



ESCUELA DE POSGRADO

Curso:

CONTROL ÓPTIMO

Tema:

Trabajo final: Control Preview

Presentado por:

CONTRERAS MARTINEZ, DIMEL ARTURO

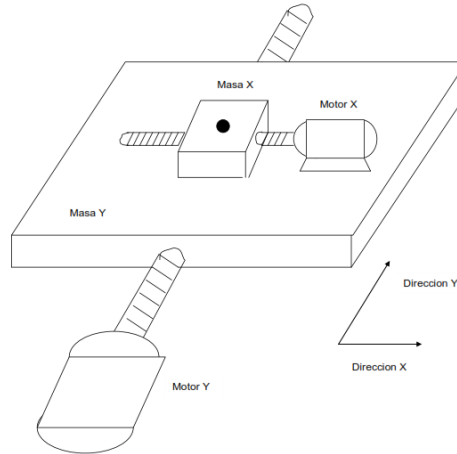
Docente:

DR. ANTONIO MORÁN

2016

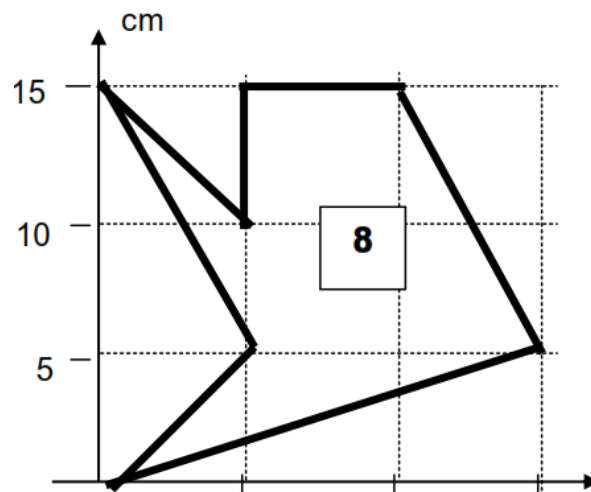
Control Preview para una Mesa XY

Se controlan los motores acoplados a tornillos sinfín de una mesa XY, tal como se muestra en la siguiente figura:



- Los actuadores son: **motor x - motor y**
- Se dispone de sensor de posición de la **masa X y masa Y**.

El objetivo del control es formar la siguiente figura:



Al aplicar control Preview se busca demostrar que a mayor velocidad de ejecución de la figura, el controlador óptimo no puede seguir la referencia y si se añade el control Preview se obtienen mejores resultados.

Parámetros de los motores:

Parámetro	Unidad	Motor X	Motor Y
R	Ohm	1.8	1.92
L	H	0.000159	0.0001801
K_b	Volt-sec/rad	0.05871	0.08925
K_t	N-m/Amp	0.05567	0.09156
d	m	0.022	0.04
p	m	0.0028	0.0042
α	Grados	60	60
Masa mesa	Kg	0.130	0.375
Masa motor + tornillo	Kg	0.218	.572
I	Kg – m ²	0.00004534	0.000098342
Potencia máxima	W	180	350
Voltaje	V	40	50
c	N-sec/m	95	95

Modelo del motor DC con tornillo sinfin



a. Corriente consumo del motor

$$i = \left(\frac{2\pi I}{pK_t} + \frac{mr}{K_t \tan \alpha} \right) \ddot{x} + \left(\frac{cr}{K_t \tan \alpha} \right) \dot{x}$$

Sea:

$$z_1 = \frac{2\pi I}{pK_t} + \frac{mr}{K_t \tan \alpha}$$

$$z_2 = \frac{cr}{K_t \tan \alpha}$$

$$i = z_1 \ddot{x} + z_2 \dot{x}$$

Se obtiene:

$$\ddot{x} = \frac{1}{z_1} i - \frac{z_2}{z_1} \dot{x}$$

b. Voltaje de entrada al motor

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + eb$$

$$eb = K_v \dot{\theta}$$

$$eb = Kb \frac{2\pi}{p} \dot{x}$$

Se obtiene:

$$\frac{di}{dt} = \frac{v}{L} - \frac{Ri}{L} - K_v \frac{2\pi}{Lp} \dot{x}$$

Se obtiene las siguientes ecuaciones de espacio de estado:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{z_2}{z_1} & \frac{1}{z_1} \\ 0 & -K_v \frac{2\pi}{Lp} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix} v + W_f F_{seca}$$

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix}$$

Controlador Optimal con acción integral

Sistema aumentado/ficticio para calcular la ganancia usando acción integral:

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i u + W r_i r$$

$$K_i = [k1 \ k2 \ k3 \ k4]$$

$$Q = \begin{bmatrix} q1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q4 \end{bmatrix}$$

El Controlador

La solución de Riccati:

$$P = \text{are}(A_i, B_i R^{-1} B_i^T, Q)$$

La ganancia del controlador K:

$$K_i = R^{-1} B_i^T P$$

La acción de control u : Para una referencia " r "

$$u = -K_i X_i$$

➤ Sin observador:

$$u = -k_1 * x - k_2 * \dot{x} - k_3 * i - k_4 * \int_0^t (x - r) dt$$

El observador Optimal:

Verificamos la observabilidad del sistema:

$$OBS = [C \quad CA \quad CA^2]$$

$\det(OBS)$ debe ser diferente de 0

$$Qo = \begin{bmatrix} q1o & 0 & 0 \\ 0 & q2o & 0 \\ 0 & 0 & q3o \end{bmatrix}$$

$$Ro = I_{3 \times 3}$$

$Xo \rightarrow$ Estimación de los estados:

$$So = are(A, Ro^{-1}, Qo)$$

Ganancia del observador:

$$L = Ro^{-1} So C^T (CC^T)^{-1}$$

Discretizando las matrices para el observador con tiempo de muestreo dt .

$$[Aok, Bok] = c2d(A - LC, B, dt)$$

$$[Aok, Lok] = c2d(A - LC, L, dt)$$

Se considera que la salida del sistema es x , solo hay sensor de la posición, sin embargo ésta salida también posee ruido:

$$y = x + ruido$$

Se considera un ruido gaussiano: ruido = 0.001 rand(1,1) ya que el sistema debe poseer con poco ruido ya que es una máquina que debe poseer componentes de buena calidad.

El observador que se obtiene:

$$\dot{X}_o = A_{ok} * X_o + B_{ok} * u + L_{ok} * y$$

Condición inicial:

$$X_{o_0} = [0; 0; 0]$$

$$u = -KX_o$$

➤ Acción de control con los estados observados:

$$u = -k_1 * \hat{x} - k_2 * \hat{\dot{x}} - k_3 * \hat{i} - k_4 * \int_0^t (\hat{x} - r) dt$$

El observador de orden reducido

La señal medida puede contener ruido:

$$y = x + ruido$$

$$z_h = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

La expresión para el sistema de orden reducido es:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix} u$$

$$\bar{A}_{11} = \bar{A}(1,1) = 0$$

$$\bar{A}_{12} = \bar{A}(1,2:3) = [1 \quad 0]$$

$$\bar{A}_{21} = \bar{A}(2:3,1) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{A}_{22} = \bar{A}(2:3,2:3) = \begin{bmatrix} \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{bmatrix}$$

$$\bar{B}_1 = \bar{B}(1,1)$$

$$\bar{B}_2 = \bar{B}(2:3,1)$$

El observador de orden reducido es:

- Utilizando la derivada del estado conocido(\dot{y}):

$$\dot{\hat{z}}_h = (\bar{A}_{22} - L\bar{A}_{12})\hat{z}_h + (\bar{A}_{21} - L\bar{A}_{11})y + (\bar{B}_2 - L\bar{B}_1)u + L\dot{y}$$

- Utilizando el cambio de variable:

$$\hat{z}_h = \hat{w} + Ly$$

$$\dot{\hat{w}} = (\bar{A}_{22} - L\bar{A}_{12})\hat{w} + (\bar{A}_{21} - L\bar{A}_{11} + \bar{A}_{22}L - L\bar{A}_{12}L)y + (\bar{B}_2 - L\bar{B}_1)u$$

Código en Matlab de la implementación**TRAYECTORIA POR MAQUINAR**

```

%% referencias
%Figura a maquinar
velx = 0.1;
vely = 0.1;
%Tramo A
X = [0 0.15];
Y = [0 0.05];
t = (abs(X(2)-X(1)))/velx;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r1x = rx';
r1y = ry';

%Tramo B
X = [0.15 0.10];
Y = [0.05 0.15];
t = (abs(X(2)-X(1)))/velx;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r2x = rx';
r2y = ry';

%Tramo C
X = [0.10 0.05];
Y = [0.15 0.15];
t = (abs(X(2)-X(1)))/velx;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r3x = rx';
r3y = ry';

%Tramo D
X = [0.05 0.05];
Y = [0.15 0.10];
t = (abs(Y(2)-Y(1)))/vely;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r4x = rx';
r4y = ry';

```

```

%Tramo E
X = [0.05 0];
Y = [0.10 0.15];
t = (abs(X(2)-X(1)))/velx;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r5x = rx';
r5y = ry';

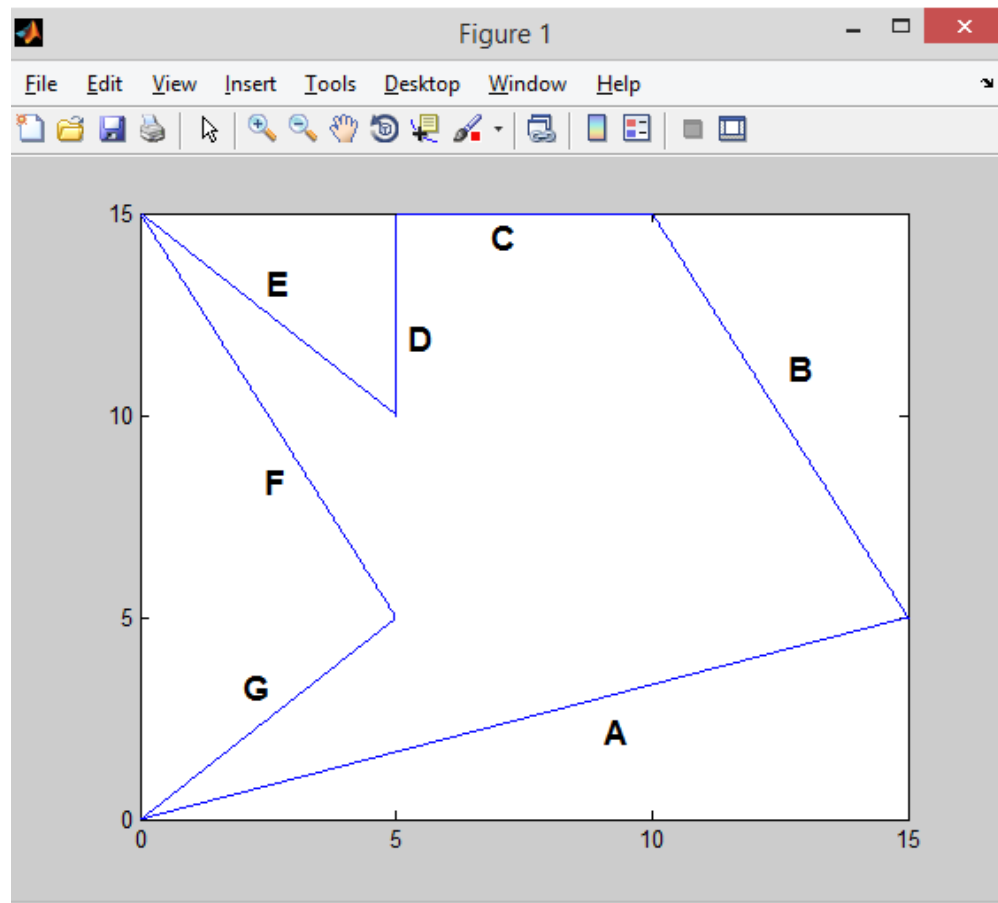
%Tramo F
X = [0 0.05];
Y = [0.15 0.05];
t = (abs(X(2)-X(1)))/velx;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r6x = rx';
r6y = ry';

%Tramo G
X = [0.05 0];
Y = [0.05 0];
t = (abs(X(2)-X(1)))/velx;
N = t/dt;
rx = linspace(X(1),X(2),N);
ry = linspace(Y(1),Y(2),N);
r7x = rx';
r7y = ry';

XX = [r1x;r2x;r3x;r4x;r5x;r6x;r7x];
YY = [r1y;r2y;r3y;r4y;r5y;r6y;r7y];

rx = XX;
ry = YY;

```

Modelo de la planta**Motor X**

```

R = 1.8;
L = 0.000159;
Kt = 0.05567;
Kb = 0.05871;
I = 0.00004534;
p = 0.0028;
m = 0.218;
c = 95;
r = 0.011;
alfa = 60*pi/180;
voltmax = 40;
d = m + 2*pi*I*tan(alfa)/(p*r);

a22 = -c/d;
a23 = Kt*tan(alfa)/(r*d);
a32 = -2*pi*Kb/(p*L);
a33 = -R/L;
b31 = 1/L;
w21 = -1/d;

Ax = [ 0  1  0
       0 a22 a23
       0 a32 a33 ];
Bx = [ 0
       0
       b31 ];
Wfx = [ 0
        w21
        0 ];

```

Motor Y

```

R = 1.92;
L = 0.0001801;
Kt = 0.09156;
Kb = 0.08925;
I = 0.000098342;
p = 0.0042;
m = 0.375 + 0.218 + 0.13;
c = 95;
r = 0.02;
alfa = 60*pi/180;
voltmax = 50;
d = m + 2*pi*I*tan(alfa)/(p*r);

a22 = -c/d;
a23 = Kt*tan(alfa)/(r*d);
a32 = -2*pi*Kb/(p*L);
a33 = -R/L;
b31 = 1/L;
w21 = -1/d;

Ay = [ 0  1  0
       0 a22 a23
       0 a32 a33 ];
By = [ 0
       0
       b31 ];
Wfy = [ 0
        w21
        0 ];

```

Sistema aumentado

```

Aix = [ 0  1  0  0
        0 a22 a23 0
        0 a32 a33 0
        1  0  0  0 ];
Bix = [ 0
        0
        b31
        0 ];
Wrix = [ 0
         0
         0
         -1 ];
Wfix = [ 0
         w21
         0
         0 ];

```

```

Aiy = [ 0  1  0  0
        0 a22 a23 0
        0 a32 a33 0
        1  0  0  0 ];
Biy = [ 0
        0
        b31
        0 ];
Wriy = [ 0
         0
         0
         -1 ];
Wfiy = [ 0
         w21
         0
         0 ];

```

Controlador + Observador Optimal

Con fines prácticos se toman los mismos pesos en para el cálculo del controlador del motor X y motor Y debido a que son plantas similares y mediante pruebas se verificó que tienen el mismo comportamiento cuando se varían los pesos en la misma proporción. Lo mismo para el observador:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Controladores optimales%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
q1 = input('Peso q1 [0]   : ');
q2 = input('Peso q2 [0]   : ');
q3 = input('Peso q3 [0]   : ');
q4 = input('Peso q4 [1e6 - 1e7] : ');
Q = diag([ q1 q2 q3 q4 ]);
RR = [ 1 ];

%Motor x
Px = are(Aix,Bix*inv(RR)*Bix',Q);
Kx = inv(RR)*Bix'*Px;
Acx = Aix - Bix*Kx;

%Motor y
Py = are(Aiy,Biy*inv(RR)*Biy',Q);
Ky = inv(RR)*Biy'*Py;
Acy = Aiy - Biy*Ky;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Observadores Optimales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5
%Motor x
Cx = [ 1   0   0 ];
Obsx = [ Cx;   Cx*Ax;   Cx*Ax*Ax ];
detObsx = det(Obsx)

q1o = input('Peso q1o : ');
q2o = input('Peso q2o : ');
q3o = input('Peso q3o : ');

Qo = diag([ q1o q2o q3o ]);
Ro = eye(3);
So = are(Ax,inv(Ro),Qo);
Lx = inv(Ro)*So*Cx'*inv(Cx*Cx');

xo = [ 0;   0;   0 ];

%Motor y
Cy = [ 1   0   0 ];
Obsy = [ Cy;   Cy*Ay;   Cy*Ay*Ay ];
detObsy = det(Obsy)

Qo = diag([ q1o q2o q3o ]);
Ro = eye(3);
So = are(Ay,inv(Ro),Qo);
Ly = inv(Ro)*So*Cy'*inv(Cy*Cy');

yo = [ 0;   0;   0 ];

```

Simulación

Discretización

```
dt = 0.0005;

%% Discretizacion de la planta
[Axk,Bxk] = c2d(Ax,Bx,dt);
[Ayk,Byk] = c2d(Ay,By,dt);

%% Discretizacion de los observadores
[Axok Bxok] = c2d(Ax-Lx*Cx,Bx,dt);
[Axok Lxok] = c2d(Ax-Lx*Cx,Lx,dt);

[Ayok Byok] = c2d(Ay-Ly*Cy,By,dt);
[Ayok Lyok] = c2d(Ay-Ly*Cy,Ly,dt);
```

Condiciones iniciales

```
x(1,1) = 0;
x(2,1) = 0;
x(3,1) = 0;
kc = 1;
interrx = 0;
Jx = 0;

y(1,1) = 0;
y(2,1) = 0;
y(3,1) = 0;
kc = 1;
interry = 0;
Jy = 0;

%Errores
e1=0;
e2=0;
rxs=0;
rys=0;
```

Bucle simulación:

```

for tt = ti:dt:tf
    %%%Motor X%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5
    x_sal = Cx*x + 0.001*rand(1,1);%medición posicion en motor X
    posx(kc,1) = x(1,1);
    velx(kc,1) = x(2,1);
    ampx(kc,1) = x(3,1);
    timex(kc,1) = tt;
    %Estados estimados
    posxh(kc,1) = xo(1,1);
    velxh(kc,1) = xo(2,1);
    ampxh(kc,1) = xo(3,1);

    interrx = interrx + (xo(1,1)-rx(kc,1))*dt;
    ufbx = -Kx*[ xo' interrx ]';
    ux = ufbx;
    if( ux > voltmax )
        ux = voltmax;
    elseif( ux < -voltmax )
        ux = -voltmax;
    end
    potx(kc,1) = ampx(kc,1)*ux;%Potencia motor X
    potxh(kc,1) = ampxh(kc,1)*ux;%Potencia motor X estimado
    Jx = Jx + 1/2*([ xo' interrx]*Q*[xo' interrx]' + ux'*RR*ux)*dt;
    voltx(kc,1) = ux;
    x = Axk*x + Bxk*ux;
    xo = Axok*xo + Bxok*ux + Lxok*x_sal; %observador

    %%% Motor Y %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    y_sal = Cy*y + 0.001*rand(1,1);%medición posicion en motor X
    posy(kc,1) = y(1,1);
    vely(kc,1) = y(2,1);
    ampy(kc,1) = y(3,1);
    timey(kc,1) = tt;
    %Estados estimados
    posyh(kc,1) = yo(1,1);
    velyh(kc,1) = yo(2,1);
    ampyh(kc,1) = yo(3,1);
    interry = interry + (yo(1,1)-ry(kc,1))*dt;
    ufby = -Ky*[ yo' interry ]';
    uy = ufby;
    if( uy > voltmax )
        uy = voltmax;
    elseif( uy < -voltmax )
        uy = -voltmax;
    end
    poty(kc,1) = ampy(kc,1)*uy;%Potencia motor Y
    potyh(kc,1) = ampyh(kc,1)*uy;%Potencia motor Y estimado
    Jy = Jy + 1/2*([ yo' interry]*Q*[yo' interry]' + uy'*RR*uy)*dt;
    volty(kc,1) = uy;
    y = Ayk*y + Byk*uy;
    yo = Ayok*yo + Byok*uy + Lyok*y_sal; %observador

    %Análisis errores %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    e1=e1+(rx(kc,1)-x(1,1))^2;
    ee1(kc,1)=rx(kc,1)-x(1,1);
    e2=e2+(ry(kc,1)-y(1,1))^2;
    ee2(kc,1)=ry(kc,1)-y(1,1);
    et=e1+e2;

    rxs=rxs+rx(kc,1)^2;
    rys=rys+ry(kc,1)^2;
    rt=rxs+rys;

    kc = kc+ 1;

end

```

Entregar resultados

```

%Indices de desempeño
desemp=sqrt(et/rt)*100
max_error_x=max(ee1)
max_error_y=max(ee2)

%Motor x
Jx = Jx/1e3;
rx = rx(1:nt,1);
maxux = max(voltx);
disp(['Maximo voltaje x: ',num2str(maxux)]);
disp(['Valor de Jx = ',num2str(Jx),'*10^3']);
figure(1); plot(timex,posx,timex,posxh,timex,rx); grid;
title('Posicion');
legend('real','observado','referencia')
figure(2); plot(timex,voltx); grid; title('Voltaje');

%Motor y
Jy = Jy/1e3;
ry = ry(1:nt,1);
maxuy = max(volty);
disp(['Maximo voltaje y: ',num2str(maxuy)]);
disp(['Valor de Jy = ',num2str(Jy),'*10^3']);
figure(3); plot(timey,psy,timey,psyh,timey,ry); grid;
title('Posicion');
legend('real','observado','referencia')
figure(4); plot(timey,volty); grid; title('Voltaje');

%XY
figure(5); plot(rx,ry,posxh,posyh);

%Comparación de potencias
figure(6)
plot(timex,potxh,timey,potyh)
legend('Potxh','Potyh')

```

Requerimientos de precisión:**Desempeño:**

$$E = \sqrt{\frac{\sum(e_x^2 + e_y^2)}{\sum r_x^2 + \sum r_y^2}} \times 100$$

$$E < 5\%$$

Error máximo: $|e_{max}| < 0.01$ **Velocidad:** la máxima posible

Pruebas

Se obtienen las siguientes determinantes de las matrices de controlabilidad y observabilidad:

detObsx = 5.4276e-001

detObsy = 5.8893e-001

De lo cual se verifica que la planta motor X y motor Y son controlables y observables (observador orden completo).

A.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 1e6$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.01m/s

Velocidad Y: 0.01m/s (Tramo D)

- *Resultados:*

desemp = 6.9675e+000

max_error_x = 6.9443e-003

max_error_y = 1.2716e-002

Maximo voltaje x: 1.6419

Valor de Jx = $40.2258 \cdot 10^3$

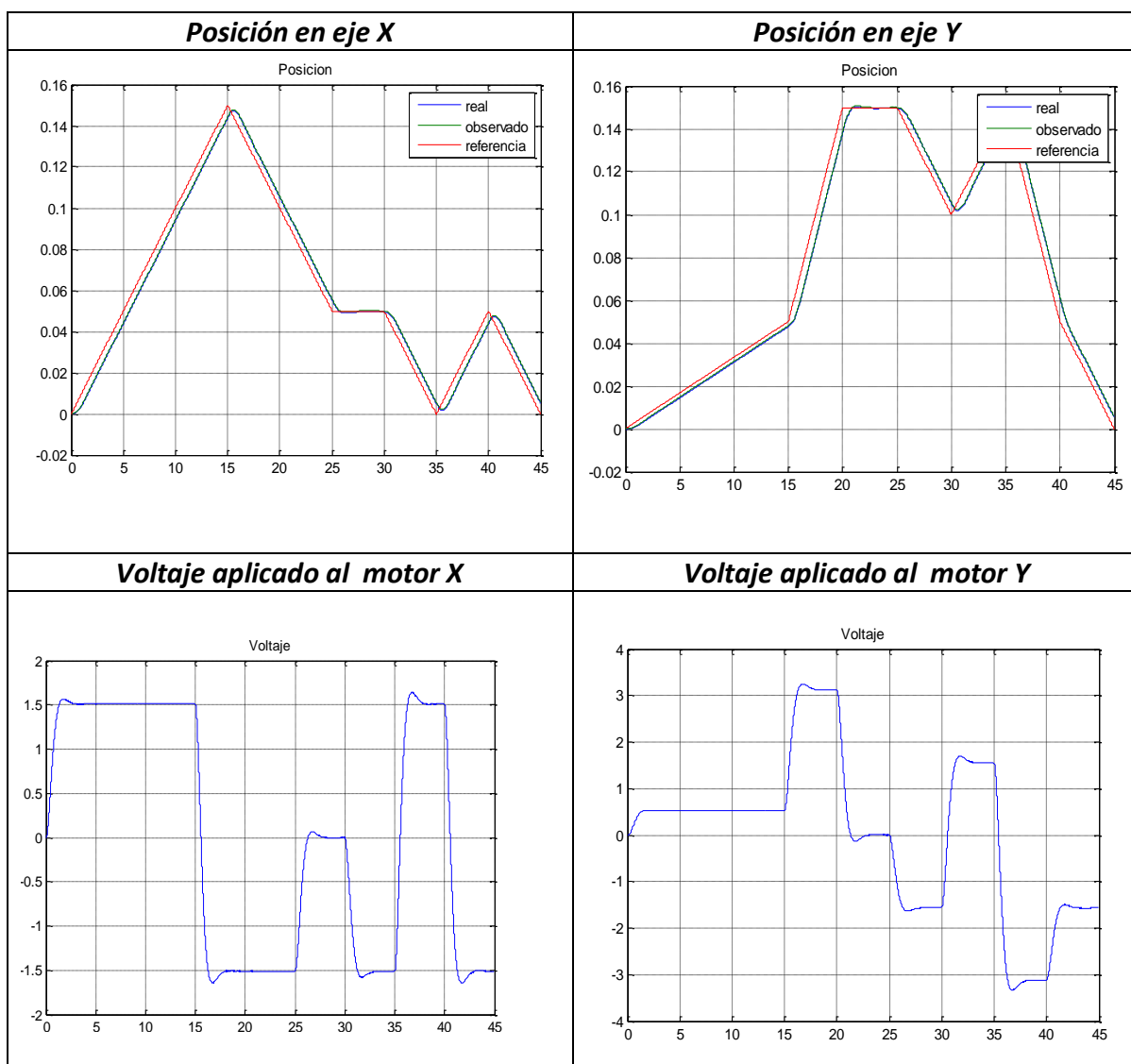
Maximo voltaje y: 3.2467

Valor de Jy = $66.6893 \cdot 10^3$

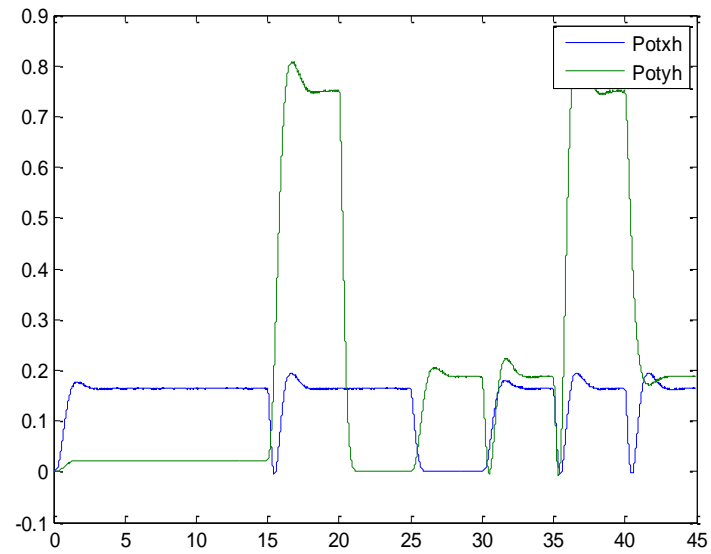
Se puede apreciar que la velocidad aplicada es bastante lenta, sin embargo aun así no se cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También el error máximo en Y es más grande que 0.01 propuesto en el requerimiento.

Se presenta las gráficas:

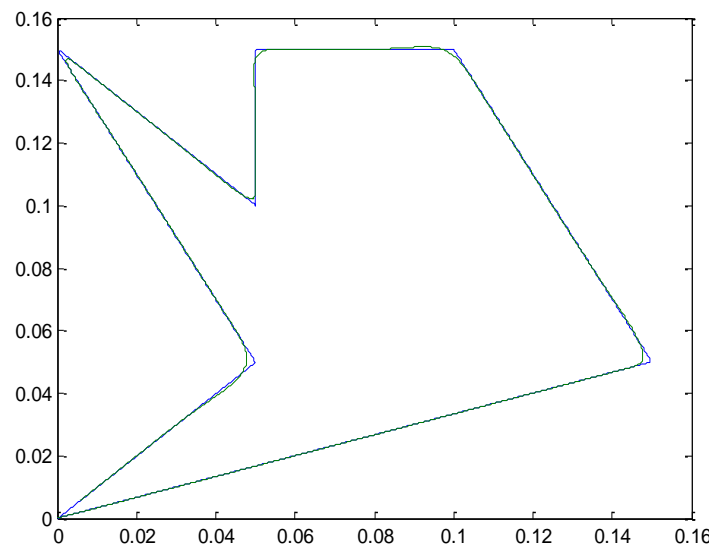
- Señal de control y seguimiento en cada eje



- *Potencia*



- *Resultado del maquinado (XY)*



B.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 1e6$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

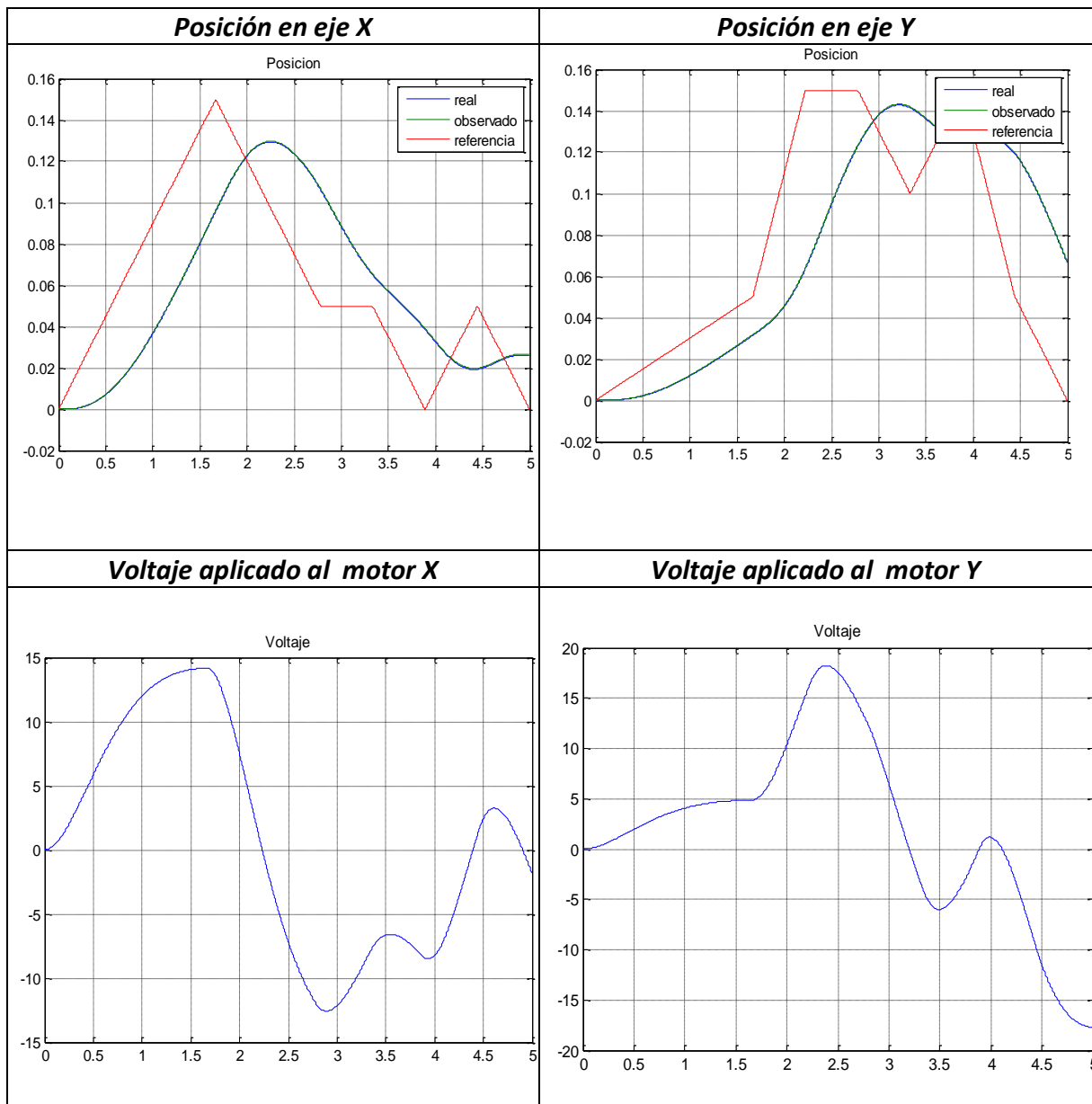
- *Resultados:*

```
desemp = 4.9011e+001  
  
max_error_x = 6.1207e-002  
  
max_error_y = 9.1026e-002  
  
Maximo voltaje x: 15.6352  
Valor de Jx = 4.1473*10^3  
Maximo voltaje y: 18.9185  
Valor de Jy = 6.7714*10^3
```

Se puede apreciar que la velocidad se ha aumentado y no cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También los errores máximos en X - Y son más grandes que 0.01 propuesto en el requerimiento.

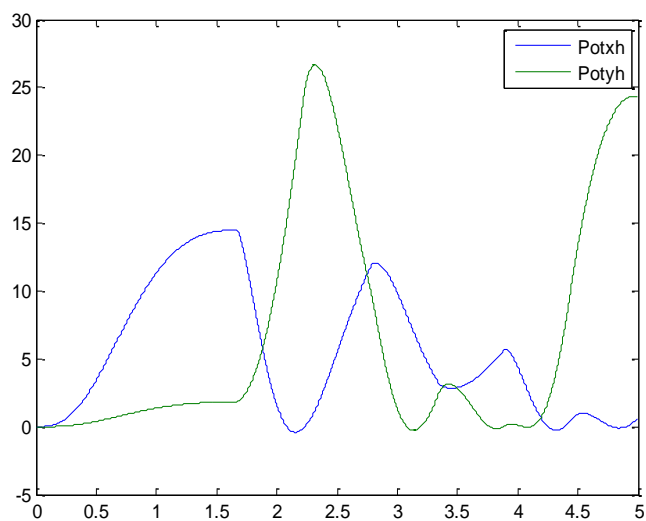
Se presenta las gráficas:

- Señal de control y seguimiento en cada eje

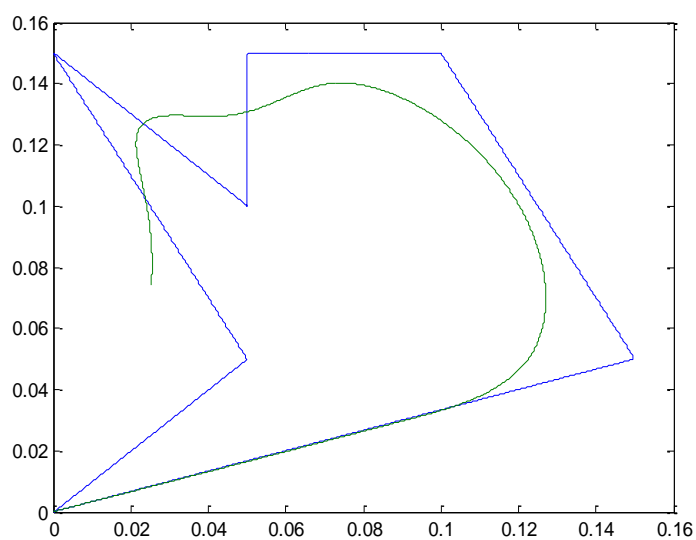


Se puede apreciar un desfase grande entre la posición deseada y posición real.
Los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



- *Resultado del maquinado (XY)*



La gráfica tiene mala precisión y está bastante desfasada respecto a la referencia.

C.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 1e11$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

- Resultados:**

desemp = 5.5745e+000

max_error_x = 5.7031e-003

max_error_y = 1.0164e-002

Maximo voltaje x: 18.5762

Valor de Jx = 2712.5519*10³

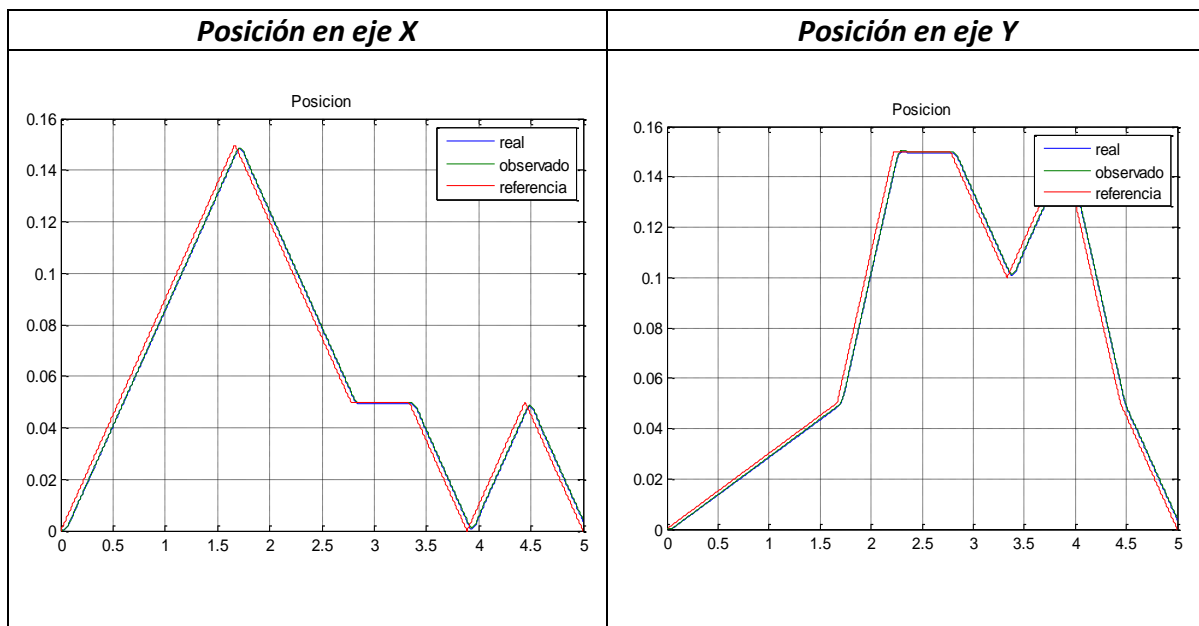
Maximo voltaje y: 34.0821

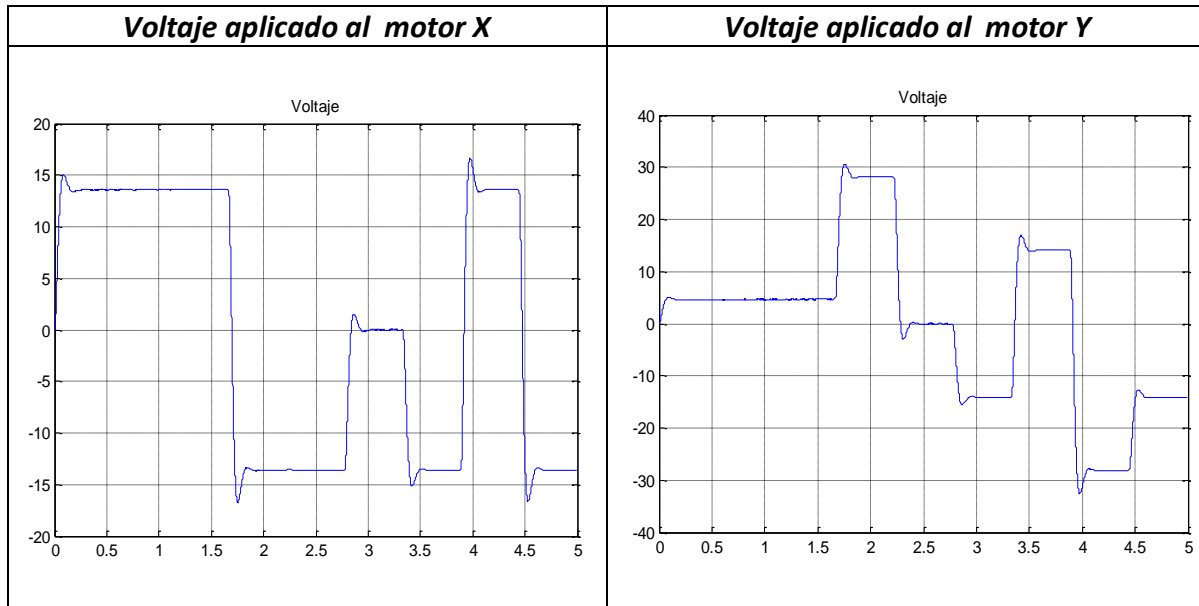
Valor de Jy = 4367.6914*10³

No se cumple el desempeño (sale mayor a 5%). También el erro máximo en Y sale mayor que 0.01 propuesto en el requerimiento.

Se presenta las gráficas:

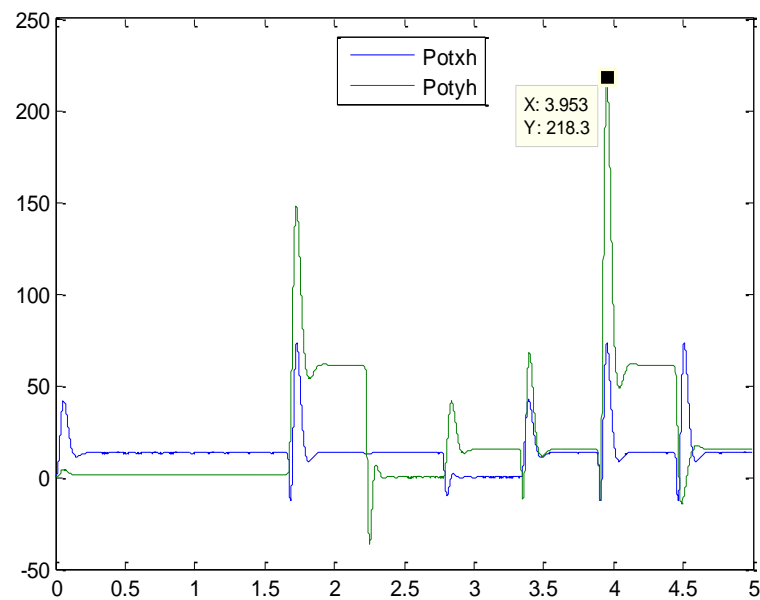
- Señal de control y seguimiento en cada eje**





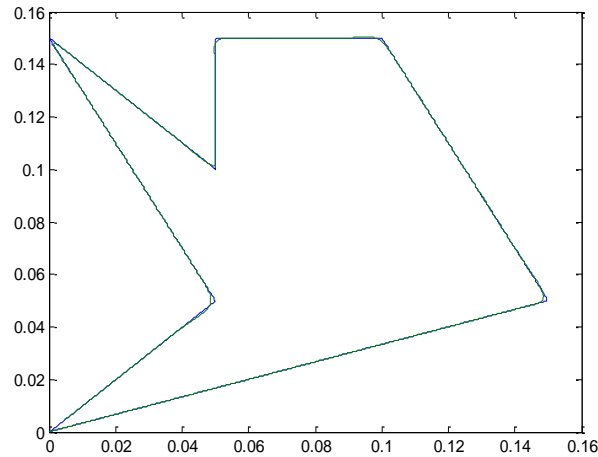
Se puede apreciar que existe un desfase entre la posición deseada y posición real.
Los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



Se puede observar que aparentemente la gráfica es buena sin embargo está desfasada en tiempo respecto a la referencia lo cual hace que no se termine la figura en el tiempo propuesto.

D.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 1e12$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

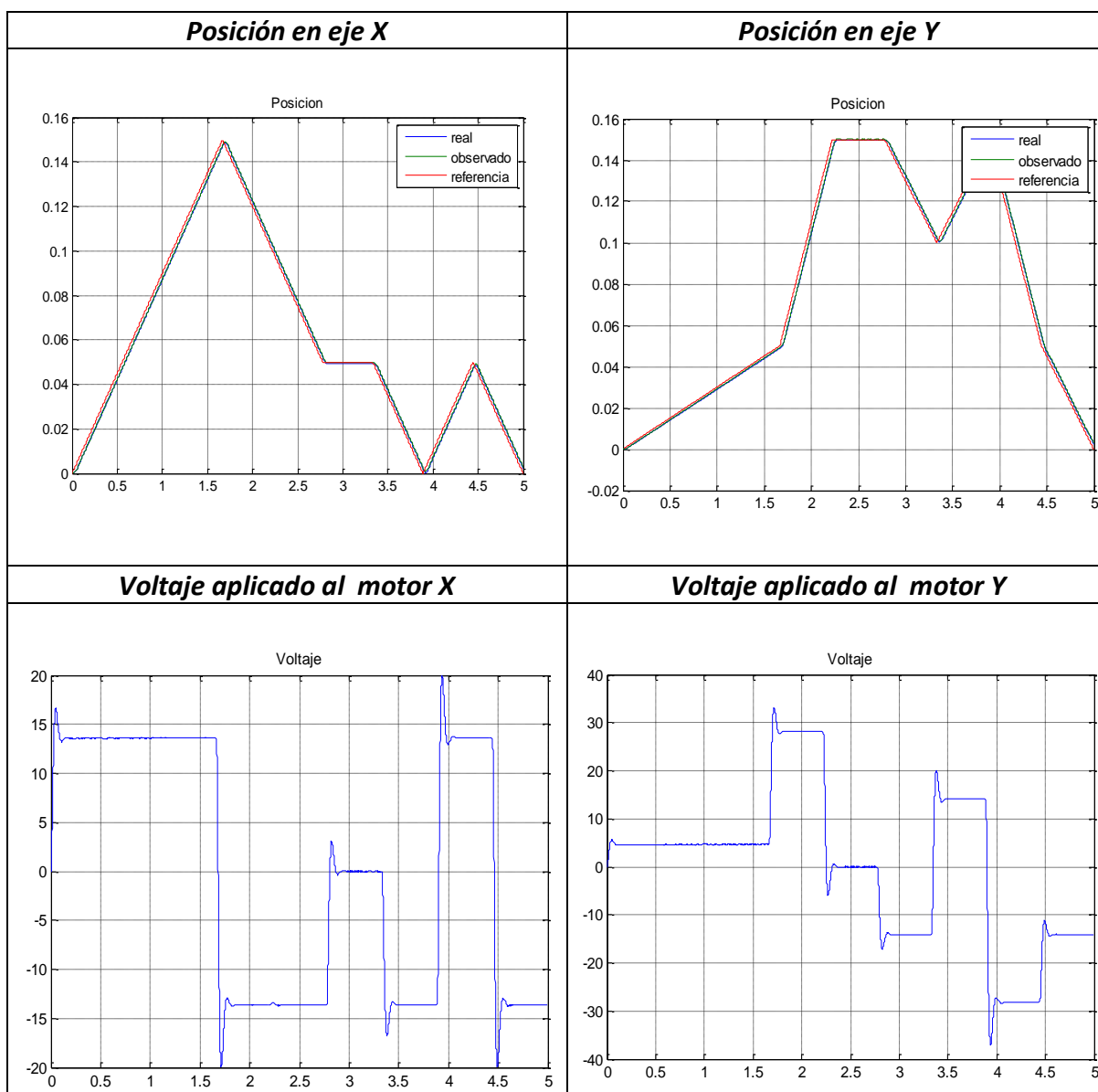
- *Resultados:*

```
desemp = 3.6606e+000  
  
max_error_x = 3.9111e-003  
  
max_error_y = 6.7841e-003  
  
Maximo voltaje x: 22.1201  
Valor de Jx = 11771.8207*10^3  
Maximo voltaje y: 36.8772  
Valor de Jy = 18861.8125*10^3
```

Se cumple el desempeño (menor a 5%). También los errores máximos en X e Y salen menor que 0.01 propuesto en el requerimiento.

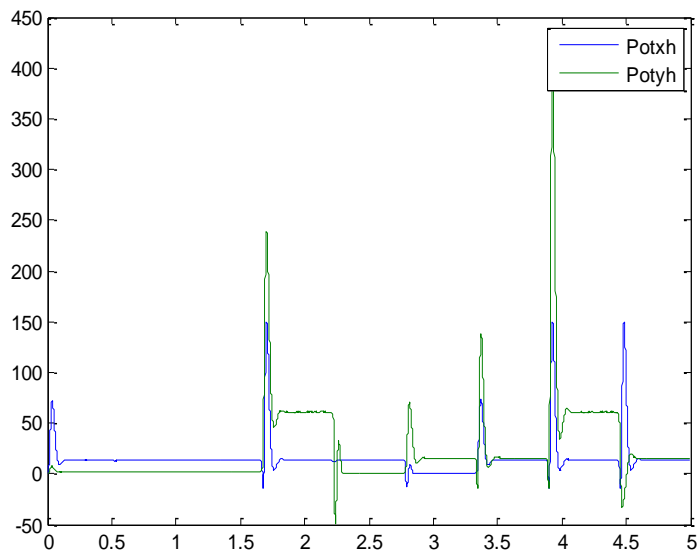
Se presenta las gráficas:

- Señal de control y seguimiento en cada eje



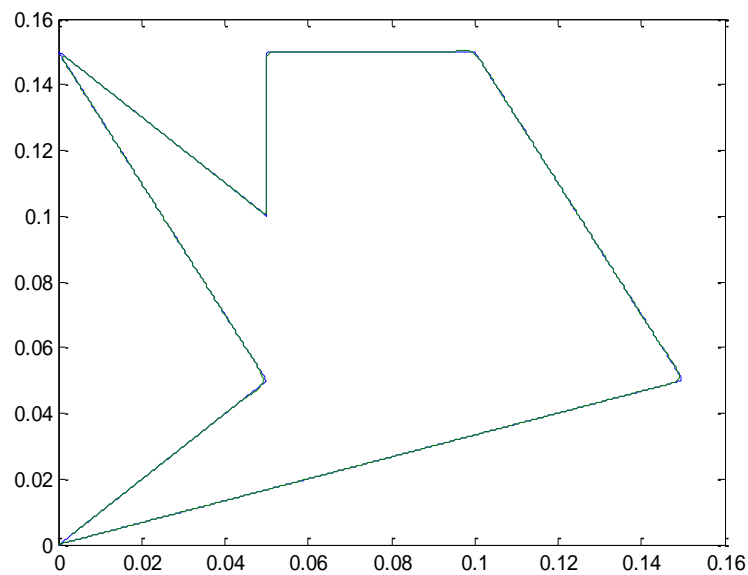
Los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



A pesar que se cumplen los requerimientos, esto conlleva a sobrepicos de potencia mayores a 500W, esto debido a que el peso asignado en la parte integral del controlador es bastante alto ($1e12$).

- *Resultado del maquinado (XY)*



CONTROL PREVIEW

Se trabaja con el sistema aumentado (así como el que se obtiene con acción integral):

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i u + W_{ri} r$$

Además:

$$\begin{aligned} t_p &: \text{tiempo de preview} \\ dt &: \text{diferencial de tiempo} \end{aligned}$$

Numero de posiciones de referencia del Preview:

$$N = \frac{t_p}{dt}$$

$$q_k = \sum_0^{t_p} e^{A^T_{cl} n dt} P W_{ri} r(k+n) dt$$

El vector de N referencias (Ventana de referencias “r” conocidas):

$$r_q = \begin{bmatrix} r_k \\ r_{k+1} \\ r_{k+2} \\ \vdots \\ r_{k+N-1} \end{bmatrix}$$

Ganancia del controlador Preview:

$$K_{pr} = R^{-1} B_i^T$$

La acción de control Preview se calcula:

$$u_{pr} = -K_{pr} q_k r_q$$

La acción de control total está conformada por la parte de Feedback y de Preview:

$$u = u_{fb} + u_{pr}$$

$$u = -K_i X_i - K_{pr} q_k r_q$$

Utilizando Observador Optimal:

$$u = -k_1 \hat{x} - k_2 \dot{\hat{x}} - k_3 \hat{t} - k_4 \int_0^t (\hat{x} - r) dt - K_{pr} q_k r_q$$

Utilizando Observador de orden Reducido:

$$u = -k_1 x - k_2 \hat{x} - k_3 \hat{t} - k_4 \int_0^t (x - r) dt - K_{pr} q_k r_q$$

Controlador Preview – Optimal + Observador Optimal

Con fines prácticos se toman los mismos pesos en para el cálculo del controlador del motor X y motor Y debido a que son plantas similares y mediante pruebas se verificó que tienen el mismo comportamiento cuando se varían los pesos en la misma proporción. Lo mismo para el observador:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Controladores optimales%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
q1 = input('Peso q1 [0]   : ');
q2 = input('Peso q2 [0]   : ');
q3 = input('Peso q3 [0]   : ');
q4 = input('Peso q4 [1e6 - 1e7] : ');
Q = diag([ q1 q2 q3 q4 ]);
RR = [ 1 ];

%Motor x
Px = are(Aix,Bix*inv(RR)*Bix',Q);
Kx = inv(RR)*Bix'*Px;
Acx = Aix - Bix*Kx;

%Motor y
Py = are(Aiy,Biy*inv(RR)*Biy',Q);
Ky = inv(RR)*Biy'*Py;
Acy = Aiy - Biy*Ky;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Observadores Optimales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Motor x
Cx = [ 1   0   0 ];
Obsx = [ Cx;   Cx*Ax;   Cx*Ax*Ax ];
detObsx = det(Obsx)

q1o = input('Peso q1o : ');
q2o = input('Peso q2o : ');
q3o = input('Peso q3o : ');

Qo = diag([ q1o q2o q3o ]);
Ro = eye(3);
So = are(Ax,inv(Ro),Qo);
Lx = inv(Ro)*So*Cx'*inv(Cx*Cx');

xo = [ 0;   0;   0 ];

%Motor y
Cy = [ 1   0   0 ];
Obsy = [ Cy;   Cy*Ay;   Cy*Ay*Ay ];
detObsy = det(Obsy)

Qo = diag([ q1o q2o q3o ]);
Ro = eye(3);
So = are(Ay,inv(Ro),Qo);
Ly = inv(Ro)*So*Cy'*inv(Cy*Cy');

yo = [ 0;   0;   0 ];

```

```

%%%%%%%% Controladores Preview X %%%%%%%%%
tp1 = input('Introducir tiempo preview X: ');
dt = 0.0005;
np = round(tp1/dt);
qqx = Px*Wrix*dt;

for n = 1:np
    qqx = [ qqx  expm(Acx'*n*dt)*Px*Wrix*dt ];
end

Kprx = inv(RR)*Bix';

%%%%%%%% Controladores Preview Y %%%%%%%%%

qqy = Py*Wriy*dt;
tp2 = input('Introducir tiempo preview Y : ');
np = round(tp2/dt);

for n = 1:np
    qqy = [ qqy  expm(Acy'*n*dt)*Py*Wriy*dt ];
end

Kpry = inv(RR)*Biy';

XX = [r1x;r2x;r3x;r4x;r5x;r6x;r7x;zeros(tp1/dt,1)];
YY = [r1y;r2y;r3y;r4y;r5y;r6y;r7y;zeros(tp1/dt,1)];

rx = XX;
ry = YY;
%% Tiempos
ti = 0;
tf = length(rx)*dt - tp1 -1*dt;
t = ti:dt:tf;
t = t';
nt =length(t);

```

Simulación

Discretización

```

%% Discretizacion de las plantas
[Axk,Bxk] = c2d(Ax,Bx,dt);
[Ayk,Byk] = c2d(Ay,By,dt);

%% Discretizacion de los observadores
[Axok Bxok] = c2d(Ax-Lx*Cx,Bx,dt);
[Axok Lxok] = c2d(Ax-Lx*Cx,Lx,dt);

[Ayok Byok] = c2d(Ay-Ly*Cy,By,dt);
[Ayok Lyok] = c2d(Ay-Ly*Cy,Ly,dt);

```

Condiciones iniciales

```

x(1,1) = 0;
x(2,1) = 0;
x(3,1) = 0;
kc = 1;
interrx = 0;
Jx = 0;
y(1,1) = 0;
y(2,1) = 0;
y(3,1) = 0;
kc = 1;
interry = 0;
Jy = 0
%Errores
e1=0;
e2=0;
rxs=0;
rys=0;

```

Bucle simulación para el Motor X:

```

for tt = ti:dt:tf
    x_sal = Cx*x + 0.001*rand(1,1);%medición posicion en motor X
    %Estados reales
    posx(kc,1) = x(1,1);
    velx(kc,1) = x(2,1);
    ampx(kc,1) = x(3,1);
    timex(kc,1) = tt;

    %Estados estimados
    posxh(kc,1) = xo(1,1);
    velxh(kc,1) = xo(2,1);
    ampxh(kc,1) = xo(3,1);

    interrxx = interrxx + (xo(1,1)-rx(kc,1))*dt;
    ufbx = -Kx*[ xo' interrxx ]';
    k1x = kc;
    k2x = k1x + np;
    rqx = rx(k1x:k2x,1);
    uprx = -Kprx*qqx*rqx;
    ux = ufbx + uprx;
    if( ux > voltmax )
        ux = voltmax;
    elseif( ux < -voltmax )
        ux = -voltmax;
    end
    potx(kc,1) = ampx(kc,1)*ux;%Potencia motor X
    potxh(kc,1) = ampxh(kc,1)*ux;%Potencia motor X estimado
    Jx = Jx + 1/2*([ xo' interrxx]*Q*[xo' interrxx]' + ux'*RR*ux)*dt;
    voltx(kc,1) = ux;
    x = Axk*x + Bxk*ux;
    xo = Axok*xo + Bxok*ux + Lxok*x_sal; %observador

    %Análisis errores
    e1=e1+(rx(kc,1)-x(1,1))^2;
    eel(kc,1)=rx(kc,1)-x(1,1);

    rxs=rxs+rx(kc,1)^2;
    kc = kc + 1;

end

```

Bucle simulación para el Motor Y:

```

XX = [r1x;r2x;r3x;r4x;r5x;r6x;r7x;zeros(tp2/dt,1)];
YY = [r1y;r2y;r3y;r4y;r5y;r6y;r7y;zeros(tp2/dt,1)];
rx = XX;
ry = YY;

% Tiempos
ti = 0;
tf = length(ry)*dt - tp2 -1*dt;
t = ti:dt:tf;
t = t';
nt =length(t);

kc = 1;

for tt = ti:dt:tf

    y_sal = Cy*y + 0.001*rand(1,1);%medición posicion en motor Y

    %Estados reales
    posy(kc,1) = y(1,1);
    vely(kc,1) = y(2,1);
    ampy(kc,1) = y(3,1);
    timey(kc,1) = tt;
    %Estados estimados
    posyh(kc,1) = yo(1,1);
    velyh(kc,1) = yo(2,1);
    ampyh(kc,1) = yo(3,1);

    interry = interry + (yo(1,1)-ry(kc,1))*dt;
    ufby = -Ky*[ yo' interry ]';
    k1y = kc;
    k2y = k1y + np;
    rqy = ry(k1y:k2y,1);
    upry = -Kpry*qy*rqy;
    uy = ufby + upry;
    if( uy > voltmax )
        uy = voltmax;
    elseif( uy < -voltmax )
        uy = -voltmax;
    end

    poty(kc,1) = ampy(kc,1)*uy;%Potencia motor Y
    potyh(kc,1) = ampyh(kc,1)*uy;%Potencia motor Y estimado

    Jy = Jy + 1/2*([ yo' interry]*Q*[yo' interry]' + uy'*RR*uy)*dt;
    volty(kc,1) = uy;
    y = Ayk*y + Byk*uy;
    yo = Ayok*yo + Byok*uy + Lyok*y_sal; %observador

    %Analisis errores
    e2=e2+(ry(kc,1)-y(1,1))^2;
    ee2(kc,1)=ry(kc,1)-y(1,1);

    rys=rys+ry(kc,1)^2;
    kc = kc+ 1;

end

```

Entregar resultados

```
et=e1+e2;
rt=rxs+rys;

desemp=sqrt(et/rt)*100
max_error_x=max(ee1)
max_error_y=max(ee2)

%Motor x
Jx = Jx/1e3;
rx = rx(1:nt,1);
maxux = max(voltx);
disp(['Maximo voltaje x: ',num2str(maxux)]);
disp(['Valor de Jx = ',num2str(Jx), '*10^3']);
figure(1); plot(timex,posx,timex,posxh,timex,rx); grid;
title('Posicion');
legend('real','observado','referencia')
figure(2); plot(timex,voltx); grid; title('Voltaje');

%Motor y
Jy = Jy/1e3;
ry = ry(1:nt,1);
maxuy = max(volty);
disp(['Maximo voltaje y: ',num2str(maxuy)]);
disp(['Valor de Jy = ',num2str(Jy), '*10^3']);
figure(3); plot(timey,psy,timey,psyh,timey,ry); grid;
title('Posicion');
legend('real','observado','referencia')
figure(4); plot(timey,volty); grid; title('Voltaje');

%XY
figure(5); plot(rx,ry,posxh,posyh);

%Comparación de potencias
figure(6)
plot(timex,potxh,timey,potyh)
legend('Potxh','Potyh')
```

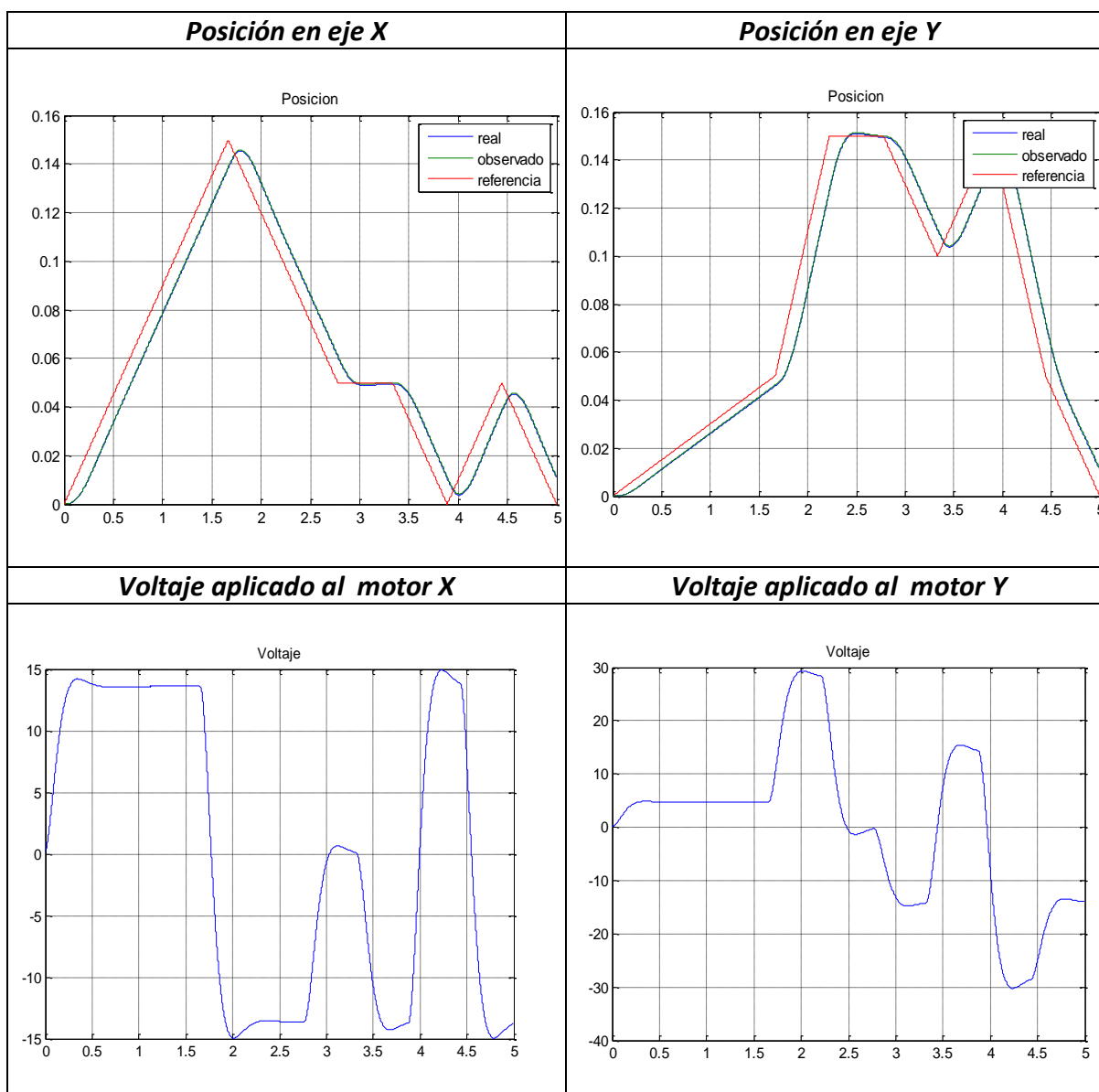

Pruebas**A.****Pesos Controlador:** $q1 = 0$; $q2 = 0$; $q3 = 0$; $q4 = 5e8$ **Pesos Observador:** $q1o = 1$; $q2o = 1$; $q3o = 1$ **Velocidad X:** 0.09m/s**Velocidad Y:** 0.09m/s (Tramo D)**Tiempo preview Tp:** 0.01 s*Resultados:*

```
desemp = 1.3400e+001  
max_error_x = 1.3255e-002  
max_error_y = 2.4436e-002  
Maximo voltaje x: 14.9306  
Valor de Jx = 108.6575*10^3  
Maximo voltaje y: 29.3006  
Valor de Jy = 178.0413*10^3
```

Se puede apreciar que la velocidad se ha aumentado y no cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También los errores máximos en X - Y son más grandes que 0.01 propuesto en el requerimiento.

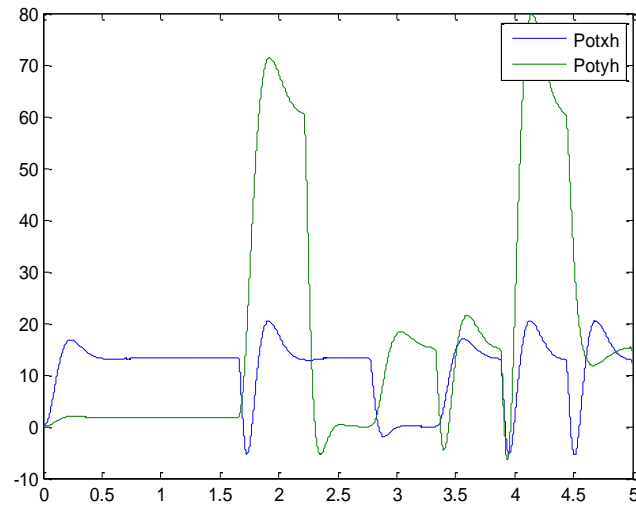
Se presenta las gráficas:

- *Señal de control y seguimiento en cada eje*



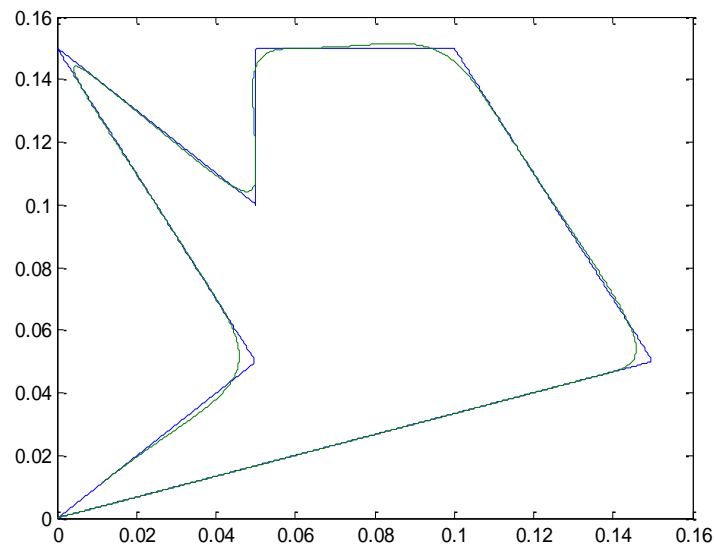
Se puede apreciar que para poco tiempo de preview, existe un desfase grande entre la señal de posición real y de referencia para ambos motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



La figura no se cierra completamente para la velocidad establecida (0.09m/s) ya que el sistema es aún lento, por ello se aumentará el tiempo de preview.

B.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 5e8$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.05 seg

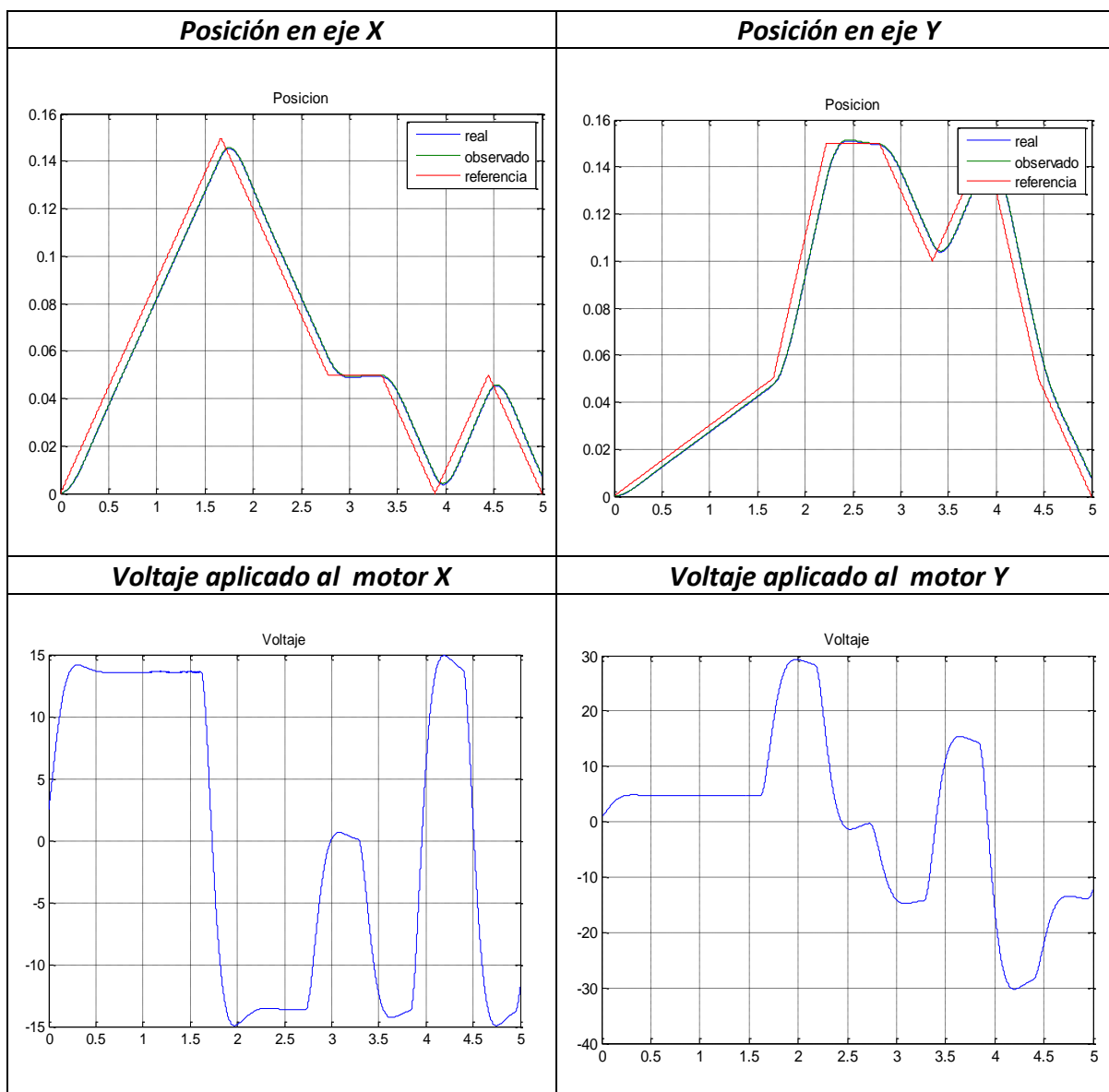
Resultados:

```
desemp = 9.4500e+000  
  
max_error_x = 9.7496e-003  
  
max_error_y = 1.7398e-002  
  
Maximo voltaje x: 14.9317  
Valor de Jx = 52.0698*10^3  
Maximo voltaje y: 29.3038  
Valor de Jy = 85.9527*10^3
```

Se puede apreciar que la velocidad se ha aumentado y no cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También los errores máximos en X - Y son más grandes que 0.01 propuesto en el requerimiento.

Se presenta las gráficas:

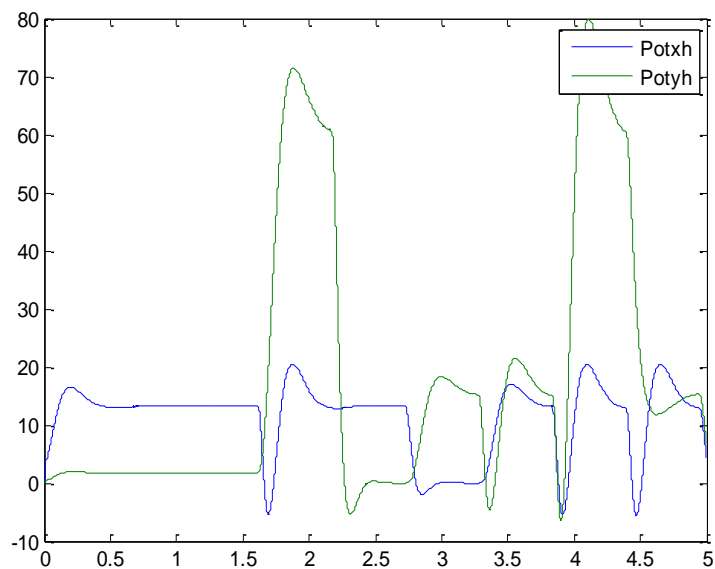
- *Señal de control y seguimiento en cada eje*



Se observa que el desfase se redujo respecto al anterior al aumentar el tiempo de preview.

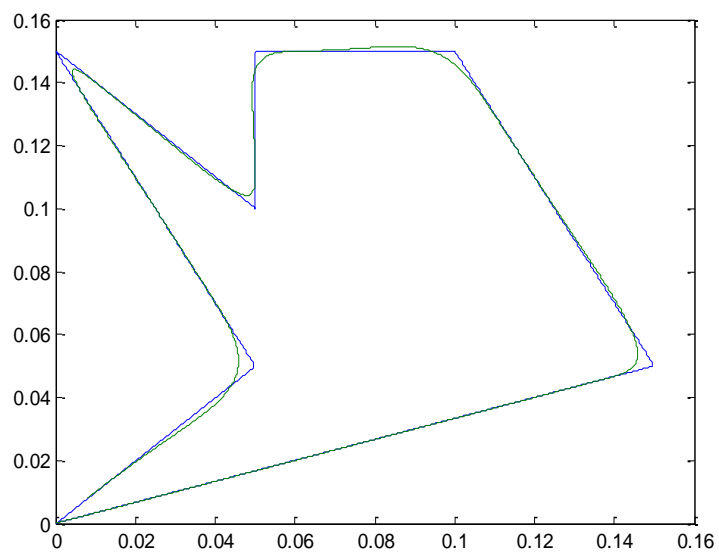
Los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



C.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 5e8$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview T_p : 0.1 seg

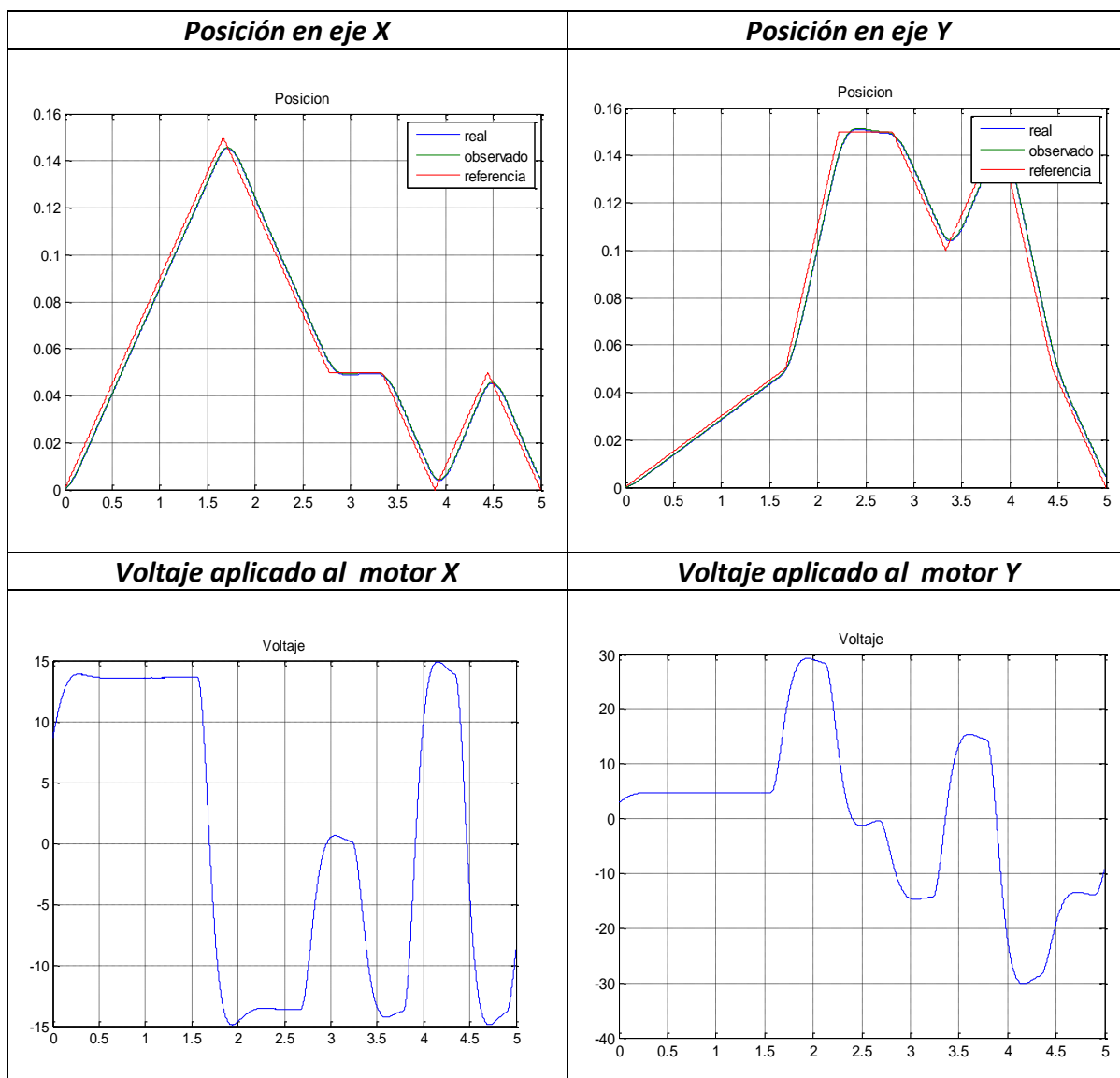
Resultados:

```
desemp = 5.1982e+000  
  
max_error_x = 5.9747e-003  
  
max_error_y = 1.0073e-002  
  
Maximo voltaje x: 14.9025  
Valor de Jx = 14.5984*10^3  
Maximo voltaje y: 29.2741  
Valor de Jy = 24.5382*10^3
```

Se puede apreciar que la velocidad se ha aumentado y no cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También los errores máximos en X - Y son más grandes que 0.01 propuesto en el requerimiento.

Se presenta las gráficas:

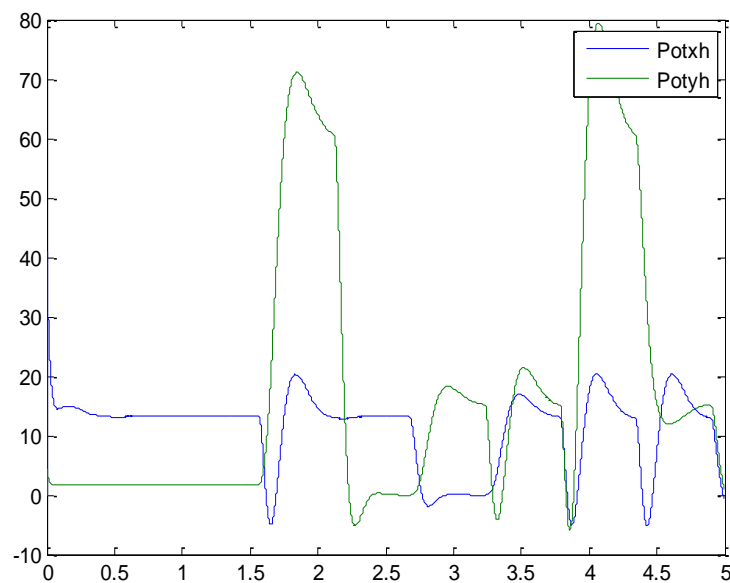
- *Señal de control y seguimiento en cada eje*



El desfase se reduce cada vez más, el sistema al aumentar preview aumenta su ancho de banda.

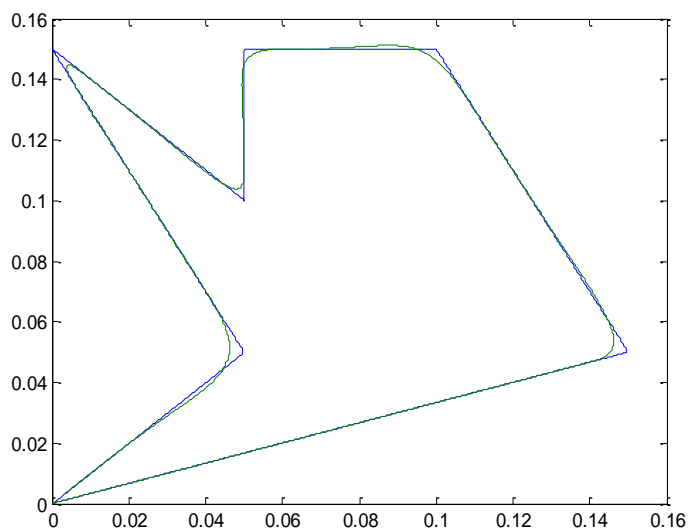
Los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



D.

Pesos Controlador: $q1 = 0$; $q2 = 0$; $q3 = 0$; $q4 = 5e8$

Pesos Observador: $q1o = 1$; $q2o = 1$; $q3o = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.16 seg

Resultados:

desemp = 1.5079e+000

max_error_x = 5.6817e-003

max_error_y = 8.4701e-003

Maximo voltaje x: 18.6955

Valor de Jx = $0.37611 \cdot 10^3$

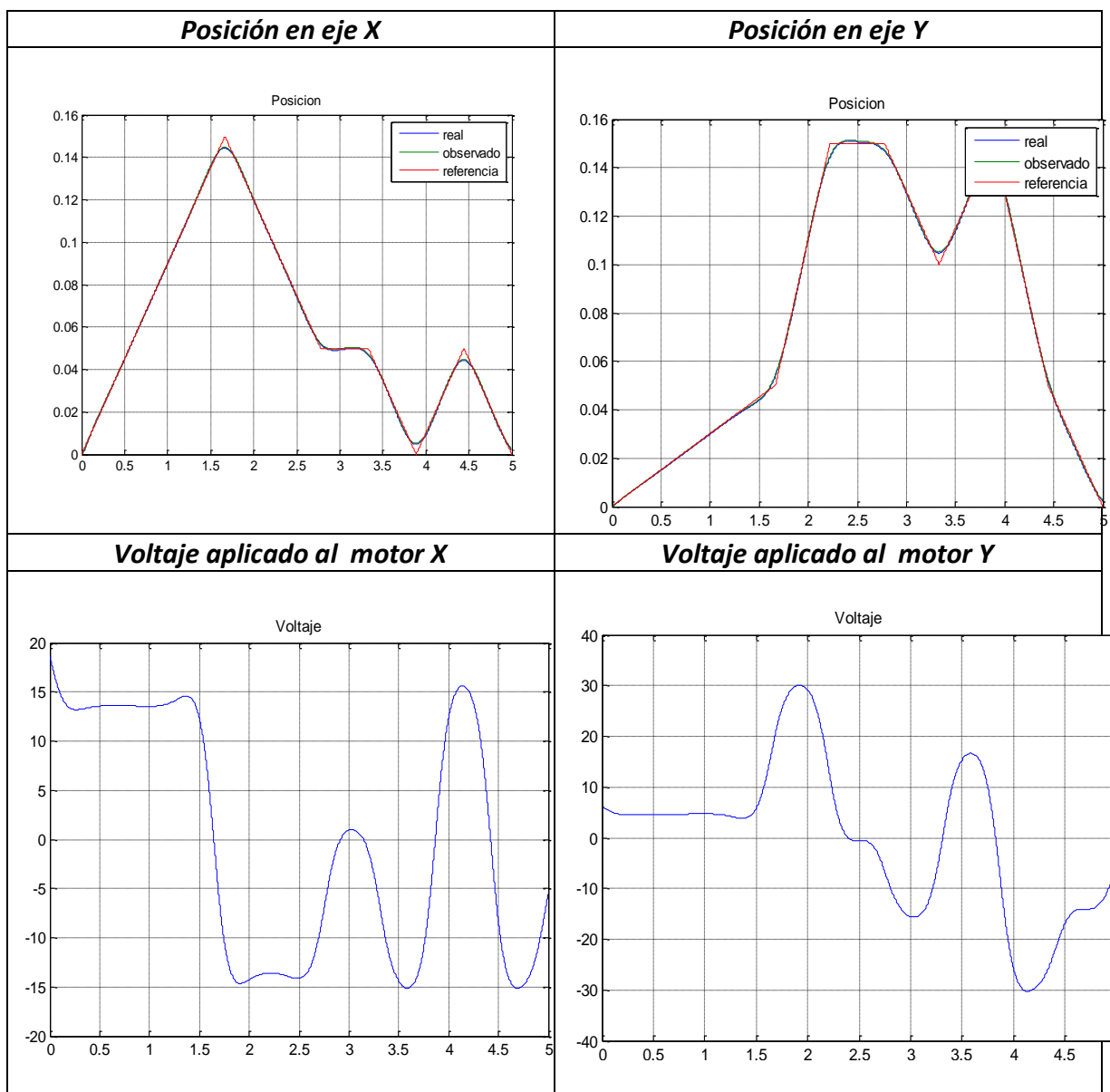
Maximo voltaje y: 30.055

Valor de Jy = $0.56189 \cdot 10^3$

Se cumplen los requerimientos de desempeño y máximo error.

Se presenta las gráficas:

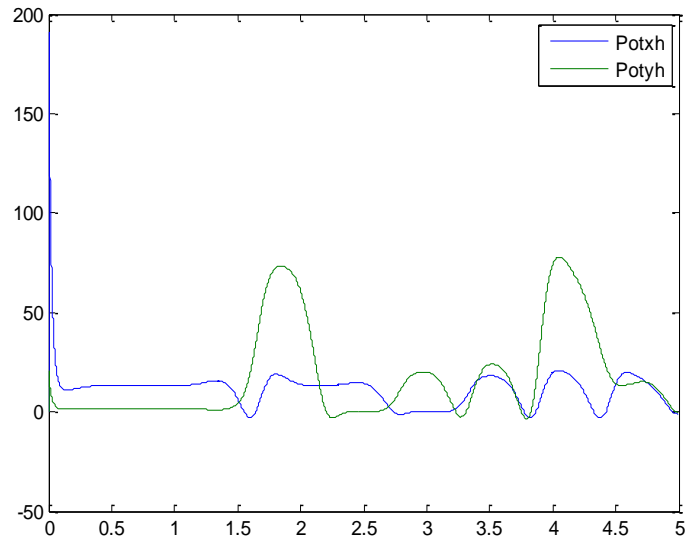
- *Señal de control y seguimiento en cada eje*



Se puede apreciar que existe no existe desfase apreciable entre la posición deseada y posición real.

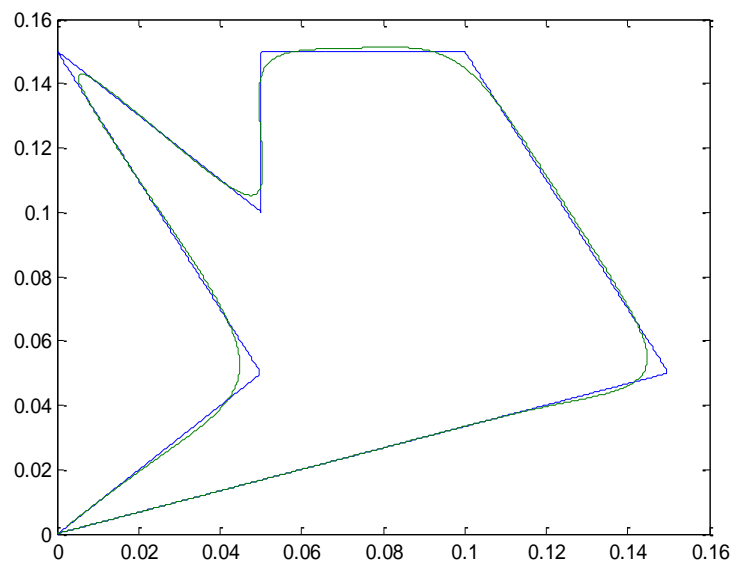
Los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



La potencia máxima que consume el motor X es un poco menor a 180W (en el inicio), y el motor Y es mucho menos a su valor máximo de 350W.

- *Resultado del maquinado (XY)*



E.

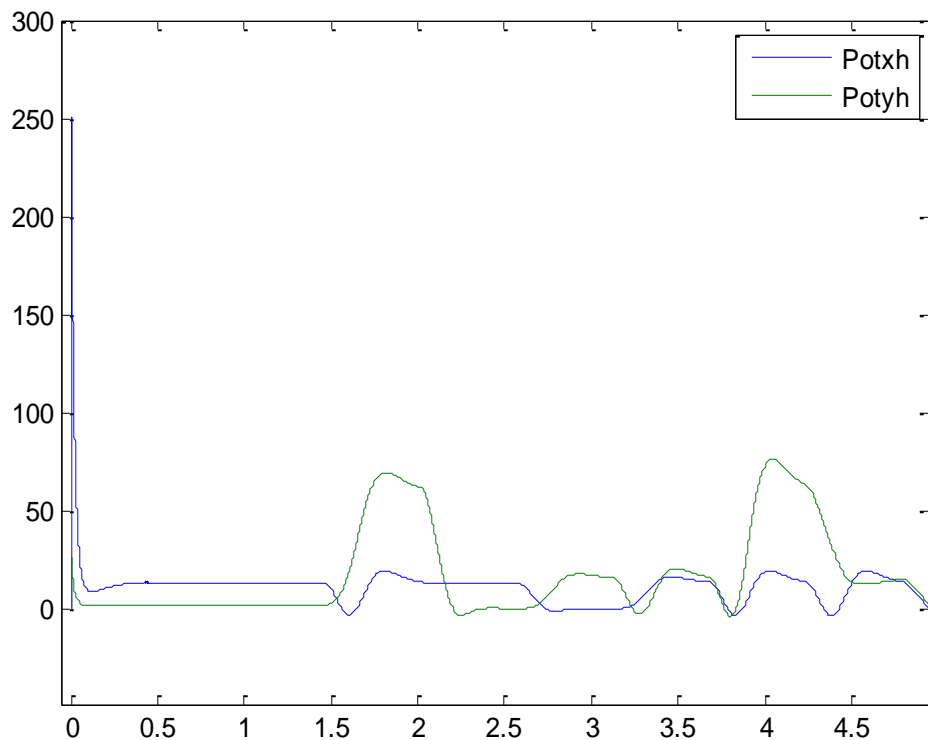
Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 5e8$

Pesos Observador: $q_{1o} = 1$; $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview T_p : 0.2 seg



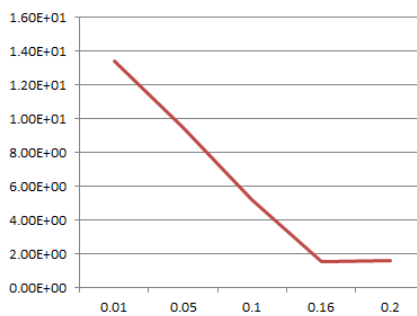
Al incrementar más el tiempo de preview (0.2 seg) el resultado ya no mejora, más aun genera un aumento del pico de potencia del motor X.

Conclusión: El valor máximo de tiempo de preview que conviene es de 0.16seg para la velocidad máxima de $V = 0.09\text{m/s}$.

Comparaciones en el control Preview al aumentar tiempo de preview “tp”:

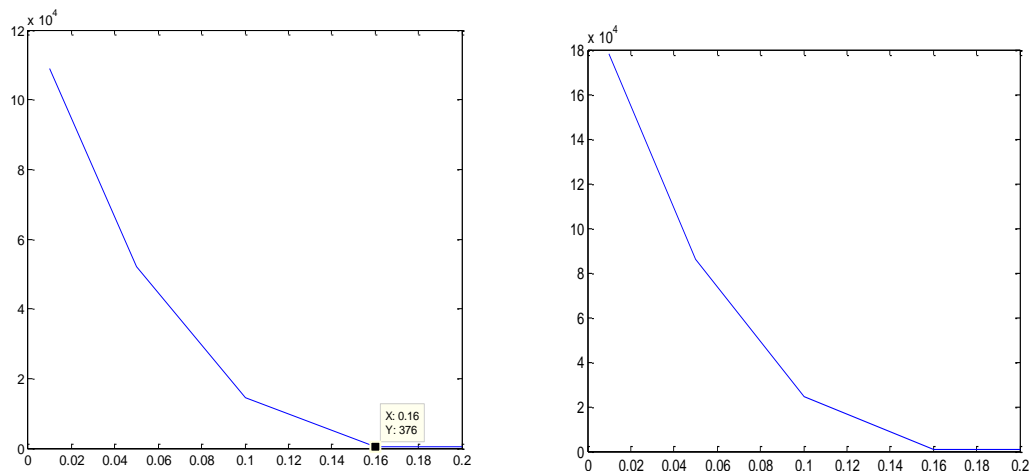
tp(s)	Desemp	Max X	Max Y	Jx	Jy	Max Ux	Max Uy
0.01	1.3400e+001	1.3265e-002	2.4430e-002	108.6572*10 ³	178.0416*10 ³	14.9345	29.3007
0.05	9.4500e+000	9.7356e-003	1.7391e-002	52.07*10 ³	85.9523*10 ³	14.9292	29.3036
0.1	5.1974e+000	5.9654e-003	1.0073e-002	14.5986*10 ³	24.5378*10 ³	14.9019	29.2721
0.16	1.5079e+000	5.6817e-003	8.4701e-003	0.37611*10 ³	0.56189*10 ³	18.6955	30.055
0.2	1.5839e+000	5.9296e-003	8.7609e-003	0.39179*10 ³	0.59393*10 ³	21.4921	29.1026

Desempeño vs. tp



Se puede observar que el desempeño mejora cuando se aumenta el tiempo de preview hasta el tp igual a “0.16seg” a partir del cual no hay mejoras.

Función de costo vs. tp



Función de costo para el control del motor X (izquierda) y motor Y respectivamente.

Controlador Preview – Optimal + Observador de Orden Reducido

Controladores optimales y observadores reducidos para Motor X y Motor Y:

```

q1 = input('Peso q1 [0] : ');
q2 = input('Peso q2 [0] : ');
q3 = input('Peso q3 [0] : ');
q4 = input('Peso q4 [1e6 - 1e7] : ');
Q = diag([ q1 q2 q3 q4 ]);
RR = [ 1 ];

%Motor x
Px = are(Aix,Bix*inv(RR)*Bix',Q);
Kx = inv(RR)*Bix'*Px;
Acx = Aix - Bix*Kx;

%Motor y
Py = are(Aiy,Biy*inv(RR)*Biy',Q);
Ky = inv(RR)*Biy'*Py;
Acy = Aiy - Biy*Ky;

%% Observadores de orden Reducido
%Motor x
A11x = Ax(1,1);    A12x = Ax(1,2:3);
A21x = Ax(2:3,1);  A22x = Ax(2:3,2:3);
B1x = Bx(1,1);
B2x = Bx(2:3,1);
Crx = A12x;

q2o = input('Peso q2o (Vel) : ');
q3o = input('Peso q3o (I) : ');
Qo = diag([ q2o q3o ]);
Sx = are(A22x',Crx'*Crx,Qo);
Lx = Sx*Crx';

Axw = A22x - Lx*A12x;
Bxw = B2x - Lx*B1x;
Lxw = A21x - Lx*A11x + A22x*Lx - Lx*A12x*Lx;

%Motor y
A11y = Ay(1,1);    A12y = Ay(1,2:3);
A21y = Ay(2:3,1);  A22y = Ay(2:3,2:3);
B1y = By(1,1);
B2y = By(2:3,1);
Cry = A12y;

Qo = diag([ q2 q3 ]);
Sy = are(A22y',Cry'*Cry,Qo);
Ly = Sy*Cry';

Ayw = A22y - Ly*A12y;
Byw = B2y - Ly*B1y;
Lyw = A21y - Ly*A11y + A22y*Ly - Ly*A12y*Ly;

```

Control Preview Motor X

```

%% preview X

tp1 = input('Introducir tiempo preview X : ');
dt = 0.0005;
np = round(tp1/dt);
qqx = Px*Wrix*dt;

for n = 1:np
    qqx = [ qqx    expm(Acx'*n*dt)*Px*Wrix*dt ];
end

Kprx = inv(RR)*Bix';

```

Discretizaciones:

```

%% Discretizaciones
% Discretizacion de la planta
[Axk,Bxk] = c2d(Ax,Bx,dt);
[Ayk,Byk] = c2d(Ay,By,dt);

% Discretizacion de los observadores reducidos
%Motor X
[Axhk,Bxhk] = c2d(Axw,Bxw,dt);
[Axhk,Lxhk] = c2d(Axw,Lxw,dt);
wxh = [ 0
        0 ];
%Motor Y
[Ayhk,Byhk] = c2d(Ayw,Byw,dt);
[Ayhk,Lyhk] = c2d(Ayw,Lyw,dt);
wyh = [ 0
        0 ];
C = [ 1  0  0 ];

```

Tiempo para simulación de preview X

```

%% Tiempos
ti = 0;
tf = length(rx)*dt - tp1 -1*dt;
t = ti:dt:tf;
t = t';
nt =length(t);

```

Condiciones iniciales:


```

x(1,1) = 0;
x(2,1) = 0;
x(3,1) = 0;
kc = 1;
interrx = 0;
Jx = 0;

y(1,1) = 0;
y(2,1) = 0;
y(3,1) = 0;
kc = 1;
interry = 0;
Jy = 0;

%Errores
e1=0;
e2=0;
rxs=0;
rys=0;

```

Bucle simulación para motor X:

```

for tt = ti:dt:tf
    x_sal(kc,1) = C*x + 0.001*rand(1,1);%medición posicion motor X
    xh = wxh + Lx*x_sal(kc,1);%Cambio de w->x
    %Estados reales
    posx(kc,1) = x(1,1);
    velx(kc,1) = x(2,1);
    ampx(kc,1) = x(3,1);
    timex(kc,1) = tt;
    %Estados estimados
    velxh(kc,1) = xh(1,1);
    ampxh(kc,1) = xh(2,1);
    interrxx = interrxx + (x_sal(kc,1)-rx(kc,1))*dt;
    xo = [x_sal(kc,1);xh];
    ufbx = -Kx*[ xo' interrxx ]';
    klx = kc;
    k2x = klx + np;
    rqx = rx(klx:k2x,1);
    uprx = -Kprx*qqx*rqx;
    ux = ufbx + uprx;
    if( ux > voltmax )
        ux = voltmax;
    elseif( ux < -voltmax )
        ux = -voltmax;
    end
    potx(kc,1) = ampx(kc,1)*ux;%Potencia motor X
    potxh(kc,1) = ampxh(kc,1)*ux;%Potencia motor X estimado
    Jx = Jx + 1/2*([ xo' interrxx]*Q*[xo' interrxx]' + ux'*RR*ux)*dt;
    voltx(kc,1) = ux;
    x = Axk*x + Bxk*ux;
    wxh = Axhk*wxh + Bxhk*ux + Lxhk*x_sal(kc,1); %Observador Reduc
    %Análisis errores
    e1=e1+(rx(kc,1)-x(1,1))^2;
    ee1(kc,1)=rx(kc,1)-x(1,1);
    rxs=rxs+rx(kc,1)^2;
    kc = kc+ 1;
end

```

Control Preview Motor Y

```
qqy = Py*Wriy*dt;  
  
tp2 = input('Introducir tiempo preview Y : ');  
dt = 0.0005;  
np = round(tp2/dt);  
  
for n = 1:np  
    qqy = [ qqy expm(Acy'*n*dt)*Py*Wriy*dt ];  
end  
  
Kpry = inv(RR)*Biy';  
  
XX = [r1x;r2x;r3x;r4x;r5x;r6x;r7x;zeros(tp2/dt,1)];  
YY = [r1y;r2y;r3y;r4y;r5y;r6y;r7y;zeros(tp2/dt,1)];  
  
rx = XX;  
ry = YY;
```

Tiempo para simulación de preview X

```
ti = 0;  
tf = length(ry)*dt - tp2 -1*dt;  
t = ti:dt:tf;  
t = t';  
nt =length(t);  
  
kc = 1;
```

Bucle simulación para motor Y:

```

for tt = ti:dt:tf

    y_sal(kc,1) = C*y + 0.001*rand(1,1); %medición posicion en motor X
    yh = wyh + Ly*y_sal(kc,1); %Cambio de w->y
    %Estados reales
    posy(kc,1) = y(1,1);
    vely(kc,1) = y(2,1);
    ampy(kc,1) = y(3,1);
    timey(kc,1) = tt;

    %Estados estimados
    velyh(kc,1) = yh(1,1);
    ampyh(kc,1) = yh(2,1);

    interry = interry + (y_sal(kc,1)-ry(kc,1))*dt;
    yo = [y_sal(kc,1);yh];
    ufby = -Ky*[ yo' interry ]';

    k1y = kc;
    k2y = k1y + np;
    rqy = ry(k1y:k2y,1);
    upry = -Kpry*qy*rqy;
    uy = ufby + upry;
    if( uy > voltmax )
        uy = voltmax;
    elseif( uy < -voltmax )
        uy = -voltmax;
    end
    poty(kc,1) = ampy(kc,1)*uy; %Potencia motor Y
    potyh(kc,1) = ampyh(kc,1)*uy; %Potencia motor Y estimado

    Jy = Jy + 1/2*([ yo' interry]*Q*[yo' interry]' + uy'*RR*uy)*dt;
    volty(kc,1) = uy;
    y = Ayk*y + Byk*uy;
    wyh = Ayhk*wyh + Byhk*uy + Lyhk*y_sal(kc,1); %Observador reducido

    %Análisis errores

    e2=e2+(ry(kc,1)-y(1,1))^2;
    ee2(kc,1)=ry(kc,1)-y(1,1);

    rys=rys+ry(kc,1)^2;
    kc = kc+ 1;

end

```

Entregar resultados

```
et=e1+e2;
rt=rxs+rys;

desemp=sqrt(et/rt)*100
max_error_x=max(ee1)
max_error_y=max(ee2)

%Motor x
Jx = Jx/1e3;
rx = rx(1:nt,1);
maxux = max(voltx);
disp(['Maximo voltaje x: ',num2str(maxux)]);
disp(['Valor de Jx = ',num2str(Jx),'*10^3']);
figure(1); plot(timex,posx,timex,x_sal,timex,rx); grid;
title('Posicion');
legend('real','observado','referencia')
figure(2); plot(timex,voltx); grid; title('Voltaje');

%Motor y
Jy = Jy/1e3;
ry = ry(1:nt,1);
maxuy = max(volty);
disp(['Maximo voltaje y: ',num2str(maxuy)]);
disp(['Valor de Jy = ',num2str(Jy),'*10^3']);
figure(3); plot(timey,posy,timey,y_sal,timey,ry); grid;
title('Posicion');
legend('real','observado','referencia')
figure(4); plot(timey,volty); grid; title('Voltaje');

%XY
figure(5); plot(rx,ry,x_sal,y_sal);

%Comparación de potencias
figure(6)
plot(timex,potxh,timey,potyh)
legend('Potxh','Potyh')
```

Pruebas

A.

Pesos Controlador: $q1 = 0$; $q2 = 0$; $q3 = 0$; $q4 = 5e8$

Pesos Observador Reducido: $q2o = 1$; $q3o = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.01 s

- *Resultados:*

```
desemp = 1.3473e+001
```

```
max_error_x = 1.3275e-002
```

```
max_error_y = 2.4531e-002
```

```
Maximo voltaje x: 16.4612
```

```
Valor de Jx = 108.6771*10^3
```

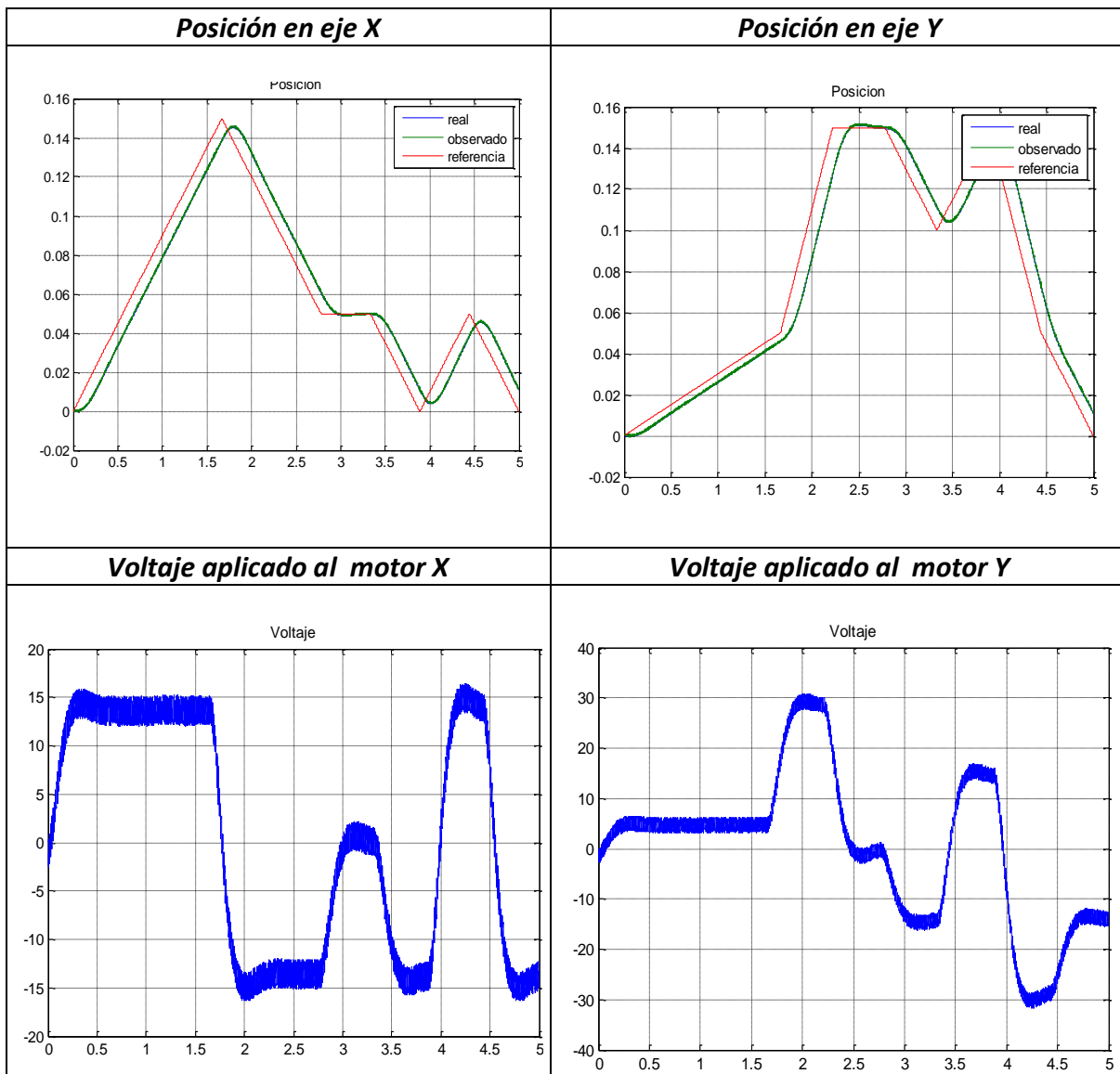
```
Maximo voltaje y: 30.7972
```

```
Valor de Jy = 178.0547*10^3
```

Se puede apreciar que la velocidad se ha aumentado y no cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También los errores máximos en X - Y son más grandes que 0.01 propuesto en el requerimiento.

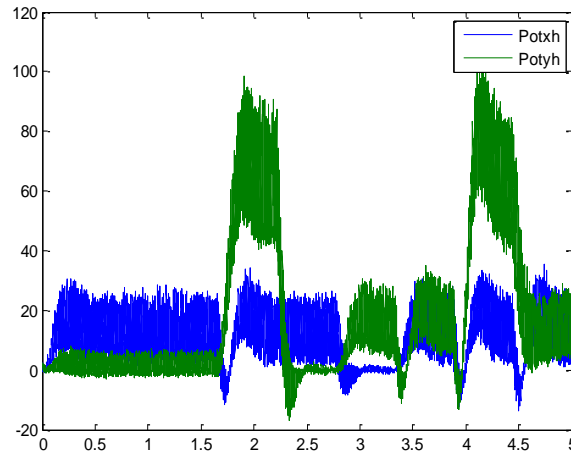
Se presenta las gráficas:

- Señal de control y posición en cada eje



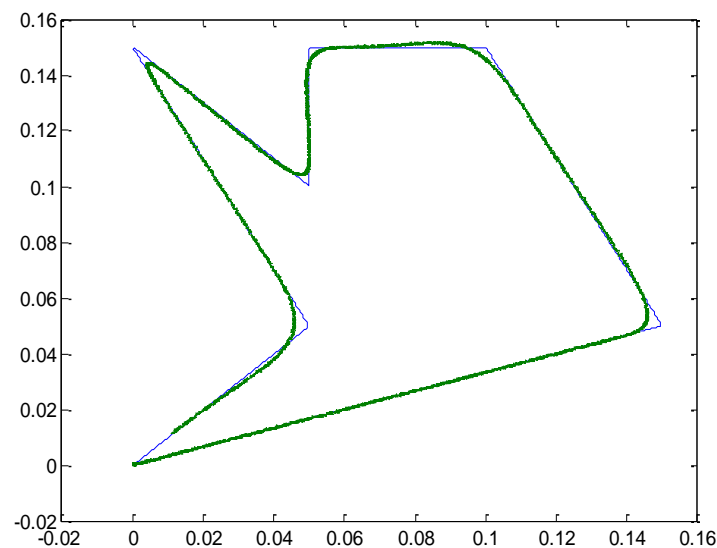
Se puede apreciar que existe un desfase entre la posición deseada y posición real. Los voltajes aplicados se visualizan ruidosos ya que la medida de la posición posee ruido, sin embargo están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



Se puede observar que la gráfica no cierra ya que le falta velocidad al sistema, por ello se aumentará el tiempo de preview.

Por otro lado se puede visualizar el ruido sobre la gráfica.

B.

Pesos Controlador: $q_1 = 0$; $q_2 = 0$; $q_3 = 0$; $q_4 = 5e8$

Pesos Reducido: $q_{2o} = 1$; $q_{3o} = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.05 s

- *Resultados:*

desemp = 9.5270e+000

max_error_x = 9.7347e-003

max_error_y = 1.7507e-002

Maximo voltaje x: 16.443

Valor de Jx = $52.0843 \cdot 10^3$

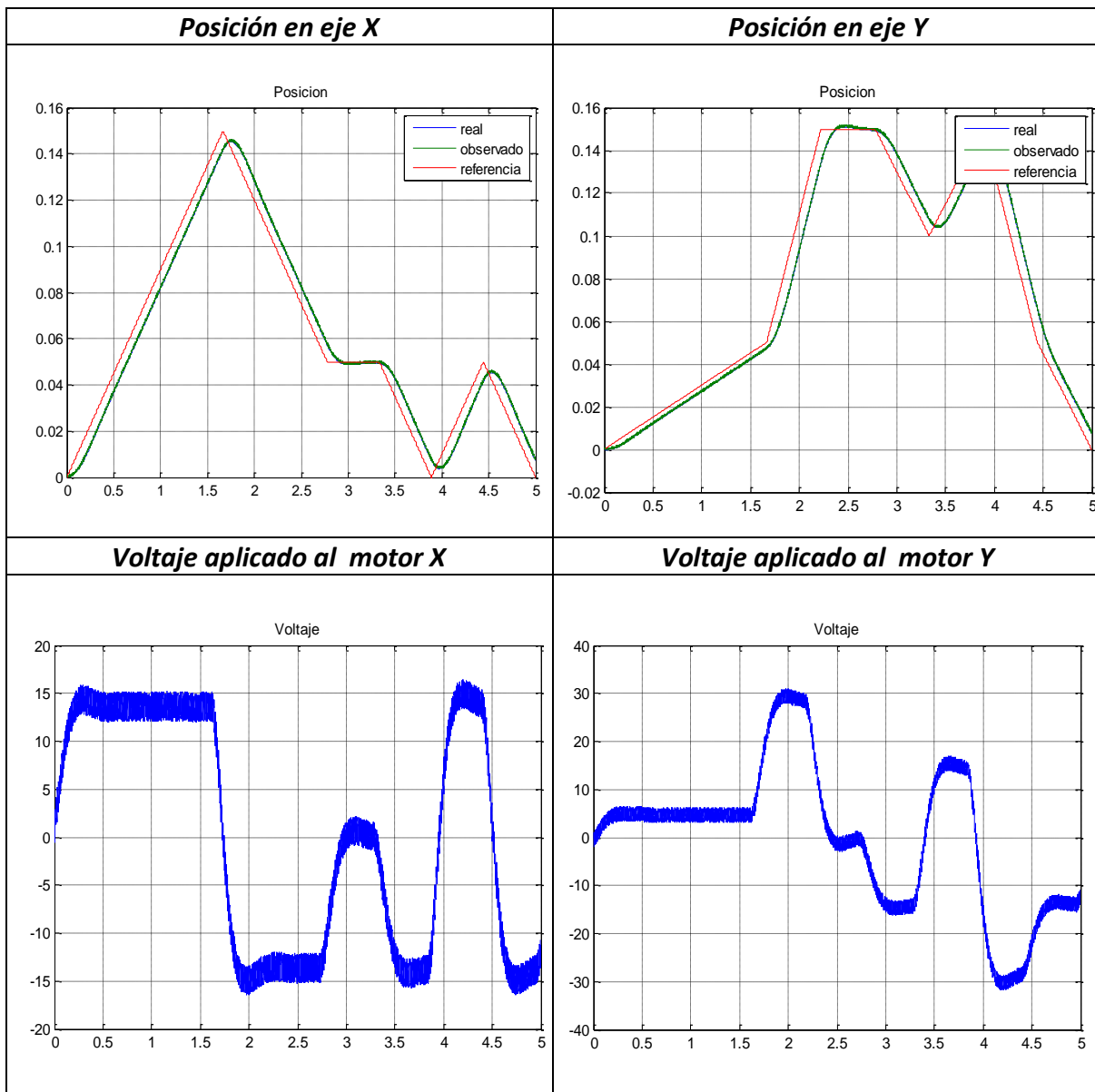
Maximo voltaje y: 30.9054

Valor de Jy = $85.9634 \cdot 10^3$

Se puede apreciar que no se cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También el error máximo en Y es más grande que 0.01 propuesto en el requerimiento.

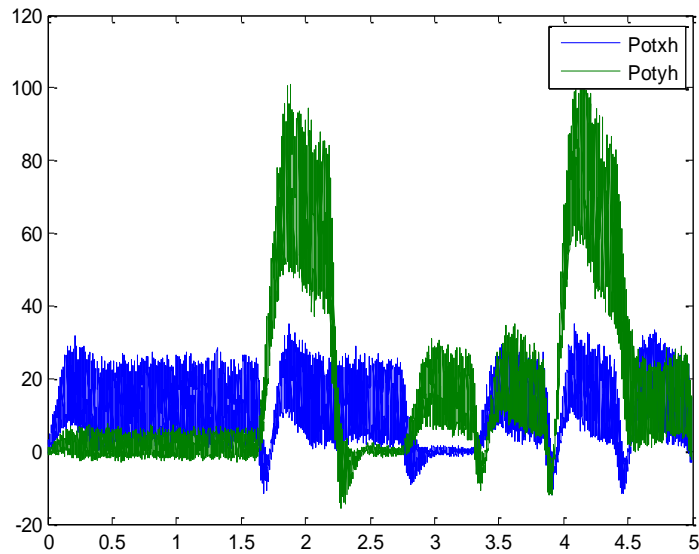
Se presenta las gráficas:

- Señal de control y posición en cada eje



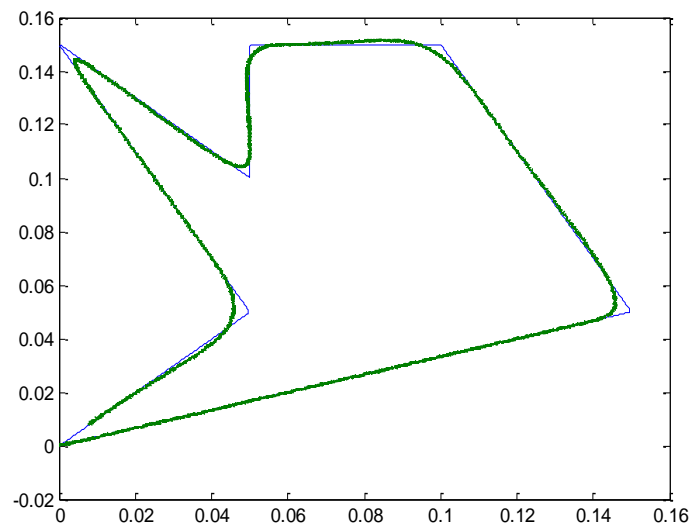
Se puede apreciar que existe un desfase entre la posición deseada y posición real. Los voltajes aplicados se visualizan ruidosos ya que la medida de la posición posee ruido, sin embargo están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



Se puede observar que la gráfica se completa más que la anterior gráfica (T_p : 0.01 s).

C.

Pesos Controlador: $q1 = 0$; $q2 = 0$; $q3 = 0$; $q4 = 5e8$

Pesos Observador Reducido: $q2o = 1$; $q3o = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.1 s

- *Resultados:*

desemp = 5.2731e+000

max_error_x = 6.0194e-003

max_error_y = 1.0132e-002

Maximo voltaje x: 16.424

Valor de Jx = $14.6067 \cdot 10^3$

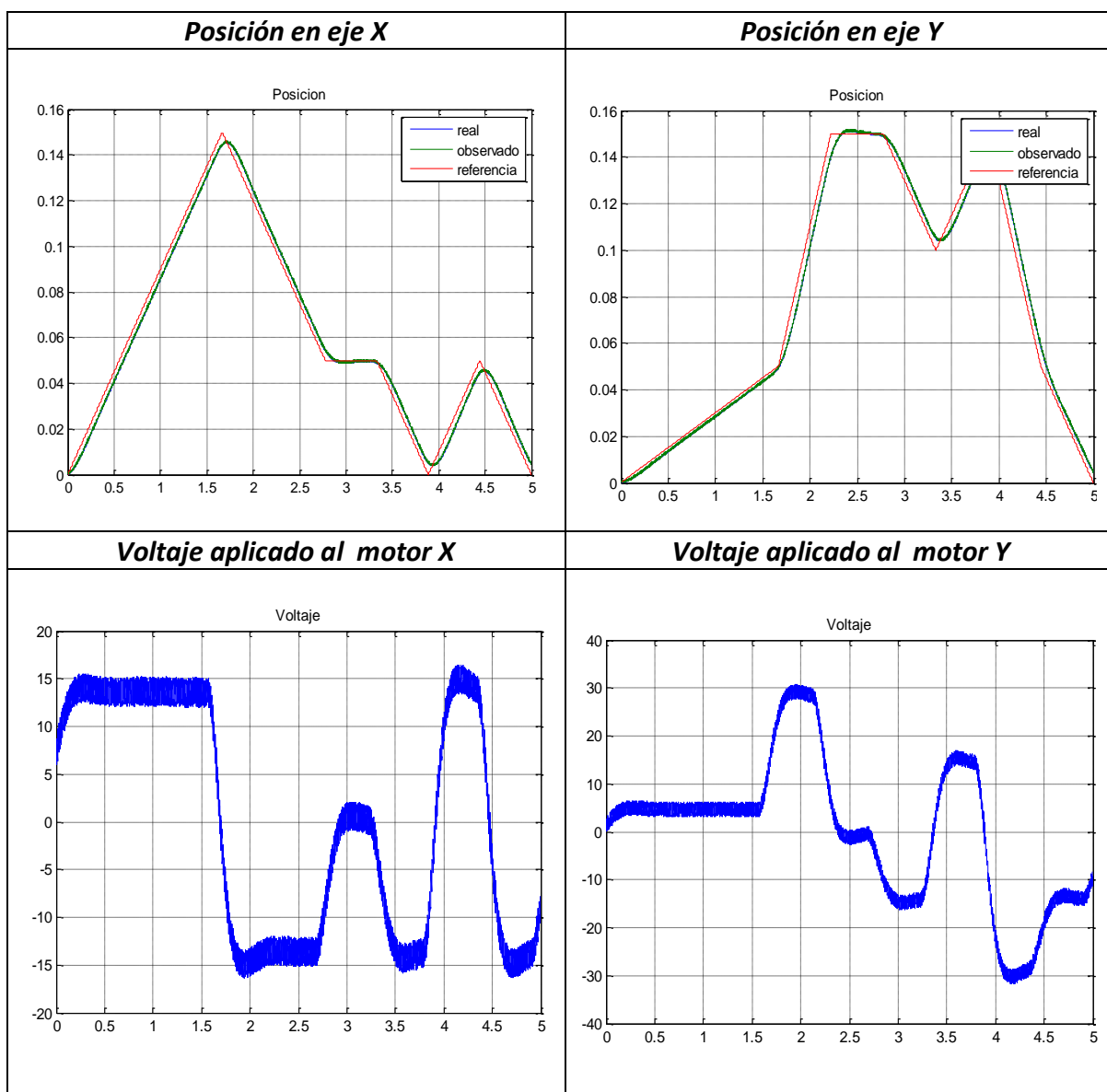
Maximo voltaje y: 30.8039

Valor de Jy = $24.5441 \cdot 10^3$

Se puede apreciar que no se cumple el requerimiento de desempeño (sale mayor a 5%). También el error máximo en Y es más grande que 0.01 propuesto en el requerimiento.

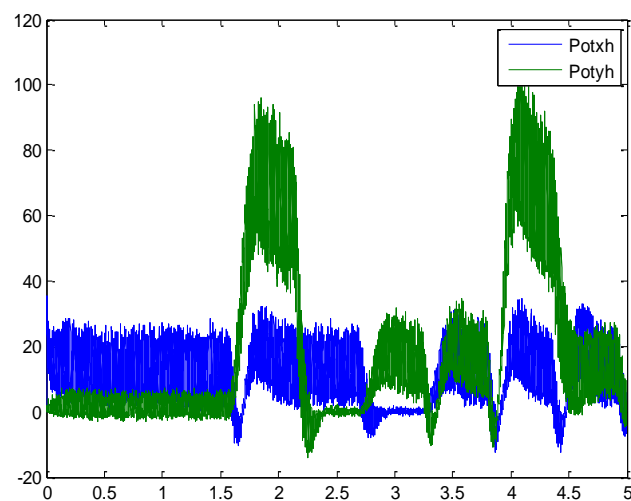
Se presenta las gráficas:

- Señal de control y posición en cada eje



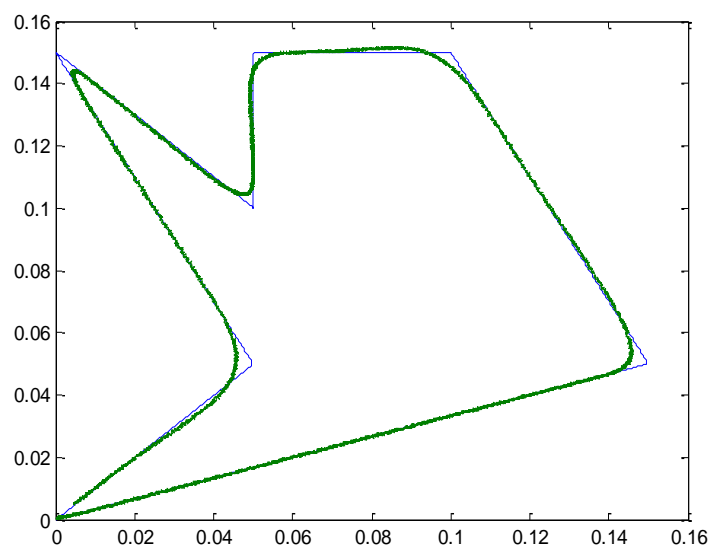
Se aprecia que el desfase se reduce, además los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



La figura se completa más gracias a que se aumentó el tp.

D.

Pesos Controlador: $q1 = 0$; $q2 = 0$; $q3 = 0$; $q4 = 5e8$

Pesos Observador Reducido: $q2o = 1$; $q3o = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.16 s

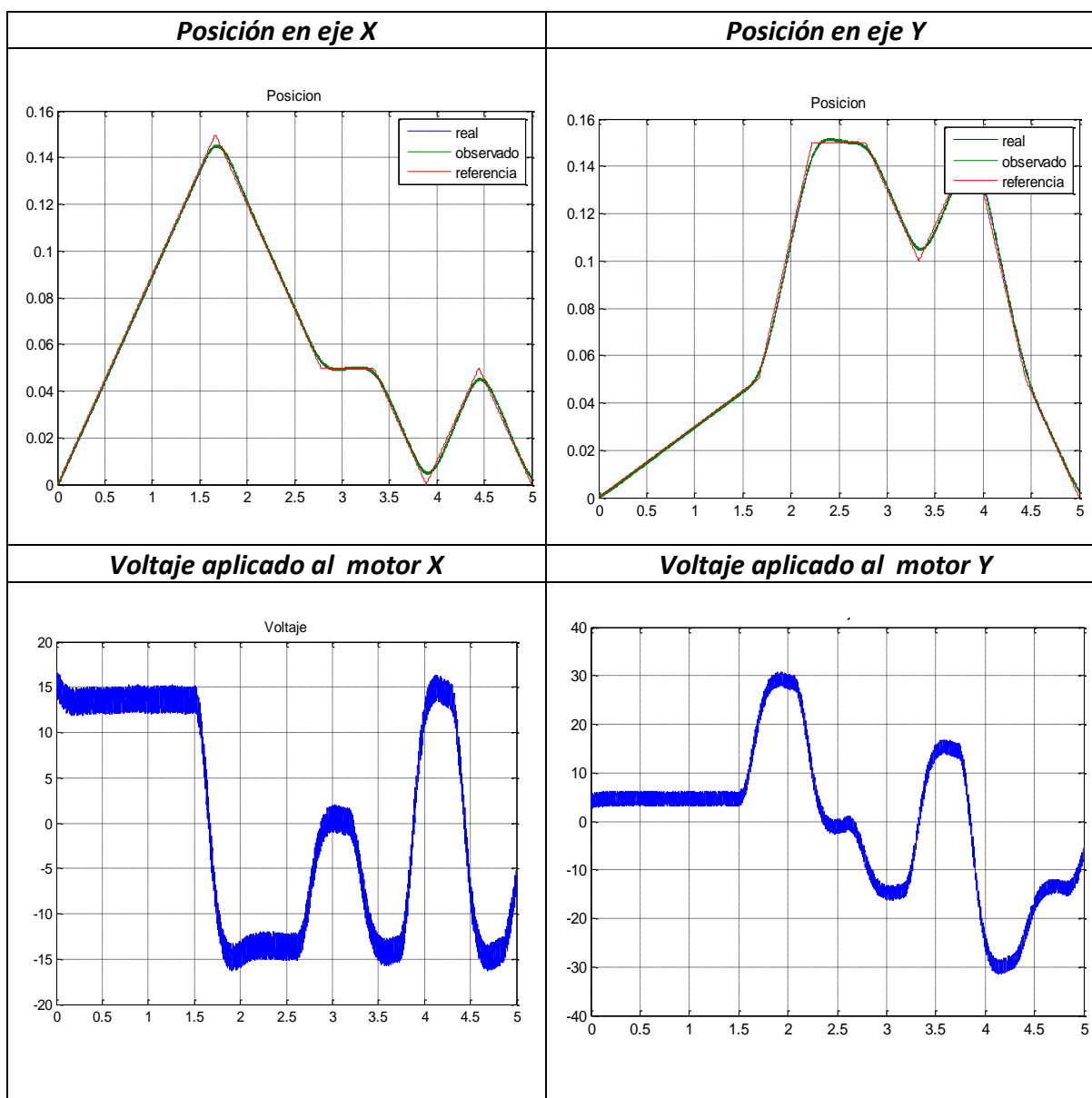
- *Resultados:*

```
desemp = 2.1403e+000  
  
max_error_x = 5.5881e-003  
  
max_error_y = 7.5966e-003  
  
Maximo voltaje x: 16.9549  
Valor de Jx =  $1.483 \cdot 10^3$   
Maximo voltaje y: 30.7397  
Valor de Jy =  $2.5672 \cdot 10^3$ 
```

Se cumplen los requerimientos de desempeño y máximo error.

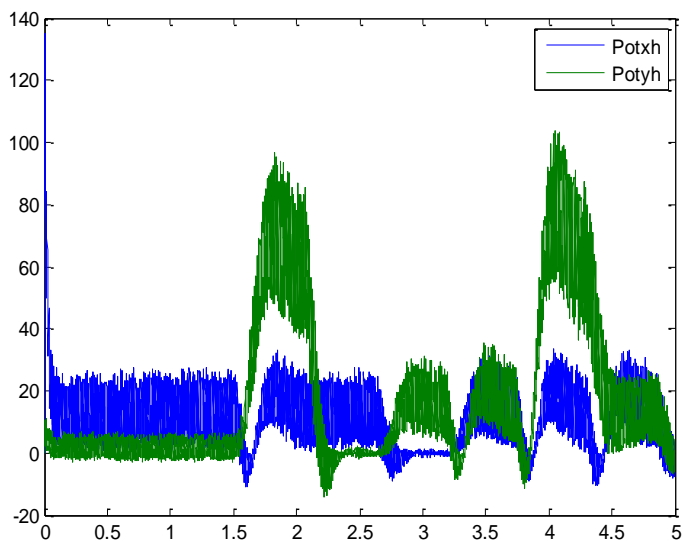
Se presenta las gráficas:

- Señal de control y posición en cada eje



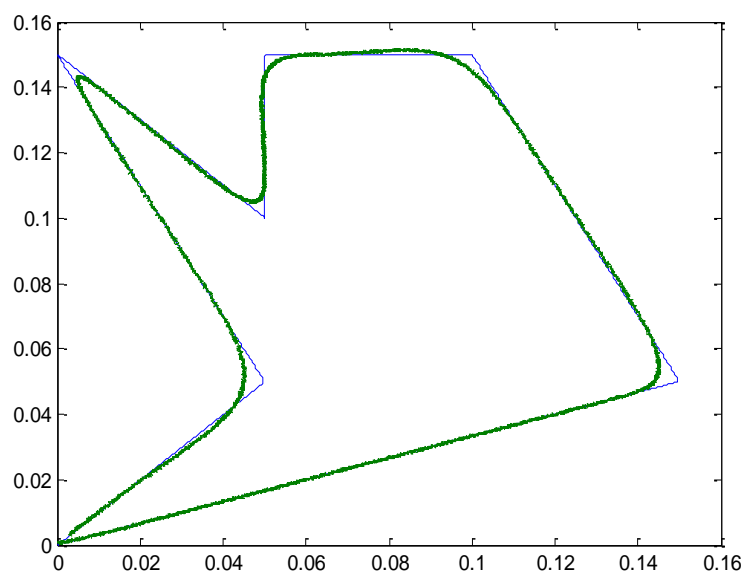
Se puede apreciar que el desfase entre la posición deseada y posición real es muy pequeño. Además los voltajes están en el rango de funcionamiento de los motores

- *Potencia*



Las potencias consumidas están en el rango de funcionamiento de los motores.

- *Resultado del maquinado (XY)*



La gráfica se encuentra muy cercana a completarse.

E.

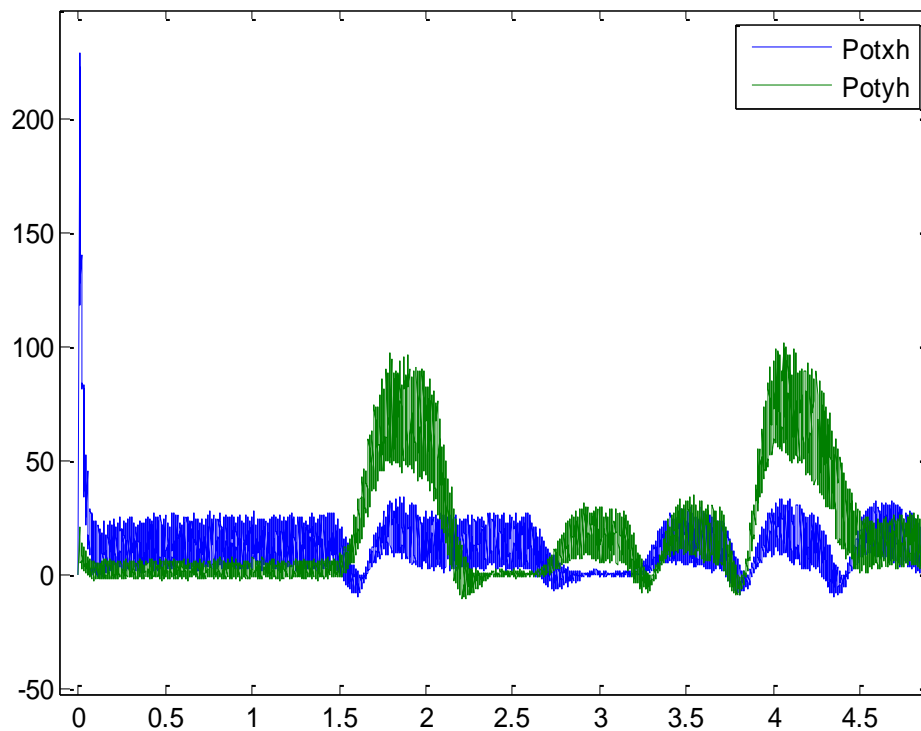
Pesos Controlador: $q1 = 0$; $q2 = 0$; $q3 = 0$; $q4 = 5e8$

Pesos Observador Reducido: $q2o = 1$; $q3o = 1$

Velocidad X: 0.09m/s

Velocidad Y: 0.09m/s (Tramo D)

Tiempo preview Tp: 0.16 s

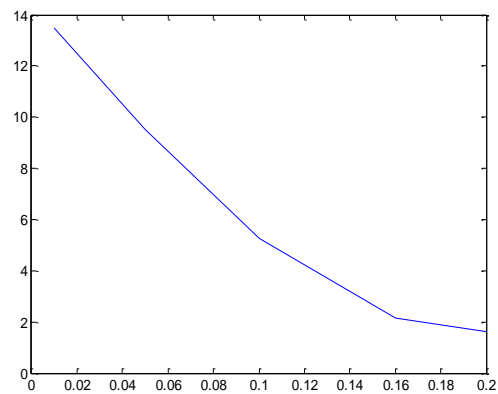


Al incrementar más el tiempo de preview (0.2 seg) el resultado ya no mejora, más aun genera un aumento del pico de potencia del motor X.

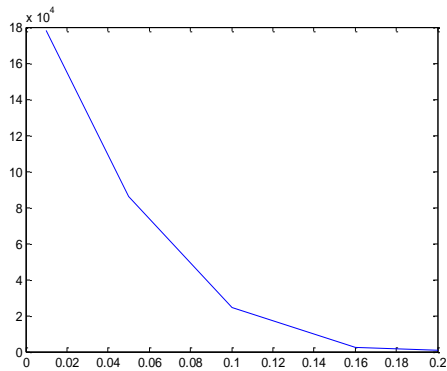
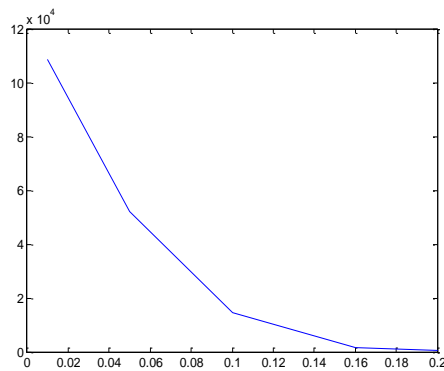
Comparaciones en el control Preview al aumentar tiempo de preview “**tp**”:

tp(s)	Desemp	Max X	Max Y	Jx	Jy	Max Ux	Max Uy
0.01	1.3473e+001	1.3275e-002	2.4531e-002	108.6771*10 ³	178.0547*10 ³	16.4612	30.7972
0.05	9.5270e+000	9.7347e-003	1.7507e-002	52.0843*10 ³	85.9634*10 ³	16.443	30.9054
0.1	5.2731e+000	6.0194e-003	1.0132e-002	14.6067*10 ³	24.5441*10 ³	16.424	30.8039
0.16	2.1403e+000	5.5881e-003	7.5966e-003	1.483*10 ³	2.5672*10 ³	16.9549	30.7397
0.2	1.6130e+000	5.9852e-003	8.7938e-003	0.39297*10 ³	0.5955*10 ³	21.1833	30.5429

Desempeño vs. tp



Función de costo vs. tp



Función de costo para el control del motor X (izquierda) y motor Y respectivamente.

Conclusiones

1. En el control Optimal (LQR) sin preview para pesos pequeños de la acción integral la respuesta del sistema controlado es bastante lenta para cada motor. Al aumentar el peso se mejora la velocidad sin embargo no se puede seguir a la referencia con velocidad igual o mayor a 0.09m/s ya que ésto implica un aumento en la potencia de los motores.
2. El control Optimal ayuda a mejorar la respuesta en magnitud pero no puede seguir referencias de velocidad relativamente alta.
3. Para poder diseñar el controlador Preview es necesario formar el sistema aumentado en la planta de motor con tornillo sinfín.
4. El control Preview ayuda a mejorar la respuesta en fase ante referencias de velocidad alta, esto se traduce como una mejora en ancho de banda para el sistema controlado.
5. Al aumentar el tiempo de preview " t_p " mejora la velocidad de respuesta del sistema controlado (para cada motor). Esto se refleja en una disminución del error máximo, así como también en el desempeño formulado. Sin embargo existe un valor máximo de " t_p " a partir del cual no mejora los resultados sino más bien produce aumentos en los picos de potencia, y/o también en la acción de control.
6. Debido a que el sensor de posición se consideró con ruido, el control utilizando los estados estimados por el observador de orden completo Optimal entregó resultados un poco mejores que utilizando el observador de orden reducido, esto se explica porque en éste último observador no se filtra el ruido del estado medido.
7. Las funciones de costo para el control del motor X y motor Y disminuyen mientras se aumente el tiempo de preview. Sin embargo a partir del " t_p " máximo no se obtienen mejoras.