

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL SMC, FUZZY Y FSMC, DE UN SISTEMA DE BALANCE BALL & PLATE (ESFERA & PLATO) PARA EL CONTROL DE POSICIÓN Y SEGUIMIENTO DE CAMINO DE UNA ESFERA

TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL ELECTRÓNICO INDUSTRIAL

SEBASTIÁN XAVIER ARROYO GALLARDO

sarroyoxg@hotmail.com

DIRECTOR: DR. CHÁVEZ GARCÍA GEOVANNY DANILO

daniilo.chavez@epn.edu.ec

CODIRECTOR: DR. CAMACHO QUINTERO OSCAR EDUARDO

oscar.camacho@epn.edu.ec

Quito, julio 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Ing. Sebastián Xavier Arroyo Gallardo, bajo nuestra supervisión.

DR. CHÁVEZ GARCÍA GEOVANNY DANILO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DR. CAMACHO QUINTERO OSCAR EDUARDO
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Sebastián Xavier Arroyo Gallardo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Sebastián Xavier Arroyo Gallardo

DEDICATORIA

A mi esposa por su apoyo, comprensión, inmenso amor y cariño que cada día son la fuente de inspiración para ser una mejor persona tanto personal y profesionalmente.

AGRADECIMIENTO

A mi madre quien siempre me enseñó a seguir adelante pese a los obstáculos, el valor del trabajo y del estudio, a mi familia por ser ese apoyo que a veces invisible siempre te da la fuerza de seguir adelante.

A mi director y codirector por su dedicación y gran apoyo para la realización del presente trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.5.1 SISTEMA DE <i>BALL & PLATE</i>	3
1.5.1.1 Modelo matemático del Sistema Ball & Plate	4
1.5.1.1.1 Relación de ángulos a partir de la geometría del sistema	9
1.5.1.1.2 Relación de ángulos de forma experimental.....	11
1.5.2 HARDWARE DEL SISTEMA BALL & PLATE.....	12
1.5.2.1 Arduino Mega.....	12
1.5.2.2 Servomotor HITEC HS 422.....	13
1.5.2.3 Pantalla Táctil Resistiva (Resistive Touch Panels - RTP).....	14
1.5.3 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC)	17
1.5.3.1 Métodos de suavizamiento del <i>chattering</i>	19
1.5.3.2 Métodos de sintonización de controladores SMC	20
1.5.3.2.1 Método de sintonización por curva de reacción	21
1.5.3.2.2 Método de sintonización por algoritmos genéticos	22
1.5.3.2.3 Método de sintonización por metodología heurística	22
1.5.4 CONTROL FUZZY	23
1.5.4.1 Interfaz de fusificación	25
1.5.4.2 Base de reglas	25
1.5.4.3 Mecanismo de inferencia	26
1.5.4.4 Interfaz de defusificación.....	27
1.5.4.5 Métodos de sintonización de controladores fuzzy.....	28
1.5.4.5.1 Agregar ganancias de sintonización.....	28

1.5.4.5.2	Modificar la base de reglas	29
1.5.4.5.3	Modificar las funciones de pertenencia.....	29
1.5.5	CONTROL SMC BASADO EN SUPERFICIE CON COMPONENTE FUZZY (FSMC) 30	
2.	METODOLOGÍA.....	31
2.1	SOFTWARE DEL SISTEMA BALL & PLATE.....	31
2.1.1.	IDE (ARDUINO).....	31
2.1.2.	MATLAB/SIMULINK.....	32
2.2.	DISEÑO Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	35
2.2.1.	DISEÑO DEL CONTROL SMC	35
2.2.2.	DISEÑO DEL CONTROL FUZZY	37
2.2.3.	DISEÑO DEL CONTROL FSMC.....	42
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1.	RESULTADOS	43
3.1.1.	SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES.....	43
3.1.2.	COMPARACIÓN ENTRE LOS CONTROLADORES SMC, FUZZY Y FSMC – SIMULACIÓN.....	67
3.1.3.	IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES.....	71
3.1.4.	COMPARACIÓN ENTRE LOS CONTROLADORES SMC, FUZZY Y FSMC 93	
3.2.	DISCUSIÓN.....	101
4.	CONCLUSIONES	102
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXOS	105
A.	ARDUINO MEGA	105
B.	SERVOMOTOR.....	106
C.	PANTALLA TÁCTIL RESISTIVA DE 5 HILOS	107

RESUMEN

Para la enseñanza de varias técnicas de control se emplean algunas plantas o modelos reales, las mismas pretenden dar un mejor entendimiento de las variables físicas que pueden afectar el diseño de un controlador al momento de su implementación.

La planta Ball & Plate (esfera & plato) pretende ser un apoyo para la enseñanza y la implementación de varias técnicas de control, como las expuestas en el presente trabajo SMC, FUZZY y FSMC.

Se emplea la tarjeta embebida Arduino Mega para manejar las señales tanto de entrada y salida propias de planta, es decir las señales del elemento sensor que en este caso es un panel táctil resistivo de 5 hilos y las señales del elemento final de control que son los servomotores.

Mediante un enlace serial la tarjeta embebida se encuentra continuamente comunicada e interactuando con el software en el computador, en el presente trabajo se emplea MatLab/Simulink, que es el ambiente en donde se procesan los datos de entrada, se desarrolla el controlador y finalmente desde donde se envía la señal de control a cada servomotor.

El enlace de comunicación además permite observar los cambios inmediatamente en la acción de control al realizar una modificación en algún parámetro de sintonización, de esta forma se reduce el tiempo para la calibración de los controladores.

PALABRAS CLAVE: Ball & Plate (esfera & plato), control SMC, control FUZZY, arduino

ABSTRACT

To teaching several control techniques, some plants or real models are used. They aim to give a better understanding of the physical variables that can affect the design of a controller at the time of its implementation.

The Ball & Plate plant aims to provide support for teaching and implementing of various control techniques, such as those described in the present work SMC, FUZZY and FSMC.

An Arduino Mega embedded card is used to handle both the input and output signals of the plant. That is the signals of the sensor element, which in this case is a 5-wire resistive touch panel, and the signals of the final control element, which are the servomotors.

Through a serial link, the embedded card is continuously communicated and interacting with the software on a computer. In the present work MatLab / Simulink is used, which is the environment where the input data is processed, the controller is developed and finally from where the control signal is sent to each servomotor.

The communication link also allows to observe the changes immediately in the control action when making a modification in some tuning parameter. In this way, the time for the calibration of the controllers is improved.

KEYWORDS: Ball & Plate, SMC control, FUZZY control, arduino

1. INTRODUCCIÓN

El sistema *Ball & Plate* (esfera & plato) es un sistema multivariable, no lineal, compuesto por una plataforma que puede rotar alrededor de dos ejes perpendiculares mediante dos servomotores ubicados en la parte inferior. Además, este es un sistema inestable debido a que una inclinación hace que la esfera se desplace indefinidamente [1], [2].

De los controles implementados para este sistema *Ball & Plate* (esfera & plato) se observa que la técnica de control más empleada es el PID (Control Proporcional, Integral y Derivativo), debido a su fácil implementación y porque alcanza buenos resultados con las técnicas de sintonización adecuadas. El problema de dicha técnica de control es su limitada robustez frente a perturbaciones (cambio de peso de la esfera o alteraciones en los mecanismos de los servomotores), en las cuales los resultados no son satisfactorios [2], [3], [4].

Por el motivo expuesto anteriormente, en este trabajo se simulan e implementan tres algoritmos de control no tradicionales para posicionamiento y seguimiento de caminos para el sistema esfera & plato. Los controles a implementar son: control SMC (Control por Modos Deslizantes), control Fuzzy y control FSMC (Control por modos deslizantes basado en superficie con componente Fuzzy); el cual es un híbrido de los controladores mencionados anteriormente [5].

Los tres algoritmos de control propuestos han sido seleccionados por su robustez, debido a que responden satisfactoriamente frente a perturbaciones y cambios de referencia. Estos controladores robustos en comparación con los controladores convencionales estabilizan al sistema rápidamente y reducen el sobreimpulso de forma considerable [5].

El control SMC es un control robusto y no lineal que presenta buen seguimiento de setpoints, por otro lado, el control Fuzzy está basado en palabras o expresiones, este controlador utiliza el conocimiento o experiencia sobre el control de una planta y transformarla en valores numéricos que un controlador digital pueda entender y utilizar, esta característica le confiere robustez y flexibilidad al controlador [5].

El control por modos deslizantes basado en superficie con componente Fuzzy (FSMC) consiste en agregar un componente de lógica fuzzy al cálculo de la superficie deslizante de un control SMC, esta característica mejora la capacidad del control SMC al agregarle inteligencia y robustez al controlador [5].

El principal objetivo de los controladores es que estos mantengan en una posición determinada la esfera mediante la inclinación de la plataforma; considerando la naturaleza no lineal del sistema a controlar, donde, al aplicar las técnicas de control clásicas los resultados son adecuados solo dentro de puntos específicos de operación, se buscan técnicas que satisfagan las particularidades del sistema y que permitan mejorar su robustez.

La contribución del trabajo de titulación es diseñar, implementar y comparar el resultado de tres algoritmos de control (uno robusto, uno difuso y uno híbrido de los controles antes mencionados) aplicados al sistema de balance *Ball & Plate* (esfera & plato).

El primer capítulo detalla la parte teórica del proyecto, incluyendo los componentes del sistema *Ball & Plate* (esfera & plato), el modelo matemático del sistema esfera & plato, el control SMC, el control FUZZY, el control FSMC y filtro de Kalman que se utilizara para filtrar la medición de la posición.

En el segundo capítulo se detalla el desarrollo del proyecto con el diseño de los controladores y la sintonización de los mismos.

En el capítulo tres se expondrán los resultados obtenidos en la simulación y en la implementación de los tres controladores en el sistema real *Ball & Plate* (esfera & plato), además del respectivo análisis y discusión de los mismos.

Se culminará con un cuarto capítulo donde se darán las conclusiones del trabajo.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, implementar y comparar los algoritmos de control SMC, FUZZY Y FSMC de un sistema de balance *Ball & Plate* (esfera & plato) para el control de posición y seguimiento de camino de una esfera.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la revisión bibliográfica del sistema *Ball & Plate*, los algoritmos de control y el modelo matemático simplificado.
- Diseñar y simular los algoritmos de control (SMC, Fuzzy y FSMC) para el posicionamiento y seguimiento de camino de una esfera.
- Implementar el sistema con los diferentes controladores.

- Realizar pruebas y comparar resultados de los controladores propuestos (SMC, Fuzzy y FSMC) para el posicionamiento y seguimiento de camino de una esfera.

1.3 ALCANCE

El alcance del proyecto consiste en:

- Seleccionar el modelo matemático simplificado que se utilizará para el diseño de los algoritmos de control y su simulación.
- Construir la estructura física del sistema (hardware), dimensiones de la plataforma (17cm x 22cm).
- Realizar el enlace entre la tarjeta embebida Arduino Mega y MatLab/Simulink.
- Diseñar y simular los algoritmos de control (SMC, FUZZY y FSMC) para el posicionamiento considerando los límites físicos de la plataforma y seguimiento de caminos (círculo y cuadrado).
- Implementar los algoritmos de control (SMC, FUZZY y FSMC) en la tarjeta embebida Arduino Mega.
- Comparar los resultados tanto de la simulación para los tres controladores propuestos y de su implementación en la planta real, utilizando factores de desempeño tales como el error cuadrático medio y el tiempo de establecimiento.

1.4 MARCO TEÓRICO

Esta sección está dedicada a la revisión de los aspectos teóricos que se utilizarán en el desarrollo del presente proyecto, se empezará con los componentes del sistema *Ball & Plate* (esfera & plato), el modelo matemático del sistema esfera & plato, el control SMC, el control FUZZY, el control FSMC y filtro de Kalman que se utilizará para filtrar la medición de la posición.

1.4.1 SISTEMA DE *BALL & PLATE*

El sistema de *Ball & Plate* (esfera & plato) es un sistema no lineal, multivariable (MIMO), consiste en un plato o plataforma rígida en la cual la esfera rueda al producirse la

inclinación del plato por medio de dos servomotores. La plataforma puede ser manipulada en dos direcciones perpendiculares entre si (X y Y) [1], [2]. Ver Figura 1.1.

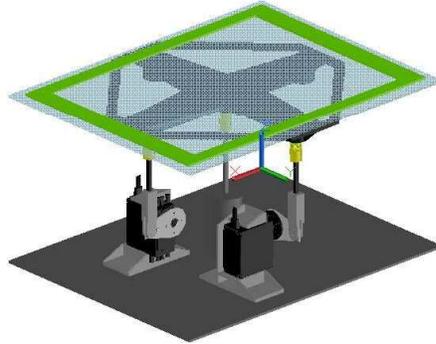


Figura 1.1. Sistema Ball & Plate propuesto.

Este sistema posee cuatro grados de libertad, dos grados de libertad para el desplazamiento de la esfera (X y Y) y dos grados de libertad para la inclinación del plato (α y β); este, se considera un sistema inestable debido a que una inclinación hace que la esfera se desplace indefinidamente [1], [2].

El objetivo del sistema es llevar la esfera a una posición determinada mediante la inclinación de la plataforma, bajo ese concepto, el sistema se puede emplear para realizar seguimiento de caminos y trayectorias [1], [2].

1.4.1.1 Modelo matemático del Sistema Ball & Plate

Para determinar el modelo matemático del sistema de Ball & Plate se deben tomar las siguientes consideraciones [1]:

- La esfera es completamente simétrica y homogénea
- Todas las fricciones son despreciables
- La esfera y el plato se encuentran en contacto todo el tiempo.

Aplicando el método de la Lagrange y despreciando la fricción de la superficie, se obtiene el modelo matemático del sistema de *Ball & Plate*. La inclinación del plato alrededor de los ejes X y Y (ver Figura 1.2), está dada por los ángulos α (ver Figura 1.3) y β (ver Figura 1.4) respectivamente. u_x y u_y representan los ángulos de los servomotores asociados a la inclinación de los ejes X y Y . La Ecuación 1.1 y la Ecuación 1.2

representan la sumatoria de energías (cinética de la esfera, cinética de la esfera sobre la plataforma y potencial) de los ejes X y Y respectivamente [1].

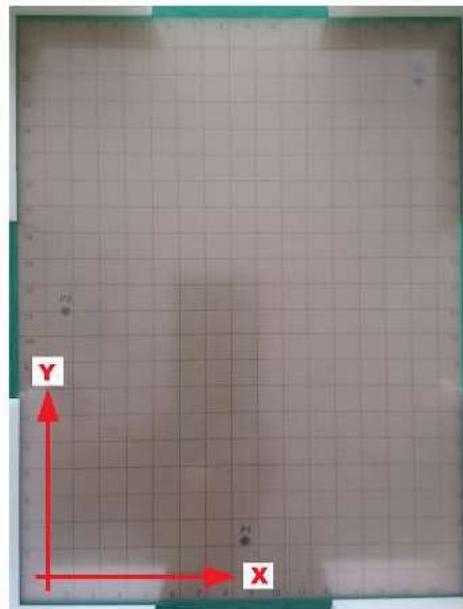


Figura 1.2. Ejes de coordenadas del plato.

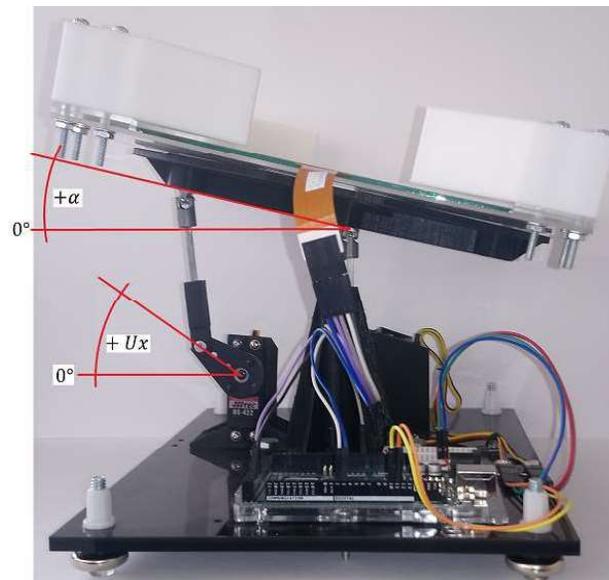


Figura 1.3. Inclinación del plato en el eje X .

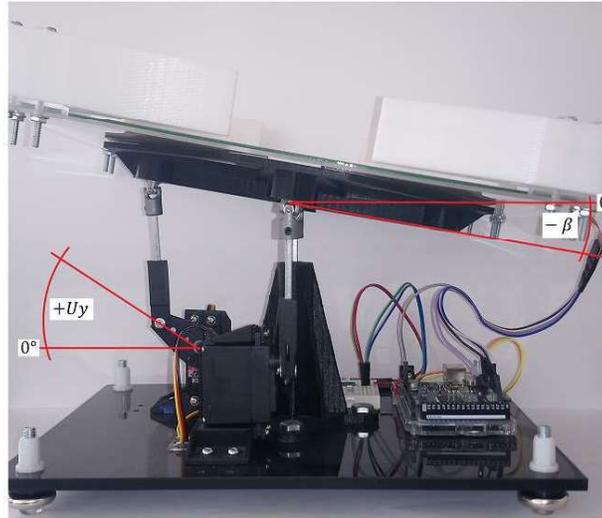


Figura 1.4. Inclinación del plato en el eje Y.

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{x} - m_b x \dot{\alpha}^2 - m_b y \dot{\alpha} \dot{\beta} + m_b g \sin(\alpha) = 0$$

Ecuación 1.1. Sumatoria de energías del eje X.

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{y} - m_b y \dot{\beta}^2 - m_b x \dot{\alpha} \dot{\beta} + m_b g \sin(\beta) = 0$$

Ecuación 1.2. Sumatoria de energías del eje Y.

En la Tabla 1.1 se muestran los parámetros del modelo matemático del sistema a controlar [1].

Tabla 1.1. Parámetros del modelo matemático.

Parámetro	Unidades	Descripción
m_b	Kg	Masa de la esfera
J_b	$Kg\ cm^2$	Momento de inercia de la esfera
r_b	cm	Radio de la esfera
x	cm	Posición de la esfera en el eje X
y	cm	Posición de la esfera en el eje Y
α	rad	Ángulo del plato en el eje X
β	rad	Ángulo del plato en el eje Y
g	cm/s^2	Aceleración debido a la gravedad

La Ecuación 1.1 y la Ecuación 1.2 pueden reducirse, si se considera que los ángulos de inclinación de la plataforma están limitados a +/- 0.5 radianes, de tal manera que el desplazamiento de la plataforma sea lento ($\dot{\alpha} \cong 0$ y $\dot{\beta} \cong 0$). El modelo reducido despejando la aceleración en cada eje está dado por la Ecuación 1.3 y la Ecuación 1.4 [1].

$$\ddot{x} = - \frac{m_b \cdot g \cdot \sin(\alpha)}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)}$$

Ecuación 1.3. Aceleración en eje X reducida.

$$\ddot{y} = - \frac{m_b \cdot g \cdot \sin(\beta)}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)}$$

Ecuación 1.4. Aceleración en el eje Y reducida.

Linealizando la Ecuación 1.3, por series de Taylor alrededor del punto de operación $\bar{\alpha} = 0$, $\bar{\beta} = 0$ (plataforma horizontal y esfera en equilibrio), se obtienen para el eje X :

$$x = f(\alpha) = \sum_0^{\infty} \frac{f^n(\bar{\alpha})}{n!} (\alpha - \bar{\alpha})^n$$

Ecuación 1.5. Series de Taylor para eje X .

Donde $\bar{\alpha}$ es el punto de operación y n es el orden de la enésima derivada.

Para la primera derivada $n = 1$:

$$x = f(\bar{\alpha}) + f'(\bar{\alpha})(\alpha - \bar{\alpha})$$

Ecuación 1.6. Series de Taylor para la primera derivada.

Aplicando la Ecuación 1.6 en la Ecuación 1.3 se obtiene la Ecuación 1.7.

$$\ddot{x} = \left(- \frac{m_b \cdot g \cdot \sin(\bar{\alpha})}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)} \right) + \left(- \frac{m_b \cdot g \cdot \cos(\bar{\alpha})}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)} \right) (\alpha - \bar{\alpha})$$

Ecuación 1.7. Series de Taylor aplicada a la aceleración en el eje X .

Remplazando el punto de operación $\bar{\alpha} = 0$ en la Ecuación 1.7 se obtiene la Ecuación 1.8

$$\ddot{x} = \left(-\frac{m_b \cdot g \cdot \sin(0)}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)} \right) + \left(-\frac{m_b \cdot g \cdot \cos(0)}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)} \right) (\alpha - 0)$$

Ecuación 1.8. Aceleración en el eje X en el punto de operación.

La Ecuación 1. muestra la Ecuación 1.8 simplificada.

$$\ddot{x} = -\frac{m_b \cdot g}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)} \cdot \alpha$$

Ecuación 1.9. Aceleración en el eje X en el punto de operación simplificada.

La Ecuación 1. resulta del mismo análisis realizado para el eje X.

$$\ddot{y} = -\frac{m_b \cdot g}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)} \cdot \beta$$

Ecuación 1.10. Aceleración en el eje Y en el punto de operación simplificada.

La aceleración de la gravedad $-980 \left[\frac{cm}{s^2}\right]$ y la Ecuación 1. se reemplazan en la Ecuación 1. y en la Ecuación 1. para obtener la Ecuación 1. y la Ecuación 1. [1].

$$J_b = \frac{2}{5} \cdot m_b \cdot r_b^2$$

Ecuación 1.11. Momento de inercia de la esfera sólida.

$$\ddot{x} = 700 \cdot \alpha$$

Ecuación 1.12. Aceleración en el eje X linealizada.

$$\ddot{y} = 700 \cdot \beta$$

Ecuación 1.13. Aceleración en el eje Y linealizada.

Finalmente, se debe relacionar el ángulo del plato con el ángulo de rotación de los actuadores (servomotores) u_x y u_y para el eje X y Y respectivamente. Esta relación de ángulos se puede encontrar de dos maneras: a partir en la geometría del sistema y de forma experimental, ambos procedimientos se detallan a continuación [6].

1.4.1.1.1 Relación de ángulos a partir de la geometría del sistema

El ángulo de inclinación del panel es controlado a través del ángulo de rotación del servomotor, la rotación se transmite mediante un brazo de palanca como se ve en la Figura 1.5 [6].

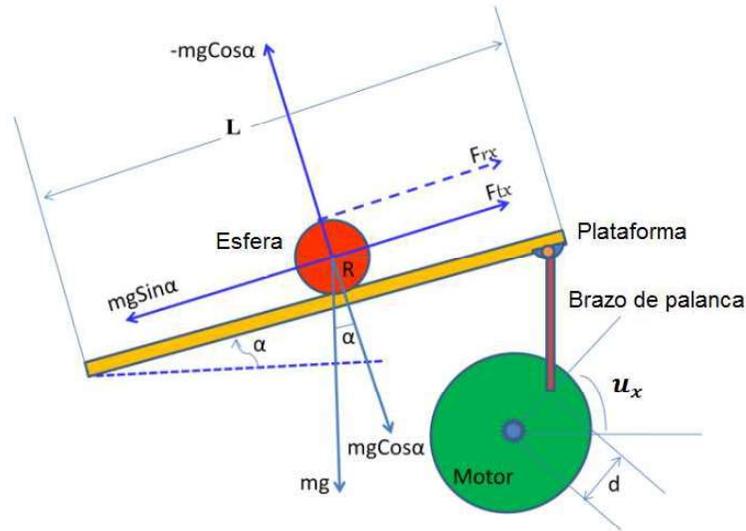


Figura 1.5. Esquema de transmisión de rotación [6].

La expresión matemática que describe como varía la inclinación del plato en función del giro del servomotor en los ejes X y Y está dada por las Ecuación 1. y Ecuación 1. respectivamente [6].

$$\alpha \approx \sin^{-1} \left(\frac{d}{L} \cdot \sin(u_x) \right)$$

Ecuación 1.14. Transmisión del giro del servo al plato en el eje X .

$$\beta \approx \sin^{-1} \left(\frac{d}{L} \cdot \sin(u_y) \right)$$

Ecuación 1.15. Transmisión del giro del servo al plato en el eje Y .

Las expresiones de transmisión del giro pueden simplificarse tomando en cuenta que los ángulos que girarán los servos serán pequeños, con lo que las expresiones de transmisión de giro para el eje X y Y quedan dadas por las ecuaciones Ecuación 1.5 y Ecuación 1.6 [6].

$$\alpha \approx \frac{d}{L} \cdot u_x$$

Ecuación 1.5. Transmisión de giro en el eje X simplificada.

$$\beta \approx \frac{d}{L} \cdot u_y$$

Ecuación 1.6. Transmisión de giro en el eje Y simplificada.

En el sistema a utilizar las constantes d y L son las mostradas en la Figura 1.6 y tienen un valor de 2.5 [cm] y 8 [cm] respectivamente. Con estos datos la transmisión del giro para el eje X y Y está dada por las ecuaciones Ecuación 1.7 y Ecuación 1.8 respectivamente.

$$\alpha = 0.3125 \cdot u_x$$

Ecuación 1.7. Transmisión de giro en el eje X.

$$\beta = 0.3125 \cdot u_y$$

Ecuación 1.8. Transmisión de giro en el eje Y

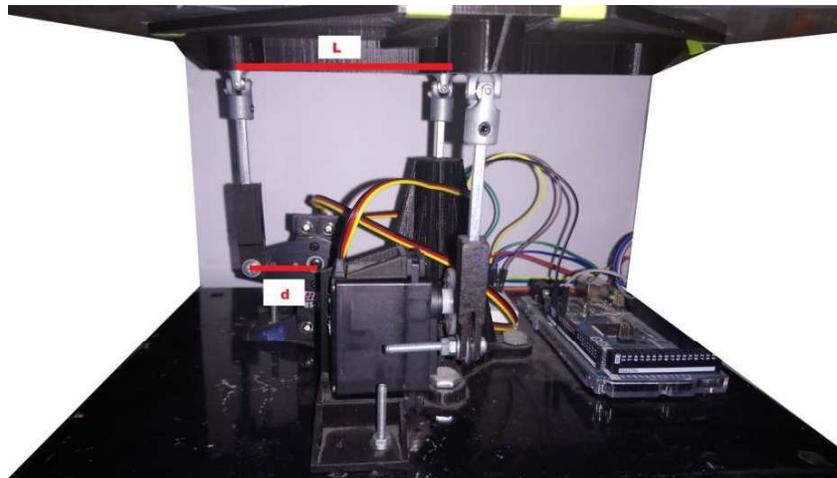


Figura 1.6. Constantes para el cálculo de la transmisión del giro.

Finalmente, al reemplazar Ecuación 1.7 y Ecuación 1.8 en la Ecuación 1. y Ecuación 1. respectivamente se obtiene el modelo simplificado del sistema esfera plato a utilizar como se ve en la Ecuación 1. y Ecuación 1.9.

$$\ddot{x} = 218.75 \cdot u_x$$

Ecuación 1.20. Aceleración en el eje X

$$\ddot{y} = 218.75 \cdot u_y$$

Ecuación 1.9. Aceleración en el eje Y

1.4.1.1.2 Relación de ángulos de forma experimental

Para encontrar la relación de giro del servomotor al plato de forma experimental se tomaron datos de variación del giro del servo con su respectiva inclinación del plato para el eje X y el eje Y , estos datos se muestran en la Tabla 1.2. Con estos datos se realizó una regresión lineal que dio como resultado las expresiones de transmisión del giro del eje X y del eje Y de la Ecuación 1. y Ecuación 1. respectivamente.

Tabla 1.2. Giro del servo e inclinación del plato.

EJE X		EJE Y	
α [°]	Plato [°]	β [°]	Plato [°]
-30	-9.4	-30	10
-20	-6.1	-20	6.7
-10	-3.3	-10	3.7
0	0	0	0
10	3.3	10	-3.2
20	6.5	20	-6.1
30	9.5	30	9.1

$$\alpha = 0.3161 \cdot u_x$$

Ecuación 1.22. Transmisión de giro en el eje X de forma experimental.

$$\beta = 0.3207 \cdot u_y$$

Ecuación 1.23. Transmisión de giro en el eje Y de forma experimental.

Las expresiones obtenidas difieren en un 1.15% y un 2.62% en el eje X y en el eje Y respectivamente en comparación con la expresión obtenida a partir de la geometría del sistema. Por este motivo se decidió trabajar con el valor de transmisión de giro obtenido a partir de la geometría del sistema.

1.4.2 HARDWARE DEL SISTEMA BALL & PLATE

En esta sección se describirá la parte de hardware del sistema *Ball & Plate* (esfera & plato). Los componentes como Arduino Mega, los servos motores y el panel táctil resistivo, se detallarán a continuación. Un esquema de la conexión del hardware se muestra en la Figura 1.7.

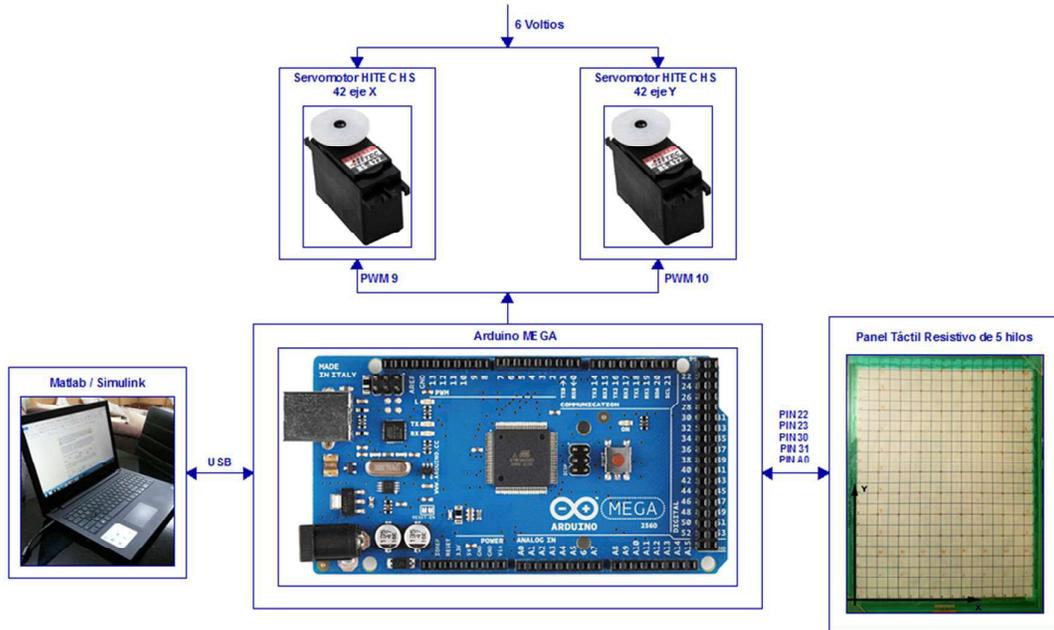


Figura 1.7. Diagrama de hardware.

1.4.2.1 Arduino Mega

Las tarjetas embebidas de Arduino son usualmente utilizadas para aplicaciones en electrónica y robótica. La tarjeta embebida Arduino Mega (ver Figura 1.8) es un microcontrolador basado en el ATMEGA 2560, la placa posee 54 pines digitales de entrada y salida, 4 UARTs (hardware con puerto serie), consta de un botón de reinicio. Se puede alimentar la tarjeta con un rango de voltaje 7 V hasta 12 V [7].

Arduino puede comunicarse a un computador a través del puerto serial (conversión con USB) utilizando lenguajes como Flash, Processing, MaxMSP, etc. En la Tabla 1.3 se muestra las especificaciones técnicas de la tarjeta a utilizar.

Tabla 1.3. Especificaciones del Arduino Mega [7].

Microcontrolador	ATMEGA2560
Voltaje operativo	5 V
Voltaje de entrada	7 – 12 V
Pines digitales de entrada/salida	54 (15 salidas PWM)
Pines analógicos de entrada	16
Corriente DC entrega en el Pin 3.3 V	40 mA
Corriente DC por cada entrada/salida	50 mA
Memoria Flash	256 KB
Cristal oscilador	16 MHz
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB

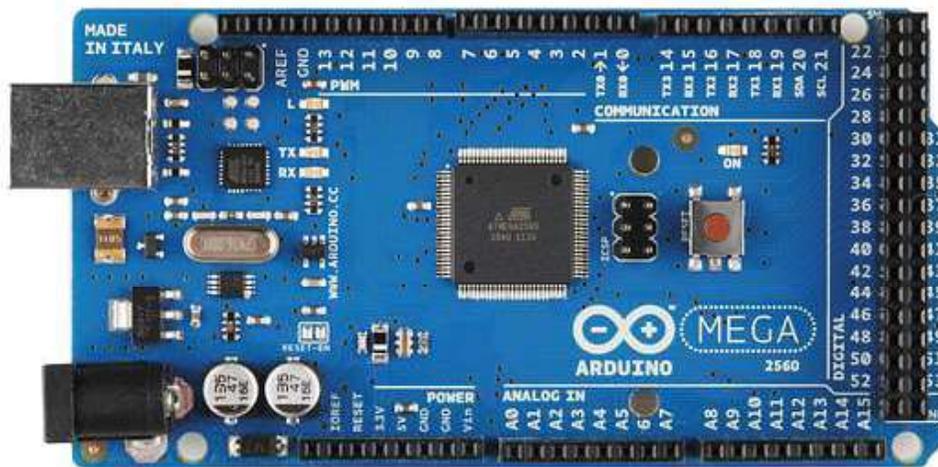


Figura 1.8. Tarjeta embebida Arduino Mega [7].

1.4.2.2 Servomotor HITEC HS 422

El servomotor HITEC HS422 (ver Figura 1.9) es dispositivo con excelentes características mecánicas y electrónicas; debido a ello son utilizados en aplicaciones robóticas [8]. En la Tabla 1.4 muestran las características técnicas del servomotor a utilizar.

Tabla 1.4. Características de HITEC HS42 [8].

Sistema de Control	Control por anchura de pulso de 1.5 ms al centro.
Tensión de funcionamiento	4.8 V a 6 V
Velocidad a 6V	0.69 segundos/60° sin carga
Fuerza a 6V	4.1 Kg · cm
Corriente en reposo	8 mA
Corriente en funcionamiento	150 mA sin carga
Corriente máxima	1100 mA
Zona Neutra	8 μs
Rango de trabajo	1100 a 19000 μs
Rodamiento Principal	Metálico
Engranajes	Plástico
Longitud de cable	300 mm



Figura 1.9. Servomotor HITEC HS 422 [8].

1.4.2.3 Pantalla Táctil Resistiva (Resistive Touch Panels - RTP)

Las RTP están compuestas por dos capas de electrodos conductivos separadas por espaciadores de aislamiento transparentes muy pequeños, cuando se aplica presión se pone en contacto las dos capas (ver Figura 1.10) que dan como resultado una caída de voltaje en el punto de contacto, este caída de voltaje se usa para determinar la coordenada de la pantalla que fue presionada [9].

Las RTP tienen tres tipos de paneles táctiles resistivos que son de 4, 5 y 8 hilos, cada tipo tiene sus propias características, pero comparten el mismo principio de funcionamiento (al aplicar presión se une dos capas conductoras). Este tipo de pantallas no permiten detectar más de un punto de presión al tiempo. El tiempo de vida de estas pantallas está alrededor de los 10 millones de acciones de presión sobre las mismas [9].

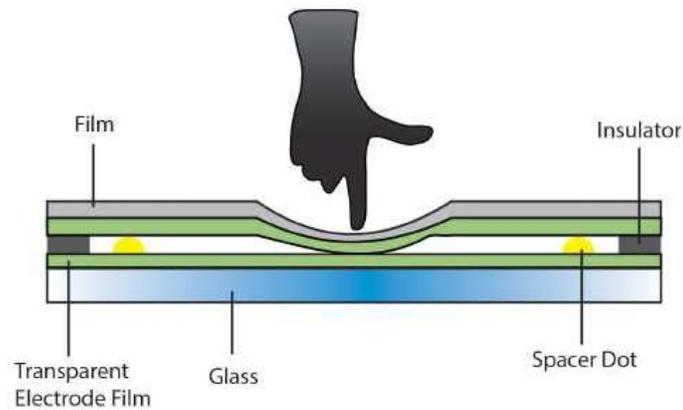


Figura 1.10. Contacto que se hace al panel táctil de Resistencia [9].

Para la implementación de este proyecto se utiliza un panel táctil de 5 hilos, en la Tabla 1.5 se muestran las características de este panel. Las RTP de 5 hilos no miden la ubicación del punto de contacto (eje X y eje Y) de forma inmediata, se debe primero leer la posición en un eje para luego medir la posición en el otro eje [9].

Tabla 1.5. Características de la RTP de cinco hilos [10].

Transmisión de luz	78 ~ 85
Tiempo de respuesta	< 5ms
Presión táctil	98 ~ 99 %
Resolución	2048 × 2048 ~ 4096 × 4096
Dureza superficial	3 H
Funcionamiento	Presión sobre la pantalla
Medio ambiente	Funciona hasta con humedad interior y exterior y acumulación de polvo
Temperatura de funcionamiento	-10° a 60° C
Alimentación V_{DD}	5 Voltios

La circuitería en el perímetro de la pantalla permite que funcione como un divisor de voltaje a lo largo de su superficie para facilitar la determinación del punto de presión; ya que cada posición tanto en el eje X como en el eje Y tiene un valor de voltaje característico.

Para determinar la posición de la pantalla en la cual se está haciendo presión la pantalla cuenta con 5 hilos de transmisión (ver Tabla 1.6). El procedimiento para determinar las coordenadas de un punto de presión en la pantalla es el siguiente [11]:

- Energizar los hilos para leer la posición en el eje X .
- Leer el voltaje entregado por el hilo de lectura.
- Determinar la posición en el eje X a partir del voltaje leído.
- Energizar los hilos para leer la posición en el eje Y .
- Leer el voltaje entregado por el hilo de lectura.
- Determinar la posición en el eje Y a partir del voltaje leído.

Tabla 1.6. Hilos de la pantalla táctil.

HILO	1: Superior izquierda	2: Inferior izquierda	3: Superior derecha	4: Inferior derecha	5: Lectura
Leer posición X	V_{SS}	V_{SS}	V_{DD}	V_{DD}	Medida de voltaje
Leer posición Y	V_{SS}	V_{DD}	V_{SS}	V_{DD}	Medida de voltaje

Donde $V_{DD} = 5$ voltios y $V_{SS} = GND$, para la medida de voltaje se emplea una canal analógico de 10 bits lo que representa un resolución de $2^{10} = 1024$ bits. El valor de voltaje está mapeado para representar una resolución de 255 bits, la Tabla 1.7 muestra un ejemplo de medición, la esfera fue ubicada en la siguiente coordenada (8.5 cm en X y 2.1 cm en Y).

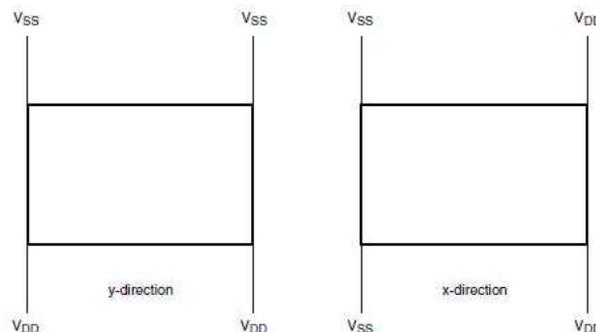


Figura 1.11. Esquema de conexiones de la pantalla táctil resistiva [11].

En la Figura 1.11 se muestra cómo se envían los voltajes para seleccionar el eje que se desea medir.

Tabla 1.7. Ejemplo de medición.

HILO	1: Superior izquierda	2: Inferior izquierda	3: Superior derecha	4: Inferior derecha	5: Lectura
Leer posición X	GND	GND	5 V	5 V	125
Leer posición Y	GND	5 V	GND	5 V	61

La Tabla 1.8 muestra el rango entre las dimensiones de la plataforma y el valor de voltaje medido en una resolución de 255 bits.

Tabla 1.8. Rangos de medición.

	Rango	Dimensiones	Lectura
Eje X	Max.	0.5 cm	60
	Min.	16.5 cm	194
Eje Y	Max.	0.5 cm	48
	Min.	21.5 cm	201

1.4.3 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

En este punto se detallará el control SMC como funciona, métodos de suavizamiento, y métodos de sintonización.

El control SMC es un procedimiento para el diseño de controladores robustos para sistemas no lineales, parte principalmente del modelo matemático del sistema y puede resultar en un controlador complejo con varios parámetros a ser calibrados [5]. En el control SMC se pueden presentar oscilaciones con amplitud y frecuencia finitas, esto ocurre debido a que la acción de control es discontinua y también a las dinámicas no modeladas del sistema, a estas oscilaciones se le conoce como *chattering* [5]. El *chattering* es un fenómeno que puede reducir la exactitud del control, este puede ser disminuido usando métodos de suavizamiento para reducir el efecto que tiene en el sistema [12].

En la Figura 1.12 se muestra el objetivo del control SMC que es lograr que el error se deslice a lo largo de una superficie deslizante y que no se aleje de esta [13].

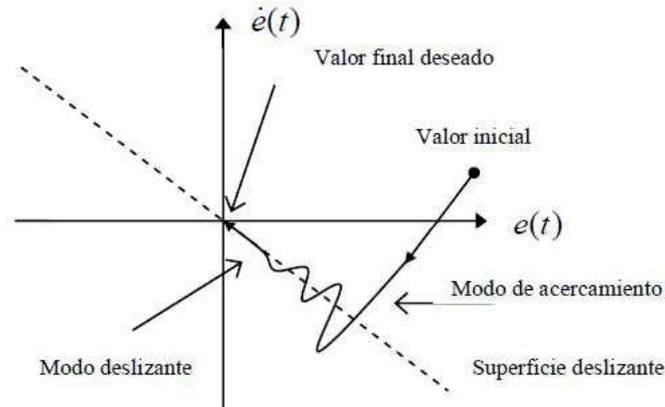


Figura 1.12. Definición gráfica del SMC [13].

La ley de control del SMC consta de dos partes que son el control discontinuo y el control equivalente, como se indica en la Ecuación 1.10 [2].

$$U_{SMC} = U_{eq} + U_D$$

Ecuación 1.10. Ley de control SMC.

Control discontinuo (U_D): es la parte discontinua que agrega un elemento no lineal que incluye el elemento de conmutación a la ley de control, que se encarga que el sistema alcance la superficie deslizante [2], [13].

Control equivalente (U_{eq}): es la parte continua de la ley de control, encargada de mantener la variable controlada sobre la superficie deslizante [2].

El diseño de un control SMC depende del modelo de la planta, primero se define una superficie (s) que cumpla la condición $\dot{s} = 0$ y la condición de estabilidad por Lyapunov que viene dada por $\dot{s} \cdot s < 0$. Las superficies propuestas por autores Jean – Jacques E. Slotiene y Weiping Li se muestran en la Ecuación 1.11 y de la Ecuación 1.12 [14].

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t)$$

Ecuación 1.11. Superficie diferencial, n orden del sistema.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int e(t) dt$$

Ecuación 1.12. Superficie integral – diferencial, n orden del sistema.

1.4.3.1 Métodos de suavizamiento del *chattering*

El control discontinuo está dado por la Ecuación 1.13, donde K_D es el parámetro sintonización de la forma de acercamiento a la superficie deslizante, y s es la superficie que utilizar. Ver Figura 1.13.

$$U_D = K_D \text{sign}(s) \quad \text{sign}(s) = \begin{cases} s > 0 & 1 \\ s = 0 & 0 \\ s < 0 & -1 \end{cases}$$

Ecuación 1.13. Control discontinuo con la función signo.

Debido a que la función signo produce oscilaciones de alta frecuencia es decir que el fenómeno *chattering* será muy notorio; es necesario suavizarlo, de esta manera los actuadores no sufrirán ningún daño.

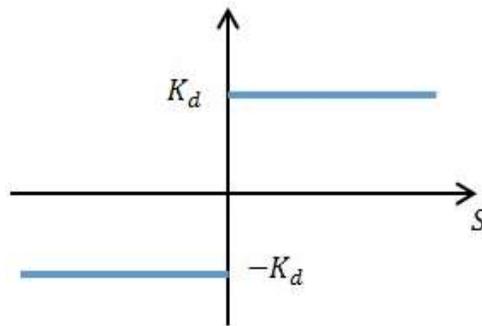


Figura 1.13. Función signo.

Existen varios métodos de suavizamiento del *chattering* que se pueden implementar, a continuación, se enumeran algunos:

- **Método de suavizamiento mediante sigmoide:**

La función sigmoide está dada por la Ecuación 1.14, donde δ permite suavizar la acción de control. Ver Figura 1.14

$$U_D = K_D \frac{s}{|s| + \delta}$$

Ecuación 1.14. Función sigmoide.

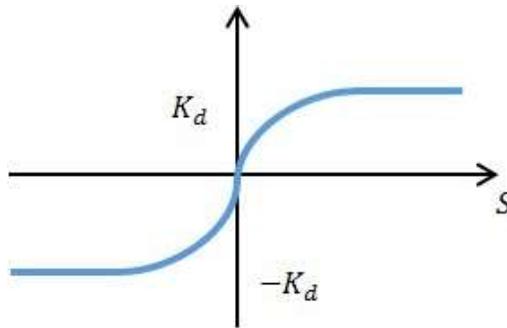


Figura 1.14. Função sigmoide.

- **Método de suavizamiento mediante zona muerta:**

Este método consiste en reemplazar la función signo por la función de la zona muerta, está dada por la Ecuación 1.. Ver Figura 1.15

$$U_D = K_D \text{ zona_muerta}(s) \quad \text{zona_muerta}(s) = \begin{cases} s \geq v & K_D \\ -v < s < v & 0 \\ s \leq -v & -K_D \end{cases}$$

Ecuación 1.29. Zona muerta

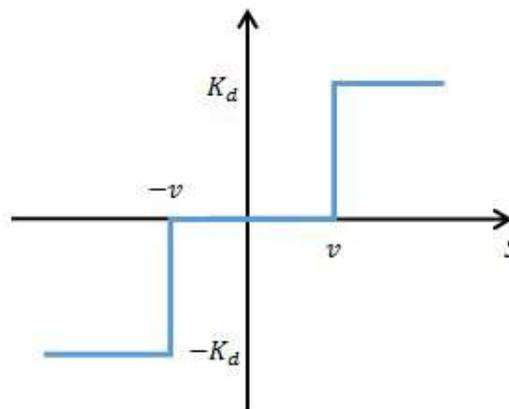


Figura 1.15. Zona muerta.

1.4.3.2 Métodos de sintonización de controladores SMC

En esta sección se indicará las maneras de sintonizar los controladores SMC, esto permitirá suavizar las oscilaciones producidas por el fenómeno *chattering*.

1.4.3.2.1 Método de sintonización por curva de reacción

Para la implementación de este método de sintonización, se requiere que la respuesta del proceso a un cambio escalón en la entrada sea una curva en forma de “s”.

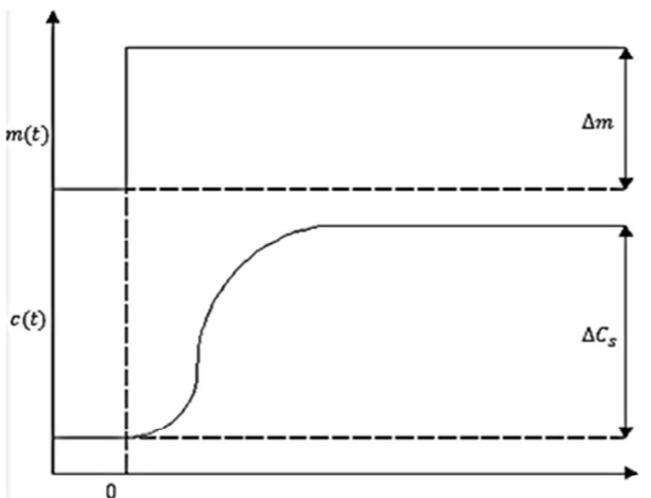


Figura 1.16. Respuesta del proceso ante una entrada escalón.

En la Figura 1.16 muestra la curva de la respuesta del proceso ante una entrada escalón, donde $m(t)$ la señal de entrada escalón y $c(t)$ es la respuesta del sistema. En este tipo de curvas se obtiene los siguientes parámetros: K ganancia en estado estacionario del proceso, t_0 tiempo muerto y τ : constante de tiempo. Para encontrar K se usa la Ecuación 1.

$$K = \frac{\Delta C_s}{\Delta m}$$

Ecuación 1.30. Ganancia en estado estacionario del proceso.

La sintonización de este sistema se selecciona una superficie deslizante para el control SMC es de tipo PID, se utilizan la Ecuación 1. a la Ecuación 1., donde $e(t)$ es el error de la variable a controlar y K_D , δ , λ_0 y λ_1 son los parámetros de sintonización del control SMC [15].

$$U_{SMC}(t) = \left(\frac{t_0 + \tau}{K}\right) \left[\left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} - \lambda_1\right) \frac{dc(t)}{dt} + \frac{c(t)}{t_0 \tau} + \lambda_0 \cdot e(t) \right] + K_D \frac{s(t)}{|s(t)| + \delta}$$

Ecuación 1.31. Ley de control SMC.

$$s(t) = \text{signo}(K) \left[\frac{d e(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) dt \right]$$

Ecuación 1.32. Superficie de deslizamiento.

$$\lambda_1 = \left[\frac{0.167}{K^{0.00952006} \tau^{0.23411834}} + 0.8558 \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.0163} \right]^{27.8127}$$

Ecuación 1.33. Ecuación de sintonización para λ_1 .

$$\lambda_0 = 0.7072 \left(\frac{1}{\tau} \right)^{1.7331} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{1.0898}$$

Ecuación 1.34. Ecuación de sintonización para λ_0 .

$$K_D = \frac{35.5364 \tau^{0.5924}}{K^{0.7997}}$$

Ecuación 1.35. Ecuación de sintonización para K_D .

$$\delta = \frac{27.9585}{K^{2.589} \tau^{6.6041}} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{7.45662} + 72.4675$$

Ecuación 1.36. Ecuación de sintonización para δ .

1.4.3.2.2 Método de sintonización por algoritmos genéticos

Este método permite obtener los valores adecuados para los parámetros de los controladores de manera aleatoria, para ello usa un método de evaluación es decir una función de desempeño o coste definida por el usuario [16].

Para la sintonización es necesario tener el modelo de la planta a controlar para poder realizar la sintonización utilizando los métodos mencionados anteriormente [16].

1.4.3.2.3 Método de sintonización por metodología heurística

Este método es el más frecuentemente utilizado para encontrar los valores adecuados para los parámetros de los controladores [2]. Para el desarrollo de este método es importante la visualización constante de la respuesta de control y la medición de un

índice de rendimiento para poder evaluar si la modificación de los parámetros de sintonización es adecuada.

Se puede partir por igualar a 1 todos los parámetros de sintonización del control SMC K_D , δ , λ_0 y λ_1 . En principio se busca eliminar el chattering modificando K_D y δ , es importante determinar el rango de variación de cada parámetro se puede partir por modificaciones de 0.1 para K_D y en variaciones de 1 para δ .

Una vez el chattering sea eliminado se modifican los parámetros λ_0 y λ_1 , igualmente se debe considerar el rango de variación adecuado dependiendo de la operación matemática asociada a la ley de control, se podrían considerar modificaciones de 0.5.

Como soporte de este método se puede desarrollar una tabla comparativa con la respuesta del índice de rendimiento obtenido por la modificación de cada parámetro de sintonización.

1.4.4 CONTROL FUZZY

En este punto se detallará el control Fuzzy, como funciona, tipos de funciones, interfaz de función, base de reglas y métodos de sintonización.

El control fuzzy es un control basado en palabras o expresiones en lugar de números; y en lugar de usar ecuaciones usa sentencias. El propósito de este tipo de control es usar la experiencia o el conocimiento de las personas sobre el control de un proceso y transformarla en valores numéricos que un controlador digital pueda entender y utilizar [17].

La forma en la que se relacionan las expresiones con valores numéricos es a través de funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia son representaciones gráficas del conjunto de valores que entran dentro de una expresión y de qué grado de pertenencia o con qué certeza el valor está dentro de esa expresión [17].

Como ejemplo, en la Figura 1.17 se ven varios tipos de funciones de pertenencia; en todas ellas los valores numéricos entre 0 y $\pi/4$ (eje X) entran dentro de la expresión de error de posición pequeño y en el eje Y se puede observar el grado de pertenencia de cada valor a dicha función de pertenencia [17].

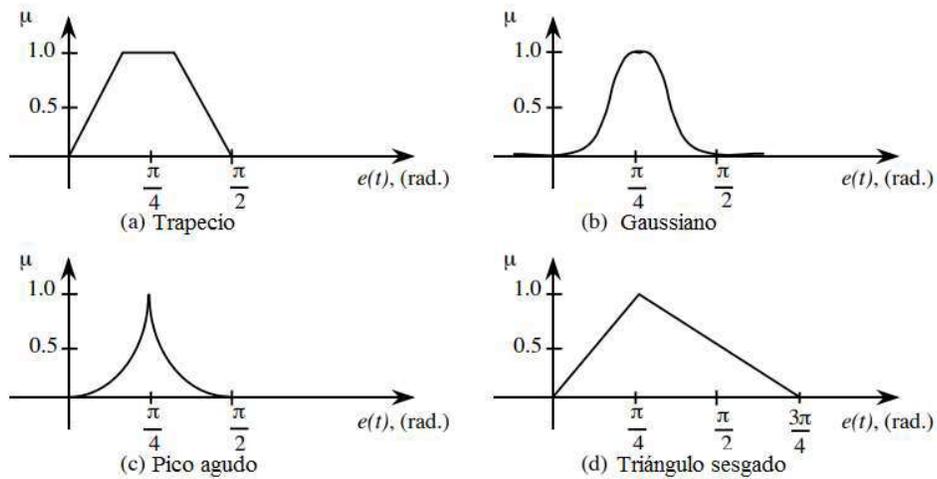


Figura 1.17. Tipos de funciones de pertenencia [18].

Un valor numérico puede estar incluido en varias funciones de pertenencia con varios grados de pertenencia. Esto se debe a que las expresiones lingüísticas usadas por las personas no son exactas; por lo tanto, el control fuzzy busca la forma de representar estas variaciones de forma numérica a través de conjuntos de pertenencia [17].

El control fuzzy cuenta con cuatro componentes los cuales se muestran en la Figura 1.18 y son [18]:

- Interfaz de fusificación.
- Mecanismo de inferencia.
- Base de reglas.
- Interfaz de defusificación.

A continuación, se explicará la función de cada componente y como se realiza un control usando un control fuzzy, para ello se usará como ejemplo un control de temperatura el cual tiene como entrada el error de temperatura y como salida el voltaje que se envía a una níquelina [18].

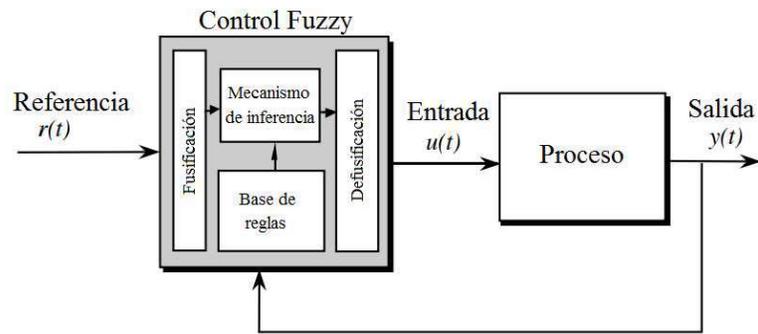


Figura 1.18. Componente de un control fuzzy [18].

1.4.4.1 Interfaz de fusificación

En esta etapa se convierten las entradas de control en expresiones que encajen dentro de las expresiones usadas en la base de reglas a través de funciones de pertenencia. Para el ejemplo del control de temperatura se puede ver en la Figura 1.19 como los valores de la entrada de control entran dentro de las tres funciones de pertenencia (error negativo, cero o positivo) [18].

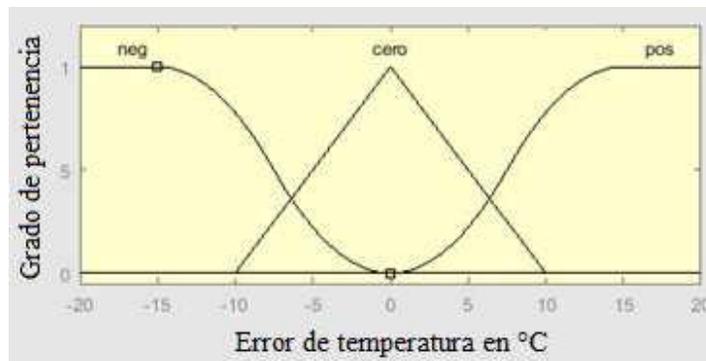


Figura 1.19. Funciones de pertenencia de la entrada de control.

1.4.4.2 Base de reglas

Contienen la lógica fuzzy, la cual relaciona las expresiones lingüísticas de la entrada de control con reglas que permiten determinar la acción a tomar (salida de control). Estas reglas están basadas en el conocimiento de personas expertas en el control de un proceso [18].

En el ejemplo del control de temperatura las reglas para el control de la temperatura son:

- Si la temperatura es baja (error positivo), entonces enviar un voltaje alto para aumentar la temperatura.
- Si la temperatura es alta (error negativo), entonces enviar un voltaje bajo para disminuir la temperatura.
- Si la temperatura está cerca al valor deseado (error cero), entonces enviar un voltaje medio para mantener la temperatura.

1.4.4.3 Mecanismo de inferencia

Permite al control fuzzy emular la toma de decisiones de un operador experto al interpretar las funciones de pertenencia de la interfaz de fusificación y usar la base de reglas para determinar la señal de control [18].

El mecanismo de inferencia usa la base de reglas para determinar las funciones de pertenencia de la salida de control que se activan, cada una con su respectivo grado de activación [18].

En el ejemplo del control de temperatura las funciones de pertenencia de la salida de control son las que se muestran en la Figura 1.20.

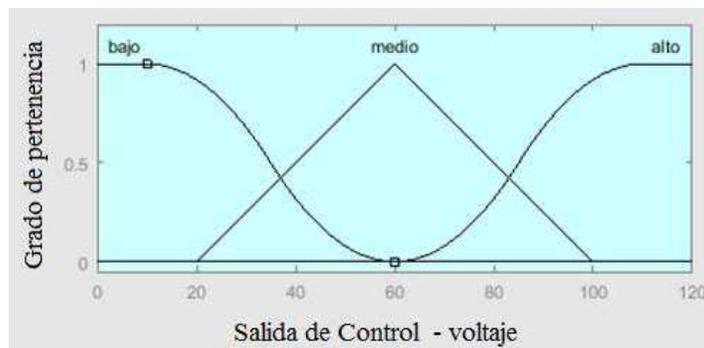


Figura 1.20. Funciones de pertenencia de la salida de control.

En la Figura 1.21 se puede observar como un cierto valor de error de temperatura (-6.71 °C) ocasiona que las funciones de pertenencia de la salida de control se activen. La unión de las funciones de pertenencia activadas es el resultado que entrega el mecanismo de inferencia [18].

Un error de -6,71 °C intersecta dos de las funciones de pertenencia de la entrada de control (negativo y cero) lo que corresponde a un grado de pertenencia. Aplicando las reglas indicadas en 1.5.4.2, para un error negativo le corresponde una función de pertenencia de salida (voltaje bajo) y para un error cero le corresponde (voltaje medio). El grado de pertenencia obtenido en las funciones de pertenencia para las entradas de control es enviado a las funciones de transferencias de la salida del control según la base de reglas. Finalmente, la resultante es el cálculo del centroide o bisectriz de la sumatoria de áreas determinada o del polígono.

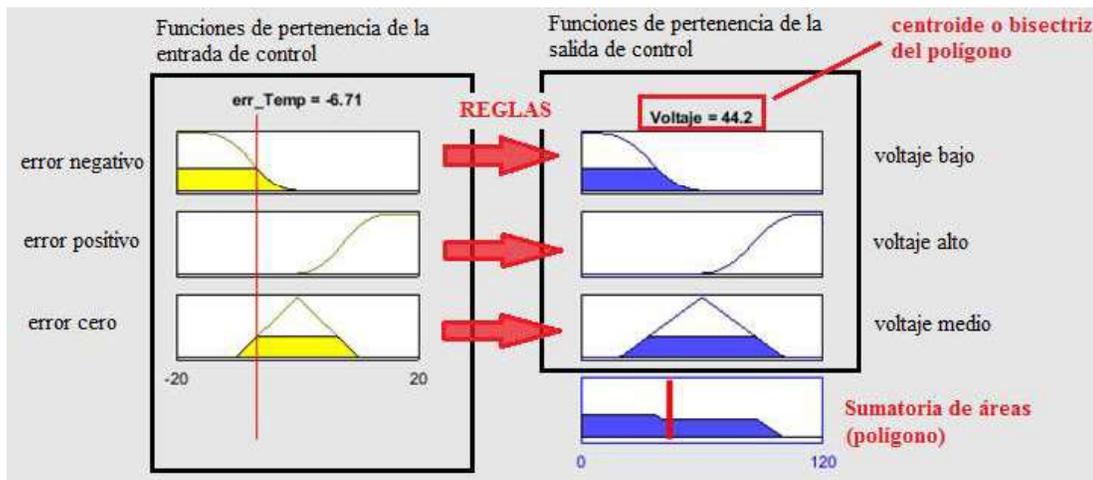


Figura 1.21. Acción del mecanismo de inferencia.

1.4.4.4 Interfaz de defusificación

Convierte el resultado del mecanismo de inferencia en una salida que pueda usar el actuador del proceso. Existen varios métodos para determinar la salida del control fuzzy, entre los más comunes están [18]:

- **Centroide:** se usa la expresión de la Ecuación 1.15 para encontrar el centroide del polígono entregado por el mecanismo de inferencia, ver Figura 1.22.

$$\text{Centroide} = \frac{\int f(x) \cdot x \, dx}{\int f(x) \, dx}$$

Ecuación 1.15. Cálculo del centroide.

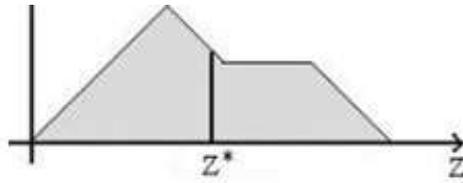


Figura 1.22. Centroide del polígono entregado por el mecanismo de inferencia

- **Bisectriz del área:** calcula el punto que divide en dos áreas iguales (Ecuación 1.16) al polígono entregado por el mecanismo de inferencia como se ve en la Figura 1.23.

$$\int_{\alpha}^{BOA} f_1(x) dx = \int_{BOA}^{\beta} f_2(x) dx$$

Ecuación 1.16. Cálculo de la bisectriz del área.

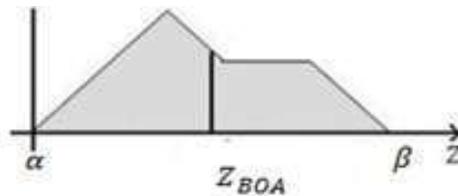


Figura 1.23. Bisectriz del área del polígono entregado por el mecanismo de inferencia

1.4.4.5 Métodos de sintonización de controladores fuzzy

Los métodos de sintonización de un controlador fuzzy incluyen: agregar ganancias de sintonización a las entradas y salidas de control, modificar la base de reglas y modificar las funciones de pertenencia. A continuación, se describirán cada uno de estos métodos [18].

1.4.4.5.1 Agregar ganancias de sintonización

Como se puede ver en la Figura 1.24 las ganancias de sintonización que afectan las entradas de control (g_0 y g_1) se pueden usar para variar la acción de control de forma análoga como se lo haría con un control PID; esto se debe a que las entradas son de naturaleza proporcional y derivativa [18].

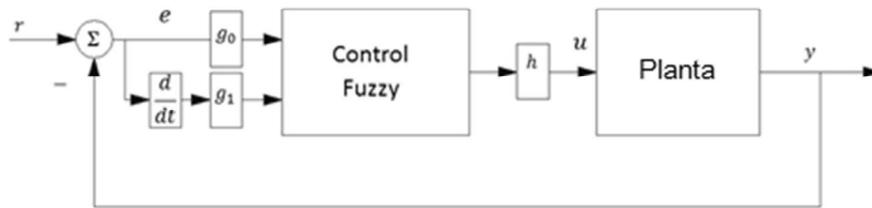


Figura 1.24. Ganancias de sintonización.

La ganancia de la salida de control (h) se usa como un medio de variar el escalamiento de la salida de control sin la necesidad de variar las funciones de pertenencia de la salida de control [18].

En [17] se recomienda que si se requiere de un término integral del error este no sea considerado como una entrada del control fuzzy, esto se debe a que es muy complicado el agregar este tipo de entrada a la base de reglas y que a mayor número de entradas el diseño de un control fuzzy aumenta en complejidad. En la Figura 1.25 se muestra un esquema de como la integral del error con su respectiva ganancia de sintonización se suma a la salida de control del controlador fuzzy [17].

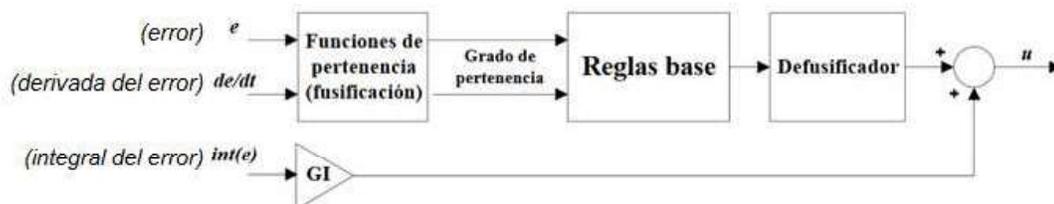


Figura 1.25. Término integral en un control fuzzy.

1.4.4.5.2 Modificar la base de reglas

Si las ganancias de sintonización no permiten obtener el comportamiento deseado se puede observar la posibilidad de agregar reglas que permitan que la señal de control tome los valores adecuados [18].

1.4.4.5.3 Modificar las funciones de pertenencia

Una forma de sintonización más compleja consiste en modificar las funciones de pertenencia, esto implica modificar el conjunto de valores que pertenecen a una función y

modificar la forma o la expresión matemática que defina a la función de pertenencia para de esta forma variar los grados de pertenencia de los valores de las entradas de control [18].

1.4.5 CONTROL SMC BASADO EN SUPERFICIE CON COMPONENTE FUZZY (FSMC)

El FSMC difiere del SMC solo en el control discontinuo, en la cual se agrega un componente basado en lógica fuzzy al cálculo de la superficie como se ve en la Ecuación 1.17, donde S_H está definida por la Ecuación 1.. El término s_F es el componente fuzzy agregado a la fase de alcanzabilidad [5].

$$U_{SMC} = U_{eq} + U_D(S_H)$$

Ecuación 1.17. Control SMC basado en superficie con componente fuzzy.

$$S_H = s + s_F$$

Ecuación 1.40. Componente fuzzy en el cálculo de la superficie.

Al incorporar el control fuzzy en la fase de alcanzabilidad se mejora la capacidad del control SMC para reaccionar rápida y agresivamente o lenta y suavemente cuando las condiciones del proceso a controlar lo requieran. Es decir que agrega inteligencia y robustez al controlador [5].

El componente fuzzy no se considera en el diseño de las ecuaciones del control SMC, solo es agregado al final del diseño en el control discontinuo. El componente fuzzy es un control fuzzy completo, por lo que posee las entradas de control y el conjunto de reglas necesarios para llevar a cabo el control del sistema [5].

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se inicia el desarrollo del software empleado para la adquisición y envío de datos desde la tarjeta embebida Arduino Mega.

Posteriormente se detalla el proceso de diseño de los controladores empezando por el control SMC, luego FUZZY y FSMC en los cuales se describirán las reglas que se implementarán para controlar sistema de balance Ball & Plate (esfera & plato).

Seguidamente se realizarán las simulaciones utilizando el software Matlab, en base a ello se obtendrá los posibles parámetros de los controladores que posteriormente serán implementados en el sistema balance Ball & Plate (esfera & plato).

2.1 SOFTWARE DEL SISTEMA BALL & PLATE

Para el desarrollo de presente trabajo se emplearán dos entornos de programación, el primero es el software IDE para la programación de la tarjeta embebida Arduino Mega y el otro es el entorno MatLab/Simulink para el desarrollo de los algoritmos de control. Para el enlace físico entre el computador y la tarjeta embebida Arduino se emplea un cable USB, bajo protocolo serial.

Para la implementación de los algoritmos de control en la tarjeta embebida Arduino Mega se empleará MatLab/Simulink desde donde se puede descargar el programa en la tarjeta, de esta forma la planta será autónoma.

2.1.1. IDE (ARDUINO)

El programa IDE se empleará para la programación de una rutina de recepción y envío de datos por medio de comunicación serial, hacia el computador. La rutina mencionada también tiene la función de tomar las señales del panel táctil resistivo y enviar la señal desde el computador a cada servomotor.

A continuación, se describe la rutina en IDE (Figura 2.1), en la misma se asignan puertos de salida para cada canal del panel resistivo, adicionalmente se asigna un puerto analógico de entrada en donde se conecta el pin sensor del panel. Mediante la librería

Servo.h se asignan los puertos en donde están conectados los servomotores. Esta librería reconoce directamente el dato de entrada al servomotor en grados dato a ser considerado posteriormente para realizar una conversión (dato analógico de 8 bit a centímetros) en el algoritmo de control.

Se inicializa y se configura el puerto de comunicación asignando la velocidad de transmisión serial en 9600 baudios.

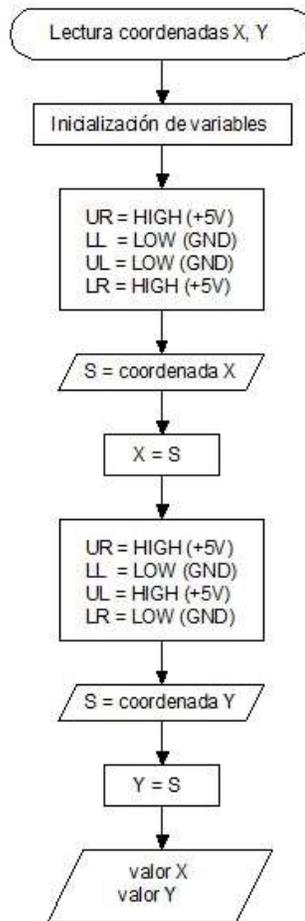


Figura 2.1 Diagrama de flujo lectura de coordenadas

2.1.2. MATLAB/SIMULINK

Para el desarrollo de los algoritmos de control se empleará MatLab/Simulink, la programación se realizará empleando los bloques correspondientes. Para el intercambio de datos con la tarjeta embebida Arduino se tiene entonces que emplear un bloque de configuración de comunicación serial asignando el puerto y seteándolo a la misma velocidad que la tarjeta 9600 baudios (Figura 2.2). Una vez realiza la apertura del puerto

el bloque de recepción serial podrá adquirir los datos enviados por la tarjeta Arduino, los datos entregados se encuentran en 8 bits (0 -255) por lo que es necesaria una etapa de acondicionamiento de los datos para que puedan ser convertidos en centímetros, dicho proceso es realizado por el bloque Subsystem1 (Figura 2.3).

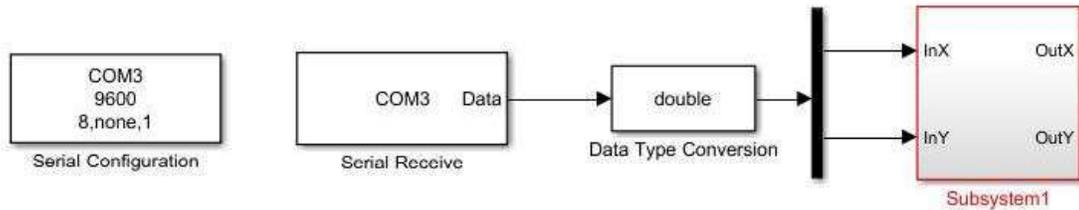


Figura 2.2. Configuración comunicación datos de entrada.

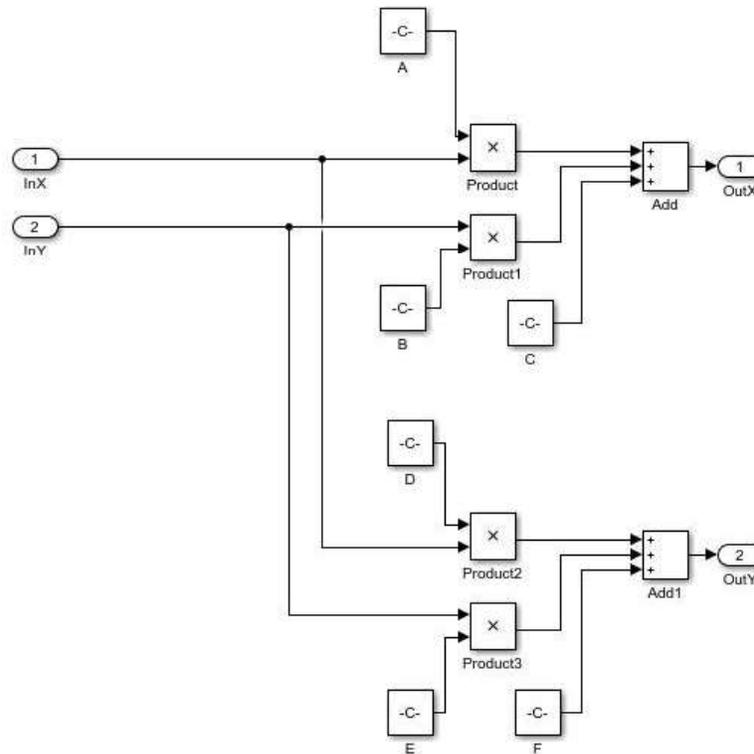


Figura 2.3. Conversión Resistencia / Centímetros.

Para realizar la conversión de los datos entregados a centímetros se optó por emplear una calibración a 3 puntos [19]. El método propone determinar las coordenadas de 3 puntos en el panel táctil (Figura 2.4), de donde se determina 6 constantes A, B, C, D, E y F las mismas están relacionadas a las entradas.

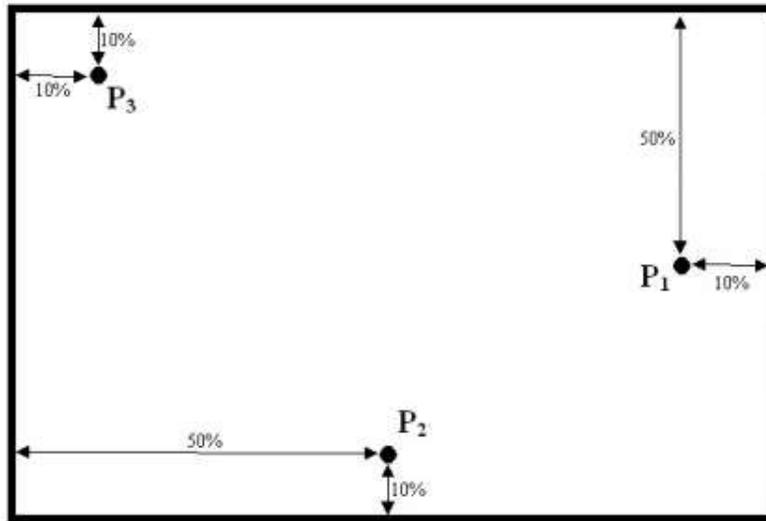


Figura 2.4. Método de calibración por 3 puntos.

El resultado del método no solo realiza la conversión a centímetros, también corrige la no linealidad inherente de la pantalla táctil.

Para la salida de datos a la tarjeta Arduino, se emplea el bloque Serial Send. Los datos enviados a la tarjeta deben estar en grados mientras que el ángulo de salida de los algoritmos de control estará en radianes, se emplea entonces bloques para realizar la conversión, además se incluyen bloques para poder calibrar el 0 en cada eje y un bloque saturador que evitará los posibles daños mecánicos en la planta debidos a un cambio brusco del ángulo de inclinación, dicho saturador está configurado en +/- 0.5 radianes (Figura 2.5).

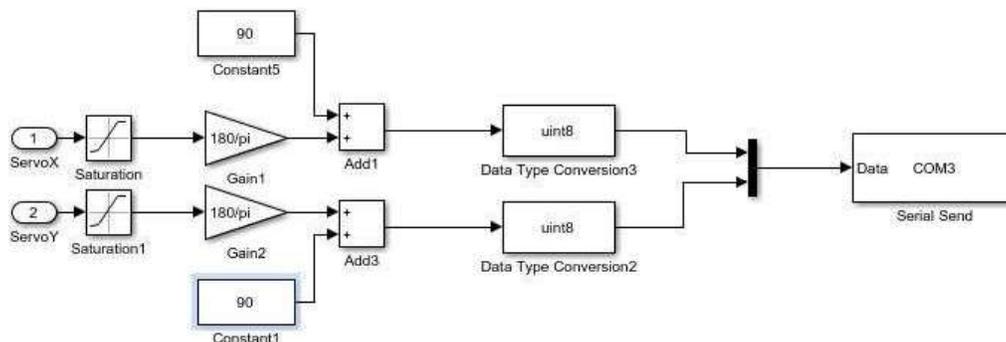


Figura 2.5. Configuración comunicación datos de salida Radianes / Grados.

2.2. DISEÑO Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

2.2.1. DISEÑO DEL CONTROL SMC

Dada la Ecuación 1.12, donde $n = 2$ por ser el orden del sistema *Ball & Plate*.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \int e(dt)$$

Ecuación 2.1. Superficie integral - diferencial seleccionada.

De la Ecuación 2.1, se resuelve la ecuación de segundo orden y se multiplica la integral, y se obtiene la Ecuación 2.2. Posteriormente se debe comprobar que se cumpla la condición $\dot{s} = 0$ que se explicó en la sección 1.5.3. La parte de la ley de control SMC, control equivalente es la responsable de mantener al sistema en la condición $\dot{s} = 0$.

$$s = \left(\frac{d^2}{dt^2} + 2 \frac{d}{dt} \lambda + \lambda^2 \right) \int e(dt)$$
$$\dot{s} = \dot{e} + 2 e \lambda + \lambda^2 \int e(dt)$$

Ecuación 2.2. Superficie deslizante por usar.

Para comprobar que cumpla la condición ($\dot{s} = 0$), se deriva la superficie y se obtiene Ecuación 2.3.

$$\dot{s} = \ddot{e} + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e$$

Ecuación 2.3. Derivada de la superficie deslizante a utilizar.

Considerando que el error de posición y sus primera y segunda derivada, pueden expresarse como se indica en la Ecuación 2.4.

$$e = x_d - x$$
$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}$$
$$\ddot{e} = \ddot{x}_d - \ddot{x}$$

Ecuación 2.4. Definición de los errores de la variable controlada.

Donde x_d es el valor deseado, referencia o set point.

La Ecuación 1. se reemplaza en la Ecuación 2.4 para llegar a la siguiente expresión:

$$\ddot{e} = \ddot{x}_d - 218.75 u_x$$

Ecuación 2.5. Error de segunda derivada.

Reemplazando la Ecuación 2.4 en la Ecuación 2.5, e igualando a cero la Ecuación 2.3 se obtiene la condición que garantiza $\dot{s} = 0$, representada en la Ecuación 2.6.

$$0 = \ddot{x}_d - 218.75 u_x + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e$$

Ecuación 2.6. Cumplir con la condición $\dot{s} = 0$.

A partir de la Ecuación 2.6 se despeja u_x , que equivale a U_{eq} , obteniendo la Ecuación 2.7.

$$U_{eq} = u_x = \frac{\ddot{x}_d + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e}{218.75}$$

Ecuación 2.7. Control equivalente.

Al reemplazar la Ecuación 2.7 y la Ecuación 1.14 en la Ecuación 1.10, se consigue la ley de control SMC válida para el eje X .

$$U_{SMx} = \frac{\ddot{x}_d + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e}{218.75} + K_D \frac{s}{|s| + \delta}$$

Ecuación 2.8. Ley de control SMC en X .

En la Ecuación 2.9 se muestra la ley de control para el eje Y , que se obtiene aplicando el mismo procedimiento anteriormente descrito.

$$U_{SMcy} = \frac{\ddot{y}_d + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e}{218.75} + K_D \frac{s}{|s| + \delta}$$

Ecuación 2.9. Ley de control SMC en Y .

Para alcanzar la superficie de deslizamiento actúa el control discontinuo (U_D), que se define a partir de una función de Lyapunov, mostrada en la Ecuación 2.10, que debe ser definida positiva, y cuya derivada debe ser definida negativa como se muestra en la Ecuación 2.11, que representa la condición de estabilidad.

$$V = \frac{1}{2} s^2 > 0$$

Ecuación 2.10. Función Lyapunov utilizada.

$$\dot{V} = s \dot{s} < 0$$

Ecuación 2.11. Condición de estabilidad.

La Ecuación 2.2 que es la superficie a utilizar y la Ecuación 2.4 que es el valor del error, se reemplazan en la Ecuación 2.11, para obtener Ecuación 2.13.

$$(\ddot{e} + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e) s < 0$$

Ecuación 2.12. Aplicando la condición de alcanzabilidad.

$$(\ddot{x}_d - 218.75 U_{SMC_x} + 2 \dot{e} \lambda + \lambda^2 e) s < 0$$

Ecuación 2.13. Condición de alcanzabilidad con el valor del error.

Finalmente se reemplaza la ley de control del eje X (Ecuación 2.9) en Ecuación 2.13 y se simplifica, para obtener Ecuación 2.14.

$$\left(218.75 K_D \frac{s}{|s| + \delta} \right) s > 0$$

Ecuación 2.14. Verificar la condición de alcanzabilidad.

A partir de la Ecuación 2.14, se analizan las condiciones que debe cumplir la desigualdad, donde K_D es un parámetro de ajuste del control. En la Ecuación 2.15 se muestran estas condiciones que se deben mantener para cumplir la condición de alcanzabilidad.

$$si s > 0 \quad \therefore \frac{s}{|s| + \delta} > 0 \quad \therefore K_D > 0 \quad \therefore \delta > 0$$

$$si s < 0 \quad \therefore \frac{s}{|s| + \delta} < 0 \quad \therefore K_D > 0 \quad \therefore \delta > 0$$

Ecuación 2.15. Condiciones de la desigualdad.

2.2.2. DISEÑO DEL CONTROL FUZZY

Para el diseño de este control se basará en funciones de pertenencia, es decir, utilizando representaciones gráficas del conjunto de valores numéricos que entran dentro de una expresión. Para este proyecto se utilizará la función de pertenencia tipo triángulo sesgado (ver sección 1.5.4).

Se utilizarán los criterios adquiridos en el control SMC para realizar las reglas del control fuzzy, y a continuación, el desarrollo de los componentes anteriormente mencionados en la sección 1.5.4.

2.1.2.1. Componente Interfaz de Fusificación

En esta etapa se ingresan los valores de entrada de control dentro de siete funciones de pertenencia (ver Figura 2.6 y 2.7) los cuales son:

- NL: *Negativo Grande*
- NM: *Negativo Mediano*
- NS: *Negativo Pequeño*
- Z: *Cero*
- PS: *Positivo Pequeño*
- PM: *Positivo Mediano*
- PL: *Positivo Grande*

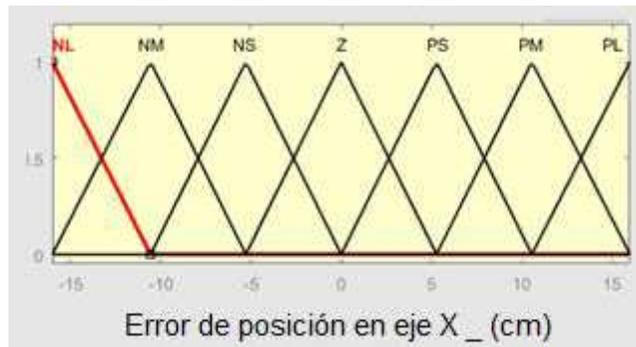


Figura 2.6. Funciones de pertenencia de entrada de control e para eje X .

La función de pertenencia para la entrada de control correspondiente al error de posición en el eje x , tiene un rango de operación de $16[cm]$ a $-16[cm]$, puesto que está limitado por la longitud física de la plataforma para este eje.

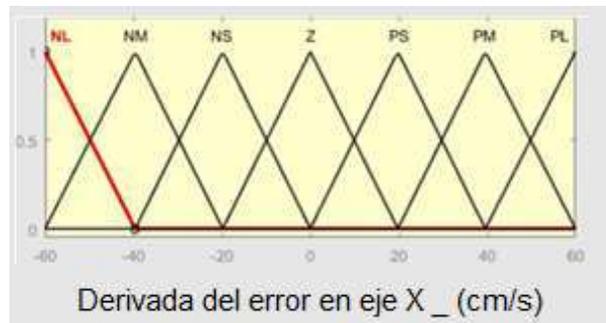


Figura 2.7. Funciones de pertenencia de entrada de control \dot{e} para eje X .

La función de pertenencia de entrada de control para eje X de la derivada del error muestra como rango de $60(cm/s)$ a $-60(cm/s)$ valor determinado experimentalmente, medido en la implementación del control SMC.

2.1.2.2. Componente Base de reglas

En la Figura 2.8 se muestra las reglas de control para del sistema *Ball & Plate* ingresadas en esta etapa. Las reglas están compuestas por los operadores lógicos “si” “y” “entonces”. Por ejemplo para la regla marcada se tiene:

- “Si” el error es Z (cero) “Y” la derivada del error es PS (positivo pequeño)
“Entonces” la salida de control es PS (positivo pequeño)

El total de reglas resulta de la multiplicación de la cantidad de funciones de pertenencia del error y de la derivada del error, para este caso $7 (e) \times 7 (\dot{e}) = 49$ reglas.

"Si" Error

e \dot{e}		PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
NL	Z	NS	NM	NL	NL	NL	NL	NL
NM	PS	Z	NS	NM	NL	NL	NL	NL
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NL	NL	NL
Z	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	NL
PS	PL	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PM	PL	PL	PL	PM	PS	Z	NS	NL
PL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	Z	NL

"Entonces" Salida de control

Figura 2.8. Reglas para el control sistema *Ball & Plate* [20].

2.1.2.3. Componente Mecanismo de inferencia

En la Figura 2.9 se muestra las funciones de pertenencia de la salida de control ingresadas para esta etapa.

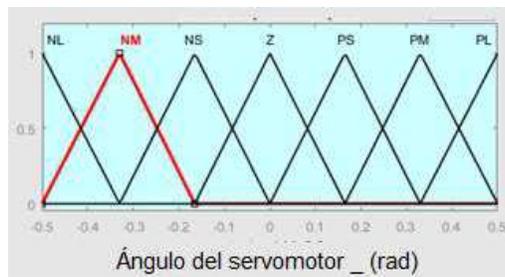


Figura 2.9. Funciones de pertenencia de salida de control para eje X .

La función de pertenencia de salida de control para eje X muestra como rango de $0.5 (rad)$ a $-0.5(rad)$ ya que es el ángulo al que está limitado el movimiento del servomotor.

En la Figura 2. se muestra las funciones de pertenencia de la salida de control que se activan al tener un cambio a en la entrada.

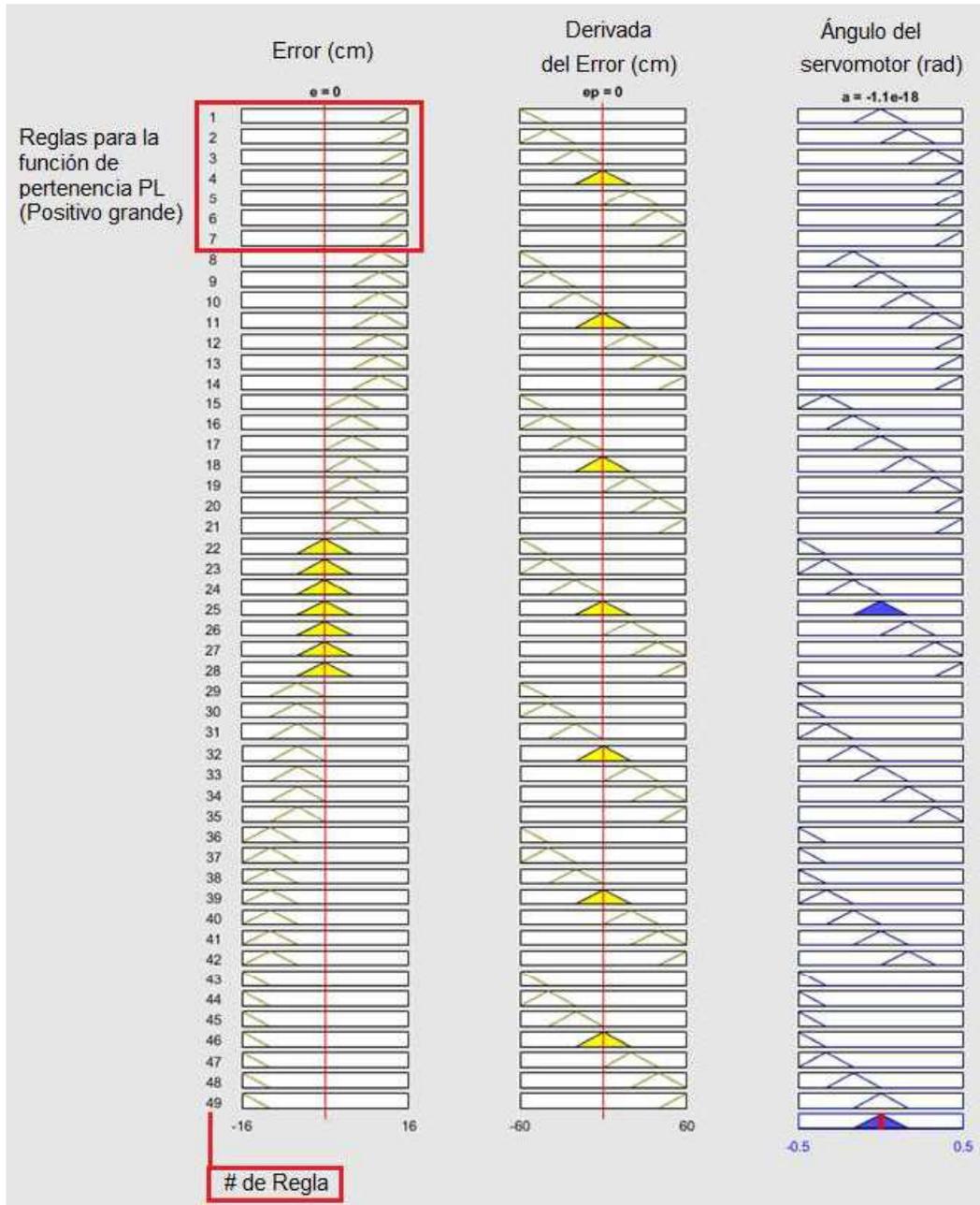


Figura 2.10. Acción del mecanismo de referencia.

2.1.2.4. Componente Interfaz de defusificación

En la Figura 2.11 se muestra método del centroide del polígono (el cual se escogió para esta etapa), el valor obtenido es la centroide del área del polígono que es entregado por el mecanismo de inferencia.

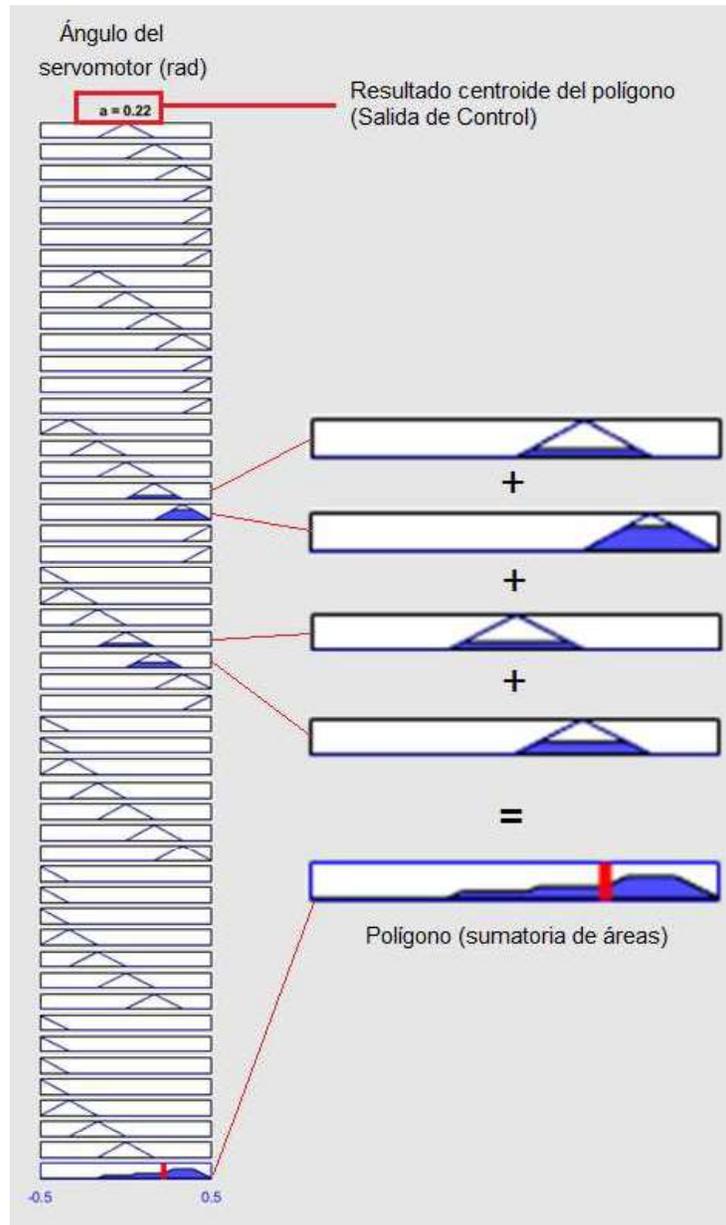


Figura 2.11. Área del polígono entregado por el mecanismo de inferencia.

2.2.3. DISEÑO DEL CONTROL FSMC

En la Sección 1.5.5 se indica que se diseña el Control SMC y el componente Fuzzy se lo agrega al final como se describe en la Ecuación 1..

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra las reglas fuzzy para obtener la superficie deslizante s_F para la fase de alcanzabilidad.

La Figura 2.12 se muestra un diagrama simplificado del control FSMC, el objetivo del control es incorporar un componente fuzzy a la superficie convencional del control SMC. Para este caso el componente es el propio control Fuzzy desarrollado en la Sección 2.2.2.

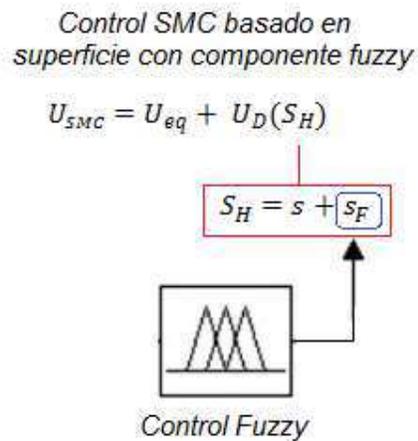


Figura 2.12. Control FMC.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS

3.1.1. SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES

Para la simulación de los algoritmos de control propuestos se emplea el modelo completo de la planta sin considerar reducción alguna, ni linealización en los puntos de operación. Se parte entonces de la Ecuación 3.1 y de la Ecuación 3.2, donde se representan las sumatorias de las energías para el eje X y para el eje Y respectivamente.

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{x} - m_b x \dot{\alpha}^2 - m_b y \dot{\alpha} \dot{\beta} + m_b g \sin(\alpha) = 0$$

Ecuación 3.18. Sumatoria de energías del eje X .

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{y} - m_b y \dot{\beta}^2 - m_b x \dot{\alpha} \dot{\beta} + m_b g \sin(\beta) = 0$$

Ecuación 3.19. Sumatoria de energías del eje Y .

Realizando el análisis para el eje X , se despeja la aceleración en la Ecuación 3.1, obteniendo la siguiente expresión:

$$\ddot{x} = \frac{m_b x \dot{\alpha}^2 + m_b y \dot{\alpha} \dot{\beta} - m_b g \sin(\alpha)}{\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)}$$

Ecuación 3.3. Aceleración en eje X .

Remplazando en la Ecuación 3.3 el momento de inercia para una esfera sólida dada en la Ecuación 3.4, se obtiene la Ecuación 3.5, que expresa una forma simplificada de la aceleración para el eje X .

$$J_b = \frac{2}{5} \cdot m_b \cdot r_b^2$$

Ecuación 3.4. Momento de inercia de la esfera sólida.

$$\ddot{x} = \frac{m_b x \dot{\alpha}^2 + m_b y \dot{\alpha} \dot{\beta} - m_b g \sin(\alpha)}{\left(m_b + \frac{2 \cdot m_b \cdot r_b^2}{r_b^2} \right)}$$

$$\ddot{x} = \frac{m_b x \dot{\alpha}^2 + m_b y \dot{\alpha} \dot{\beta} - m_b g \sin(\alpha)}{\left(\frac{7}{5} m_b \right)}$$

$$\ddot{x} = \frac{5}{7} (x \dot{\alpha}^2 + y \dot{\alpha} \dot{\beta} - g \sin(\alpha))$$

Ecuación 3.5. Aceleración en eje X simplificada.

En la Ecuación 3.5 se reemplaza la Ecuación 3.6, que representa la transmisión de giro del ángulo de la plataforma (α) al ángulo del servomotor en el eje X (u_x), como se analizó en la Sección 1.5.1.1.1.

$$\alpha = \frac{2.5}{8} \cdot u_x$$

Ecuación 3.6. Transmisión de giro en el eje X .

$$\beta = \frac{2.5}{8} \cdot u_y$$

Ecuación 3.7. Transmisión de giro en el eje Y

Una vez determinado el modelo completo del sistema *Ball & Plate* (esfera & plato), se procede con la implementación en MatLab/Simulink, dicho esquema se puede apreciar en la Figura 3.1. y para determinar el desempeño de cada uno de los controladores propuestos se realizó la comparativa considerando el criterio de la integral del error cuadrático ISE, la Ecuación 3.8 fue utilizada en la simulación de cada controlador para analizar las variables correspondientes de posicionamiento y seguimiento de camino.

$$ISE = \int e^2(t)(t) dt$$

Ecuación 3.8. Criterio de la integral del error cuadrático.

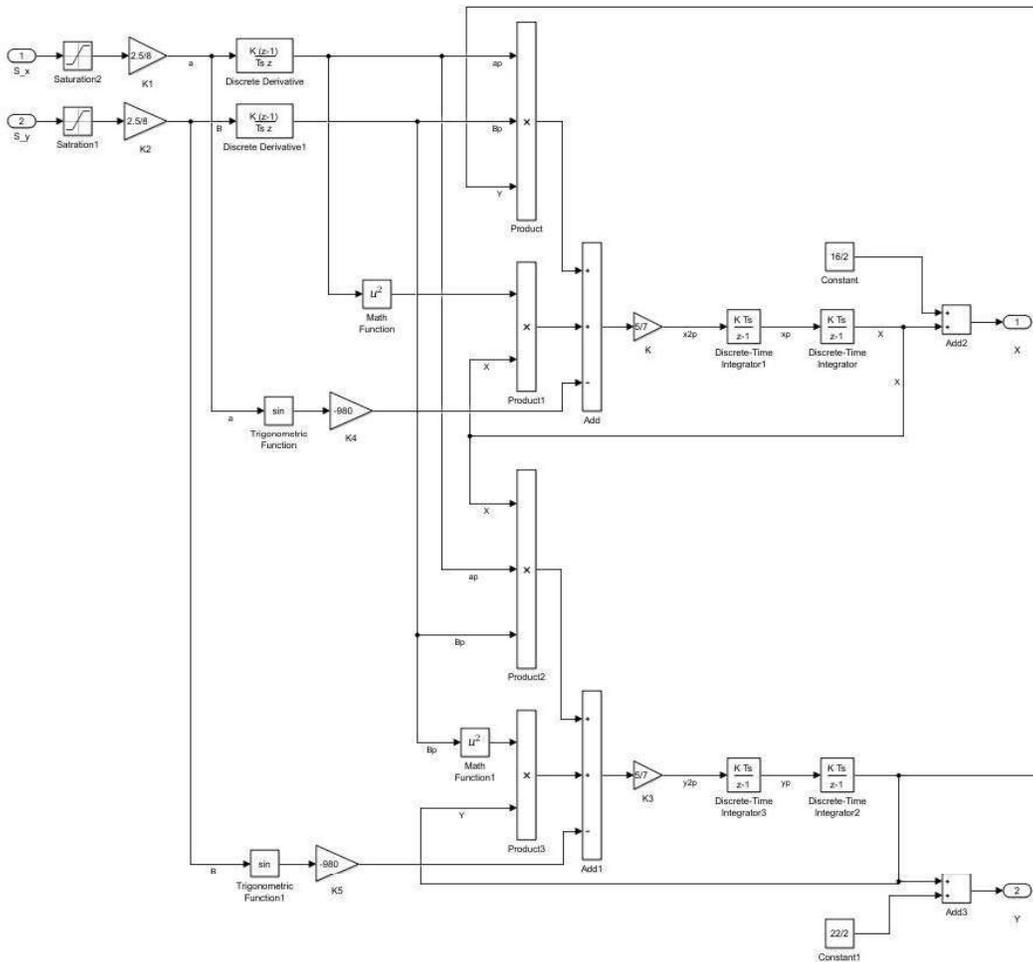


Figura 3.1. Modelo completo sistema Esfera & Plato.

3.1.1.1. Simulación de control SMC

El control SMC es aplicado en forma individual sobre cada eje como se indica en la Figura 3.2, en las entradas X_{REF} y Y_{REF} se prueban coordenadas diferentes, primero se aplica un sencillo cambio de variable, y posteriormente las trayectorias de una circunferencia y un cuadrado.

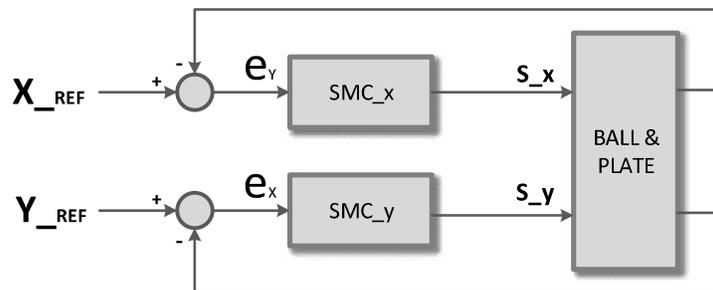


Figura 3.2. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes X y Y

En la Figura 3.3 se muestra el esquema de la simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control SMC para los ejes *X* y *Y*, la referencia del sistema es el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- *Coordenada inicial* = (6,7) [cm]
- *Coordenada final* = (11,15) [cm]

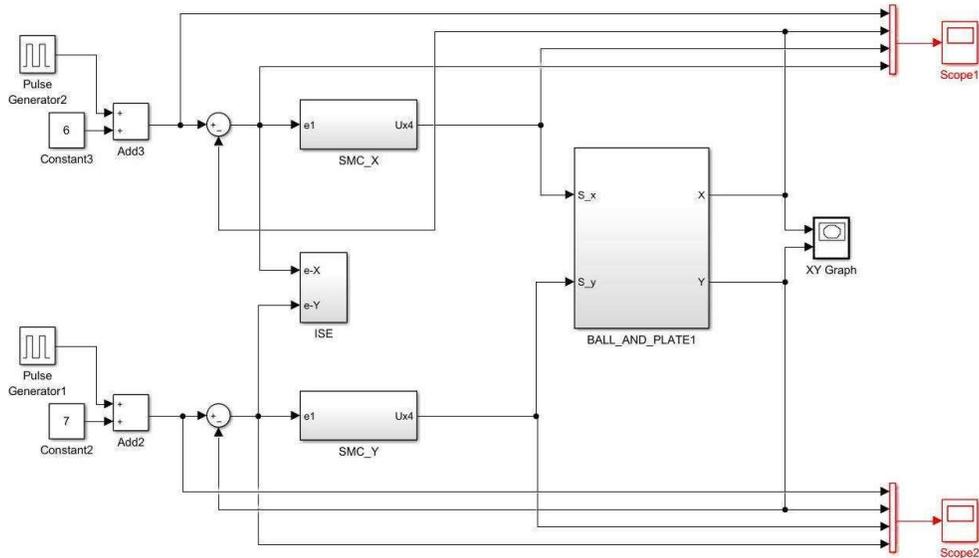


Figura 3.3. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes *X* y *Y* (Cambio de coordenadas).

Los parámetros de sintonización del control γ_1 , γ_2 , K , δ , fueron determinados heurísticamente, y se empleó el método de la sigmoide para el suavizamiento del chattering.

En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador SMC, tanto para el control en el eje *X* y el control en el eje *Y*.

Tabla 3.1. Parámetros de sintonización simulación controlador SMC.

Eje	γ_1	γ_2	K	δ
X	6	7	1.1	12
Y	6	7	1.1	12

Los parámetros de sintonización mencionados fueron utilizados para la simulación del controlador con referencia de cambio de coordenadas, circunferencia y cuadrado.

La Figura 3.4 muestra el resultado del controlador SMC en el plano *X, Y*, para la referencia del cambio de coordenadas.

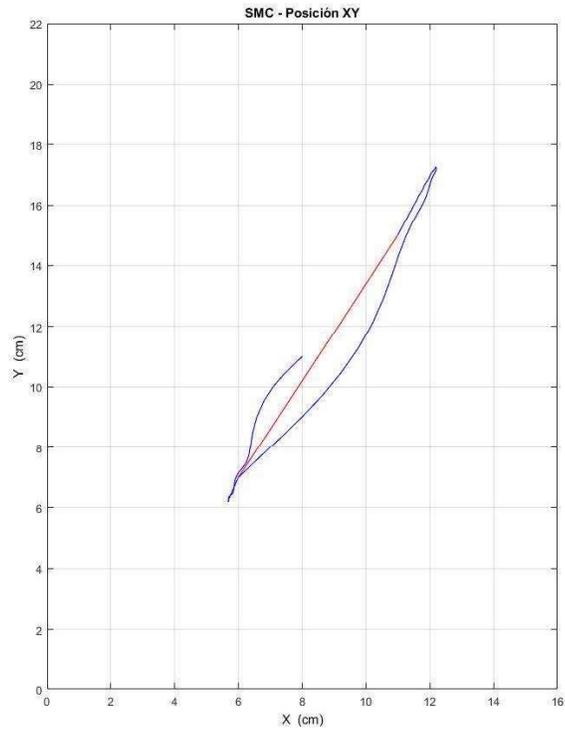


Figura 3.4. Resultado de la simulación del control SMC plano X, Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.5 muestra los resultados del controlador SMC para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

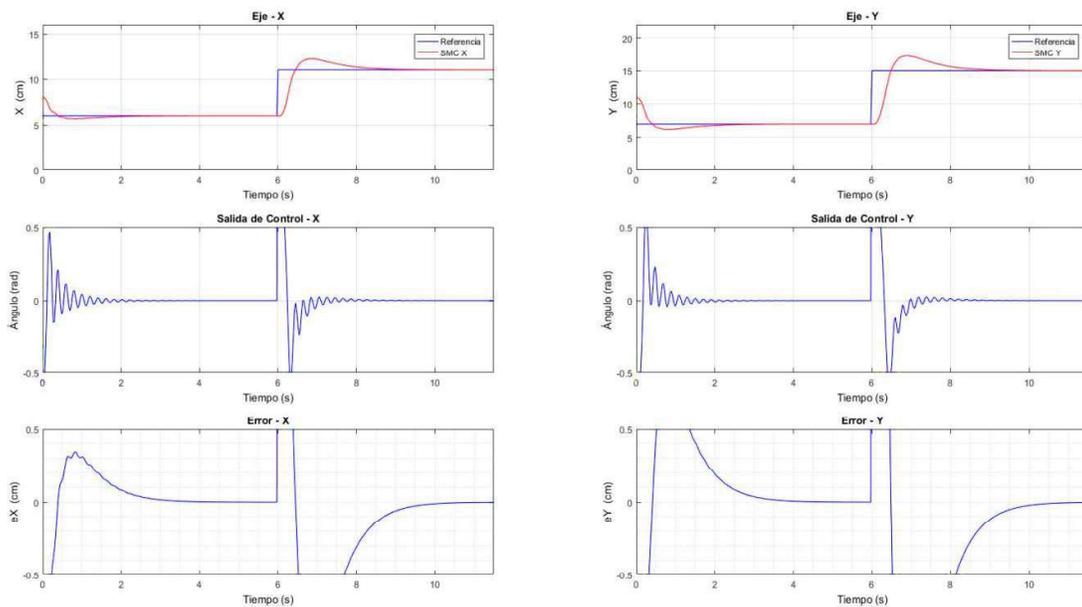


Figura 3.5. Resultados de la simulación del control SMC (Cambio de coordenadas).

Considerando un tiempo total de 11.5 segundos, se determinó un índice de desempeño ISE, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento para cada uno de los ejes Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Índice de desempeño de la simulación del controlador SMC.

Eje	ISE	Sobre-Impulso (cm)	Tiempo de establecimiento (s)
X	6.84	1.192	3.67
Y	21.2	2.23	4.74

En la Figura 3.6 se muestra el esquema de simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control SMC para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8, 11) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

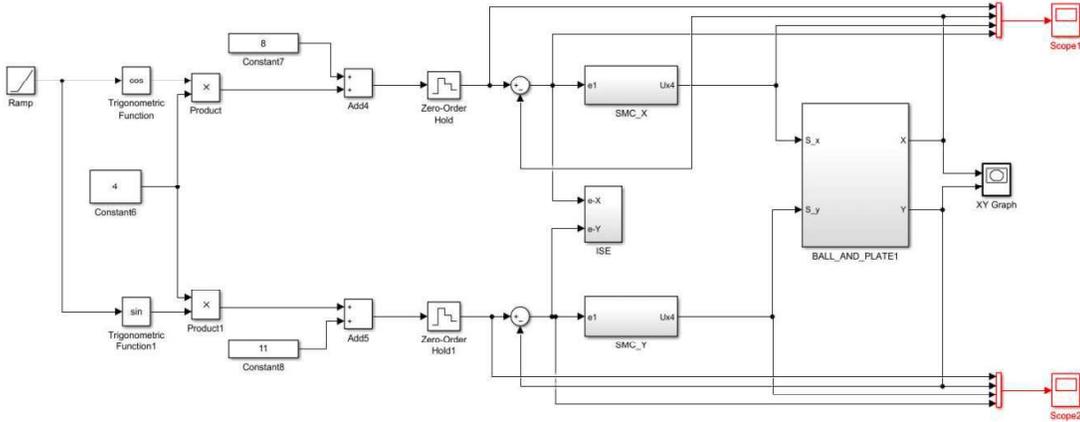


Figura 3.6. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes *X* y *Y* (Circunferencia).

La Figura 3.7 muestra el resultado del controlador SMC en el plano *X, Y*, para la referencia del seguimiento de camino de una circunferencia.

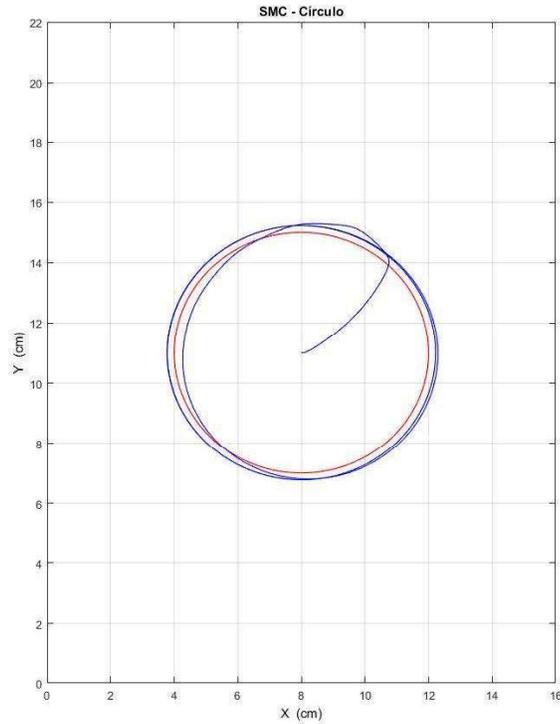


Figura 3.7. Resultado de la simulación del control SMC plano X, Y (Circunferencia).

La Figura 3.8 muestra los resultados del controlador SMC para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

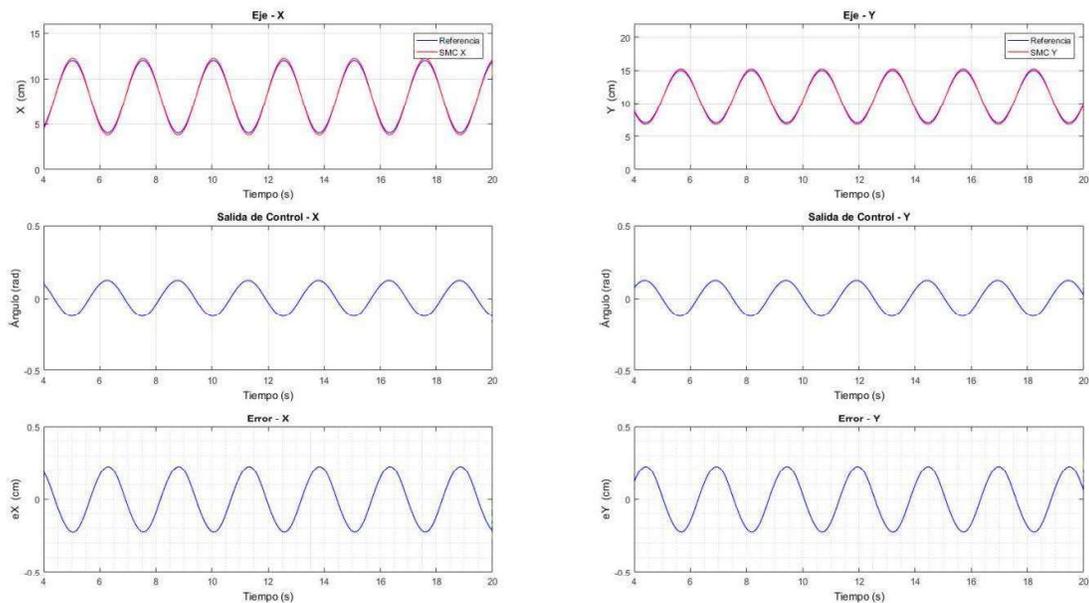


Figura 3.8. Resultados de la simulación del control SMC (Circunferencia).

Para un tiempo de 4 a 20 segundos se determinó un índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Índice de desempeño de la simulación del controlador SMC – circunferencia.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	0.3942	0.22
Y	0.4102	0.22

En la Figura 3.9 se muestra el esquema de simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control SMC para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- *Lado* = 5 [cm]
- *Coordenada de inicio* = (6, 8.5) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.7 [cm/s]

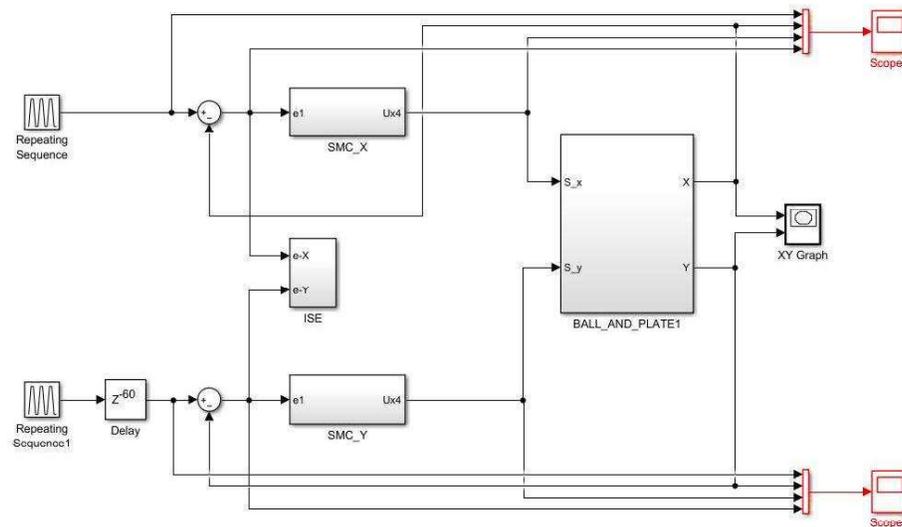


Figura 3.9. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes *X* y *Y* (Cuadrado).

La Figura 3.10 muestra el resultado del controlador SMC en el plano *X,Y*, para la referencia del seguimiento de camino de un cuadrado.

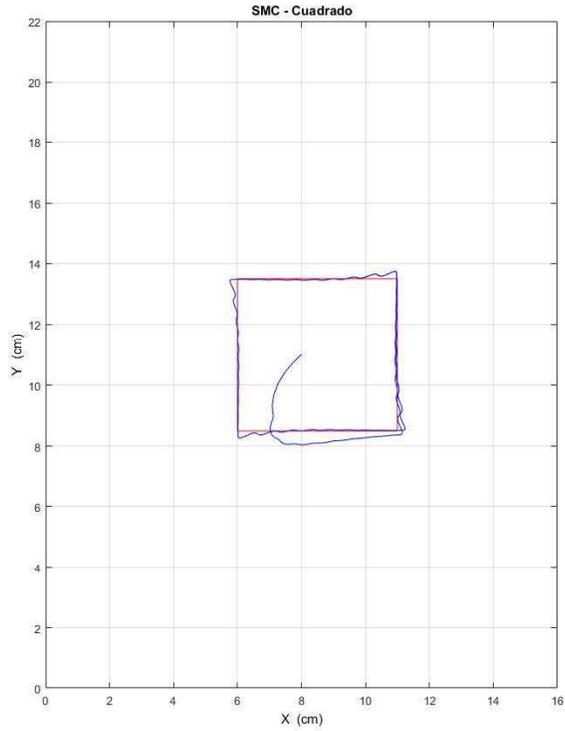


Figura 3.10. Resultado de la simulación del control SMC plano X, Y (Cuadrado).

La Figura 3.11 muestra los resultados del controlador SMC para una referencia de cambio del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

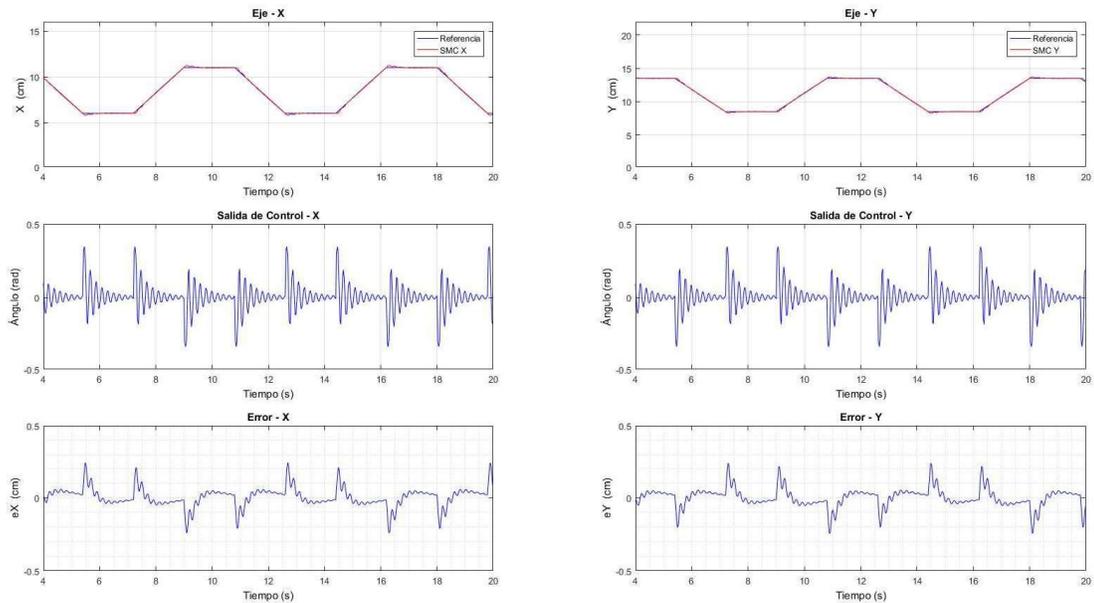


Figura 3.11. Resultados de la simulación del control SMC (Cuadrado).

En la Tabla 3.4, se muestran los resultados de desempeño ISE y el error en estado estable, índice para cada uno de los ejes, obtenidos para un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.4. Índice de desempeño de la simulación del controlador SMC – cuadrado.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	0.3942	0.02
Y	0.4102	0.02

3.1.1.2. Simulación de control FUZZY

El control FUZZY es aplicado en forma individual sobre cada eje como se indica en la Figura 3.12, en las entradas X_{REF} y Y_{REF} se prueban coordenadas diferentes, primero se aplica un sencillo cambio de variable, y posteriormente las trayectorias de una circunferencia y un cuadrado.

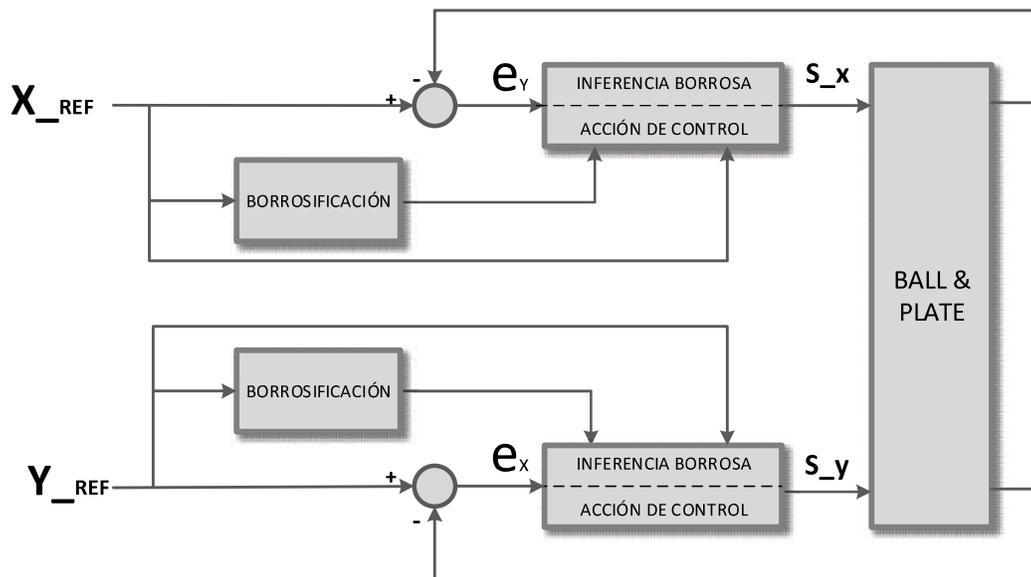


Figura 3.12. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes X y Y

En la Figura 3.3 se muestra el esquema de la simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FUZZY para los ejes X y Y, la referencia del sistema es el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- *Coordenada inicial* = (6, 7)[cm]
- *Coordenada final* = (11, 15) [cm]

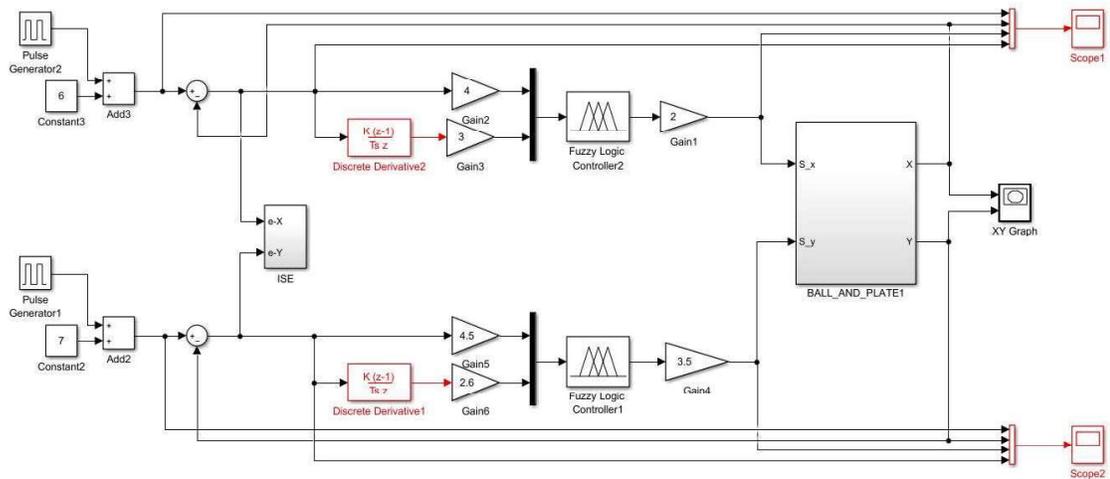


Figura 3.13. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes X y Y (Cambio de coordenadas).

Los parámetros de sintonización del control K_p , K_d , K fueron determinados heurísticamente.

En la Tabla 3.5 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FUZZY, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y.

Tabla 3.5. Parámetros de sintonización simulación controlador FUZZY – cambio de coordenadas.

Eje	K_p	K_d	K
X	4	3	2
Y	4.5	2.6	3.5

La Figura 3.14 muestra el resultado del controlador FUZZY en el plano X,Y, para la referencia del cambio de coordenadas.

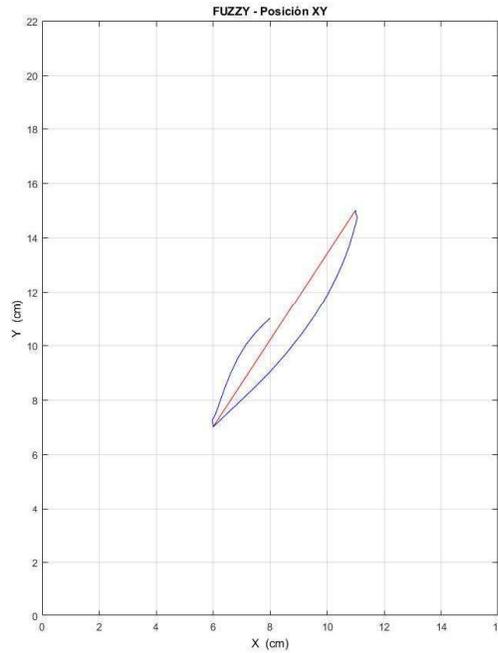


Figura 3.14. Resultado de la simulación del control FUZZY plano X, Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.15 muestra los resultados del controlador FUZZY para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

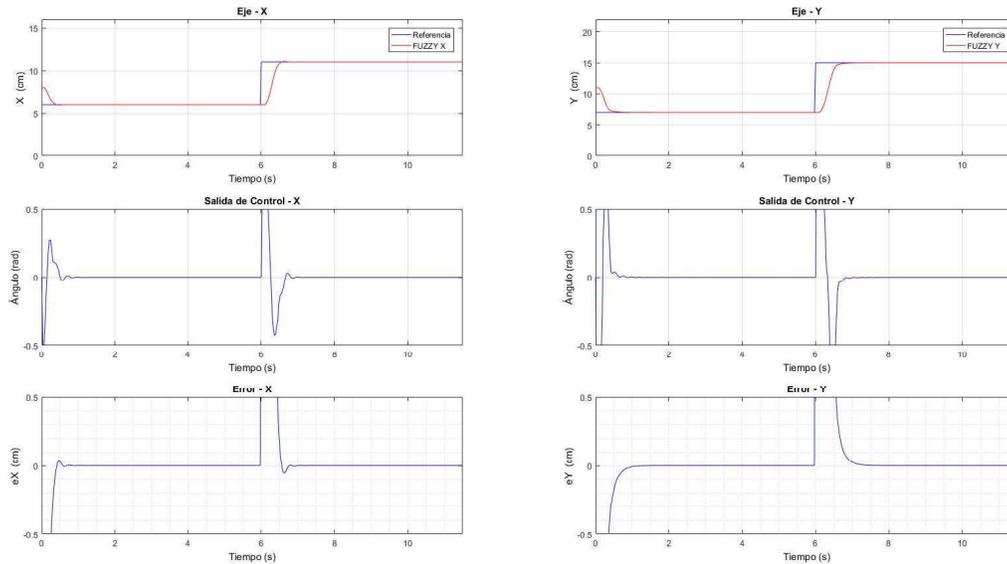


Figura 3.15. Resultados de la simulación del control FUZZY (Cambio de coordenadas).

Para un tiempo total de 11.5 segundos se determinó un índice de desempeño ISE, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento para cada uno de los ejes, como se puede ver en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Índice de desempeño de la simulación del controlador FUZZY.

Eje	ISE	Sobre-Impulso (cm)	Tiempo de establecimiento (s)
X	6.53	0.07	1
Y	19.48	0.05	1.03

En la Figura 3.6 se muestra el esquema de simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FUZZY para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* (8, 11)[cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

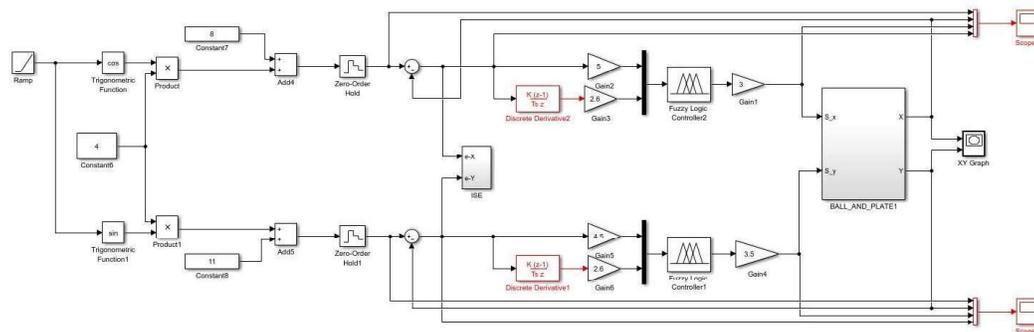


Figura 3.16. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes *X* y *Y* (Circunferencia).

En la Tabla 3.7 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FUZZY, tanto para el control en el eje *X* y el control en el eje *Y*. La Figura 3.17 muestra el resultado del controlador FUZZY en el plano *X,Y*, para la referencia del seguimiento de camino de una circunferencia.

Tabla 3.7. Parámetros de sintonización simulación controlador FUZZY – circunferencia.

Eje	K_p	K_d	K
X	5	2.6	3
Y	4.5	2.6	3.5

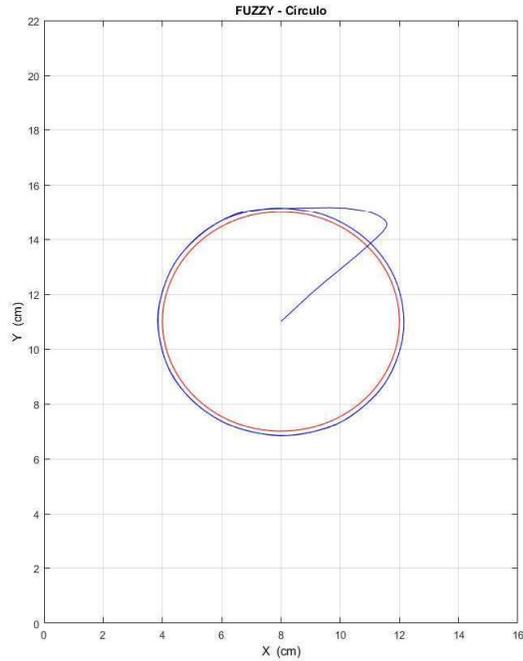


Figura 3.17. Resultado de la simulación del control FUZZY plano X, Y (Circunferencia).

La Figura 3.18 muestra los resultados del controlador FUZZY para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

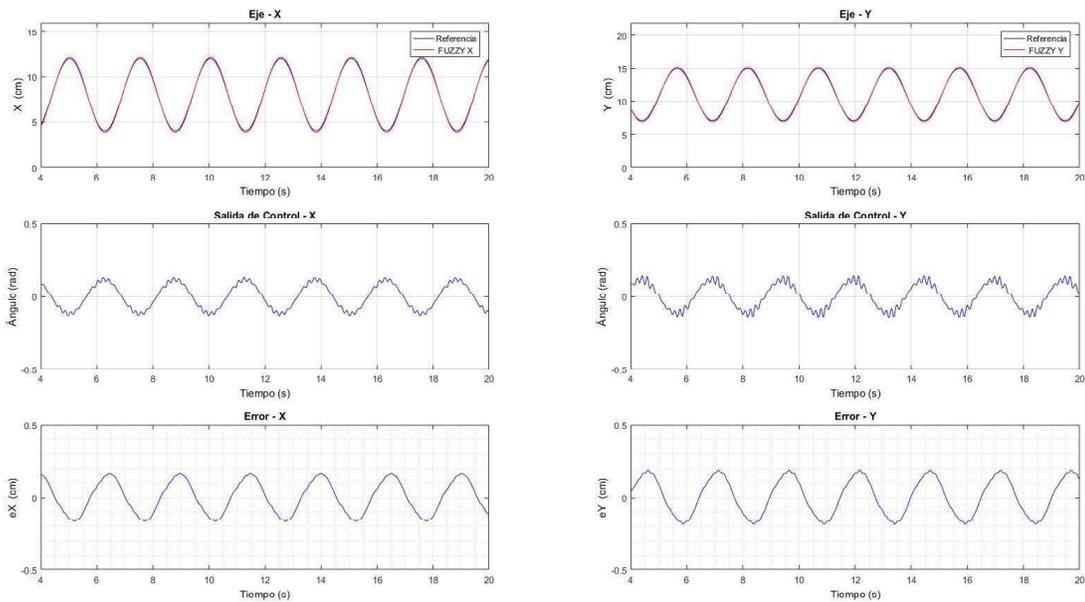


Figura 3.18. Resultados de la simulación del control FUZZY (Circunferencia).

En la Tabla 3.8 se muestra el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, para un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.8. Índice de desempeño de la simulación del controlador FUZZY – circunferencia.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	0.2	0.16
Y	0.26	0.16

En la Figura 3.9 se muestra el esquema de simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FUZZY para los ejes X y Y , como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- *Lado* = 5 [cm]
- *Coordenada de inicio* = (6, 8.5)[cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.7 [cm/s]

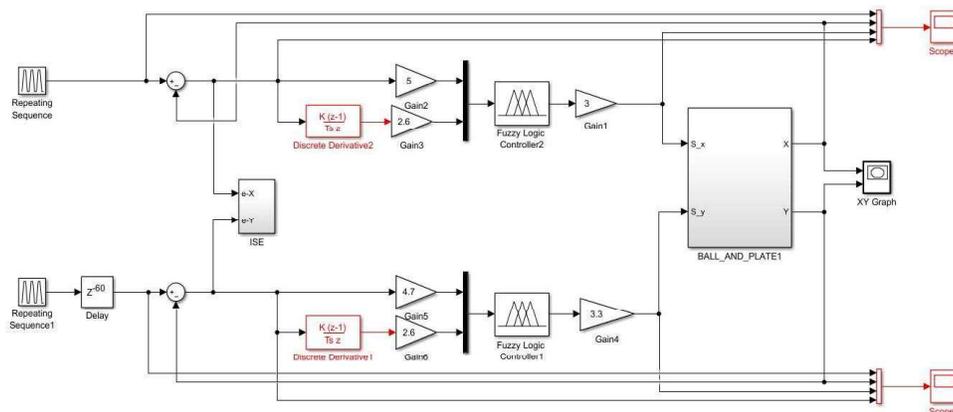


Figura 3.19. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes X y Y (Cuadrado).

En la Tabla 3.9 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FUZZY, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y .

Tabla 3.9. Parámetros de sintonización simulación controlador FUZZY – cuadrado.

Eje	K_p	K_d	K
X	5	2.6	3
Y	4.7	2.6	3.3

La Figura 3.20 muestra el resultado del controlador FUZZY en el plano X,Y, para la referencia del seguimiento de camino de un cuadrado.

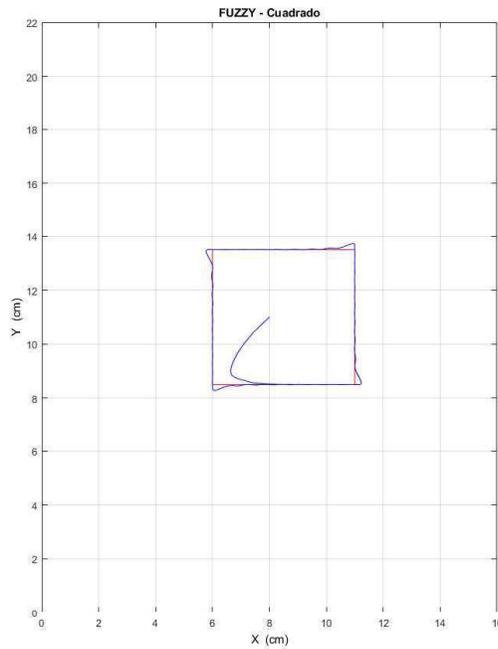


Figura 3.20. Resultado de la simulación del control FUZZY plano X,Y (Cuadrado).

La Figura 3.21 muestra los resultados del controlador FUZZY para una referencia de cambio del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

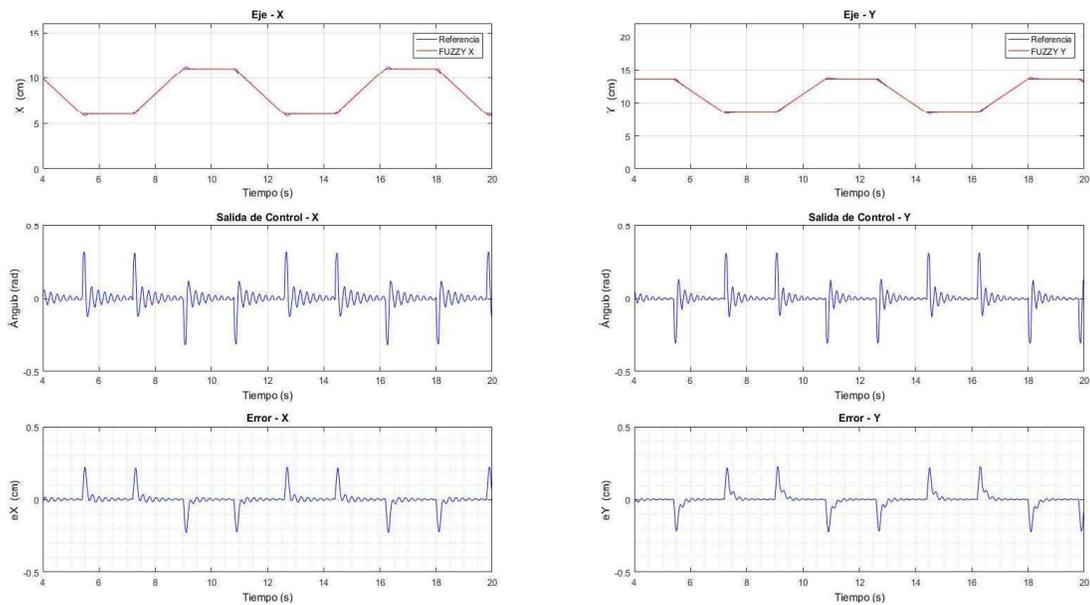


Figura 3.21. Resultados de la simulación del control FUZZY (Cuadrado).

En la Tabla 3.10 se muestran el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, en un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.10. Índice de desempeño de la simulación del controlador FUZZY – cuadrado.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	0.045	0.01
Y	0.047	0.01

3.1.1.3. Simulación de control FSMC

El control FSMC es aplicado en forma individual sobre cada eje como se indica en la Figura 3.22, en las entradas X_{REF} y Y_{REF} se prueban coordenadas diferentes, primero se aplica un sencillo cambio de variable, y posteriormente las trayectorias de una circunferencia y un cuadrado.

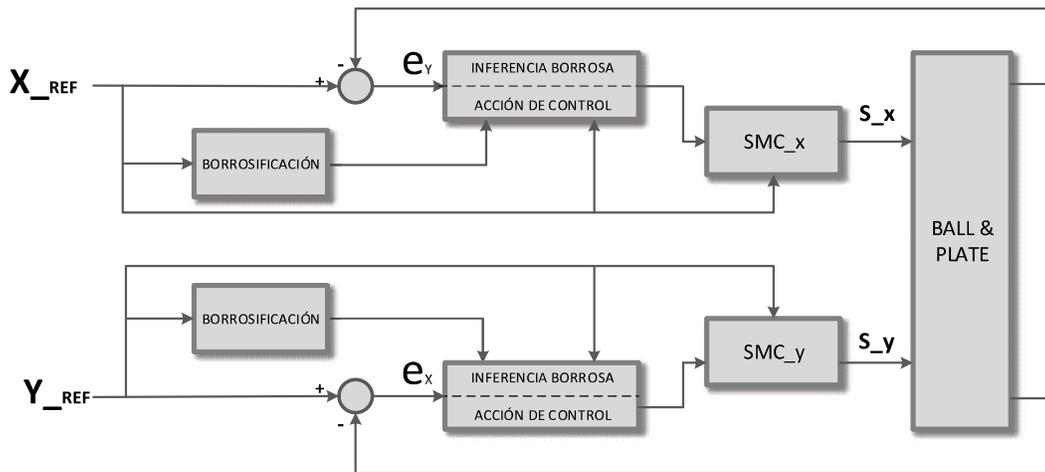


Figura 3.22. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes X y Y

En la Figura 3.3 se muestra el esquema de la simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FSMC para los ejes X y Y, la referencia del sistema es el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- *Coordenada inicial* = (6, 7) [cm]
- *Coordenada final* = (11, 15)[cm]

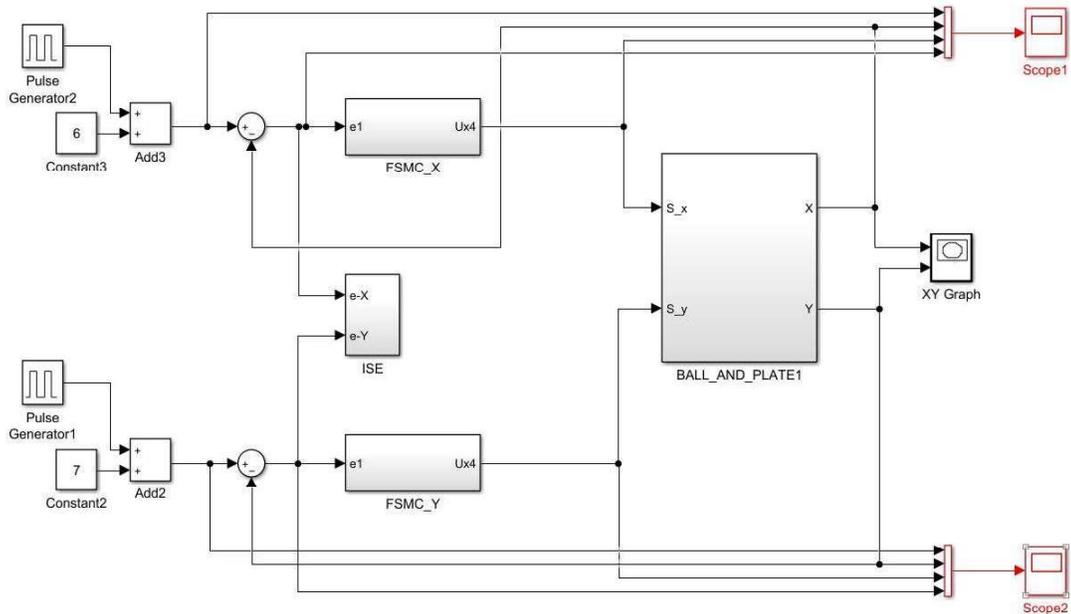


Figura 3.23. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes X y Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.24 muestra la incorporación del componente FUZZY a la superficie convencional del control SMC.

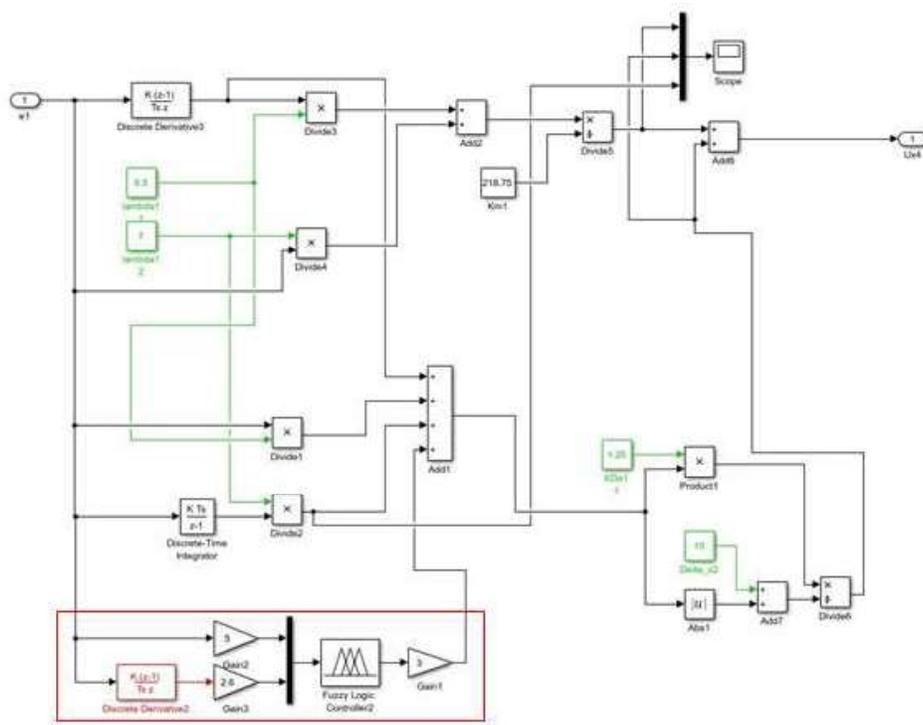


Figura 3.24. Componente FUZZY incorporado en la superficie del control SMC.

Los parámetros de sintonización del control $\gamma_1, \gamma_2, K, \delta, K_p, K_d, K$ fueron determinados heurísticamente.

En la Tabla 3.11 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FSMC, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y.

Tabla 3.11. Parámetros de sintonización simulación controlador FSMC – cambio de coordenadas.

Eje	SMC				Componente FUZZY		
	γ_1	γ_2	K	δ	K_p	K_d	K
X	6.5	7	1.25	15	5	2.6	3
Y	7	7	1.35	15	4.5	2.6	3.5

La Figura 3.25 muestra el resultado del controlador FSMC en el plano X,Y, para la referencia del cambio de coordenadas.

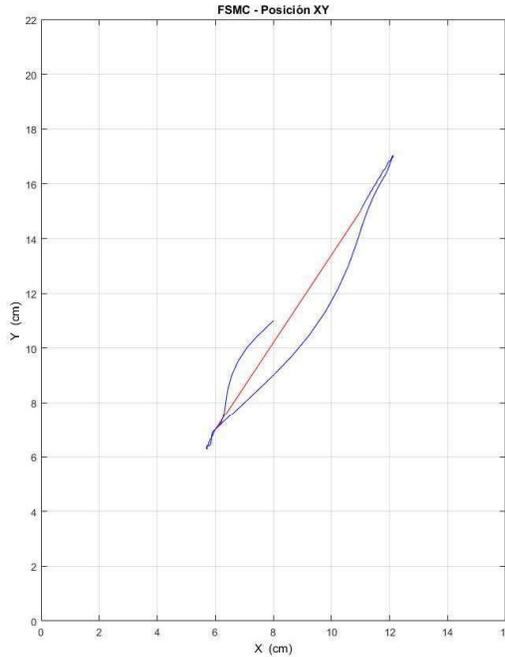


Figura 3.25. Resultado de la simulación del control FSMC plano X,Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.26 muestra los resultados del controlador FSMC para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

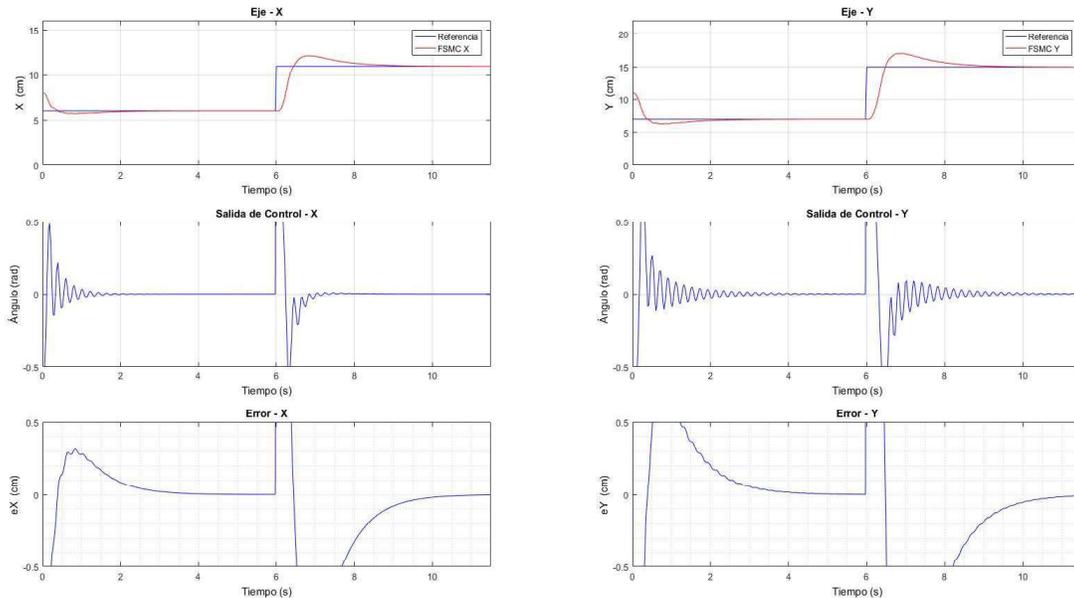


Figura 3.26. Resultados de la simulación del control FSMC (Cambio de coordenadas).

Para un tiempo total de 11.5 segundos se determinó un índice de desempeño ISE, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento para cada uno de los ejes, estos resultados se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Índice de desempeño de la simulación del controlador FSMC.

Eje	ISE	Sobre-impulso (cm)	Tiempo de establecimiento (s)
X	6.74	1.132	4.23
Y	20.61	2	5.32

En la Figura 3.7 se muestra el esquema de simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FSMC para los ejes X y Y, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8, 11)[cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

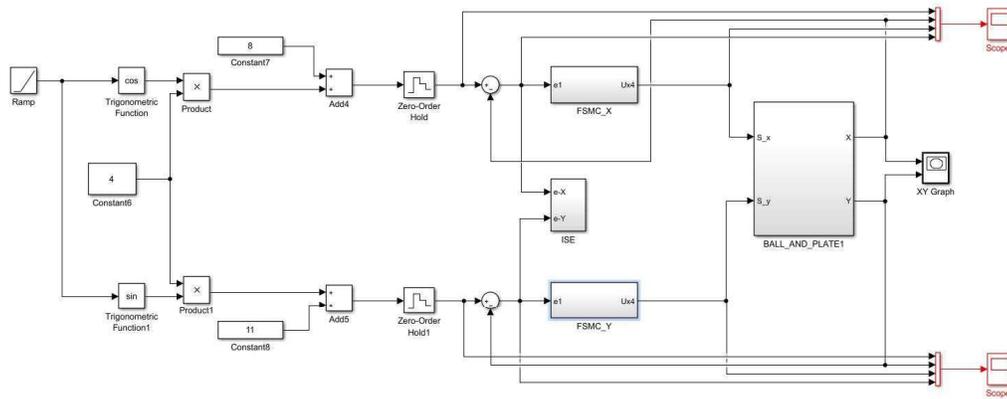


Figura 3.27. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes X y Y (Circunferencia).

En la Tabla 3.13 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FSMC, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y.

Tabla 3.13. Parámetros de sintonización simulación controlador FSMC – circunferencia.

Eje	SMC				Componente FUZZY		
	γ_1	γ_2	K	δ	K_p	K_d	K
X	7	7	1.35	15	5	2.6	3
Y	7	7	1.35	15	5	2.6	3

La Figura 3.28 muestra el resultado del controlador FSMC en el plano X,Y, para la referencia del seguimiento de camino de una circunferencia.

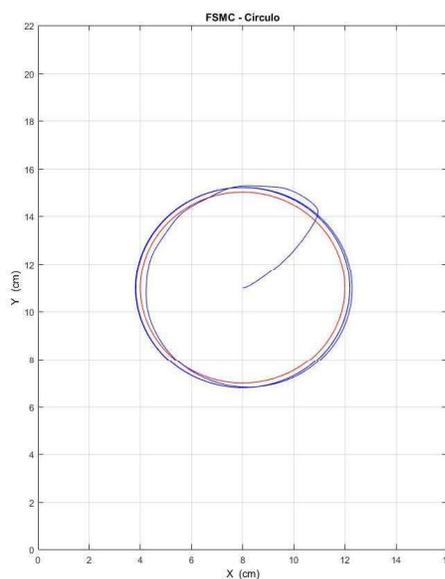


Figura 3.28. Resultado de la simulación del control FSMC plano X,Y (Circunferencia).

La Figura 3.29 muestra los resultados del controlador FSMC para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

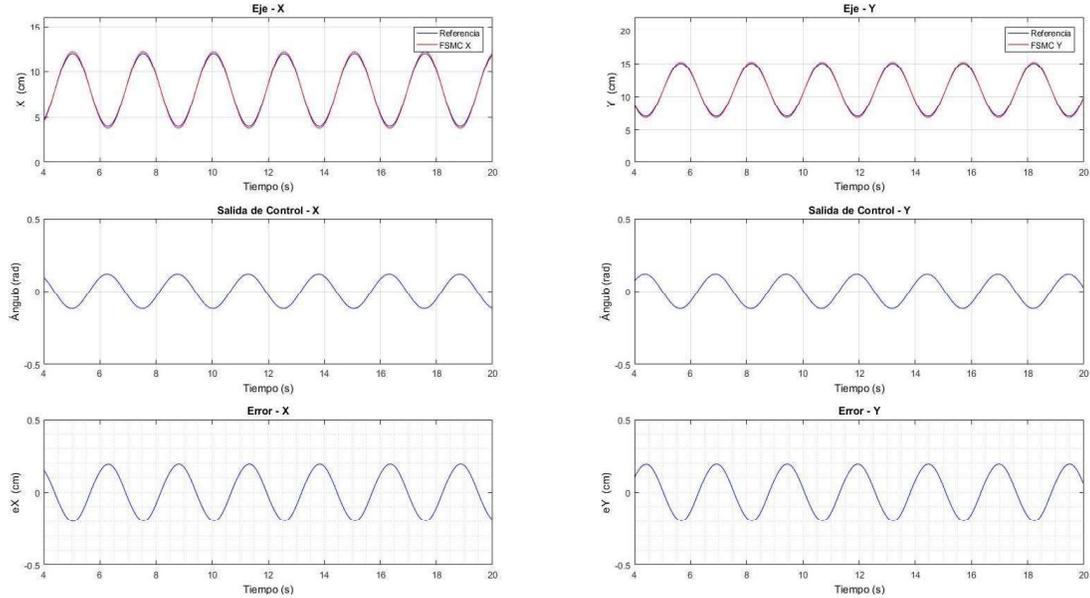


Figura 3.29. Resultados de la simulación del control FSMC (Circunferencia).

Como se muestra en la Tabla 3.14, para un tiempo de 4 a 20 segundos, se determinó el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes.

Tabla 3.14 Índice de desempeño de la simulación del controlador FSMC – circunferencia.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	0.2904	0.16
Y	0.3018	0.16

En la Figura 3.30 se muestra el esquema de simulación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FSMC para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- *Lado* = 5 [cm]
- *Coordenada de inicio* = (6, 8.5)[cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.7 [cm/s]

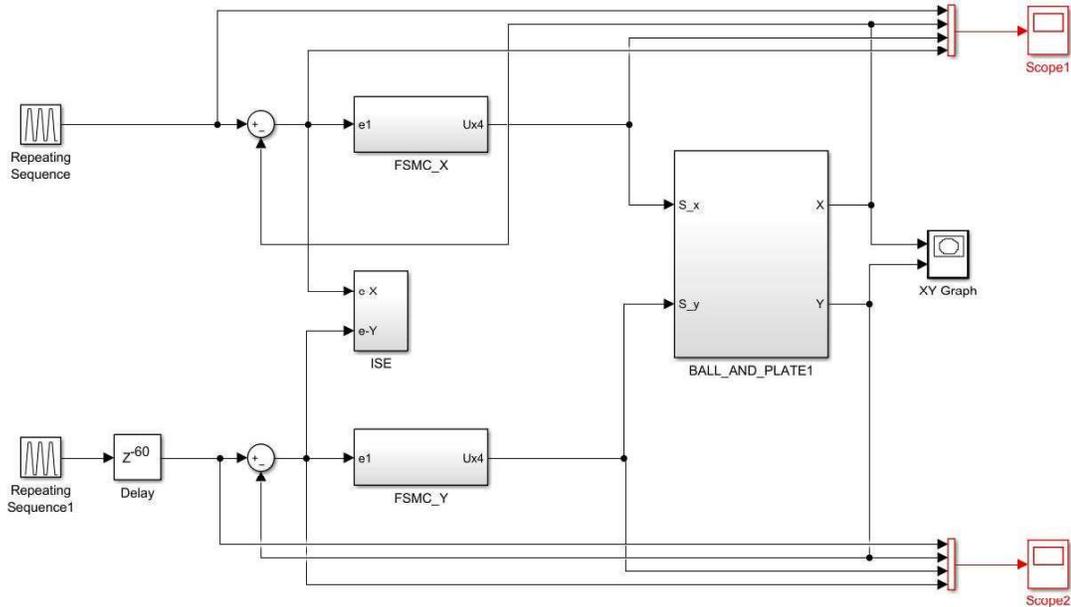


Figura 3.30. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes X y Y (Cuadrado).

En la Tabla 3.15 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FSMC, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y.

Tabla 3.15. Parámetros de sintonización simulación controlador FSMC – cuadrado.

Eje	SMC				Componente FUZZY		
	γ_1	γ_2	K	δ	K_p	K_d	K
X	6	7	1.1	12	5	2.6	3
Y	6	7	1.1	12	4.7	2.6	3.5

La Figura 3.31 muestra el resultado del controlador FSMC en el plano X,Y, para la referencia del seguimiento de camino de un cuadrado.

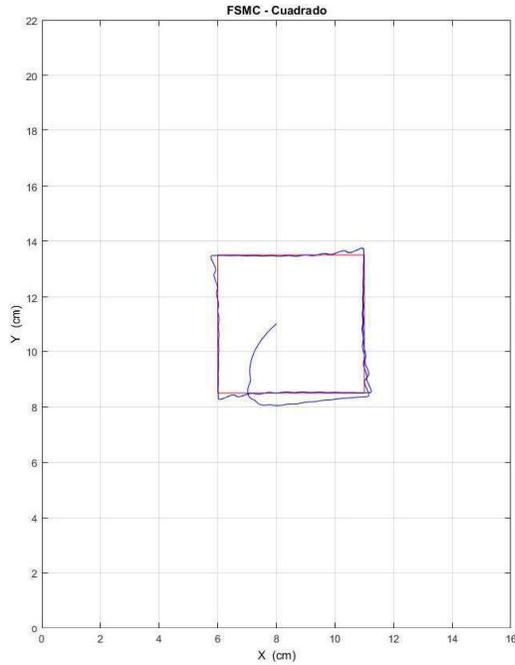


Figura 3.31. Resultado de la simulación del control FSMC plano X, Y (Cuadrado).

La Figura 3.32 muestra los resultados del controlador FSMC para una referencia de cambio del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

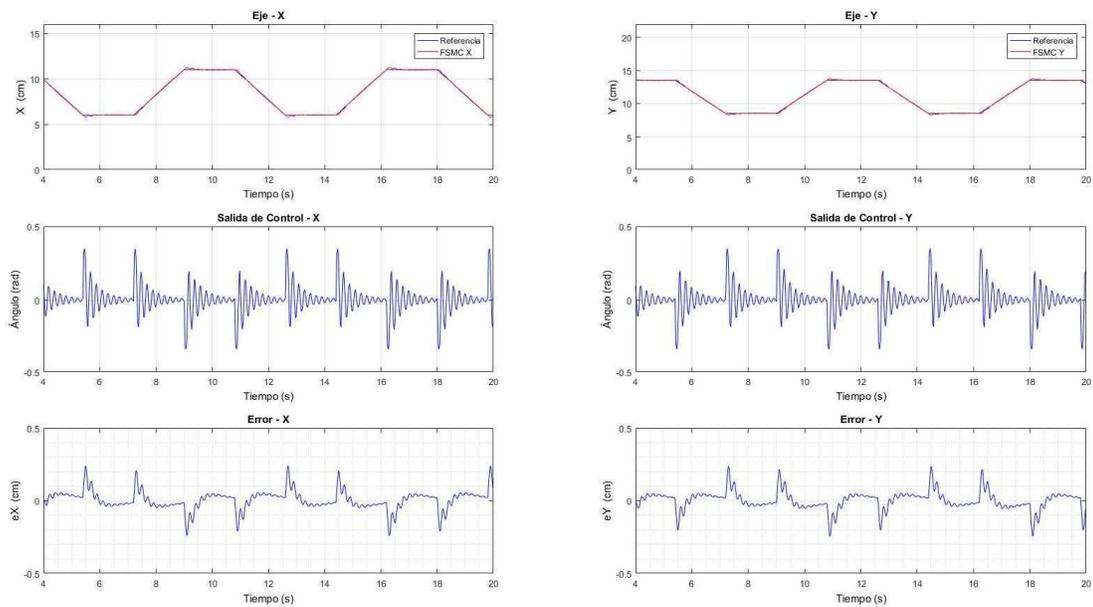


Figura 3.32. Resultados de la simulación del control FSMC (Cuadrado).

En la Tabla 3.16 se muestran los resultados del índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, en un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.16. Índice de desempeño de la simulación del controlador FSMC – cuadrado.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	0.07	0.02
Y	0.06	0.02

3.1.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS CONTROLADORES SMC, FUZZY Y FSMC – SIMULACIÓN

La Figura 3.33 muestra la comparación de los controladores SMC, FUZZY y FSMC en el plano X,Y, para el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- *Coordenada inicial* (6,7) [cm]
- *Coordenada final* (11,15) [cm]

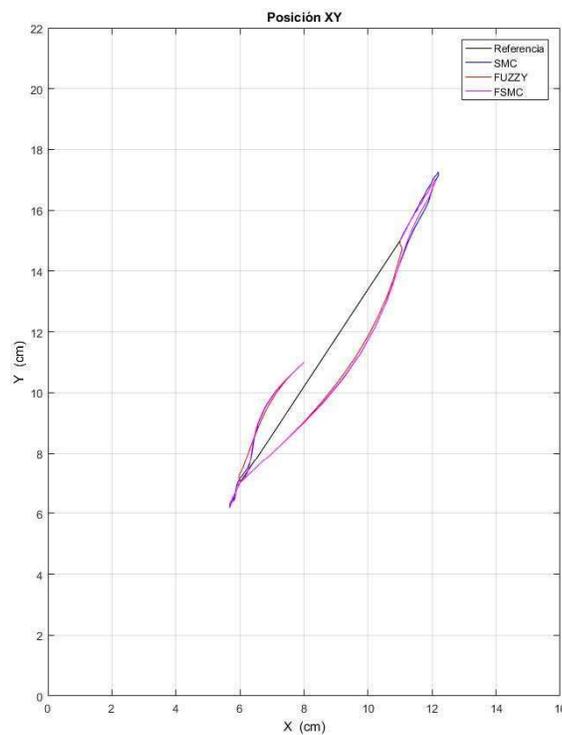


Figura 3.33. Comparación controladores plano X,Y (Cambio de coordenadas)

La Figura 3.34 muestra la comparación de los controladores propuestos para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

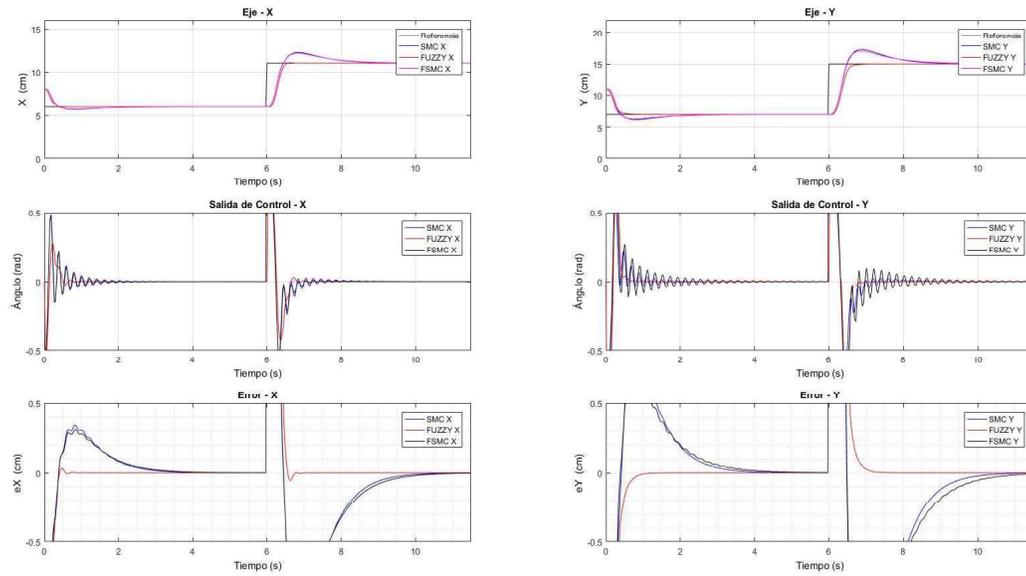


Figura 3.34 Comparación controladores (Cambio de coordenadas)

La Figura 3.35 muestra la comparación de los controladores propuestos en el plano X, Y , para el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8, 11) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

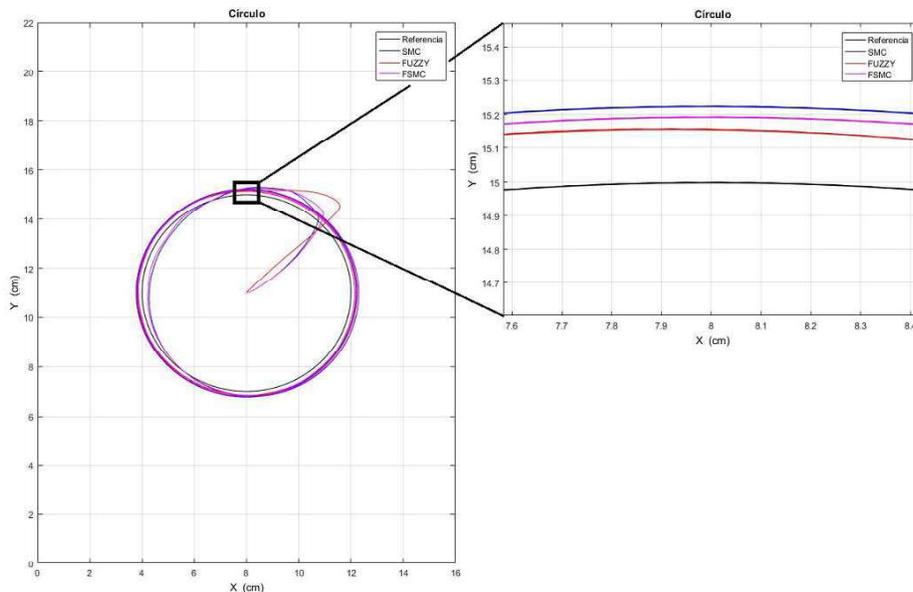


Figura 3.35. Comparación controladores plano X, Y (Circunferencia)

La Figura 3.36 muestra la comparación de los controladores propuestos para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

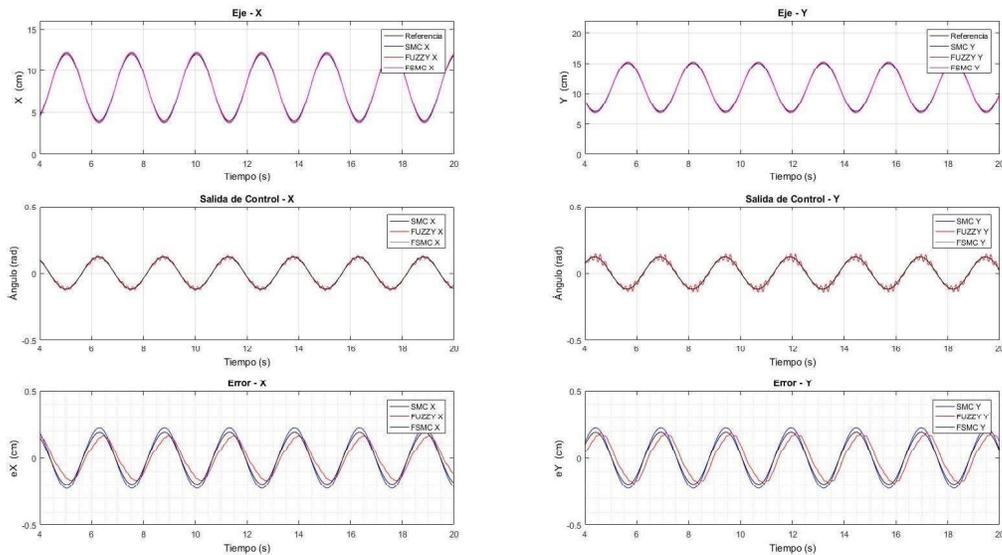


Figura 3.36. Comparación controladores (Circunferencia)

La Figura 3.37 muestra la comparación de los controladores propuestos en el plano X, Y , para el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- *Lado* = 5 [cm]
- *Coordenada de inicio* = (6, 8.5) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.7 [cm/s]

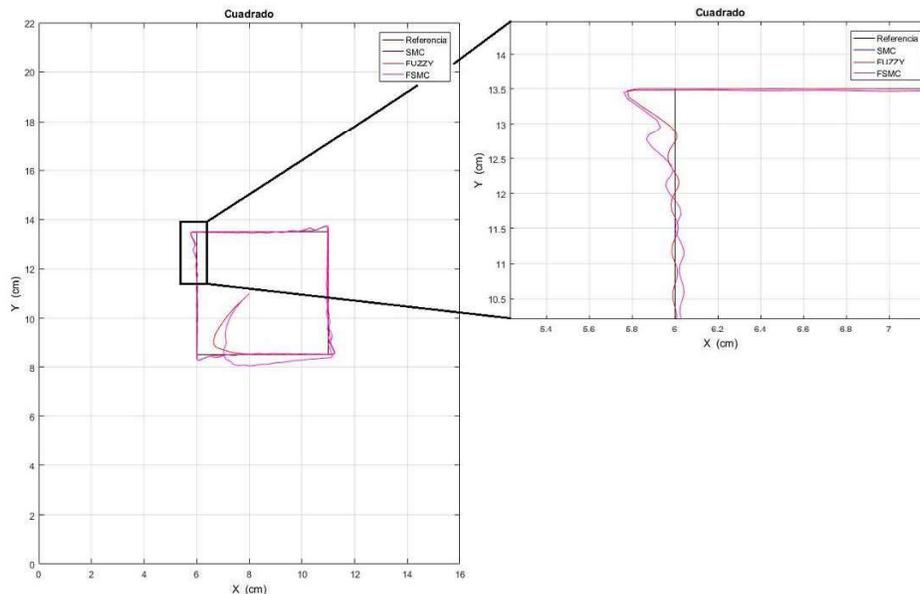


Figura 3.37. Comparación controladores plano X, Y (Cuadrado)

La Figura 3.38 muestra la comparación de los controladores propuestos para una referencia del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

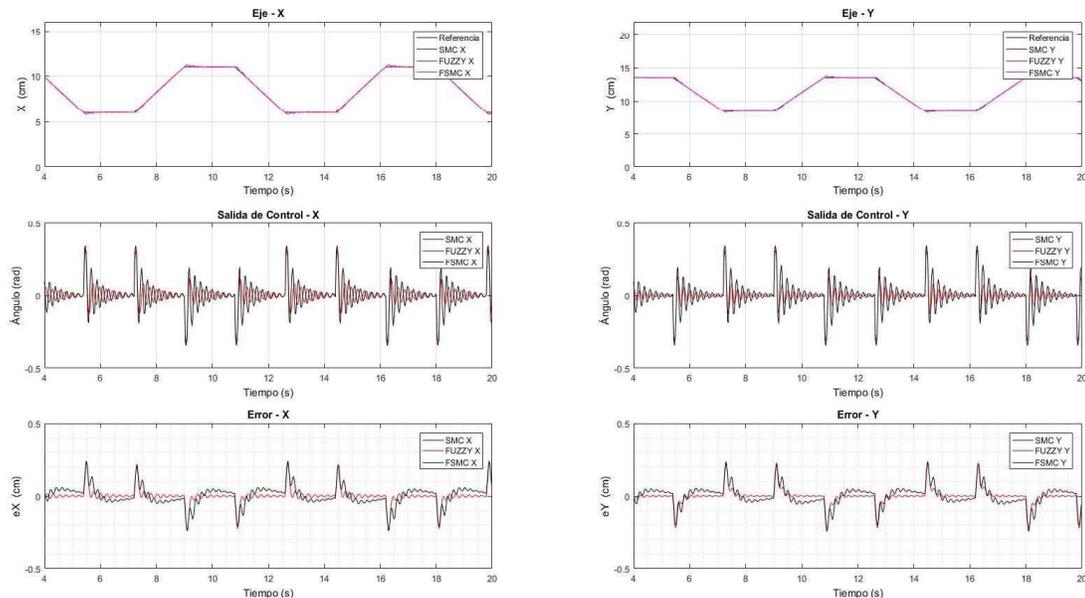


Figura 3.38. Comparación controladores (Cuadrado)

La Tabla 3.16 muestra el resumen de comparación de las respuestas de los controladores propuestos (SMC, FUZZY y FSMC). Se marca en naranja el valor más bajo para cada uno de los campos de comparación

Tabla 3.16. Tabla resumen de comparación de controladores – simulación

	Eje	SMC				FUZZY				FSMC			
		<i>ISE</i>	<i>EEE</i> [cm]	<i>s. imp</i> [cm]	<i>t. est</i> [s]	<i>ISE</i>	<i>EEE</i> [cm]	<i>s. imp</i> [cm]	<i>t. est</i> [s]	<i>ISE</i>	<i>EEE</i> [cm]	<i>s. imp</i> [cm]	<i>t. est</i> [s]
Posición XY	X	6.84	-	1.19	3.67	6.53	-	0.07	1	6.74	-	1.32	4.23
	Y	21.2	-	2.23	4.74	19.48	-	0.05	1.03	20.61	-	2	5.23
Círculo	X	0.394	0.22	-	-	0.2	0.16	-	-	0.29	0.17	-	-
	Y	0.41	0.22	-	-	0.26	0.16	-	-	0.3	0.17	-	-
Cuadrado	X	0.07	0.2	-	-	0.045	0.01	-	-	0.07	0.02	-	-
	Y	0.068	0.2	-	-	0.047	0.01	-	-	0.068	0.02	-	-

ISE: Integral del error cuadrático

EEE: Error en estado estable [cm]

s. imp: Sobre impulso [cm]

t. est: Tiempo de establecimiento [s]

3.1.3. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al implementar los controladores propuestos en la planta Ball & Plate (esfera & plato) y se realizará una comparativa de la respuesta entre los controladores para el posicionamiento, y seguimiento de caminos (circunferencia y cuadrado).

3.1.3.1. Implementación de control SMC

Al igual que en simulación, para la implementación se plantea el mismo esquema de control SMC que es aplicado en forma individual sobre cada eje como se indicó en la Figura 3.21, las trayectorias aplicadas en las entradas X_{REF} y Y_{REF} corresponden a una circunferencia y un cuadrado.

En la Figura 3.9 se muestra el esquema de la implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control SMC para los ejes X y Y , la referencia del sistema es el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- *Coordenada inicial* = $(6, 7)$ [cm]
- *Coordenada final* = $(11, 15)$ [cm]

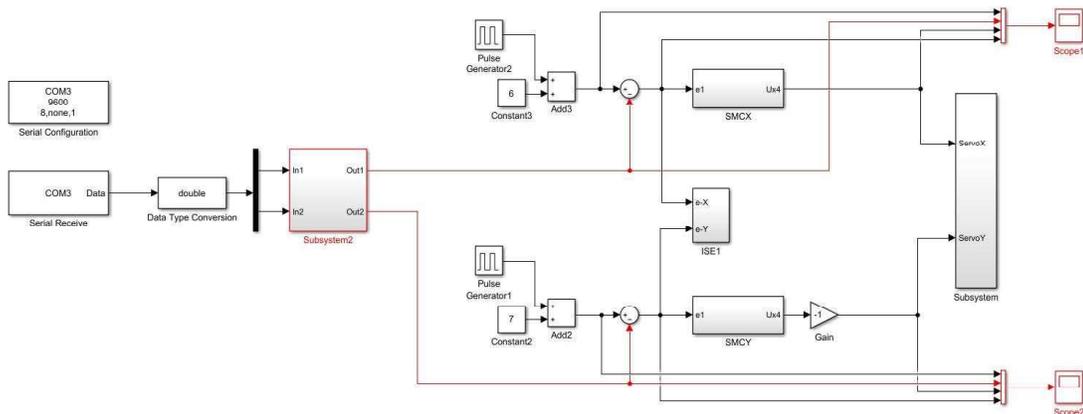


Figura 3.39. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes X y Y (Cambio de coordenadas).

Los parámetros de sintonización del control γ_1 , γ_2 , K , δ , fueron determinados heurísticamente, se empleó el método de la sigmoide para el suavizamiento del chattering.

En la Tabla 3.17 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador SMC, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y .

Tabla 3.17. Parámetros de sintonización Implementación controlador SMC.

	Implementación				Simulación			
Eje	γ_1	γ_2	K	δ	γ_1	γ_2	K	δ
X	1.35	7.82	0.1	50	6	7	1.1	12
Y	1.35	7.77	0.1	50	6	7	1.1	12

Los parámetros de sintonización mencionados fueron utilizados para la Implementación del controlador con referencia de cambio de coordenadas, circunferencia y cuadrado.

La Figura 3.40 muestra el resultado del controlador SMC en el plano X,Y , para la referencia del cambio de coordenadas.

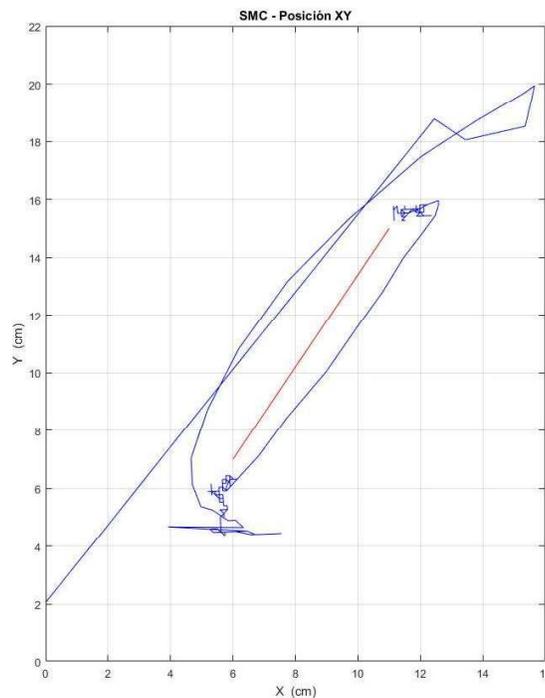


Figura 3.40. Resultado de la Implementación del control SMC plano X,Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.41 muestra los resultados del controlador SMC para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

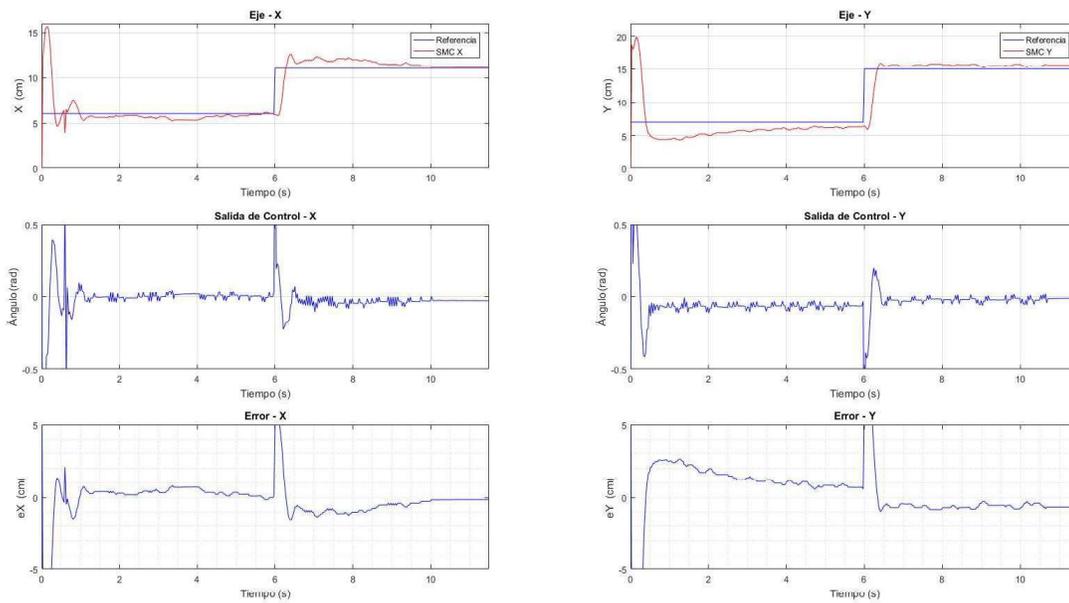


Figura 3.41. Resultados de la Implementación del control SMC (Cambio de coordenadas).

Para un tiempo total de 11.5 segundos se determinó un índice de desempeño ISE, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento para cada uno de los ejes, como se muestra en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Índice de desempeño de la Implementación del controlador SMC.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)	Sobre-Impulso (cm)	Tiempo de establecimiento (s)
X	7.61	0.15	1.6	4.05
Y	19.35	0.57	1	4.72

En la Figura 3.42 se muestra el esquema de implementación del sistema de balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control SMC para los ejes X y Y , como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8, 11) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

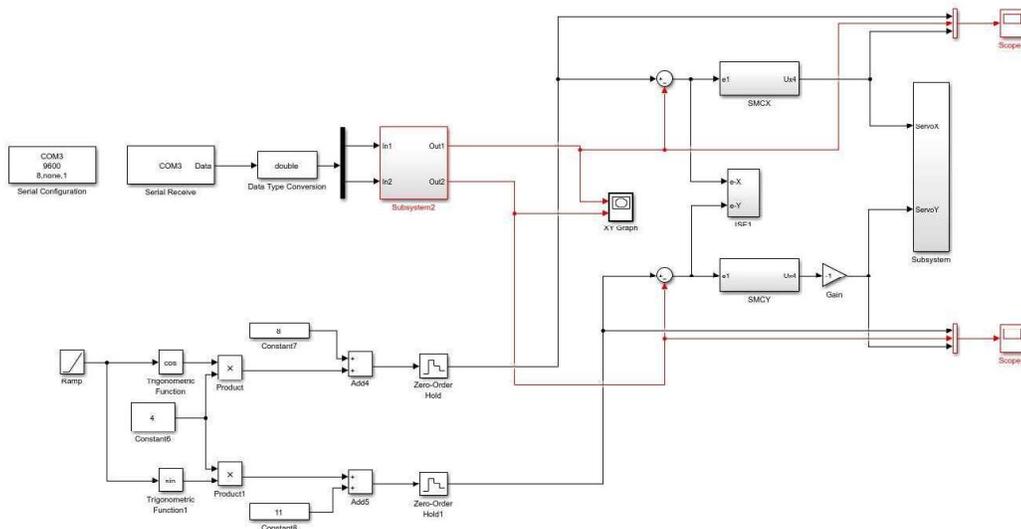


Figura 3.42. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes X y Y (Circunferencia).

La Figura 3.43 muestra el resultado del controlador SMC en el plano X,Y, para la referencia del seguimiento de camino de una circunferencia.

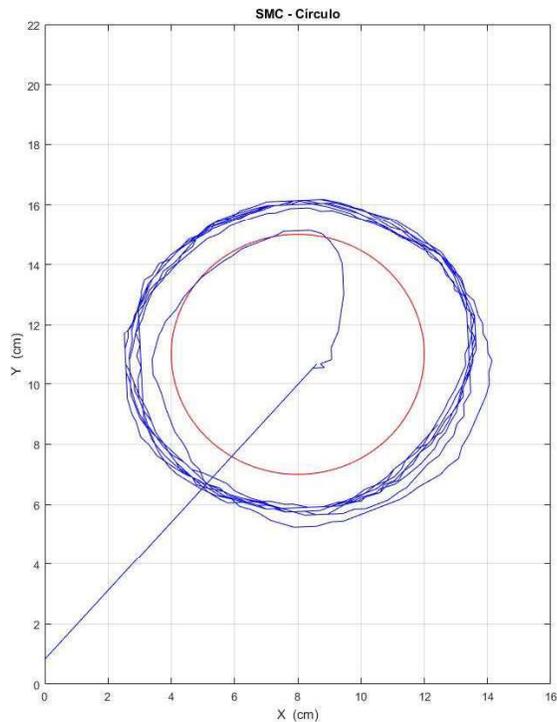


Figura 3.43. Resultado de la Implementación del control SMC plano X, Y (Circunferencia).

La Figura 3.44 muestra los resultados del controlador SMC para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

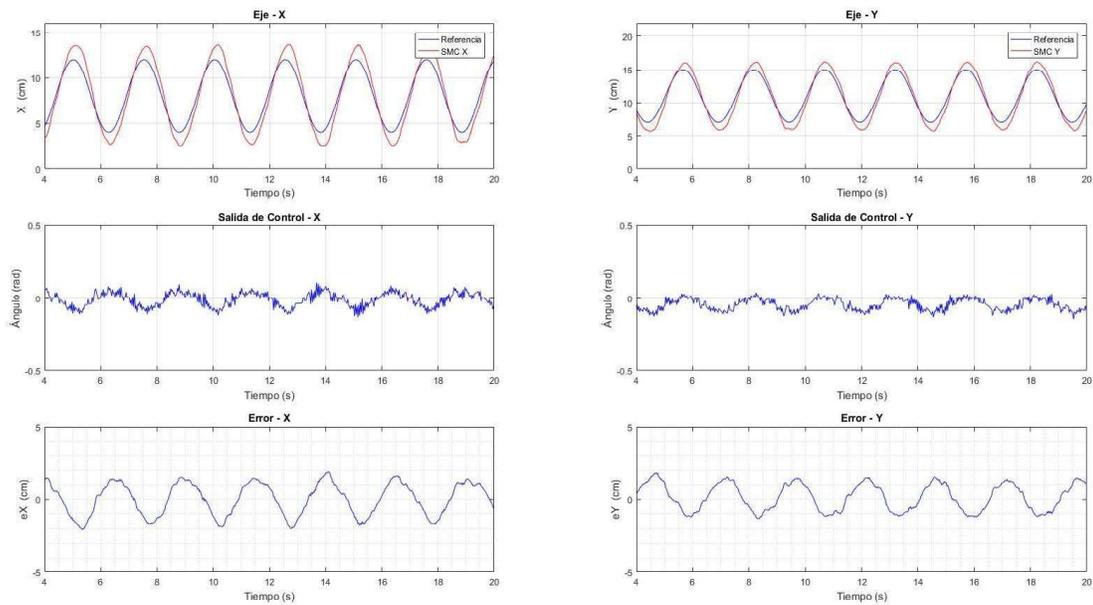


Figura 3.44. Resultados de la Implementación del control SMC (Circunferencia).

Para un intervalo de tiempo de 4 a 20 segundos se determinó el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, estos valores se pueden observar en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Índice de desempeño de la Implementación del controlador SMC – circunferencia.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	19.42	1.48
Y	13.95	1.17

En la Figura 3.5 se muestra el esquema de Implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control SMC para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- Lado = 8 (cm)
- Coordenada de inicio (4.5 , 7)
- Rampa de velocidad = 2.7 (cm/s)

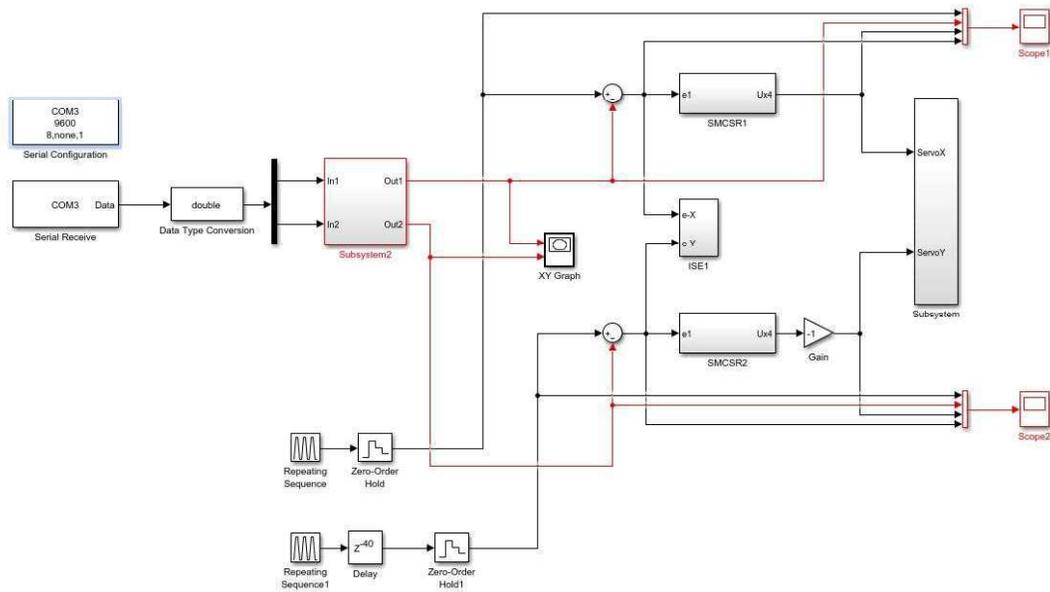


Figura 3.45. Diagrama de bloques del Control SMC para los ejes X y Y (Cuadrado).

La Figura 3.46 muestra el resultado del controlador SMC en el plano X, Y , para la referencia del seguimiento de camino de un cuadrado.

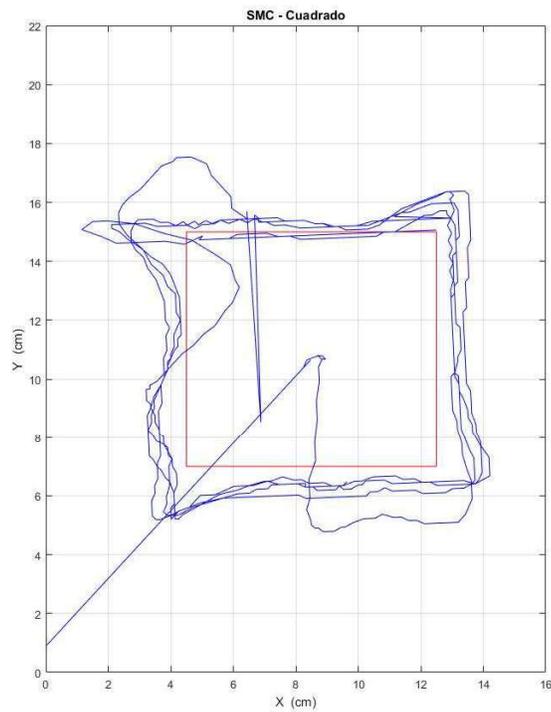


Figura 3.46. Resultado de la Implementación del control SMC plano X, Y (Cuadrado).

La Figura 3.47 muestra los resultados del controlador SMC para una referencia de cambio del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

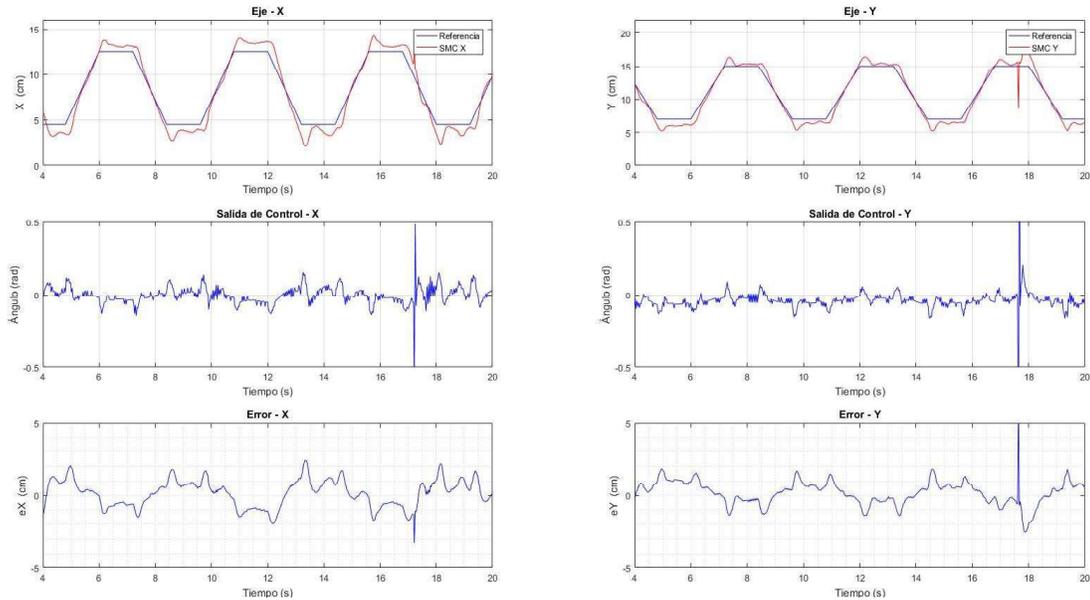


Figura 3.47. Resultados de la Implementación del control SMC (Cuadrado).

Para un tiempo de 4 a 20 segundos se determinó un índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Índice de desempeño de la Implementación del controlador SMC – cuadrado.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	14.47	0.64
Y	11.65	0.56

3.1.3.2. Implementación de control FUZZY

Al igual que en simulación, para la implementación se plantea el mismo esquema de control FUZZY que es aplicado en forma individual sobre cada eje como se indicó en la Figura 3.21, las trayectorias aplicadas en las entradas X_{REF} y Y_{REF} corresponden a una circunferencia y un cuadrado.

En la Figura 3.7 se muestra el esquema de la Implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FUZZY para los ejes *X* y *Y*, la referencia del sistema es el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- Coordenada inicial (6,7) [cm]
- Coordenada final (11,15) [cm]

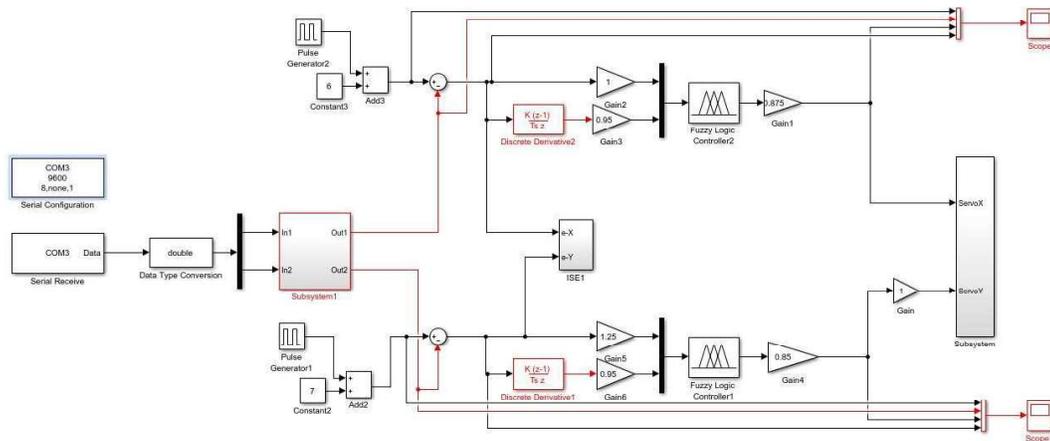


Figura 3.47. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes *X* y *Y* (Cambio de coordenadas).

Los parámetros de sintonización del control K_p , K_d , K fueron determinados heurísticamente.

En la Tabla 3.21 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FUZZY, tanto para el control en el eje *X* y el control en el eje *Y*.

Tabla 3.21. Parámetros de sintonización Implementación controlador FUZZY – cambio de coordenadas.

Eje	K_p	K_d	K
X	1	0.95	0.875
Y	1.25	0.95	0.85

La Figura 3.48 muestra el resultado del controlador FUZZY en el plano *X,Y*, para la referencia del cambio de coordenadas.

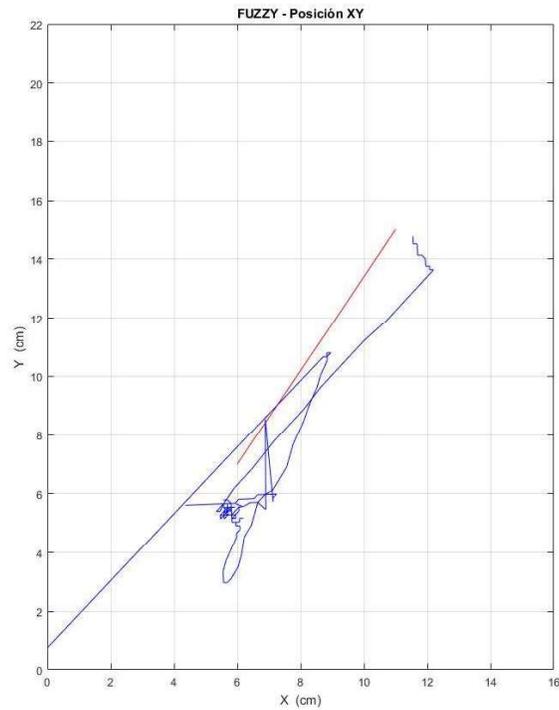


Figura 3.48. Resultado de la Implementación del control FUZZY plano X, Y
(Cambio de coordenadas).

La Figura 3.49 muestra los resultados del controlador FUZZY para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

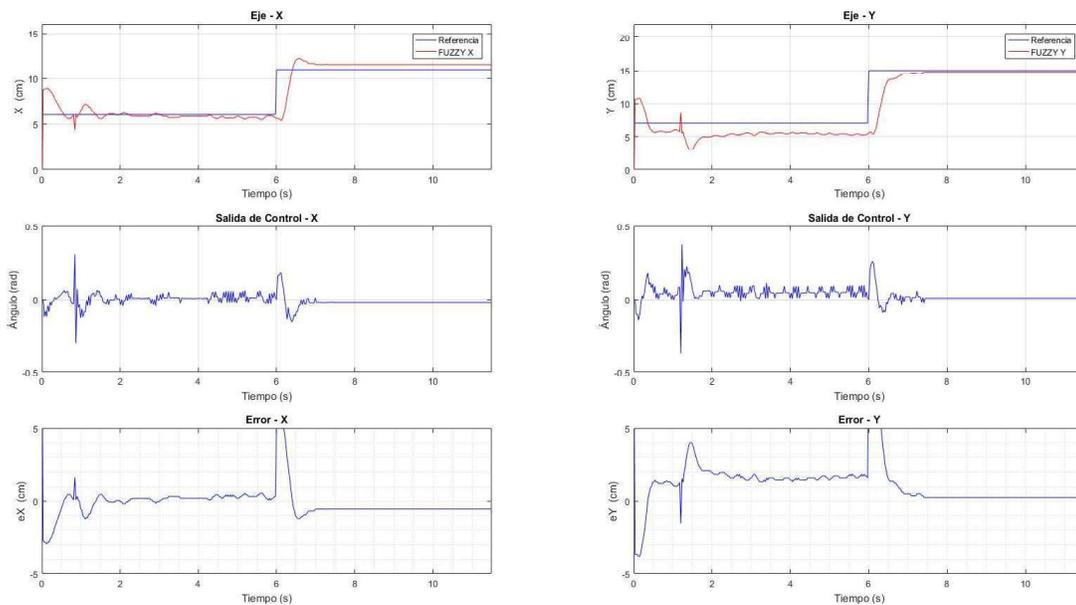


Figura 3.49. Resultados de la Implementación del control FUZZY
(Cambio de coordenadas).

Para un tiempo total de 11.5 segundos se determinó un índice de desempeño ISE, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento para cada uno de los ejes, dichos resultados se muestran en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Índice de desempeño de la Implementación del controlador FUZZY.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)	Sobre-Impulso (cm)	Tiempo de establecimiento (s)
X	9.807	0.54	1.22	1.37
Y	31.66	0.25	-	1.46

En la Figura 3.50 se muestra el esquema de Implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FUZZY para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8 , 11) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

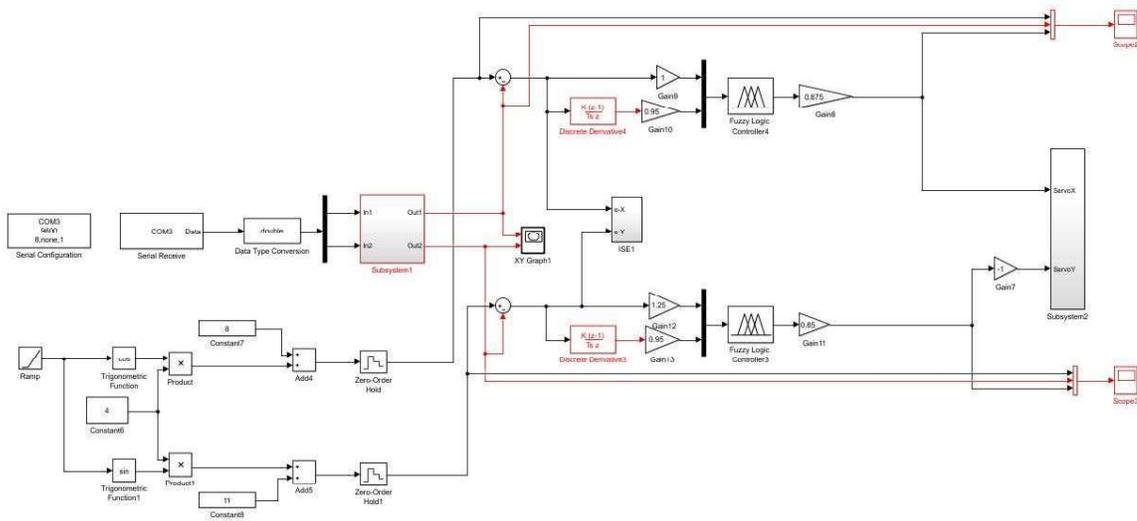


Figura 3.50. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes *X* y *Y* (Circunferencia).

En la Tabla 3.23 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FUZZY, tanto para el control en el eje *X* y el control en el eje *Y*.

Tabla 3.23. Parámetros de sintonización Implementación controlador FUZZY – circunferencia.

Eje	Kp	Kd	K
X	1	0.95	0.875
Y	1.25	0.95	0.85

La Figura 3.51 muestra el resultado del controlador FUZZY en el plano X,Y , para la referencia del seguimiento de camino de una circunferencia.

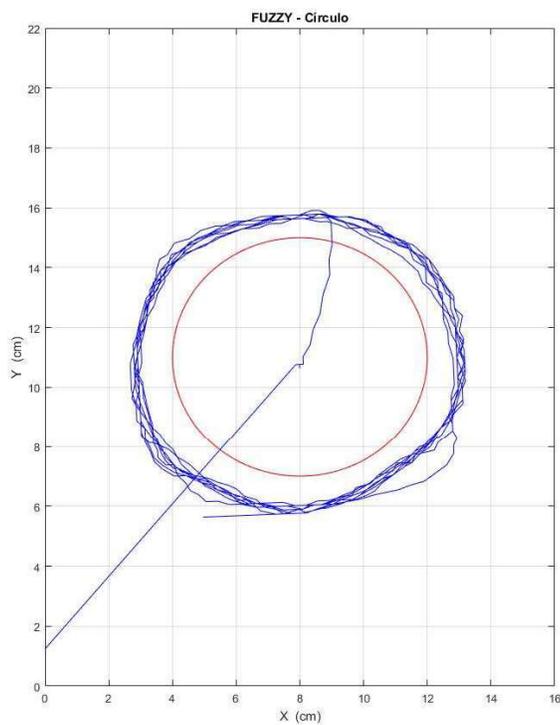


Figura 3.51. Resultado de la Implementación del control FUZZY plano X,Y (Circunferencia).

La Figura 3.50 muestra los resultados del controlador FUZZY para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

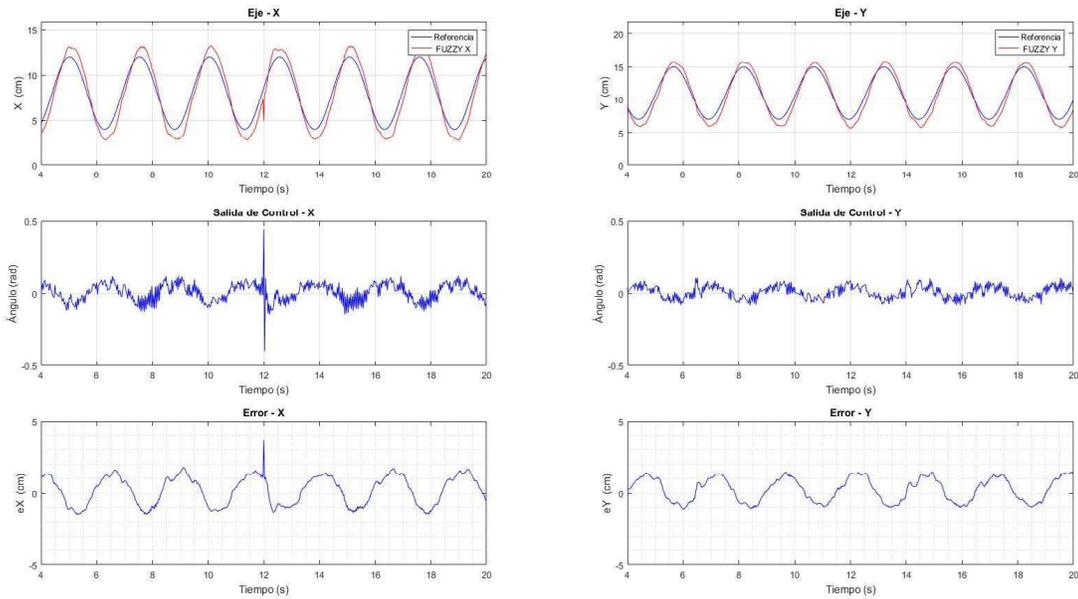


Figura 3.50. Resultados de la Implementación del control FUZZY (Circunferencia).

Para un tiempo de 4 a 20 segundos, se determinó el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, dichos resultados se muestran en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Índice de desempeño de la Implementación del controlador FUZZY – circunferencia.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	16.66	1.01
Y	11.54	0.7

En la Figura 3. se muestra el esquema de Implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FUZZY para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- *Lado* = 8 [cm]
- *Coordenada de inicio* = (4,5, 7) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.7 [cm/s]

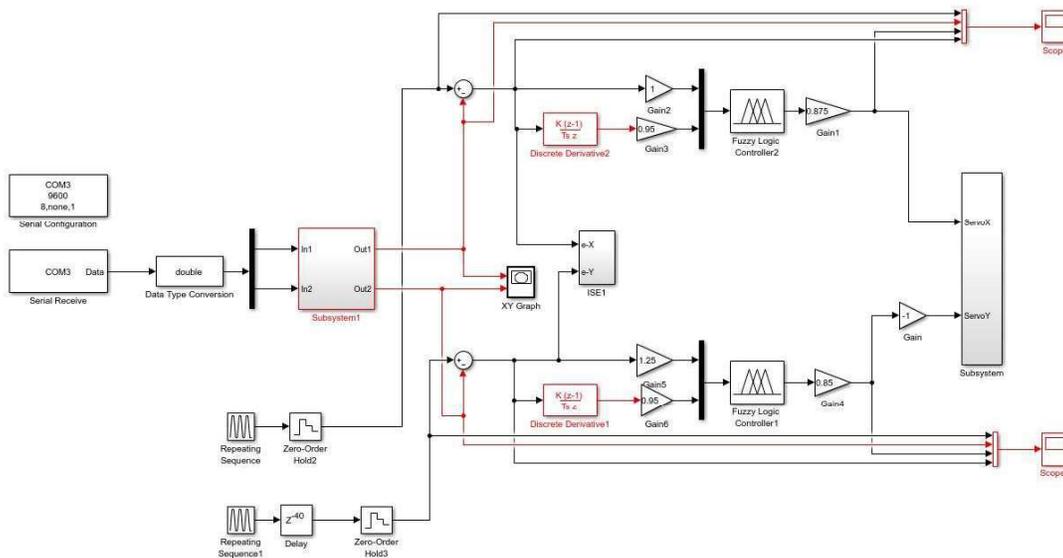


Figura 3.51. Diagrama de bloques del Control FUZZY para los ejes X y Y (Cuadrado).

En la Tabla 3.25 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FUZZY, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y.

Tabla 3.25. Parámetros de sintonización Implementación controlador FUZZY – cuadrado.

Eje	K_p	K_d	K
X	1	0.95	0.875
Y	1.25	0.95	0.85

La Figura 3.52 muestra el resultado del controlador FUZZY en el plano X,Y, para la referencia del seguimiento de camino de un cuadrado.

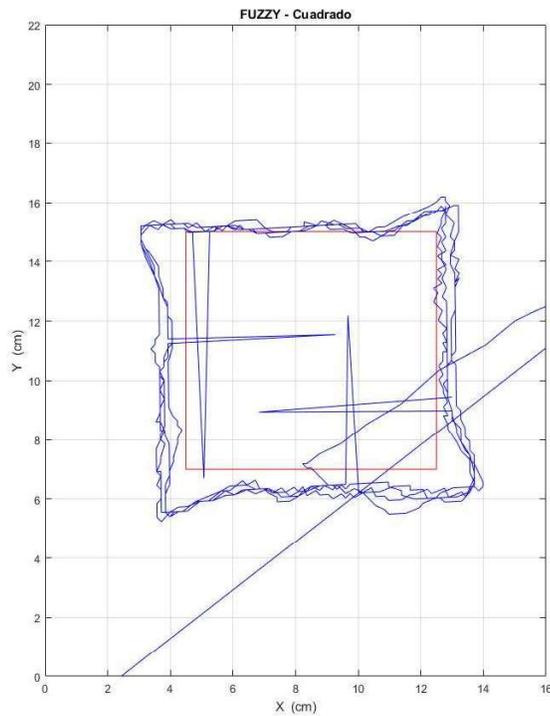


Figura 3.52. Resultado de la Implementación del control FUZZY plano X, Y (Cuadrado).

La Figura 3.53 muestra los resultados del controlador FUZZY para una referencia de cambio del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

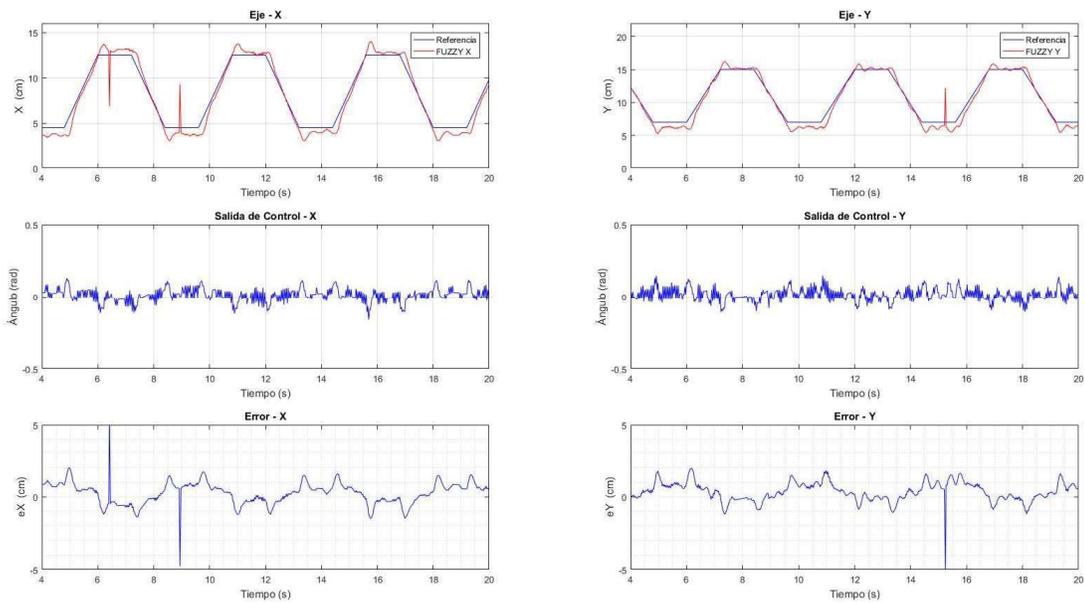


Figura 3.53. Resultados de la Implementación del control FUZZY (Cuadrado).

En la Tabla 3.26, se muestra el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, determinados para un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.26. Índice de desempeño de la Implementación del controlador FUZZY – cuadrado.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	10.37	0.38
Y	8.66	0.24

3.1.3.3. Implementación de control FSMC

Al igual que en simulación, para la implementación se plantea el mismo esquema de control FSMC que es aplicado en forma individual sobre cada eje como se indicó en la Figura 3.21, las trayectorias aplicadas en las entradas X_{REF} y Y_{REF} corresponden a una circunferencia y un cuadrado.

En la Figura 3. se muestra el esquema de la Implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FSMC para los ejes X y Y , la referencia del sistema es el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- Coordenada inicial = (6, 7) [cm]
- Coordenada final = (11, 15) [cm]

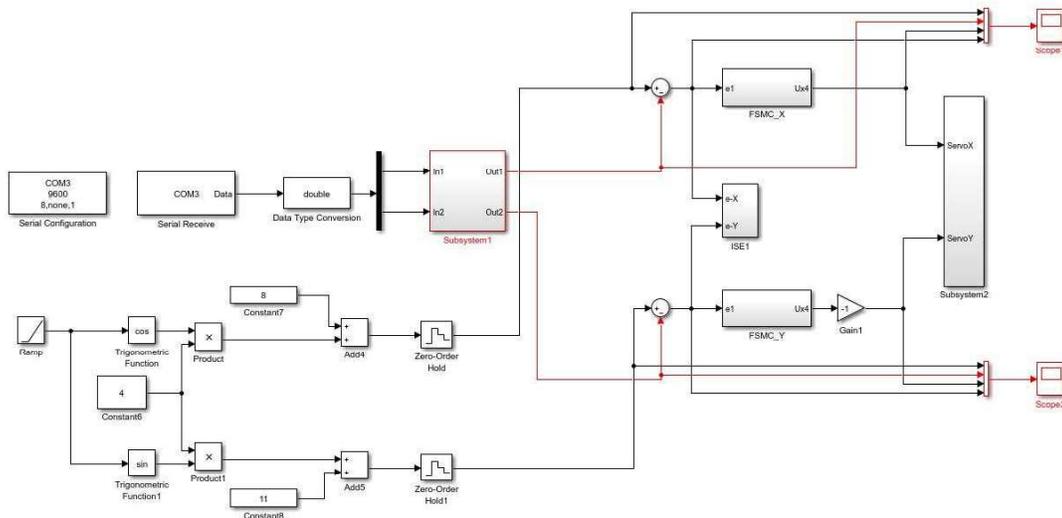


Figura 3.54. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes X y Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.55 muestra la incorporación del componente FUZZY a la superficie convencional del control SMC.

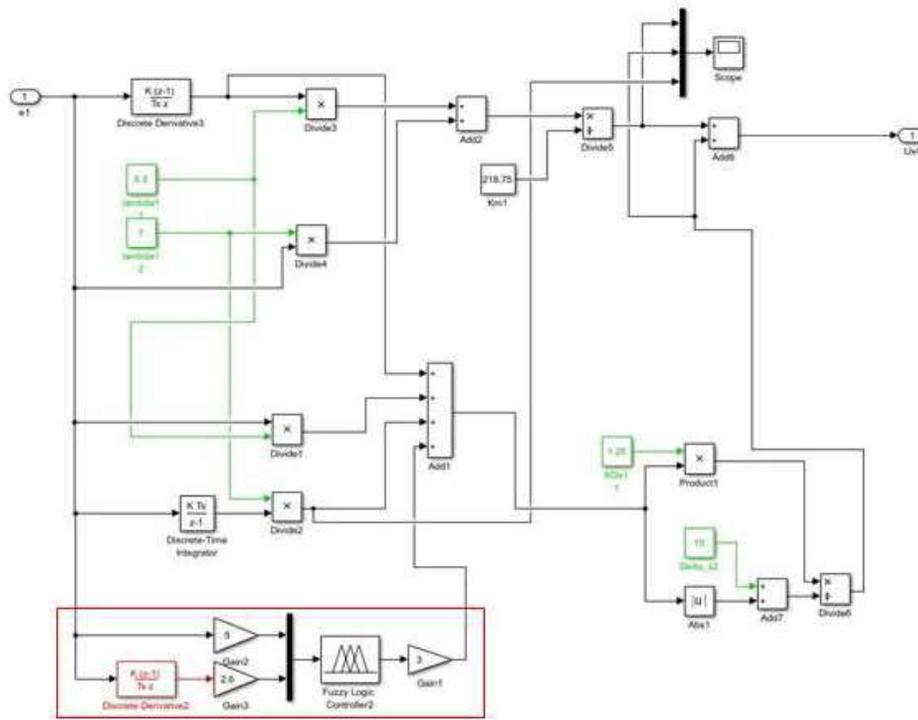


Figura 3.55. Componente FUZZY incorporado en la superficie del control SMC.

Los parámetros de sintonización del control γ_1 , γ_2 , K , δ , K_p , K_d , K fueron determinados heurísticamente.

En la Tabla 3.27 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FSMC, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y .

Tabla 3.27. Parámetros de sintonización Implementación controlador FSMC – cambio de coordenadas.

Eje	SMC				Componente FUZZY		
	γ_1	γ_2	K	δ	K_p	K_d	K
X	1	7.5	0.1	50	1	0.8	0.8
Y	1.2	7.5	0.1	50	0.85	0.8	0.8

La Figura 3.56 muestra el resultado del controlador FSMC en el plano X,Y , para la referencia del cambio de coordenadas.

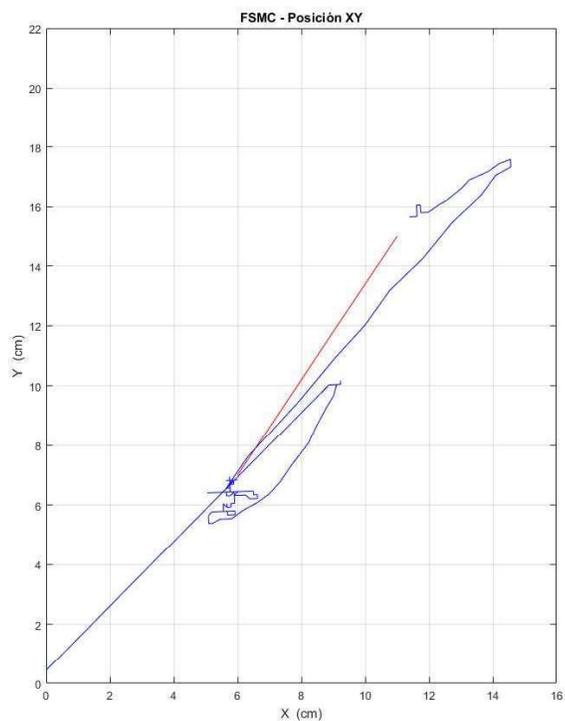


Figura 3.56. Resultado de la Implementación del control FSMC plano X, Y (Cambio de coordenadas).

La Figura 3.57 muestra los resultados del controlador FSMC para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

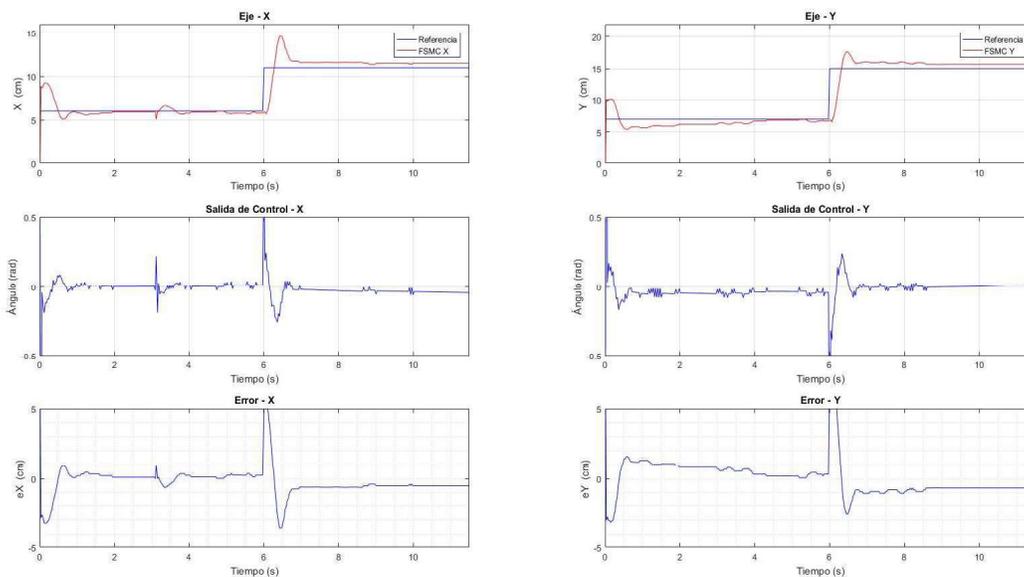


Figura 3.57. Resultados de la Implementación del control FSMC (Cambio de coordenadas).

Para un tiempo total de 11.5 segundos, se determinó el índice de desempeño ISE, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento para cada uno de los ejes, como se muestra en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Índice de desempeño de la Implementación del controlador FSMC.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)	Sobre-Impulso (cm)	Tiempo de establecimiento (s)
X	9.21	0.6	3.5	1.38
Y	17.71	0.66	2.5	2.6

En la Figura 3. se muestra el esquema de implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FSMC para los ejes *X* y *Y*, como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8 , 11) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

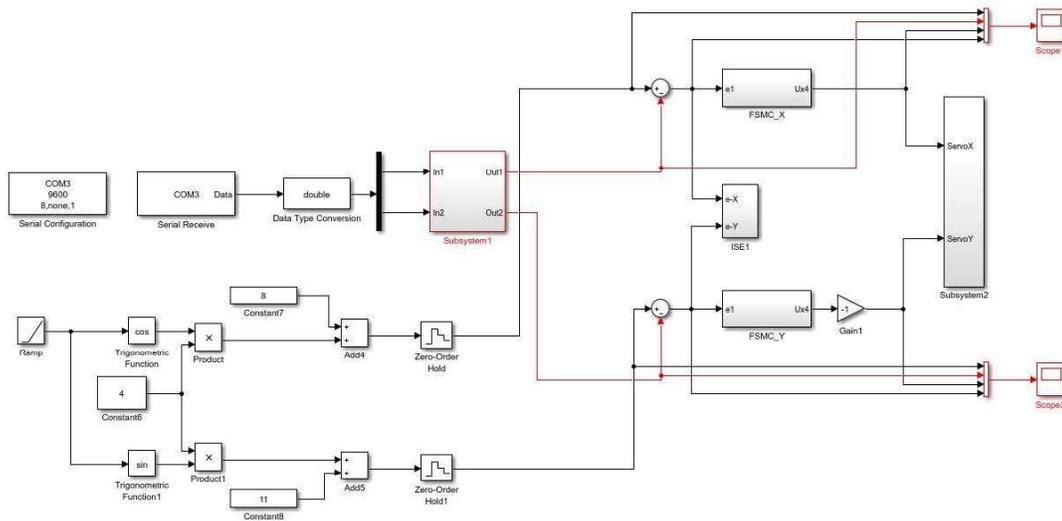


Figura 3.58. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes *X* y *Y* (Circunferencia).

En la Tabla 3.29 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FSMC, tanto para el control en el eje *X* y el control en el eje *Y*.

Tabla 3.29. Parámetros de sintonización Implementación controlador FSMC – circunferencia.

Eje	SMC				Componente FUZZY		
	γ_1	γ_2	K	δ	K_p	K_d	K
X	1	7.5	0.1	50	1	0.8	0.8
Y	1.2	7.5	0.1	50	0.85	0.8	0.8

La Figura 3.59 muestra el resultado del controlador FSMC en el plano X,Y , para la referencia del seguimiento de camino de una circunferencia.

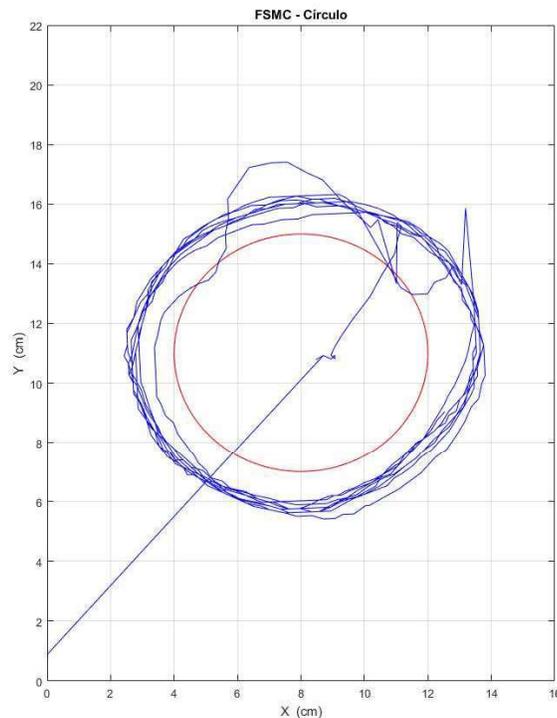


Figura 3.59. Resultado de la Implementación del control FSMC plano X,Y (Circunferencia).

La Figura 3.60 muestra los resultados del controlador FSMC para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

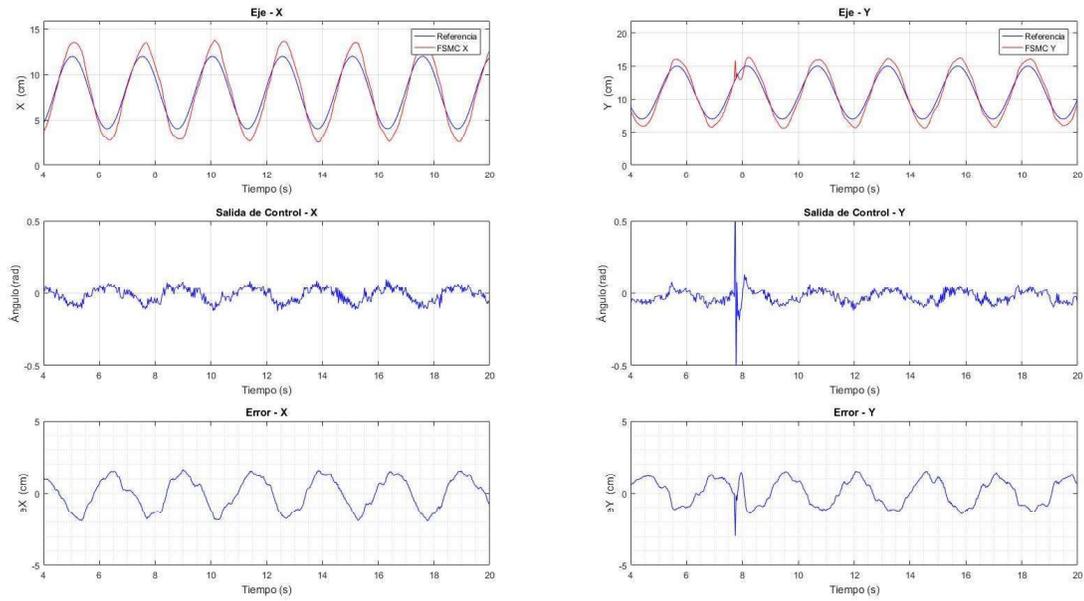


Figura 3.60. Resultados de la Implementación del control FSMC (Circunferencia).

En la Tabla 3.30, se muestra el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, determinados para un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.30 Índice de desempeño de la Implementación del controlador FSMC – circunferencia.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	18.62	1.61
Y	13.13	1.08

En la Figura 3. se muestra el esquema de Implementación del sistema balance *Ball & Plate* (esfera & plato) con un control FSMC para los ejes X y Y , como entrada del sistema se tiene el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- *Lado* = 8 [cm]
- *Coordenada de inicio* = (4.5, 7) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.7 [cm/s]

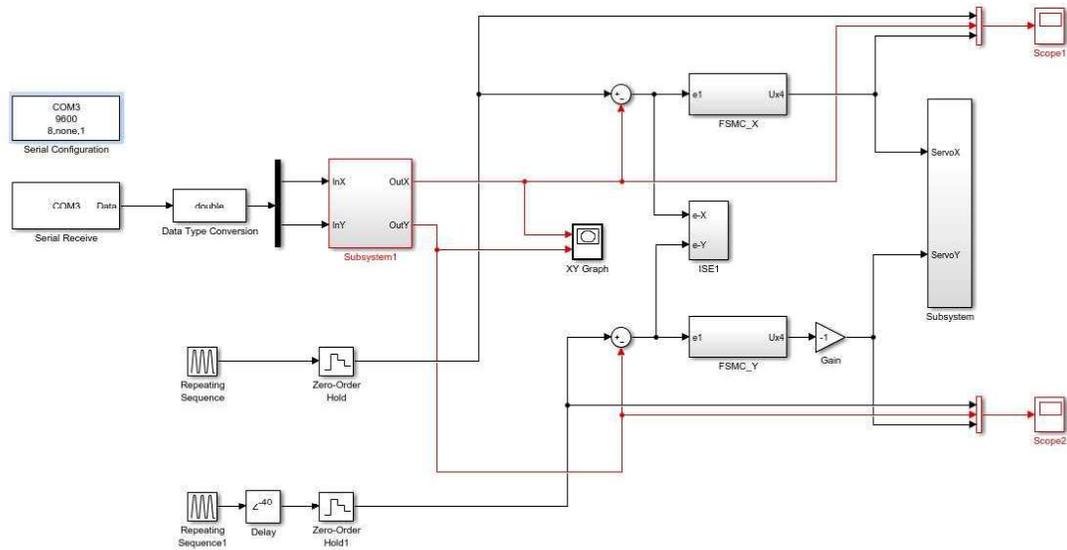


Figura 3.61. Diagrama de bloques del Control FSMC para los ejes X y Y (Cuadrado).

En la Tabla 3.31 se muestran los parámetros de sintonización para el controlador FSMC, tanto para el control en el eje X y el control en el eje Y .

Tabla 3.31. Parámetros de sintonización Implementación controlador FSMC – cuadrado.

Eje	SMC				Componente FUZZY		
	γ_1	γ_2	K	δ	K_p	K_d	K
X	1	7.5	0.1	50	1	0.8	0.8
Y	1.2	7.5	0.1	50	0.85	0.8	0.8

La Figura 3.62 muestra el resultado del controlador FSMC en el plano X,Y , para la referencia del seguimiento de camino de un cuadrado.

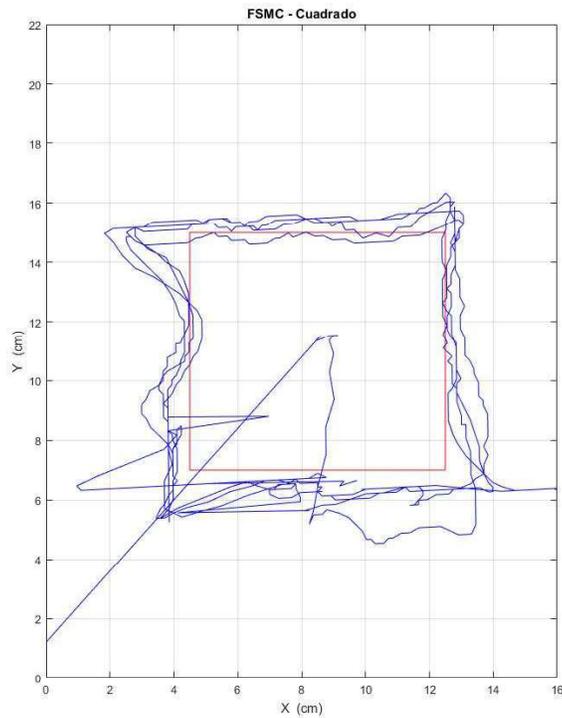


Figura 3.62. Resultado de la Implementación del control FSMC plano X, Y (Cuadrado).

La Figura 3.63 muestra los resultados del controlador FSMC para una referencia de cambio del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

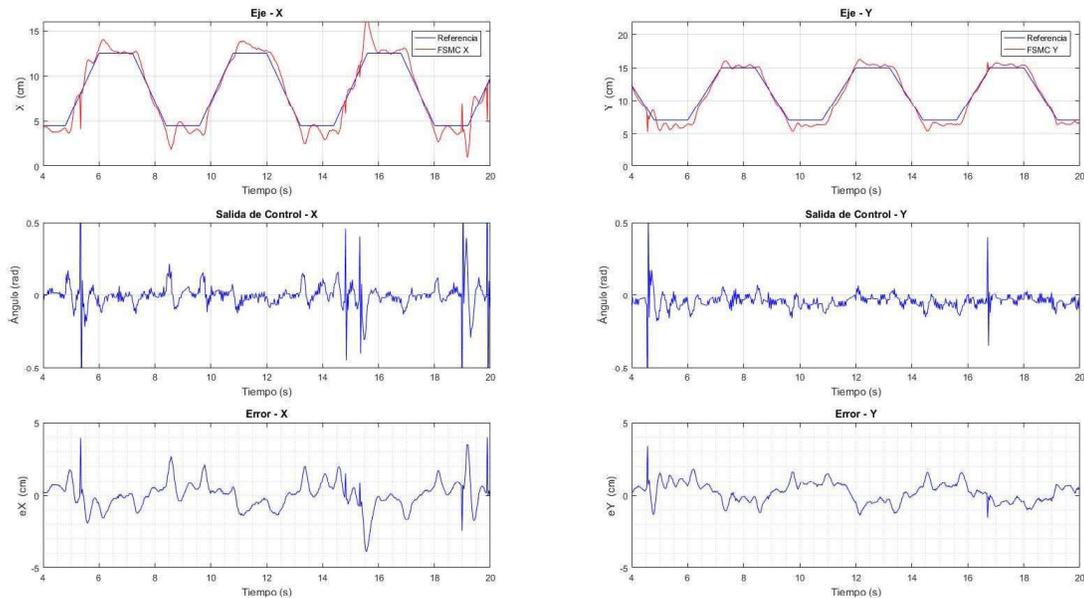


Figura 3.63. Resultados de la Implementación del control FSMC (Cuadrado).

En la Tabla 3.32 se muestran el índice de desempeño ISE y el error en estado estable para cada uno de los ejes, determinados para un tiempo de 4 a 20 segundos.

Tabla 3.32. Índice de desempeño de la Implementación del controlador FSMC – cuadrado.

Eje	ISE	Error en estado estable (cm)
X	15.65	0.645
Y	8.35	0.75

3.1.4. COMPARACIÓN ENTRE LOS CONTROLADORES SMC, FUZZY Y FSMC

3.1.4.1. Comparativa de los controladores para el posicionamiento y seguimiento de caminos

La Figura 3.64 muestra la comparación de los controladores SMC, FUZZY y FSMC en el plano X,Y, para el cambio de coordenadas con las siguientes características:

- *Coordenada inicial* = (6, 7) [cm]
- *Coordenada final* = (11, 15) [cm]

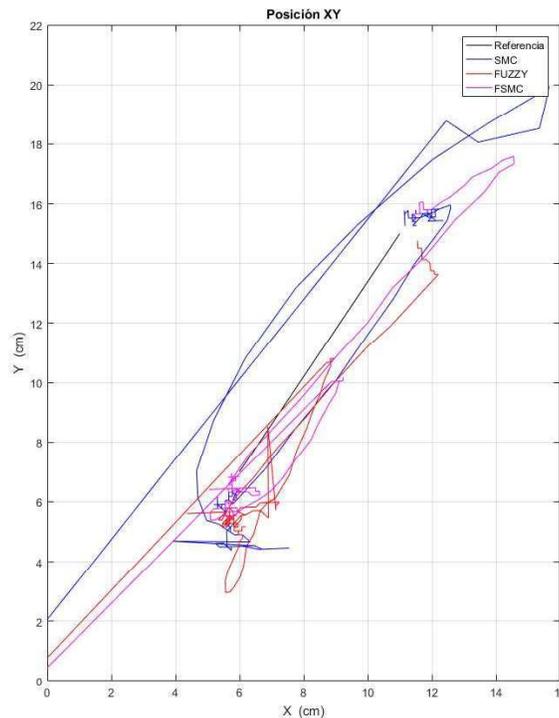


Figura 3.64. Comparación controladores plano X,Y (Cambio de coordenadas)

La Figura 3.65 muestra la comparación de los controladores propuestos para una referencia de cambio de coordenadas, la salida de control y el error de posición.

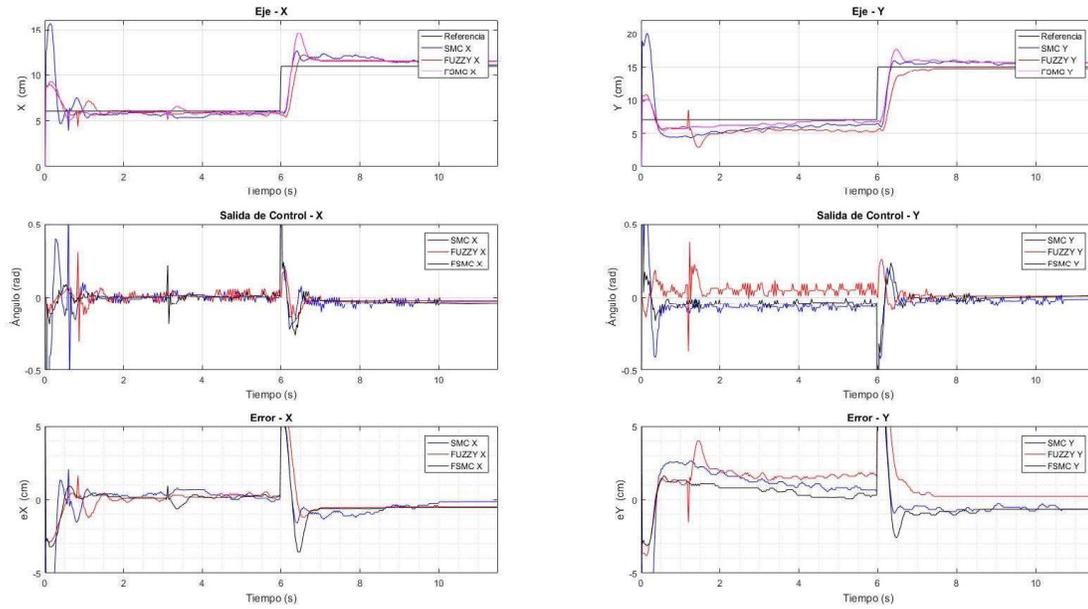


Figura 3.65 Comparación controladores (Cambio de coordenadas)

La Figura 3.66 muestra la comparación de los controladores propuestos en el plano X, Y , para el seguimiento de camino de una circunferencia de las siguientes características:

- *Radio* = 4 [cm]
- *Coordenada del centro* = (8, 11) [cm]
- *Rampa de velocidad* = 2.5 [cm/s]

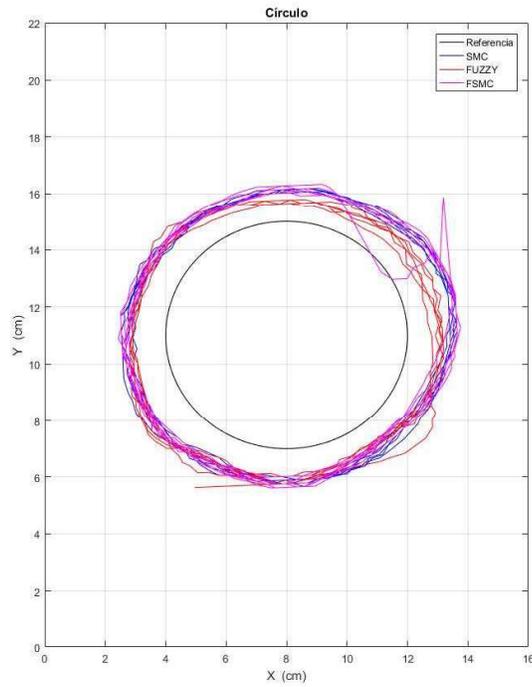


Figura 3.66. Comparación controladores plano X, Y (Circunferencia)

La Figura 3.67 muestra la comparación de los controladores propuestos para una referencia del seguimiento de camino de una circunferencia, la salida de control y el error de posición.

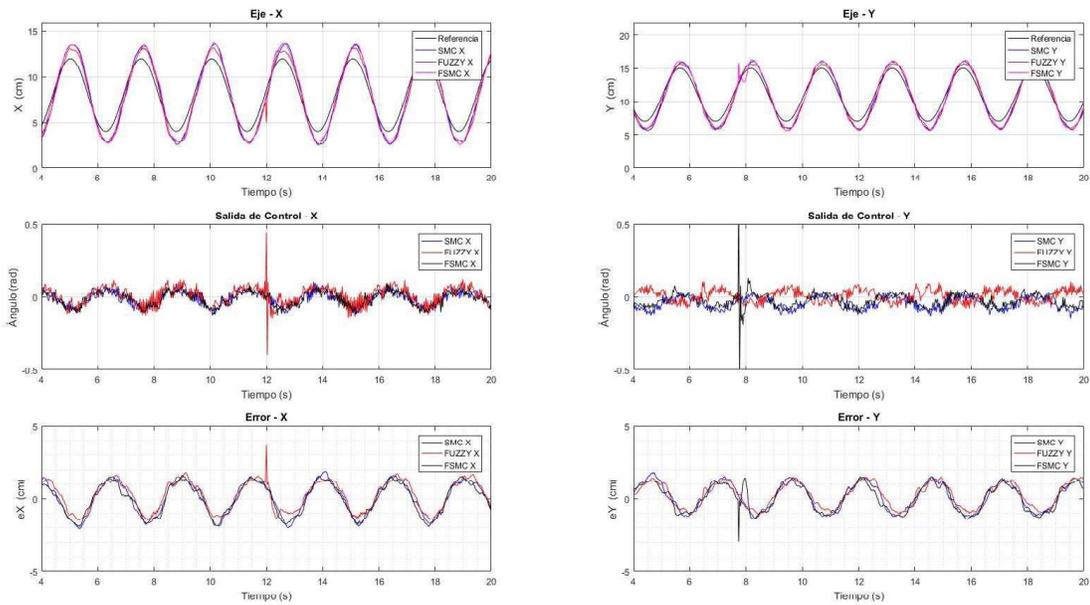


Figura 3.67. Comparación controladores (Circunferencia)

La Figura 3.68 muestra la comparación de los controladores propuestos en el plano X, Y , para el seguimiento de camino de un cuadrado de las siguientes características:

- $Lado = 8 [cm]$
- $Coordenada\ de\ inicio = (4,5, 7) [cm]$
- $Rampa\ de\ velocidad = 2.7 [cm/s]$

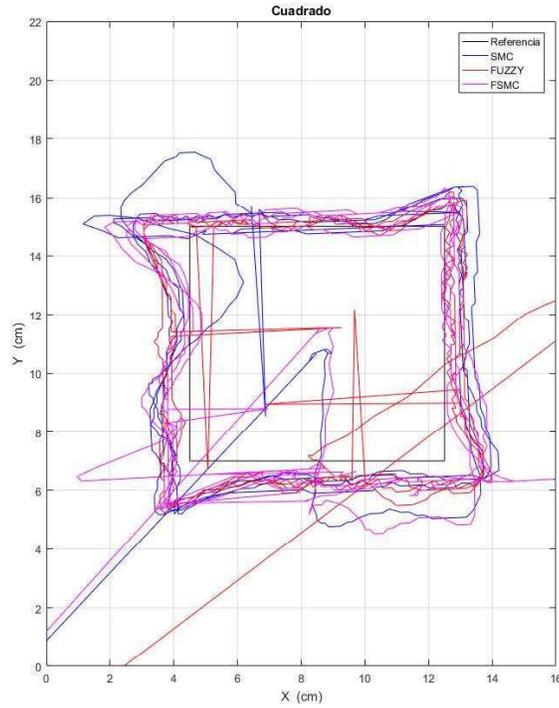


Figura 3.68. Comparación controladores plano X, Y (Cuadrado)

La Figura 3.69 muestra la comparación de los controladores propuestos para una referencia del seguimiento de camino de un cuadrado, la salida de control y el error de posición.

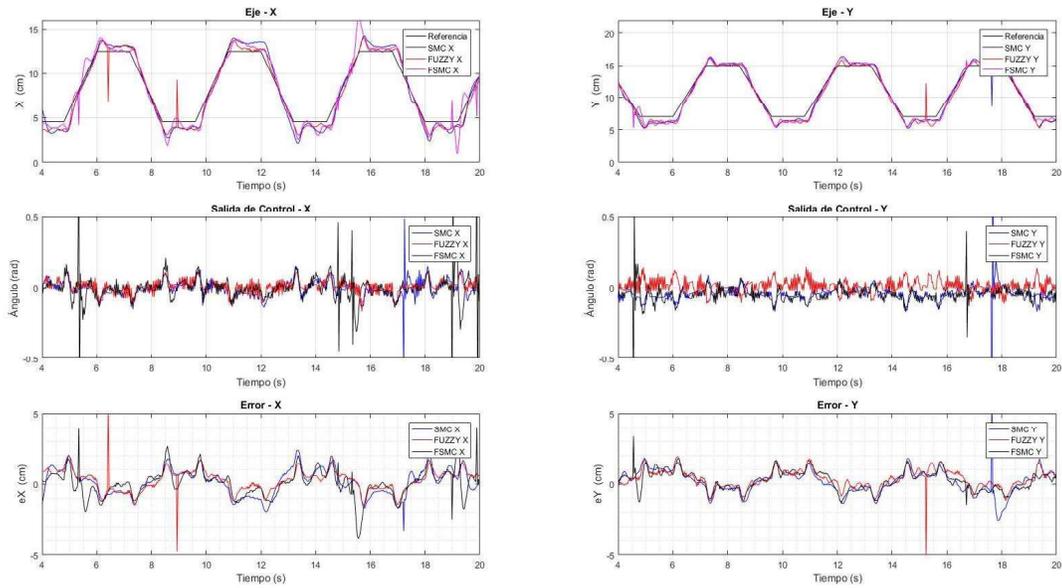


Figura 3.69. Comparación controladores (Cuadrado)

La Tabla 3.16 muestra el resumen de comparación de las respuestas de los controladores propuestos (SMC, FUZZY y FSMC). Se marca en naranja el valor más bajo para cada uno de los campos de comparación

Tabla 3.16. Tabla resumen de comparación de controladores – simulación

	Eje	SMC				FUZZY				FSMC			
		<i>ISE</i>	<i>EEE</i> (cm)	<i>s. imp</i> (cm)	<i>t. est</i> (s)	<i>ISE</i>	<i>EEE</i> (cm)	<i>s. imp</i> (cm)	<i>t. est</i> (s)	<i>ISE</i>	<i>EEE</i> (cm)	<i>s. imp</i> (cm)	<i>t. est</i> (s)
Posición XY	X	7.61	0.15	1.6	4.05	9.8	0.54	1.22	1.37	9.21	0.6	3.5	1.38
	Y	19.35	0.57	1	4.72	31.66	0.25	0	1.46	17.71	0.66	2.5	2.6
Círculo	X	19.42	1.48	-	-	16.66	1.01	-	-	18.62	1.61	-	-
	Y	13.9	1.17	-	-	11.54	0.7	-	-	13.13	1.08	-	-
Cuadrado	X	14.47	0.64	-	-	10.37	0.38	-	-	15.65	0.64	-	-
	Y	11.65	0.5	-	-	8.66	0.24	-	-	8.35	0.75	-	-

ISE: Integral del error cuadrático

EEE: Error en estado estable [cm]

s. imp: Sobre impulso [cm]

t. est: Tiempo de establecimiento [s]

3.1.4.1. Perturbación

La Figuras 3.70 y la Figura 3.71 muestran la respuesta del controlador SMC ante una perturbación generada mientras realiza el seguimiento de camino circular y cuadrado respectivamente.

La perturbación generada es externa al sistema, producida por el movimiento manual de la esfera.

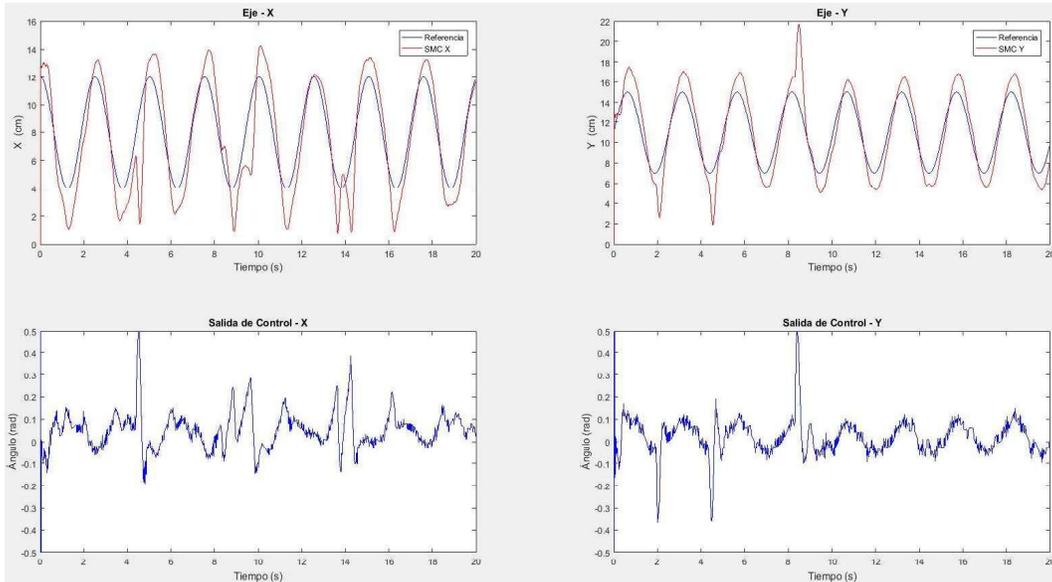


Figura 3.70. Perturbación control SMC – entrada circular

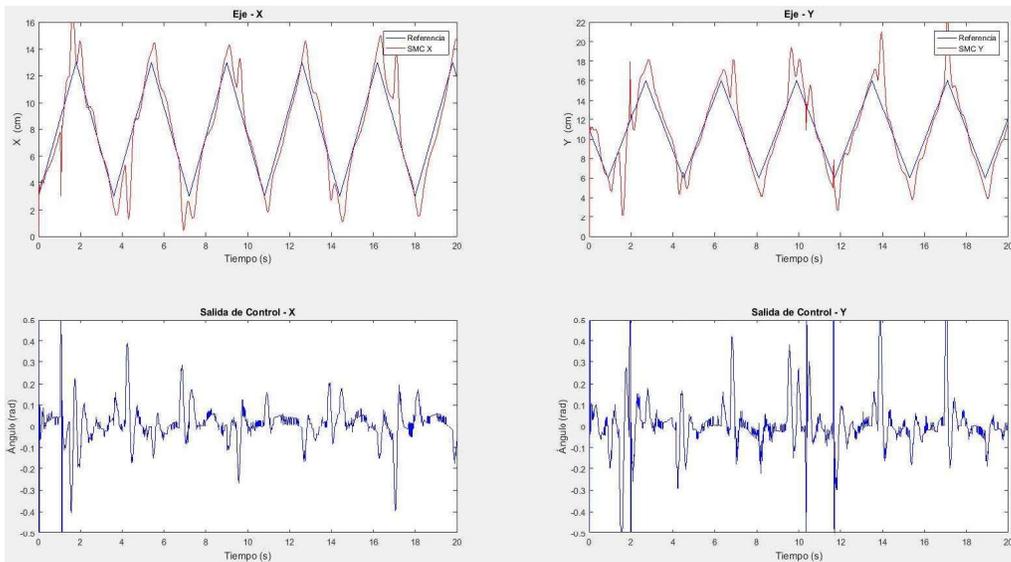


Figura 3.71. Perturbación control SMC – entrada cuadrada

La Figuras 3.72 y la Figura 3.73 muestran la respuesta del controlador FUZZY ante una perturbación generada mientras realiza el seguimiento de camino circular y cuadrado respectivamente.

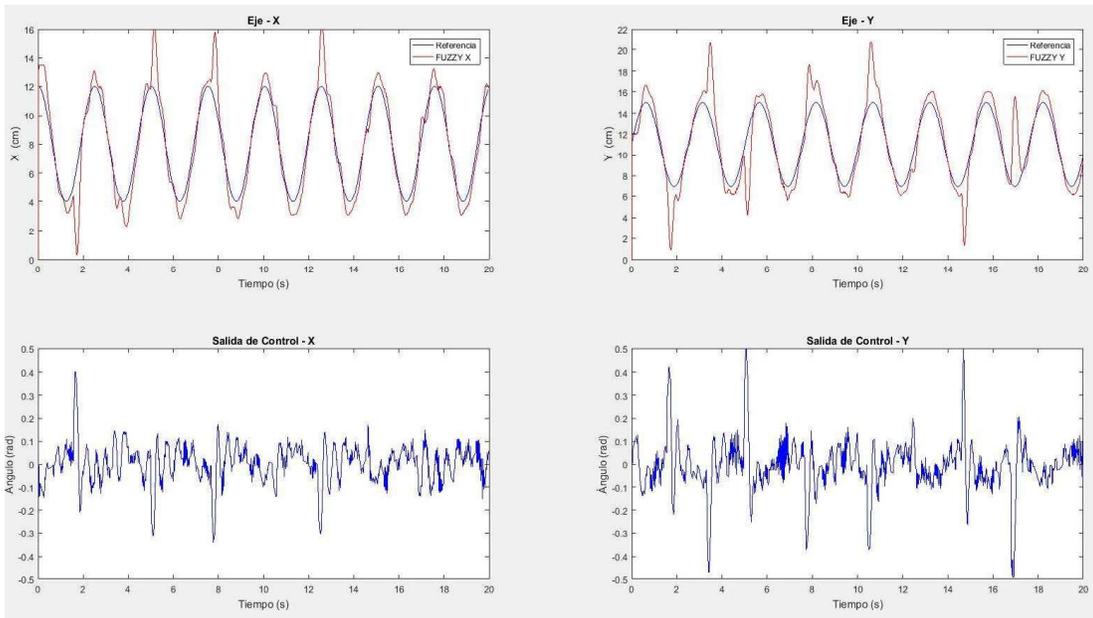


Figura 3.72. Perturbación control FUZZY – entrada circular

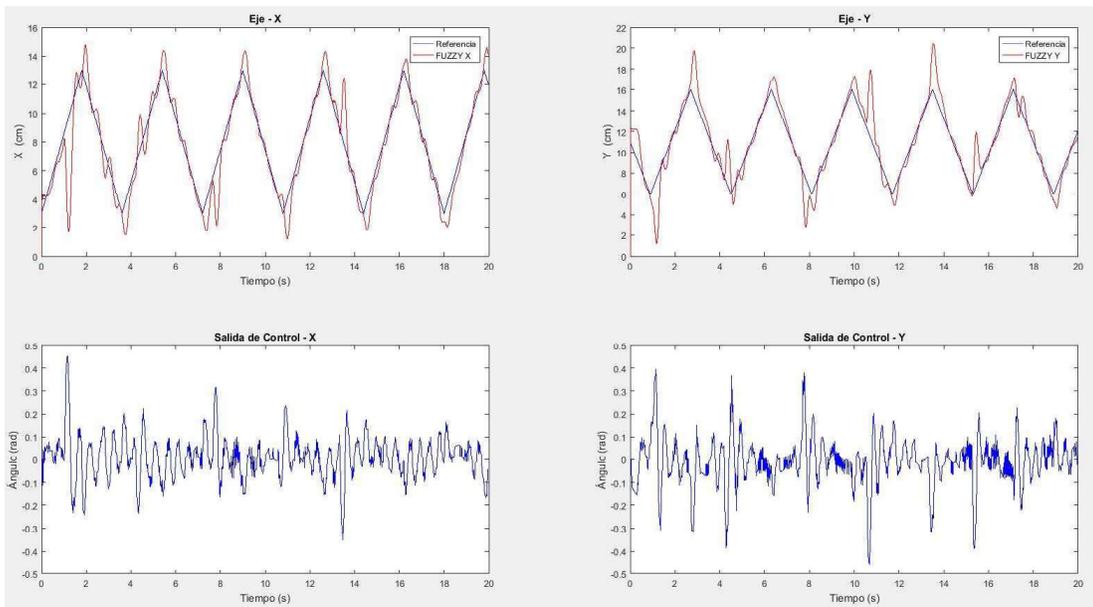


Figura 3.73. Perturbación control FUZZY – entrada cuadrada

La Figura 3.74 y la Figura 3.75 muestran la respuesta del controlador FSMC ante una perturbación generada mientras realiza el seguimiento de camino circular y cuadrado respectivamente.

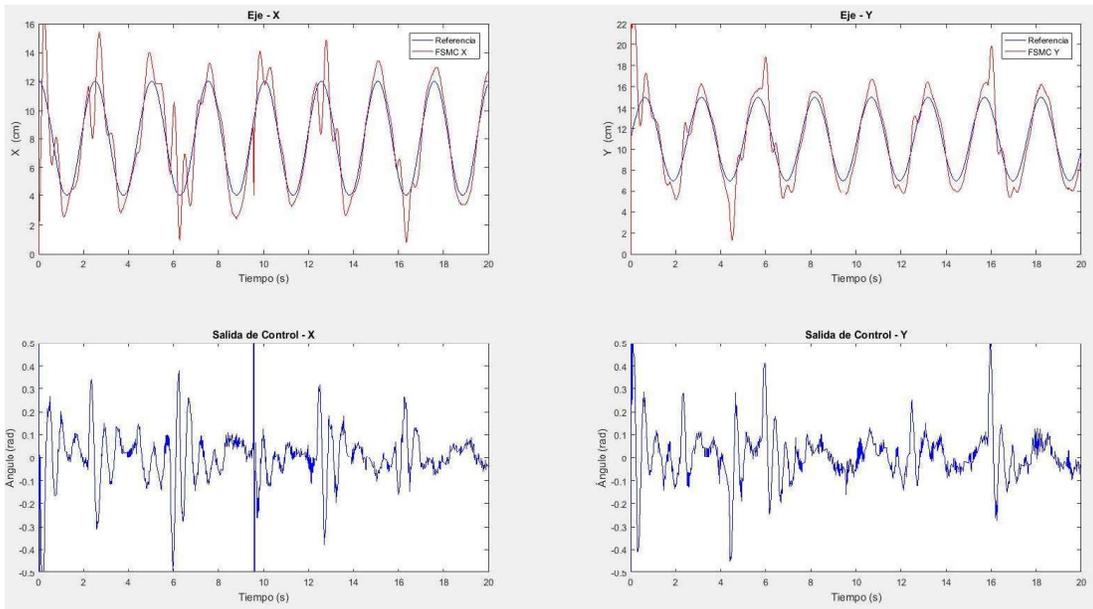


Figura 3.74. Perturbación control FSMC – entrada circular

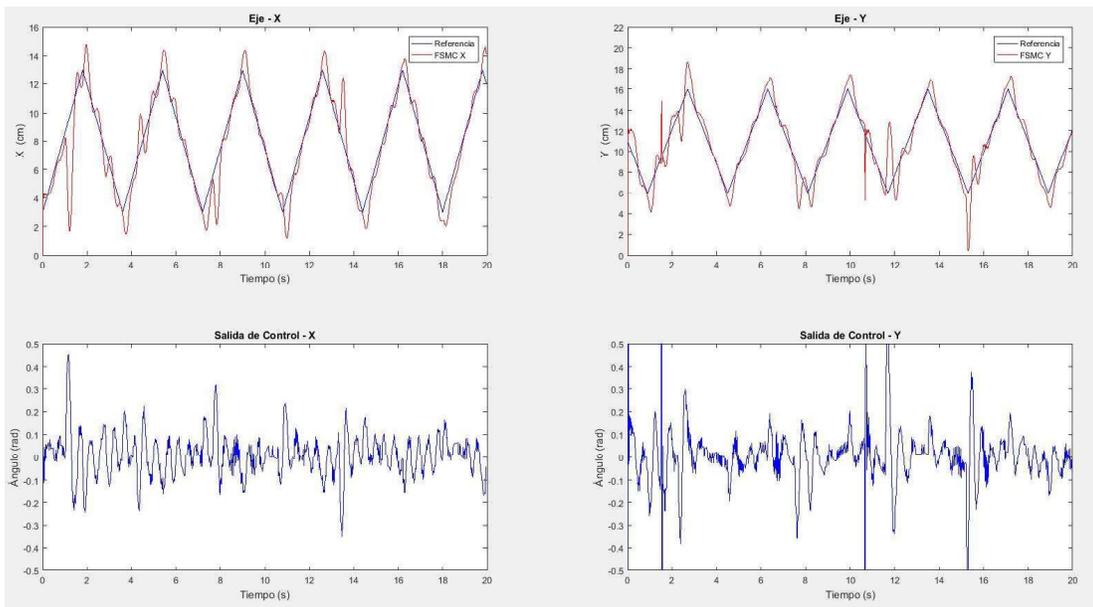


Figura 3.75. Perturbación control FSMC – entrada cuadrada

3.2. DISCUSIÓN

Para la implementación de los algoritmos de control propuestos en la tarjeta embebida Arduino se debe considerar la limitada memoria RAM de la tarjeta que es de 8 Kb, dicha limitante es expuesta al momento de ejecutar los bloques de simulink bajo el esquema de “modo externo”, impidiendo la descarga del algoritmo a la tarjeta embebida. Dicha limitante es incluso más notoria para el controlador FUZZY y el control híbrido FSMC, ya que se está trabajando con 49 reglas de inferencia las mismas que requieren un elevado consumo de cómputo, lo que deja claro, que la memoria RAM es insuficiente para la ejecución del algoritmo. Una alternativa para la implementación de los controles en la tarjeta embebida es ejecutar los algoritmos en un solo eje, considerando que cada controlador prácticamente ejecuta dos algoritmos de control independientes al mismo tiempo, la ejecución de un solo controlador requeriría la mitad de la memoria RAM, corrigiendo el problema de memoria pero afectando la robustez del control.

El control FUZZY muestra el mejor desempeño en comparación a los otros dos controladores propuestos SMC y FSMC, para la medición de desempeño se utilizó el índice de la integral del error cuadrático ISE, como se muestran en la Tabla 3.13, Tabla 3.14 y Tabla 3.15, dicho índice para el caso del controlador FUZZY es el menor.

El controlador híbrido FSMC muestra un mejor desempeño que el controlador SMC, se muestra entonces que el componente FUZZY añadido a la superficie pretende ser un controlador más robusto dotado además de inteligencia.

La velocidad configurada tanto en el seguimiento de camino con entrada circular y con entrada cuadrada es directamente proporcional al ISE para todos los controladores, esto considerando la inercia de la esfera.

Al controlador FUZZY se le añadió un término integral para mejorar el error en estado estacionario, dicha inclusión fue realizada según lo indicado en el numeral [1.5.4.5.1], el efecto se puede observar en la Figura 3.26, donde se determina un tiempo de establecimiento menor para el controlador.

Los controladores muestran una respuesta adecuada ante las perturbaciones, todas las Figuras consideradas en el apartado [3.1.2.1], se obtuvieron mientras se ejecutaban los controladores para una entrada circular y cuadrada respectivamente.

4. CONCLUSIONES

Empleando el modelo reducido de la planta Ball & Plate (esfera & plato) se puede desarrollar un controlador SMC con un desempeño aceptable, tomando en cuenta que una de las ventajas del controlador es que por su robustez permite absorber los posibles errores de modelado de la planta.

El controlador con el mejor desempeño de los propuestos es el controlador FUZZY, que no depende del modelo de la planta solo requiere el conocimiento del comportamiento de la misma.

Los controladores propuestos pueden mejorar su desempeño, aplicando otras técnicas para la obtención de los parámetros de sintonización, como por ejemplo redes neuronales.

Diferente a lo estimado inicialmente el controlador FSMC no resultó ser el de mejor desempeño sin embargo si se concluye que el componente FUZZY añadido a la superficie mejora el desempeño del control SMC.

El enlace entre la tarjeta embebida Arduino y el computador facilita notablemente el determinar los parámetros de sintonización de los controladores (método heurístico) ya que puede visualizarse inmediatamente el cambio de las respuestas de control ante cualquier variación de un parámetro.

Todos los controladores fueron afectados por una perturbación generada en el panel táctil resistivo, a pesar de implementar múltiples filtros y aumentar tiempos para la estabilización de la señal dicha perturbación persiste y se concluye que es una perturbación inherente al panel, la misma se presenta aleatoriamente y cuando se trabaja con muy bajas velocidades.

Considerando que el elemento sensor es un panel táctil resistivo, el mismo se ve afectado por la presión que se ejerce en el mismo, entonces se puede concluir que el peso de la esfera es determinante para obtener un desempeño óptimo en cada controlador.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Nokhbeh y D. Khashabi, *Modelling and Control of Ball-Plate System*, Iran: Amirkabir University of Technology, Final Project Report, 2011.
- [2] L. Morales, O. Camacho, P. Leica y D. Chavéz, "A Sliding-Mode Controller from a reduced order model: Ball and Plate system experimental application," de *14th International Conference on Informatics in Control*, Madrid, 2017.
- [3] A. Cedeño y M. Gordón, *Implementación de una plataforma de estabilización para control de posición y seguimiento de camino de una esfera*, Quito: Escuela Politécnica Nacional - Proyecto de titulación pregrado, 2016.
- [4] H. Subía y V. Manuel, "Diseño de un algoritmo de control inteligente utilizando lógica difusa comparado con un algoritmo PID, para su implementación en un sistema multivariable no lineal bola y plato," 24 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/30110>. [Último acceso: 10 Abril 2018].
- [5] E. Iglesias, Y. García, O. Camacho y C. Smith, "Fuzzy surface-based sliding mode control," *E. Iglesias et al. / ISA Transactions*, vol. 46, pp. 73-83, 2007.
- [6] S. Anand y R. Prasad, "Modeling and control of Ball and Beam system," *International Journal of Engineering Research in Electronics and and Communication Engineering (IJERECE)*, vol. 4, nº 9, 2017.
- [7] Arduino, «<http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>,» Arduino, 23 enero 2013. [En línea]. Available: <http://arduino.cl/>.
- [8] Superrobotica, «<http://www.superrobotica.com/s330165.htm>,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.superrobotica.com>.
- [9] epec build to print electronics, «<http://www.epectec.com/articles/the-technology-within-touch-panels.html>,» epectec, 2013. [En línea]. Available: <http://www.epectec.com/articles/the-technology-within-touch-panels.html>.
- [10] ezscreen The Natural Interface is Touch, «http://www.ezscreen.com/touch_select.html,» Touch Panel Technology Selection, 2014. [En línea]. Available: <http://www.ezscreen.com/>.
- [11] AN10675, *Interfacing 4-wire and 5-wire resistive touchscreens to the LPC247x*, NXP founded by Philips, 2008.
- [12] R. Rascón Carmona, A. Calvillo Téllez, J. d. D. Ocampo Díaz y J. R. Cárdenas - Valdez, «Control por Modos Deslizantes Mejorado,» *Investigación Básica y Aplicada*, vol. 4, nº 7, pp. 2 - 9, 2015.
- [13] F. De la Cruz y O. Camacho, «Controlador de Modos Deslizantes basado en Predictor de Smith y Modelo de Segundo Orden para Procesos con Elevado Retardo,» *Revista Politécnica*, vol. 35, nº 2, 2015.

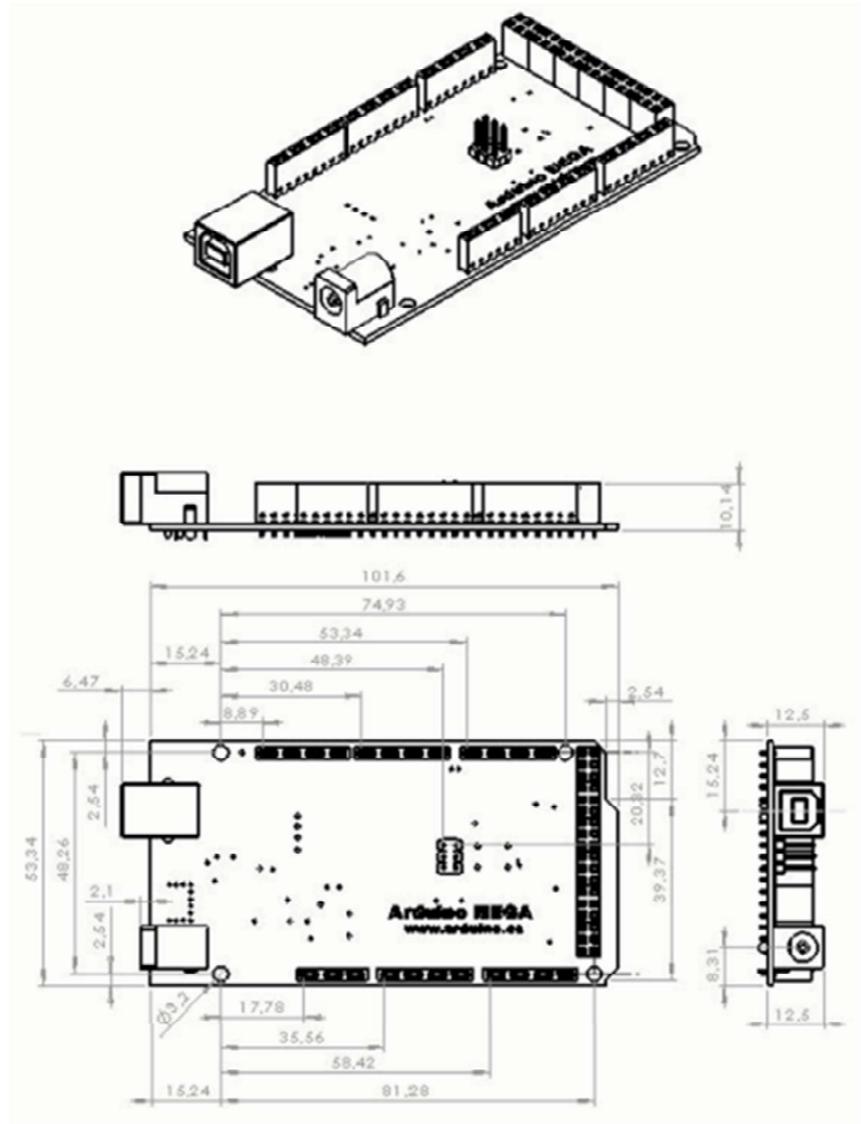
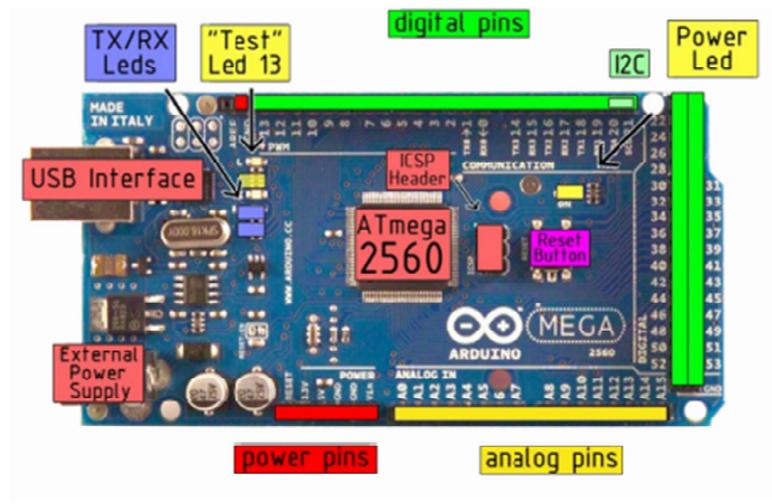
- [14] J.-J. Slotine y L. Weiping, *Applied Nonlinear Control*, New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [15] E. Iglesias, J. García, O. Camacho, S. Calderón y A. Acosta, «Ecuaciones de Sintonización para Controlador por Modos Deslizantes y Control de Matriz Dinámica a partir de un Módulo Difuso,» *AXIOMA*, vol. 1, nº 14, pp. 14 - 24, 2015.
- [16] J. Terán, J. Anderez y O. Camacho, «Genetics algorithms as a tuning tool for PID and sliding mode controllers,» *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 28, nº 3, pp. 28-32, 2005.
- [17] S. Kouro y R. Musalem, «Universidad Técnica Federico Santa María,» 01 Abril 2010. [En línea]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>. [Último acceso: 2017 Abril 10].
- [18] K. Passino y S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, California: Addison-Wesley, 1998.
- [19] Atmel, «<http://www.lysator.liu.se/~kjell-e/embedded/doc8091.pdf>,» Atmel, Julio 2007. [En línea]. Available: <http://www.lysator.liu.se/>.
- [20] K. Ischaque, Z. Shareef, M. Amjad y S. Abdullah, «Fuzzy logic control of ball and beam system,» de *International Conference on Education Technology and Computer (ICETC)*, 2010.

ANEXOS

A. ARDUINO MEGA



Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

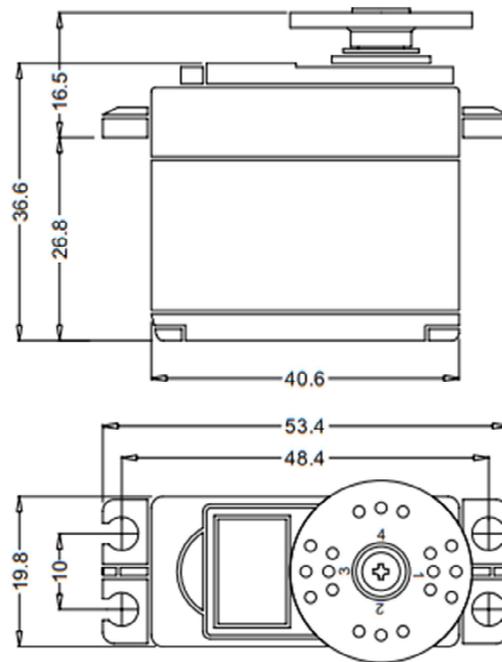


B. SERVOMOTOR

ANNOUNCED SPECIFICATION OF HS-422 STANDARD DELUXE SERVO

1. TECHNICAL VALUES

CONTROL SYSTEM	: +PULSE WIDTH CONTROL 1500usec NEUTRAL	
OPERATING VOLTAGE RANGE	: 4.8V TO 6.0V	
OPERATING TEMPERATURE RANGE	: -20 TO +60°C	
TEST VOLTAGE	: AT 4.8V	AT 6.0V
OPERATING SPEED	: 0.21sec/60° AT NO LOAD	0.16sec/60° AT NO LOAD
STALL TORQUE	: 3.3kg.cm(45.82oz.in)	4.1kg.cm(56.93oz.in)
OPERATING ANGLE	: 45°ONE SIDE PULSE TRAVELING 400usec	
DIRECTION	: CLOCK WISE/PULSE TRAVELING 1500 TO 1900usec	
CURRENT DRAIN	: 8mA/IDLE AND 150mA/NO LOAD RUNNING	
DEAD BAND WIDTH	: 8usec	
CONNECTOR WIRE LENGTH	: 300mm(11.81in)	
DIMENSIONS	: 40.6x19.8x36.6mm(1.59x0.77x1.44in)	
WEIGHT	: 45.5g(1.6oz)	



2. FEATURES

- 3-POLE FERRITE MOTOR
- LONG LIFE POTENTIOMETER
- DUAL OILITE BUSHING
- INDIRECT POTENTIOMETER DRIVE

C. PANTALLA TÁCTIL RESISTIVA DE 5 HILOS



"The Natural Interface Is Touch"

5-Wire Resistive Touchscreen Specifications Rev.: 09/01/2003

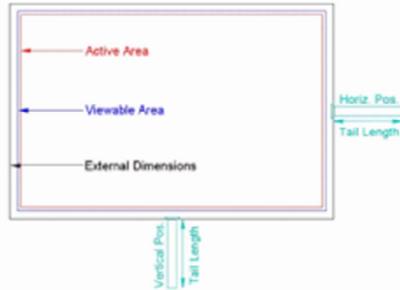
Ezscreen® 5-wire Resistive Touch Sensors (Touch Screens) have the following standard features:

- Touch Point is 99%+ Accurate and ADA Compliant
- "Anti-Newton Ring" Chemically Hardened "ITO" Indium Tin Oxide (In₂O₃-SnO₂) Glass
- Engineered Internal Anti-Glare PET (PolyEthylene Terephthalate) overlay is fully bonded to the ITO glass substrate
- Separator dot diameter less than 0.035mm-0.050mm, the Smallest in the industry for the best quality of display transmission of all resistive touch screens
- Light Transmission: ≥83% wavelength @ 550nm, the Best in the industry
- FPC Tail: Lower electrical resistance and greater flexibility than PET or ITO Film used by other suppliers. It is much more reliable than ribbon wire connectors. It is laser-bonded to the touch sensor for consistent and reliable performance, an exclusive feature in the industry.
- Resolution (touch) of 4096X4096
- Haze: Less than 6%, The best rating any resistive touch screen
- Maximum Circuit Rating: DC5v less than 20mA at contact point of top layer with bottom layer (ITO/ITO)
- Insulation Resistance: 10M+ @ DC25V
- Dielectric Strength: Withstands 250V RMS (50 ~ 60 Hz 1 min.)
- Contact Bounce Time: Less than 5ms
- Life Expectancy: Greater than 35,000,000 closures (typical)
- Scoring Life: More than 5,000,000
- Mechanical Actuation Force: 10 to 100g (pen or finger)
- Linearity: Less than 1.5%
- Surface Hardness 3H
- Environmental Operational Temperature Range -10°C (14°F) to +60°C (140°F) (humidity from 20% to 85%, no dew condensation)
- Storage Temperature from -20°C (-4°F) to +70°C (158°F) (humidity 20% to 90%, no dew condensation) Humidity 40°C @ 90% -95% for 240 hrs
- Vibration Rating: 20 G's max. (10-200 Hz, MIL-STD-202, M204, Condition B)

1999 tellepsen st., houston, tx 77023 usa, phone: 713.926.1186, toll-free (usa and canada) 888-touchEZ (888.868.2439), fax: 713.926.3110, website: www.ezscreen.com

5-Wire Resistive Touch Screen Panels

Using our panels and controllers allows you to add our touchscreen interface to virtually any LCD display, desktop, laptop or palmtop.



5-Wire Resistive	
Size (Diagonal):	8.0" thru 22.0"
Application:	Severe Duty, Works even when cut
Light Transmission:	78-85%
Response Time:	<5ms
Touch Accuracy:	98-99%
Environment:	Indoor/Outdoor, moisture and dust resistant
Operating Temp.:	-10°~+60° C
Life:	Tested to perform over 30 million touches on a single point
Surface Hardness:	3H
Resolution:	2048x 2048-4096x4096
Input Mode:	Bare or gloved finger, stylus, pen etc.
Function:	Senses pressure exerted on the screen

5-Wire Resistive Touch Screen Panels						
model number	construction & surface treatment ("1")	external dims.(mm)	viewable dims. (mm/inch)	active area dims. (mm/inch)	tail position	tail length (mm)
EZ-061L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	138.00x108.00mm / 5.43"x4.25"	118.00x89.00mm / 4.65"x3.5"	116.00x87.00mm / 4.57"x3.43"	horizontal	
EZ-061L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	156.00x120.00mm / 6.14"x4.72"	136.00x100.00mm / 5.35"x3.94"	134.00x98.00mm / 5.28"x3.86"	horizontal	
EZ-074L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	171.90x127.40mm / 6.77"x5.02"	148.90x112.40mm / 5.86"x4.43"	145.90x109.40mm / 5.74"x4.31"	horizontal	
EZ084L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	206.00x152.00mm / 8.11"x5.98"	176.00x133.00mm / 6.93"x5.24"	171.00x128.00mm / 6.73"x5.04"	horizontal	
EZ104L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	249.00x186.60mm / 9.8"x7.35"	219.90x167.80mm / 8.66"x6.61"	215.90x163.80mm / 8.5"x6.45"	horizontal	67.00mm
EZ121L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	276.00x213.00mm	253.00x191.00mm	247.00x185.00mm	horizontal	67.00mm
EZ151L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	337.00x257.00mm	310.00x235.00mm	305.00x228.00mm	horizontal	67.00mm
EZ170L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	362.00x276.00mm	340.00x260.00mm	320.00x238.00mm	horizontal	67.00mm
EZ181L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	388.00x313.00mm	363.00x291.00mm	357.00x285.00mm	horizontal	67.00mm
EZ190L-W5R	ITO-1,CH, AGH,ANR	397.00x320.00mm	377.00x303.00mm	369.00x294.00mm	horizontal	67.00mm