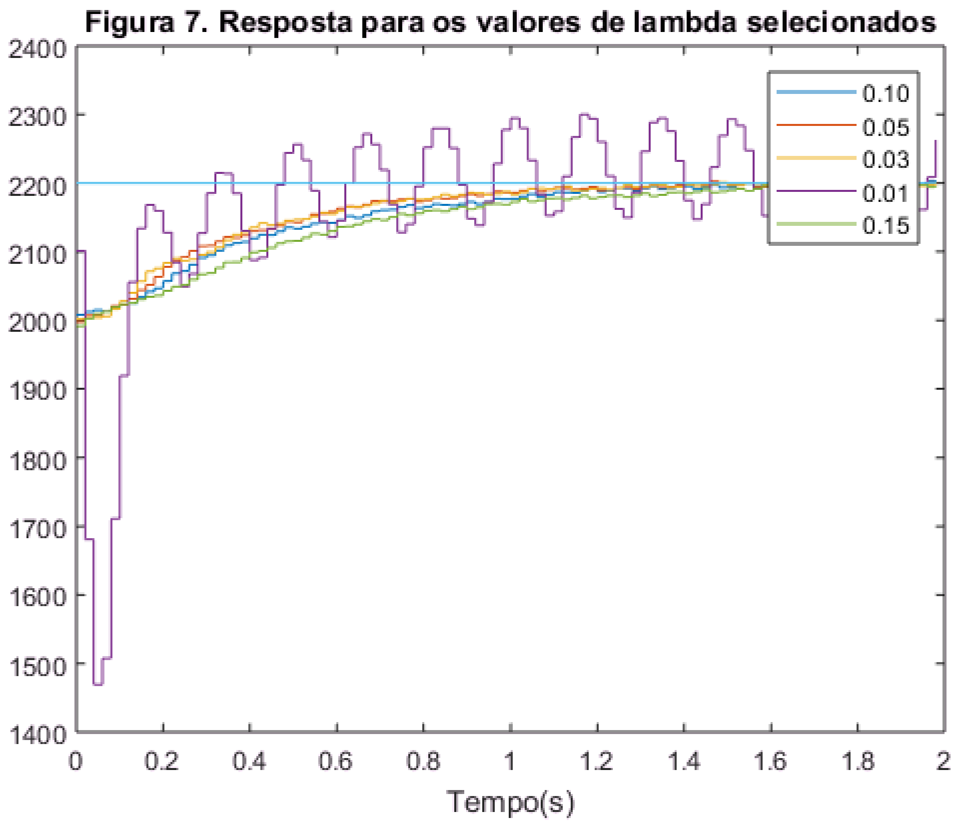


Incluir teste:

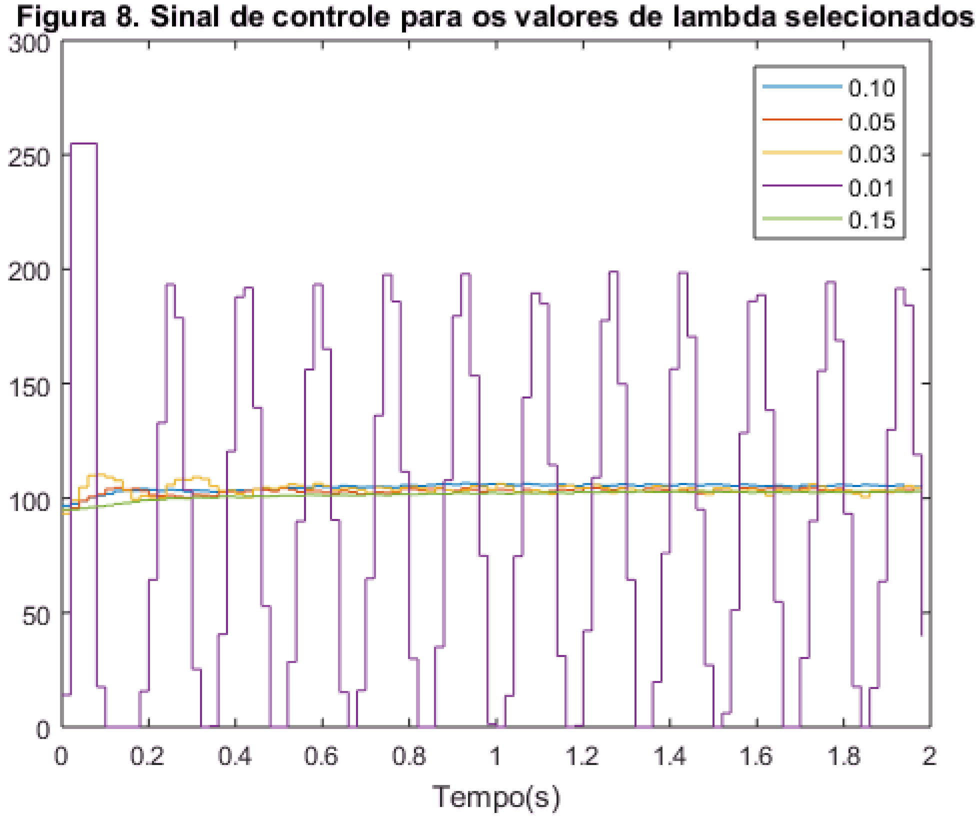
Execute esta seção para armazenar o resultado do teste da seção anterior.

```
nr=Ref1-mean(y(1:3));
iae=trapz(t,100*abs(Ref1-y)/nr); % IAE normalizado pela referencia
S=stepinfo(y,t);
Lambda=[Lambda;lambda];
IAE=[IAE;iae];
```

```
UP=[UP;S.Overshoot];
ts=[ts;S.SettlingTime];
leg=[leg;num2str(lambda,'%3.2f')];
Y=[Y y];
Uc=[Uc u];
figure;
stairs(t,[Y r]);
title('Figura 7. Resposta para os valores de lambda selecionados');
legend(leg);
xlabel('Tempo(s)');
```




```
figure;
stairs(t,Uc);
title('Figura 8. Sinal de controle para os valores de lambda selecionados');
legend(leg);
xlabel('Tempo(s)');
```



Resumo dos testes

```
Tabela1=table(Lambda,UP,ts,IAE)
```

Tabela1 = *5×4 table*

Lambda	UP	ts	IAE
0.1	0.098153	1.8432	47.411
0.05	0.21053	1.8261	39.379
0.025	0.18043	1.9488	38.582
0.01	1.6367	1.9742	34.432
0.15	0.13894	1.5542	54.101

1.1 Qual a resposta mais rápida que conseguiu e qual foi a limitação?

A resposta mais rápida foi obtida com lambda = 0.15, foi o tempo de subida maior e uma resposta pouco oscilatória.

1.2 Que valor de lambda deu o melhor desempenho? Caracterize-o pelos valores mostrados na Tabela 1.

A resposta com melhor desempenho foi obtida com lambda = 0.01, visto que foi obtido o menor IAE no mesmo.

1.3 Que o efeito da redução de lambda sobre o IAE?

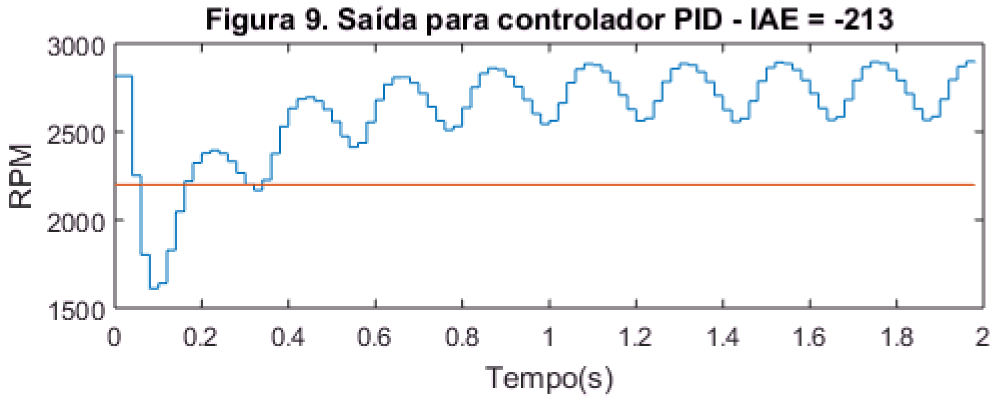
O valor do IAE e lambda são diretamente proporcionais, de modo que a redução do lambda adianta a resposta e diminui o valor da integral do erro absoluto.

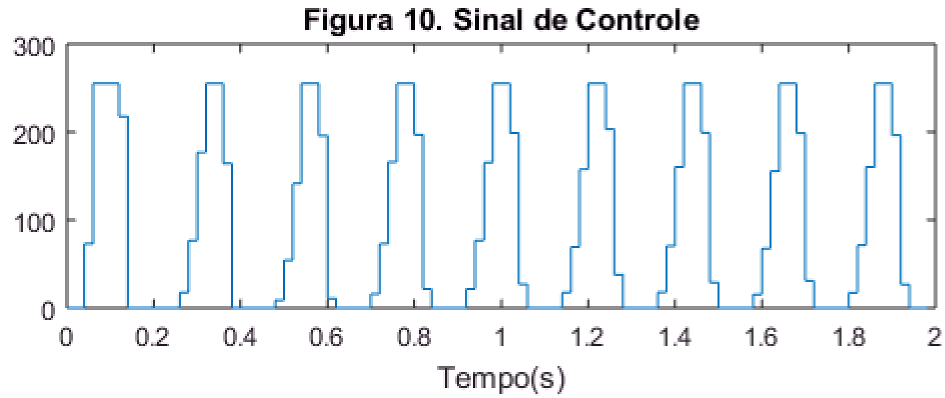
Atividade 2: Controle do motor CC com controlador PID e sintonia lambda

Use agora o modelo de ordem 2 (g2), que tem dois polos (reais ou complexos). Para ter-se $M(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}$, o controlador resultante é um PID (veja a Tabela 6).

2.1 Escolha o mesmo valor de lambda que deu o melhor resultado com o controlador PI, e compare o desempenho dos controladores PI e PID.

```
lambda=0.01; % Escolher valor de lambda
g2=g2e;
[~,z]=damp(g2);
g2complexo=z<1;
if g2complexo     % g2 tem polos complexos
    K=g2.K;
    tau=g2.Tw;
    zeta=g2.Zeta;
    Kp=2*zeta*tau/(K*lambda); % Sintonia lambda
    Ki=1/(2*zeta*tau);
    Kd=tau/(2*zeta);
    G2=tf(K,[tau^2 2*zeta*tau 1]);
else              % g2 tem polos reais
    K=g2.K;
    tau1=g2.Tp1;
    tau2=g2.Tp2;
    Kp=(tau1+tau2)/(K*lambda); % Sintonia lambda
    Ki=1/(tau1+tau2);
    Kd=(tau1*tau2)/(tau1+tau2);
    G2=tf(K,conv([tau1 1],[tau2 1]));
end

[y,u,t] = arduino_controle_PID_motor(obj,Ref,Tempo, Kp, Ki, Kd); % teste
[y,u,t] = arduino_controle_PID_motor(obj,Ref1,Tempo, Kp, Ki, Kd); % teste
seta_saida_motor(obj,0);

nr=Ref1-mean(y(1:3));
iae=trapz(t,100*abs(Ref1-y)/nr);
S=stepinfo(y,t);
up2=S.Overshoot;
ts2=S.SettlingTime;
ss=sprintf('Figura 9. Saída para controlador PID - IAE = %.0f',iae);
figure;
subplot(2,1,1);
r=Ref1*ones(size(y));
stairs(t,[y r]);title(ss);xlabel('Tempo(s)');ylabel('RPM');
subplot(2,1,2);
stairs(t,u);title('Figura 10. Sinal de Controle');xlabel('Tempo(s)');
```






```
tabela2=table(lambda,up2,ts2,iae)
```

```
tabela2 = 1×4 table
    lambda     up2        ts2         iae
    ______    ______     ______     _______

    0.01      0.2524     1.9389     -212.52
```

Agora compare o desempenho dos controladores PI e PID.

Foi observado que a conservação do valor de lambda do PI para o PID resulta em altas oscilações e altos valores de IAE, um resultado ruim em geral.

2.2 Há evidências de que se pode conseguir um desempenho melhor usando o controlador PID e outro valor de lambda, baseado nos testes anteriores?

Justifique e teste abaixo com um novo valor de lambda.

Sim, um valor de lambda entre 0,1 e 0,05 gera resultaves aceitáveis para a IAE.

```
lambda=0.07; % Escolher valor de lambda
g2=g2e;
if g2complexo     % g2 tem polos complexos
    K=g2.K;
    tau=g2.Tw;
    zeta=g2.Zeta;
    Kp=2*zeta*tau/(K*lambda); % Sintonia lambda
    Ki=1/(2*zeta*tau);
    Kd=tau/(2*zeta);
else              % g2 tem polos reais
    K=g2.K;
    tau1=g2.Tp1;
    tau2=g2.Tp2;
    Kp=(tau1+tau2)/(K*lambda); % Sintonia lambda
    Ki=1/(tau1+tau2);
    Kd=(tau1*tau2)/(tau1+tau2);
end

[y,u,t] = arduino_controle_PID_motor(obj,Ref,Tempo, Kp, Ki, Kd);
[y,u,t] = arduino_controle_PID_motor(obj,Ref1,Tempo, Kp, Ki, Kd);
seta_saida_motor(obj,0);

nr=Ref1-mean(y(1:3));
iae=trapz(t,100*abs(Ref1-y)/nr);
S=stepinfo(y,t);
up2=S.Overshoot;
ts2=S.SettlingTime;
ss=sprintf('Figura 11. Saída para controlador PID - IAE = %.0f',iae);
figure;
subplot(2,1,1);
r=Ref1*ones(size(y));
stairs(t,[y r]);title(ss);xlabel('Tempo(s)');ylabel('RPM');
subplot(2,1,2);
stairs(t,u);title('Figura 12. Sinal de Controle');xlabel('Tempo(s)');
```

Figura 11. Saída para controlador PID - IAE = 55

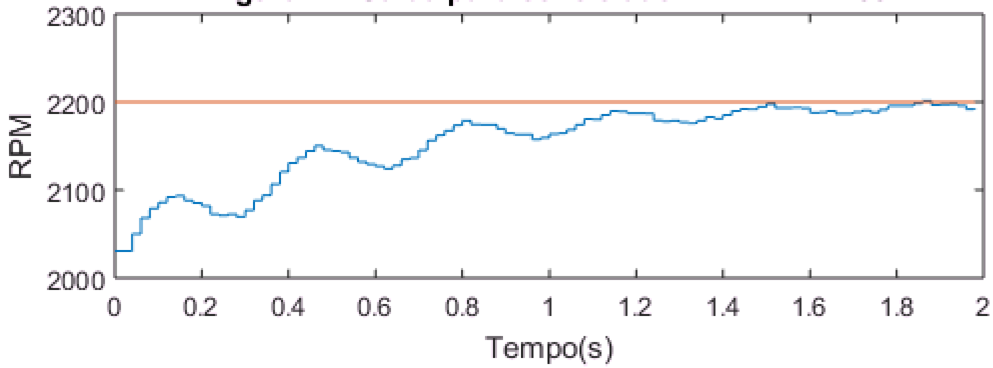
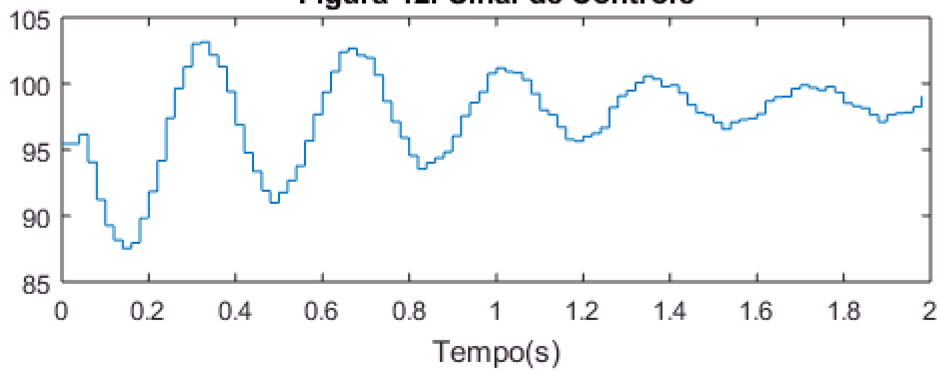


Figura 12. Sinal de Controle




```
tabela3=table(lambda,up2,ts2,iae)
```

tabela3 = *1×4 table*

lambda	up2	ts2	iae
0.07	0.40091	1.9402	54.836

Atividade 3: Projeto do controlador PI via método do lugar das raízes

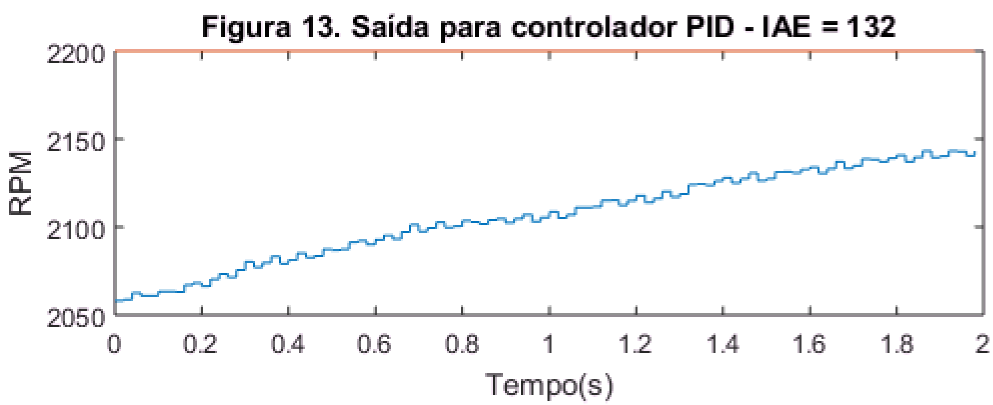
Lembramos que a função de transferência do controlador PI é dada por $C(s) = K_p + K_pK_I/s = K_p\frac{s + K_I}{s}$.

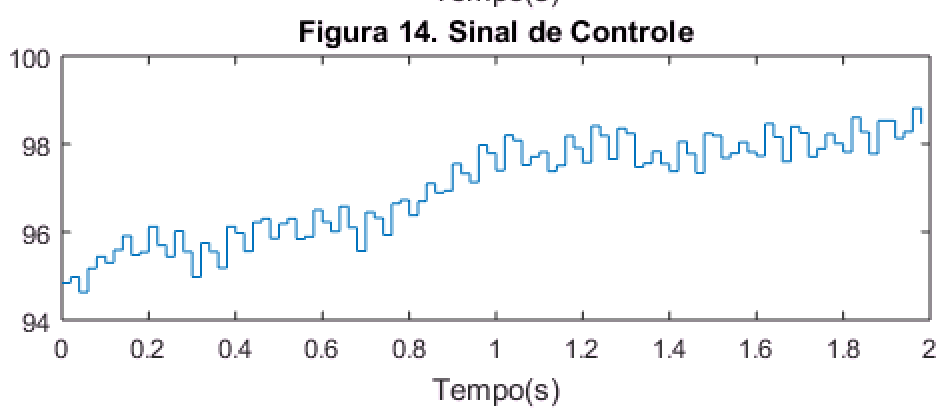
Logo, com os valores de K_p e K_i do projeto via sintonia lambda pode-se identificar a localização do zero em $s = -K_I$ naquele projeto.

3.1 A partir desta escolha, use o rltool ou sisotool para buscar uma nova escolha do zero e do ganho K_p para obter um controlador PI com IAE melhor que o obtido na Tabela 1. Escolha o modelo que julgar melhor para fazer o projeto, de ordem 1 (g1) ou de ordem 2 (G2). Substitua os valores de K_p e K_i abaixo e mostre o resultado obtido.

Explique como fez as escolhas e a razão para o sucesso ou insucesso, comparando a tabela 4 com a tabela 3.

```
Kp=0.1757; % Substituir pelos obtidos do LR
Ki=0.6011; % Substituir pelos obtidos do LR
[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);
S=stepinfo(y,t);
up2=S.Overshoot;
ts2=S.SettlingTime;
ss=sprintf('Figura 13. Saída para controlador PID - IAE = %.0f',iae);
figure;
subplot(2,1,1);
r=Ref1*ones(size(y));
stairs(t,[y r]);title(ss);xlabel('Tempo(s)');ylabel('RPM');
subplot(2,1,2);
stairs(t,u);title('Figura 14. Sinal de Controle');xlabel('Tempo(s)');
```






```
tabela4=table(lambda,up2,ts2,iae)
```

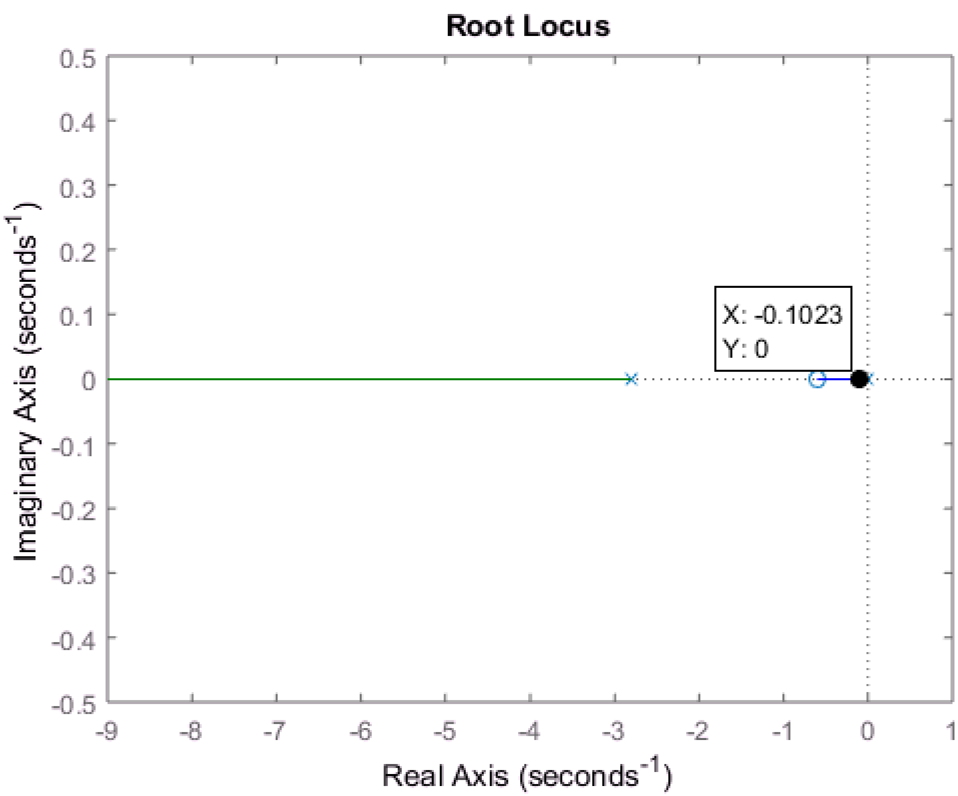
tabela4 = *1×4 table*

lambda	up2	ts2	iae
0.07	0	1.9673	132.13

É observado um insucesso na obtenção de uma melhor performance visto que a resposta ao controlador PI projetado foi muito lenta obtendo um alto valor de IAE.

3.2 O valor de K_i atribuido acima será utilizado abaixo para obter a FT de malha aberta C(s)G(s) com $K_p = 1$ para desenhar o lugar das raízes utilizado. Faça o LR na linha de comando com o comando rlocus(C*G), marque sobre ele onde estão os polos de malha fechada, correspondentes ao ganho K_p escolhido no projeto, que deve aparecer no lugar selecionado. Copie a figura deste LR abaixo.

```
G=g1;
C=tf([ 1 Ki],[1 0]);
figure;
rlocus(C*G) % dar este comando no workspace para acessar a figura
```



Os polos estão em -2.806 e 0.

3.3 Compare o projeto do controlador PI via método de sintonia lambda e via método do lugar das raízes, destacando aspectos como: simplicidade, flexibilidade, formas de especificação de projeto.

O método de sintonia lambda foi mais simples devido a sua característica de testagem quase arbitaria dos valores de lambda para obtenção de uma resposta otimizada, porém o projeto do PI tem como sua força a capacidade de prever o comportamento da resposta somente limitado a capacidade do controlador para geração do sinal de controle.