TRABAJO PRÁCTICO N° 1

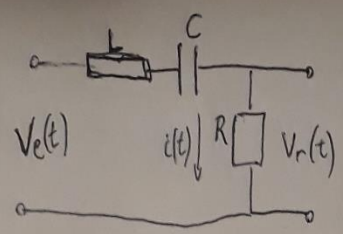
Alumno: Medina Acevedo Josué.

M.U.N°: 00638.

Catedra: Teoría de Control II.

Carrera: Ingeniería Electrónica.

Caso de estudio 1. **Sistema de dos variables de estado**



L y C almacenadores de energía

$x_1 = i_L = i$ corriente del circ.

$x_2 = v_C$

$y = V_R = R x_1$

$$\sum v = 0 \Rightarrow V_e - V_L - V_C - V_R = 0$$

$$V_L + V_C + V_R = V_e$$

$$V_L = L\frac{di}{dt} = L\dot{x}_1$$

$$L\dot{x}_1 + x_2 + R x_1 = V_e$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{R}{L}x_1 - \frac{1}{L}x_2 + \frac{1}{L}V_e$$

$$i_C = C\frac{dv_C}{dt} \longrightarrow i = C\dot{x}_2 \longrightarrow \dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1$$

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

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -R/L & -\frac{1}{L} \\ 1/C & 0 \end{bmatrix}}_{A} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix}}_{B} V_e$$

$$y = V_R = R x_1 \longrightarrow y = \underbrace{\begin{bmatrix} R & 0 \end{bmatrix}}_{C} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Circuito serie RLC

$x_1 = i_L = i$

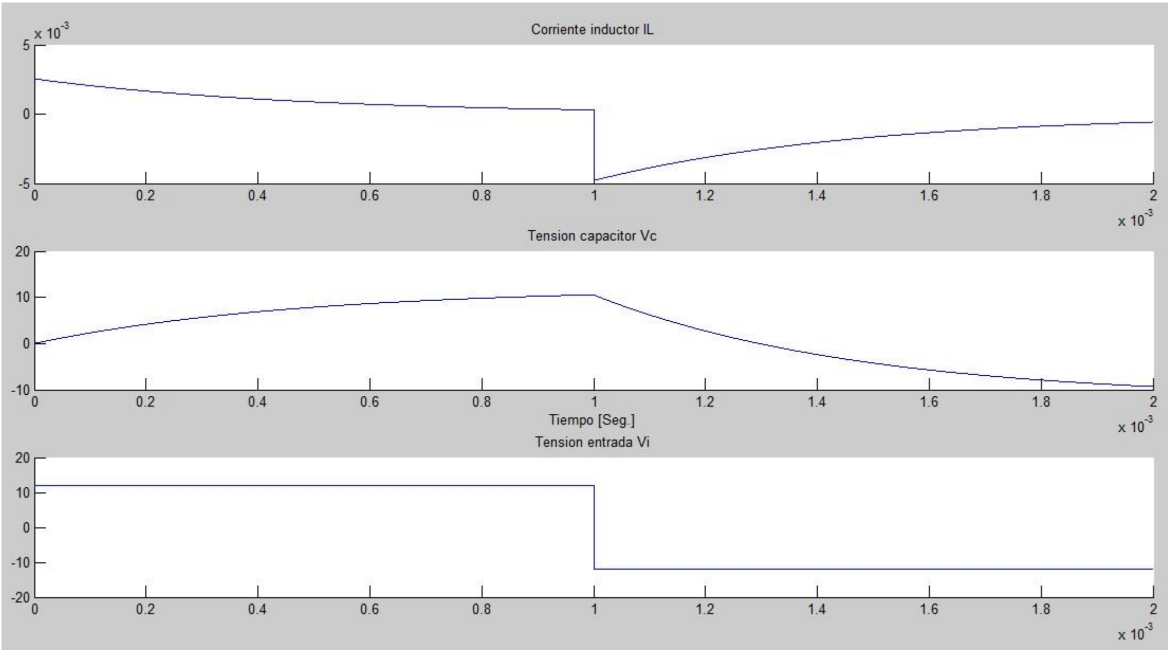
$x_2 = v_C$

Codigos de Matlab para la función y para el circuito

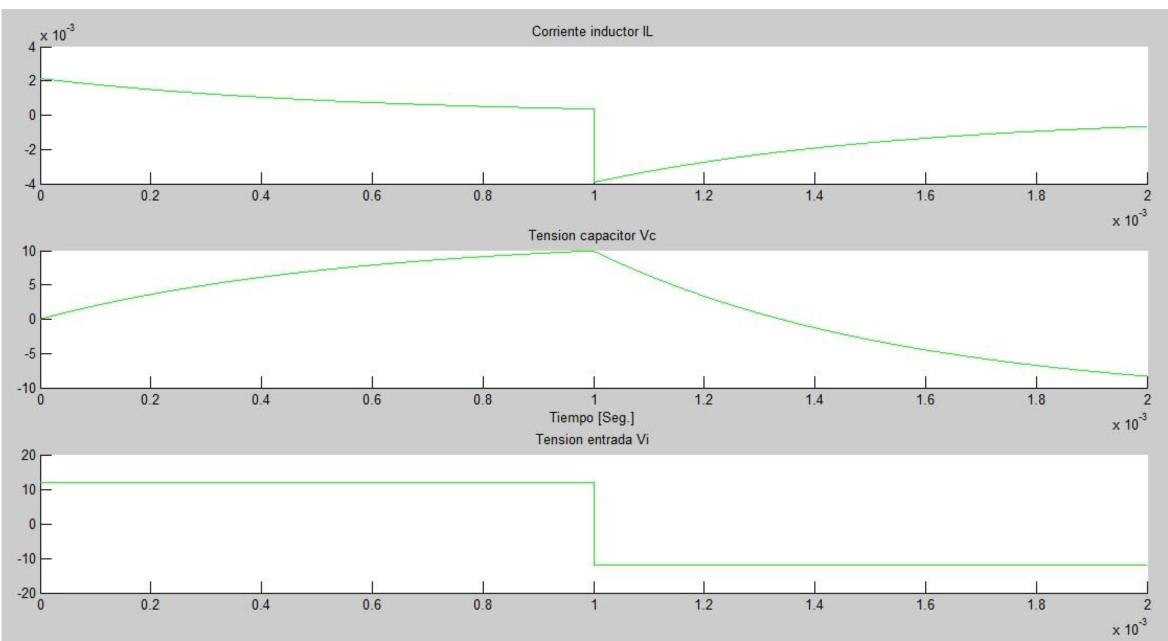
```
function [X]=modrlc(t_etapa, xant, accion)
R=4700;
L=10e-6;
C=100e-9;
A= [-R/L -1/L; 1/C 0]; B=[1/L; 0];
h=1e-11;
u=accion;
x=xant;
for ii=1:t_etapa/h
xp=A*x+B*u;
x=x+xp*h;
end
X=x;
```

```
clear all;clc;
X=-[0; 0];i=0;t_etapa=.1e-6;tF=2e-3;
t=0:t_etapa:tF;
u=12;

for n=0:t_etapa:tF
   if i*t_etapa>1e-3
      u=-12;
   end
   i=i+1;
   X=modrlc2(t_etapa, X, u);
   x1(i)=X(1);%IL
   x2(i)=X(2);%Vc
   acc(i)=u;
end

subplot(3,1,1);hold on;
plot(t,x1,'b');title('Corriente inductor IL');

subplot(3,1,2);hold on;
plot(t,x2,'b');title('Tension capacitor Vc');
xlabel('Tiempo [Seg.]');

subplot(3,1,3);hold on;
plot(t,acc,'b');title('Tension entrada Vi');
```

Simulación con R=4,7KΩ, L= 10μHy, y C=100nF.

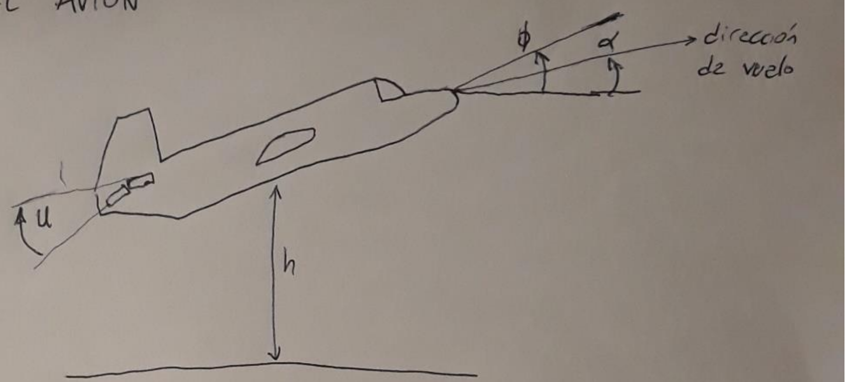


Simulación con R=5,6KΩ, L= 10μHy, y C=100nF.



Caso de estudio 3. Sistema lineal de cuatro variables de estado

VUELO DEL AVIÓN



$$\begin{cases} \dot{\alpha} = a(\phi - \alpha) \\ \ddot{\phi} = -\omega^2(\phi - \alpha - b.u) \\ \dot{h} = c\alpha \end{cases}$$

sist. lineal en variables de estado para el equilibrio $X = [0\ 0\ 0\ 0]^T$

Vbles. del sist. lineal

$$X \begin{cases} x_1 = \alpha \\ x_2 = \phi \\ x_3 = \dot{\phi} \\ x_4 = h \end{cases} \qquad \dot{X} \begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\alpha} \\ \dot{x}_2 = \dot{\phi} \\ \dot{x}_3 = \ddot{\phi} \\ \dot{x}_4 = \dot{h} \end{cases}$$

$$\dot{\alpha} = a(x_2 - x_1)$$
$$\ddot{\phi} = -\omega^2(x_2 - x_1 - b.u)$$
$$\dot{h} = c x_1$$

$$\dot{x}_1 = a(x_2 - x_1) = -a x_1 + a x_2$$
$$\dot{x}_2 = x_3$$
$$\dot{x}_3 = -\omega^2(x_2 - x_1 - b.u) = \omega^2 x_1 - \omega^2 x_2 + \omega^2 b.u$$
$$\dot{x}_4 = c x_1$$

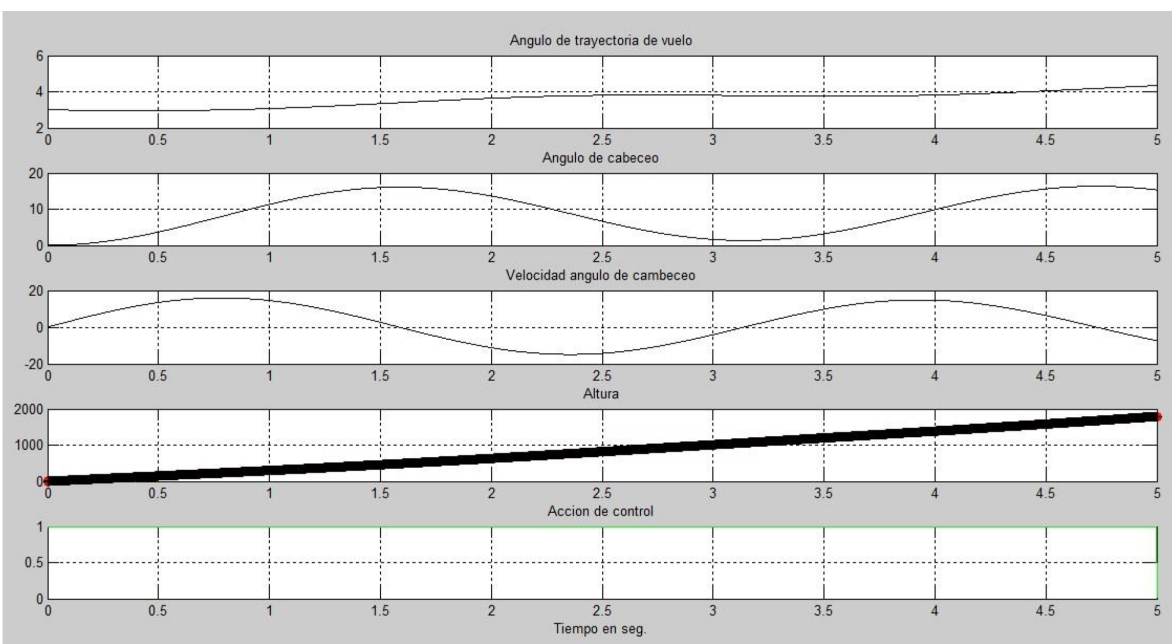
$$A = \begin{bmatrix} -a & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \omega^2 & -\omega^2 & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega^2 b \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \omega^2 & -\omega^2 & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega^2 b \\ 0 \end{bmatrix} u$$

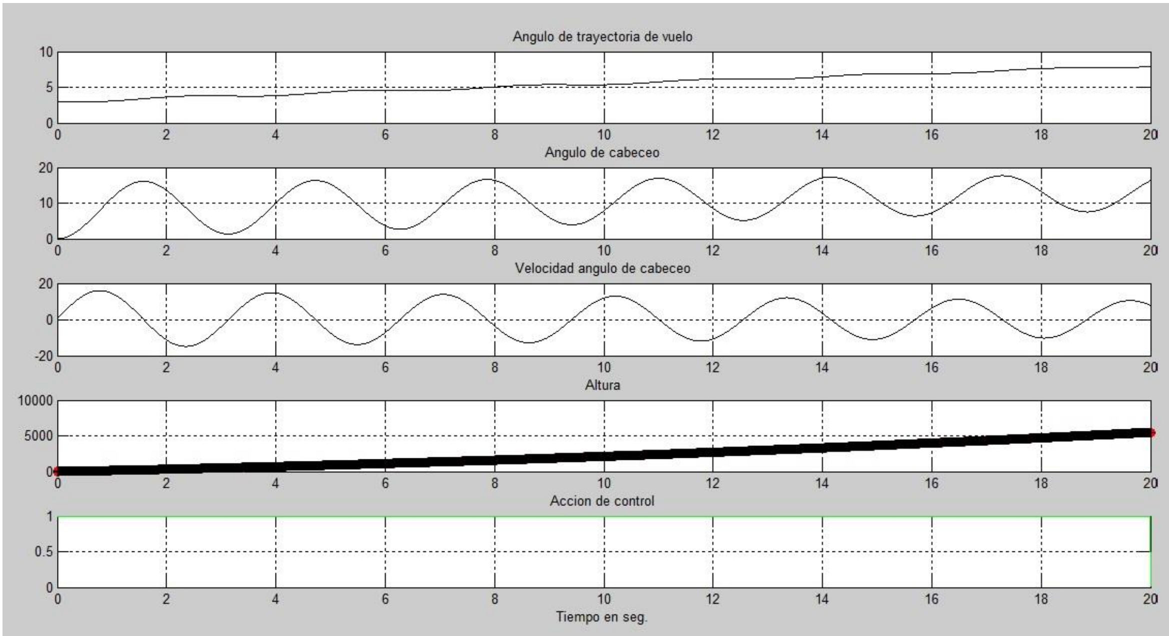
```
clc;clear all;close all;
w=2;
a=0.05;
b=5;
c=100;
dlt_t=0.001;
tiempo=(5/dlt_t);
t=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;

alfa=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
phi=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
phi_p=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
h=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
u=linspace(0,dlt_t,tiempo+1);

%condiciones iniciales
alfa(1)=3; phi(1)=0.01; i=1; color='g';
u(1)=0.9;

%Version linealizada en el equilibrio estable.
Mat_A=[-a a 0 0; 0 0 1 0; w^2 -w^2 0 0; c 0 0 0];
Mat_B=[0;0;b*w^2;0];
x0=[0 0 0 0]';
x=[alfa(1);phi(1);phi_p(1);h(1)];

while(i<(tiempo+1))
%Variables del sistema no lineal
%estado=[alfa(i);phi(i);phi_p(i);h(i)];
u(i)=1;

alfa_p=a*(phi(i)-alfa(i));
phi_pp=-w^2*(phi(i)-alfa(i)-(b*u(i)));
h_p=c*alfa(i);

%Completar las derivadas que faltan
alfa(i+1)=alfa(i)+dlt_t*alfa_p;
phi_p(i+1)=phi_p(i)+dlt_t*phi_pp;
phi(i+1)=phi(i)+dlt_t*phi_p(i);
h(i+1)=h(i)+dlt_t*h_p;

%Variables del sistema lineal
alfa1(i)=x(1);phi1(i)=x(2);phi_p1(i)=x(3);h1(i)=x(4);

%Sistema lineal
xp=Mat_A*(x-x0)+Mat_B*u(i);
x=x+dlt_t*xp;
i=i+1;
end
```

```
alfa1(i)=x(1); phi1(i)=x(2); phi_p1(i)=x(3); h1(i)=x(4);
figure(1);hold on;

subplot(5,1,1);
plot(t,alfa,color);hold on;plot(t,alfa1,'k');
grid on; title('Angulo de trayectoria de vuelo');hold on;

subplot(5,1,2);
plot(t,phi,color);hold on;plot(t,phi1,'k');
grid on; title('Angulo de cabeceo');hold on;

subplot(5,1,3);
plot(t,phi_p,color); hold on;plot(t,phi_p1,'k');
grid on; title('Velocidad angulo de cambeceo'); hold on;

subplot(5,1,4);
plot(t,h,'or');hold on;plot(t,h1,'+k');
grid on;title('Altura'); hold on;

subplot(5,1,5);
plot(t,u,color);grid on;title('Accion de control');
xlabel('Tiempo en seg.');hold on;
```

Avión con los parámetros ɯ=2; a=0,05; b=5; c=100 m/s, Dt=10-3; y el tiempo de simulación de 5 segundos.



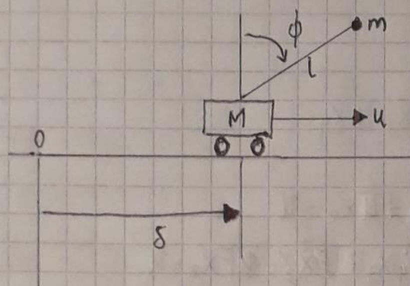
Avión con los parámetros ω=2; a=0,05; b=5; c=50 m/s, Dt=10-3; y el tiempo de simulación de 20 segundos.



Caso de estudio 4. Sistema no lineal de cuatro variables de estado

FECHA

Sistema No Lineal de cuatro variables de estado



$$\begin{cases} (M+m)\ddot{\delta} + mL\ddot{\phi}\cos\phi - mL\dot{\phi}^2 \operatorname{sen}\phi + F\dot{\delta} = u \\ L\ddot{\phi} - g\operatorname{sen}\phi + \ddot{\delta}\cos\phi = 0 \end{cases}$$

MODELO NO LINEAL

$$X = [\delta \ \dot{\delta} \ \phi \ \dot{\phi}]^T$$

Representación lineal en variables de estado para el equilibrio inestable

$$X = [0 \ \ 0 \ \ 0 \ \ 0]^T$$

punto cercano de $\phi = 0$

Si $\phi \cong 0 \implies \cos\phi = 1$, $\operatorname{sen}\phi = \phi$

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{\delta} + mL\ddot{\phi} - mL\dot{\phi}^2\phi + F\dot{\delta} = u \\ L\ddot{\phi} - g\phi + \ddot{\delta} = 0 \end{cases}$$

Reemplazamos $\delta, \dot{\delta}, \phi$ y $\dot{\phi}$ por X_1, X_2, X_3 y X_4 respectivamente

$$X = \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}$$

(1) $$\begin{cases} (M+m)\dot{X}_2 + mL\dot{X}_4 - mLX_4^2X_3 + FX_2 = u \\ L\dot{X}_4 - gX_3 + \dot{X}_2 = 0 \end{cases}$$

Si $\delta = X_1$ derivamos en el tiempo $\dot{\delta} = \dot{X}_1$

$\dot{\delta} = X_2 \implies \dot{X}_1 = X_2$

Si $\phi = X_3$ derivamos en el tiempo $\dot{\phi} = \dot{X}_3$

$\dot{\phi} = X_4 \implies \dot{X}_3 = X_4$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}x_2\\ \dot{x}_2\\ x_4\\ \dot{x}_4\end{bmatrix}$$

en 1 se despeja $\dot{x}_2$ y $\dot{x}_4$

$$l\dot{x}_4 - gx_3 + \dot{x}_2 = 0 \Rightarrow \dot{x}_2 = gx_3 - l\dot{x}_4$$

$$(M+m)(gx_3 - l\dot{x}_4) + ml\dot{x}_4 - mlx_4^2x_3 + Fx_2 = u$$

$$Mgx_3 + mgx_3 - Ml\dot{x}_4 - \cancel{ml\dot{x}_4} + \cancel{ml\dot{x}_4} - mlx_4^2x_3 + Fx_2 = u$$

$$(M+m)gx_3 - Ml\dot{x}_4 - mlx_4^2x_3 + Fx_2 = u$$

$$Ml\dot{x}_4 = (M+m)gx_3 - mlx_4^2x_3 + Fx_2 - u$$

$$\boxed{\dot{x}_4 = \frac{Fx_2 + (M+m)gx_3 - mlx_4^2x_3 - u}{Ml}}$$

$$\dot{x}_2 = gx_3 - \cancel{l}\left(\frac{Fx_2 + (M+m)gx_3 - mlx_4^2x_3 - u}{M\cancel{l}}\right)$$

$$\boxed{\dot{x}_2 = gx_3 - \frac{Fx_2 + (M+m)gx_3 - mlx_4^2x_3 - u}{M}}$$

Ahora derivamos y evaluamos en el pto de operación

$$X_{op} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad , \quad U_{op} = 0$$

Aplicamos Taylor

es 0 porque el pto de operación es 0

$$\dot{x}_2 = \underbrace{0x_1}_{\text{derivada respecto de } x_1} - \underbrace{\frac{F}{M}x_2}_{\text{derivada respecto de } x_2} - \underbrace{\frac{mg}{M}x_3}_{\text{derivada respecto de } x_3} + \underbrace{\cancelto{0}{\frac{2mlx_4x_3}{Ml}}}_{\text{derivada respecto de } x_4} + \underbrace{\frac{1}{M}u}_{\text{derivada respecto de } u}$$

es 0 porque el pto de operación es 0

$$\dot{x}_4 = \underbrace{0x_1}_{\text{derivada respecto de } x_1} + \underbrace{\frac{F}{Ml}x_2}_{\text{derivada respecto de } x_2} + \underbrace{\frac{(M+m)g}{Ml}x_3}_{\text{derivada respecto de } x_3} - \underbrace{\cancel{\frac{2mlx_4x_3}{Ml}}}_{\text{derivada respecto de } x_4} - \underbrace{\frac{1}{Ml}u}_{\text{derivada respecto de } u}$$

NOTA

$$\dot{X}_1 = X_2$$
$$\dot{X}_3 = X_4$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -F/M & -mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & F/ML & \frac{(M+m)g}{ML} & 0 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ -1/ML \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -F/M & -mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & F/ML & \frac{g(m+M)}{ML} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ -1/ML \end{bmatrix} \cdot u$$

MODELO NO LINEAL EXPRESADO EN UN PUNTO DE OPERACIÓN LINEAL

Para $X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \pi & 0 \end{bmatrix}^T \qquad \phi = \pi \Rightarrow \cos\phi = -1$

$\qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \sin\phi \simeq -\phi$ (sen)

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{\delta} - ml\ddot{\phi} + ml\dot{\phi}^2\phi + F\dot{\delta} = u \\ l\ddot{\phi} + g\phi - \ddot{\delta} = 0 \end{cases}$$

$$X = \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} (M+m)\dot{X}_2 - ml\dot{X}_4 + mlX_4^2X_3 + FX_2 = u \\ l\dot{X}_4 + gX_3 - \dot{X}_2 = 0 \end{cases}$$

$$\delta = X_1 \Rightarrow \dot{\delta} = \dot{X}_1 \Rightarrow \dot{\delta} = X_2 \Rightarrow \dot{X}_1 = X_2$$
$$\phi = X_3 \Rightarrow \dot{\phi} = \dot{X}_3 \Rightarrow \dot{\phi} = X_4 \Rightarrow \dot{X}_3 = X_4$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ \dot{X}_2 \\ X_4 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix}$$

$$l\dot{X}_4 + gX_3 - \dot{X}_2 = 0$$

$$\dot{X}_2 = l\dot{X}_4 + gX_3$$

$$(M+m)(l\dot{X}_4 + gX_3) - ml\dot{X}_4 + mlX_4^2X_3 + FX_2 = u$$

$$Ml\dot{X}_4 + \cancel{ml}\dot{X}_4 + (M+m)gX_3 - \cancel{ml}\dot{X}_4 + mlX_4^2X_3 + FX_2 = u$$

$$Ml\dot{X}_4 + (M+m)gX_3 + mlX_4^2X_3 + FX_2 = u$$

$$\dot{X}_4 = \frac{u - (M+m)gX_3 - mlX_4^2X_3 - FX_2}{Ml}$$

$$\dot{X}_2 = \cancel{l}\cdot\left(\frac{u - (M+m)gX_3 - mlX_4^2X_3 - FX_2}{M\cancel{l}}\right) + gX_3$$

$$\dot{X}_2 = \frac{u - (M+m)gX_3 - mlX_4^2X_3 - FX_2}{M} + gX_3$$

Derivar y evaluar en el pto de operación $X = [0\ \ 0\ \ \pi\ \ 0]$ $\quad u = 0$

Aplicar Taylor

es 0 porque el pto de op es $X_3 = 0$

$$\dot{X}_2 = \underbrace{0X_1}_{\text{derivada respecto de } X_1} - \underbrace{\frac{F}{M}X_2}_{\text{derivada respecto de } X_2} - \underbrace{\frac{mg}{M}X_3}_{\text{derivada respecto de } X_3} - \underbrace{\cancel{\frac{2mlX_4X_3}{M}}}_{\text{derivada respecto de } X_4} + \underbrace{\frac{1}{M}u}_{\text{derivada respecto de } u}$$

0 es 0 porque el pto de operación es $X_3 = 0$

$$\dot{X}_4 = \underbrace{0X_1}_{\text{derivada respecto de } X_1} - \underbrace{\frac{F}{Ml}X_2}_{\text{derivada respecto de } X_2} - \underbrace{g\left(\frac{M+m}{Ml}\right)X_3}_{\text{derivada respecto de } X_3} - \underbrace{\cancel{\frac{2mX_4X_3}{M}}}_{\text{derivada respecto de } X_4} + \underbrace{\frac{1}{Ml}u}_{\text{derivada respecto de } u}$$

$$\dot{X}_1 = X_2$$

$$\dot{X}_3 = X_4$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -F/M & -mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-F}{ML} & -g\left(\frac{M+m}{ML}\right) & 0 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ 1/ML \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -F/M & \frac{-mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-F}{ML} & -g\left(\frac{M+m}{ML}\right) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ 1/ML \end{bmatrix} \cdot u$$

Codigo de Matlab de péndulo inestable

```
clc;clear all;close all;
m=.1;
F=0.1;
long=0.6;
g=9.8;
M=.5;
dlt_t=0.0001;
tiempo=(10/dlt_t);
t=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;

del_pp=0;
phi_pp=0;
phi_p=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
phi=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
del=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
del_p=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
```

```
u=linspace(0,0,tiempo+1);

%Condiciones iniciales
phi(1)=pi-0.8; color='r';
del(1)=0; del_p(1)=0; u(1)=0; del(1)=0; i=1;

%Version linealizada en el equilibrio estable
%estado=[del(i); del_p(i); phi(i); phi_p(i)]
Mat_A=[0 1 0 0;0 -F/M -m*g/M 0; 0 0 0 1; 0 F/(long*M) g*(m+M)/(long*M) 0]
Mat_B=[0; 1/M; 0; -1/(long*M) ]
X0=[0 0 0 0]';x=[0 0 phi(1) 0]';

while(i<(tiempo+1))
%Variables del sistema no lineal
estado=[del(i); del_p(i); phi(i); phi_p(i)];
u(i)=0;

%Sistema no lineal
del_pp=(1/(M+m))*(u(i)-m*long*phi_pp*cos(phi(i))+m*long*phi_p(i)^2*sin(phi(i))-F*del_p(i));
phi_pp=(1/long)*(g*sin(phi(i))-del_pp*cos(phi(i)));
del_p(i+1)=del_p(i)+dlt_t*del_pp;
del(i+1)=del(i)+dlt_t*del_p(i);
phi_p(i+1)=phi_p(i)+dlt_t*phi_pp;
phi(i+1)=phi(i)+dlt_t*phi_p(i);

%Variables del sistema lineal
dell(i)=x(1); del_pl(i)=x(2);phil(i)=x(3);phi_pl(i)=x(4);

%Sistema lineal
xp=Mat_A*(x-X0)+Mat_B*u(i);
x=x+dlt_t*xp;
i=i+1;

end

dell(i)=x(1); del_pl(i)=x(2);phil(i)=x(3);phi_pl(i)=x(4);

figure(1);hold on;

subplot(3,2,1);
plot(t,del,color);grid on;title('Posicion carro');
hold on;plot(t,dell,'k');

subplot(3,2,2);
plot(t,del_p,color);grid on;title('Velocidad carro');
hold on;plot(t,del_pl,'k');

subplot(3,2,3);
```

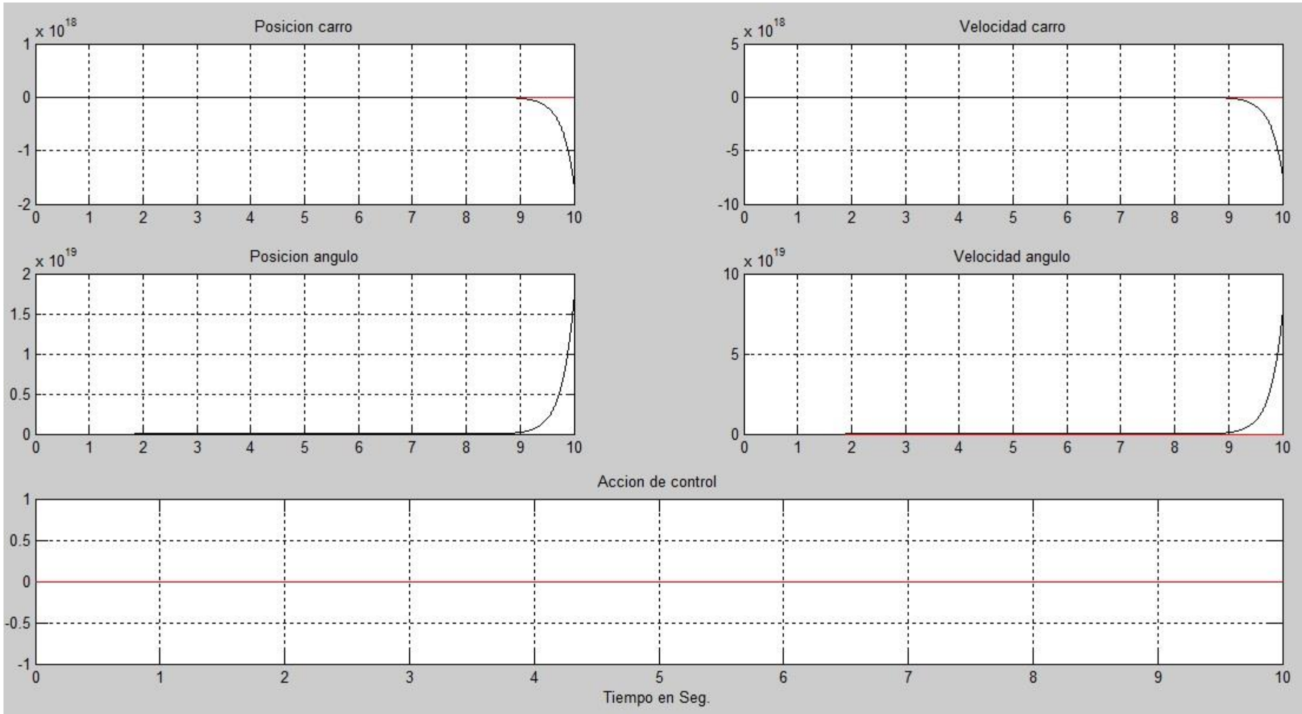
```
plot(t,phi,color);hold on;plot(t,pi*ones(size(t)),'k');plot(t,phil,'k');
grid on;title('Posicion angulo');hold on;

subplot(3,2,4);
plot(t,phi_p,color);grid on; title('Velocidad angulo');
hold on;plot(t,phi_pl,'k');

subplot(3,1,3);
plot(t,u,color);grid on;title('Accion de control');xlabel('Tiempo en Seg.');
hold on;
```

Codigo de Matlab de péndulo estable

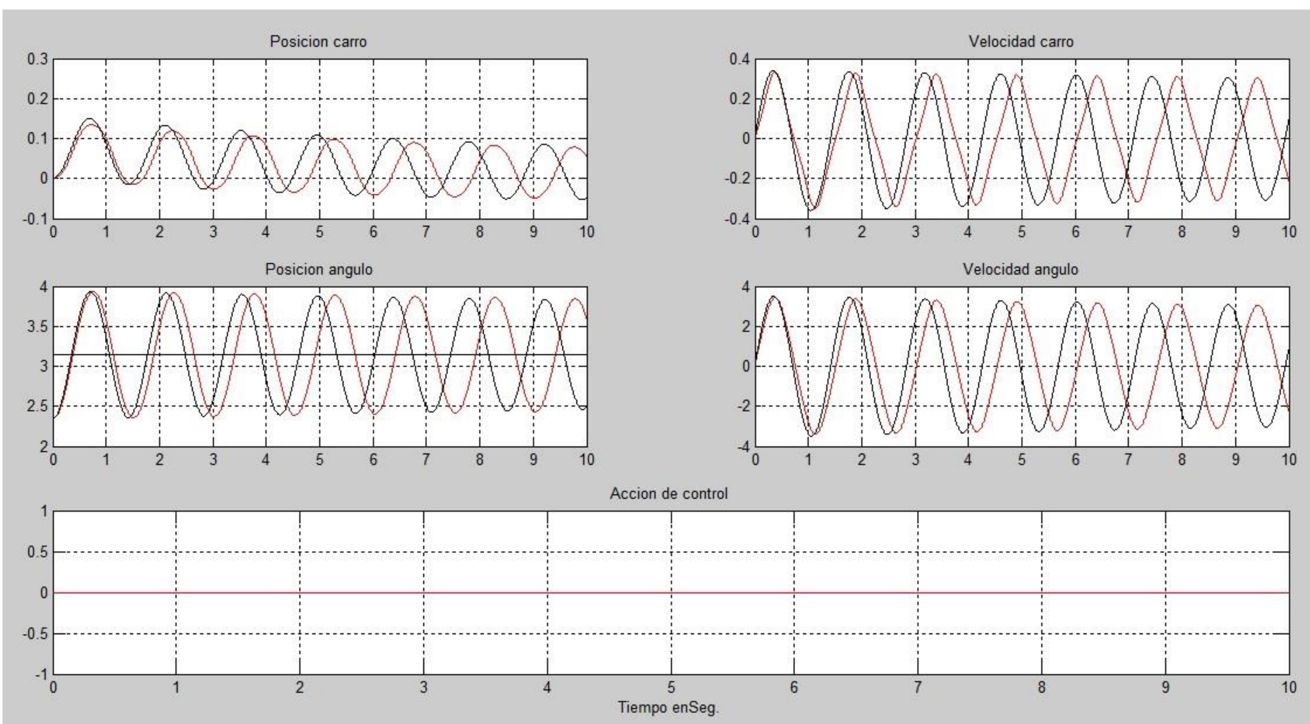
```
clc;clear all;close all;
m=.1;
F=0.1;
long=0.6;
g=9.8;
M=.5;
dlt_t=0.0001;
tiempo=(10/dlt_t);
t=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;

del_pp=0;
phi_pp=0;
phi_p=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
phi=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
del=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
del_p=0:dlt_t:tiempo*dlt_t;
u=linspace(0,0,tiempo+1);

%Condiciones iniciales
phi(1)=pi-0.8; color='r';
del(1)=0; del_p(1)=0; u(1)=0; del(1)=0; i=1;

%Version linealizada en el equilibrio estable
%estado=[del(i); del_p(i); phi(i); phi_p(i)]
Mat_A=[0 1 0 0;0 -F/M -m*g/M 0; 0 0 0 1; 0 -F/(long*M) -g*(m+M)/(long*M) 0]
Mat_B=[0; 1/M; 0; 1/(long*M) ]
X0=[0 0 pi 0]';x=[0 0 phi(1) 0]';

while(i<(tiempo+1))
%Variables del sistema no lineal
estado=[del(i); del_p(i); phi(i); phi_p(i)];
u(i)=0;

%Sistema no lineal
```

```
del_pp=(1/(M+m))*(u(i)-m*long*phi_pp*cos(phi(i))+m*long*phi_p(i)^2*sin(phi(i))-F*del_p(i));
phi_pp=(1/long)*(g*sin(phi(i))-del_pp*cos(phi(i)));
del_p(i+1)=del_p(i)+dlt_t*del_pp;
del(i+1)=del(i)+dlt_t*del_p(i);
phi_p(i+1)=phi_p(i)+dlt_t*phi_pp;
phi(i+1)=phi(i)+dlt_t*phi_p(i);

%Variables del sistema lineal
dell(i)=x(1); del_pl(i)=x(2);phil(i)=x(3);phi_pl(i)=x(4);

%Sistema lineal
xp=Mat_A*(x-X0)+Mat_B*u(i);
x=x+dlt_t*xp;
i=i+1;
end

dell(i)=x(1); del_pl(i)=x(2);phil(i)=x(3);phi_pl(i)=x(4);
figure(1);hold on;

subplot(3,2,1);
plot(t,del,color);grid on;title('Posicion carro');
hold on;plot(t,dell,'k');

subplot(3,2,2);
plot(t,del_p,color);grid on;title('Velocidad carro');
hold on;plot(t,del_pl,'k');

subplot(3,2,3);
plot(t,phi,color);
hold on;plot(t,pi*ones(size(t)),'k');plot(t,phil,'k');
grid on;title('Posicion angulo');hold on;

subplot(3,2,4);
plot(t,phi_p,color);grid on; title('Velocidad angulo');
hold on;plot(t,phi_pl,'k');

subplot(3,1,3);
plot(t,u,color);grid on;title('Accion de control');xlabel('Tiempo enSeg.');
hold on;
```

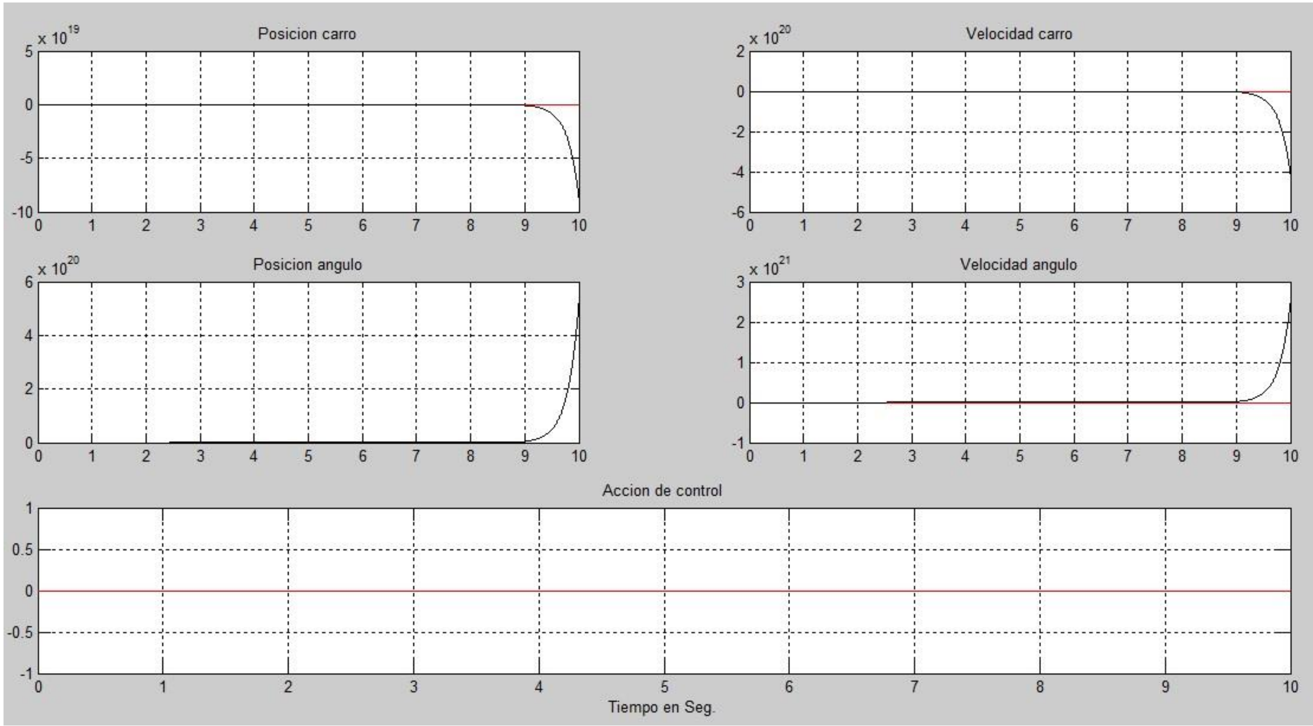
Péndulo inestable x=[0 0 -0.01 0]’

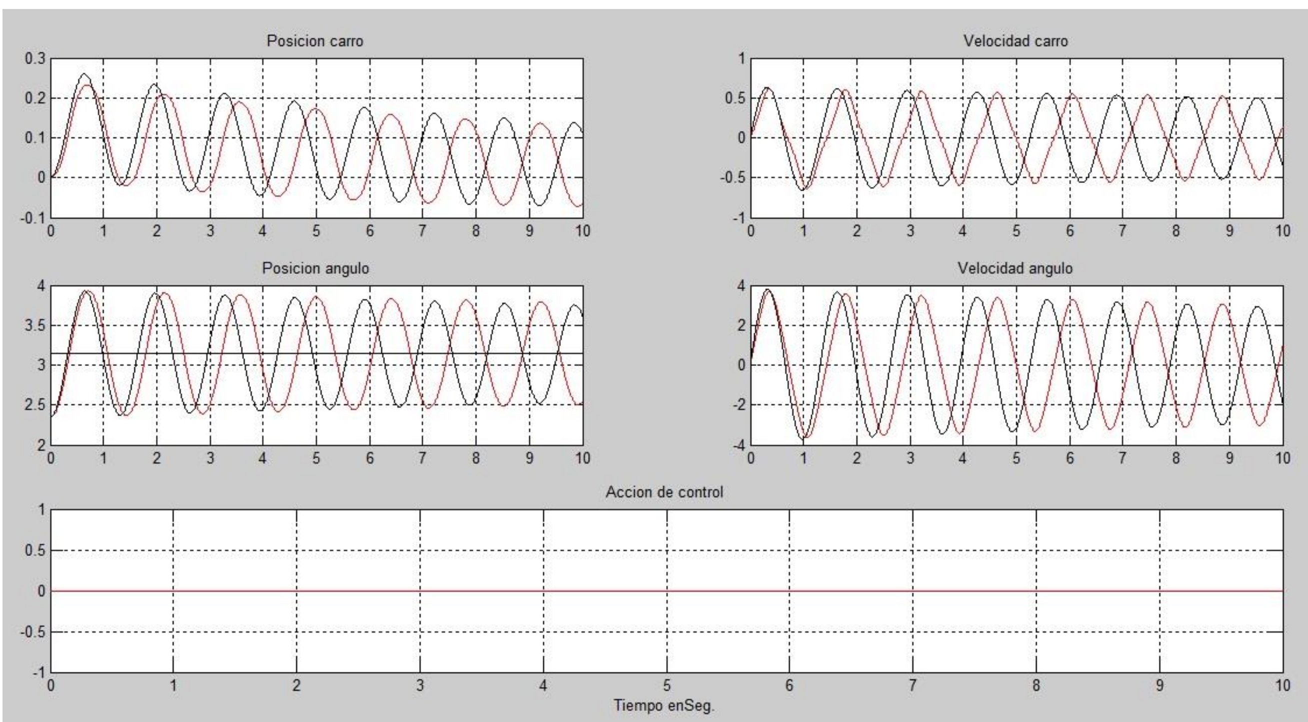


Péndulo estable x=[0 0 3.01 0]’

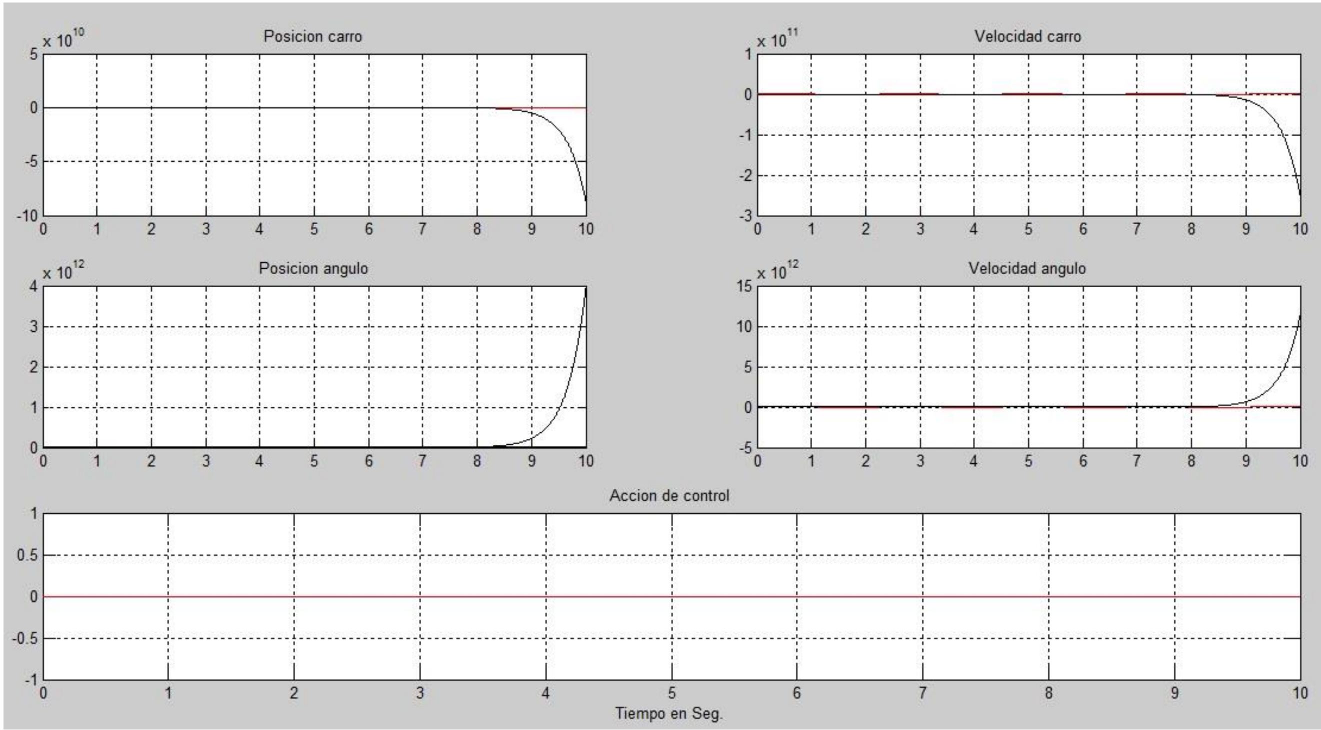


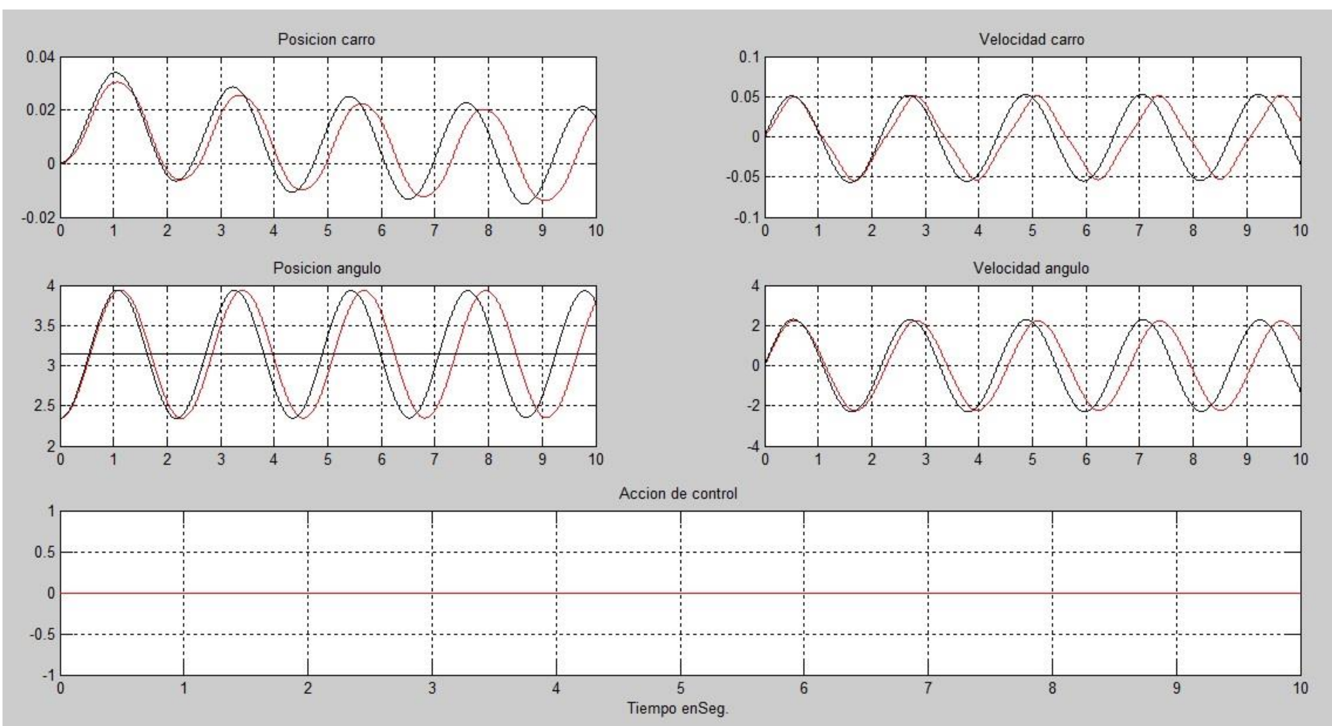
Péndulo con masa m al doble





Péndulo con masa m=0.01 y longitud L=1.2





Péndulo con masa m=0.5 y longitud L=12