

MODELADO, IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y CONTROL DE UN ROBOT DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD



ANEXOS

Alexander Constaín Daza
Karoll Viviana Torres Pérez

Director
Oscar Andrés Vivas Alban
Phd

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2008**

CONTENIDO

	Pag.
ANEXO A: PROGRAMAS Y SIMULACION DE LOS MODELOS GEOMETRICOS DEL ROBOT SCORBOT-ER 5PLUS	1
ANEXO B: REDUCCION DE LOS PARAMETROS ESTANDAR (PARAMETROS DE BASE)	4
ANEXO C: TRAYECTORIAS (TOMA DE DATOS)	5
ANEXO D: PROGRAMA DE IDENTIFICACION.....	7
ANEXO E: PROGRAMA CONCATENACION	15
ANEXO F:MATRIZ DE OBSERVACION	23
ANEXO G: VALIDACION CRUZADA DEL PROGRAMA DE IDENTIFICACION DEL ROBOT SCORBOT-ER 5PLUS	25
ANEXO H: ALGORITMOS PARA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE CONTROL..	33
ANEXO I: ARCHIVOS DE INICIO, UTILIZADOS PARA SIMULAR LOS LAZOS DE CONTROL	41
ANEXO J: ESQUEMAS EN SIMULINK PARA LOS CONTROLADORES PID Y CTC EN LOS ESPACIOS CARTESIANO Y ARTICULAR	43
ANEXO K: MODELOS DINAMICOS DEL ROBOT SCORBOT-ER 5PLUS	45

LISTA DE FIGURAS

Pag.

Figura A.1. Diagrama en Simulink para validar los modelos geométricos.	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.1. Gráfica de Trayectorias 3.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.2. Gráfica de Trayectorias 4.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.3. Gráfica de Trayectorias 7.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.4. Gráfica de trayectorias 10.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.5. Gráfica de trayectorias 15.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.6. Gráfica de trayectorias 20.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.7. Gráfica de trayectorias 21.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura G.1. Gráfica de seguimiento de trayectoria 20. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.	¡Error! Marcador no definido.
Figura G.2. Gráfica de seguimiento de trayectoria 21. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.	¡Error! Marcador no definido.
Figura G.3. Gráfica de seguimiento de trayectoria 23. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.	¡Error! Marcador no definido.
Figura G.4. Gráfica de seguimiento de trayectoria 25. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.	¡Error! Marcador no definido.
Figura H.1. Consigna articular tipo Bang-bang.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura H.2. Consigna Circular (a) y Componentes Cartesianos (b).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura J.1. Esquema en Simulink para control PID: espacio articular.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura J.2. Esquema en Simulink para control PID: espacio cartesiano.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura J.3. Esquema en Simulink para control CTC: espacio articular.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura J.4. Esquema en Simulink para control CTC: espacio cartesiano.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

Pag.

Tabla B.1. Parámetros inerciales de base simplificados del robot Scrobot-ER 5plus; **Error! Marcador no definido.**

Tabla D.1. Resultados del programa de Identificación.....; **Error! Marcador no definido.**

Tabla E.1. Concatenación para diferentes tipos de trayectorias; **Error! Marcador no definido.**

Tabla E.2. Concatenación de trayectorias antes de la identificación; **Error! Marcador no definido.**

ANEXO A

PROGRAMAS Y SIMULACION DE LOS MODELOS GEOMETRICOS DEL ROBOT SCORBOT-ER 5PLUS

Los modelos geométrico directo e inversos de un robot como el Scorbot er 5plus, están relacionados entre sí por las coordenadas cartesianas y articulares, correspondientes a una consigna utilizada en determinado momento. Ésta relación se evidencia en las expresiones simbólicas desarrolladas para dichos modelos utilizando la herramienta Matlab Simulink (figura A.1).

- **Modelo Geométrico Directo**

```
%Programa para obtener el Modelo Geométrico Directo del robot Scorbot ER 5 Plus

function salida = mgd(q1,q2,q3,q4)

%DISTANCIAS
D3 = 0.22;
D4 = 0.22;
D5 = 0.17;

%matriz 0T4
T4 = [(cos(q1)*cos(q2+q3+q4))      (-cos(q1)*sin(q2+q3+q4))      -sin(q1)
cos(q1)*(D5*cos(q2+q3+q4) + D4*cos(q2+q3) + D3*cos(q2));
(sin(q1)*cos(q2+q3+q4))      (-sin(q1)*sin(q2+q3+q4))      cos(q1)
sin(q1)*(D5*cos(q2+q3+q4) + D4*cos(q2+q3) + D3*cos(q2));
(-sin(q2+q3+q4))      (-cos(q2+q3+q4))      0      (-
D5*sin(q2+q3+q4) - D4*sin(q2+q3) - D3*sin(q2));
0      0      0      1];

%Posición
x = T4(1,4);
y = T4(2,4);
z = T4(3,4);

salida = [x y z];
```

- **Modelo Geométrico Inverso**

```
% Programa para obtener el Modelo Geométrico Inverso del robot Scorbot ER 5 Plus

function salida = mgi(X,Y,Z)

%Distancias
D3 = 0.22;
D4 = 0.22;
D5 = 0.17;

%Orientación
sz= 0;%
```

```

nz= -1;%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
S1 = Y;
C1 = X;

q1 = atan2(S1,C1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
H= X*cos(q1) + Y*sin(q1);
K1= (H^2) + (Z^2) + (D3^2) - (D4^2) + (D5^2)*(nz^2 + sz^2) - (2*D5)*(Z*sz - H*nz);
K2= (2*H*D3) + (2*D3*D5*nz);
K3= (2*D3*D5*sz) - (2*Z*D3);

%Ecuación tipo:
K1= cos(q2)*K2 + sin(q2)*K3;
num2= ((-K2*(2*K1*K2 + 2*sqrt(K2^2*K3^2 + K3^4 - K3^2*K1^2))) + 2*K1*(K2^2 + K3^2))/(2*K3*(K2^2 + K3^2));%
den2= (2*K1*K2 + 2*sqrt(K2^2*K3^2 + K3^4 - K3^2*K1^2))/(2*(K2^2 + K3^2));

q2 = atan(num2/den2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
M= H*cos(q2) - Z*sin(q2);
N= -H*sin(q2) - Z*cos(q2);

A1= (M^2) + (N^2) + (D3^2) + (D4^2) - (D5^2) - (2*M*D3);
A2= (2*M*D4) - (2*D3*D4);
A3= (2*N*D4);

%Ecuación tipo:
A1= cos(q3)*A2 + sin(q3)*A3;
num3= ((-A2*(2*A1*A2 + 2*sqrt(A2^2*A3^2 + A3^4 - A3^2*A1^2))) + 2*A1*(A2^2 + A3^2))/(2*A3*(A2^2 + A3^2));%
den3= (2*A1*A2 + 2*sqrt(A2^2*A3^2 + A3^4 - A3^2*A1^2))/(2*(A2^2 + A3^2));

q3 = atan(num3/den3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
C4 = ((M^2) + (N^2) - (2*M*D3) + (D3^2) - (D4^2) - (D5^2))/(2*D4*D5) ;
S4 = sqrt(1 - (C4^2));
q4 = atan2(S4,C4);

salida = [q1 q2 q3 q4];

```

cons1 es la consigna 1
Instant es la base de tiempo
Tem es el tiempo de muestreo

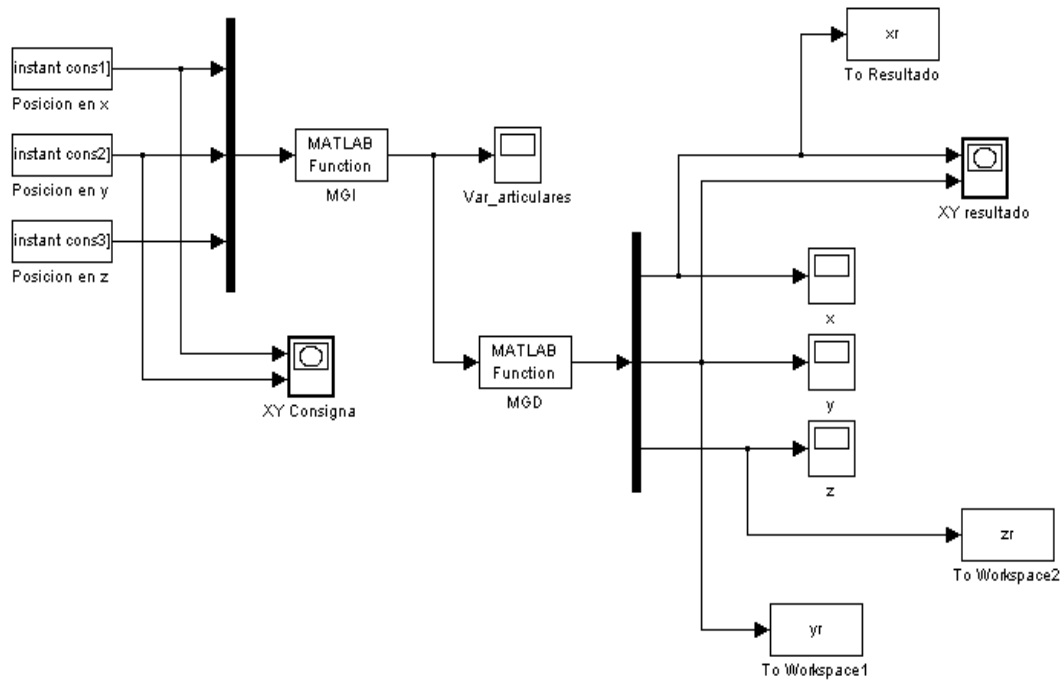


Figura A.1. Diagrama en Simulink para validar los modelos geométricos.

ANEXO B

REDUCCION DE LOS PARAMETROS ESTANDAR (PARAMETROS DE BASE)

Para obtener los parámetros mínimos de base, se utiliza el software SYMORO el cual arroja los siguientes resultados, que para el caso de estudio se modifican, eliminando aquellos valores del tensor de inercia que no se encuentran en la diagonal principal y el valor de MY1R que se elimina en el cálculo de la energía cinética, el resultado final se observa en la tabla (B.1).

```

(*****)
(** SYMORO+ : SYmbolic MOdelling of RObots **)
(**-----**)
(** IRCCyN-ECN - 1, rue de la Noe **)
(** B.P.92101 **)
(** 44321 Nantes cedex 3, FRANCE **)
(** www.irccyn.ec-nantes.fr **)
(*****)

Name of file : C:\Archivos de programa\IRCCyN\Symoro+\Robots\Scorbot ER5\Scorbot1base.ddm

Inertial parameters

j  XX  XY  XZ  YY  YZ  ZZ  MX  MY  MZ  M  Ia
1  0   0   0   0   0  ZZ1R  0  MY1R  0  0  0
2  XX2R  0  XZ2R  0   0  ZZ2R  MX2R  0   0  0  0
3  XX3R  0  XZ3R  0   0  ZZ3R  MX3R  MY3R  0  0  IA3
4  XX4R  XY4R  XZ4R  0  YZ4R  ZZ4R  MX4R  MY4R  0  0  IA4
5  0     0     0     0     0     0     0     0     0  0  0
    
```

j	XX_j	XY_j	XZ_j	YY_j	YZ_j	ZZ_j	MX_j	MY_j	MZ_j	M_j	I_{aj}
1	0	0	0	0	0	ZZR_1	0	MY_1	0	0	0
2	XXR_2	0	0	0	0	ZZR_2	MX_2	0	0	0	0
3	XXR_3	0	0	0	0	ZZR_3	MX_3	MY_3	0	0	I_3
4	XXR_4	0	0	0	0	ZZR_4	MX_4	MY_4	0	0	I_4
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla B.1. Parámetros inerciales de base simplificados del robot Scorbot-ER 5plus

ANEXO C

TRAYECTORIAS (TOMA DE DATOS)

Desde el momento en el que se comenzó el experimento o toma de datos, se han realizado 26 mediciones, obteniendo con el desarrollo de nuevos experimentos, mejoras en dichas trayectorias en cuanto al tiempo de muestreo. A continuación se grafican algunas de las secuencias enviadas para el proceso de estimación de los parámetros dinámicos.

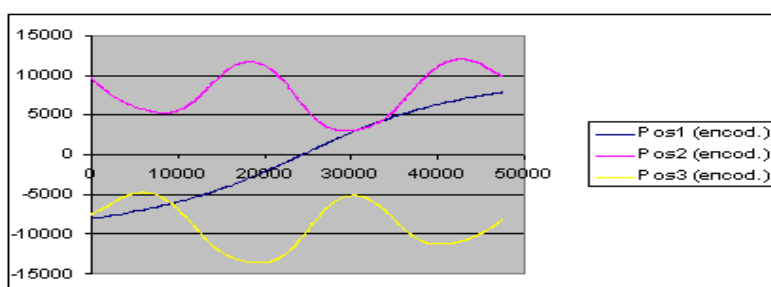


Figura C.1. Gráfica de Trayectorias 3

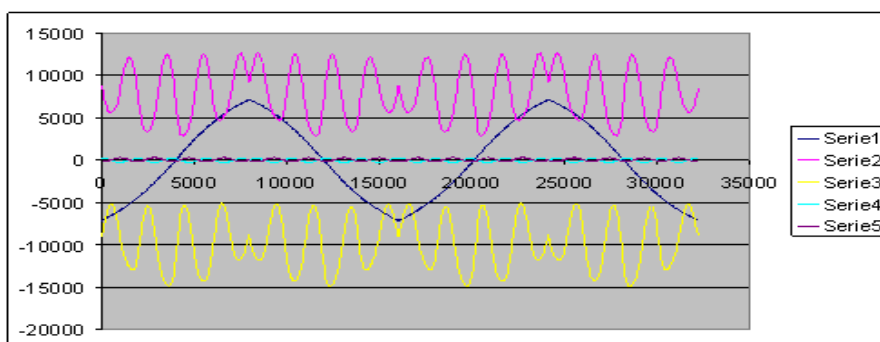


Figura C.2. Gráfica de Trayectorias 4

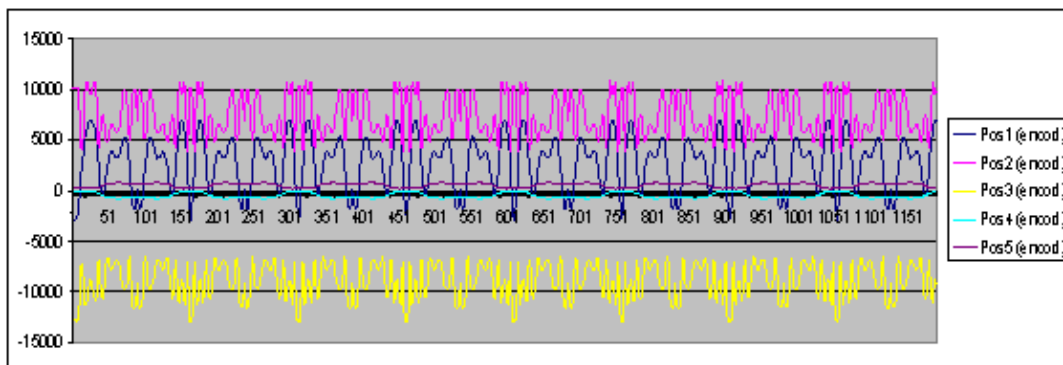


Figura C.3. Gráfica de Trayectorias 7

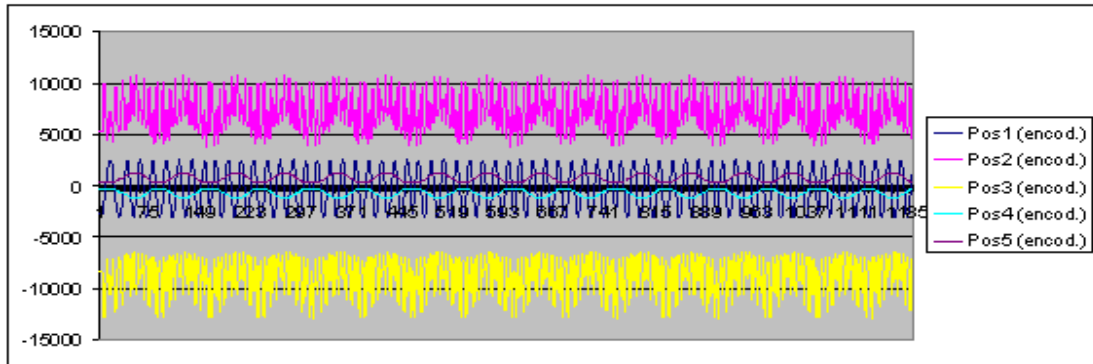


Figura C.4. Gráfica de trayectorias 10

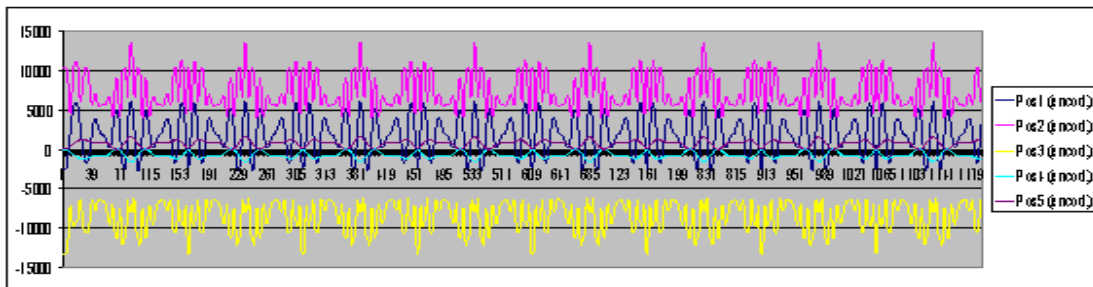


Figura C.5. Gráfica de trayectorias 15

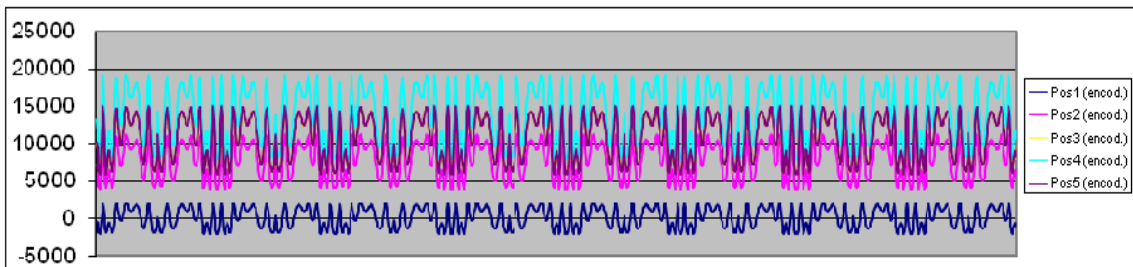


Figura C.6. Gráfica de trayectorias 20

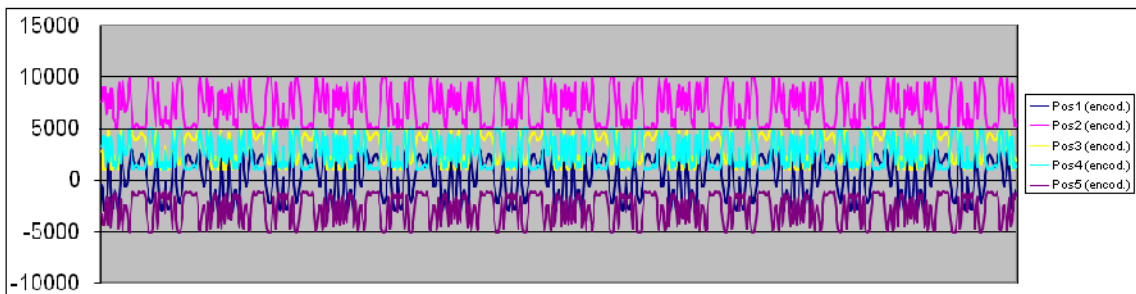


Figura C.7. Gráfica de trayectorias 21

ANEXO D

PROGRAMA DE IDENTIFICACION

Para el experimento se utilizo la herramienta Matlab 7.0, en la cual se edita el programa de identificación con el método de mínimos cuadrados ordinarios. Inicialmente se cargan los valores de los datos medidos: voltajes (DACs) y posiciones (ENCODERS) (Anexo C), a partir de los voltajes medidos se obtienen los pares medidos para cada articulación. De las posiciones, se consiguen las velocidades y aceleraciones requeridas para formar la matriz de observación. El método de mínimos cuadrados requiere tener dicha matriz y el vector de pares medidos para encontrar los parámetros del sistema. Una vez obtenidos se encuentran los pares deseados y de la diferencia entre estos y los pares medidos se obtiene el vector de error residual para encontrar así, la desviación estándar relativa para cada parámetro, que traduce que tanto se encuentran alejados los valores encontrados de la media y nos indica además una medida de la calidad de la estimación.

```
%-----  
%IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS DINAMICOS DE UN ROBOT SERIE SCORBOT R-5 DE  
CINCO GRADOS DE LIBERTAD:  
%SE MODELAN 4 DE LOS 5 GRADOS.  
%Estudiantes: Alexander Constaín Daza  
%           Karoll Viviana Torres Pérez  
%Director:   Oscar Andrés Vivas Albán  
%-----  
  
%-----  
%Inicialización del ambiente MATLAB  
%-----  
  
    close all;% Cierre de todas las ventanas  
    clear all;% Destrucción de todas las variables locales  
  
    tm=0.125; % Fijación del tiempo de muestreo  
  
%-----  
%CARGA DEL ARCHIVO DE MEDIDAS  
%-----  
%AA  
  
    load med22; %CAMBIAR A POR UNA TRAYECTORIA medX.mat  
    medidas=med22;  
        % Cargar archivo con un vector de 8000 filas y 1 columna:  
        % 4 vectores de posiciones articulares, 4 vectores con  
        % pares de motores (voltajes)  
  
%-----  
% Carga de las posiciones articulares:  
%-----  
  
q1 = medidas(1:1000); %rads  
q2 = medidas(1001:2000);  
q3 = medidas(2001:3000);
```

```

q4 = medidas(3001:4000);

%-----
% Carga de las pares articulares:
%-----

cm1 = medidas(4001:5000);%voltios
cm2 = medidas(5001:6000);
cm3 = medidas(6001:7000);
cm4 = medidas(7001:8000);

lmq=length(q1);%longitud máxima de lmq igual a 1000, sin importar que contenga q1

%-----
% Eliminación de los efectos de borde (50 puntos son eliminados al inicio y al final de la trayectoria):
%-----

nbord=51;
nbon=(nbord:lmq-(nbord-1));%(desde 51 hasta 950)
lmq=length(nbon);%longitud máxima de lmq sin importar q contenga igual a 900
theta=zeros(lmq,1); %matriz de ceros de 900 filas x 1 columna

%toma los datos de medidas.m para cada articulación
%(posición, voltaje)iniciando en el dato No.51

q1a = q1(nbon);%Posiciones de las articulaciones
q2a = q2(nbon);
q3a = q3(nbon);
q4a = q4(nbon);

cm1a = cm1(nbon);%Voltajes de las articulaciones
cm2a = cm2(nbon);
cm3a = cm3(nbon);
cm4a = cm4(nbon);

%-----
% Los valores de voltajes medidos se convierten a pares en los accionadores
%-----

cm11 = cm1a*0.1;
cm22 = cm2a*0.1;
cm33 = cm3a*0.1;
cm44 = cm4a*0.1;

%-----
%Velocidades y aceleraciones para cada articulación
%-----

%.....
%Articulación 1
%.....

v1 = diffcent(q1a,tm); %velocidad 1
a1 = diffcent(v1,tm); %aceleración 1

%.....
%Articulación 2
%.....

```

```

v2 = diffcent(q2a,tm); %velocidad 2
a2 = diffcent(v2,tm); %aceleración 2

%.....
%Articulación 3
%.....

v3 = diffcent(q3a,tm); %velocidad 3
a3 = diffcent(v3,tm); %aceleración 3

%.....
%Articulación 4
%.....

v4 = diffcent(q4a,tm); %velocidad 4
a4 = diffcent(v4,tm); %aceleración 4

%-----
%Resumen de las pares:
%-----

acm = [cm11; cm22; cm33; cm44]; %vector columna

%-----
% Calculo de la MATRIZ DE OBSERVACION:
% Y = W * X
% 14 parámetros a estimar:
%X = [XXR2 XXR3 XXR4 ZZR1 ZZR2 ZZR3 ZZR4 MX2 MX3 MY3 MX4 MY4 Ia3 Ia4];
%Parámetros a identificar: tensores de inercias, primer momento de inercia, inercia
%del accionador:
%-----

G = 9.81;%Gravedad +/-

%-----
%Funciones Trigonómicas
%-----

s2=sin(q2a);
c2=cos(q2a);

s3=sin(q3a);
c3=cos(q3a);

s4=sin(q4a);
c4=cos(q4a);

s23=(s2.*c3)+(c2.*s3);
c23=(c2.*c3)-(s2.*s3);

s34=(s3.*c4)+(s4.*c3);
c34=(c3.*c4)-(s3.*s4);

s234=(s23.*c4)+(s4.*c23);
c234=(c23.*c4)-(s23.*s4);

%Distancias entre

```

```
D3=0.22;%(art2 y art3)
D4=0.22;%(art3 y art4)
```

```
% _____ MATRIZ DE OBSERVACION 4 DOF 14 PARÁMETROS: _____
```

```
%Tensor de inercia XXR2:
```

```
pa1a = (s2.^2).*a1;
pa1b = theta;
pa1c = theta;
pa1d = theta;
col1 = [pa1a; pa1b; pa1c; pa1d];%Columna 1 de la matriz de observación W
```

```
%Tensor de inercia XXR3:
```

```
pa2a = (s23.^2).*a1;
pa2b = theta;
pa2c = theta;
pa2d = theta;
col2 = [pa2a; pa2b; pa2c; pa2d];%Columna 2 de la matriz de observación W
```

```
%Tensor de inercia XXR4:
```

```
pa3a = (s234.^2).*a1;
pa3b = theta;
pa3c = theta;
pa3d = theta;
col3 = [pa3a; pa3b; pa3c; pa3d];%Columna 3 de la matriz de observación W
```

```
%Tensor de inercia ZZR1:
```

```
pa4a = a1;
pa4b = theta;
pa4c = theta;
pa4d = theta;
col4 = [pa4a; pa4b; pa4c; pa4d];%Columna 4 de la matriz de observación W
```

```
%Tensor de inercia ZZR2:
```

```
pa5a = theta;
pa5b = a2;
pa5c = theta;
pa5d = theta;
col5 = [pa5a; pa5b; pa5c; pa5d];%Columna 5 de la matriz de observación W
```

```
%Tensor de inercia ZZR3:
```

```
pa6a = theta;
pa6b = a2+a3;
pa6c = a2+a3;
pa6d = theta;
col6 = [pa6a; pa6b; pa6c; pa6d];%Columna 6 de la matriz de observación W
```

```
%Tensor de inercia ZZR4:
```

```
pa7a = theta;
pa7b = a2+a3+a4;
pa7c = a2+a3+a4;
pa7d = a2+a3+a4;
col7 = [pa7a; pa7b; pa7c; pa7d];%Columna 7 de la matriz de observación W
```

```

%Primer momento MXR2:
pa8a = theta;
pa8b = c2.*G;
pa8c = theta;
pa8d = theta;
col8 = [pa8a; pa8b; pa8c; pa8d];%Columna 8 de la matriz de observación W

%Primer momento MXR3:
pa9a = 2*c2.*c23.*D3.*a1;
pa9b = (2*c3.*D3.*a2) + (c3.*D3.*a3) + (c23.*G);
pa9c = (c3.*D3.*a2) + (c23.*G);
pa9d = theta;
col9 = [pa9a; pa9b; pa9c; pa9d];%Columna 9 de la matriz de observación W

%Primer momento MYR3:
pa10a = -2*c2.*s23.*D3.*a1;
pa10b = (-2*s3.*D3.*a2) - (s3.*D3.*a3) - (s23.*G);
pa10c = (-s3.*D3.*a2) - (s23.*G);
pa10d = theta;
col10 = [pa10a; pa10b; pa10c; pa10d];%Columna 10 de la matriz de observación W

%Primer momento MXR4:
pa11a = (2*D3.*c2.*c234.*a1) + (2*D4.*c23.*c234.*a1);
pa11b = (2*D3.*c34.*a2) + (2*D4.*c4.*a2) + (D3.*c34.*a3) + (2*D4.*c4.*a3) + (D3.*c34.*a4) +
(D4.*c4.*a4)+(c234.*G);
pa11c = (D3.*c34.*a2) + (2*D4.*c4.*a2) + (2*D4.*c4.*a3) + (D4.*c4.*a4) + (c234.*G);
pa11d = (D3.*c34.*a2) + (D4.*c4.*a2) + (D4.*c4.*a3) + (c234.*G);
col11 = [pa11a; pa11b; pa11c; pa11d];%Columna 11 de la matriz de observación W

%Primer momento MYR4:
pa12a = (-2*D3.*c2.*s234.*a1) - (2*D4.*c23.*s234.*a1);
pa12b = (-2*D3.*s34.*a2) - (2*D4.*s4.*a2) - (D3.*s34.*a3) - (2*D4.*s4.*a3) - (D3.*s34.*a4) - (D4.*s4.*a4)
- (s234.*G);
pa12c = (-D3.*s34.*a2) - (2*D4.*s4.*a2) - (2*D4.*s4.*a3) - (D4.*s4.*a4) - (s234.*G);
pa12d = (-D3.*s34.*a2) - (D4.*s4.*a2) - (D4.*s4.*a3) - (s234.*G);
col12 = [pa12a; pa12b; pa12c; pa12d];%Columna 12 de la matriz de observación W

%Inercia del rotor la3:%
pa13a = theta;
pa13b = theta;
pa13c = a3;
pa13d = theta;
col13 = [pa13a; pa13b; pa13c; pa13d];%Columna 13 de la matriz de observación W

%Inercia del rotor la4:
pa14a = theta;
pa14b = theta;
pa14c = theta;
pa14d = a4;
col14 = [pa14a; pa14b; pa14c; pa14d]; %Columna 14 de la matriz de observación W

%_____FIN NEW MATRIZ DE OBSERVACIÓN_____

%-----
%MATRIZ DE OBSERVACION

```

```

%-----
%tensores de inercia, primer momento de inercia, masas, inercia del accionador (rotor)
%conformando la matriz de observación:

w1t = [col1 col2 col3 col4 col5 col6 col7 col8 col9 col10 col11 col12 col13 col14];

%-----
% Vector de medidas de la ecuación 1 y regresor:
%-----

y = acm(:); % toma el valor de todos los datos de los pares en un solo vector de 3600x1
w = w1t(:,1:14); %reorganizar en forma ordenada la matriz de observación w1t (de la columna 1 a la
14 de izquierda a derecha)
neq = length(y);%calcular la longitud del vector "y" para determinar el !número total de ecuaciones!
np = rank(w); %Rango de la matriz de observación w: Estimar el número de filas o columnas
linealmente independientes.
    %!numero de parámetros mínimos!

%-----
% Visualización del número total de datos de pares x 4 articulaciones:
% 901 datos de pares por cada articulación.
% -----

    disp(' ');
    disp(['Numero de muestras : ',nu2stab(neq)]);

%-----
%ESTIMACION DE PARAMETROS UTILIZANDO LA TECNICA DE MINIMOS CUADRADOS
%ORDINARIOS
%-----

x = w\y; %seudoinversa de w : 'x=parámetros estimados; w= matriz de observación de 14 columnas; y=
%pares experimentales
    %organizadas. Esta ecuación resuelve el modelo de identificación Y=WX+r por el método
    %de los mínimos cuadrados (r=vector de error residual)

r = y - w*x; %despejando el error residual 'para obtener su minimización'
normr = norm(r); %cálculo de la norma del error residual
normy=norm(y); %cálculo de la norma del vector de pares
sr = normr/sqrt(neq-np); %DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ERROR (neq: número de ecuaciones; np:
%número de parámetros o incógnitas)
trans= (w')*w;
sx1= (sr^2).*(inv(trans)); %matriz de varianza-Covarianza = Varianza *inv(w'*w)
sx=sqrt(diag(sx1)); %Desviación estándar del vector de parámetros estimado

sxr = 100*(sx./abs(x)); %desviación estándar relativa para cada parámetro: criterio para medir la
%calidad
    %del valor de un parámetro identificado

y_Estimado = w*x;%Vector de pares calculadas con los parámetros estimados,
    %utilizado para comparar con las reales (validación cruzada)

%-----
% Parámetros a identificar:
%-----

xpar=['XXR2';'XXR3';'XXR4';'ZZR1';'ZZR2';'ZZR3';'ZZR4';'MXR2';'MXR3';'MYR3';'MXR4';'MYR4';'Ia3';'Ia4']

%-----

```



```

% Visualizar los parámetros:
%-----

ir = [1:neq];%vector de 1 hasta el número de ecuaciones [1 2 3 ... 3600]
jr = [1:np]; %vector de 1 hasta el número de parámetros [1 2 3 ... 14]

disp(' ');
disp('Identificación Scorbot-ER 5plus');
disp(' ');
disp('Mínimos cuadrados');
disp(' ');
disp('-----');
disp('param      x      %sigxr');

prom=0;%para promedio de desviaciones estándar

for ipar = 1:np,
    res = [ xpar(jr(ipar),:),' ',...
           nu2stab(x(ipar)),' ',...
           nu2stab(sxr(ipar))];
    disp(res);

    prom=prom+sxr(ipar);%ir sumando todas las desviaciones estándar
end;

disp(' ');

prom=prom/14%mostrar el promedio de las desviaciones estándar
condición= cond(w)

disp(' ');

disp(['Numero de ecuaciones      : ',nu2stab(neq)]);
disp(['Norma del residuo         : ',nu2stab(normr)]);
disp(['Norma relativa del residuo : ',nu2stab(normr/normy)]);
disp(['Desviación estándar       : ',nu2stab(100*sr/normy),'%']);
disp(['Error relativo máximo     : ',nu2stab(max(abs(r./normy)))]);

close all;

```

El programa anterior editado en Matlab, arroja la lista de los parámetros y sus respectivos valores, así como la desviación estándar relativa para cada uno de ellos. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos durante el proceso de estimación para algunos de los movimientos (figura D.1).

Trayectoria 5			Trayectoria 13		
Identificación Scorbobot-ER 5plus			Identificación Scorbobot-ER 5plus		
Minimos cuadrados			Minimos cuadrados		
param	x	%sigxr	param	x	%sigxr
XXR2	-0.7916	24.9258	XXR2	0.2371	120.7197
XXR3	-1.5328	21.6273	XXR3	0.0080	5721.8114
XXR4	1.1980	26.7981	XXR4	0.0131	4148.1547
ZZR1	0.2884	49.7244	ZZR1	-0.2911	92.9976
ZZR2	-0.2146	8.3686	ZZR2	-0.3010	8.7381
ZZR3	-0.1304	53.4804	ZZR3	-0.1117	73.4112
ZZR4	-0.0491	128.8051	ZZR4	-0.0107	643.8555
MXR2	-0.0167	53.5820	MXR2	-0.0363	14.7794
MXR3	-0.0232	43.9595	MXR3	-0.0083	81.2583
MYR3	0.0039	353.3405	MYR3	0.0020	419.0533
MXR4	-0.0061	175.0571	MXR4	-0.0023	309.2407
MYR4	0.0044	308.8529	MYR4	-0.0015	442.5337
Ia3	-0.1613	10.4193	Ia3	-0.2745	9.7010
Ia4	2.4488	251.1764	Ia4	0.4232	224.7928
prom =			prom =		
107.8655			879.3605		
condicion =			condicion =		
2.0345e+003			671.8114		

Trayectoria 21			Trayectoria 23		
Identificación Scorbobot-ER 5plus			Identificación Scorbobot-ER 5plus		
Minimos cuadrados			Minimos cuadrados		
param	x	%sigxr	param	x	%sigxr
XXR2	0.1310	45.9791	XXR2	-0.1585	27.4640
XXR3	-0.1032	46.6179	XXR3	-0.0362	77.6760
XXR4	-0.0595	72.6614	XXR4	0.0066	405.7302
ZZR1	0.1211	42.9033	ZZR1	0.1471	21.7166
ZZR2	0.0834	12.7127	ZZR2	0.0905	19.3133
ZZR3	0.0192	80.2495	ZZR3	0.0040	283.5036
ZZR4	-0.0127	57.7512	ZZR4	0.0012	588.8936
MXR2	0.0449	17.7917	MXR2	0.0386	14.2628
MXR3	-0.0075	115.2382	MXR3	-0.0097	80.6682
MYR3	-0.0029	296.6371	MYR3	0.0075	101.9022
MXR4	0.0127	47.2010	MXR4	0.0029	201.3372
MYR4	-0.0062	96.6264	MYR4	0.0017	285.1979
Ia3	0.1062	19.0941	Ia3	0.0598	16.6404
Ia4	0.1408	10.8374	Ia4	0.0328	106.2174
prom =			prom =		
68.7358			159.3231		
condicion =			condicion =		
46.6677			31.3535		

Tabla D.1. Resultados del programa de Identificación

ANEXO E

PROGRAMA CONCATENACION

El programa de concatenación se realiza en Matlab 7.0, en el cual se unen diversas trayectorias. Después de crear el nuevo movimiento, se realiza el mismo proceso del anexo anterior, con el fin de obtener mejores resultados de estimación en relación a la desviación estándar. Se prueban diversos experimentos de concatenación de 2, 3, 4, 5 y 10 trayectorias con variada combinación de las mismas. Cabe resaltar que entre más trayectorias se utilicen en la concatenación, mejor serán los resultados, debido a que se cuenta con mayor información del sistema estudiado.

A continuación se presenta el archivo de concatenación para 2 trayectorias en las que se unen los elementos de las matrices de observación y vectores de pares medidos de los experimentos de identificación independientes, almacenados en variables que posteriormente son llamadas en el programa de concatenación. Es importante tener en cuenta, que los archivos de concatenación para mayor número de movimientos tienen como diferencia, mayor número de variables.

```
%-----  
%PROGRAMA DE CONCATENACION PARA LAS TRAYECTORIAS A y B DEL ROBOT  
%SCORBOT ER-5 PLUS  
%-----  
  
%-----  
%Trayectoria a (TRAY A):  
%-----  
  
load a1;% pa1a;XXR2  
load a2;% pa2a;XXR3  
load a3;% pa3a;XXR4  
load a4;% pa4a;ZZR1  
load a5;% pa5b;ZZR2  
  
load a6;% pa6b;ZZR3  
load a7;% pa6c;  
  
load a8;% pa7b;ZZR4  
load a9;% pa7c;  
load a10;%pa7d;  
  
load a11;% pa8b;MXR2  
  
load a12;% pa9a;MXR3  
load a13;% pa9b;  
load a14;% pa9c;  
  
load a15;% pa10a;MYR3  
load a16;% pa10b;  
load a17;% pa10c;
```

load a18;% pa11a;MXR4
load a19;% pa11b;
load a20;% pa11c;
load a21;% pa11d;

load a22;% pa12a;MYR4
load a23;% pa12b;
load a24;% pa12c;
load a25;% pa12d;

load a26;% pa13c;la3

load a27;% pa14d;la4

load a28;% cm11
load a29;% cm22
load a30;% cm33
load a31;% cm44

%-----
%Trayectoria a (TRAY B):
%-----

load b1;% pa1ab;XXR2
load b2;% pa2ab;XXR3
load b3;% pa3ab;XXR4
load b4;% pa4ab;ZZR1
load b5;% pa5bb;ZZR2

load b6;% pa6bb;ZZR3
load b7;% pa6cb;

load b8;% pa7bb;ZZR4
load b9;% pa7cb;
load b10;%pa7db;

load b11;% pa8bb;MXR2

load b12;% pa9ab;MXR3
load b13;% pa9bb;
load b14;% pa9cb;

load b15;% pa10ab;MYR3
load b16;% pa10bb;
load b17;% pa10cb;

load b18;% pa11ab;MXR4
load b19;% pa11bb;
load b20;% pa11cb;
load b21;% pa11db;

load b22;% pa12ab;MYR4
load b23;% pa12bb;
load b24;% pa12cb;
load b25;% pa12db;

load b26;% pa13cb;la3

load b27;% pa14db;la4

```

load b28;% cm11
load b29;% cm22
load b30;% cm33
load b31;% cm44

theta=zeros(900,1);

%-----
%Creación de la matriz de observación por columnas
%-----

e1 = [pa1a;pa1ab;theta;theta;theta;theta;theta;theta];%Tensor de inercia XXR2
e2 = [pa2a;pa2ab;theta;theta;theta;theta;theta;theta];%Tensor de inercia XXR3
e3 = [pa3a;pa3ab;theta;theta;theta;theta;theta;theta];%Tensor de inercia XXR4

e4 = [pa4a;pa4ab;theta;theta;theta;theta;theta;theta];%Tensor de inercia ZZR1
e5 = [theta;theta;pa5b;pa5bb;theta;theta;theta;theta];%Tensor de inercia ZZR2
e6 = [theta;theta;pa6b;pa6bb;pa6c;pa6cb;theta;theta];%Tensor de inercia ZZR3
e7 = [theta;theta;pa7b;pa7bb;pa7c;pa7cb;pa7d;pa7db];%Tensor de inercia ZZR4

e8 = [theta;theta;pa8b;pa8bb;theta;theta;theta;theta];%Primer momento de inercia MXR2
e9 = [pa9a;pa9ab;pa9b;pa9bb;pa9c;pa9cb;theta;theta];%Primer momento de inercia MXR3
e10 = [pa10a;pa10ab;pa10b;pa10bb;pa10c;pa10cb;theta;theta];%Primer momento de inercia MYR3
e11 = [pa11a;pa11ab;pa11b;pa11bb;pa11c;pa11cb;pa11d;pa11db];%Primer momento de inercia MX4
e12 = [pa12a;pa12ab;pa12b;pa12bb;pa12c;pa12cb;pa12d;pa12db];%Primer momento de inercia MYR4

e13 = [theta;theta;theta;theta;pa13c;pa13cb;theta;theta];%Momento de inercia del accionador la3
e14 = [theta;theta;theta;theta;theta;theta;pa14d;pa14db];%Momento de inercia del accionador la4

%-----
%MATRIZ DE OBSERVACION
%-----

WT = [e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8 e9 e10 e11 e12 e13 e14];

%-----
%Vector columna que organiza todos los datos de pares para cada
%articulación y cada trayectoria
%-----

GT = [cm11;cm11b;cm22;cm22b;cm33;cm33b;cm44;cm44b];
%GT = [cmga1;cmga1b;cmga2;cmga2b;cmga3;cmga3b;cmga4;cmga4b;cmga5;cmga5b];
%GT =
[cmga1;cmga1b;cmga1c;cmga1d;cmga1e;cmga2;cmga2b;cmga2c;cmga2d;cmga2e;cmga3;cmga3b;cmga
3c;cmga3d;cmga3e;cmga4;cmga4b;cmga4c;cmga4d;cmga4e;cmga5;cmga5b;cmga5c;cmga5d;cmga5e];

...continua procedimiento anexo D

```

Los mejores resultados obtenidos del anterior experimento se pueden observar en las siguientes figuras.

Concatenación 20-21-23-25			Concatenación 25-21-23-21-25		
Identificación Scorbob-ER 5plus			Identificación Scorbob-ER 5plus		
Minimos cuadrados			Minimos cuadrados		
param	x	%sigxr	param	x	%sigxr
XXR2	-0.0193	126.2547	XXR2	0.0165	126.7798
XXR3	-0.0233	76.4159	XXR3	-0.0299	53.6880
XXR4	-0.0108	132.4218	XXR4	-0.0354	34.5632
ZZR1	0.1120	16.7439	ZZR1	0.1141	14.5001
ZZR2	0.0907	7.3868	ZZR2	0.0879	6.3262
ZZR3	0.0107	65.1805	ZZR3	0.0095	65.3650
ZZR4	-0.0065	54.8026	ZZR4	-0.0059	51.0877
MXR2	0.0402	7.2144	MXR2	0.0432	6.6333
MXR3	-0.0121	29.8982	MXR3	-0.0077	43.1474
MYR3	0.0045	74.5525	MYR3	0.0053	59.9361
MXR4	0.0071	35.2919	MXR4	0.0081	28.8261
MYR4	-0.0037	67.7072	MYR4	-0.0045	53.0618
Ia3	0.0714	11.0837	Ia3	0.0812	9.3081
Ia4	0.1165	6.8800	Ia4	0.1181	5.4615
prom =			prom =		
159.3231			39.9060		
condicion =			condicion =		
33.5995			31.2088		

Concatenación 23-21-25-23-25-21-20-23-21-23			Concatenación 20-21-25-23-25-21-20-21-25-21		
Identificación Scorbob-ER 5plus			Identificación Scorbob-ER 5plus		
Minimos cuadrados			Minimos cuadrados		
param	x	%sigxr	param	x	%sigxr
XXR2	-0.0314	47.1463	XXR2	0.0393	41.3166
XXR3	-0.0321	33.2469	XXR3	-0.0303	41.4353
XXR4	-0.0163	55.4741	XXR4	-0.0372	25.2726
ZZR1	0.1228	9.2915	ZZR1	0.1097	11.8313
ZZR2	0.0884	4.5755	ZZR2	0.0887	4.4723
ZZR3	0.0090	46.5362	ZZR3	0.0131	35.3439
ZZR4	-0.0058	37.8358	ZZR4	-0.0081	27.4997
MXR2	0.0404	4.7711	MXR2	0.0416	4.7268
MXR3	-0.0113	20.9300	MXR3	-0.0096	24.5342
MYR3	0.0028	79.7971	MYR3	0.0043	51.0884
MXR4	0.0084	19.6456	MXR4	0.0080	20.2386
MYR4	-0.0031	52.8794	MYR4	-0.0047	34.9295
Ia3	0.0693	6.3380	Ia3	0.0875	6.9414
Ia4	0.1178	4.2690	Ia4	0.1233	3.8671
prom =			prom =		
30.1955			23.8213		
condicion =			condicion =		
31.4542			35.4386		

Tabla E.1. Concatenación para diferentes tipos de trayectorias

Otra forma de concatenar trayectorias es unirlas antes de realizar el proceso de identificación. A continuación se muestra el código en el cual se unen los movimientos antes de ejecutarse el programa de identificación (Anexo D).

```

%-----
%PROGRAMA DE CONCATENACION PARA DIEZ TRAYECTORIAS DEL ROBOT SERIE SCORBOT-
%ER 5PLUS:
%SE CONCATENAN ANTES DE LA IDENTIFICACION

%Director: Ing. Oscar Andrés Vivas
%Estudiantes: Alexander Constain Daza
%           Karoll Viviana Torres Pérez
%-----

%-----
%Inicialización del ambiente MATLAB
% -----

        close all;% Cierre de todas las ventanas
        clear all;% Destrucción de todas las variables locales

        tm=0.125; % Fijación del tiempo de muestreo

%-----
%CARGA DEL ARCHIVO DE MEDIDAS
%-----

        load med1;
        medidas1=med11;
        load med22;
        medidas2=med22;
        load med44;
        medidas3=med44;
        load med66;
        medidas4=med66;

%-----
% Inicializaciones
% -----

        w=[];
        y=[];

%-----
% Carga de las posiciones articulares para la trayectoria1:
%-----

q11 = medidas1(1:1000); %rads
q21 = medidas1(1001:2000);
q31 = medidas1(2001:3000);
q41 = medidas1(3001:4000);

%-----
% Carga de las pares articulares para la trayectoria1:
%-----

cm11 = medidas1(4001:5000);
cm21 = medidas1(5001:6000);
cm31 = medidas1(6001:7000);
cm41 = medidas1(7001:8000);

```

```
%-----  
% Carga de las posiciones articulares para la trayectoria2:  
%-----  
  
q12 = medidas2(1:1000); %rads  
q22 = medidas2(1001:2000);  
q32 = medidas2(2001:3000);  
q42 = medidas2(3001:4000);  
  
%-----  
% Carga de las pares articulares para la trayectoria2:  
%-----  
  
cm12 = medidas2(4001:5000);  
cm22 = medidas2(5001:6000);  
cm32 = medidas2(6001:7000);  
cm42 = medidas2(7001:8000);  
  
%-----  
% Carga de las posiciones articulares para la trayectoria4:  
%-----  
  
q13 = medidas3(1:1000); %rads  
q23 = medidas3(1001:2000);  
q33 = medidas3(2001:3000);  
q43 = medidas3(3001:4000);  
  
%-----  
% Carga de las pares articulares para la trayectoria4:  
%-----  
  
cm13 = medidas3(4001:5000);  
cm23 = medidas3(5001:6000);  
cm33 = medidas3(6001:7000);  
cm43 = medidas3(7001:8000);  
  
%-----  
% Carga de las posiciones articulares para la trayectoria6:  
%-----  
  
q14 = medidas4(1:1000); %rads  
q24 = medidas4(1001:2000);  
q34 = medidas4(2001:3000);  
q44 = medidas4(3001:4000);  
  
%-----  
% Carga de las pares articulares para la trayectoria6:  
%-----  
  
cm14 = medidas4(4001:5000);  
cm24 = medidas4(5001:6000);  
cm34 = medidas4(6001:7000);  
cm44 = medidas4(7001:8000);  
  
lmq=length(q11);%longitud máxima de lmq igual a 1000, sin importar que contenga q1  
  
%-----  
% Eliminación de los efectos de borde (50 puntos son eliminados al inicio y al final de la trayectoria):  
%-----
```



```

nbord=51;
nbon=(nbord:lmq-(nbord-1));%(desde 51 hasta 950)
lmq=length(nbon);%longitud máxima de nmf sin importar q contenga igual a 900
theta=zeros((lmq*10),1); %matriz de ceros de 900 filas x 1 columna

%toma los datos de medidas.m para cada articulación (posición, voltaje)iniciando en el dato No.50

%-----
q1a1 = q11(nbon);%Posiciones de las articulaciones para la trayectoria1
q2a1 = q21(nbon);
q3a1 = q31(nbon);
q4a1 = q41(nbon);

cm1a1 = cm11(nbon);%Voltajes de las articulaciones para la trayectoria1
cm2a1 = cm21(nbon);
cm3a1 = cm31(nbon);
cm4a1 = cm41(nbon);

%-----
q1a2 = q12(nbon);%Posiciones de las articulaciones para la trayectoria2
q2a2 = q22(nbon);
q3a2 = q32(nbon);
q4a2 = q42(nbon);

cm1a2 = cm12(nbon);%Voltajes de las articulaciones para la trayectoria2
cm2a2 = cm22(nbon);
cm3a2 = cm32(nbon);
cm4a2 = cm42(nbon);

%-----
q1a3 = q13(nbon);%Posiciones de las articulaciones para la trayectoria4
q2a3 = q23(nbon);
q3a3 = q33(nbon);
q4a3 = q43(nbon);

cm1a3 = cm13(nbon);%Voltajes de las articulaciones para la trayectoria4
cm2a3 = cm23(nbon);
cm3a3 = cm33(nbon);
cm4a3 = cm43(nbon);

%-----
q1a4 = q14(nbon);%Posiciones de las articulaciones para la trayectoria6
q2a4 = q24(nbon);
q3a4 = q34(nbon);
q4a4 = q44(nbon);

cm1a4 = cm14(nbon);%Voltajes de las articulaciones para la trayectoria6
cm2a4 = cm24(nbon);
cm3a4 = cm34(nbon);
cm4a4 = cm44(nbon);

%-----
%SE CONCATENAN LAS TRAYECTORIAS PARA FORMAR
% UNA NUEVA, PERO CON 9000 DATOS
%Secuencia trayectorias: 20-21-25-23-25-21-20-21-25-21
%-----

%-----
%POSICIONES ARTICULARES
%-----

```

```

q1a = [q1a1; q1a2; q1a4; q1a3; q1a4; q1a2; q1a1; q1a2; q1a4; q1a2];
q2a = [q2a1; q2a2; q2a4; q2a3; q2a4; q2a2; q2a1; q2a2; q2a4; q2a2];
q3a = [q3a1; q3a2; q3a4; q3a3; q3a4; q3a2; q3a1; q3a2; q3a4; q3a2];
q4a = [q4a1; q4a2; q4a4; q4a3; q4a4; q4a2; q4a1; q4a2; q4a4; q4a2];

%-----
%PARES APLICADOS
%-----

cm1a = [cm1a1; cm1a2; cm1a4; cm1a3; cm1a4; cm1a2; cm1a1; cm1a2; cm1a4; cm1a2];
cm2a = [cm2a1; cm2a2; cm2a4; cm2a3; cm2a4; cm2a2; cm2a1; cm2a2; cm2a4; cm2a2];
cm3a = [cm3a1; cm3a2; cm3a4; cm3a3; cm3a4; cm3a2; cm3a1; cm3a2; cm3a4; cm3a2];
cm4a = [cm4a1; cm4a2; cm4a4; cm4a3; cm4a4; cm4a2; cm4a1; cm4a2; cm4a4; cm4a2];

%-----
% Los valores de voltajes medidos se convierten a pares en los accionadores
%-----

cm11 = cm1a*0.1;
cm22 = cm2a*0.1;
cm33 = cm3a*0.1;
cm44 = cm4a*0.1;

Se continúa con el programa de identificación del Anexo D...

```

Concatenación 20-21-25-23-25-21-20-21-25-21		
Identificación Scorbote-ER 5plus		
Minimos cuadrados		
param	x	%sigxr
XXR2	0.0399	40.6193
XXR3	-0.0297	42.1997
XXR4	-0.0368	25.5071
ZZR1	0.1092	11.8794
ZZR2	0.0870	4.5339
ZZR3	0.0143	31.9837
ZZR4	-0.0081	27.2100
MXR2	0.0417	4.7104
MXR3	-0.0091	25.7249
MYR3	0.0047	47.0171
MXR4	0.0076	21.3718
MYR4	-0.0045	37.0031
Ia3	0.0859	7.0066
Ia4	0.1209	3.8998
prom =		
23.6191		
condicion =		
35.4036		

Tabla E.2. Concatenación de trayectorias antes de la identificación

ANEXO F

MATRIZ DE OBSERVACION

La matriz de observación (regresor del robot), es utilizada en para la identificación de los parámetros dinámicos de Scorbot-ER 5plus y está compuesta por los elementos de la matriz de inercia, el vector de aceleraciones de las articulaciones y el vector de fuerzas de gravedad.

- **Primera fila** $S_{234}^2 C_3^2 \ddot{q}_1 - S_{234} C_5 S_5 (\ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 + \ddot{q}_4)$

$$w(1,1) = S_{234}^2 \ddot{q}_1$$

$$w(1,2) = S_{234}^2 \ddot{q}_1$$

$$w(1,3) = S_{234}^2 \ddot{q}_1$$

$$w(1,4) = \ddot{q}_1$$

$$w(1,5) = 0$$

$$w(1,6) = 0$$

$$w(1,7) = 0$$

$$w(1,8) = 0$$

$$w(1,9) = 2C_2 C_{23} D_3 \ddot{q}_1$$

$$w(1,10) = -2C_2 S_{23} D_3 \ddot{q}_1$$

$$w(1,11) = (2D_3 C_2 C_{234} \ddot{q}_1) - (2D_4 C_{23} C_{234} \ddot{q}_1)$$

$$w(1,12) = (-2D_3 C_2 S_{234} \ddot{q}_1) + (2D_4 C_{23} S_{234} \ddot{q}_1)$$

$$w(1,13) = 0$$

$$w(1,14) = 0$$

- **Segunda fila**

$$w(2,1) = 0$$

$$w(2,2) = 0$$

$$w(2,3) = 0$$

$$w(2,4) = 0$$

$$w(2,5) = \ddot{q}_2$$

$$w(2,6) = \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3$$

$$w(2,7) = \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 + \ddot{q}_4$$

$$w(2,8) = C_2 G$$

$$w(2,9) = (2C_3 D_3 \ddot{q}_2) + (C_3 D_3 \ddot{q}_3) + (C_{23} G)$$

$$w(2,10) = (-2S_3 D_3 \ddot{q}_2) - (S_3 D_3 \ddot{q}_3) - (S_{23} G)$$

$$w(2,11) = (2D_3 C_{34} \ddot{q}_2) + (2C_4 D_4 \ddot{q}_2) + (C_{34} D_3 \ddot{q}_3) + (2C_4 D_4 \ddot{q}_3) + (C_{34} D_3 \ddot{q}_4) + (C_4 D_4 \ddot{q}_4) + (C_{234} G)$$

$$w(2,12) = (-2D_3 S_{34} \ddot{q}_2) - (2S_4 D_4 \ddot{q}_2) - (S_{34} D_3 \ddot{q}_3) - (2S_4 D_4 \ddot{q}_3) - (S_{34} D_3 \ddot{q}_4) - (S_4 D_4 \ddot{q}_4) - (S_{234} G)$$

$$w(2,13) = 0$$

$$w(2,14) = 0$$

- **Tercera fila**

$$w(3,1) = 0$$

$$w(3,2) = 0$$

$$w(3,3) = 0$$

$$w(3,4) = 0$$

$$w(3,5) = 0$$

$$w(3,6) = \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3$$

$$w(3,7) = \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 + \ddot{q}_4$$

$$w(3,8) = 0$$

$$w(3,9) = C_3 D_3 \ddot{q}_2 + C_{23} G_3$$

$$w(3,10) = -S_3 D_3 \ddot{q}_2 - S_{23} G_3$$

$$w(3,11) = (D_3 C_{34} \ddot{q}_2) + (2C_4 D_4 \ddot{q}_2) + (2C_4 D_4 \ddot{q}_3) + (C_4 D_4 \ddot{q}_4) + (C_{234} G)$$

$$w(3,12) = (-D_3 S_{34} \ddot{q}_2) - (2S_4 D_4 \ddot{q}_2) - (2S_4 D_4 \ddot{q}_3) - (S_4 D_4 \ddot{q}_4) - (S_{234} G)$$

$$w(3,13) = \ddot{q}_3$$

$$w(3,14) = 0$$

- **Cuarta fila**

$$w(4,1) = 0$$

$$w(4,2) = 0$$

$$w(4,3) = 0$$

$$w(4,4) = 0$$

$$w(4,5) = 0$$

$$w(4,6) = 0$$

$$w(4,7) = \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 + \ddot{q}_4$$

$$w(4,8) = 0$$

$$w(4,9) = 0$$

$$w(4,10) = 0$$

$$w(4,11) = C_{34} D_3 \ddot{q}_2 + C_4 D_4 (\ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) + C_{234} G_3$$

$$w(4,12) = -S_{34} D_3 \ddot{q}_2 - S_4 D_4 (\ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) - S_{234} G_3$$

$$w(4,13) = 0$$

$$w(4,14) = \ddot{q}_4$$

ANEXO G

VALIDACION CRUZADA DEL PROGRAMA DE IDENTIFICACION DEL ROBOT SCORBOT-ER 5PLUS

Es necesario corroborar que la identificación que se ha hecho del robot Scrobot-ER 5plus es satisfactoria en cuanto a seguimiento de trayectoria se refiere, para esto se obtiene del programa de concatenación el vector de parámetros X, adicionalmente se edita el siguiente código con el fin de utilizar dicho vector para estimar los pares de una nueva trayectoria Y, y compararlos en seguimiento de línea con los pares reales. El producto de este experimento se muestra en una grafica G.1, donde se valida tabla de parámetros geométricos obtenida del programa del anexo E, comparando el vector de pares de la trayectoria 21 con su estimado. El proceso de validación además de realizarse para la trayectoria 21, se ejecuta para 20, 23 y 25.

```
%-----  
%VALIDACION DE LA IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS DINAMICOS DE UN ROBOT SERIE  
SCORBOT R-5 DE CINCO  
%GRADOS DE LIBERTAD:  
  
%VALIDACION CRUZADA.  
%Con la identificación del mejor resultado de concatenación, se obtuvo el  
%vector de parámetros estimados 'xa', ahora se utiliza dicho vector para  
%encontrar las pares estimadas para una nueva trayectoria que se  
%compararán con la trayectoria real. De esta manera se corroboran que tan  
%buenos son los parámetros identificados esperando que la grafica de pares  
%estimadas sea lo más parecida posible a la grafica de pares real.  
  
%Director: Ing. Oscar Andrés Vivas  
%Estudiantes: Alexander Constain Daza  
%           Karoll Viviana Torres Perez  
%-----  
  
%-----  
%Inicialización del ambiente MATLAB  
%-----  
  
    close all;% Cierre de todas las ventanas  
    clear all;% Destrucción de todas las variables locales  
  
    tm=0.125;% Fijación del tiempo de muestreo  
  
%-----  
%CARGA DEL NUEVO ARCHIVO DE MEDIDAS PARA LA VALIDACIÓN  
%-----  
  
    load xa;           %Carga el vector de parámetros estimados de la concatenación  
    x=xa;
```

```

load med1;
medidas2=med1;
    %Cargar archivo con un vector de 8000 filas y 1 columna:
    %4 vectores de posiciones articulares, 4 vectores con
    % pares de motores (voltajes)

%-----
% Carga de las posiciones articulares:
%-----

q1b = medidas2(1:1000); %rads
q2b = medidas2(1001:2000);
q3b = medidas2(2001:3000);
q4b = medidas2(3001:4000);

%-----
% Carga de las pares articulares:
%-----

cm1b = medidas2(4001:5000);
cm2b = medidas2(5001:6000);
cm3b = medidas2(6001:7000);
cm4b = medidas2(7001:8000);

lmqb=length(q1b);%longitud máxima de lmq igual a 1000, sin importar que contenga q1

%-----
% Eliminación de los efectos de borde (50 puntos son eliminados al inicio y al final de la trayectoria):
%-----

nbordb=51;
nbonb=(nbordb:lmqb-(nbordb-1));%(desde 51 hasta 950)
lmqb=length(nbonb);%longitud máxima de nmf sin importar q contenga igual a 900
theta=zeros(lmqb,1); %matriz de ceros de 900 filas x 1 columna

%toma los datos de medidas.m para cada articulación (posición, voltaje)iniciando en el dato No.50

q1ab = q1b(nbonb);%Posiciones de las articulaciones
q2ab = q2b(nbonb);
q3ab = q3b(nbonb);
q4ab = q4b(nbonb);

cm1ab = cm1b(nbonb);%Voltajes de las articulaciones
cm2ab = cm2b(nbonb);
cm3ab = cm3b(nbonb);
cm4ab = cm4b(nbonb);

%-----
% Los valores de voltajes medidos se convierten a pares en los accionadores
%-----

cm11b = cm1ab*0.1;
cm22b = cm2ab*0.1;
cm33b = cm3ab*0.1;
cm44b = cm4ab*0.1;

%-----

```

```

%Velocidades y aceleraciones para cada articulación
%-----

%.....
%Articulación 1
%.....

v1b = diffcent(q1ab,tm); %velocidad 1
a1b = diffcent(v1b,tm); %aceleración 1

%.....
%Articulación 2
%.....

v2b = diffcent(q2ab,tm); %velocidad 2
a2b = diffcent(v2b,tm); %aceleración 2

%.....
%Articulación 3
%.....

v3b = diffcent(q3ab,tm); %velocidad 3
a3b = diffcent(v3b,tm); %aceleración 3

%.....
%Articulación 4
%.....

v4b = diffcent(q4ab,tm); %velocidad 4
a4b = diffcent(v4b,tm); %aceleración 4

%-----
%Resumen de las pares:
%-----

acmb = [cm11b; cm22b; cm33b; cm44b]; %vector columna

%-----
% Calculo de la MATRIZ DE OBSERVACION PARA LA NUEVA TRAYECTORIA:
% Y = W * X
% 14 parámetros a estimar:
%X = [XXR2 XXR3 XXR4 ZZR1 ZZR2 ZZR3 ZZR4 MX2 MX3 MY3 MX4 MY4 Ia3 Ia4];
% Parámetros a identificar: tensores de inercias, primer momento de inercia, inercia del
% accionador:
%-----

G = 9.81;%Gravedad +/-

%-----
%Funciones Trigonómicas
%-----

s2b=sin(q2ab);
c2b=cos(q2ab);

s3b=sin(q3ab);
c3b=cos(q3ab);

s4b=sin(q4ab);
c4b=cos(q4ab);

```

```

s23b=(s2b.*c3b)+(c2b.*s3b);
c23b=(c2b.*c3b)-(s2b.*s3b);
s34b=(s3b.*c4b)+(s4b.*c3b);
c34b=(c3b.*c4b)-(s3b.*s4b);

s234b=(s23b.*c4b)+(s4b.*c23b);
c234b=(c23b.*c4b)-(s23b.*s4b);

%Distancias entre
D3=0.22;%(ejes z2 y art3)
D4=0.22;%(art3 y art4)

% _____NEW MATRIZ DE OBSERVACION 4 DOF 14 PARÁMETROS:_____

%Tensor de inercia XXR2:
pa1ab = (s2b.^2).*a1b;
pa1bb = theta;
pa1cb = theta;
pa1db = theta;
col1b = [pa1ab; pa1bb; pa1cb; pa1db];%Columna 1 de la matriz de observación W

%Tensor de inercia XXR3:
pa2ab = (s23b.^2).*a1b;
pa2bb = theta;
pa2cb = theta;
pa2db = theta;
col2b = [pa2ab; pa2bb; pa2cb; pa2db];%Columna 2 de la matriz de observación W

%Tensor de inercia XXR4:
pa3ab = (s234b.^2).*a1b;
pa3bb = theta;
pa3cb = theta;
pa3db = theta;
col3b = [pa3ab; pa3bb; pa3cb; pa3db];%Columna 3 de la matriz de observación W

%Tensor de inercia ZZR1:
pa4ab = a1b;
pa4bb = theta;
pa4cb = theta;
pa4db = theta;
col4b = [pa4ab; pa4bb; pa4cb; pa4db];%Columna 4 de la matriz de observación W

%Tensor de inercia ZZR2:
pa5ab = theta;
pa5bb = a2b;
pa5cb = theta;
pa5db = theta;
col5b = [pa5ab; pa5bb; pa5cb; pa5db];%Columna 5 de la matriz de observación W

%Tensor de inercia ZZR3:
pa6ab = theta;
pa6bb = a2b+a3b;
pa6cb = a2b+a3b;
pa6db = theta;
col6b = [pa6ab; pa6bb; pa6cb; pa6db];%Columna 6 de la matriz de observación W

```



```

%Tensor de inercia ZZR4:
pa7ab = theta;
pa7bb = a2b+a3b+a4b;
pa7cb = a2b+a3b+a4b;
pa7db = a2b+a3b+a4b;
col7b = [pa7ab; pa7bb; pa7cb; pa7db];%Columna 7 de la matriz de observación W

%Primer momento MXR2:
pa8ab = theta;
pa8bb = c2b.*G;
pa8cb = theta;
pa8db = theta;
col8b = [pa8ab; pa8bb; pa8cb; pa8db];%Columna 8 de la matriz de observación W

%Primer momento MXR3:
pa9ab = 2*c2b.*c23b.*D3.*a1b;
pa9bb = (2*c3b.*D3.*a2b) + (c3b.*D3.*a3b) + (c23b.*G);
pa9cb = (c3b.*D3.*a2b) + (c23b.*G);
pa9db = theta;
col9b = [pa9ab; pa9bb; pa9cb; pa9db];%Columna 9 de la matriz de observación W

%Primer momento MYR3:
pa10ab = -2*c2b.*s23b.*D3.*a1b;
pa10bb = (-2*s3b.*D3.*a2b) - (s3b.*D3.*a3b) - (s23b.*G);
pa10cb = (-s3b.*D3.*a2b) - (s23b.*G);
pa10db = theta;
col10b = [pa10ab; pa10bb; pa10cb; pa10db];%Columna 10 de la matriz de observación W

%Primer momento MXR4:
pa11ab = (2*D3.*c2b.*c234b.*a1b) + (2*D4.*c23b.*c234b.*a1b);
pa11bb = (2*D3.*c34b.*a2b) + (2*D4.*c4b.*a2b) + (D3.*c34b.*a3b) + (2*D4.*c4b.*a3b) +
(D3.*c34b.*a4b) + (D4.*c4b.*a4b)+ (c234b.*G);
pa11cb = (D3.*c34b.*a2b) + (2*D4.*c4b.*a2b) + (2*D4.*c4b.*a3b) + (D4.*c4b.*a4b) + (c234b.*G);
pa11db = (D3.*c34b.*a2b) + (D4.*c4b.*a2b) + (D4.*c4b.*a3b) + (c234b.*G);
col11b = [pa11ab; pa11bb; pa11cb; pa11db];%Columna 11 de la matriz de observación W

%Primer momento MYR4:
pa12ab = (-2*D3.*c2b.*s234b.*a1b) - (2*D4.*c23b.*s234b.*a1b);
pa12bb = (-2*D3.*s34b.*a2b) - (2*D4.*s4b.*a2b) - (D3.*s34b.*a3b) - (2*D4.*s4b.*a3b) - (D3.*s34b.*a4b)
- (D4.*s4b.*a4b) - (s234b.*G);
pa12cb = (-D3.*s34b.*a2b) - (2*D4.*s4b.*a2b) - (2*D4.*s4b.*a3b) - (D4.*s4b.*a4b) - (s234b.*G);
pa12db = (-D3.*s34b.*a2b) - (D4.*s4b.*a2b) - (D4.*s4b.*a3b) - (s234b.*G);
col12b = [pa12ab; pa12bb; pa12cb; pa12db];%Columna 12 de la matriz de observación W

%Inercia del rotor la3:%
pa13ab = theta;
pa13bb = theta;
pa13cb = a3b;
pa13db = theta;
col13b = [pa13ab; pa13bb; pa13cb; pa13db];%Columna 13 de la matriz de observación W

%Inercia del rotor la4:
pa14ab = theta;
pa14bb = theta;

```

```

pa14cb = theta;
pa14db = a4b;
col14b = [pa14ab; pa14bb; pa14cb; pa14db]; %Columna 14 de la matriz de observación W

%_____FIN MATRIZ DE OBSERVACIÓN_____

%-----
%MATRIZ DE OBSERVACION
%-----

%tensores de inercia, primer momento de inercia, masas, inercia del accionador (rotor)
%conformando la matriz de observación:

w1tb = [col1b col2b col3b col4b col5b col6b col7b col8b col9b col10b col11b col12b col13b col14b];

yb = acmb(:); %toma el valor de todos los datos de los pares de la nueva trayectoria en un solo vector
%de 4505x1
wb = w1tb(:,1:14); %reorganizar en forma ordenada la matriz de observación w1t de la nueva
%trayectoria (de la columna 1 a la 16 de izquierda a derecha)

y_Estimadob = wb*x;%Vector de pares calculadas con los parámetros estimados de la primera
%trayectoria y
%la matriz de observación de la segunda trayectoria, utilizado para comparar con las
% Pares reales de la segunda tray.(validación cruzada)

%-----
%La dinámica de los sistemas de transmisión mecánicos (no modelados) se representa
%por una constante que se estimo a ensayo y error. Esto con el fin de compensar las
%perdidas que se tiene en cuanto pares (de la base a los ejes de cada articulación)
%-----

y_es1 = y_Estimadob(1:900);
y_es11 = y_es1*2.5;
y_es2 = y_Estimadob(901:1800);
y_es22 = y_es2*3+0.6;
y_es3 = y_Estimadob(1801:2700);
y_es33 = y_es3*2.5;
y_es4 = y_Estimadob(2701:3600);
y_es44 = y_es4*2.8;

y_EstimadobT = [y_es11;y_es22;y_es33;y_es44];

%-----
%GRAFICA DE LA VALIDACION CRUZADA DE LA IDENTIFICACION: Pares reales vs Pares estimadas
con el
%vector de parámetros obtenido en la concatenación
%-----

figure
plot([0:tm*1:tm*1*(3600-1)],yb(1:3600),'b');hold on;plot([0:tm*1:tm*1*(3600-1)],y_EstimadobT(1:3600),'r')

xlabel('Time (s)');ylabel('Torque (N.m)');
title(' Pares reales azul - Pares estimados rojo')
pause;
close all;

```

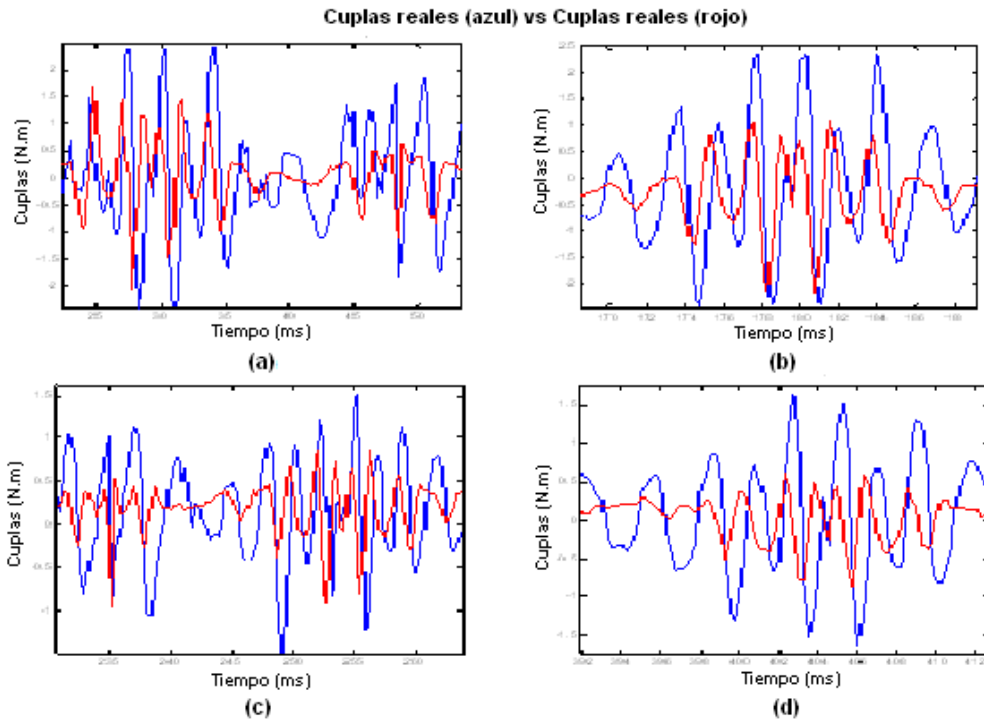


Figura G.1. Gráfica de seguimiento de trayectoria 20. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.

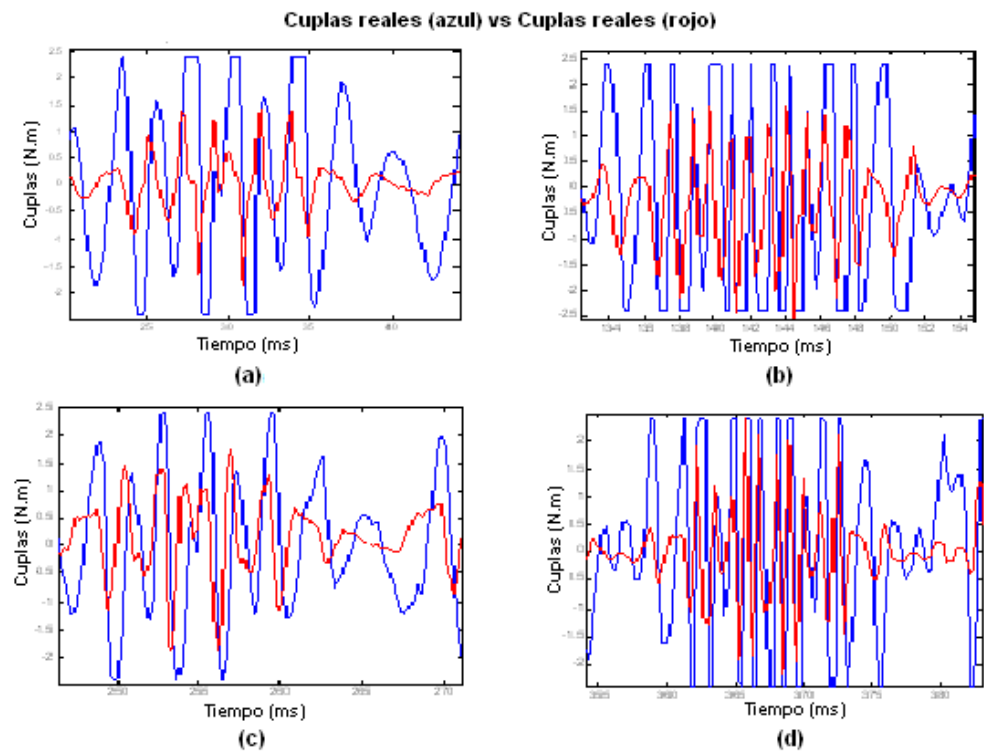


Figura G.2. Gráfica de seguimiento de trayectoria 21. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.

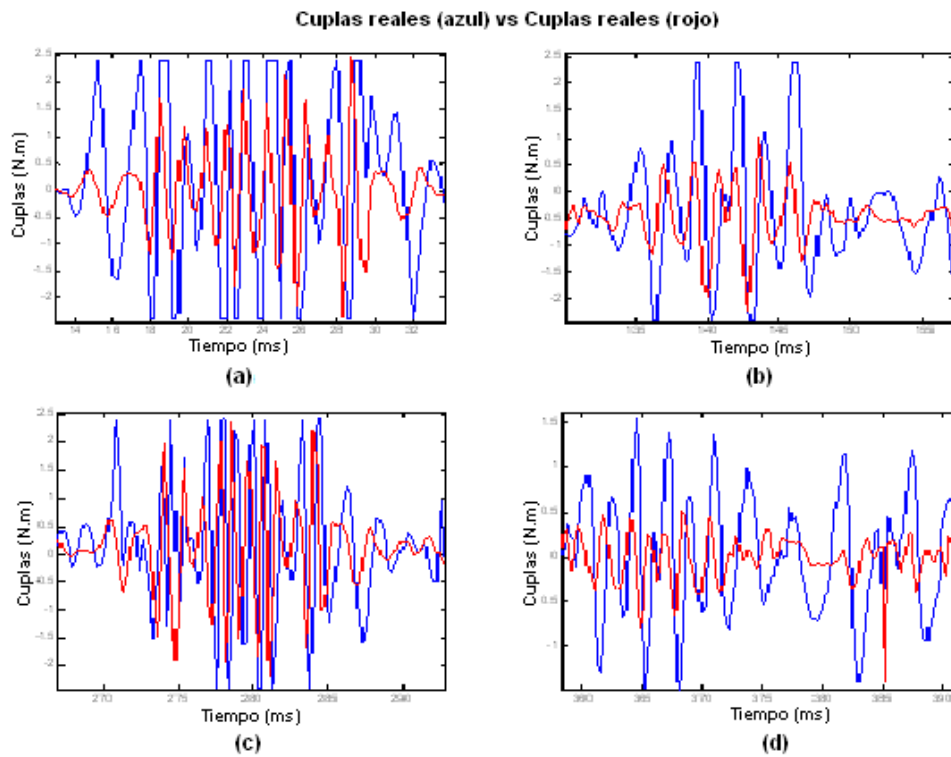


Figura G.3. Gráfica de seguimiento de trayectoria 23. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.

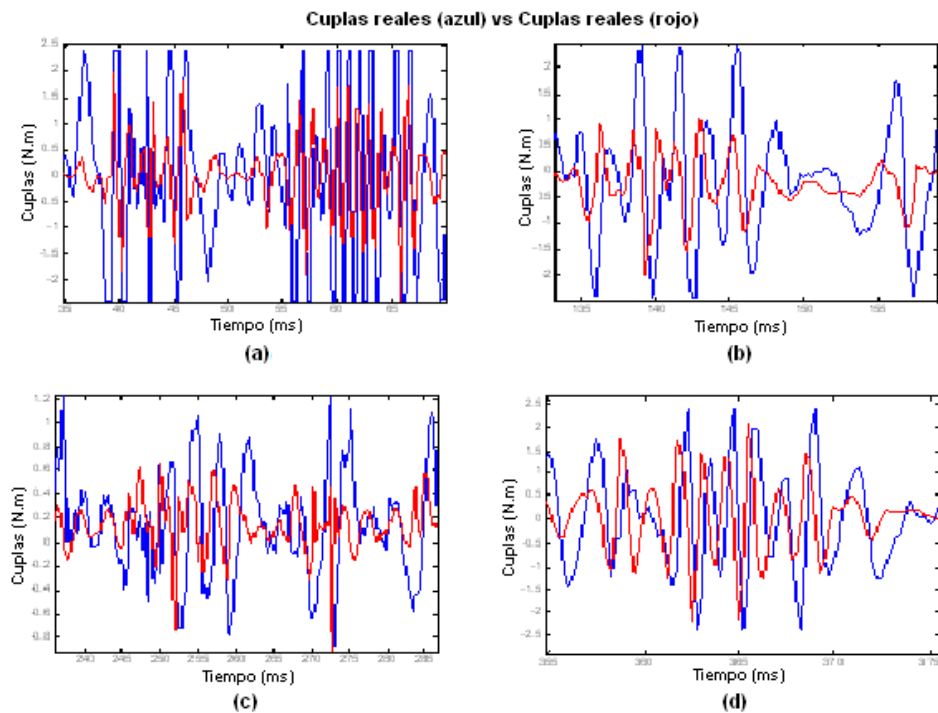


Figura G.4. Gráfica de seguimiento de trayectoria 25. (a) articulación 1. (b) articulación 2. (c) articulación 3. (d) articulación 4.

ANEXO H

ALGORITMOS PARA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE CONTROL

- **Generación de la trayectoria en espacio articular**

```
%-----  
% Generación de una trayectoria Bang_Bang  
%-----  
  
clc  
format long e  
global instant consigne Tech Tfin cons_vit  
  
%-----  
Tech=0.002;  
Tech_com=Tech;  
  
% Eje 1:  
  
Qinicial = 0.0;  
Qfinal = 0.1;  
  
%Aceleración deseada  
Kai=1;  
%Desaceleración deseada  
Kdi=1;  
% Velocidad máxima deseada  
Kvi=1;  
% Duración  
Tfinal=2.0;  
  
qpprec=0;  
  
%%%%%%%%%%%%%% ZONA DE INICIALIZACION %%%%%%%%%%%%%%%  
  
% Calculo de la distancia a recorrer  
  
delta_pos=Qfinal-Qinicial;  
  
Vlim=sqrt(Kai*delta_pos);  
if ( Kvi >= Vlim )  
    Kvi=Vlim;  
end  
  
% Puntos de quiebre:  
  
t1=0;  
t3=(round(delta_pos/Kvi/Tech))*Tech;  
Kvi=delta_pos/t3;  
t2=(round(Kvi/Kai/Tech))*Tech;  
Kai=Kvi/t2;  
t4=t2+t3;
```

```

% Calculo del numero de muestras:

nbech=(Tfinal/Tech)+1;
if ((round(nbech)-nbech) == 0)
    instant=[0:Tech:Tfinal]';
else
    nbech=nbech+1;
    instant=[0:Tech:Tfinal+Tech]';
end

% Inicialización de vectores:

xt=0;
vt=0;
at=0;

temps=0;
v=[]';
p=[]';
a=[]';

% %%%Construcción de los vectores para la simulación%%

for g=1:1:nbech

    v(g)=vt;
    p(g)=xt;
    a(g)=at;

    if (temps<=t2)
        ti=t1;
        a0=0;
        a1=0;
        a2=Kai/2;
    elseif (temps<=t3)
        ti=t2;
        a0=0.5*Kvi^2/Kai;
        a1=Kvi;
        a2=0;
    elseif (temps<=t4)
        ti=t3;
        a0=delta_pos-(0.5*Kvi^2/Kai);
        a1=Kvi;
        a2=-0.5*Kai;
    else
        ti=t4;
        a0=delta_pos;
        a1=0;
        a2=0;
    end

    delta_t=temps-ti;
    xt=a0+a1*delta_t+a2*delta_t*delta_t;
    vt=a1+2*a2*delta_t;
    at=2*a2;
    temps=temps+Tech;
end

qd_1 = p';
qpd_1 = v';
qppd_1 = a';

```

```

% Eje 2:

Qinicial = 0.0;
Qfinal=0.3;

%Aceleración deseada
Kai=1;
%Desaceleración deseada
Kdi=1;
% Velocidad máxima deseada
Kvi=1;
% Duración
Tfinal=2.0;

pprec=0;

%%%%%%%%%%%% ZONA DE INICIALIZACION %%%%%%%%%%%%%

% Calculo de la distancia a recorrer

delta_pos=Qfinal-Qinicial;

Vlim=sqrt(Kai*delta_pos);
if ( Kvi >= Vlim )
    Kvi=Vlim;
end

% Puntos de quiebre:

t1=0;
t3=(round(delta_pos/Kvi/Tech))*Tech;
Kvi=delta_pos/t3;
t2=(round(Kvi/Kai/Tech))*Tech;
Kai=Kvi/t2;
t4=t2+t3;

% Calculo del numero de muestras:

nbech=(Tfinal/Tech)+1;
if ((round(nbech)-nbech) == 0)
    instant=[0:Tech:Tfinal]';
else
    nbech=nbech+1;
    instant=[0:Tech:Tfinal+Tech]';
end

% Inicializacion de vectores:

xt=0;
vt=0;
at=0;

temps=0;
v=[]';
p=[]';
a=[]';

%%%%%%%%%%%% Construcción de los vectores para la simulación%%%%%%%%%%%%

for g=1:1:nbech

```

```

v(g)=vt;
p(g)=xt;
a(g)=at;

if (temps<=t2)
    ti=t1;
    a0=0;
    a1=0;
    a2=Kai/2;
elseif (temps<=t3)
    ti=t2;
    a0=0.5*Kvi^2/Kai;
    a1=Kvi;
    a2=0;
elseif (temps<=t4)
    ti=t3;
    a0=delta_pos-(0.5*Kvi^2/Kai);
    a1=Kvi;
    a2=-0.5*Kai;
else
    ti=t4;
    a0=delta_pos;
    a1=0;
    a2=0;
end

delta_t=temps-ti;
xt=a0+a1*delta_t+a2*delta_t*delta_t;
vt=a1+2*a2*delta_t;
at=2*a2;
temps=temps+Tech;
end

qd_2 = p';
qpd_2 = v';
qppd_2 = a';

% Eje 3:

Qinicial = 0.0;
Qfinal=0.2;

%Aceleración deseada
Kai=1;
%Desaceleración deseada
Kdi=1;
% Velocidad máxima deseada
Kvi=1;
% Duración
Tfinal=2.0;

qpprec=0;

%%%%%%%%%%%% ZONA DE INICIALIZACION %%%%%%%%%%%%%

% Calculo de la distancia a recorrer

delta_pos=Qfinal-Qinicial;

Vlim=sqrt(Kai*delta_pos);
if ( Kvi >= Vlim )
    Kvi=Vlim;

```



```

end

% Puntos de quiebre:

t1=0;
t3=(round(delta_pos/Kvi/Tech))*Tech;
Kvi=delta_pos/t3;
t2=(round(Kvi/Kai/Tech))*Tech;
Kai=Kvi/t2;
t4=t2+t3;

% Calculo del numero de muestras:

nbech=(Tfinal/Tech)+1;
if ((round(nbech)-nbech) == 0)
    instant=[0:Tech:Tfinal]';
else
    nbech=nbech+1;
    instant=[0:Tech:Tfinal+Tech]';
end

% Inicialización de vectores:

xt=0;
vt=0;
at=0;

temps=0;
v=[];
p=[];
a=[];

%%%%%% Construcción de los vectores para la simulación:%%%%%%%%

for g=1:1:nbech

    v(g)=vt;
    p(g)=xt;
    a(g)=at;

    if (temps<=t2)
        ti=t1;
        a0=0;
        a1=0;
        a2=Kai/2;
    elseif (temps<=t3)
        ti=t2;
        a0=0.5*Kvi^2/Kai;
        a1=Kvi;
        a2=0;
    elseif (temps<=t4)
        ti=t3;
        a0=delta_pos-(0.5*Kvi^2/Kai);
        a1=Kvi;
        a2=-0.5*Kai;
    else
        ti=t4;
        a0=delta_pos;
        a1=0;
        a2=0;
    end

end

```

```

        delta_t=temps-ti;
        xt=a0+a1*delta_t+a2*delta_t*delta_t;
        vt=a1+2*a2*delta_t;
        at=2*a2;
        temps=temps+Tech;
end

qd_3 = p';
qpd_3 = v';
qppd_3 = a';

% Eje 4:

Qinicial = 0.0;
Qfinal=0.15;

%Aceleración deseada
Kai=1;
%Desaceleración deseada
Kdi=1;
% Velocidad máxima deseada
Kvi=1;
% Duración
Tfinal=2.0;

qpprec=0;

%%%%%%%%%%%%%ZONA DE INICIALIZACION%%%%%%%%%%%%%

% Calculo de la distancia a recorrer

delta_pos=Qfinal-Qinicial;

Vlim=sqrt(Kai*delta_pos);
if ( Kvi >= Vlim )
    Kvi=Vlim;
end

% Puntos de quiebre:

t1=0;
t3=(round(delta_pos/Kvi/Tech))*Tech;
Kvi=delta_pos/t3;
t2=(round(Kvi/Kai/Tech))*Tech;
Kai=Kvi/t2;
t4=t2+t3;

% Calculo del numero de muestras:

nbech=(Tfinal/Tech)+1;
if ((round(nbech)-nbech) == 0)
    instant=[0:Tech:Tfinal]';
else
    nbech=nbech+1;
    instant=[0:Tech:Tfinal+Tech]';
end

% Inicialización de vectores:

xt=0;
vt=0;
at=0;

```

```

temps=0;
v=[];
p=[];
a=[];

% Construccion de los vectores para la simulacion:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for g=1:1:nbech

    v(g)=vt;
    p(g)=xt;
    a(g)=at;

    if (temps<=t2)
        ti=t1;
        a0=0;
        a1=0;
        a2=Kai/2;
    elseif (temps<=t3)
        ti=t2;
        a0=0.5*Kvi^2/Kai;
        a1=Kvi;
        a2=0;
    elseif (temps<=t4)
        ti=t3;
        a0=delta_pos-(0.5*Kvi^2/Kai);
        a1=Kvi;
        a2=-0.5*Kai;
    else
        ti=t4;
        a0=delta_pos;
        a1=0;
        a2=0;
    end
    delta_t=temps-ti;
    xt=a0+a1*delta_t+a2*delta_t*delta_t;
    vt=a1+2*a2*delta_t;
    at=2*a2;
    temps=temps+Tech;
end
qd_4 = p';
qpd_4 = v';
qppd_4 = a';

```

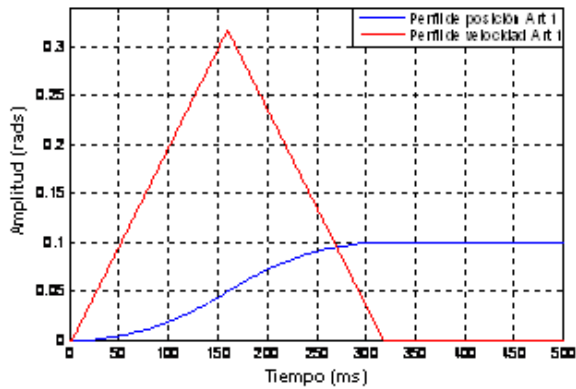


Figura H.1. Consigna articular tipo Bang-bang

- **Generación de una trayectoria en espacio cartesiano**

```

%Generación de una trayectoria circular

%----Movimiento circular-----

clear all;
clc;
Tfinal=10.0;
Tem=0.002;%1 ms de tiempo de muestreo

% Calculo del numero de muestras %

nbech=(Tfinal/Tem)+1;
if ((round(nbech)-nbech) == 0)
    instant=[0:Tem:Tfinal];
else
    nbech=nbech+1;
    instant=[0:Tem:Tfinal+Tem];
end
t=0;
for h=1:1:nbech
    t=t+Tem;
    x1(h)=0.03*sin(2*pi*1/Tfinal*t - pi/2);%Radio 0.03
    y1(h)=0.03*cos(2*pi*1/Tfinal*t - pi/2);%
end
x1=x1';
y1=y1';
%-----

cons1= 0.26 + x1;%Centro en 0.26 (x), 0.26 (y)
cons2= 0.26 + y1;
cons3= -0.17*ones(5001,1);%Posición en z

```

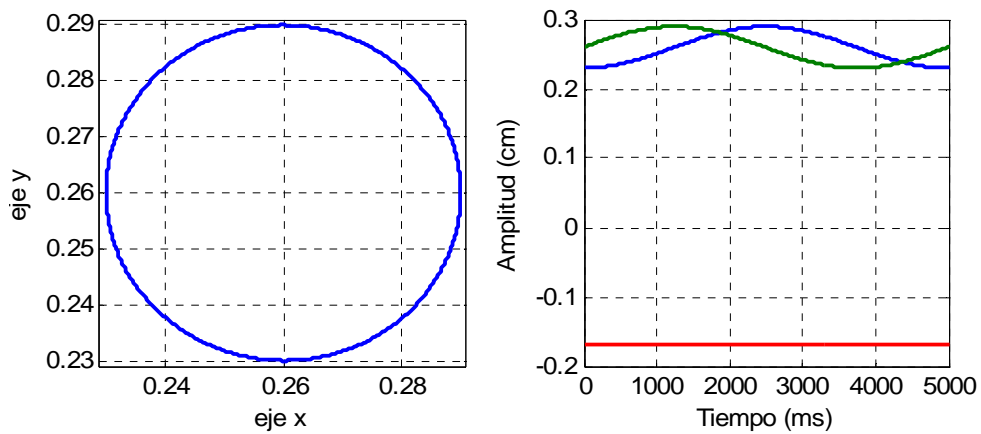


Figura H.2. Consigna Circular (a) y Componentes Cartesianos (b)

ANEXO I

ARCHIVOS DE INICIO, UTILIZADOS PARA SIMULAR LOS LAZOS DE CONTROL

```
%CONTROL DE UN ROBOT SERIE SCORBOT ER-5 PLUS DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD:
%SE TOMAN 4 DE LOS 5 GRADOS DE LIBERTAD.
%Estudiantes: Alexander Constaín Daza
%              Karoll Viviana Torres Pérez
%Director:    Oscar Andrés Vivas Albán
%-----

% %ARCHIVO DE INICIO SCORBOT-ER 5plus:% %
%Este archivo es necesario para el funcionamiento de los diferentes
% lazos de control estudiados (PID y CTC en los espacios cartesiano y articular)

clear all;
clc;

% %Definir el tipo de consigna que se va a utilizar:

% %Trayectoria en espacio articular (Bang-Bang):
Trayectoria1;

% %Trayectoria en espacio cartesiano (círculo):
% Circular;

% %Definir tiempo de muestreo
Tem = 0.002;

% %Definir posición inicial para las articulaciones del robot

% %Para el Control Articular:
QI = [0;0;0;0];

% %Para el Control Cartesiano
% QI = [mgi2(cons1(1),cons2(1),cons3(1))];

% %Especificar ganancias de los controladores

% %-----Controlador PID:-----

% %-----Caso Articular-----
% %Ganancias Proporcionales
kp1 = 100;
kp2 = 700;
kp3 = 200;
kp4 = 300;
% %Ganancias Derivativas
kv1 = 50;
kv2 = 70;
kv3 = 50;
kv4 = 50;
% %Ganancias Integrales
ki1 =1e-4;
```

```

ki2 = 800;
ki3 = 100;
ki4 = 400;

% %----Caso Cartesiano----
% %Ganancias Proporcionales
kp1 = 300;
% kp2 = 400;
% kp3 = 700;
% kp4 = 500;

% %Ganancias Derivativas
% kv1 = 10;
% kv2 = 70;
% kv3 = 50;
% kv4 = 40;
% %Ganancias Integrales
% ki1 = 10;
% ki2 = 15;
% ki3 = 13;
% ki4 = 11;

% %-----
% %-----Controlador CTC:-----

% %----Caso Articular----
% %Ganancias Proporcionales
% kp1 = 300000;
% kp2 = 400000;
% kp3 = 250000;
% kp4 = 300000;
% %Ganancias Derivativas
% kv1 = 500;
% kv3 = 300;
% kv4 = 400;
% kv2 = 450;

% %----Caso Cartesiano----
% %Ganancias Proporcionales
% kp1 = 300000;
% kp2 = 250000;
% kp3 = 50000;
% kp4 = 330000;
% %Ganancias Derivativas
% kv1 = 550;
% kv2 = 700;
% kv3 = 200;
% kv4 = 400;

% %-----

```

ANEXO J

ESQUEMAS EN SIMULINK PARA LOS CONTROLADORES PID Y CTC EN LOS ESPACIOS CARTESIANO Y ARTICULAR

Los diagramas de Simulink siguientes, serán incluidos en el anexo en formato digital.

- **Controlador PID en espacio articular.**

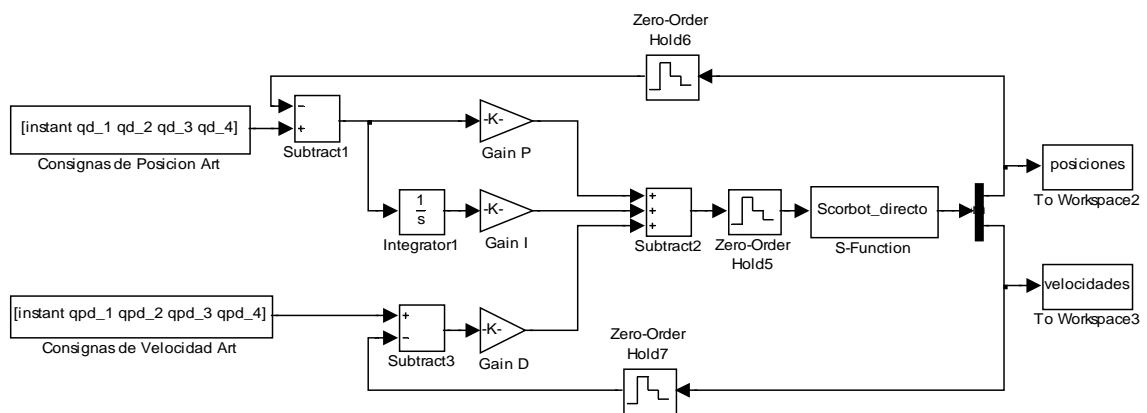


Figura J.1. Esquema en Simulink para control PID: espacio articular

- **Controlador PID en espacio cartesiano.**

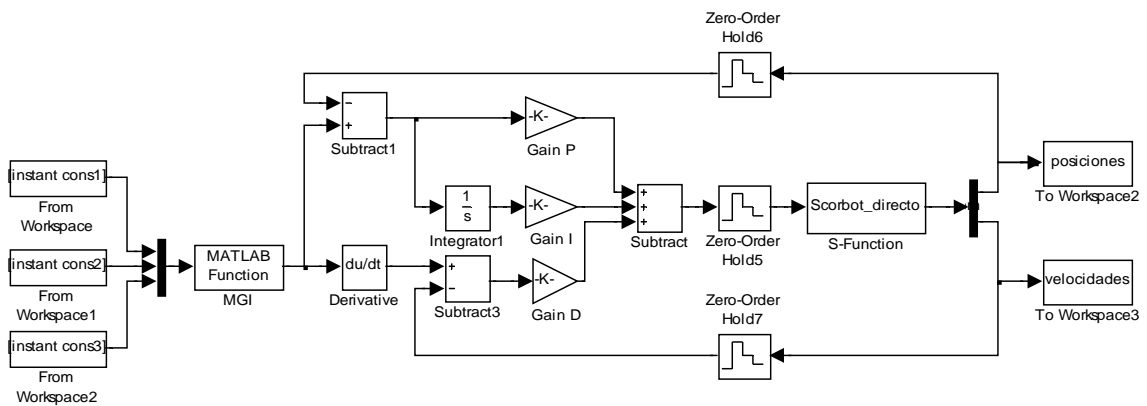


Figura J.2. Esquema en Simulink para control PID: espacio cartesiano

- **Controlador CTC en espacio articular.**

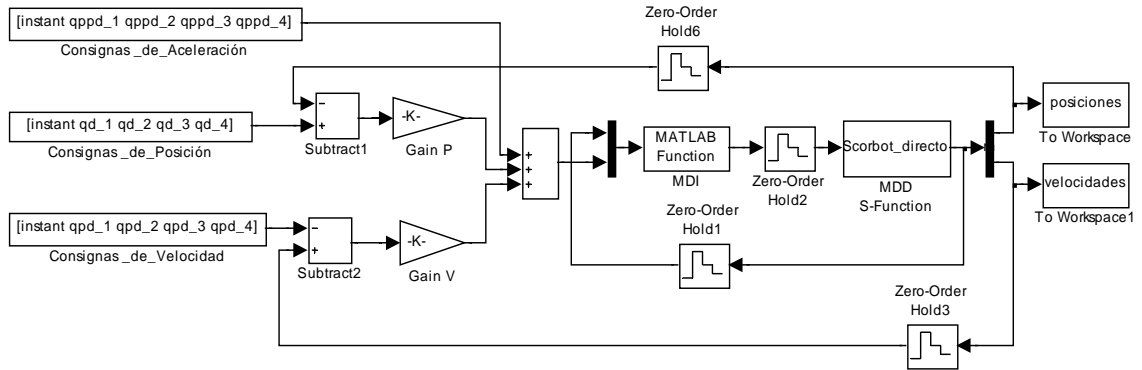


Figura J.3. Esquema en Simulink para control CTC: espacio articular.

- **Controlador CTC en espacio cartesiano.**

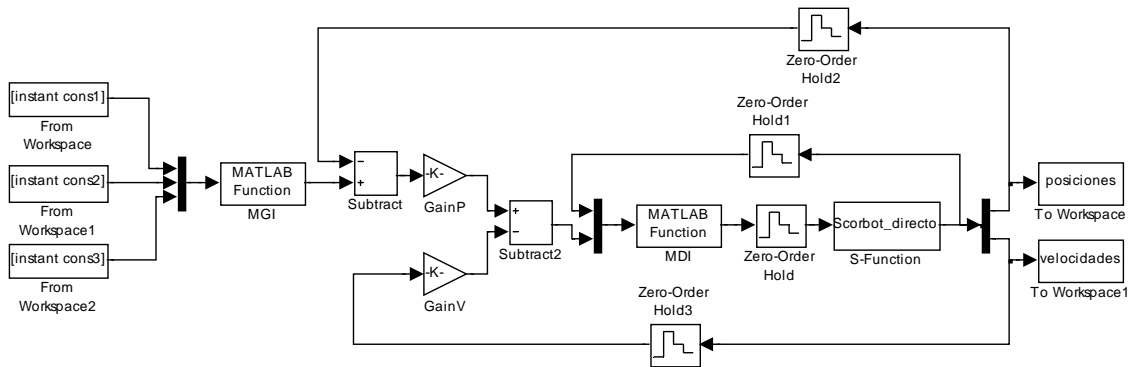


Figura J.4. Esquema en Simulink para control CTC: espacio cartesiano.

ANEXO K

MODELOS DINAMICOS DEL ROBOT SCORBOT-ER 5PLUS

- **Modelo dinámico directo**

```
%Modelo Dinámico Directo del robot Scorbot ER 5 Plus

function [sys, x0, str, ts] = Scorbot_directo(t,x,u,flag,QI)

switch flag,
case 0,
    [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(QI);
case 1,
    sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case { 2, 4, 9 },
    sys = [];
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

%=====
% mdlInitializeSizes
% Retorna los tamaños, condiciones iniciales y tiempos de muestreo para la función "S-function".
%=====

function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(QI)

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 8;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 8;%4 velocidades art y 4 aceleraciones art de salida
sizes.NumInputs = 4;%4 consignas de posiciones articulares
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);

% Inicializar condiciones Iniciales
%
% x0=[q1,q2,q3,q4,q5,qp1,qp2,qp3,qp4,qp5]
x0=[QI(1);QI(2);QI(3);QI(4);0;0;0;0];

% str es una matriz vacía
%
str = [];

% Inicializar el vector de tiempos de muestreo
%
ts = [0 0];
```

```

% end mdlInitializeSizes

%=====

%=====
% mdlDerivatives
% retorna las derivadas de the continuous states.
%=====

function sys=mdlDerivatives(t,x,u)

%GRAVEDAD
G3= 9.81;

%DISTANCIAS
D3= 0.22;%22 Cm
D4= 0.22;%22 Cm

% %Vector de parámetros dinámicos
% %x = [XXR2 XXR3 XXR4 ZZR1 ZZR2 ZZR3 ZZR4 MX2 MX3 MY3 MX4 MY4 Ia3 Ia4];

% %valores de los respectivos parámetros dinámicos
AVA(1)= 0.0393;%XXR2
AVA(2)= -0.0303;%XXR3
AVA(3)= -0.0372;%XXR4
AVA(4)= 0.1097;%ZZR1
AVA(5)= 0.0885;%ZZR2
AVA(6)= 0.0131;%ZZR3
AVA(7)= -0.0081;%ZZR4

AVA(8)= 0.0416;%MXR2
AVA(9)= -0.0096;%MXR3
AVA(10)= 0.0043;%MYR3
AVA(11)= 0.0080;%MXR4
AVA(12)= -0.0047;%MYR4

AVA(13)= 0.0874;%IA3
AVA(14)= 0.1232;%IA4

%TENSORES DE INERCIA
XXR1= 0;
XXR2= AVA(1);
XXR3= AVA(2);
XXR4= AVA(3);

XY1=0.0;
XY2=0.0;
XY3=0.0;
XY4=0.0;

XZ1=0.0;
XZ2=0.0;
XZ3=0.0;
XZ4=0.0;

YZ1=0.0;
YZ2=0.0;
YZ3=0.0;
YZ4=0.0;

ZZR1= AVA(4);

```

```

ZZR2= AVA(5);
ZZR3= AVA(6);
ZZR4= AVA(7);

%PRIMEROS MOMENTOS DE INERCIA
MXR1= 0;
MYR1= 0;

MXR2= AVA(8);
MYR2= 0;

MXR3= AVA(9);
MYR3= AVA(10);

MXR4= AVA(11);
MYR4= AVA(12);

%INERCIA DE LOS ROTORES
IA3= AVA(13);
IA4= AVA(14);

%ARGUMENTO DEL MDI
%Theta
posicion=x;
Q1=posicion(1);
Q2=posicion(2);
Q3=posicion(3);
Q4=posicion(4);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Entradas (Cuplas de MDI a los motores)
GAMA1=u(1);
GAMA2=u(2);
GAMA3=u(3);
GAMA4=u(4);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%FUNCIONES TRIGONOMÉTRICAS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
S2=sin(x(2));
C2=cos(x(2));
S3=sin(x(3));
C3=cos(x(3));
S4=sin(x(4));
C4=cos(x(4));

S23= S2*C3 + S3*C2;%sin(Q2+Q3);
C23= C2*C3 - S2*S3;%cos(Q2+Q3);

S34= S3*C4 + S4*C3;%sin(Q3+Q4);
C34= C2*C3 - S2*S3;%cos(Q3+Q4);

S234=sin(Q2+Q3+Q4);
C234=cos(Q2+Q3+Q4);

%Velocidades = Q Punto
QP1=x(5);%velocidad articulación uno (1)
QP2=x(6);
QP3=x(7);
QP4=x(8);%velocidad articulación cuatro (4)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE INERCIA 4*4

$$A11 = ZZR1 + (S2^2)*XXR2 + (S23^2)*XXR3 + 2*MXR3*D3*C2*C23 - 2*MYR3*C2*S23*D3 + (S234^2)*XXR4 + 2*MXR4*D3*C2*C234 + 2*MXR4*D4*C23*C234 - 2*MYR4*D3*C2*S234 - 2*MYR4*D4*C23*S234;$$

$$A12= 0;$$

$$A13= 0;$$

$$A14= 0;$$

$$A21= A12;$$

$$A22= ZZR2 + ZZR3 + 2*MXR3*D3*C3 - 2*MYR3*S3*D3 + ZZR4 + 2*MXR4*D3*C34 + 2*MXR4*D4*C4 - 2*MYR4*D3*S34 - 2*MYR4*D4*S4;$$

$$A23= ZZR3 + MXR3*D3*C3 - MYR3*S3*D3 + ZZR4 + MXR4*D3*C34 + MXR4*D4*C4 + MXR4*D4*C4 - MYR4*D3*S34 - MYR4*D4*S4 - MYR4*D4*S4;$$

$$A24= ZZR4 + MXR4*D3*C34 + MXR4*D4*C4 - MYR4*D3*S34 - MYR4*D4*S4;$$

$$A31= A13;$$

$$A32= A23;$$

$$A33= ZZR3 + ZZR4 + 2*MXR4*D4*C4 - 2*MYR4*D4*S4 + IA3;$$

$$A34= ZZR4 + MXR4*D4*C4 - MYR4*D4*S4;$$

$$A41= A14;$$

$$A42= A24;$$

$$A43= A34;$$

$$A44= ZZR4 + IA4;$$

MATRIZ DE INERCIA TOTAL

$$A=[A11 A12 A13 A14;A21 A22 A23 A24;A31 A32 A33 A34;A41 A42 A43 A44];$$

VECTOR DE FUERZAS DE GRAVEDAD

$$FG1=0;$$

$$FG2= C2^2*G3*MXR2 + C23^2*G3*MXR3 - S23^2*G3*MYR3 + C234^2*G3*MXR4 - S234^2*G3*MYR4;$$

$$FG3= C23^2*G3*MXR3 - S23^2*G3*MYR3 + C234^2*G3*MXR4 - S234^2*G3*MYR4;$$

$$FG4= C234^2*G3*MXR4 - S234^2*G3*MYR4;$$

=====

INVERSA DE LA MATRIZ DE INERCIA

```

INVA=inv(A);
%=====
%=====

GAMA(1) = GAMA1;
GAMA(2) = GAMA2;
GAMA(3) = GAMA3;
GAMA(4) = GAMA4;

%%%%%%%%%%%%% CÁLCULO ACELERACIONES ARTICULARES %%%%%%%%%%%%%%

QDP1= INVA(1,1)*(GAMA1-FG1) + INVA(1,2)*(GAMA2-FG2) + INVA(1,3)*(GAMA3-FG3) +
INVA(1,4)*(GAMA4-FG4);

QDP2= INVA(2,1)*(GAMA1-FG1) + INVA(2,2)*(GAMA2-FG2) + INVA(2,3)*(GAMA3-FG3) +
INVA(2,4)*(GAMA4-FG4);

QDP3= INVA(3,1)*(GAMA1-FG1) + INVA(3,2)*(GAMA2-FG2) + INVA(3,3)*(GAMA3-FG3) +
INVA(3,4)*(GAMA4-FG4);

QDP4= INVA(4,1)*(GAMA1-FG1) + INVA(4,2)*(GAMA2-FG2) + INVA(4,3)*(GAMA3-FG3) +
INVA(4,4)*(GAMA4-FG4);

%%%%%%%%%%%%%

%DE x(1) a x(5) POSICIONES ARTICULARES
%DE x(6) a x(10) VELOCIDADES ARTICULARES
%DE x(11) a x(15) ACELERACIONES ARTICULARES

sys(1) = x(5) ;%QP1
sys(2) = x(6) ;%QP2
sys(3) = x(7) ;%QP3
sys(4) = x(8) ;%QP4

sys(5) = QDP1;
sys(6) = QDP2;
sys(7) = QDP3;
sys(8) = QDP4;

% end mdlDerivatives
%=====

%=====
% mdlOutputs
% retorna el bloque de salidas.
%=====

function sys=mdlOutputs(t,x,u)

    sys(1) = x(1);
    sys(2) = x(2);
    sys(3) = x(3);
    sys(4) = x(4);

    sys(5) = x(5);
    sys(6) = x(6);
    sys(7) = x(7);
    sys(8) = x(8);

% end mdlOutputs
%=====

```

- **Modelo dinámico inverso**

```

%Modelo Dinámico Inverso del robot Scorbob ER 5 Plus

function GAM =
Scorbob_inverso(posicion1,posicion2,posicion3,posicion4,velocidad1,velocidad2,velocidad3,velocidad4,acel
eracion1,aceleracion2,aceleracion3,aceleracion4)

%Pares articulares en términos de las posiciones, velocidades y
%aceleraciones articulares

% % Parámetros del Scorbob:

%GRAVEDAD
G3= 9.81;

%DISTANCIAS
D3= 0.22;%22 Cm
D4= 0.22;%22 Cm

% %Vector de parámetros dinámicos
% %x = [XXR2 XXR3 XXR4 ZZR1 ZZR2 ZZR3 ZZR4 MX2 MX3 MY3 MX4 MY4 Ia3 Ia4];

% %valores de los respectivos parámetros dinámicos
AVA(1)= 0.0393;%XXR2
AVA(2)= -0.0303;%XXR3
AVA(3)= -0.0372;%XXR4
AVA(4)= 0.1097;%ZZR1
AVA(5)= 0.0885;%ZZR2
AVA(6)= 0.0131;%ZZR3
AVA(7)= -0.0081;%ZZR4

AVA(8)= 0.0416;%MXR2
AVA(9)= -0.0096;%MXR3
AVA(10)= 0.0043;%MYR3
AVA(11)= 0.0080;%MXR4
AVA(12)= -0.0047;%MYR4

AVA(13)= 0.0874;%IA3
AVA(14)= 0.1232;%IA4

%TENSORES DE INERCIA

XXR1= 0;
XXR2= AVA(1);;
XXR3= AVA(2);
XXR4= AVA(3);

XY1=0.0;
XY2=0.0;
XY3=0.0;
XY4=30.0;

XZ1=0.0;
XZ2=0.0;
XZ3=0.0;
XZ4=0.0;

YZ1=0.0;
YZ2=0.0;
YZ3=0.0;

```

```

YZ4=0.0;
ZZR1= AVA(4);
ZZR2= AVA(5);
ZZR3= AVA(6);
ZZR4= AVA(7);

%PRIMEROS MOMENTOS DE INERCIA
MXR1= 0;
MYR1= 0;

MXR2= AVA(8);
MYR2= 0;

MXR3= AVA(9);
MYR3= AVA(10);

MXR4= AVA(11);
MYR4= AVA(12);

%INERCIA DE LOS ROTORES
IA3= AVA(13);
IA4= AVA(14);

Q1=posicion1;
Q2=posicion2;
Q3=posicion3;
Q4=posicion4;

QP1=velocidad1;
QP2=velocidad2;
QP3=velocidad3;
QP4=velocidad4;

QDP1=aceleracion1;
QDP2=aceleracion2;
QDP3=aceleracion3;
QDP4=aceleracion4;

%%%%%%%%%%%%%%FUNCIONES TRIGONOMÉTRICAS%%%%%%%%%%%%%%
S2=sin(Q2);
C2=cos(Q2);
S3=sin(Q3);
C3=cos(Q3);
S4=sin(Q4);
C4=cos(Q4);

S23= S2*C3 + S3*C2;%sin(Q2+Q3);
C23= C2*C3 - S2*S3;%cos(Q2+Q3);

S34= S3*C4 + S4*C3;%sin(Q3+Q4);
C34= C2*C3 - S2*S3;%cos(Q3+Q4);

S234=sin(Q2+Q3+Q4);
C234=cos(Q2+Q3+Q4);

%%%%%%%%%%%%%%ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE INERCIA 4*4%%%%%%%%%%%%%%
A11 = ZZR1 + (S2^2)*XXR2 + (S23^2)*XXR3 + 2*MXR3*D3*C2*C23 - 2*MYR3*C2*S23*D3 +
(S234^2)*XXR4 + 2*MXR4*D3*C2*C234 + 2*MXR4*D4*C23*C234 - 2*MYR4*D3*C2*S234 -
2*MYR4*D4*C23*S234;

```

A12= 0;

A13= 0;

A14= 0;

%%%

A21= A12;

A22= ZZR2 + ZZR3 + 2*MXR3*D3*C3 - 2*MYR3*S3*D3 + ZZR4 + 2*MXR4*D3*C34 + 2*MXR4*D4*C4 - 2*MYR4*D3*S34 - 2*MYR4*D4*S4;

A23= ZZR3 + MXR3*D3*C3 - MYR3*S3*D3 + ZZR4 + MXR4*D3*C34 + MXR4*D4*C4 + MXR4*D4*C4 - MYR4*D3*S34 - MYR4*D4*S4 - MYR4*D4*S4;

A24= ZZR4 + MXR4*D3*C34 + MXR4*D4*C4 - MYR4*D3*S34 - MYR4*D4*S4;

%%%

A31= A13;

A32= A23;

A33= ZZR3 + ZZR4 + 2*MXR4*D4*C4 - 2*MYR4*D4*S4 + IA3;

A34= ZZR4 + MXR4*D4*C4 - MYR4*D4*S4;

%%%

A41= A14;

A42= A24;

A43= A34;

A44= ZZR4 + IA4;%

%%%

%%%MATRIZ DE INERCIA TOTAL%%%

A=[A11 A12 A13 A14;A21 A22 A23 A24;A31 A32 A33 A34;A41 A42 A43 A44];

%VECTOR DE FUERZAS DE GRAVEDAD

FG1=0;

FG2= C2*G3*MXR2 + C23*G3*MXR3- S23*G3*MYR3 + C234*G3*MXR4 - S234*G3*MYR4;

FG3= C23*G3*MXR3 - S23*G3*MYR3 + C234*G3*MXR4 - S234*G3*MYR4;

FG4= C234*G3*MXR4 - S234*G3*MYR4;

%PARES DE SALIDAS

GAMA1= A11*QDP1 + A12*QDP2 + A13*QDP3 + A14*QDP4 + FG1;

GAMA2= A21*QDP1 + A22*QDP2 + A23*QDP3 + A24*QDP4 + FG2;

GAMA3= A31*QDP1 + A32*QDP2 + A33*QDP3 + A34*QDP4 + FG3;

GAMA4= A41*QDP1 + A42*QDP2 + A43*QDP3 + A44*QDP4 + FG4;

GAM(1) = GAMA1;

GAM(2) = GAMA2;

GAM(3) = GAMA3;

GAM(4) = GAMA4;