

# Controlo Automático - Projecto

```
%% Inicialização do ambiente
clear ; close all; clc

% Importamos os dados dos pacientes
data = importdata('ROC_REAL_50.mat');

% Definimos uma seed estatica para o gerador de números aleatórios de forma
% a podermos repetir os experimentos com resultados determinísticos
rng(42);
```

## Questão 1

a) Seleccionamos 10 pacientes da base de dados:

```
rndIDX = randperm(50);
sample_size = 10
```

```
sample_size = 10
```

```
sample = data(rndIDX(1:sample_size), :)
```

```
sample = 10x2
    0.0219    1.2746
    0.0528    2.5362
    0.0352    1.5503
    0.0293    1.4728
    0.0308    1.9499
    0.0330    2.4823
    0.0282    1.2615
    0.0295    1.2390
    0.0329    2.5669
    0.0394    2.0425
```

```
t_size = 600
```

```
t_size = 600
```

b) e c)

Temos que  $(s + \alpha)(s + 4\alpha)(s + 10\alpha) = s^3 + 15\alpha s^2 + 54\alpha^2 s + 40\alpha^3$ , o que nos dá os fatores  $[1 \ 15a \ 54a^2 \ 40a^3]$ .

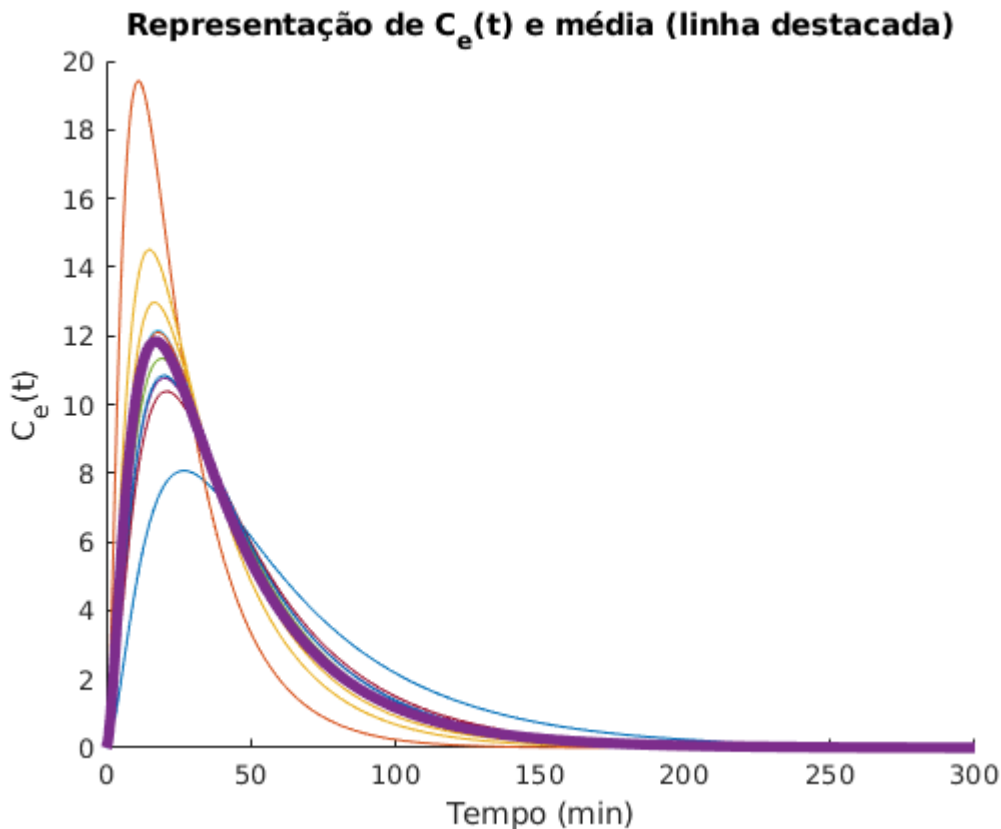
Cálculo de  $c_e(t)$  e da respectiva média.

```
figure(1);
hold on
t = linspace(0, 300, t_size);
Ce = zeros(t_size, sample_size);
G = @(a) tf(40*a^3, [1 15*a 54*a^2 40*a^3]);
for idx = 1 : sample_size
```

```

a = sample(idx, 1);
Ce(:, idx) = impulse(G(a) * 600, t);
end
plot(t, Ce);
mean_ce = mean(Ce, 2);
plot(t, mean_ce, 'LineWidth', 4);
%fplot(@(x) 1489.2*x);
xlabel('Tempo (min)')
ylabel('C_e(t)')
title('Representação de C_e(t) e média (linha destacada)')
hold off

```



Cálculo de  $R(t)$  e da respectiva média.

```

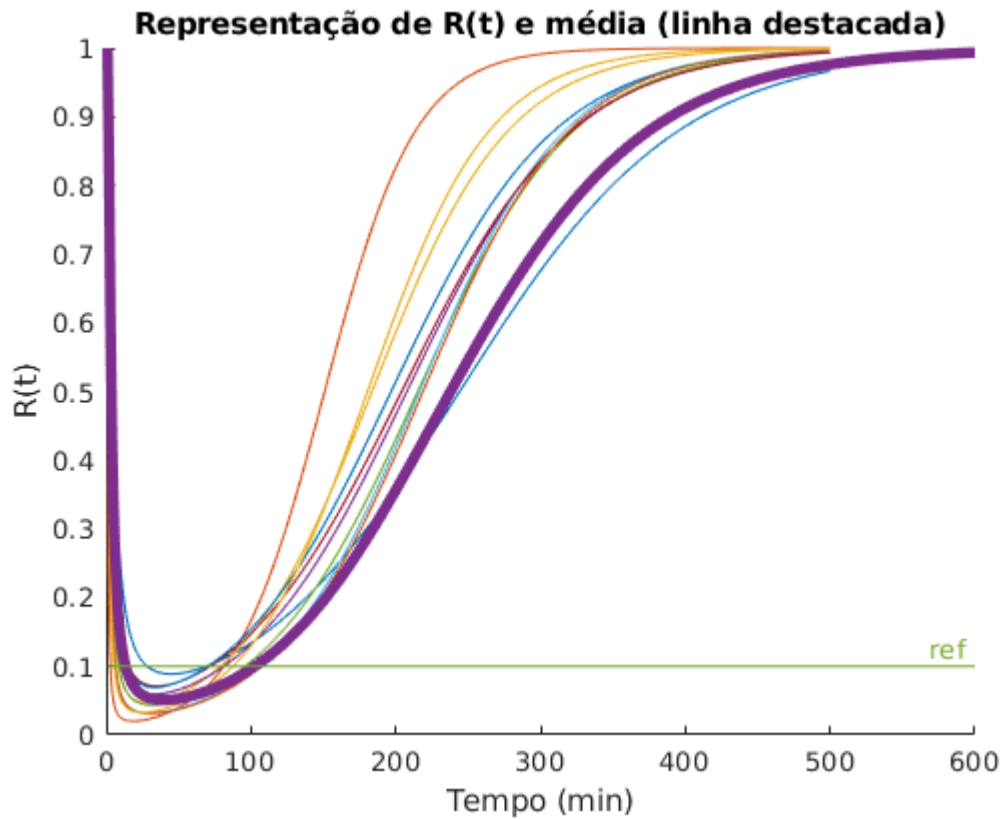
r0 = 1;
EC50 = 1;
figure(2);
hold on
t = linspace(0, 500, t_size);
% 0 transposto da segunda coluna de `sample` é repetido verticalmente
% `t_size` vezes e multiplicado elemento a elemento com `Ce`
Rt = @(Ce, gamma) r0 ./ (1 + (Ce / EC50) .* gamma);
R = Rt(Ce, repmat(sample(:, 2)', t_size, 1));
plot(t, R);
gamma = mean(R, 2);
plot(gamma, 'LineWidth', 4);
% Ver label.m
label(plot(ones(t_size, 1) * 0.1), 'ref', 'location', 'right');

```

```

xlabel('Tempo (min)')
ylabel('R(t)')
title('Representação de R(t) e média (linha destacada)')
hold off

```



## Questão 2

a)

Pela condição de estabilidade necessária do critério de estabilidade de Routh-Hurwitz, facilmente vemos que  $\alpha$  tem que ser não negativo, caso contrário pelo menos um dos coeficientes do polinómio do denominador seria negativo.

Aplicando o método de Routh-Hurwitz obtemos a seguinte tabela:

$$\begin{array}{c|cc}
 s^3 & 1 & 54\alpha^2 \\
 s^2 & 15\alpha & 40\alpha^3 \\
 s^1 & \frac{15\alpha^2}{3} & 0 \\
 s^0 & \frac{40\alpha^3}{3} & 0
 \end{array}$$

Daqui, facilmente vemos que os valores da primeira coluna têm todos o mesmo sinal, se  $15\alpha > 0$ ,  $\frac{154\alpha^2}{3} > 0$  e  $\frac{40\alpha^3}{3} > 0$ , o que acontece para todos os  $\alpha > 0$ , ou seja, para todos os valores estritamente positivos de  $\alpha$ , o sistema é estável.

b)

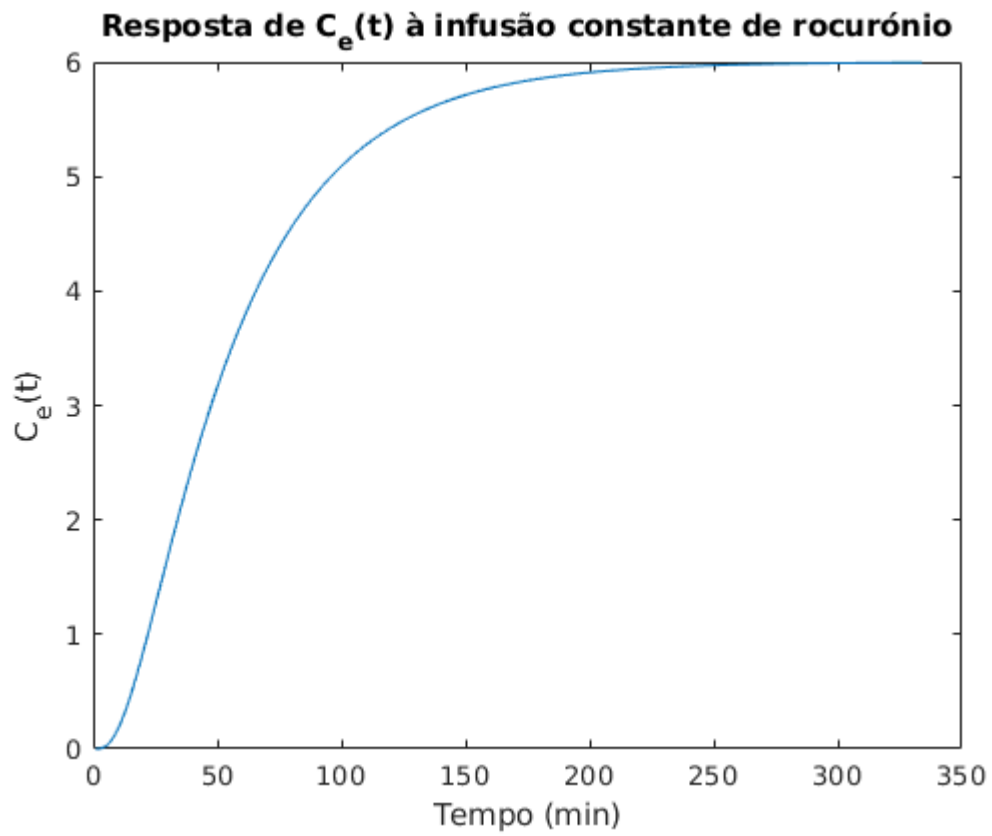
```
figure(3);  
alpha = mean(sample(:, 1))
```

```
alpha = 0.0333
```

```
sys = G(alpha) * 6;  
constant_infusion = step(sys);  
step_info = stepinfo(constant_infusion)
```

```
step_info = struct with fields:  
    RiseTime: 100.8415  
    SettlingTime: 186.5193  
    SettlingMin: 5.3991  
    SettlingMax: 5.9958  
    Overshoot: 0  
    Undershoot: 0  
    Peak: 5.9958  
    PeakTime: 334
```

```
plot(constant_infusion);  
xlabel('Tempo (min)');  
ylabel('C_{e}(t)');  
title('Resposta de C_{e}(t) à infusão constante de rocurônio');
```



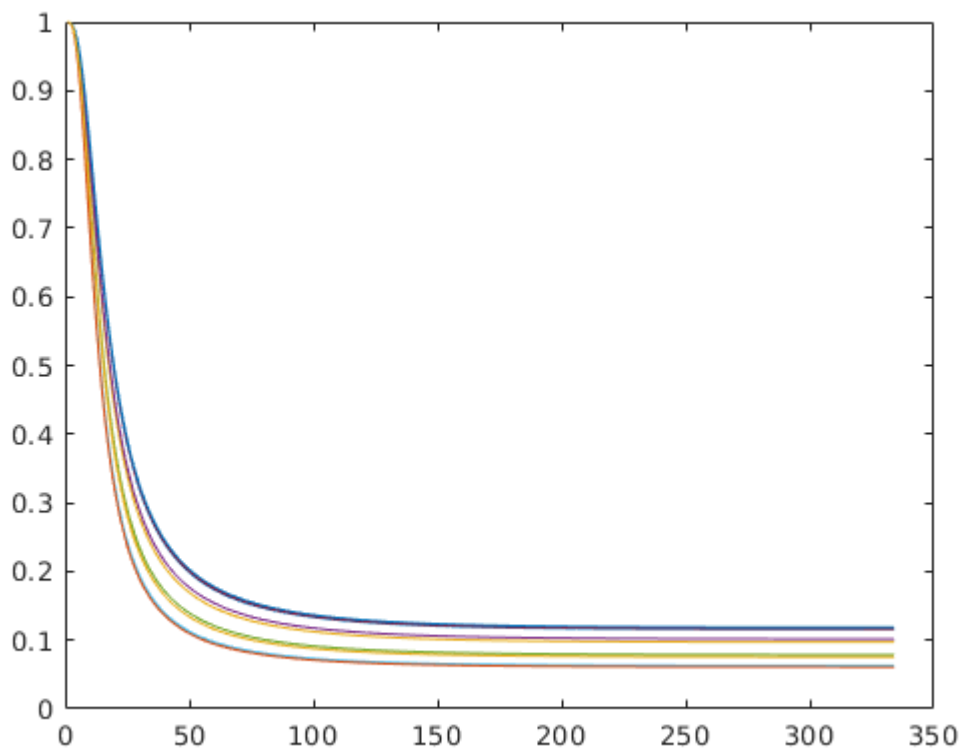
c)

```
[Z, gain] = zero(sys);  
gain
```

```
gain = 0.0089
```

d)

```
figure(4);  
plot(Rt(constant_infusion, repmat(sample(:, 2)', length(constant_infusion), 1)));
```

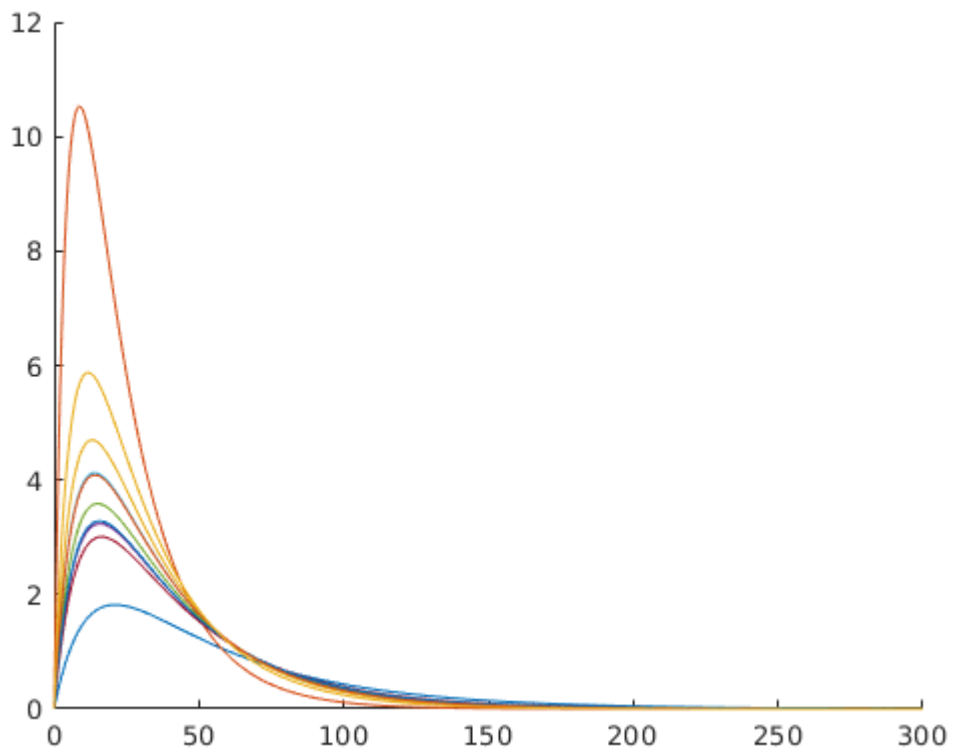


e)

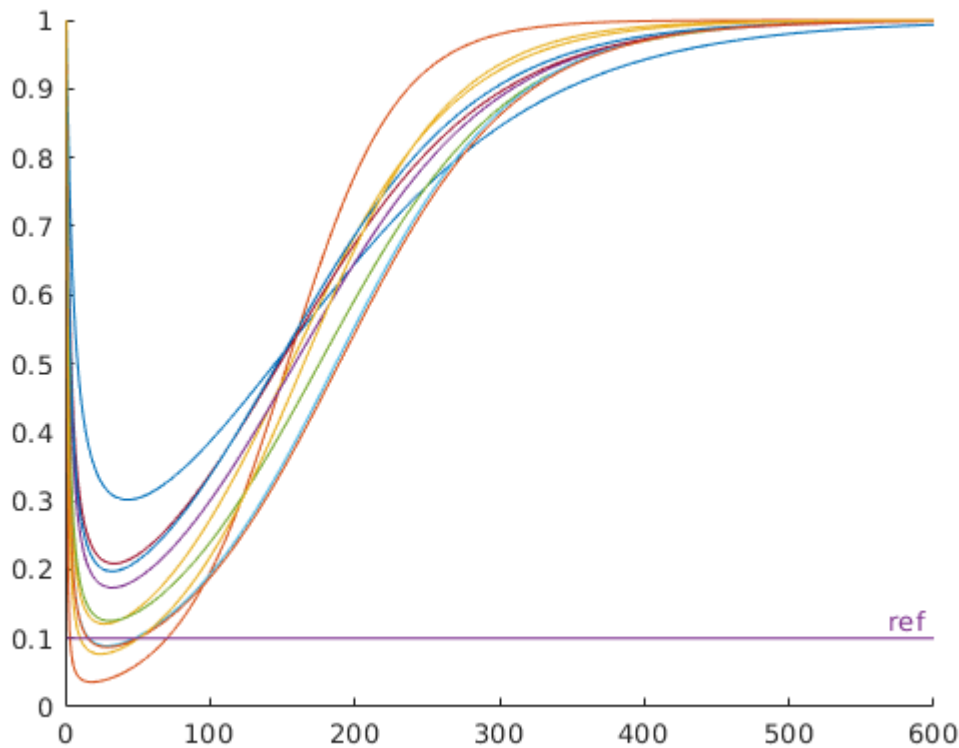
Os polos são  $-\alpha$  e  $-4\alpha$ .

$$40 * a^3 / ((s + a) * (s + 4 * a)) = 40 * a^3 / (s^2 + 5 * a * s + 4 * a^2)$$

```
figure(5);
hold on;
H = @(a) tf(40*a^3, [1 5*a 4*a^2]);
t = linspace(0, 300, t_size);
Ce_h = zeros(t_size, sample_size);
for idx = 1 : sample_size
    a = sample(idx, 1);
    Ce_h(:, idx) = impulse(H(a) * 600, t);
end
plot(t, Ce_h);
hold off;
```



```
figure(6);  
hold on;  
plot(Rt(Ce_h, repmat(sample(:, 2)', t_size, 1)));  
label(plot(ones(t_size, 1) * 0.1), 'ref', 'location', 'right');  
hold off;
```



f)

Como podemos observar pelos dois gráficos apresentados em cima, estes têm comportamentos semelhantes aos correspondentes à função de transferência exata, exceto que apresentam uma magnitude diferente. Verificamos que com esta aproximação, o modelo não tem o desempenho pretendido já que muito poucos pacientes atingem o nível de NBM de referência com a administração do bólus inicial.

### Questão 3

a)

Obtenção do modelo (A,B,C,D) para o sistema input/output através da Função de Transferência.

$$G(s) = \frac{40 \alpha^3}{s^3 + 15 \alpha s^2 + 54 \alpha^2 s + 40 \alpha^3} \Leftrightarrow$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{40 \alpha^3}{s^3 + 15 \alpha s^2 + 54 \alpha^2 s + 40 \alpha^3} \Leftrightarrow$$

$$Y(s) \cdot (s^3 + 15 \alpha s^2 + 54 \alpha^2 s + 40 \alpha^3) = 40 \alpha U(s)$$

No domínio do tempo, pela  $\mathcal{L}^{-1}$ :  $\ddot{y}(t) + 15\alpha\dot{y}(t) + 54\alpha^2 y(t) = 40\alpha u(t)$

Ora, temos que:



$$y(t) = y = x_1$$

$$\dot{y}(t) = x_2 = \dot{x}_1$$

$$\ddot{y}(t) = x_3 = \dot{x}_2$$

$$\ddot{\ddot{y}}(t) = \dot{x}_3$$

$$u(t) = u$$

Portanto,

$$\dot{x}_3 + 15\alpha x_3 + 54\alpha^2 x_2 + 40\alpha^3 x_1 = 40\alpha^3 u \iff$$

$$\dot{x}_3 = -40\alpha^3 x_1 - 54\alpha^2 x_2 - 15\alpha x_3 + 40\alpha^3 u$$

Chegamos assim ao seguinte modelo de espaço de estados na forma canonica controlável em representação matricial:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & \overset{A}{1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -40\alpha^3 & -54\alpha^2 & -15\alpha \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \overset{B}{0} \\ 0 \\ 40\alpha^3 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} \overset{x_1}{1} & \overset{x_2}{0} & \overset{x_3}{0} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u$$

b)

```
%[num, den] = tfdata(G(alpha), 'v');
%[A, B, C, D] = tf2ss(num, den)
A = @(alpha) [0 1 0; 0 0 1; -40*alpha^3 -54*alpha^2 -15*alpha];
B = @(alpha) [0 0 40*alpha^3]';
C = @(alpha) [1 0 0];
D = @(alpha) [0];
G_ss = @(alpha, delay) ss(A(alpha), B(alpha), C(alpha), D(alpha), 'InputDelay', delay);

alpha = mean(sample(:, 1))
```

```
alpha = 0.0333
```

```
Co = ctrb(G_ss(alpha, 0))
```

```
Co = 3x3
      0      0      0.0015
      0      0.0015     -0.0007
      0.0015     -0.0007      0.0003
```

Número de estados não controláveis:

```
unco = 3 - rank(Co) % A é uma matriz três por três
```

```
unco = 0
```

Concluimos assim, pelo teste de Kalman, que o sistema é controlável.

Por meio do MATLAB, conseguimos também testar a estabilidade do sistema da seguinte forma:

```
is_B_stable = isstable(G_ss(alpha, 0))
```

```
is_B_stable = logical  
1
```

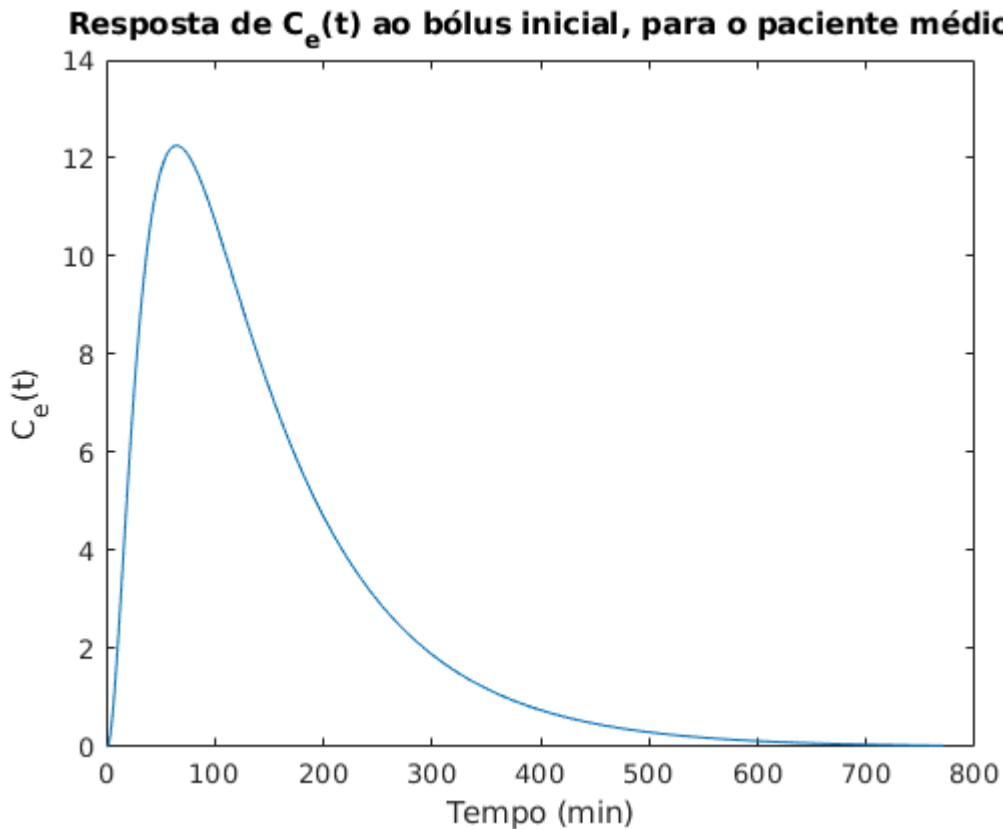
Sendo este um sistema de tempo contínuo, deduzimos que todos os polos se localizam na metade esquerda aberta do plano complexo.

c)

```
alpha = mean(sample(:, 1));  
gamma = mean(sample(:, 2))
```

```
gamma = 1.8376
```

```
figure(7);  
ce = impulse(G_ss(alpha, 0)*600);  
plot(ce);  
xlabel('Tempo (min)');  
ylabel('Ce(t)');  
title('Resposta de Ce(t) ao bólus inicial, para o paciente médio');
```

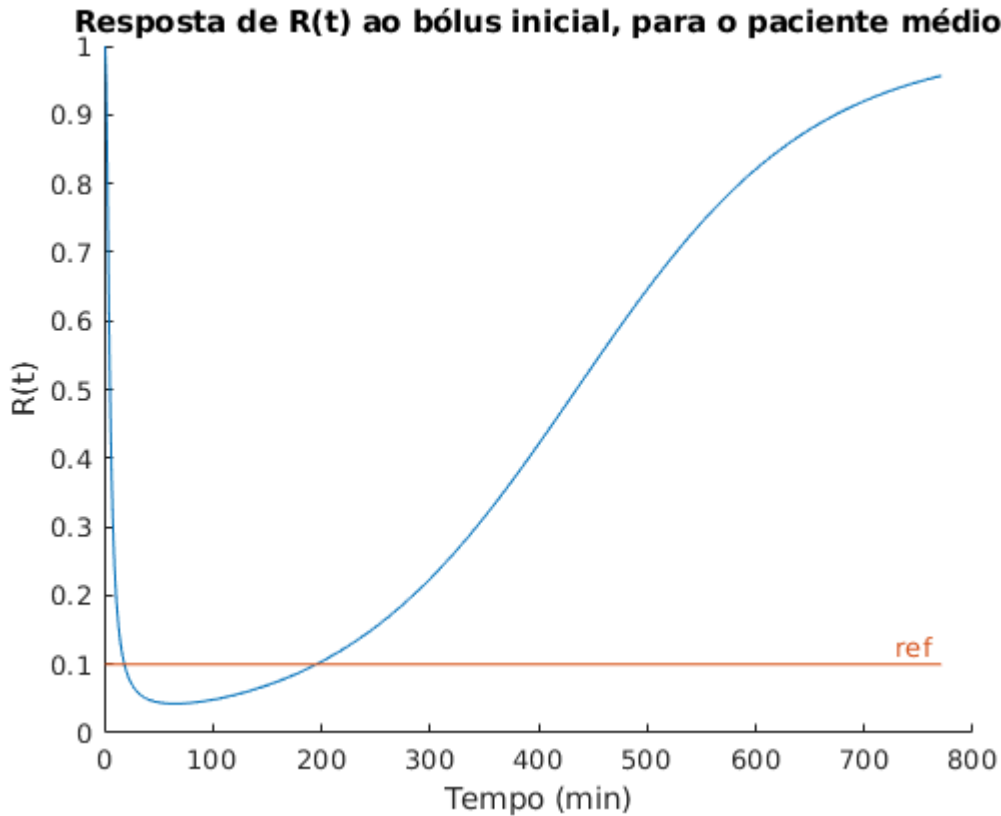


```
figure(8);
```

```

hold on;
plot(Rt(ce, gamma));
xlabel('Tempo (min)');
ylabel('R(t)');
title('Resposta de R(t) ao bólus inicial, para o paciente médio');
label(plot(ones(length(ce), 1) * 0.1), 'ref', 'location', 'right');
hold off;

```



## Questão 4

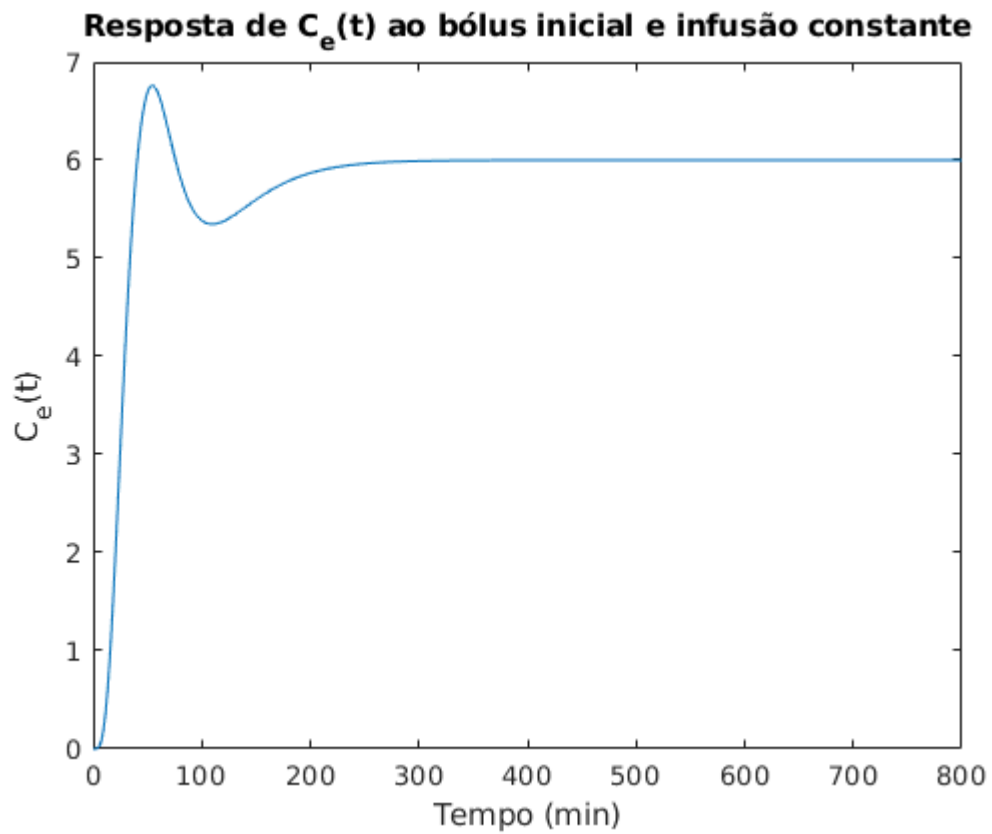
a)

Pela análise do gráfico de  $R(t)$  apresentado em 3.c, uma escolha apropriada de  $T$  é 50s, já que este é um ponto no qual o efeito do bólus inicial está a começar a diminuir tal que o nível de NBM se aproxima do valor de referência.

```

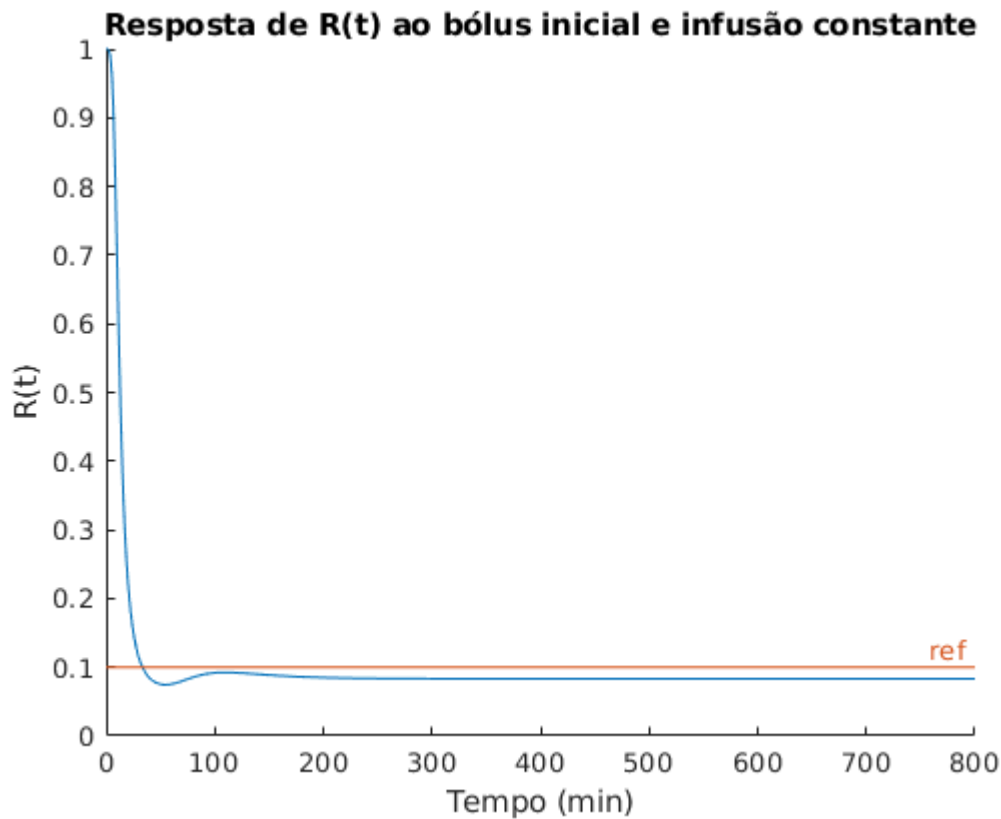
figure(9);
T = 50;
t = linspace(0, 800, 600);
%t2 = linspace(T, 800, length(t));
u = impulse(G_ss(alpha, 0) * 600, t) + step(G_ss(alpha, T) * 6, t);
ce = lsim(G_ss(alpha, 0), u, t);
plot(t, ce);
xlabel('Tempo (min)');
ylabel('C_{e}(t)');
title('Resposta de C_{e}(t) ao bólus inicial e infusão constante');

```



Como confirmação da validade da escolha de  $T$ , apresentamos a resposta  $R(t)$ :

```
figure(10);
hold on;
plot(t, Rt(ce, gamma));
xlabel('Tempo (min)');
ylabel('R(t)');
title('Resposta de R(t) ao bólus inicial e infusão constante');
label(plot(t, ones(length(t), 1) * 0.1), 'ref', 'location', 'right');
hold off;
```

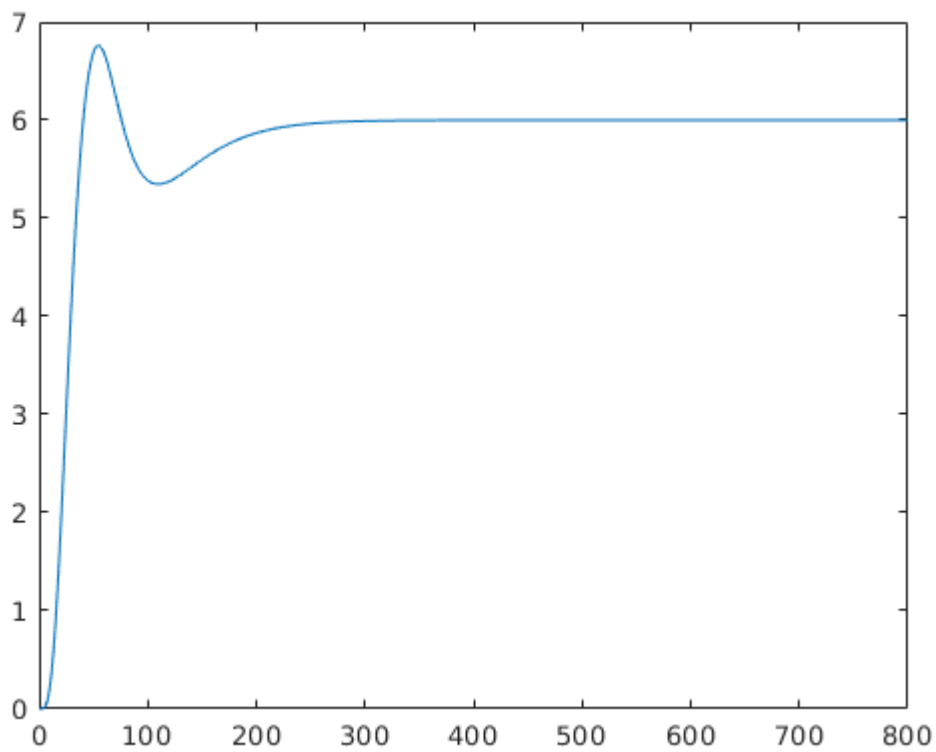


b)

```
figure(11);
% 40*alpha^3, [1 (14 + lambda)*alpha (40 + 14*lambda)*alpha^2 40*alpha^3]

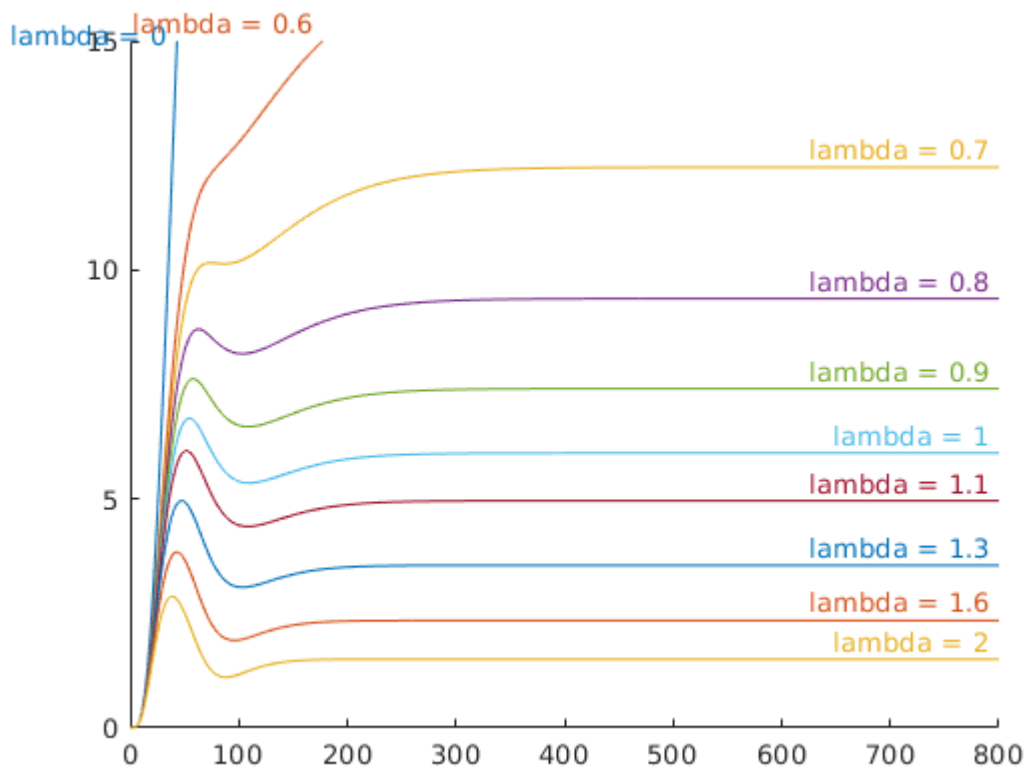
A_cl = @(lambda, alpha) [0, 1, 0; 0, 0, 1; -40*lambda*alpha^3, -(40+14*lambda)*alpha^2, -(14+14*lambda)*alpha];
G_cl = @(lambda, alpha, delay) ss(A_cl(lambda, alpha), B(alpha), C(alpha), D(alpha), 'InputDelay', delay);
K = @(lambda, alpha) [40*(lambda-1)*alpha^3 14*(lambda-1)*alpha^2 (lambda-1)*alpha];

sys = feedback(G_cl(1, alpha, 0), tf(K(1, alpha), 1));
u = impulse(G_cl(1, alpha, 0) * 600, t) + step(G_cl(1, alpha, T) * 6, t);
ce = lsim(G_cl(1, alpha, 0), u, t);
plot(t, ce);
```



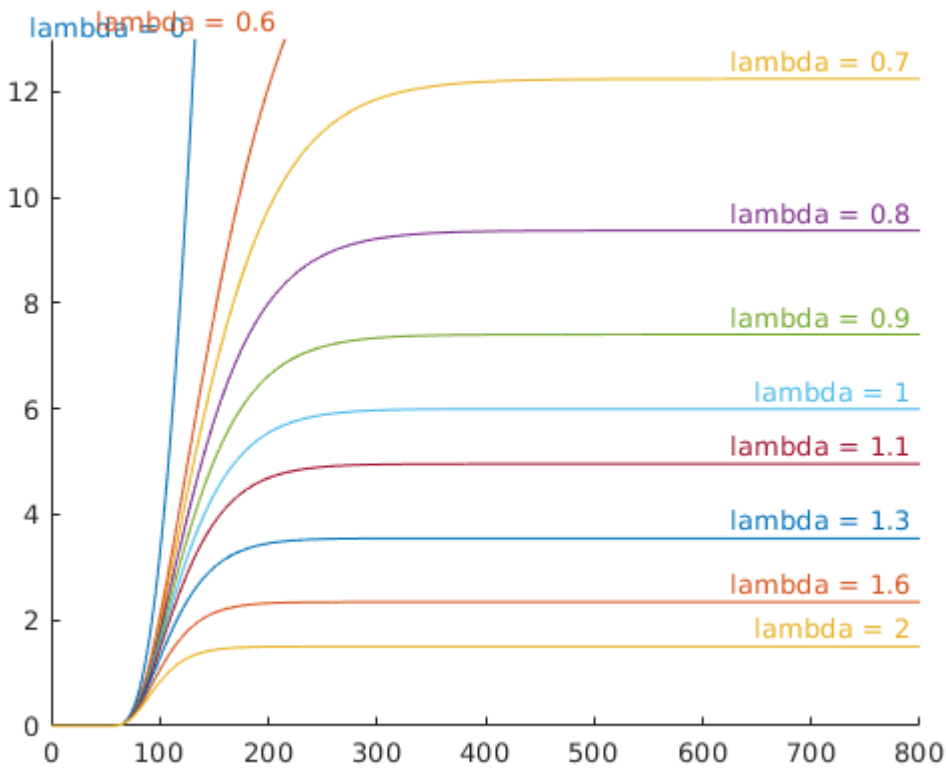
c)

```
figure(12);
hold on;
lambdas = [0 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.3 1.6 2];
Ce_lambda = zeros(length(t), length(lambdas));
ax = gca;
ax.YLim = [0, 15];
for idx = 1:length(lambdas)
    lb = lambdas(idx);
    sys = feedback(G_cl(lb, alpha, 0), tf(K(lb, alpha), 1));
    u = impulse(G_cl(lb, alpha, 0) * 600, t) + step(G_cl(lb, alpha, T) * 6, t);
    Ce_lambda(:, idx) = lsim(G_cl(lb, alpha, 0), u, t);
    label(plot(ax, t, Ce_lambda(:, idx)), ['lambda = ', num2str(lb)], 'location', 'right')
end
hold off;
```



Sem b́́lus inicial

```
figure(13);
hold on;
ax = gca;
ax.YLim = [0, 13];
for lb = lambdas
    sys = feedback(G_cl(lb, alpha, 0), tf(K(lb, alpha), 1));
    u = step(G_cl(lb, alpha, T) * 6, t);
    ce = lsim(G_cl(lb, alpha, 0), u, t);
    label(plot(ax, t, ce), ['lambda = ', num2str(lb)], 'location', 'right')
end
hold off;
```



d)

$$a(s) = \det(sI - A) = \det \left( \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ -40\alpha^3 & 54\alpha^3 & s + 15\alpha \end{bmatrix} \right)$$

$$= s^3 + 15\alpha s^2 - 54\alpha^3 s + 40\alpha^3$$

$$a(s) = s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3$$

$$= s^3 + \underset{a_1}{15\alpha} s^2 - \underset{a_2}{54\alpha^3} s + \underset{a_3}{40\alpha^3}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 15\alpha & 1 & 0 \\ -54\alpha^3 & 15\alpha & 1 \end{bmatrix}$$

$$M^{-T} = (M^{-1})^T = \begin{bmatrix} 1 & -15\alpha & -54\alpha^3 + 225\alpha^2 \\ 0 & 1 & -15\alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = C(A, B) = (B A B A^2 B)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 40\alpha^3 \\ 0 & 40\alpha^3 & -600\alpha^4 \\ 40\alpha^3 & -600\alpha^4 & 6840\alpha^5 \end{bmatrix}$$

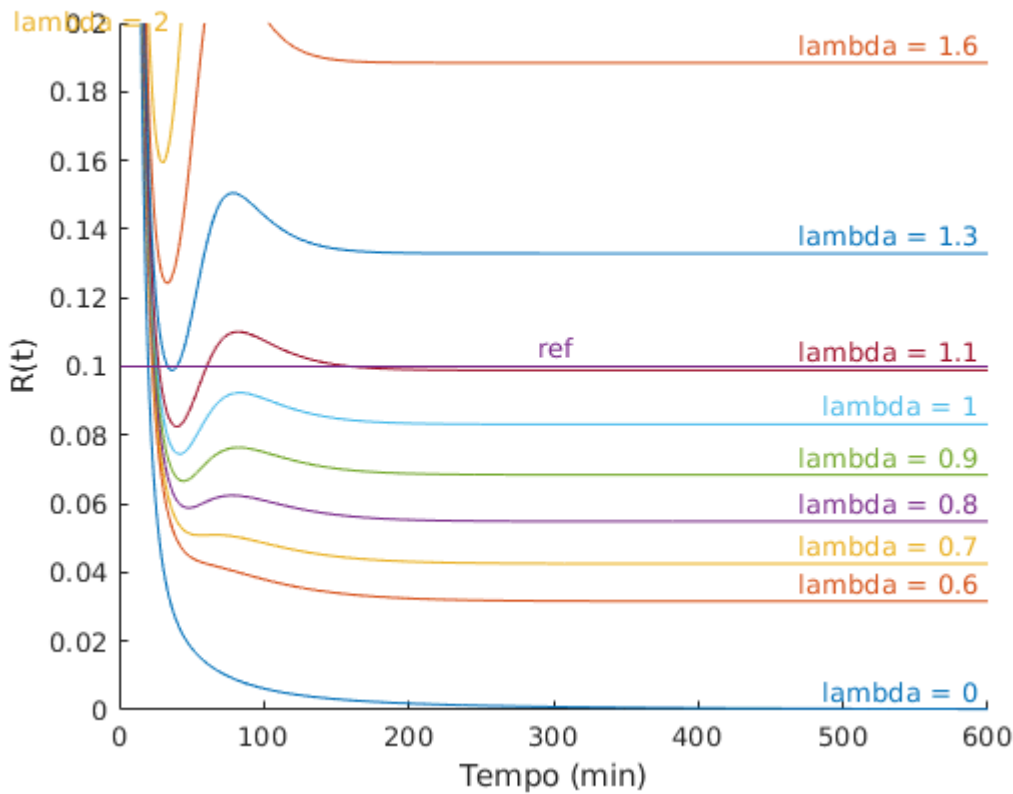


$$\therefore C^{-1}(A, B) = \begin{bmatrix} \frac{103}{80\alpha} & \frac{3}{8\alpha^2} & \frac{1}{40\alpha^3} \\ \frac{3}{8\alpha^2} & \frac{1}{40\alpha^3} & 0 \\ \frac{1}{40\alpha^3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\therefore K = (\alpha - a) M^{-T} C^{-1}$$

e)

```
figure(14);
hold on;
ax = gca;
ax.YLim = [0, 0.2];
for idx = 1 : length(lambdas)
    ce = Ce_lambda(:, idx);
    lb = lambdas(idx);
    label(plot(ax, Rt(ce, gamma)), ['lambda = ', num2str(lb)], 'location', 'right')
    xlabel('Tempo (min)');
    ylabel('R(t)');
end
label(plot(ones(length(t), 1) * 0.1), 'ref', 'location', 'middle');
hold off;
```



Pela análise dos gráficos supra apresentados, vemos que o valor de  $\lambda = 1.1$  é o valor que fica mais próximo do nível de referência, oscilando em apenas 2%.