

# Sistemas de Control II

## Trabajo práctico N°3



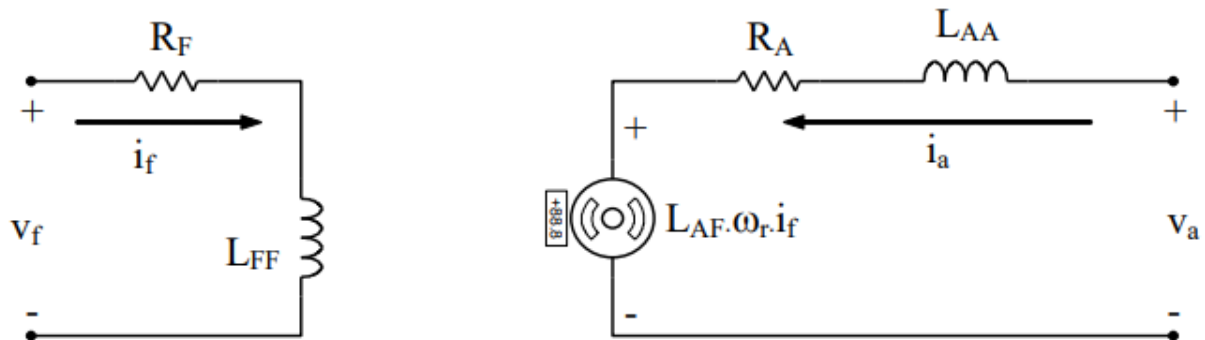
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**  
**FCEFyN**

- Profesor: Dr. Ing. Pucheta, Julian
- Alumno: Valdez Benavidez, Mauricio L.

# DISEÑO DE CONTROLADORES CONSIDERANDO LA DINAMICA DEL ERROR Y LA MAGNITUD DE LA ACCION DE CONTROL EN SISTEMAS NO LINEALES MULTIVARIABLES

## CASO DE ESTUDIO 1

### SISTEMAS DE TRES VARIABLES DE ESTADO



Se parte del esquemático del circuito que representa a un motor de CC, las ecuaciones con torque  $T_L$  no nulo y parámetros definidos  $L_{AA}=0.56$ ;  $J=0.0019$ ;  $R_A=1.35$ ;  $B=0.000792$ ;  $K_i=1$ ;  $K_m=1$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_A}{L_{AA}}i_a - \frac{K_m}{L_{AA}}\omega_r + \frac{1}{L_{AA}}V_a$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{K_i}{J}i_a - \frac{B_m}{J}\omega_r + \frac{1}{J}T_L$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \omega_r$$

**Item[1]** Implementar un sistema en variables de estado que controle el ángulo del motor, para consignas de  $\pi/2$  y  $-\pi/2$  cambiando cada 5 segundos y que el  $T_L$  de 1,5 Nm aparece sólo para  $\pi/2$ , para  $-\pi/2$  es nulo. Hallar el valor de integración Euler adecuado. El objetivo es mejorar la dinámica del controlador que muestra la Fig. 1. Aunque esta se muestre en otra escala de tiempo verificando el resultado con las curvas del archivo *xlsx* adjunto.

-Evitando que la tensión supere los 24Volts en valor absoluto, especificar el tiempo de muestreo necesario para el controlador cumpla el objetivo.

-Asumiendo que no puede medirse directamente la corriente, proponer un controlador que logre el objetivo.

-Determinar el efecto de la no linealidad en la acción de control, descrita en la Fig. 2, y verificar cuál es el máximo valor admisible de ésa no linealidad.

Para hallar el valor de integración de Euler, se planteó la matriz A de estados y se calcularon los auto-valores de la misma. Luego se buscaron los coeficientes que representan a las dinámicas más rápidas y lentas del sistema

Se llegó a un valor de integración de  $h = 3 * 10^{-3}$  valor que se usó también para el tiempo de muestreo.

Antes de continuar con el procedimiento para la realización del controlador se verifica que el sistema sea controlable, es decir que sea tal que se le puede aplicar una acción de control adecuada para lograr que el sistema evolucione desde un estado inicial hasta un estado deseado en un número finito de pasos discretos de tiempo.

También se chequea que sea alcanzable es decir la capacidad de un sistema para alcanzar cualquier estado deseado dentro de un tiempo finito a partir de un estado inicial dado, utilizando acciones de control adecuadas.

Para chequear ambos requerimientos, se plantean las matrices de controlabilidad y de alcanzabilidad y se verifica el rango. Si el rango es completo, verifica.

Una cuestión a tener en cuenta es que, si el sistema es controlable, entonces es alcanzable, pero no significa que si es alcanzable, sea controlable.

```
Mc = [B A*B A^2*B A^3*B A^4]; rank(Mc) % Controlabilidad  
Ma = [B A*B A^2*B A^3*B]; rank(Ma) % Alcanzabilidad
```

```
>> Mc  
  
Mc =  
  
    0.0053    0.0052    0.0051    0.0050    0.9060   -0.0206         0  
    0.0042    0.0126    0.0207    0.0287    6.0706    0.9290         0  
    0.0000    0.0000    0.0001    0.0002    0.0370    0.0117    1.0000  
  
>> rank(Mc)  
  
ans =  
  
     3
```

```
>> Ma

Ma =

    0.0053    0.0052    0.0051    0.0050
    0.0042    0.0126    0.0207    0.0287
    0.0000    0.0000    0.0001    0.0002

>> rank(Ma)

ans =

     3
```

Además de un controlador DLQR puro, se le agrega un Integrador para que pueda seguir a la referencia con mayor precisión y disminuyendo el error con cada iteración.

Quedando las matrices Q, R y K de la siguiente manera

```
Q =

    1.0000         0         0         0
         0    1.0000         0         0
         0         0    1.0000         0
         0         0         0    0.1000

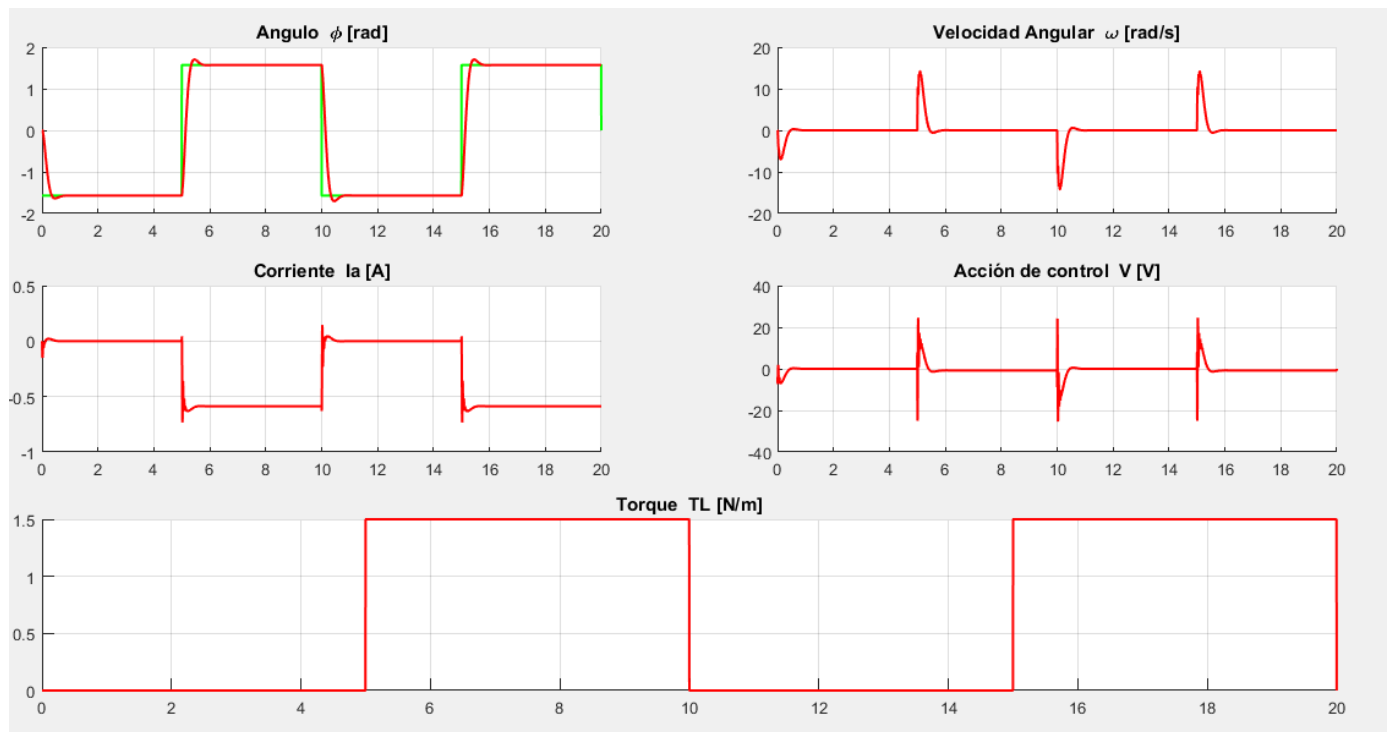
R =

    0.0100

K =

    72.0005    8.9872   129.6946
```

Consiguiendo el siguiente comportamiento del sistema cumplimentando el primer requerimiento que es que la tensión no sobrepase los 24 [V] en valor absoluto



Ahora para el segundo requerimiento, que no puede medirse la corriente directamente, se plantea un observador entonces los parámetros son los siguientes:

$Q_o =$

10.0000	0	0
0	10.0000	0
0	0	0.0900

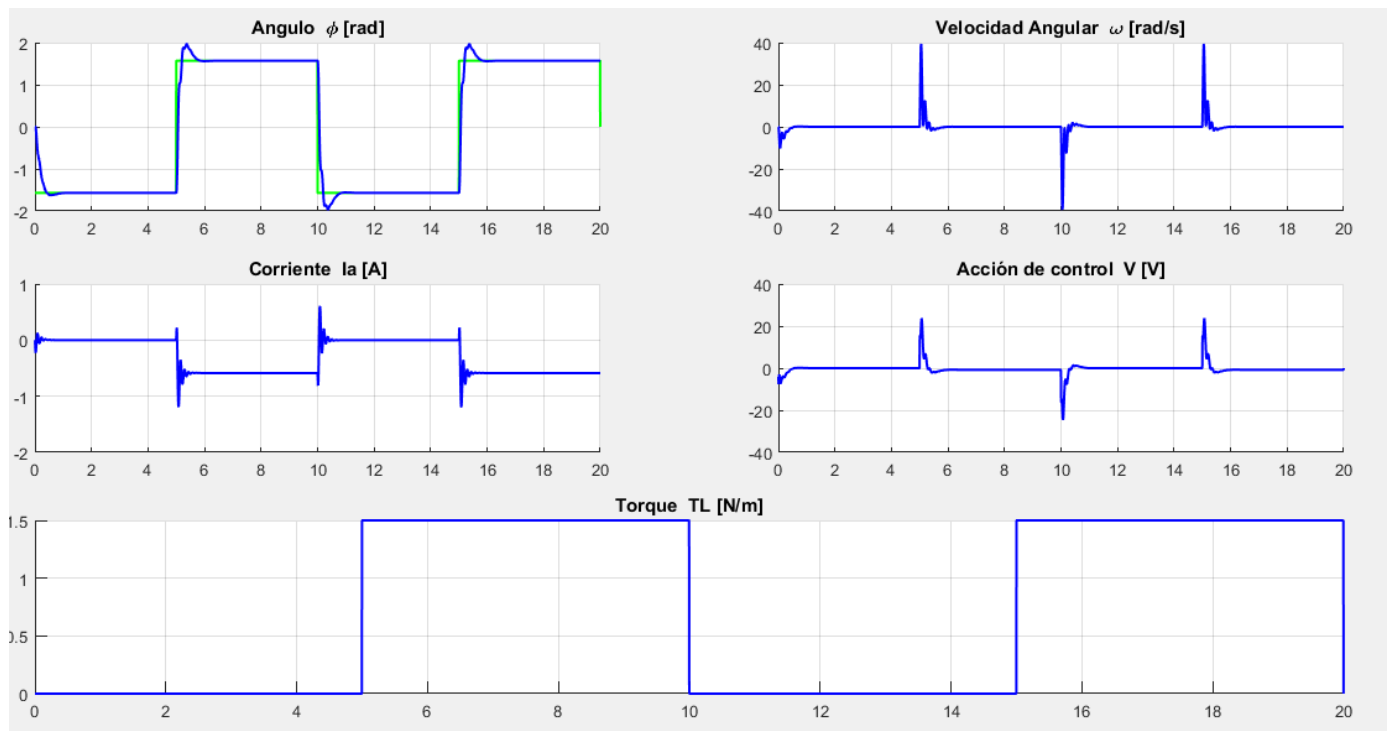
$R_o =$

10	0
0	10

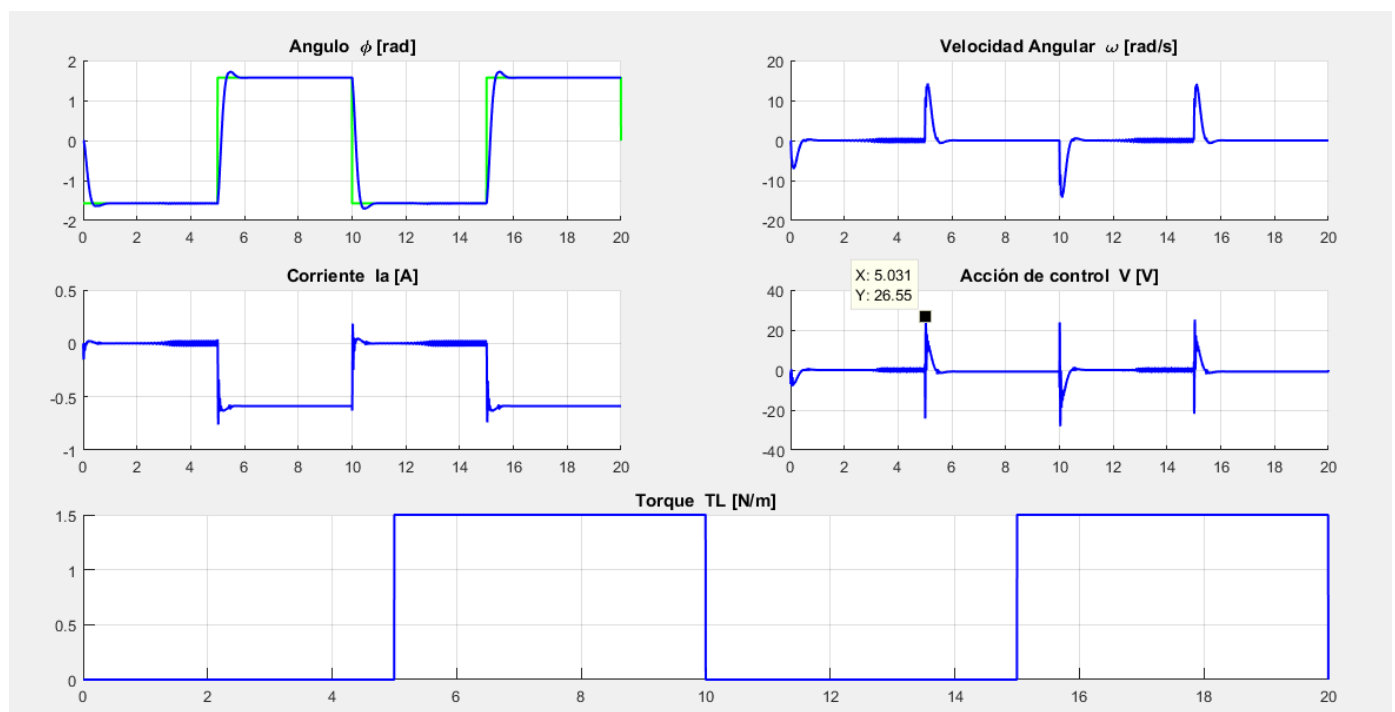
$K_o =$

-0.0111	0.6064
1.4652	1.3199
0.1314	-0.0008

Quedando entonces las gráficas con este controlador



Una no linealidad va a hacer más lento el sistema, y la acción de control va a aumentar tratando de compensar ese efecto y aumentará para poder hacer que el sistema llegue a su referencia. Para este caso, se fue aumentando el valor de la no linealidad de 1 en 1. Al llegar al valor de 3 vemos que el sistema llega a seguir la referencia de manera aceptable, sin embargo la acción de control aumenta a picos de +26 [V], sobrepasando el requerimiento de que no supere los 24[V] en valor absoluto. Por lo tanto este será el límite de la no linealidad.



## Script utilizado

```
% Sistemas de Control II -FCEFyN-UNC
% Profesor: Dr.Ing. Pucheta, Julian
% Alumno: Valdez Benavidez, Mauricio Luciano
% Tp N° 3 - Caso de estudio 1 -
% Inciso 1
% Implementar un sistema en variables de estado que controle el ángulo
del motor,
% para consignas de  $\pi/2$  y  $-\pi/2$  cambiando cada 5 segundos y que el
% TL de 1,5 aparece sólo para  $\pi/2$ , para  $-\pi/2$  es nulo.
% Hallar el valor de integración Euler adecuado.
% El objetivo es mejorar la dinámica del controlador que muestra la
Fig. 1
% verificando el resultado con las curvas del archivo.xlsx adjunto
%%
close all; clear all; clc;
% color='r';
color='b';

% %Se importan los datos de la tabla excel
% valores=xlsread('Curvas_Medidas_Motor_2023.xls');
% t_excel=valores(1:end,1); %tiempo
% phi_excel=valores(1:end,2); %angulo
% w_excel=valores(1:end,3); %velocidad angular
% ia_excel=valores(1:end,4); %corriente
% v_excel=valores(1:end,5); %tension
% tl_excel=valores(1:end,6); %torque
%
% figure(1)
% subplot(3,2,1);hold on;
% plot(t_excel,phi_excel, 'r' , 'LineWidth',1.5);title('Angulo \phi
[rad]'); grid on;hold on;
% subplot(3,2,2);hold on;
% plot(t_excel,w_excel, 'r' , 'LineWidth',1.5);title('Velocidad Angular
\omega [rad/s]');grid on;hold on;
% subplot(3,2,3);hold on;
% plot(t_excel,ia_excel, 'r' , 'LineWidth',1.5);title('Corriente Ia
[A]');grid on;hold on;
% subplot(3,2,4);hold on;
% plot(t_excel,v_excel, 'r' , 'LineWidth',1.5);title('Tensión V
[V]');grid on;hold on;
% subplot(3,1,3);hold on;
% plot(t_excel,tl_excel, 'r' , 'LineWidth',1.5);title('Torque TL
[N/m]');grid on;hold on;

%Se declaran los parámetros del sistema
LAA = .56;
J = .0019;
RA = 1.35;
Bm = .000792; % figura 6.9 Kuo (version en ingles) cap 6.2.1
Ki = 1;
Km = 1;
```

```

%TIEMPO CONTINUO
%Matrices a lazo abierto
Ac=[-RA/LAA      -Km/LAA      0; %x1 = Corriente
      Ki/J      -Bm/J      0; %x2 = Velocidad angular
      0          1          0] %x3 = Angulo

Bc=[1/LAA;
     0;
     0]

Cc=[0 0 1;
    1 0 0] %Salida theta

Dc=[0]

%val= eig(Ac)

% val=real(1/eig(Ac))

% tR=log(0.95)/val(2); %dinámica mas rápida
% tR=tR/10;
% tL=log(0.05)/val(3); %dinámica mas lenta
% tL=tL*10;

%Tiempos
Ts = 3e-3; %Tiempo de muestreo
T = 20; %Tiempo de simulación - Más lento
At = Ts; %Tiempo de integración - Más rápido
Kmax = (T/At);

%Definición de variables
titaRef = (-pi/2); %Valor de referencia inicial
Tl =1.5; %0.1035 %este valor es el promedio del excel %Torque
(solo para pi/2)
tc = 5; %Tiempo en el que se pasa la referencia de pi/2 a -pi/2
est = 0;

%Asignaciones
t = 0:At:T;
ia = 0:At:T;
w = 0:At:T;
w_p = 0:At:T;
theta = 0:At:T;

u = linspace(0,0,Kmax+1);
ref = linspace(0,0,Kmax+1);
torque = linspace(0,0,Kmax+1);
%Condiciones Iniciales
ia(1) = 0;
w(1) = 0;
w_p(1) = 0;
theta(1) = 0;

```



```

TL = 0;           %El torque comienza en Tl, ya que la referencia inicial
es -pi/2
u(1) = 0;

x = [0,0,0];      %[ia, tita, omega] condiciones inicales
x_p = [0,0,0];    %[ia_p, tita_p, omega_p]
x_hat = [0;0;0];

%Pasaje de tiempo continuo a tiempo discreto
sys_c = ss(Ac,Bc,Cc,Dc);
sys_d = c2d(sys_c,Ts,'zoh');

%TIEMPO DISCRETO
%Matrices de lazo abierto
A = sys_d.a;
B = sys_d.b;
C = sys_d.c;

%Matriz de Ma y Mc
Mc = [B A*B A^2*B A^3*B A^4]; Controlabilidad = rank(Mc) %Controlabi-
lidad
Ma = [B A*B A^2*B A^3*B]; Alcanzabilidad = rank(Ma) %Alcanzabilidad

% Para el integrador
Cref = Cc(1,:);
AA=[A,zeros(3,1);-Cref*A,eye(1)]
BB=[B;-Cref*B]

%Parámetros del controlador LQR

d = [1 1 1 0.1]; %Corriente, velocidad , Ángulo
Q = diag(d);
R = 1e-2;        %Dimensionar para que no pase de 24 v
Kk = dlqr(AA, BB, Q, R);
K= Kk(1:3);
Ki = -Kk(4);

%Observador
Ao = A';
Bo = Cc';
Co = B';
%Parámetros del controlador LQR observador
do = [1e1 10 .09e0]; %Corriente, velocidad, angulo
Qo = diag(do);
Ro=[1e1 0 ;
    0 1e1];
Ko = (dlqr(Ao,Bo,Qo,Ro))'

%Simulación
ii = 1;
kk = 0;
% psi(1)=0;
v(1) = 0;

```

```

while(ii<(Kmax))
    kk=kk+At;
    if(kk>tc)
        titaRef=titaRef*(-1);
        if(est==0)
            TL=Tl;
            est=1;
        else
            TL=0;
            est=0;
        end
        kk=0;
    end
    ref(ii)=titaRef;
    torque(ii)=TL ;
    estado=[ia(ii); w(ii); theta(ii)];

    y_sal=Cc*estado;
    v(ii+1)=v(ii)+ref(ii)-y_sal(1);

    %Ley de control
    u(ii)=-K*estado+Ki*v(ii+1); %Sin observador
%    u(ii) = -K*x_hat+Ki*v(ii+1); %Con observador

    zona_muerta=3;

    %Zona Muerta
    if(abs(u(ii))<zona_muerta)
        u(ii)=0;
    else
        u(ii)=sign(u(ii))*(abs(u(ii))-zona_muerta);
    end

    %-----

    y_sal_o=Cc*x_hat;

    %Integracion de Euler
    ia_p = -(RA/LAA)*ia(ii) - (Km/LAA)*w(ii) + (1/LAA)*u(ii);
    w_p = (Ki/J)*ia(ii) - (Bm/J)*w(ii) + (1/J)*TL;
    tita_p = w(ii);
    x_hat = A*x_hat+B*u(ii)+Ko*(y_sal - y_sal_o);
    ia(ii+1) = ia(ii)+At*ia_p;
    w(ii+1) = w(ii)+At*w_p;
    theta(ii+1) = theta(ii)+At*w(ii);
    ii=ii+1;

end

%Gráficos

figure(2)
subplot(3,2,1);hold on;

```

```

plot(t,ref,'g','LineWidth',1.5);title('Angulo \phi [rad]'); grid
on;hold on;
plot(t,theta, color , 'LineWidth',1.5)
subplot(3,2,2);hold on;
plot(t,w, color , 'LineWidth',1.5);title('Velocidad Angular \omega
[rad/s]');grid on;hold on;
subplot(3,2,3);hold on;
plot(t,ia, color , 'LineWidth',1.5);title('Corriente Ia [A]');grid
on;hold on;
subplot(3,2,4);hold on;
plot(t,u, color , 'LineWidth',1.5);title('Acción de control V
[V]');grid on;hold on;
subplot(3,1,3);hold on;
plot(t,torque, color , 'LineWidth',1.5);title('Torque TL [N/m]');grid
on;hold on;

figure(3)
plot(theta,w, color , 'LineWidth',1.5);title('Plano de Fases'); grid
on;hold on;

```

## CASO DE ESTUDIO 2

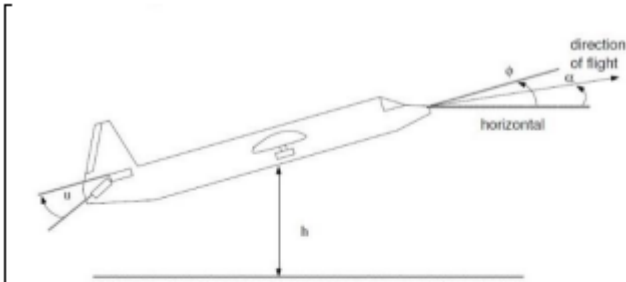


Fig. 3. Modelo de sistema de altitud en un avión.

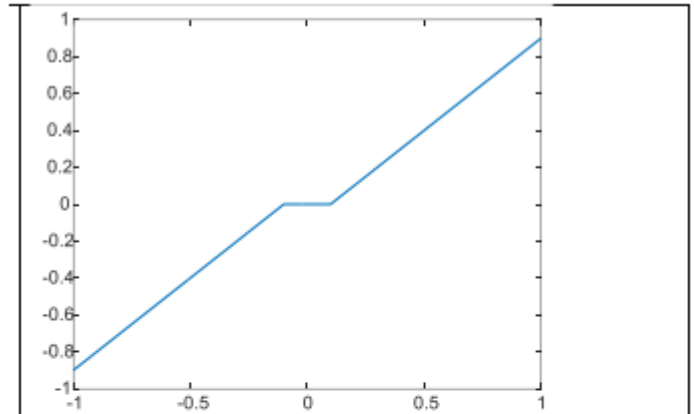


Fig. 4. Relación de entrada salida que tiene el actuador lineal con zona muerta de 0.5.

Para el caso de la Fig. 3, modelo válido sólo para pequeños ángulos, se tiene

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = a(\phi - \alpha) \\ \ddot{\phi} = -\omega^2(\phi - \alpha - b \cdot u) \\ \dot{h} = c\alpha \end{cases} \quad (4)$$

donde  $\omega > 0$  representa la frecuencia natural, y los coeficientes  $a$   $b$  son constantes positivas,  $u$  es la variable manipulada y es proporcional a la posición de los elevadores,  $\phi$  (ángulo de cabeceo) en radianes, vuela a  $c$  metros por segundo, su trayectoria de vuelo forma un ángulo  $\alpha$  con la horizontal (si  $\alpha > 0$  sube, si  $\alpha < 0$  descende).

**Ítem [2]** Para el caso del avión, emplear un tiempo de integración por Euler adecuado y un tiempo de simulación de 70seg. Los parámetros son  $a=0.07$ ;  $\omega=9$ ;  $b=5$ ;  $c=150$ , hallar un controlador para que los polos de lazo cerrado se ubiquen en  $\mu_i = -15 \pm 15j$ ;  $-0.5 \pm 0.5j$ , para referencias de 100 y -100 metros en altura, ambas con alturas iniciales de -500 y 500.

-Proponer un controlador en tiempo discreto en variables de estado para que el proceso evolucione en los rangos de validez del modelo, es decir donde los ángulos y el valor de la acción de control en valor absoluto son menores a la unidad.

-Asumiendo que no puede medirse el ángulo  $\alpha$ , pero sí el ángulo  $\phi$  y la altura, proponer un esquema que permita lograr el objetivo de control.

-Establecer el valor del tiempo de muestreo más adecuado para implementar el diseño en un sistema micro controlado.

-Determinar el efecto de la no linealidad en la acción de control, descrita en la Fig. 4, y verificar cuál es el máximo valor admisible de la no linealidad.

## CASO DE ESTUDIO 3

### SISTEMAS NO LINEAL DE CUATRO VARIABLES DE ESTADO

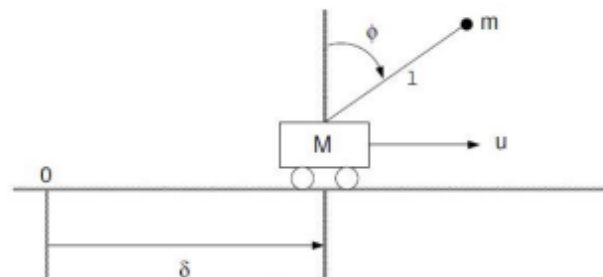


Fig. 5. Sistema del péndulo.

Para el caso del esquema del péndulo invertido de la Fig. 5 donde el modelo es,

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{\delta} + m l \ddot{\phi} \cos \phi - m l \dot{\phi}^2 \sin \phi + F \dot{\delta} = u \\ l \ddot{\phi} - g \sin \phi + \ddot{\delta} \cos \phi = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Con las variables de estado  $x = [\delta \quad \dot{\delta} \quad \phi \quad \dot{\phi}]^T$ , y los valores de los coeficientes de  $m=0,1$ ;  $F=0,1$ ;  $l=1,6$ ;  $g=9,8$ ;  $M=1,5$  y  $\Delta t=10^{-4}$  seg, tomando un tiempo de simulación de 15 segundos.

**Ítem [3]** Calcular sistema controlador que haga evolucionar al péndulo en el equilibrio estable. Objetivo de control: partiendo de una condición inicial nula en el desplazamiento y el ángulo en  $\pi$ , hacer que el carro se desplace a 10 metros evitando las oscilaciones de la masa  $m$ , considerando que es una grúa. Una vez que  $\delta=10$  modificar a  $m$  a un valor 10 veces mayor y volver al origen evitando oscilaciones.

- Considerar que sólo puede medirse el desplazamiento  $\delta$  y el ángulo  $\phi$ .
- Especificar el rango posible para el tiempo de muestreo para implementar el sistema en un microcontrolador.
- Determinar el efecto de la no linealidad en la acción de control, descrita en la Fig. 4, y verificar cuál es el máximo valor admisible de esa no linealidad.

Para hallar el valor de integración de Euler, se planteó la matriz A de estados y se calcularon los auto-valores de la misma. Luego se buscaron los coeficientes que representan a las dinámicas más rápidas y lentas del sistema

Se llegó a un valor de integración de  $h = 1 * 10^{-4}$ , para el valor de muestreo se utilizó un valor más grande, en este caso  $T_s = 1 * 10^{-2}$ .

Ahora para el cálculo del controlador se pasaron de las matrices de estado en tiempo continuo a tiempo discreto mediante un retentor de orden cero utilizando el  $T_s$  calculado antes.

Luego se hizo la verificación de controlabilidad y alcanzabilidad.

El sistema al tener 2 masas diferentes para diferentes posiciones, se crea 2 controladores, teniendo en cuenta que para este caso, al variar la masa, la matriz de estados se modifica. Además se agrega un integrador para que pueda seguir a la referencia.

```
%parametros DLQR de 0 a 10 m
dd = [.1 .01 .01 .1 0.00001];
QQ = diag(dd);
RR = 2.3e-4;

KK = dlqr(AA,BB,QQ,RR);
K = KK(1:4);
KI = -KK(5);
```

```

% Controlador de 10 a 0 m
%matrices para m*10
m2 = m*10;

Ac_m2=[0      1      0      0;
        0    -Fricc/M    -m2*g/M    0;
        0      0      0      1;
        0  -Fricc/(1*M)  -g*(m2+M)/(1*M)  0];

sys_c_m2 = ss(Ac_m2, Bc, Cc, Dc);
sys_d_m2=c2d(sys_c_m2,Ts,'zoh');

%Matrices de lazo abierto en el equilibrio estable
A_m2 = sys_d_m2.a;
B_m2 = sys_d_m2.b;
C_m2 = sys_d_m2.c;

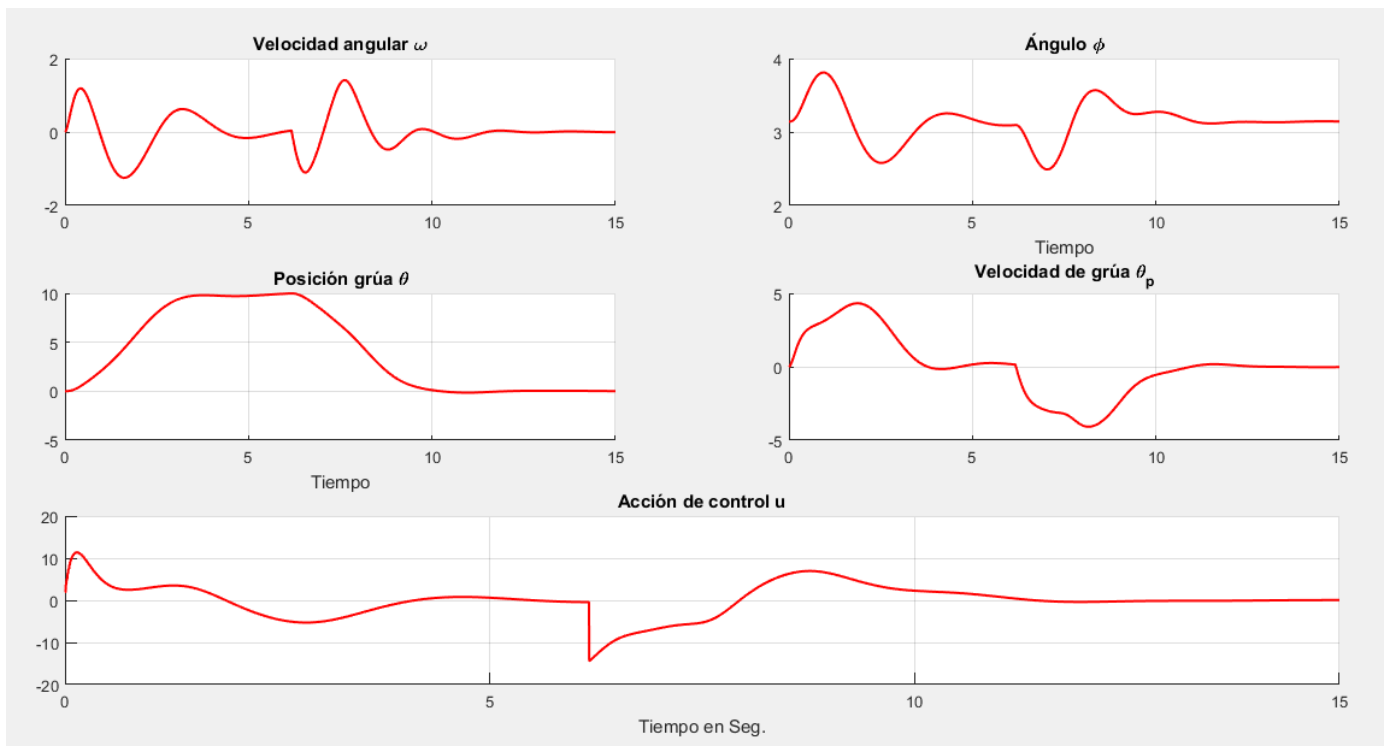
AA_m2=[A_m2,zeros(4,1);-Cref*A_m2,eye(1)];

% parametros DLQR
dd_m2 = [.1 1e-3 1e-3 .1 0.001];
QQ_m2 = diag(dd);
RR_m2 = .008;

KK_m2 = dlqr(AA_m2,BB,QQ_m2,RR_m2);
K_m2 = KK_m2(1:4);
KI_m2 = -KK_m2(5);

```

Luego se obtuvieron las siguientes gráficas



Como se observa, el carro, o más bien la grúa cumple con el requerimiento de ir hasta los 10 metros y luego regresar. En cuanto a las oscilaciones, el ángulo se mantiene dentro de un rango aceptable de la referencia que es  $\pi$ .

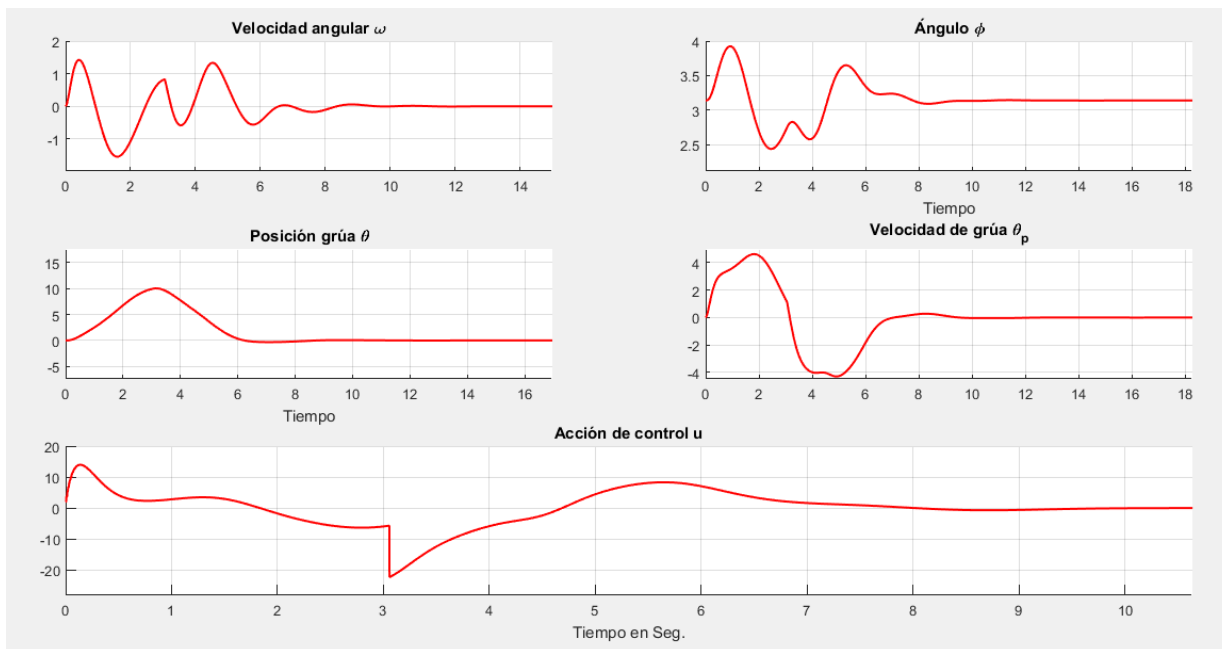
Para el rango posible de valores de tiempo de muestreo para que pueda implementarse en algún microcontrolador, se fueron cambiando y se llegó a un rango que va desde

$$8 * 10^{-3} \leq T_s \leq 1 * 10^{-2}$$

La disminución del período de muestreo (acercándolo al valor de integración por Euler) hace que el sistema sea mucho más rápido, por lo que se puede intuir que se asemeja más a un controlador en tiempo continuo, sin embargo, entra en juego la limitación de conseguir un microcontrolador que pueda tomar tantas muestras por segundo, es decir los precios son cada vez más elevados y llegan hasta un límite de fabricación.

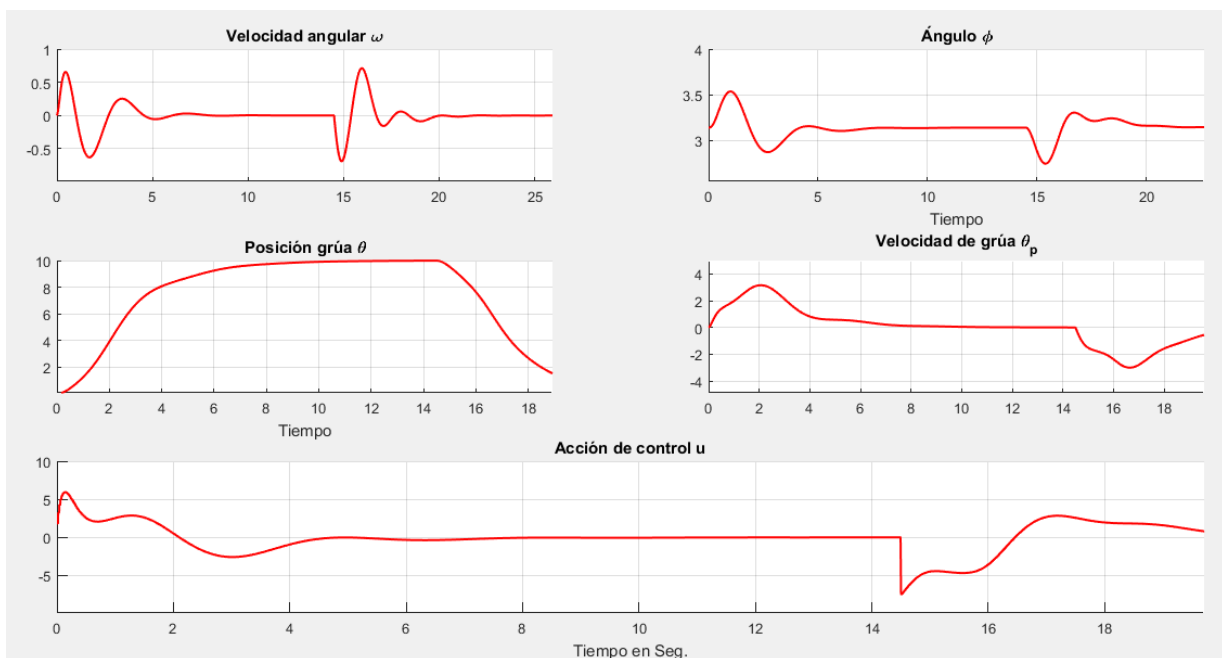
Si tomamos un controlador comercial estándar vamos a ver que generan oscilaciones haciendo que las acciones de control no puedan cumplir su objetivo

Aquí se muestra el efecto muestrear a  $8 * 10^{-3}$



Al aumentar el período de muestreo el sistema se vuelve muy lento, no pudiendo así traer mover la grúa, y trasladar la carga al origen.

Aquí se muestra el efecto muestrear a  $2 * 10^{-2}$ , vemos como se ralentiza todo el sistema.

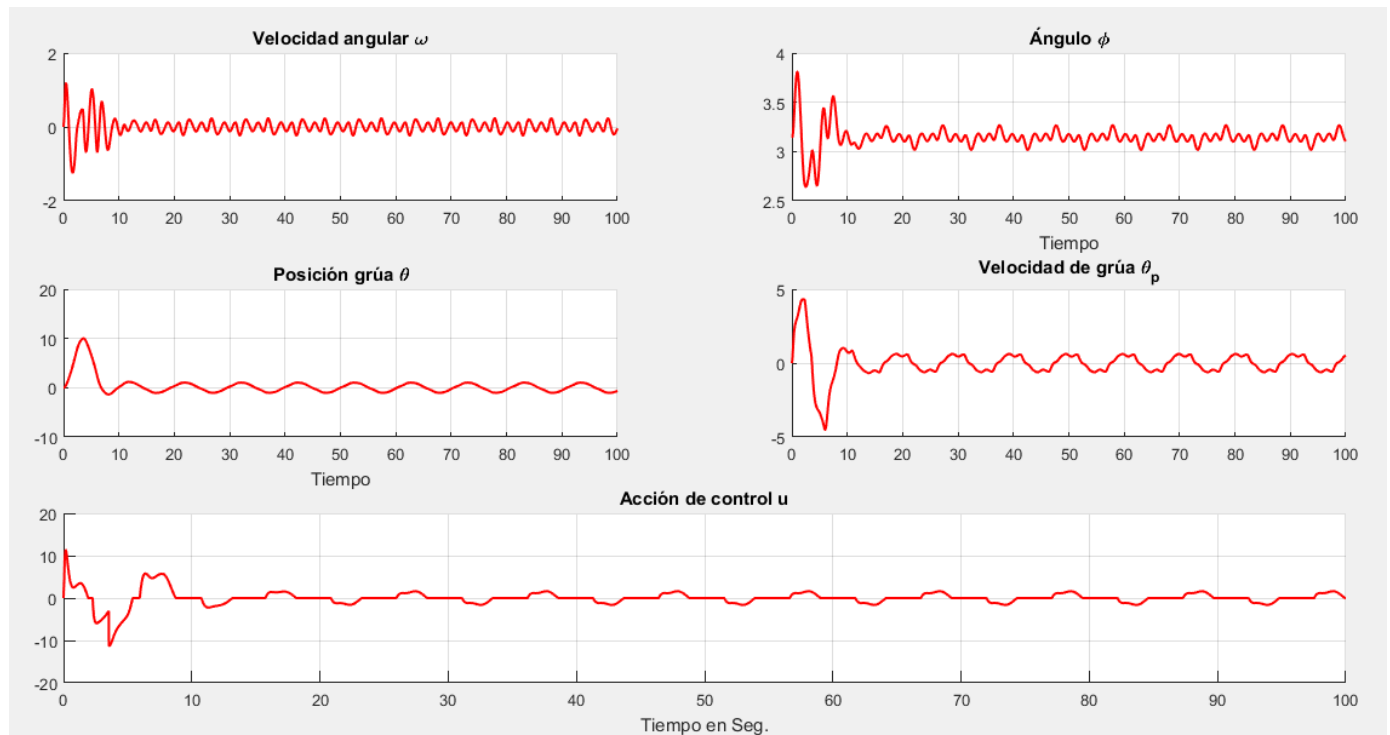


La no linealidad presente en el sistema genera una zona muerta en el actuador. Si esta linealidad está por debajo de 10, que es aproximadamente el valor pico de la acción de control, no afecta demasiado al transitorio del sistema. Sin embargo, al aumentar esta no linealidad superando la



mitad del valor pico (5), comienzan a apreciarse ciclos límite. Estos ciclos aparecen porque el sistema planteado con esa no linealidad grande tiende a aproximarse a un control todo o nada con relé, por ejemplo, en donde el ancho de histéresis es demasiado grande. Este es un efecto no deseado.

### Ciclo límite en 6 [V]



### Script utilizado para esta segunda parte

```
%Caso de estudio 3. Sistema no lineal de cuatro variables de estado
close all;clear all; clc;
color = 'r';

%Se declaran los parámetros del sistema
m = 0.1;
Fricc = 0.1;
l = 1.6;
g = 9.8;
M = 1.5;

%TIEMPO CONTINUO
%Matrices de lazo abierto en el equilibrio estable
Ac=[0      1      0      0; %x1=delta - desplazamiento
    0     -Fricc/M  -m*g/M  0; %x2=delta_p
    0      0      0      1; %x3=phi - angulo
    0  -Fricc/(l*M)  -g*(m+M)/(l*M)  0]; %x4=phi_p

Bc=[ 0;
     1/M;
     0;
     1/(l*M) ];
```

```

Cc=[1 0 0 0;
    0 0 1 0];

Dc=[0];

%Condiciones iniciales
alfa(1) = pi;           %Ángulo inicial
ref = 10;               %Posición de referencia
flag = 0;

%Tiempos
% Ts = 1e-2; Rango posible de 8e-3 a 1e-2
Ts = 1e-2;
T = 20;
At = 1e-4;
Kmax = T/Ts;

%Pasaje de tiempo continuo a tiempo discreto
sys_c = ss(Ac, Bc, Cc, Dc);
sys_d=c2d(sys_c,Ts,'zoh');

%TIEMPO DISCRETO
%Matrices de lazo abierto en el equilibrio estable
A = sys_d.a;
B = sys_d.b;
C = sys_d.c;

%Integrador se mide desplazamiento
Cref = Cc(1,:);

AA=[A,zeros(4,1);-Cref*A,eye(1)];
BB=[B;-Cref*B];

% %Matriz de Ma y Mc
% Mc = [BB AA*BB AA^2*BB AA^3*BB AA^4*BB AA^5*BB AA^6]; Controlabili-
dad = rank(Mc);
% Ma = [BB AA*BB AA^2*BB AA^3*BB AA^4*BB AA^5*BB]; Alcanzabilidad =
rank(Ma);

%parametros DLQR de 0 a 10 m
dd = [.1 .01 .01 .1 0.00001];           %Desplazamiento, Veloci-
dad, Angulo, Velocidad angular, Integrador
QQ = diag(dd);
RR = 2.3e-4;

KK = dlqr(AA,BB,QQ,RR);
K = KK(1:4);
KI = -KK(5);

% Controlador de 10 a 0 m
%matrices para m*10

```

```

m2 = m*10;

Ac_m2=[0          1          0          0;           %x1=delta - des-
plazamiento
      0      -Fricc/M          -m2*g/M      0;           %x2=delta_p
      0          0          0          1;           %x3=phi - angulo
      0      -Fricc/(1*M)      -g*(m2+M)/(1*M) 0];           %x4=phi_p

sys_c_m2 = ss(Ac_m2, Bc, Cc, Dc);
sys_d_m2=c2d(sys_c_m2,Ts,'zoh');

%Matrices de lazo abierto en el equilibrio estable
A_m2 = sys_d_m2.a;
B_m2 = sys_d_m2.b;
C_m2 = sys_d_m2.c;

AA_m2=[A_m2,zeros(4,1);-Cref*A_m2,eye(1)];           % para el integra-
dor de m2

% parametros DLQR
dd_m2 = [.1 1e-3 1e-3 .1 0.001];           %Desplazamiento,
Velocidad, Angulo, Velocidad angular, Integrador
QQ_m2 = diag(dd);
RR_m2 = .008;

KK_m2 = dlqr(AA_m2,BB,QQ_m2,RR_m2);
K_m2 = KK_m2(1:4);
KI_m2 = -KK_m2(5);

%Observador
Ao = A';
Bo = Cc';
Co = B';

%parametros DLRQ- Observador
do = [.01 .01 .01 .0001]; %Desplazamiento, Velocidad, Angulo, Veloci-
dad angular
Qo = diag(do);
Ro = diag([10000 100000]);

Kko = dlqr(Ao,Bo,Qo,Ro);
Ko=Kko';
t = 0;

x = [0;0;alfa(1);0];
p = x(1);
p_p = x(2);
alfa = x(3);
w = x(4);

tita_pp(1) = 0;
h = Ts/20;

```

```

u = [];
i = 1;
u_k(1) = 0;
ref = 10;
flag = 0;
v(1) = 0;
x = [0; 0; alfa(1); 0];
x_hat = [0; 0; pi; 0];
xop=[0 0 pi 0]';

for ki=1:Kmax

    y_sal=Cc*x; %Salida de dos componentes
    y_sal_o=Cc*(x_hat-xop);
    v(ki+1)=v(ki)+ref-y_sal(1);

    %Ley de control
    u1(ki)=-K*(x-xop)+KI*v(ki+1); %color = ''; %Sin observador
%    u1(ki)=-K*x_hat+KI*v(ki+1); color = ''; %Con observador

    %Zona Muerta
    zona_muerta=0;
    if(abs(u1(ki))<zona_muerta)
        u1(ki)=0;
    else
        u1(ki)=sign(u1(ki))*(abs(u1(ki))-zona_muerta);
    end
    %-----

    for kii=1:Ts/h

        u(i)=u1(ki);
        p_pp=(1/(M+m))*(u(i)-
m*1*tita_pp*cos(alfa(i))+m*1*w(i)^2*sin(alfa(i))-Fricc*p_p(i));
        tita_pp=(1/l)*(g*sin(alfa(i))-p_pp*cos(alfa(i)));
        p_p(i+1)=p_p(i)+h*p_pp;
        p(i+1)=p(i)+h*p_p(i);
        w(i+1)=w(i)+h*tita_pp;
        alfa(i+1)=alfa(i)+h*w(i);
        if(p(i)>=9.99)
            if(flag==0)
                ref=0
                m=m*10;
                flag=1;
                K=K_m2;
                KI=KI_m2;
            end
        end
        i=i+1;
    end
    x=[p(i-1); p_p(i-1); alfa(i-1); w(i-1)];
    x_hat=A*x_hat+B*u1(ki)+Ko*(y_sal-y_sal_o)+xop;
end

```

```

u(i)=u1(ki);
t=0:h:T;

figure(1);
subplot(3,2,1); grid on; hold on;
plot(t,w,color,'LineWidth',1.5);grid on; title('Velocidad angular
\omega');

subplot(3,2,2); grid on; hold on;
plot(t,alfa,color,'LineWidth',1.5); title('Ángulo \phi');xlabel('Tiem-
po');

subplot(3,2,3); grid on; hold on;
plot(t,p,color,'LineWidth',1.5);title('Posición grúa \theta');xla-
bel('Tiempo');

subplot(3,2,4); grid on; hold on;
plot(t,p_p,color,'LineWidth',1.5);title('Velocidad de grúa \theta_p');

subplot(3,1,3); grid on; hold on;
plot(t,u,color,'LineWidth',1.5);title('Acción de control u');xla-
bel('Tiempo en Seg. ');
%
% figure(2);
% subplot(2,1,1);grid on; hold on;
% plot(alfa,w,color,'LineWidth',1.5);
% title('Ángulo vs Velocidad angular');
% xlabel('Ángulo');ylabel('Velocidad angular');
%
% subplot(2,1,2);grid on; hold on;
% plot(p,p_p,color,'LineWidth',1.5);
% title('Distancia vs velocidad');
% xlabel('Distancia');ylabel('Velocidad');

```

## Lecciones aprendidas y problemas que se presentaron

Identificadores de logros:

- Diseñar, proyectar y calcular sistemas de automatización y control para brindar soluciones óptimas de acuerdo a las condiciones definidas por el usuario.
- Analizar la factibilidad de controlar un proceso real conociendo el modelo.
- Diseñar controladores con realimentación de estados para obtener una dinámica estable considerando la dinámica y la magnitud de las acciones de control.

- Diseñar observadores de procesos linealizados para controlarlos cuando no es viable medir sus variables.
- Diseñar controladores para obtener una dinámica estable del proceso linealizado.
- Analizar el comportamiento de procesos reales mediante su representación matemática no lineal multivariable. 25
- Diseñar controladores de procesos considerando la dinámica y la magnitud de las acciones de control.
- Diseñar controladores para sistemas no lineales.
- Relacionar controladores digitales con el muestreo y la reconstrucción de señales de procesos de tiempo continuo.
- Determinar funciones de transferencia discretas de sistemas con muestreadores y retentores de orden cero.
- Comprender la equivalencia entre planos  $s$  y  $z$  y los lugares de tiempo de establecimiento, frecuencia natural amortiguada y no amortiguada y coeficiente de amortiguamiento constante.
- Digitalizar controladores de tiempo continuo.
- Expresar el modelo lineal multivariable de un proceso real en un punto de operación.
- Comprender conceptos de equilibrio, ciclo límite y espacio de estados.
- Analizar sistemas lineales a tramos o de estructura variable.

## Bibliografía

- Apuntes de las clases teóricas de Sistemas de Control 2 - Dr Ing Pucheta, Julian
- Ingeniería de control moderna, quinta edición – Ogata
- Links de internet :  
<https://la.mathworks.com/help/index.html>
- Repositorio de GitHub donde están los códigos a disposición del docente ya que fue designado como colaborador.

<https://github.com/mauriciovaldez19/Sistemas-de-Control-II---FCEFN-UNC>