

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS PID CLÁSICOS Y CONTROL DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO APLICADOS AL SISTEMA MULTIVARIABLE PLATO-BOLA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

HOLGER ELÍAS LÓPEZ CÓRDOVA

DIRECTOR: ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PHD.

Quito, marzo 2022

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Holger Elías López Córdova, bajo mi supervisión.

ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PHD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Holger Elías López Córdova, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado 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 dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

HOLGER ELÍAS LÓPEZ CÓRDOVA

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado:

Principalmente a Dios, por ser la guía en todo este camino, quien me proporciono la fuerza para continuar en todo el proceso y sobre todo es el proveedor en cada una de las personas que fueron de bendición en todo mi camino universitario.

A mis padres Halbert y Janeth por su apoyo incondicional, trabajo, sacrificio permitiéndome llegar a la meta tan anhelada y sobre todo por darme el ejemplo de lucha, perseverancia y constancia.

A mis hermanos María José, Juan Carlos y Andrés que siempre estuvieron con su ayuda incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi guía.

A mis padres Halbert y Janeth por siempre creer en mí.

A mis hermanos María José, Juan Carlos y Andrés por su apoyo.

A mis abuelos y tíos que siempre aportaron con sus consejos, ánimos y por estar pendientes y prestarme su ayuda.

A PhD. Oscar Camacho, por su predisposición en la realización del proyecto de titulación, por sus conocimientos brindados, por su amabilidad y calidez.

2.3	ESQUEMA DE CONTROL DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	30
2.4	ADQUISICIÓN DE DATOS Y COMUNICACIÓN SERIAL	36
2.4.1	ACONDICIONAMIENTO PANTALLA TÁCTIL RESISTIVA 5 HILOS	40
2.5	IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA PID CLÁSICO Y CONTROLADOR DIFUSO PD+I TAKAGI SUGGENO	43
2.6	TRAYECTORIAS PARA EL SISTEMA PLATO-BOLA.....	47
2.6.1	PUNTO ESPECÍFICO	47
2.6.2	CUADRADO.....	47
2.7	INTERFAZ GRÁFICA.....	51
2.7.1	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INTERFAZ GRAFICA	54
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1	VALIDACIÓN DE LA APROXIMACIÓN LINEAL DEL SISTEMA PLATO-BOLA	59
3.2	SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL PD MEDIANTE SINTONIZACIÓN ZIEGLERS Y NICHOLS	62
3.3	SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	71
3.4	IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL PID SINTONIZADO POR ZIEGLER Y NCHOLS Y ESQUEMA DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	80
3.4.1	RESPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID.	80
3.4.2	RESPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO.....	87
3.5	COMPARACIÓN DEL ÍNDICE CUADRÁTICO INTEGRAL DE LOS ESQUEMAS DE CONTROL.	93
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
4.1	CONCLUSIONES	99
4.2	RECOMENDACIONES	100
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

RESUMEN

El sistema plato-bola tiene un comportamiento no lineal e inestable. Está compuesto por una bola rígida que rueda sobre una base, también se utiliza una pantalla táctil resistiva de 5 hilos, y además funciona como sensor para obtener la posición de la bola, una estructura de soporte para la base y un pivote central para que pueda moverse en cualquier dirección y dos servomotores como elementos finales de control para determinar la inclinación de la plataforma en cada eje y poder controlar la posición deseada de la bola.

El sistema plato-bola tiene dos entradas y dos salidas, por tal razón es un sistema MIMO (múltiples entradas – múltiples salidas). Para este sistema se diseñan dos controladores un PID sintonizado por el método de Ziegler-Nichols y un control difuso PD+I de Takagi-Sugeno. Por otro lado, para la simulación e implementación de los controladores se utiliza el software computacional Simulink de MATLAB y para la adquisición de datos entre el sistema plato-bola y el software computacional se utiliza una tarjeta embebida Arduino.

Es importante mencionar, que se realiza el control del sistema plato-bola en una posición determinada o para el seguimiento de trayectorias (cuadrado, círculo y lemniscata). Asimismo, para determinar el desempeño del controlador PID clásico Y control difuso PD+I de Takagi-Sugeno se realiza la comparación mediante el índice cuadrático del error (ISE) y especificaciones de desempeño en la respuesta transitoria (máximo sobrepico (MP) y tiempo de establecimiento (ts)).

Finalmente, en este trabajo se presenta una interfaz gráfica (APP DESIGNER) que proporciona gráficos visuales y valores de las diferentes variables del sistema.

PALABRAS CLAVE: Lógica difusa, ISE, pantalla táctil resistiva, plato-bola, Takagi-Sugeno, Ziegler-Nichols.

ABSTRACT

The Plato-Ball system has a non-linear and unstable behavior. It is composed of a rigid ball that rolls on a base, a 5-wire resistive TouchScreen is also used, and it also functions as a sensor to obtain the position of the ball, a support structure for the base and a central pivot so that it can move. in any direction and two servomotors as final control elements to determine the inclination of the platform in each axis and to be able to control the desired position of the ball.

The Plato-bola system has two inputs and two outputs, for this reason it is a MIMO system (multiple inputs - multiple outputs). Two controllers are designed for this system, a PID tuned by the Ziegler-Nichols method and a PD + I fuzzy control by Takagi-Sugeno. On the other hand, for the simulation and implementation of the controllers, Matlab's Simulink computer software is used, and an Arduino embedded card is used for data acquisition between the Plato-ball system and the computer software.

It is important to mention that the control of the Plato-Ball system is carried out in a certain position or for the tracking of trajectories (square, circle and lemniscata). Likewise, to determine the performance of the classic PID controller AND PD + I fuzzy control from Takagi-Sugeno, the comparison is made using the quadratic error index (ISE) and performance specifications in the transient response (maximum overshoot (MP) and response time). establishment (ts)).

Finally, in this work a graphical interface (APP DESIGNER) is presented that provides visual graphs and values of the different variables of the system.

KEY WORDS: Fuzzy Logic, ISE, Touch-Screen, Plate-Ball, Takagi-Sugeno, Ziegler-Nichols.

1. INTRODUCCIÓN

En el área de la ingeniería electrónica, la mayoría de los sistemas con los que se trabaja tienen un comportamiento no lineal y se los conoce como sistemas inestables. Dentro de estos, por sus características se encuentra el sistema plato-bola, que lo convierte en tema de investigación para su respectivo análisis e implementación de diferentes métodos de controladores en el área de la ingeniería.

El punto de partida en el análisis de un sistema de control es su representación por un modelo matemático, generalmente como un operador entre entradas y salidas del sistema, o como un conjunto de ecuaciones en diferencias y/o diferenciales. La mayoría de los modelos matemáticos usados tradicionalmente por teóricos y prácticos del control son lineales [1].

Por tanto, para su estudio se requiere obtener el modelo matemático del sistema plato-bola, con el cual se puede comprobar la respuesta dinámica del sistema al estar en lazo abierto. Asimismo, a partir del modelo matemático se podrá realizar el diseño de controladores clásicos.

El Sistema es un dispositivo electromecánico que resulta novedoso para los estudiantes de control dada su complejidad, permite el estudio teórico y práctico para implementar diferentes técnicas de control. El proyecto se centra en un sistema inestable, siendo este muy común en la industria, el proceso para desarrollar un controlador que estabilice el sistema se basa en el modelado de la planta [1].

La teoría del control clásico se centra muy poco en los sistemas múltiples entradas y múltiples salidas debido a que pierde su potencial [1]. El control inteligente comprende una serie de técnicas extraídas de la inteligencia artificial con las que se pretende resolver problemas control con mayor facilidad en comparación a los métodos clásicos [2].

El sistema plato-bola tiene 2 grados de libertad, consiste en un plato donde se desplaza una bola, para permitir la inclinación del plato se tiene un eje central como pivote [3]. Como actuadores tiene 2 servomotores; conectados al plato mediante extensiones fijadas en sus ejes [4]. Además, presenta una tarjeta embebida Arduino para la adquisición de datos y comunicación entre el software computacional y el sistema.

La construcción y diseño de un prototipo del Sistema plato-bola está orientado como material de investigación por las características del hardware, ya que permite incorporar algunos tipos de controlador para los estudiantes y profesionales de Ingeniería Electrónica,

además de aportar a quien se interese el tema planteado, facilitando información referente al proyecto de investigación.

Tomando en consideración lo expuesto anteriormente, se propone diseñar e implementar un esquema PID utilizando el método de sintonización de Ziegler-Nichols y un esquema de control difuso PD+I Takagi-Sugeno para el sistema plato-bola.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es: diseñar e implementar esquemas PID clásicos y control difuso PD+I Takagi-Sugeno aplicados al sistema multivariable plato-bola.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una recopilación bibliográfica de los sistemas Plato-bola y de la sintonización de controladores PID por Ziegler-Nichols y controladores difusos Takagi-Sugeno
- Diseñar y sintonizar el control PID y el control PD+I de lógica difusa basado en Takagi-Sugeno para el sistema Plato-bola utilizando el Software computacional Simulink de Matlab.
- Implementar el sistema Plato-bola con los controladores PID y PD+I lógica difusa basado en Takagi-Sugeno
- Desarrollar una interfaz gráfica para visualizar y analizar los resultados obtenidos de los controladores PID y controlador PD+I de lógica difusa Takagi-Sugeno en el sistema Plato-Bola
- Comprobar el desempeño de los controladores PID y PD+I lógica difusa basado en Takagi-Sugeno en el sistema Plato-bola utilizando el índice cuadrático integral (ISE).

1.2 ALCANCE

- Se realizará una recopilación bibliográfica sobre el funcionamiento, características dinámicas y modelado del sistema el sistema Plato-Bola, funcionamiento del sensor TouchScreen resistivo de 5 hilos, sintonización de Ziegler-Nichols para controladores PID clásico y sintonización de lógica difusa basado en Takagi-Sugeno.

- Se estudiará el modelado matemático del sistema Plato-Bola, su aproximación lineal, respuesta transitoria de la planta y validación utilizando el Software computacional Simulink de Matlab.
- Se diseñará y simularán el esquema de control PID y esquema de control difuso PD+ para pruebas como: seguimiento de trayectorias (cuadrado, circulo, lemniscata) y estabilización en un punto determinado con el fin de comprobar el rendimiento de cada controlador.
- Se comprobará el rendimiento de la simulación del esquema de control PID y el esquema de control difuso PD+I Takagi-Suggeno utilizando el modelo lineal del sistema Plato-Bola para pruebas de seguimiento de trayectorias (cuadrado, circulo, lemniscata) y estabilización en un punto determinado tomando en cuenta el índice ISE.
- Se programará la adquisición de datos y la comunicación serial en una tarjeta embebida Arduino, que será utilizada como medio de comunicación entre el sistema Plato-Bola y el Software computacional Simulink de Matlab.
- Se implementará el esquema de control PID y el esquema de control difuso PD+I basado en Takagi-Suggeno en el Software computacional Simulink de Matlab que será enlazado mediante una tarjeta embebida con el sistema físico Plato-Bola para realizar el control de posición y seguimiento de trayectoria (cuadrado, circulo, lemniscata) de la esfera.
- Se comprobará el rendimiento del esquema de control PID y el esquema de control difuso PD+I Takagi-Suggeno implementado al módulo físico Plato-Bola, tomando en cuenta el índice ISE.
- Se desarrollará una interfaz gráfica utilizando el software de Matlab el cual permitirá observar las respuestas de las variables a controlar del sistema Plato-Bola, las respectivas señales de los controladores y el índice cuadrático integral (ISE).

1.3 MARCO TEÓRICO

Al aplicar los conocimientos de control sobre diferentes sistemas no lineales se puede realizar la comparación entre la eficiencia de los controladores, el sistema de tabla-bola es muy popular en el ámbito educativo ya que permite el análisis de los resultados, donde se observa los controles que obtienen mejor desempeño estabilizando el sistema.

El estudio, la simulación e implementación del sistema Plato-bola permite el diseño de leyes de control para que los servomotores generen movimiento al plato, el cual mueve la bola llevándola desde la posición real hasta la posición deseada. Se estudia los temas relevantes del sistema plato-bola y esquemas de control para desarrollar el modelado, sintonización, pruebas e implementación.

1.3.1 SISTEMA PLATO-BOLA

El prototipo plato-bola tiene la característica de un sistema electromecánico de dos dimensiones, el cual es un desarrollo del prototipo clásico de la teoría de control llamado "bola en viga". La estructura del sistema consiste en una placa rectangular con movilidad en todos sus ejes, sujeta por un pivote en su centro. Su inclinación puede ser manipulada en dos direcciones perpendiculares. El problema consiste en llevar a una posición deseada y mantener la bola que rueda libremente sobre la tabla, o mover la bola realizando el seguimiento de alguna trayectoria definida [24].

El sistema plato-bola es un sistema de control compuesto de entradas y salidas las cuales se comandan para producir una respuesta dinámica deseada. Este sistema es una variación del tradicional sistema Barra-Bola, debido a que tienen por objetivo el control de la posición de la bola sobre una superficie plana, su funcionamiento se diferencia en el número de ejes de control, el sistema sobre la barra maneja el eje "X" y en el sistema de la tabla maneja los ejes "X" y "Y".

Este sistema es completamente no lineal en lazo abierto, con una pequeña inclinación en cualquiera de sus ejes para que la bola tienda a desplazarse sin control bajo la influencia de la gravedad [7], convirtiéndole en un sistema MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas). Por otro lado, el sistema plato-bola es un sistema con cuatro grados de libertad [8].

El sistema plato-bola tiene dos grados de libertad y debido a sus características altamente no lineales de la planta se implementa un diseño de un controlador PID con el fin de estabilizar la bola en la plataforma y adicionalmente realizar el seguimiento de caminos de una bola [9].

Existen dos problemas de control: la estabilización de puntos y el seguimiento de trayectorias. En el primer caso, la finalidad es llevar la bola a una posición específica y mantenerla allí. En el control de seguimiento de trayectoria, el objetivo es hacer que la pelota siga una trayectoria predefinida.

Se ha implementado diversos tipos de sistemas plato-bola que presentan diferentes características y problemáticas dependiendo de la arquitectura, del tipo de sensor y el tipo de actuadores.

Los actuadores existen de diversos tipos dependiendo de su estructura de funcionamiento, fuente de alimentación entre otras características mecánicas y eléctricas propias de cada dispositivo, así pues, podemos encontrar dispositivos electromecánicos, electroneumáticos, neumáticos entre otros, encargados de mover o manipular la estructura mecánica.

El tipo de actuadores que requiere el sistema para el movimiento del plato en los ejes X e Y dependen de la construcción y forma de la estructura física, al mismo tiempo la capacidad de levantar el plato y la bola [24]. Por tanto, pueden utilizarse actuadores por levitación magnética a base de inductores Thomson [21], motores de inducción, motores DC o servomotores.

En el sistema plato-bola es necesario e importante el sistema de sensado ya que mediante este se determina la posición de la bola, por lo cual se debe seleccionar un sensor que cumpla con características de resolución, exactitud y tiempo de respuesta, debido que la posición de la bola cambia muy rápido y al ser un sistema lento de sensado el controlador no puede realizar su función de manera precisa.

En los diferentes sistemas plato-bola comerciales o prototipos, se ha utilizado diferentes dispositivos para el sensado como son: sistemas infrarrojos, pantallas táctil capacitivas, pantallas táctil resistivas y sistemas de visión artificial.

1.3.1.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PLATO-BOLA

El sistema plato-bola iniciará su operación del reposo, para lo que se ingresa una posición o trayectoria desde el ordenador, y este interactúa con el sistema a través del Software Simulink de MATLAB, a su vez, este envía la señal de salida al puerto de comunicación hacia la placa Arduino Uno, la cual es la encargada de la activación de los dos servomotores que representan los grados de libertad, para que la tabla inicialmente horizontal se incline a lo largo de cada uno de los ejes controlando la posición de pelota. El sensado del movimiento de la bola lo realiza con una pantalla táctil tipo resistiva conectado a las entradas de la placa Arduino Uno.

Al identificar los componentes del sistema se puede organizar en un diagrama de bloques de lazo cerrado como se muestra en la Figura 1.1.

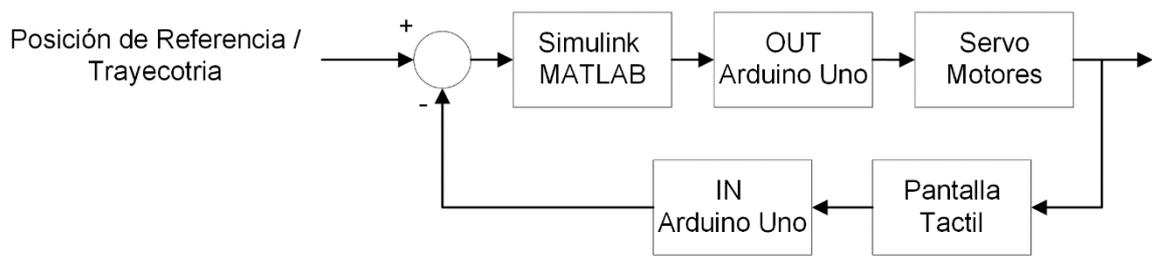


Figura 1.1. Diagrama de bloques del sistema plato-bola

El objetivo del sistema plato-bola es llevar la bola desde una posición real hasta la posición final deseada dentro del plato y estabilizarla o realizar el seguimiento de trayectorias geométricas, donde la posición de la bola es controlada por la inclinación del plato [9].

El sistema está formado por una placa o plato que es pivotada en su centro de tal forma que la pendiente del plato puede ser manipulada y varía en las dos direcciones perpendiculares del eje X y eje Y. Para manipular la inclinación del plato se utiliza dos motores y una tarjeta para ejecutar el control de cada motor. El sistema plato-bola se caracteriza por ser un sistema dinámico con dos señales de entradas y dos señales de salida como se muestra en la Figura 1.2. Las coordenadas de la bola sobre el plato pueden ser controladas de forma independiente ya que sus interacciones mutuas son insignificantes debido a la baja velocidad y velocidad de aceleración del movimiento de la bola. El sistema debe realizar un muestreo ya que tanto los actuadores como los sensores trabajan mediante una digital discreta.

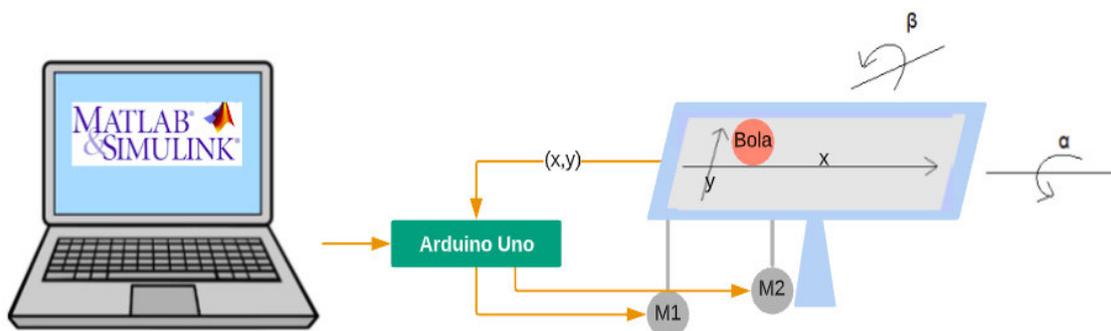


Figura 1.2. Diagrama Esquemático del sistema plato-bola

1.3.1.2 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SISTEMA PLATO-BOLA.

Conocer la dinámica del sistema es importante para obtener el modelo matemático y así poder validar y diseñar esquemas de control, por lo que se consideran las características físicas y mecánicas que influyen en el sistema.

El modelo mecánico del sistema plato-bola está compuesto por los ejes que producen la transmisión del movimiento hacia la tabla, al mismo tiempo son considerados como movimientos ideales; es decir sin pérdidas de fuerza y fricción entre los elementos que conforman el sistema como son ejes y engranajes, además se considera una masa despreciable de la plataforma.

En sistema plato-bola presenta dos fuerzas físicas importantes de considerar que son la energía cinética y energía potencial.

Energía cinética.

La energía cinética es la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo, la energía que posee un cuerpo debido a su movimiento [11].

En el sistema plato-bola se identifica la energía cinética de la bola cuando se desplaza por la tabla y la energía cinética de la bola producto a la rotación del plato. Por lo tanto, la energía cinética del sistema es la suma de las energías identificadas:

$$E_{CSIS} = E_{CBOLA} + E_{CBOLA-PLATO} \quad (1.1)$$

Donde, E_{CSIS} es la energía cinética del sistema, E_{CBOLA} es la energía cinética de la bola y $E_{CBOLA-PLATO}$ es la energía cinética de la bola sobre el plato.

La energía cinética de la bola es igual a la energía cinética de traslación más la energía cinética de rotación; la energía cinética de traslación es debido al movimiento de la bola de masa m a una velocidad lineal v y su energía cinética de rotación.

$$E_{CBOLA} = E_{CBtraslacion} + E_{CBrotacion} \quad (1.2)$$

Donde, $E_{CBtraslacion}$ es la energía cinética de traslación de la bola y $E_{CBrotacion}$ es la energía cinética de rotación de la bola.

Igualmente, la energía cinética de la bola sobre el plato realiza movimiento de rotación y traslación cuando la tabla genera el movimiento de un ángulo definido.

$$E_{CBOLA-PLATO} = E_{CBPtraslacion} + E_{CBProtacion} \quad (1.3)$$

Donde, $E_{CBPtraslacion}$ es la energía cinética de traslación de la bola sobre el plato y $E_{CBProtacion}$ es la energía cinética de rotación de la bola sobre el plato.

Energía potencial.

Es la energía que posee un objeto debido al campo gravitacional, el objeto al caer una distancia vertical h , puede realizar un trabajo de magnitud mgh [11].

$$E_{pSISTEMA} = m_Bgh \quad (1.4)$$

Donde, $E_{pSISTEMA}$ es la energía potencia del sistema, m_B la masa de la bola, g la gravedad y h la altura.

1.3.1.3 MODELADO DEL SISTEMA PLATO-BOLA

Unos de los primeros pasos es el desarrollo del modelado matemático del proceso para poder comprender, identificar y tener claro los problemas que presentan la planta. Una de las formas es identificando los principios físicos que influyen en el proceso o llevando a cabo una identificación del comportamiento de un sistema real con los datos que producen.

El desarrollo del modelo matemático tiene que ser lo más preciso posible, ya que será utilizado en la simulación para el desarrollo y evaluación de sistema de control. El modelo matemático no puede representar toda la dinámica de un proceso físico

Cuando al sistema plato-bola se encuentra en lazo abierto y es aplicado una inclinación sobre el plato en cualquiera de sus ejes provoca el desplazamiento indefinido de la posición de la bola. Por lo tanto, es necesario trabajar al sistema en lazo cerrado y aplicar un sistema de control que tenga la capacidad de mantener la bola en la posición deseada, controlar el

movimiento de la bola y llevar al sistema a la estabilidad ante cualquier perturbación o señal que pueda provocar un desplazamiento sobre la bola.

El sistema plato-bola consiste en una plataforma construida con actuadores que son los encargados de variar la inclinación del plato y de la misma manera el desplazamiento de la bola que rodara sobre este, el actuador ejerce movimiento angular hacia el plato.

Las características físicas del sistema plato-bola varía de acuerdo con su estructura y ubicación de los actuadores y sensores. Los actuadores son los elementos que varían la inclinación del plato y pueden estar acoplados directamente a la plataforma o de forma indirecta mediante el uso de extensiones, engranajes o pivotes. La señal de los sensores son los que nos indicaran la posición en la que se encuentra la bola sobre el plato, estos elementos pueden ser una pantalla táctil, cámara de video, sensores infrarrojos u otros.

El modelo matemático representa la característica dinámica de un sistema y además es importante para poder validar el funcionamiento, características y diseño de esquemas de control de un sistema en simulación, para llevar estos valores a la implementación de una planta real.

Para obtener el modelo del sistema se parte de la ecuación de Lagrange como se muestra en la Ecuación 1.5.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial W_K}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial W_K}{\partial q_i} + \frac{\partial W_P}{\partial q_i} = F_i \quad (1.5)$$

El sistema tiene cuatro grados de libertad, los cuales son considerados: dos en el movimiento que tendrá la bola y dos en la inclinación del plato para variar el movimiento de la bola. Las dos coordenadas de la bola con respecto a la placa son denominadas como "x" e "y" y la inclinación de la Pantalla táctil será considerada como α y β . Los ángulos de inclinación de la pantalla táctil son causados por dos pares de torsión, M_α y M_β , todos estos generan el movimiento de la **Figura** . [12].

Al realizar la derivación de la Ecuación 1.5 de Euler-Lagrange se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, las cuales describen la dinámica del sistema, la cual se observa en las Ecuación 1.6 y Ecuación 1.7.

$$\left(m + \frac{J_K}{r_k^2}\right) \ddot{x} - m(\dot{\alpha}\dot{\beta}y + \dot{\alpha}^2x) + mg \sin \alpha = 0 \quad (1.6)$$

$$\left(m + \frac{J_K}{r_k^2}\right) \ddot{y} - m(\dot{\alpha}\dot{\beta}y + \dot{\beta}^2x) + mg \sin \beta = 0 \quad (1.7)$$

Para la simplificación de la Ecuación 1.6 y 1.7 se debe considerar:

- La bola nunca pierde el contacto con la pantalla táctil (tabla).
- Un deslizamiento nulo entre la bola y la pantalla táctil (tabla).
- La fuerza de fricción y el momento de rotación son despreciables
- El movimiento de la pantalla táctil (tabla) generado por los motores es ideal
- Al ser motores de poca potencia la fuerza centrífuga se puede despreciar.
- La posición inicial del sistema es con la pantalla táctil horizontal.
- Los ángulos α y β son 0°

Todo el procedimiento matemático realizado para el modelado del sistema se especifica iniciando y tomando como punto de partida se tiene la ecuación de Lagrange que describe el comportamiento físico de las partículas en base a la mecánica Newtoniana. Adicionalmente se realizan aproximaciones matemáticas de ciertos efectos físicos del sistema y su entorno, las cuales permiten la simplificación de dichas ecuaciones.

El denominado Lagrangeano relaciona las energías cinética y potencial como se muestra en la Ecuación 1.8 [6]:

$$L(t) = Ec(t) - Ep(t) \quad (1.8)$$

Donde,

$L(t)$ es el Lagrangeano en función del tiempo.

$Ec(t)$ es energía cinética en función del tiempo.

$Ep(t)$ es energía potencial en función del tiempo.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (1.9)$$

Para determinar la energía cinética de la bola se suma la energía cinética de rotación y la energía cinética de traslación.

$$E_C = E_{CR} + E_{CT}$$

$$E_C = \frac{1}{2}I_R\omega_b^2 + \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{1}{2}I_T\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{s}^2$$

Donde:

I_R es el momento de inercia de rotación de la bola.

ω_b es la velocidad angular de rotación de la bola.

m es la masa de la bola.

r es la posición de rotación de la bola.

I_T es el momento de inercia de traslación de la bola.

θ es la posición angular de traslación de la bola.

s es la posición de traslación de la bola.

Luego, la velocidad angular de rotación de la bola reemplazamos en función de la velocidad y el radio de la bola.

$$E_C = \frac{1}{2}I_R \left(\frac{\dot{r}}{R}\right)^2 + \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{1}{2}I_T\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{s}^2$$

Donde, R es el radio de la bola

Así pues, descomponiendo a las posiciones de rotación y traslación en sus coordenadas rectangulares x e y :

$$E_C = \frac{1}{2}I_R \left(\left(\frac{\dot{x}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{R}\right)^2 \right) + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2}I_T(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2}m(x\dot{\alpha} + y\dot{\beta})^2 \quad (1.10)$$

Además, utilizando la Ecuación 1.4 de la energía potencial y reemplazando la altura en función de del ángulo que describe la tabla como muestra la Ecuación 1.11, se determina la energía potencia del sistema.

$$E_P = -m_bgh$$

$$E_P = -mg(x \sin \alpha + y \sin \beta) \quad (1.11)$$

Reemplazando las ecuaciones en el Lagrangeano:

$$L_{(t)} = \frac{1}{2} \left(m + \frac{I_R}{R^2} \right) (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I_T (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} m (x\dot{\alpha} + y\dot{\beta})^2 + mg(x \sin \alpha + y \sin \beta) \quad (1.12)$$

Ahora, se aplica la ecuación de Lagrange para cada una de las coordenadas de movimiento X e Y que describen la posición de la bola con respecto al plato.

Para el eje X:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = m x \dot{\alpha}^2 + m y \dot{\alpha} \dot{\beta} + m g \sin \alpha$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = m (x \dot{\alpha}^2 + y \dot{\alpha} \dot{\beta} + g \sin \alpha)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \left(m + \frac{I_R}{R^2} \right) \dot{x}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \left(m + \frac{I_R}{R^2} \right) \ddot{x}$$

$$\left(m + \frac{I_R}{R^2} \right) \ddot{x} - m (x \dot{\alpha}^2 + y \dot{\alpha} \dot{\beta} + g \sin \alpha) = 0 \quad (1.13)$$

Despejando la variable \ddot{x} y reemplazando el valor de I_R :

$$\ddot{x} = \frac{m (x \dot{\alpha}^2 + y \dot{\alpha} \dot{\beta} + g \sin \alpha)}{\left(m + \frac{I_R}{R^2} \right)}$$

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

$$\ddot{x} = \frac{5}{7} (x \dot{\alpha}^2 + y \dot{\alpha} \dot{\beta} + g \sin \alpha) \quad (1.14)$$

Para el eje Y

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial L}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial y} = mx\dot{\alpha}\dot{\beta} + my\dot{\beta}^2 + mg \sin \beta$$

$$\frac{\partial L}{\partial y} = m(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta} + g \sin \beta)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} = \left(m + \frac{I_R}{R^2}\right) \dot{y}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} = \left(m + \frac{I_R}{R^2}\right) \ddot{y}$$

$$\left(m + \frac{I_R}{R^2}\right) \ddot{y} - m(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta} + g \sin \beta) = 0 \quad (1.15)$$

$$\ddot{y} = \frac{m(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta} + g \sin \beta)}{\left(m + \frac{I_R}{R^2}\right)}$$

$$\ddot{y} = \frac{m(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta} + g \sin \beta)}{\left(m + \frac{\frac{2}{5}mR^2}{R^2}\right)}$$

$$\ddot{y} = \frac{5}{7}(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta} + g \sin \beta) \quad (1.16)$$

Debido a que la inclinación para el eje del sistema plato-bola tiene un máximo de 8 grados se tiene que $\dot{\alpha}E = 0$

$$\therefore \ddot{x} = \frac{5}{7}g \sin \alpha \quad (1.17)$$

$$\therefore \ddot{y} = \frac{5}{7}g \sin \beta \quad (1.18)$$

La Ecuación 1.17 y Ecuación 1.18 son no lineales y dependientes de la función trigonométrica de su ángulo de inclinación.

1.3.2 PANTALLA TÁCTIL RESISTIVA.

Una pantalla táctil es una lámina resistiva transparente compuesta por varias laminas de vidrio y en su interior una capa delgada de material conductor que puede detectar una presión dentro de una superficie determinada, esta presión puede estar dada por la mano o por un lápiz óptico [10].

Es una pantalla que mediante un contacto directo sobre su superficie permite el ingreso de datos y señales al sistema o dispositivo que se encuentra conectado. A su vez, actúa como periférico de salida, mostrando los resultados introducidos o generados previamente en un sistema. Así pues, la pantalla táctil puede actuar como periférico de entrada y salida de datos [11].

El dispositivo al actuar como periférico de entrada, en donde, la acción ocurrida en su superficie se transfiere a un GLCD (Graphical Led Display). Se tiene una gran diversidad de aplicaciones para este tipo de dispositivos, sin embargo, se utiliza frecuentemente en celulares y computadoras.

Las pantallas táctiles se han popularizado desde la invención de la interfaz electrónica táctil en 1971. Han llegado a ser utilizadas en diseños de bajo costo debido a su construcción simple, y el hardware y software necesarios para su funcionamiento se encuentran disponibles a través de varios fabricantes. Además, es un dispositivo que casi siempre requiere un algoritmo de calibración antes de ser utilizado.

Una pantalla táctil resistiva se encuentra construida por varias capas. Las más importantes se encuentran en su interior y son dos finas capas de material conductor entre las cuales hay una pequeña separación nominal entre las superficies conductoras. Cuando algún objeto presiona la superficie de la capa exterior, las dos capas conductoras entran en contacto en un punto concreto. De esta manera, se produce un cambio del potencial de voltaje que permite a un controlador calcular la posición del punto en el que se ha ejercido presión. Ciertas pantallas pueden medir aparte de las coordenadas del contacto, la presión que se ha ejercido sobre la misma.

Para realizar el control sobre las pantallas táctiles se activa aplicando una fuente de voltaje en cada uno de los extremos de las capas conductoras. El controlador o un dispositivo A/D traduce la lectura de voltaje en coordenadas del punto donde se presiona la pantalla de acuerdo con la calibración de cada usuario

Las pantallas táctiles resistivas son por norma general más asequibles, pero tienen una pérdida de aproximadamente el 25% del brillo debido a las múltiples capas necesarias y la

separación entre laminas conductivas determinan la sensibilidad de la pantalla. Otro inconveniente que tienen es que pueden ser dañadas por utilizar objetos punzantes o afilados. Por el contrario, no se ven afectadas por elementos externos como polvo o agua, razón por la que son el tipo de pantallas táctiles más usado en la actualidad.

Empleada en este proyecto de investigación, la pantalla táctil resistiva es la más usada, y por lo tanto la más utilizada debido a su robustez y confiabilidad en la aplicación que sea empleada. Se puede encontrar pantallas táctiles de 4, 5, 6, 7 y 8 hilos. La diferencia entre uno y otro varía de acuerdo con el tamaño de la pantalla táctil, puntos de sensibilidad y sobre todo la aplicación.

1.3.2.1 FUNCIONAMIENTO PANTALLA TÁCTIL

El funcionamiento de una pantalla táctil básicamente consta de un divisor de tensión (voltaje) de acuerdo con cuatro posiciones X, Y, -X, -Y, como se observa en la Figura 1.3.:

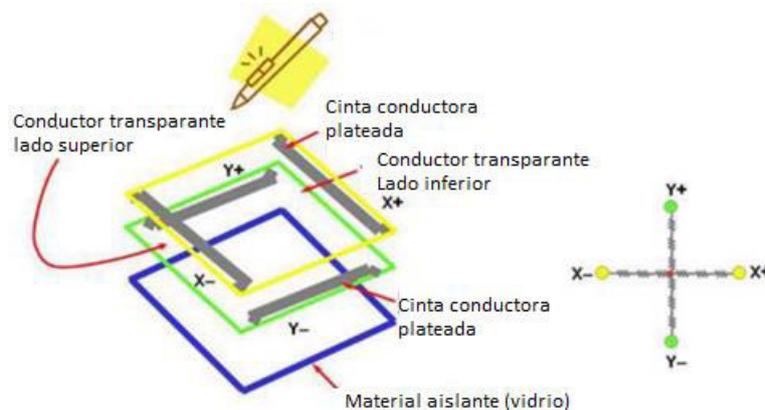


Figura 1.3. Estructura de una pantalla táctil. [11]

El diseño de una pantalla táctil se basa en tres capas:

- Capa X+Y+.
- Capa X-Y-.
- Capa de vidrio transparente

Las capas: X+Y+ y X-Y- son resistivas y su composición es un bañado de ITO (óxido de indio y estaño).

Los voltajes analógicos que en estas capas se generan son enviados hacia el microprocesador para ser procesados.

Por otro lado, la capa de vidrio transparente es únicamente de protección para las otras 2 capas y evita que estas se deterioren.

Los valores analógicos ingresan al microprocesador mediante pines que son configurados como entradas analógicas (depende de cada microprocesador) para su procesamiento y posterior aplicación.

Estos valores analógicos una vez convertidos en valores digitales son ya interpretados por el microprocesador y nos dan coordenadas X (capa X+Y+) y coordenada Y (capa X-Y-) para representar un punto en el GLCD o bien realizar la lectura de un valor previamente programado.

1.3.3 ESQUEMAS DE CONTROL

Los esquemas de control comparan el valor el valor real de salida de una planta con la entrada de referencia, determinando el error o desviación que produce una señal de control con el objetivo de reducir el error a cero [7].

El control convencional presenta diferentes métodos para el diseño de controladores en sistemas dinámicos, pero la mayoría de los métodos se enfocan en utilizar el modelo matemático del sistema para diseñar y tener un buen esquema de control.

1.3.3.1 CONTROL PID

Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID se encuentra compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID como se observa en la Figura 1.4 [12].

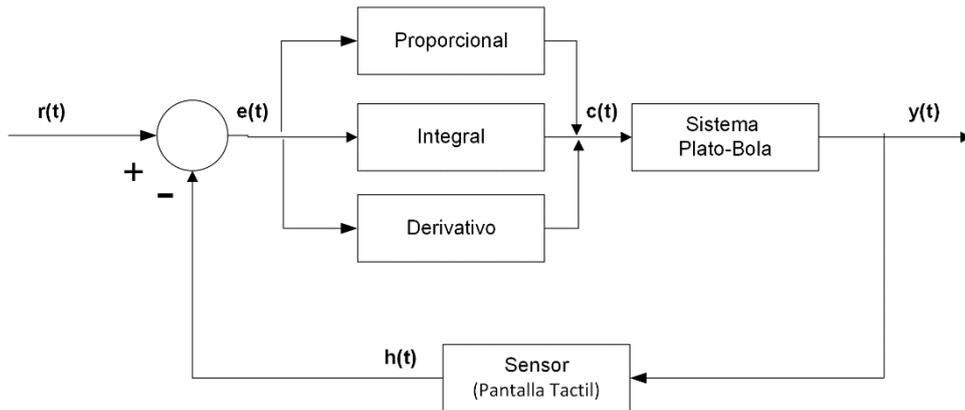


Figura 1.4. Diagrama de bloques del control PID

Es importante mencionar que se pueden aplicar unas reglas sencillas para sintonizar este controlador de forma manual.

Acción Proporcional

Se incrementa de a poco la acción proporcional para reducir el error (diferencia entre el estado deseado y el estado conseguido) y para aumentar la velocidad de respuesta.

Si se alcanza la respuesta deseada en velocidad y error, el PID ya está sintonizado.

Si, por otro lado, el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe incrementar la acción derivativa

Acción Derivativa

Si el sistema es muy inestable, se aumentará poco a poco la constante derivativa K_d para conseguir de nuevo estabilidad en la respuesta.

Acción Integral

En el caso de que el error en estado estacionario del sistema sea mayor que el deseado, se aumentará la constante integral K_i hasta que el error se minimice con la rapidez deseada.

Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

Con estas sencillas reglas es fácil afinar poco a poco el controlador PID hasta conseguir la respuesta deseada.

La ecuación del control PID es la siguiente:

$$C(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int e(t) dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.19)$$

Donde:

- $C(t)$ es la señal de control
- $e(t)$ es el error.
- k_p, k_i, k_d parámetros del controlador PID

Este controlador PID es ideal y da lugar a ciertos problemas de estabilidad, sensibilidad, excesivo ancho de banda en algunos casos, etc., y por ello es indispensable en varios casos modificarlo, suavizando sus efectos.

1.3.3.2 SINTONIZACIÓN DEL ESQUEMA PID POR ZIEGLER Y NICHOLS

Entre los métodos de sintonización de mayor empleo en la industria para procesos donde la identificación de parámetros es posible mediante pruebas, se encuentra el de Ziegler-Nichols. Este método se caracteriza por lograr una buena atenuación en las perturbaciones de carga y ruido, pero también, por un incremento en la magnitud de la sobre elongación y un tiempo de establecimiento largo, de tal modo, que a menudo los parámetros de sintonización obtenidos por dicho método deben ser ajustados con base en pruebas o a la experiencia de un experto.

El método de Ziegler-Nichols permite sintonizar un controlador PID de forma empírica, sin necesidad de conocer las ecuaciones de la planta o del sistema controlado. Estas reglas de ajusta propuestas por Ziegler y Nichols fueron publicadas en 1942 y desde entonces es uno de los métodos de sintonización más ampliamente difundido y utilizado. Los valores propuestos por este método intentan conseguir en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobrepulso máximo del 25%, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para gran parte de los sistemas [3].

El método de sintonización de reguladores PID de Ziegler-Nichols permite definir las ganancias proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto o a partir de la respuesta del sistema en lazo cerrado. Cada uno de los dos ensayos se ajusta mejor a un tipo de sistema.

1.3.3.3 CONTROL DE LÓGICA DIFUSA TAKAGI-SUGGENO

Actualmente, una de las áreas de aplicación más importantes de la Teoría de Conjuntos Difusos y de la Lógica Difusa la componen los Sistemas Basados en Reglas Difusas (SBRDs). Este tipo de sistemas constituyen una extensión de los Sistemas Basados en Reglas que hacen uso de la Lógica Clásica puesto que emplean reglas del tipo “SI-ENTONCES” (IF-THEN) en las que los antecedentes y consecuentes están compuestos por proposiciones difusas en lugar de proposiciones clásicas.

Los sistemas basados en Lógica Difusa son fáciles de diseñar, modificar y mantener. Pese a la pérdida de precisión, la reducción de tiempo de desarrollo y mantenimiento es muy relevante para su uso industrial.

Un diagrama de control de difuso está compuesto por los siguientes elementos como muestra en la Figura 1.5. Que será descrito a continuación cada uno de sus componentes.

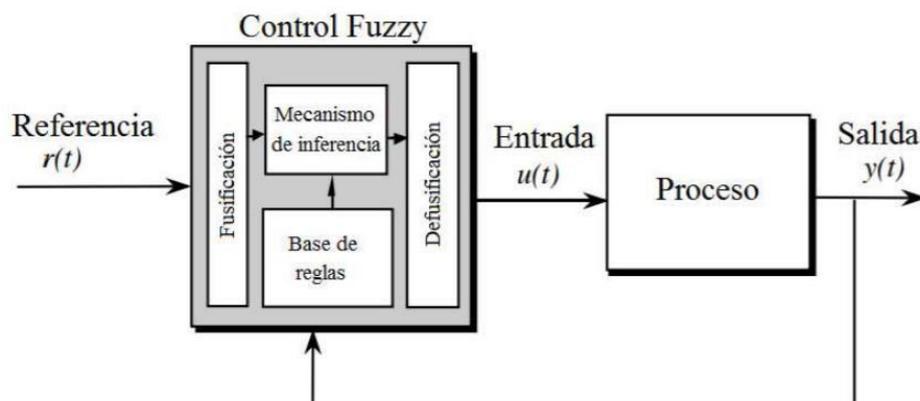


Figura 1.5. Diagrama de control difuso [22].

Reglas base

Contiene la cuantificación de reglas de como tener un buen funcionamiento de control a través de una descripción lingüística. Se basa en la lógica de SI-ENTONCES.

Una regla difusa es una expresión lingüística que refleja una causa y un efecto. Su calidad de difusa radica en el hecho de que emplea adjetivos imprecisos y relativos.

Si X pertenece a A, entonces Y pertenece a B. Donde X y Y, son elementos; y A y B, conjuntos difusos.

Mecanismo de interferencia

Emula la toma de decisiones del operador al aplicar e interpretar el conocimiento sobre el control de la planta, así entonces es cómo responderá el sistema ante cualquier evento que se presente.

Un sistema de inferencia difusa (SID) consta de, en primera instancia, una etapa de:

Fusificación

Realiza la interpretación de las entradas de control a lengua difuso que será utilizado para poder obtener el mecanismo de interferencia.

Posteriormente, se relacionan estas en un proceso de agregación, que no es más que la intersección y/o unión de dos o más conjuntos difusos mediante operadores llamados T-norma o T-conorma [14].

Defusificación

Es para obtener un valor concreto a la salida. En forma general, los sistemas de inferencia difusa son mapeadores universales no lineales que, sin embargo, requieren operaciones intermedias lineales.

En 1985, Takagi y Sugeno aportan a la teoría del control difuso un nuevo método llamado de Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa al método de Mamdani. Se trata de un método basado en reglas difusas, pero en el que el consecuente no nos da un conjunto difuso sino una serie de funciones lineales. Este modelo es útil para sistemas complejos y de dimensiones mayores que los que se puede resolver por el método de Mamdani.

El sistema Takagi-Suegno se trata de un SID que mejoró a Mamdani en cuanto a su menor procesamiento computacional. No considera funciones de membresía para la salida, sino combinaciones lineales concretas de los valores de entrada. La salida concreta es un promedio ponderado entre los resultados de las combinaciones lineales de salida y los valores arrojados por la T-norma [13] Figura 1.2.

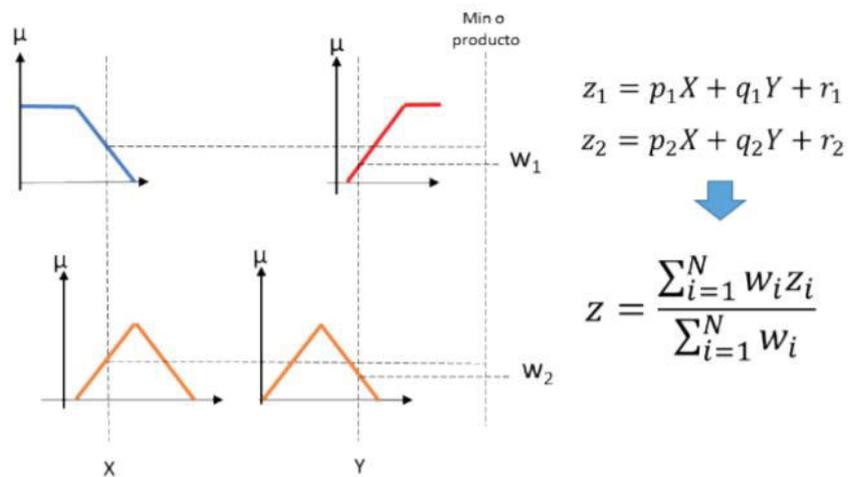


Figura 1.2. Sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno [22].

Sean A_i y B_i , con $i = 1, 2, \dots, n$, conjuntos difusos de nuestro sistema. Las reglas tendrían la siguiente forma:

R1: Si x es A_1 \wedge y es B_1 entonces $z = f_1(x,y)$

R2: Si x es A_2 \wedge y es B_2 entonces $z = f_2(x,y)$

Rn: Si x es A_n \wedge y es B_n entonces $z = f_n(x,y)$

La principal diferencia que presenta el método TSK respecto al de Mamdani es que no es indispensable realizar un proceso de defusificación. Esto se debe al hecho de que no se obtiene ningún conjunto difuso sino un conjunto de funciones lineales. Así, en el método TSK se puede obtener directamente el valor de salida de sistema con una expresión del tipo:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1.20)$$

Donde el valor w_i se obtiene calculando el mínimo de los valores de entrada en cada regla R_i (Figura 1.3)

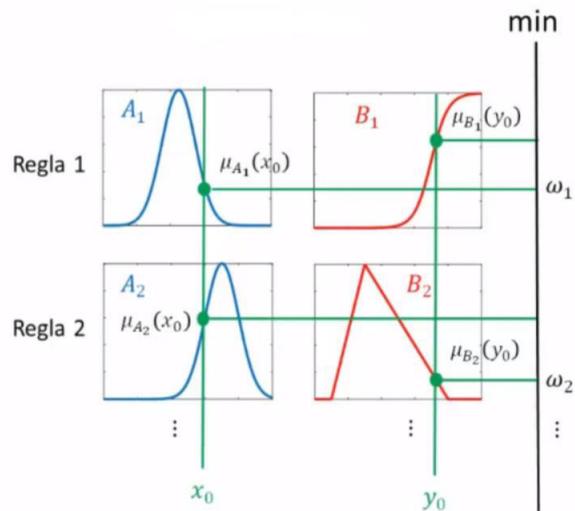


Figura 1.3. Cálculo de las componentes w_i [22].

El método de Takagi-Sugeno-Kang no necesita de muchas operaciones en el proceso inicial. Sin embargo, su uso es imposible en la práctica cuando no se puede trabajar con conjuntos de datos discretos para lograr el diseño de las funciones lineales. La elección del método depende, en consecuencia, del acceso a los datos.

1.3.3.4 SINTONIZACIÓN DE UN ESQUEMA DE CONTROL PD+I DIFUSO TAKAGI-SUGGENO

Para sintoniza el esquema de control difuso Takagi-Sugeno se aplica la transferencia de las ganancias del control PID ya antes diseñado. El esquema de control a su entrada tiene los términos del error, la derivada del error y el error integral, sin embargo, una descripción lingüística de las reglas bases se vuelve bastante numerosas y crear reglas en base a la acción integral causan problema en su ejecución por lo que, es común separa la acción integral como en esquema de control difuso PD+I [23], como se muestra en la Figura 1.8.

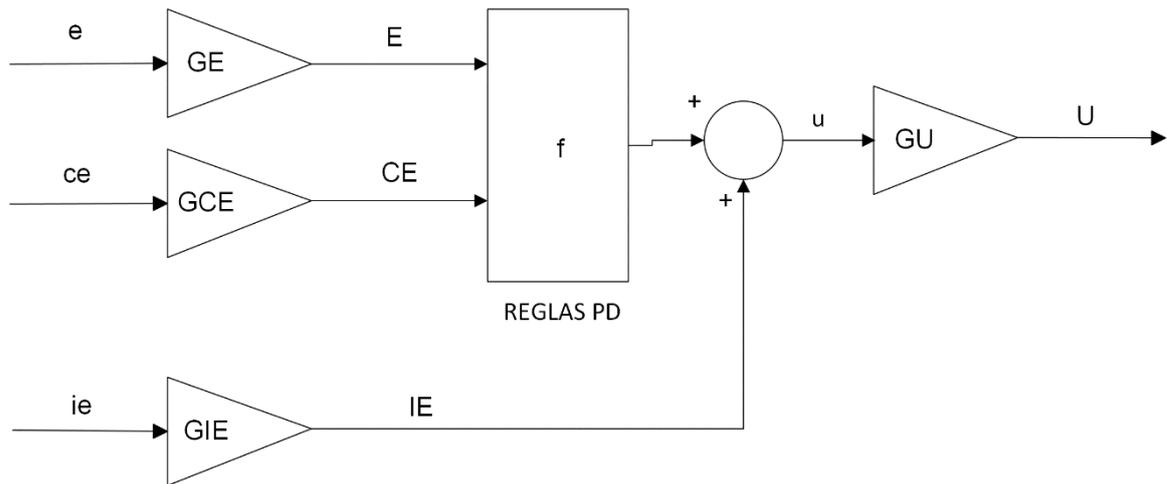


Figura 1.8. Esquema de control Fuzzy PD+I [23].

El esquema de control tiene una función de entradas y se representa con la ecuación:

$$U_n = [f(GE \times e_n, GCE \times ce_n) + GIE \times ie_n] \times GU \quad (1.21)$$

Realizando una aproximación lineal a las reglas de control se tiene:

$$U_n = [GE \times e_n + GCE \times ce_n + GIE \times ie_n] \times GU \quad (1.22)$$

$$U_n = GE \times GU \times \left(e_n + \frac{GCE}{GE} \times ce_n + \frac{GIE}{GE} \times ie_n \right)$$

La ganancia GE no debe valer cero, de tal manera comparando con la Ecuación 1.19 se tiene que:

$$GE \times GU = k_p \quad (1.23)$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d \quad (1.24)$$

$$\frac{GIE}{GE} = \frac{1}{T_I} \quad (1.25)$$

1.3.4 SISTEMA EMBEBIDO

Un sistema embebido es un sistema de computación diseñado para realizar funciones específicas, y cuyos componentes se encuentran integrados en una placa base. El procesamiento central del sistema se lleva a cabo gracias a un microcontrolador, es decir, un microprocesador que incluye además interfaces de entrada/salida, así como una memoria de tamaño reducido en el mismo chip.

Son diseñados para su empleo en tareas que impliquen una computación en tiempo real, pero también destacan otros casos como son Arduino y Raspberry Pi, cuyo propósito está más orientado al diseño y desarrollo de aplicaciones y prototipos con sistemas embebidos desde entornos gráficos [15].

El proceso tradicional para desarrollar código de sistemas de control embebidos se basa en el modelado y simulación del sistema y la posterior programación manual. A medida que aumenta la complejidad de los sistemas, este tipo de procedimiento consume más recursos y la probabilidad de errores de origen humano se hace más alta [16].

La interacción de los sistemas integrados con variables externas es el tema más importante para considerar, ya sean estímulos de entrada o salida del sistema. Es por eso, que algunas características que deben enfatizarse para lograr una interacción exitosa con el medio ambiente son la disponibilidad, la confiabilidad y la seguridad. Otras características de un sistema embebido son:

- El software que compone estos sistemas es responsable de controlar y comunicar los elementos de hardware al interior y al exterior del sistema integrado. Funciona jerárquicamente según el estado de sus componentes.
- Los resultados del cambio de estado de los componentes se proporcionan de acuerdo con el manejo de eventos, ya sean externos, precisamente de acciones externas al sistema o internamente directamente desde el software.
- En un sistema embebido hay recursos limitados, gracias al hecho de que factores como el tamaño, la energía, entre otros, deben optimizarse para garantizar la portabilidad del sistema embebido. Son sistemas que tienen un alto grado de autonomía.
- Los sistemas integrados tienen dos grandes características, sincronización y comunicación, que son las que permiten el flujo de información [18].

1.3.5 COMUNICACIÓN SERIAL

La comunicación serial es un protocolo de comunicación en donde se realiza la transmisión de datos bit a bit a través de un puerto, por el gran alcance que puede tener es una de las más utilizadas en el área de la automatización y control.

La comunicación serial en Arduino es asíncrona, es decir, que se puede realizar la transmisión por un canal y la recepción por el otro canal. Cada tarjeta Arduino tiene al menos un puerto serial, el cual consta de un punto de recepción Rx, un punto de transmisión Tx y la conexión a GND o referencia como se muestra en la Figura 1.9.

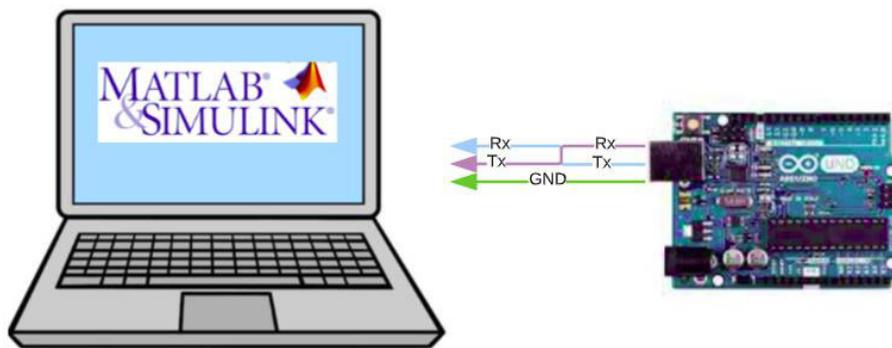


Figura 1.9. Comunicación serial con Arduino

Para que dos equipos puedan comunicarse entre sí por comunicación serial debe cumplir coincidir con los siguientes requerimientos:

- Velocidad de transmisión: debe coincidir la velocidad de transmisión entre los equipos (115200, 9600, 4800)
- Numero de bits de transmisión: conforman la palabra a transmitir
- Bit de parada de transmisión: indican el fin de la palabra o mensaje
- Bit de paridad de transmisión: puede ser de paridad par o impar; ayuda verificar el estado del mensaje recibido.

Estas configuraciones se deben realizar al inicializar el programa de control, de esta forma se logra establecer la comunicación entre todos los dispositivos del sistema.

1.3.6 SIMULINK DE MATLAB

Simulink es una de las herramientas más importantes en MATLAB, debido a que permite el diseño y simulación de diferentes sistemas y procesos. Permite sustituir la construcción de prototipos, reduciendo los costos del estudio.

Pueden operar MATLAB y Simulink con diferentes dispositivos externos gracias a su actualización en el software e implementación de diversos protocolos de comunicación. Se puede realizar la comunicación de esta herramienta gracias a los paquetes de soporte. Adicionalmente posee una opción de generar y descargar el código del sistema que se ha diseñado para ejecutarlo en Arduino.

Simulink de MATLAB ofrece herramientas para diferentes tipos de aplicaciones; de las cuales para el entorno de ingeniería se puede encontrar una de las siguientes opciones:

- Un entorno de diagramas de bloques multidominio para modelizar la dinámica de la planta, diseñar algoritmos de control y ejecutar simulaciones de lazo cerrado.
- Modelización de plantas mediante herramientas de modelización física o identificación del sistema.
- Funciones prediseñadas y herramientas interactivas para analizar el sobreimpulso, el tiempo de subida, el margen de fase, el margen de ganancia y otras características de rendimiento y estabilidad en los dominios de la frecuencia y el tiempo.
- Lugar de raíces, diagramas de Bode, LQR, LQG, control robusto, control predictivo de modelos y otras técnicas de diseño y análisis.
- Ajuste automático de sistemas de control PID, de ganancia programada y SISO/MIMO arbitrarios.
- Modelización, diseño y simulación de la lógica de supervisión para llevar a cabo la planificación, el cambio de modo y la detección, aislamiento y recuperación de errores [18].

Se puede realizar el procesamiento y acondicionamiento de señales de control, manejar lógica de estados entre otras rutinas avanzadas de matemáticas, ingeniería en todos los sistemas que posean una parte mecánica.

2. METODOLOGÍA

Para el presente proyecto se han considerado varias etapas; en primer lugar se tiene una fase teórica que consiste en la investigación, selección de documentos relacionados con la temática del proyecto y su análisis; la siguiente fase se centra en el diseño del sistema planta-controlador en base al modelado y consideraciones recopiladas previamente; a continuación una fase de simulación para verificar el correcto funcionamiento del modelo utilizando el software seleccionado, y finalmente la fase de validación en la que se realizan pruebas a la planta y su controlador para comparar los datos obtenidos en la simulación.

2.1 APROXIMACION LINEAL DEL MODELADO MATEMATICO

La aproximación lineal del modelo matemático permite una mejor evaluación y una manipulación aún más sencilla del sistema de control, para este sistema se parte de la ecuación no lineal obtenida en la Ecuación 1.17 y Ecuación 1.18:

$$y = f(x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x - x_0) \quad (2.1)$$

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}g \sin \alpha_0 + \frac{5}{7}g \cos \alpha_0 (\alpha - \alpha_0) \quad (2.2)$$

$$\ddot{y} = \frac{5}{7}g \sin \beta_0 + \frac{5}{7}g \cos \beta_0 (\beta - \beta_0) \quad (2.3)$$

Debido a que la posición inicial de la tabla es totalmente horizontal entonces:

$$\alpha_0 = \beta_0 = 0$$

Reemplazando para el eje X se tiene que:

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}g \sin(0) + \frac{5}{7}g \cos(0) (\alpha - 0)$$

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}g\alpha$$

$$\Delta\ddot{x} = \frac{5}{7}g\Delta\alpha$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$s^2 \Delta x = \frac{5}{7} g \Delta \alpha$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta \alpha} = \frac{5}{7} \frac{g}{s^2}$$

Reemplazando el valor de la gravedad y aproximando el resultado se obtiene:

$$\frac{\Delta x}{\Delta \alpha} = \frac{7}{s^2} \quad (2.4)$$

Reemplazando para el eje Y se tiene que

$$\ddot{y} = \frac{5}{7} g \sin(0) + \frac{5}{7} g \cos(0) (\beta - 0)$$

$$\ddot{y} = \frac{5}{7} g \beta$$

$$\Delta \ddot{y} = \frac{5}{7} g \Delta \beta$$

$$s^2 \Delta y = \frac{5}{7} g \Delta \beta$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta \beta} = \frac{5}{7} \frac{g}{s^2}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta \beta} = \frac{7}{s^2} \quad (2.5)$$

La Ecuación 2.4 y Ecuación 2.5 describen la relación entre la posición de la bola sobre el plato y el ángulo formado por el plato y la horizontal.

2.2 ESQUEMA DE CONTROL PID ZIEGLER-NICHOLS

Para realizar el diseño del controlador se utiliza el método Ziegler-Nichols que consiste en multiplicar por una ganancia k_c al modelo lineal de la planta en lazo cerrado, hasta obtener oscilaciones sostenidas lineales en la simulación y así poder determinar el periodo de la oscilación llamado tiempo crítico t_c [3].

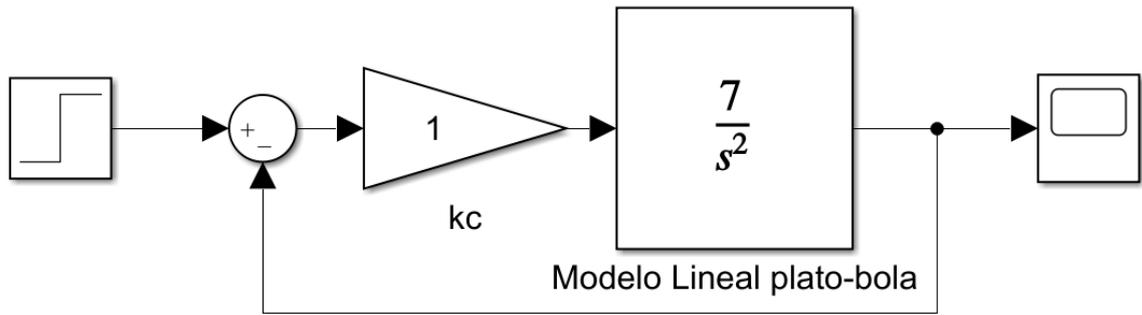


Figura 2.1. Diagrama en lazo cerrado del sistema Plato Bola

La respuesta a esta perturbación se observa en la Figura 2.2, presentando oscilaciones uniformes con los valores de ganancia y tiempo crítico definidos para el diseño del controlador.

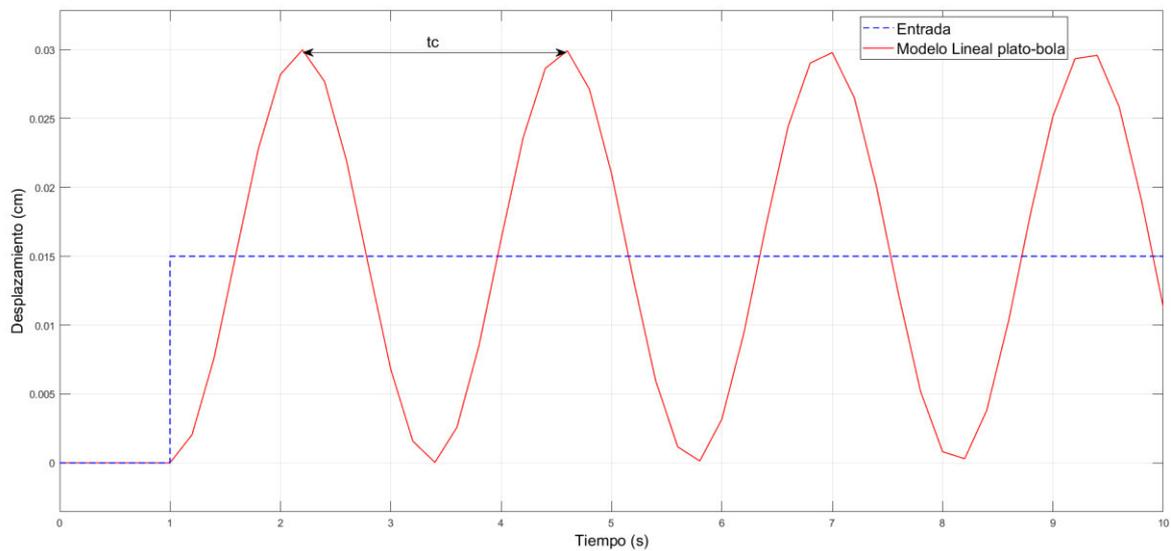


Figura 2.2. Respuesta del modelo lineal en lazo cerrado

Con los valores de $k_c = 1$ y $t_c = 2.382$ es posible calcular los parámetros de k_p, τ_d, τ_i de acuerdo con la Tabla 2.1 [3].

Tabla 2.1. Reglas de Ziegler-Nichols

	Fórmula	Resultado en la implementación
k_p	$0.6 \cdot k_c$	$0.6 \cdot 1 = 0.6$
τ_d	$t_c/8$	$2.3282/8 = 0.291$
τ_i	$t_c/2$	$2.3282/2 = 1.1641$

Analizando la ecuación obtenida para el sistema, ésta presenta dos polos en cero dentro del eje real, se plantea entonces que sería suficiente implementar un control PD con lo que la parte integral tomaría el valor de 0.

Tanto el eje X como el Y son independientes uno del otro, pero mantienen el mismo comportamiento, por lo que el controlador PD a implementar será el mismo para cada eje.

2.3 ESQUEMA DE CONTROL DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO

Para el diseño de un control difuso es importante tener una buena comprensión y conocimiento de la planta para poder especificar la serie de reglas complejas, que serán las encargadas de indicar como el controlador debe responder a la salida de la planta y las entradas de referencia.

El diseño de controladores difusos es aplicado para sistemas lineales como sistemas no lineales, mediante un conjunto de reglas de inferencia que describen el comportamiento del sistema.

El controlador difuso es diseñado utilizando el método lógico Takagi-Suggeno cuyas señales de entrada son el error (SET POINT menos la señal a la salida del sistema) y la derivada del error además de una parte integral para eliminar el error en estado estático. Este controlador difuso reduce la carga computacional en comparación a otros métodos de control clásico o difuso.

La implementación de este control difuso tiene como ventaja que no se requiere conocer el modelo matemático de la planta, utilizando las reglas o características que el operador posee como experiencia relacionada al funcionamiento de la planta.

El primer paso es determinar el rango de operación del error de nuestro sistema, sus características presentan rangos diferentes de error para el eje X y el eje Y determinados por las dimensiones físicas de la Pantalla táctil. Es importante tomar en cuenta los máximos sobre impulsos que presentan las señales para evitar la saturación del controlador difuso, se consideran los siguientes rangos:

$$e_x = [-0.08 ; 0.08]$$

$$e_y = [-0.1 ; 0.1]$$

La precisión del controlador depende de las funciones de membresía y reglas empleadas, por tanto, es importante escoger un universo amplio en la entrada, se extiende entonces el universo del error con un factor de 100:

$$E_x = [-8 ; 8]$$

$$E_y = [-10 ; 10]$$

El rango del universo de la derivada del error es el mismo que del error establecido, para el universo de salida se debe sumar los valores de los universos de entrada:

$$U_x = [-16 ; 16]$$

$$U_y = [-20 ; 20]$$

Para establecer las ganancias del controlador Takagi-Sugeno se emplean los resultados de k_p , t_d y t_i ya determinados en la sintonización del controlador PDI.

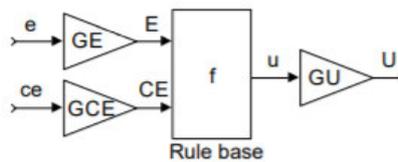


Figura 2.3. Controlador PD difuso Takagi-Sugeno.

Se utilizan la Ecuación 1.12, Ecuación 1.13 y Ecuación 1.14 para determinar las ganancias del controlador PD+I difuso Takagi-Sugeno que se muestra en la Figura 1.8.

Con el nuevo universo de la señal de entrada se determina que $GE=100$, y con este valor determinado se realiza el cálculo de las constantes GCE y GU necesarias para el control difuso.:

$$GU = \frac{K_p}{GE} = \frac{0.6}{100}$$

$$GCE = T_d * GE = 0.291 * 100$$

$$GIE = \frac{1}{T_i} * GE = \frac{1}{1.1641} * 100$$

Las funciones de membresía que se eligen para el control difuso son tipo trapezoidales denominadas negativo, positivo y cero, tanto para la entrada del error y la entrada de la derivada tanto para el eje X como para el eje Y como se muestran en la Figura 2.4, Figura 2.5, Figura 2.7 y Figura 2.8 En cambio, para la salida se determina cinco funciones constantes de membresía, denominadas positivo grande (posg), positivo pequeño (posp), cero, negativo pequeño (negp) y negativo grande (negg) como se muestra en la Figura 2.6 y Figura 2.9.

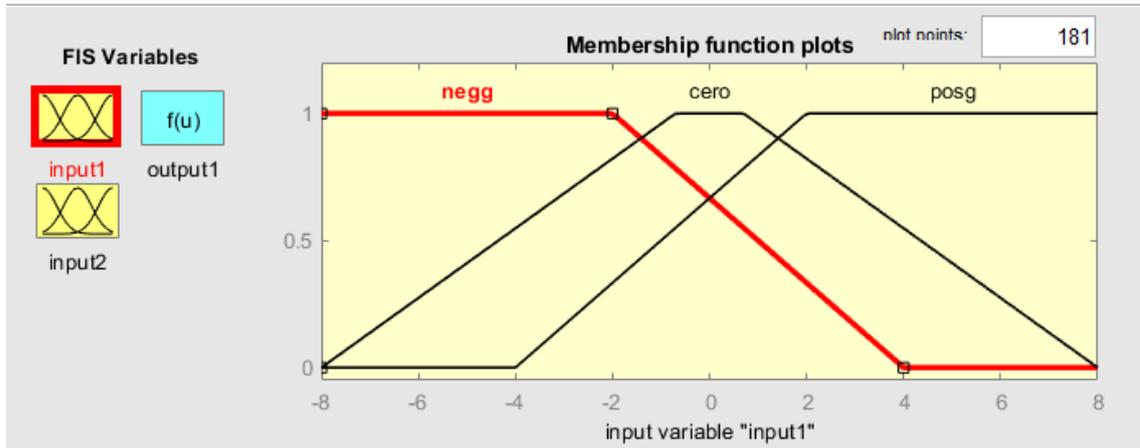


Figura 2.4. Funciones de membresía para la entrada error X.

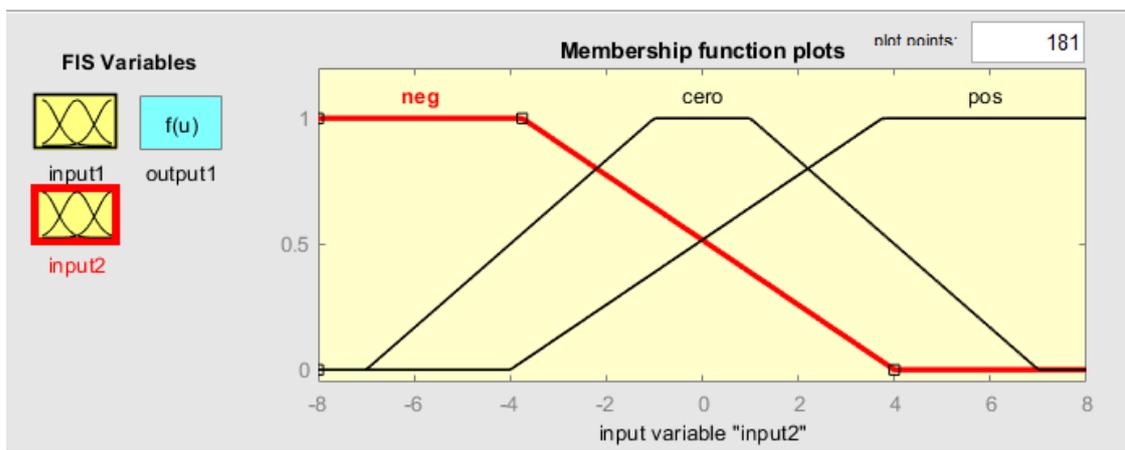


Figura 2.5. Funciones de membresía para la entrada derivada del error X.

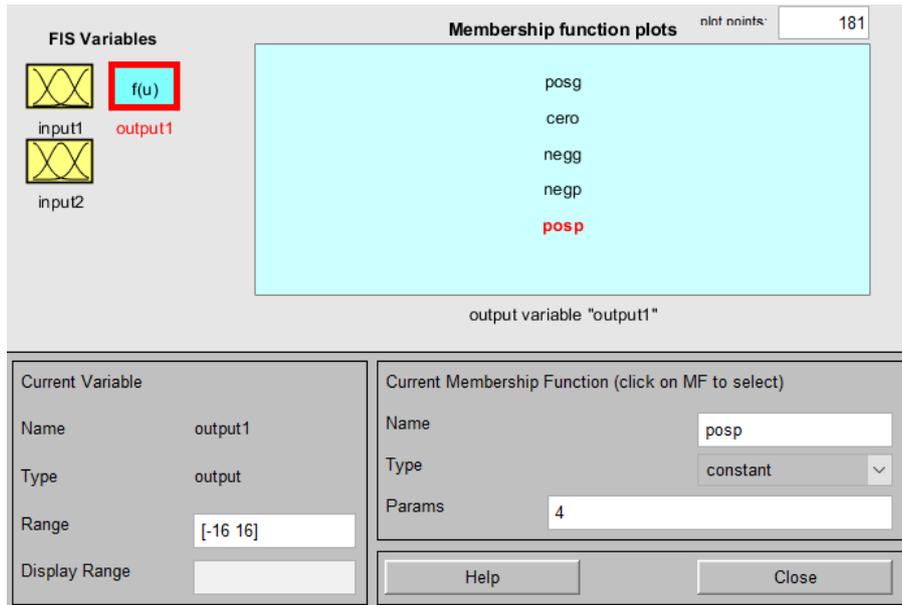


Figura 2.6. Funciones de membresía para la salida X.

Las funciones de membresía de salida para el eje X tienen los siguientes valores constantes:

- $\text{posg}=16$
- $\text{posp}=4$
- $\text{cero}=0$
- $\text{negp}=-4$
- $\text{negg}=-16$

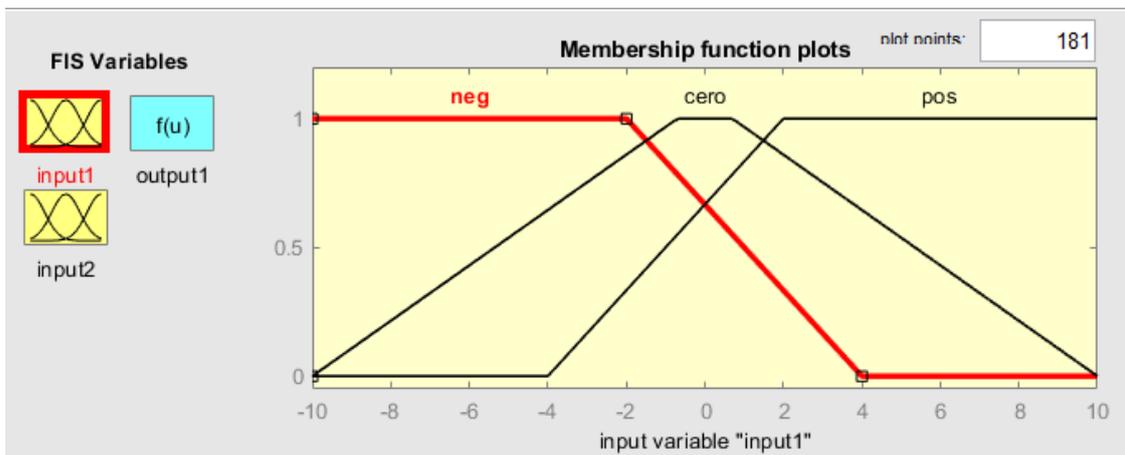


Figura 2.7. Funciones de membresía para la entrada error Y.

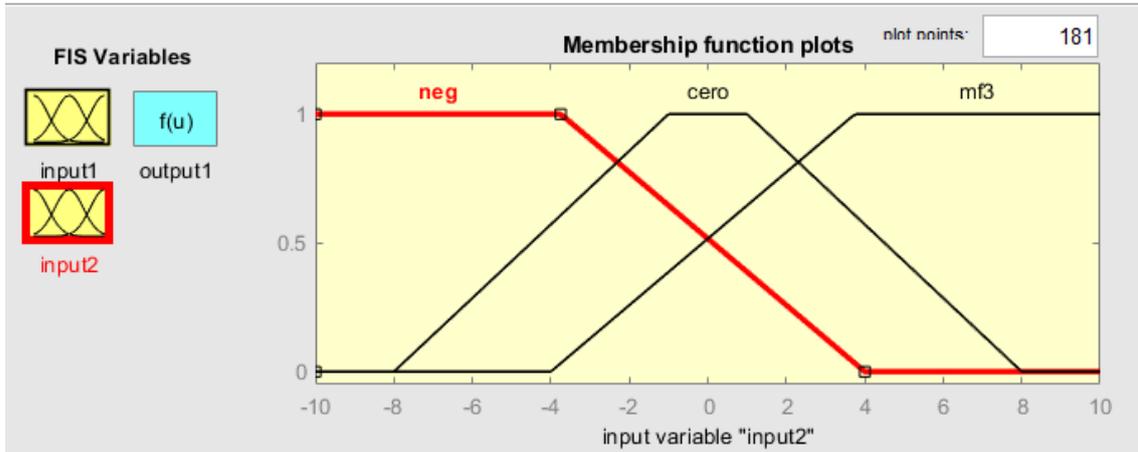


Figura 2.8. Funciones de membresía para la entrada derivada del error Y.

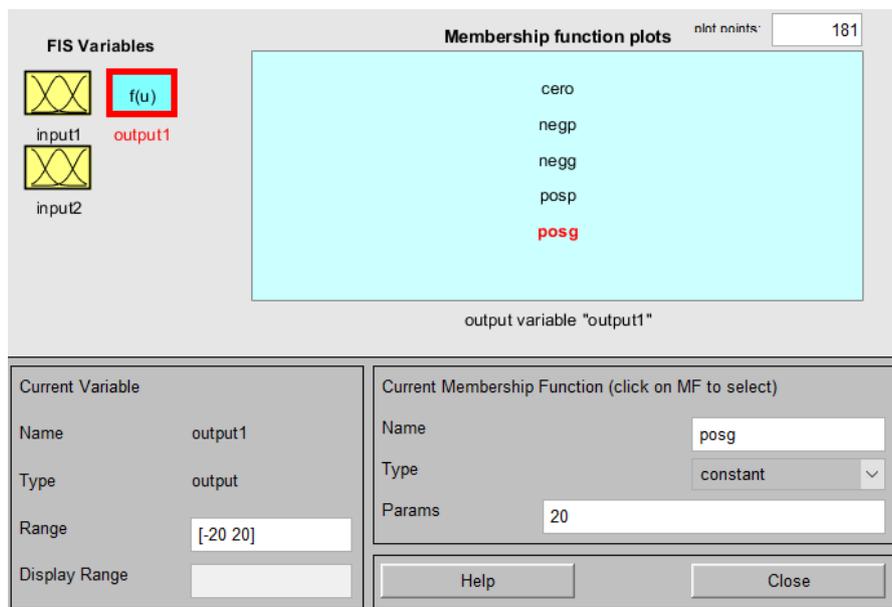


Figura 2.9. Funciones de membresía para la salida Y.

Las funciones de membresía de salida para el eje Y tienen los siguientes valores constantes:

- $posg=20$
- $posp=5$
- $cero=0$
- $negp=-5$
- $negg=-20$

Una vez determinadas las funciones de membresía, se crean las reglas del control difuso, estas reglas se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 1.2. Funciones de membresía para el sistema tabla bola.

de/dt error	NEG	CERO	POS
NEG	NEGG	NEGP	CERO
CERO	NEGP	CERO	POSP
POS	CERO	POSP	POSG

1. Si error es NEG y derivada del error es NEG entonces salida es NEGG.
2. Si error es NEG y derivada del error es CERO entonces salida es NEGP.
3. Si error es NEG y derivada del error es POS entonces salida es CERO.
4. Si error es CERO y derivada del error es NEG entonces salida es NEGP.
5. Si error es CERO y derivada del error es CERO entonces salida es CERO.
6. Si error es CERO y derivada del error es POS entonces salida es POSP.
7. Si error es POS y derivada del error es NEG entonces salida es CERO.
8. Si error es POS y derivada del error es CERO entonces salida es POSP.
9. Si error es POS y derivada del error es POS entonces salida es POSG.

Con las funciones de membresía y las reglas podemos observar las superficies del control PD difuso, tanto para el eje X como el eje Y:

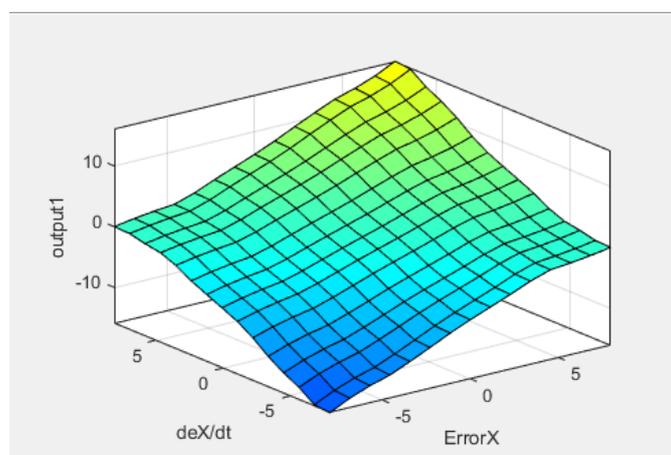


Figura 2.10. Superficie de control difuso del eje X.

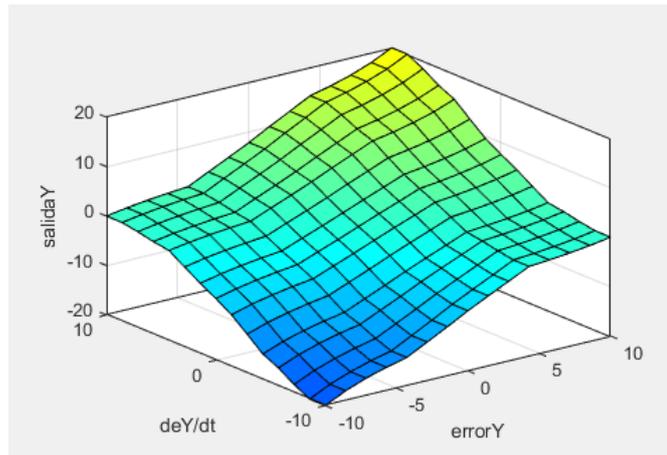


Figura 2.11. Superficie de control difuso del eje Y.

Luego de implementar el control PD difuso se realizan las simulaciones correspondientes para confirmar que la planta se estabiliza en el punto deseado.

2.4 ADQUISICIÓN DE DATOS Y COMUNICACIÓN SERIAL

Para el presente sistema se pueden considerar dos direcciones para el flujo de datos:

Primeramente, la posición de la bola sobre el plato es medida utilizando la pantalla táctil que produce una señal que debe ser leída e interpretada por el programa del controlador en Simulink, y posterior a esto, las instrucciones necesarias para corregir dicha posición generadas desde el controlador deben accionar los servomotores que giran al plato y desplazan a la bola hacia la posición deseada.

Es necesario entonces incluir una etapa de comunicación entre el ordenador y el prototipo para el intercambio de información de la pantalla táctil, el controlador y los servomotores.

Debido a su disponibilidad y a la facilidad de implementación tanto en software como hardware, se ha seleccionado el dispositivo Arduino que utilizará el protocolo de comunicación serial mediante el uso de sentencias de lectura y escritura, el proceso definido en dicho dispositivo se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 12 y el diagrama de flujo en la Figura 2.13.

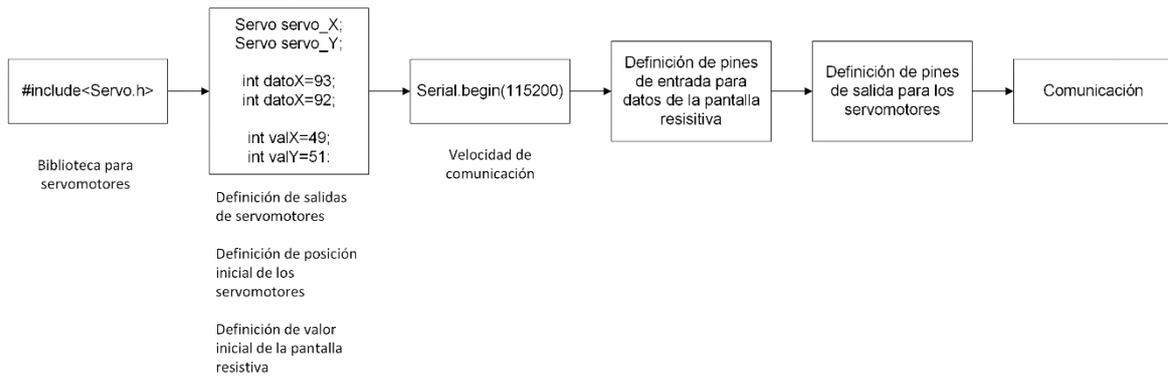


Figura 2.12. Comunicación serial con Arduino.

Como en cualquier programa se debe inicialmente declarar las librerías, puertos, valores constantes y variables que se utilizarán en el proceso:

Servo.h, es la librería incluida en el sistema Arduino que nos facilitará el uso de comandos propios para el control de servomotores.

Las variables *servo_X* y *servo_Y* serán asociadas con puertos en el Arduino y a su vez conectados a los dos servomotores para su accionamiento.

Los pines de entrada/salida *out1*, *out2*, *out3* y *out4* se conectan a la pantalla táctil para la lectura de la posición X e Y de la bola.

Las entradas de comunicación serial se asocian a las variables *datoX* y *datoY*, son los valores enviados por Simulink para el control del sistema, al inicio se fijan en un valor específico para que la tabla se coloque en posición horizontal.

Las variables *valX* y *valY* se adjuntan a una entrada analógica para almacenar la posición medida por la pantalla táctil y su posterior envío serial a Simulink.

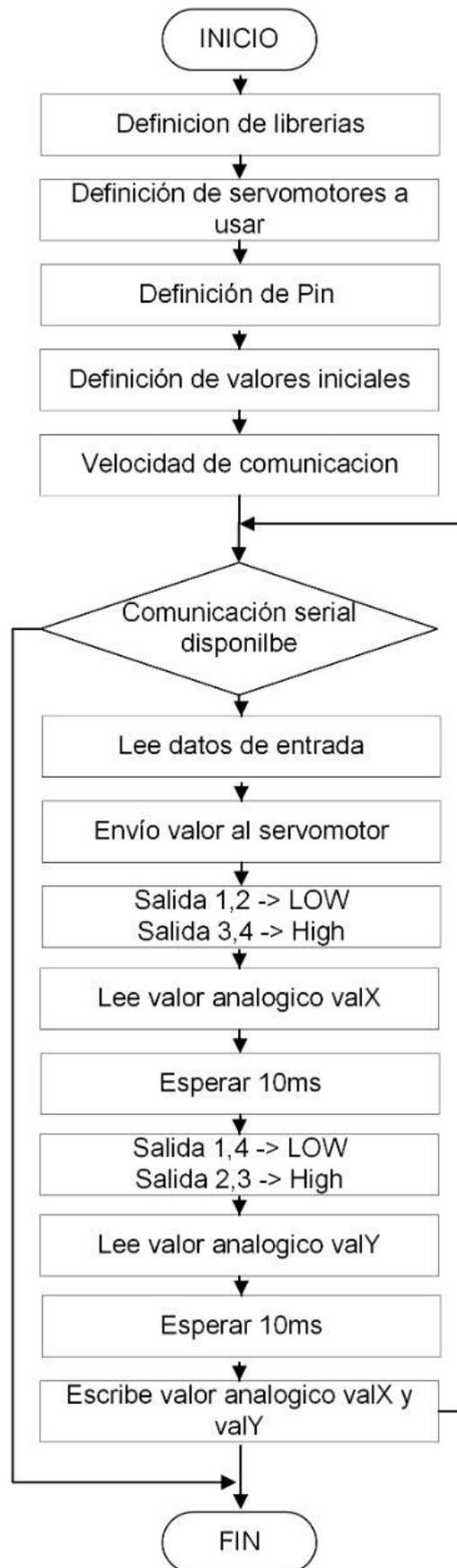


Figura 2.13. Diagrama de flujo del programa implementado en Arduino

La comunicación serial en Simulink de MATLAB se realiza utilizando los bloques paramétricos de Serial Recive y Serial Send como se muestra en la Figura 2,14, configurando el puerto de comunicación al cual es conectado el Arduino.

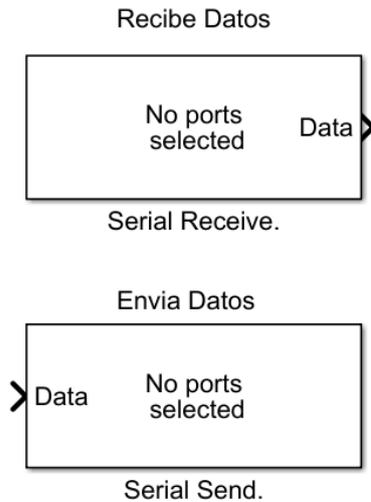


Figura 2.14. Bloques de la comunicación serial en Simulink.

La configuración de parámetros es necesario para lograr una correcta comunicación serial determinado el puerto de comunicación, numero de datos a recibir, tipo de dato y el tiempo de muestreo de los datos de acuerdo con la velocidad de respuesta de los elementos electrónicos del sistema a utilizar como se muestra en la Figura 2.15.

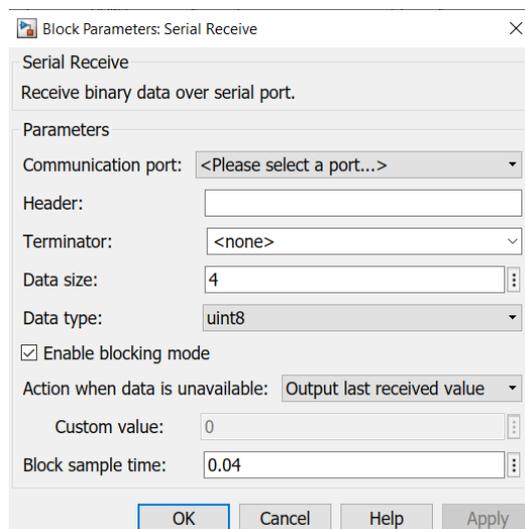


Figura 2.15. Configuración de parámetros para la comunicación en Simulink.

Donde, una de las más importantes configuraciones a realizar es la selección del puerto de comunicación, la cantidad de datos a recibir, el tipo de datos y tiempo de muestreo.

2.4.1 ACONDICIONAMIENTO PANTALLA TÁCTIL RESISTIVA 5 HILOS

La pantalla táctil resistiva de 5 hilos se encuentra distribuida como se muestra en la Figura 2.16 donde, P0, P1 y P2 son puntos para calibrar y acondicionar los valores de la pantalla táctil.

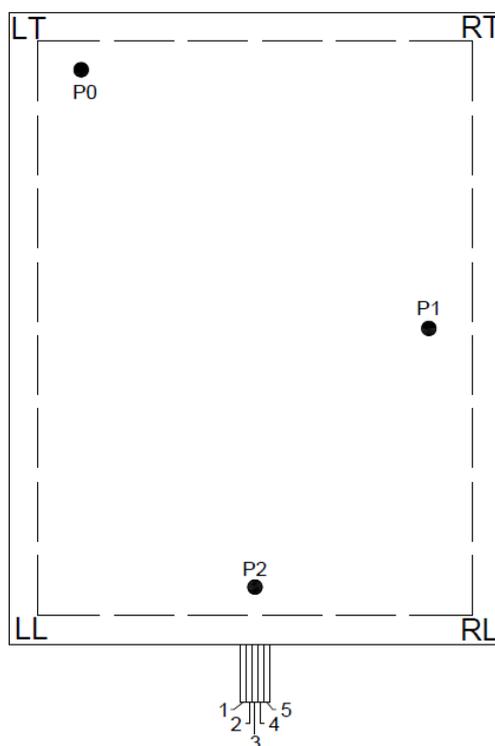


FIGURA 2.16. Esquema pantalla táctil resistiva 5 hilos

Además, la Tabla 2.3 se muestra la distribución de cada uno de los hilos en la pantalla táctil donde, LT, LL, RL Y RT son hilos que de acuerdo con su variación de voltaje determinara la posición que se realiza la presión sobre la pantalla y SG es el hilo de señal.

Tabla 2.3. Distribución de hilos de la pantalla táctil

PIN	DESIGNACIÓN
1	LT
2	LL
3	SG
4	RL
5	RT

Para realizar la conversión a centímetros se utiliza la calibración por 3 puntos. Se propone puntos en los bordes activos de la pantalla distribuidos como se muestra en la Figura 2.16.

Una vez determinados los puntos sobre el área activa de la pantalla resistiva se establece los valores en centímetros de acuerdo con las coordenadas deseadas como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Asignación de valores de los puntos en el eje X e Y

PUNTOS	EJE X	EJE Y
P0	6	9
P1	-6	0
P2	0	-9

Además, para cada punto se toma en cuenta el valor análogo que entrega la pantalla al presionar sobre cada punto teniendo como respuestas los siguientes valores como se indica en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores análogos de los puntos determinados en la pantalla táctil.

PUNTOS	VALOR X	VALOR Y
P0	630	250
P1	310	480
P2	510	700

Teniendo todos los valores deseados se encuentra las constantes para realizar la conversión, que además de entregar los valores de posición en centímetros corrige la no linealidad de la lectura de valores de la pantalla táctil.

Para el cálculo de las constantes utilizamos el Software de MATLAB aplicando las ecuaciones de una matriz de calibración, colocando los valores de las constantes de los puntos seleccionados y ecuaciones de cada constante necesaria para la conversión como se muestra en las siguientes instrucciones ingresadas en la pantalla de comandos de MATLAB de acuerdo con el Anexo 1.

Una vez ingresadas las instrucciones se ejecuta el programa y obtenemos los valores deseados como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Constantes para el acondicionamiento de la pantalla táctil.

CONSTANTE	VALOR
K	-116400
A	-0.0345
B	0.0041
C	14.7268
D	-7.732e-04
E	-0.0402
F	19.5386

Las constantes obtenidas construimos las ecuaciones mediante bloques para obtener el acondicionamiento como se muestra en la Figura 2.17 y Figura 2.18

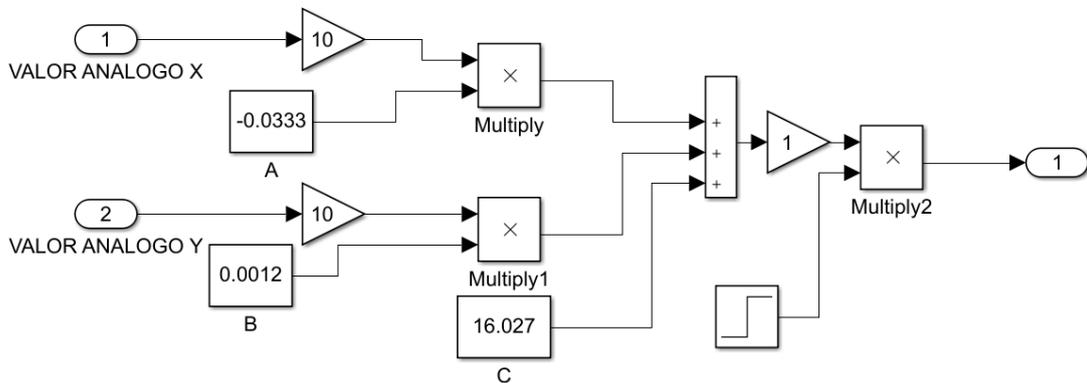


Figura 2.17. Acondicionamiento de coordenadas del eje X

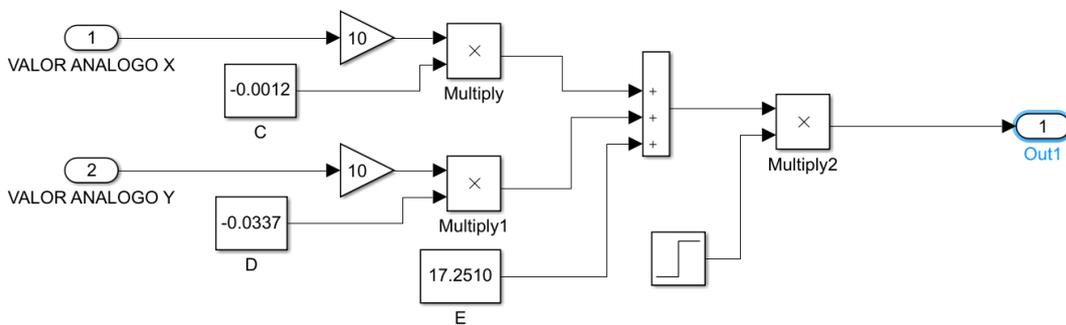


Figura 2.18. Acondicionamiento de coordenadas del eje Y

Una vez realizada la estructura de acondicionamiento para el eje X y el eje Y queda establecido las coordenadas de la pantalla resistiva de la siguiente manera. Para el eje X se tiene coordenadas de -9 a 9 y para el eje Y -11 a 11 como se muestra en la Figura 2.19.

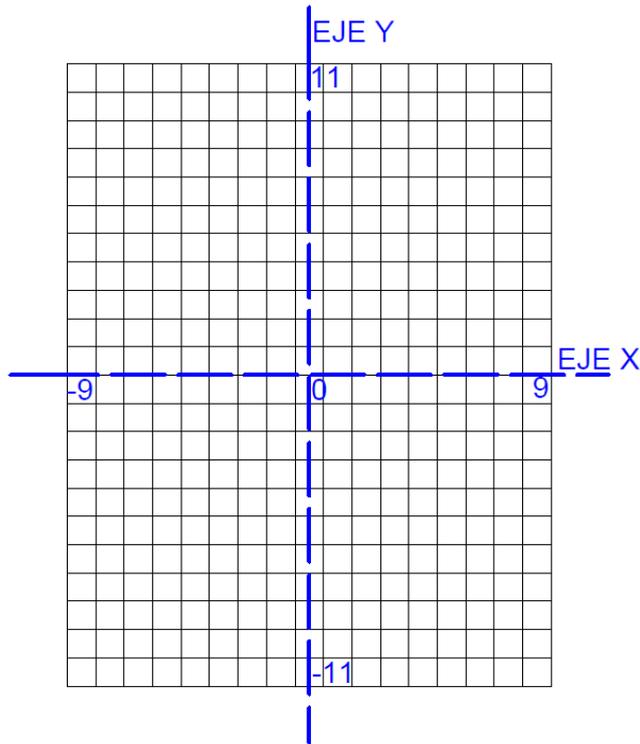


Figura 2.19. Coordenadas de la pantalla táctil.

2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA PID CLÁSICO Y CONTROLADOR DIFUSO PD+I TAKAGI SUGGENO

Una vez diseñado los controladores se realiza la implementa utilizando la herramienta Simulink de MATLAB y la planta física provista del laboratorio LARSI, el sistema debe contar con varias etapas necesarias para el tratamiento y control de las señales, en la Figura 2.20 se observa la etapa para selección de referencia (1), etapa de los controladores para la coordenada X e Y (2), una etapa de saturación y acondicionamiento de señal de control para los servomotores (3), la comunicación serial para el intercambio de datos entre el ordenador y el Arduino y etapa de acondicionamiento según especificaciones de la pantalla táctil (4) y se incluyen también varios displays y osciloscopios en diferentes puntos para verificar y visualizar la respuesta de la implementación.

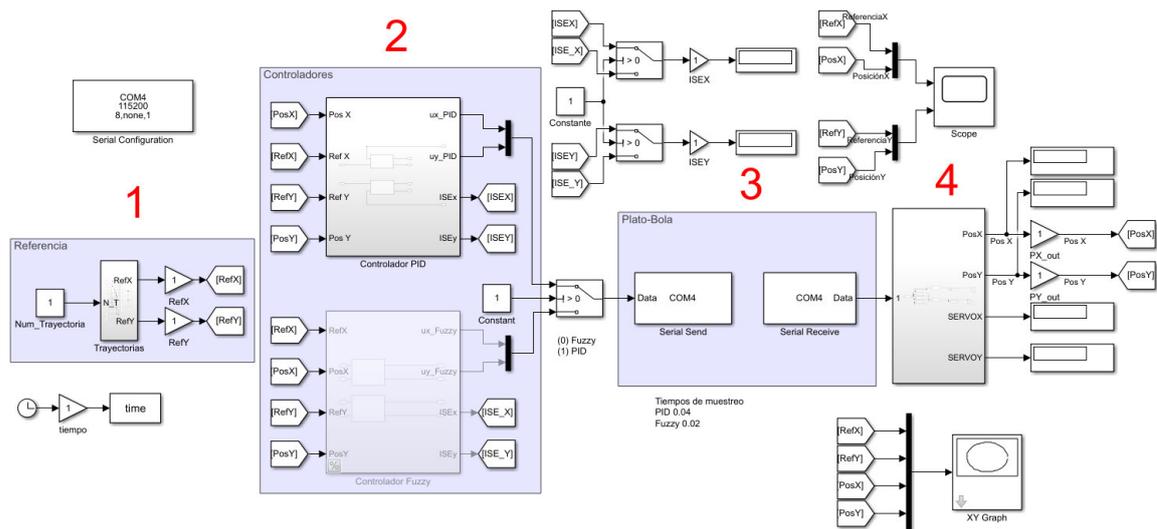


Figura 2.20. Implementación en Simulink del controlador PD Ziegler-Nichols, las etapas principales son: 1) Selección de trayectoria, 2) Controladores, 3) Acondicionamiento y 4) Comunicación.

ETAPA 1

Se ha diseñado la primera etapa para poder seleccionar el tipo de referencia que se desea para el sistema Plato-Bola, las referencias implementadas son:

- Control de posición en un punto específico.
- Seguimiento de trayectoria de un cuadrado.
- Seguimiento de trayectoria de un círculo.
- Seguimiento de trayectorias lemniscata.

ETAPA 2

La etapa se implementa el controlador para el sistema, como se dijo anteriormente, se ha incluido un controlador para cada coordenada con los mismos parámetros.

- Control PID

En la Figura 2.20 se muestra el controlador PD implementado para el eje X, de la misma manera será implementado para el eje Y.

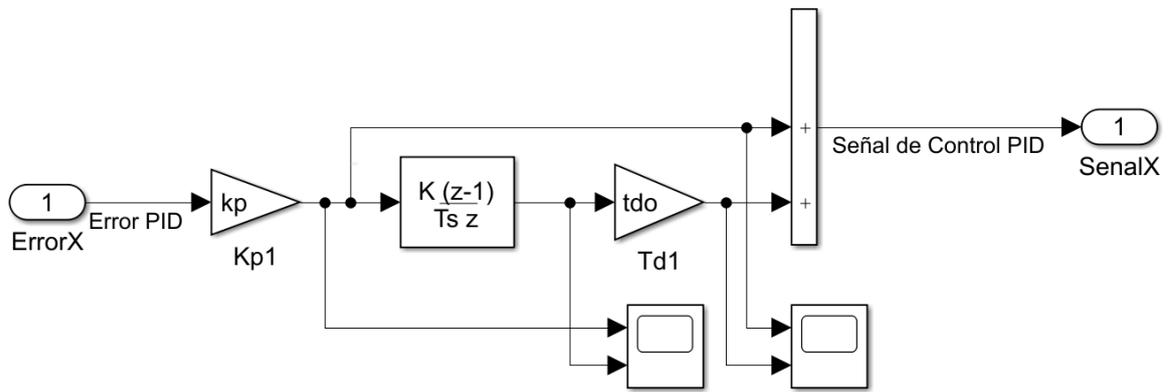


Figura 2.21. Esquema de control PD para la coordenada X de la posición de la bola.

- Control difuso PD+I Takagi-Sugeno

Asimismo, se implementa el controlador difuso PD+I Takagi-Sugeno como se muestra en la Figura 2.22 con ayuda de los bloques de Simulink

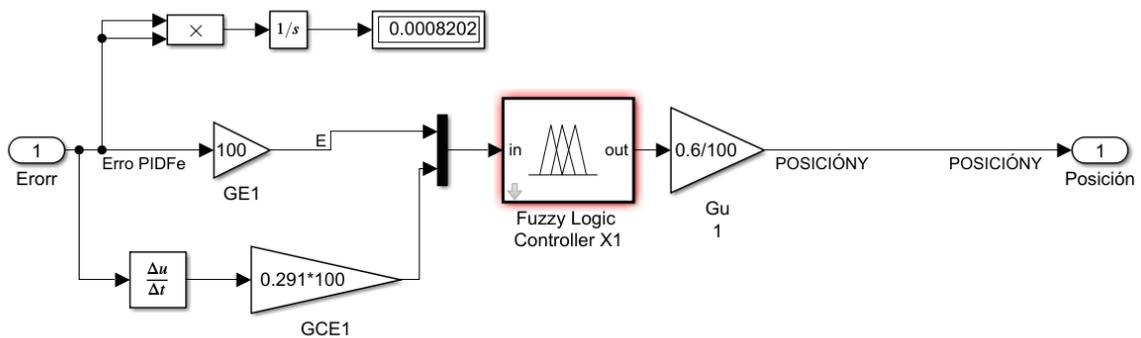


Figura 2.22. Esquema de control difuso PD+I Takagi-Sugeno

Para implementar el control difuso es necesario ejecutar el comando FuzzyLogicDesigner en la ventana de comandos de Matlab. Una vez abierta la ventana se generan las funciones de membresía de acuerdo con el diseño en el capítulo 2. Una vez realizadas todas las configuraciones es importante exportar el archivo y pueda ser utilizado en el bloque FUZZY LOGIC CONTROLLER como se muestra en la Figura 2.23.

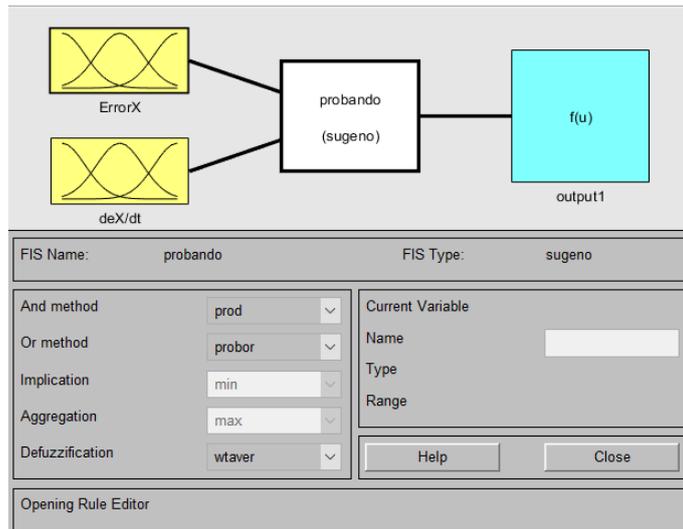


Figura 2.23. Ventana Fuzzy Logic Designer

ETAPA 3

En esta etapa como se muestra la Figura 2.24 se incorpora un bloque para saturar la señal de control y evitar que se generen señales que puedan dañar al elemento final de control, el saturador tiene un rango de $\pm 0.08 \text{ rad}$. Posterior a la saturación se realiza la conversión de la señal de control de radianes a grados y también se agrega un bloque sumatorio de 90 grados, debido a que para que la tabla se encuentre en posición horizontal los servomotores debe estar en la posición de 90 grados.

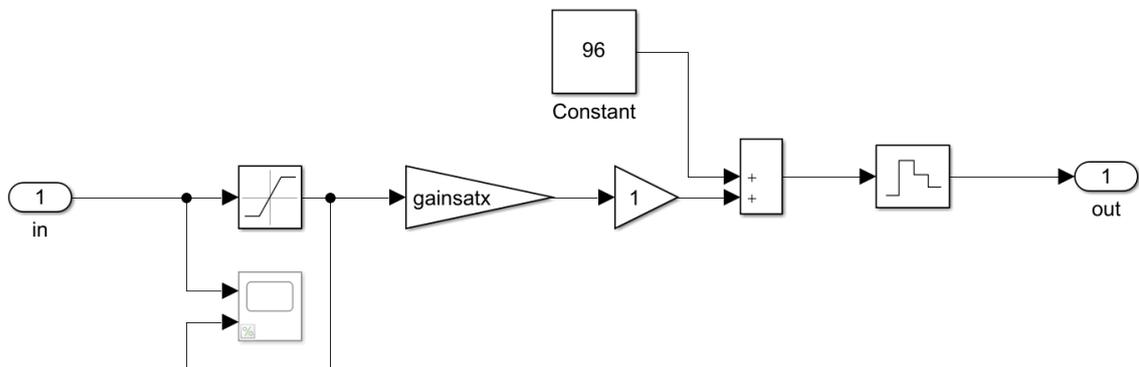


Figura 2.24. Acondicionamiento de señal de control

ETAPA 4

En esta etapa se realiza la adquisición y envío de datos entre Simulink y la planta física, así mismo el acondicionamiento de datos para las coordenadas de la pantalla táctil.

2.6 TRAYECTORIAS PARA EL SISTEMA PLATO-BOLA

Para comprobar el correcto funcionamiento de los controladores se han propuesto varias trayectorias a seguir por la bola sobre el plato (*pantalla táctil*). Como se había mencionado antes, se dibuja un sistema de coordenadas cartesianas sobre el plato para poder identificar correctamente la posición actual y la deseada para la bola. Las trayectorias se describen a continuación:

2.6.1 PUNTO ESPECÍFICO

Este modo de operación es el más sencillo, se comunica al sistema las coordenadas X e Y del punto en el que se desea que la bola se posicione de coordenadas (4,4) como se muestra en la Figura 2.25, el sistema deberá mantener a la bola en dicha posición.

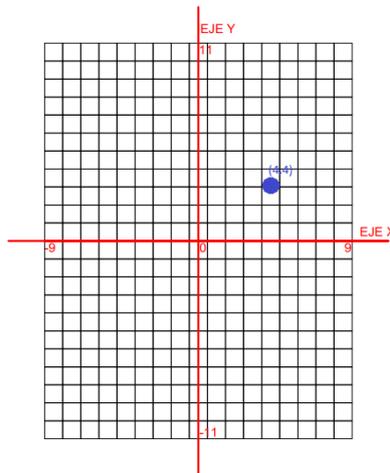


Figura 2.25. Posicionamiento en un punto específico sobre la superficie del plato.

2.6.2 CUADRADO

Para esta trayectoria, así como para las siguientes, se utilizará repetidamente el posicionamiento en un punto específico en diferentes ubicaciones generadas para dibujar la figura, para generar la secuencia de puntos en el caso del cuadrado se aplican dos señales cuadradas desfasadas $\frac{1}{4}$ del periodo, los valores máximo y mínimo serán las coordenadas X e Y de los vértices del cuadrado: A (Xmin, Ymin), B (Xmin, Ymax), C (Xmax, Ymax) y D (Xmax, Ymin) según presentan la Figuras 2.26 y Figura 2.27.

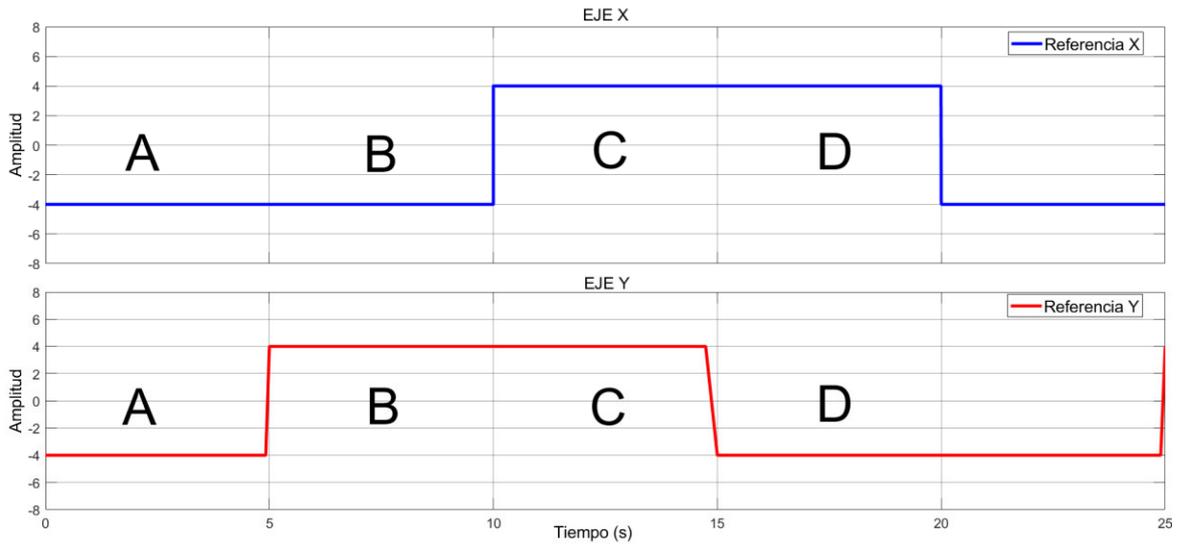


Figura 2.26. Señal cuadrada para generar secuencia de posiciones para X e Y en cada vértice del cuadrado.

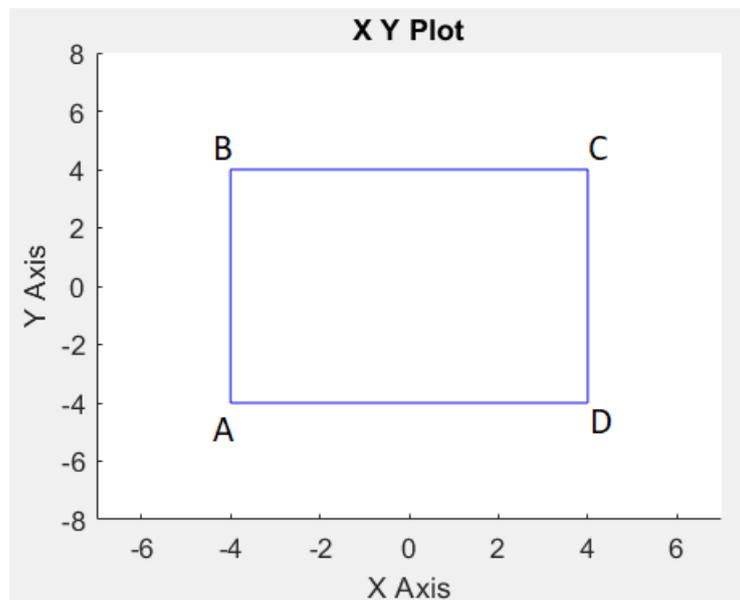


Figura 2.27. Cuadrado sobre las coordenadas del plato.

2.6.3 CÍRCULO

Las posiciones para esta trayectoria también se generan muy parecido a los métodos anteriores, pero se deben reemplazar las señales con senoidales. Se debe considerar que los valores máximos en X e Y corresponden al valor del radio del círculo, se visualizan

cuatro puntos en la Figura 2.28 y Figura 2.29: A(X_{min} , 0), B(0, Y_{max}), C(X_{max} , 0) y D(0, Y_{min}).

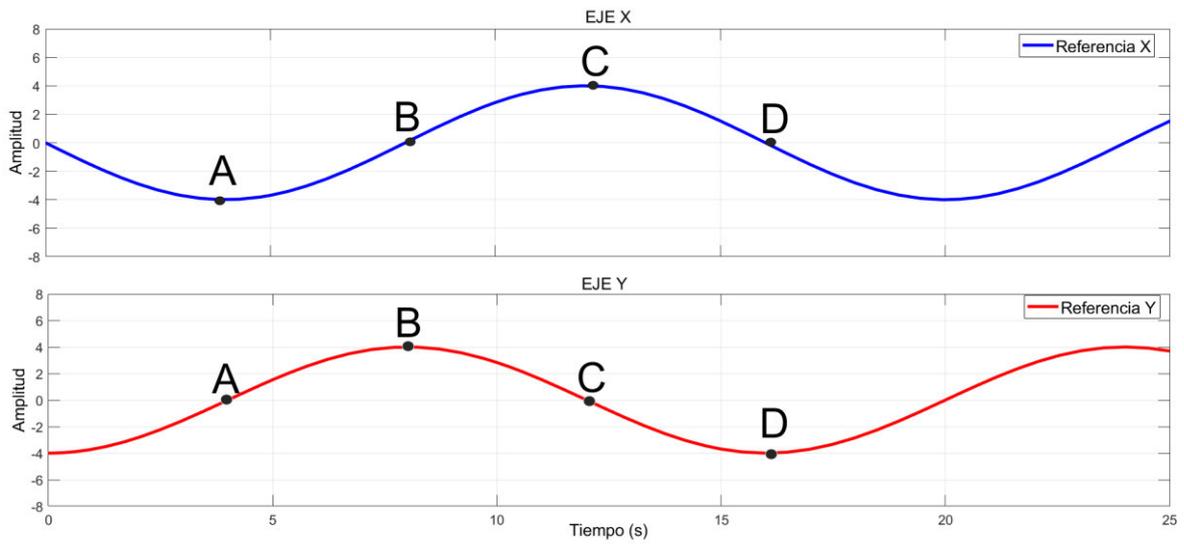


Figura 2.28. Señal senoidal para generar secuencia de posiciones para X en cada punto del círculo.

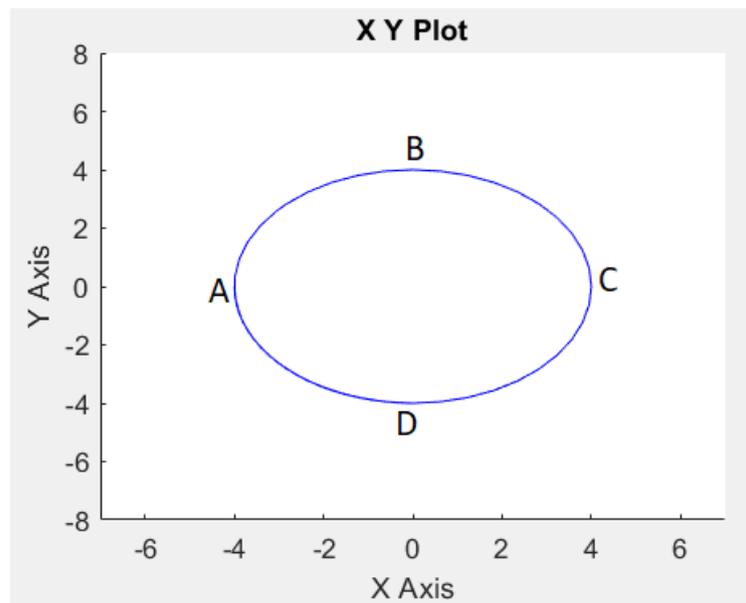


Figura 2.29. Círculo sobre las coordenadas del plato.

2.6.4 LEMNISCATA

Para la figura lemniscata se tomará el método del círculo siendo necesario solamente duplicar la frecuencia para la senoidal del eje X, se muestran los puntos A(0, 0), B(Xmin, YB), C(0, Ymax), D(Xmax, YD), E(Xmin, YE), F(0, Ymin) y G(Xmax, YG) en la Figura 2.30 y Figura 2.31.

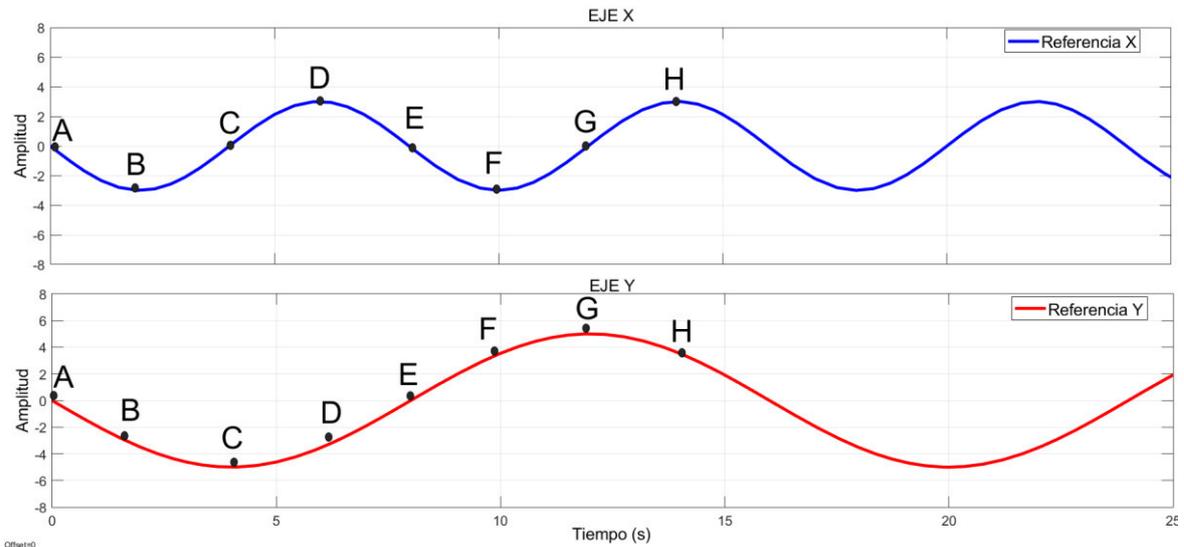


Figura 2.30. Señal senoidal para generar secuencia de posiciones para X e Y en cada punto de la figura lemniscata.

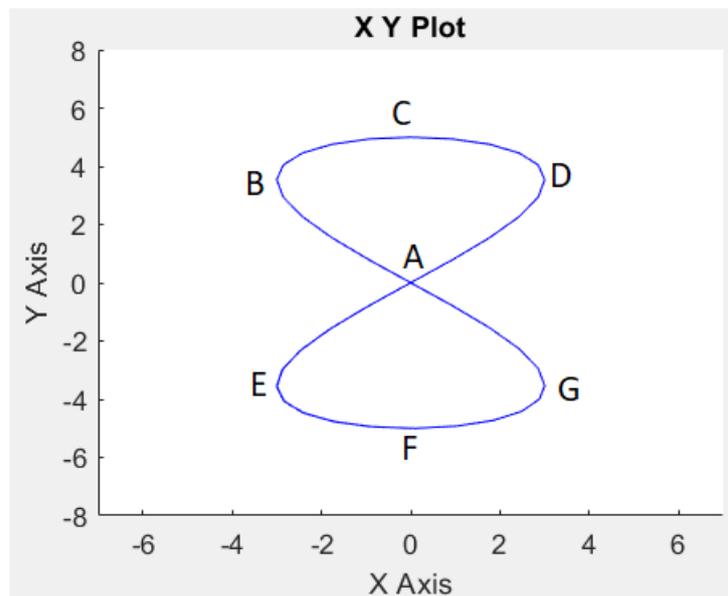


Figura 2.31. Lemniscata sobre las coordenadas del plato.

2.7 INTERFAZ GRÁFICA

Para la implementación de la interfaz gráfica del sistema Plato-bola se utiliza la herramienta computacional App Designer del software MATLAB, el mismo que es realizado con los siguientes objetivos.

- Interacción con el usuario
- Indicar los valores del índice de desempeño de cada controlador implementado
- Visualizar las gráficas de la respuesta del sistema.

App Designer es un entorno grafico de desarrollo de interfaces tiene diversas herramientas que vincula el diseño gráfico y código de implementación optimizando la forma de programación y facilitando el acceso a diferentes componentes gráficos, modificaciones y declaración de variables.

La interfaz gráfica está estructurada por dos niveles de navegación distribuidos de la siguiente manera:

Nivel 1

La venta de la Figura 2.32 es la pantalla principal o de pantalla de inicio donde encontramos la información del presente trabajo de titulación y las funciones de navegación para el acceso al nivel2; con las funciones de navegación el usuario puede elegir acceder a la ventana de simulación o implementación.



Figura 2.42. Ventana de Inicio.

Nivel 2

Se encuentran las ventanas para la ejecución de los controladores en simulación o implementando la planta física, aquí se puede realizar un control de operación del sistema Tabla-Bola teniendo en cuenta que se pueden seleccionar la trayectoria y el tipo de controlador a utilizar, así como los parámetros de los controladores implementados, además, visualizar la información del sistema como son los índices de desempeño, las trayectorias generadas y las gráficas de la posición y referencia en cada uno de los ejes.

La Figura 2.33 representa la ventana de simulación facilita visualizar e interactuar los controladores para el sistema Plato-Bola. En la parte izquierda se encuentra las variables para seleccionar el tipo de trayectoria, valores de las constantes de los controladores, seleccionar el tipo de controladores y visualizar las magnitudes de los índices de desempeño.

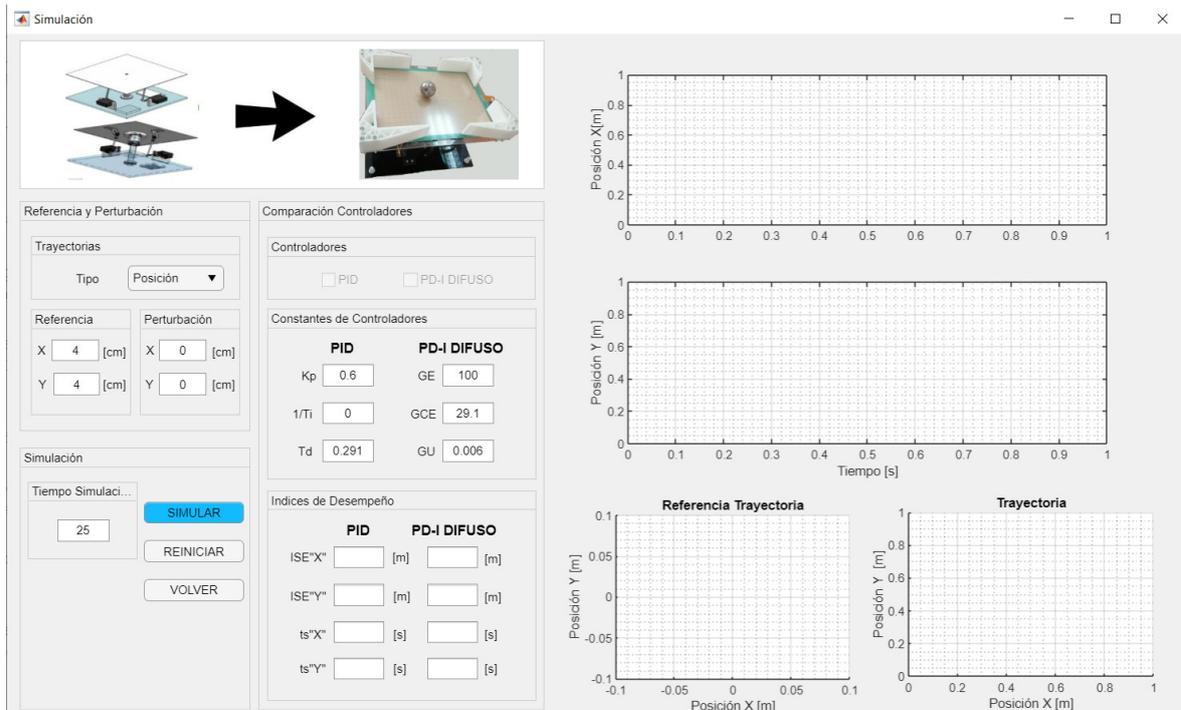


Figura 3.33. Ventana de resultados de la simulación de controladores

La ventana Figura 2.34 representa la ventana para ejecutar y visualizar la respuesta del sistema Tabla-Bola implementado, realizando el enlace entre Simulink y la planta. Además, se pueden seleccionar el tipo de trayectoria, tiempo de simulación y el controlador; en las gráficas se muestra la posición de la bola con la referencia de trayectoria de entrada.

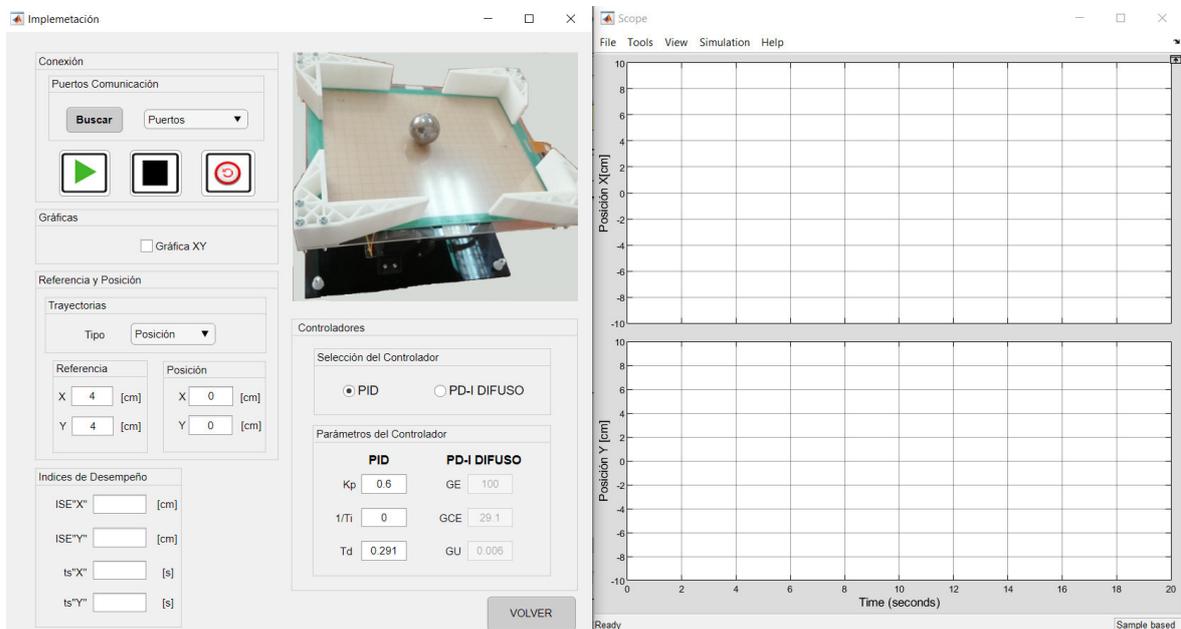


Figura 2.35. Venta de resultados de la implementación de controladores

2.7.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INTERFAZ GRAFICA

Para el desarrollo de la interfaz gráfica es necesario la ejecución de comandos y una secuencia de programación de los diferentes componentes de la librería de componentes utilizados para el ingreso y visualización de valores y gráficos, por lo que es importante presentar los diferentes diagramas de flujo que permiten entender el desarrollo de la interfaz gráfica presentada en la sección anterior, esto se indica en la Figura 2.35, Figura 2.36, Figura 2.37, Figura 2.38 y Figura 2.39.

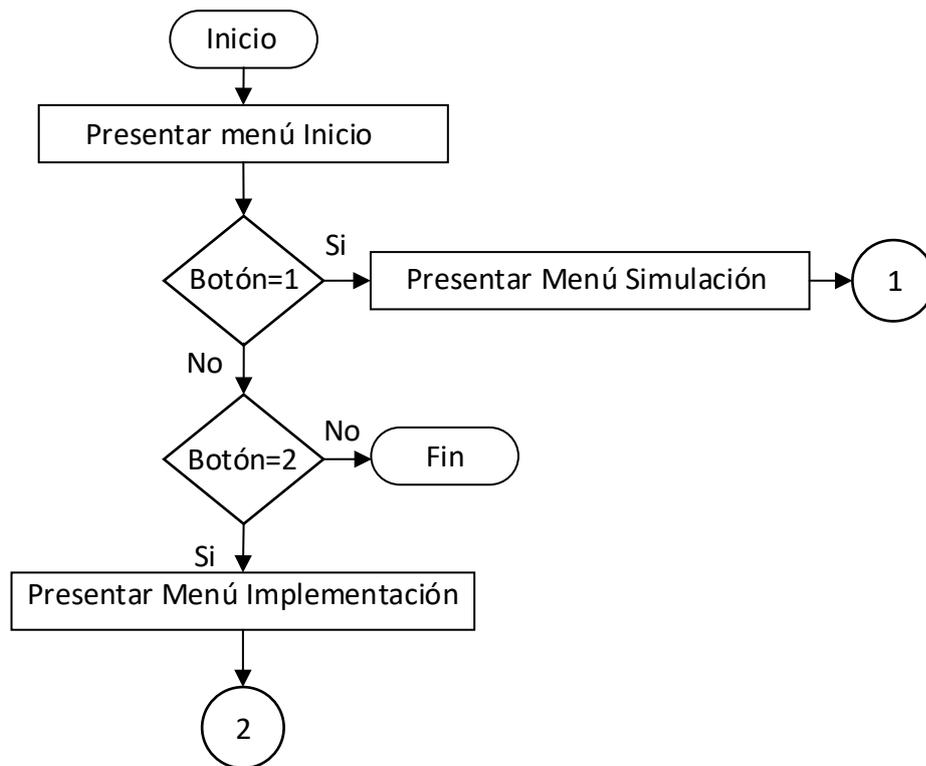


Figura 2.35. Diagrama de flujo ventana de inicio.

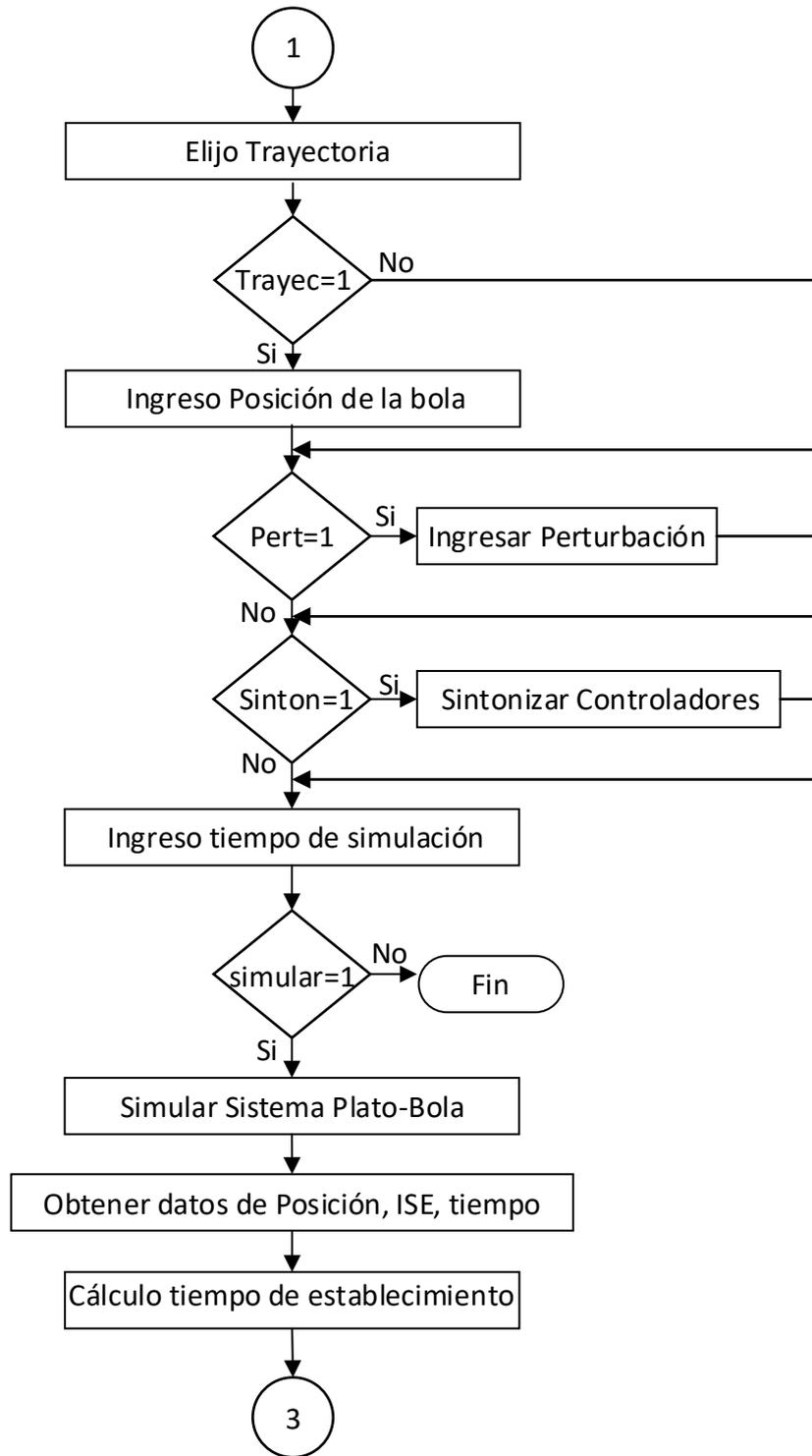


Figura 6. Diagrama de flujo ventana de simulación

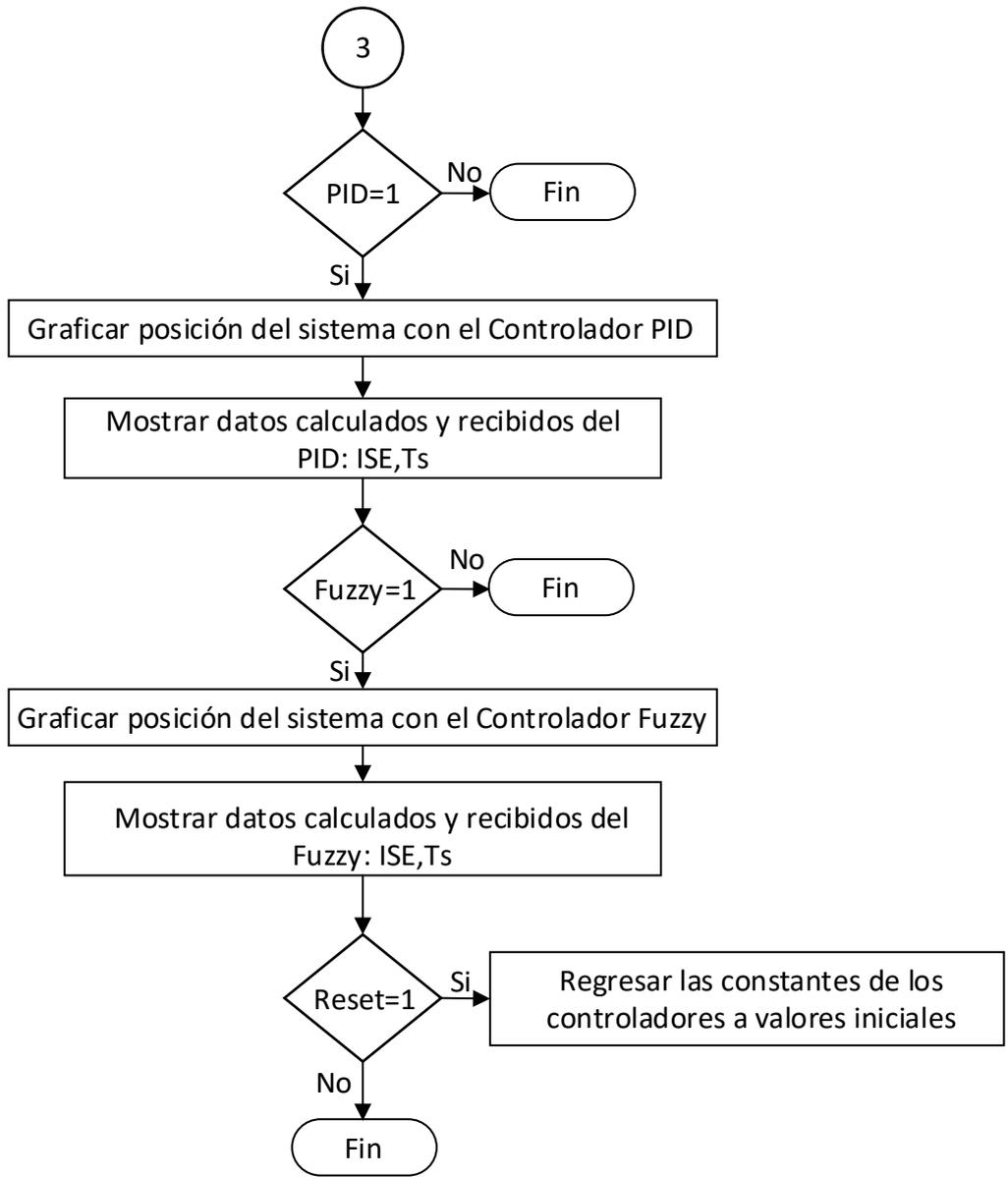


Figura 7. Ventana de flujo de resultados de la simulación

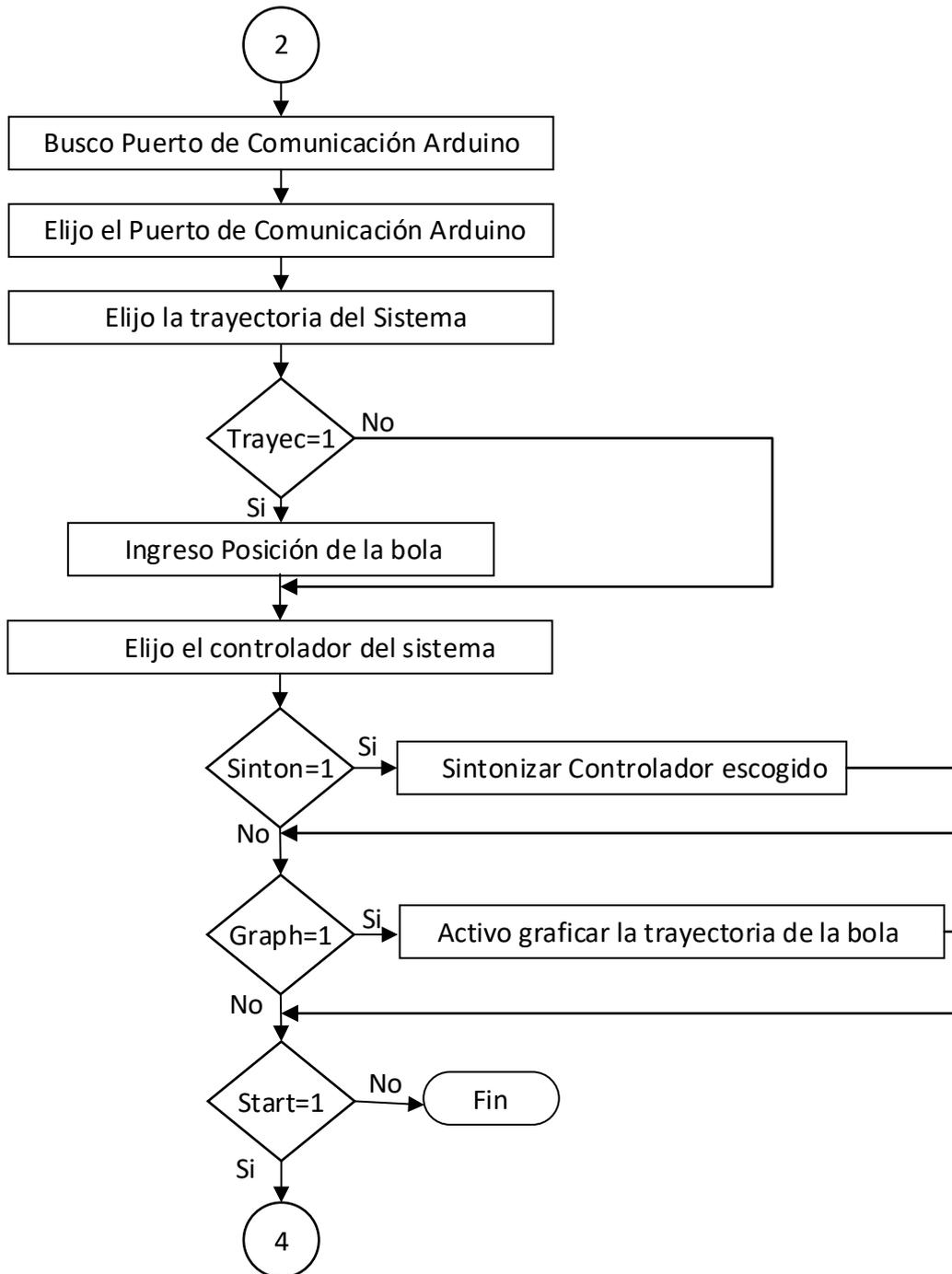


Figura 8. Ventana de flujo ventana de implementación.

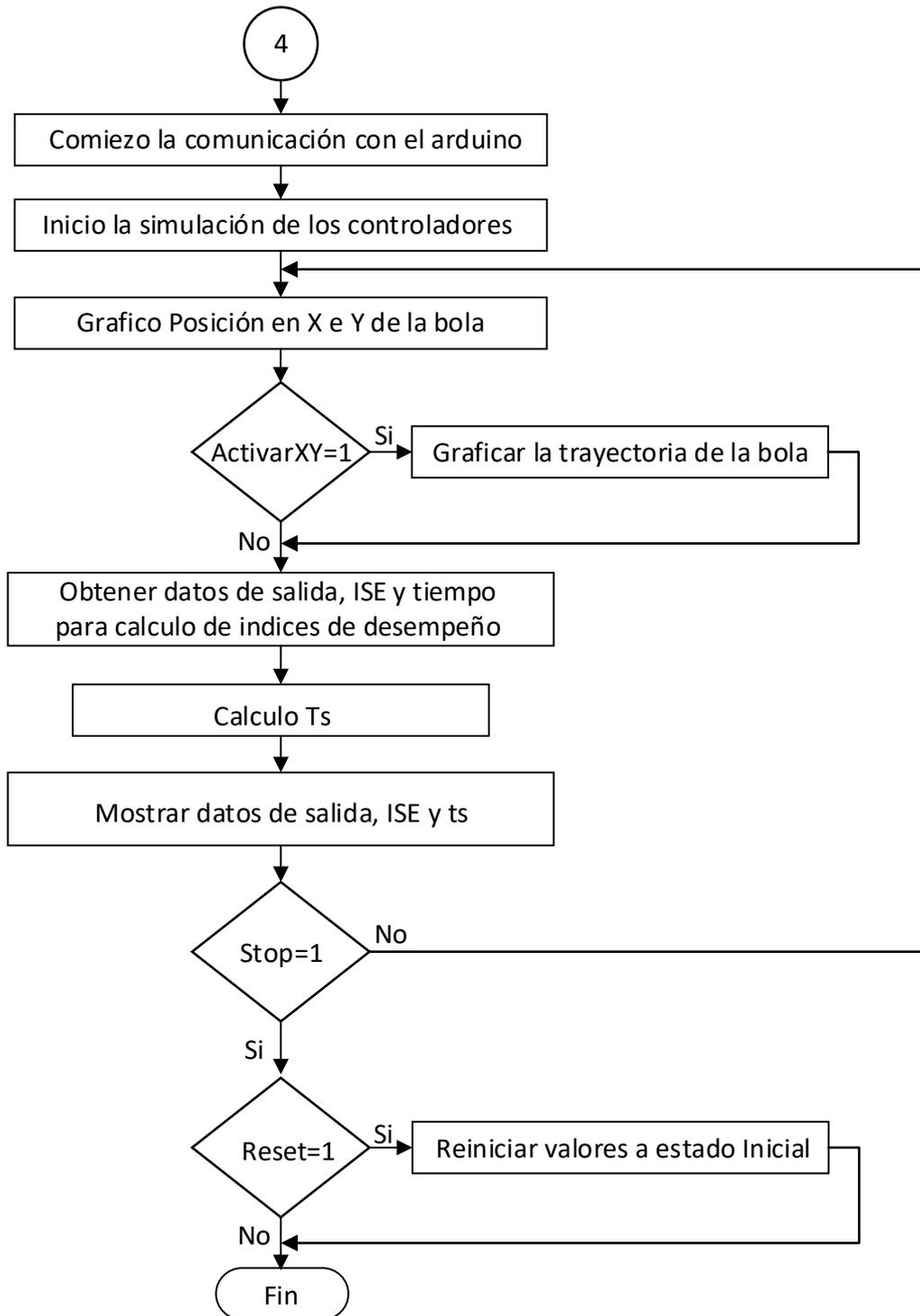


Figura 9. Diagrama de flujo de resultados de la simulación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados del controlador PD utilizando el método de sintonización Ziegler y Nichols del controlador difuso PID Takagi Sugeno utilizando el modelo matemático del sistema Tabla-Bola determinado en el anterior capítulo mediante el programa Simulink de Matlab. Además, se recopila los valores de los parámetros de cada uno de los controladores aplicando como entrada de referencia la estabilización en un punto y seguimiento de trayectoria.

Por último, se realizan las pruebas de los controladores simulados utilizando la planta real Tabla-Bola, para así determinar cuál es el controlador que proporciona mejor desempeño al sistema

3.1 VALIDACIÓN DE LA APROXIMACIÓN LINEAL DEL SISTEMA PLATO-BOLA

Una vez determinadas en el capítulo 2 la Ecuación 2.10 y Ecuación 2.11 del modelo matemático del sistema tabla bola, donde se comprueba que tiene un comportamiento no lineal que depende de una función trigonométrica con relación al ángulo de inclinación de la tabla del sistema, se realizó la linealización y se obtuvo una ecuación lineal de segundo orden como muestra la Ecuación 2.15 y Ecuación 2.16.

Tabla 3.1. Ecuaciones del modelo matemático del sistema plato-bola.

MODELO MATEMÁTICO	EJE X	EJE Y
MODELO NO LINEAL	$\ddot{x} = \frac{5}{7}g \sin \alpha$	$\ddot{y} = \frac{5}{7}g \sin \beta$
APROXIMACIÓN LINEAL	$\frac{\Delta x}{\Delta \alpha} = \frac{7}{s^2}$	$\frac{\Delta y}{\Delta \beta} = \frac{7}{s^2}$

Por lo cual, se realiza la validación de la ecuación del modelo matemático no lineal y la ecuación de la aproximación lineal del modelo matemático que se muestra en la Tabla 3.1 realizando un cambio de referencia con una señal como se muestra en la Figura 3.1. Como resultado, se tiene una respuesta una función creciente al infinito tanto la ecuación no lineal y ecuación lineal del sistema como se muestra en la Figura 3.1, con esto, se quiere decir que las dos ecuaciones tienen un mismo comportamiento altamente inestable en lazo abierto.

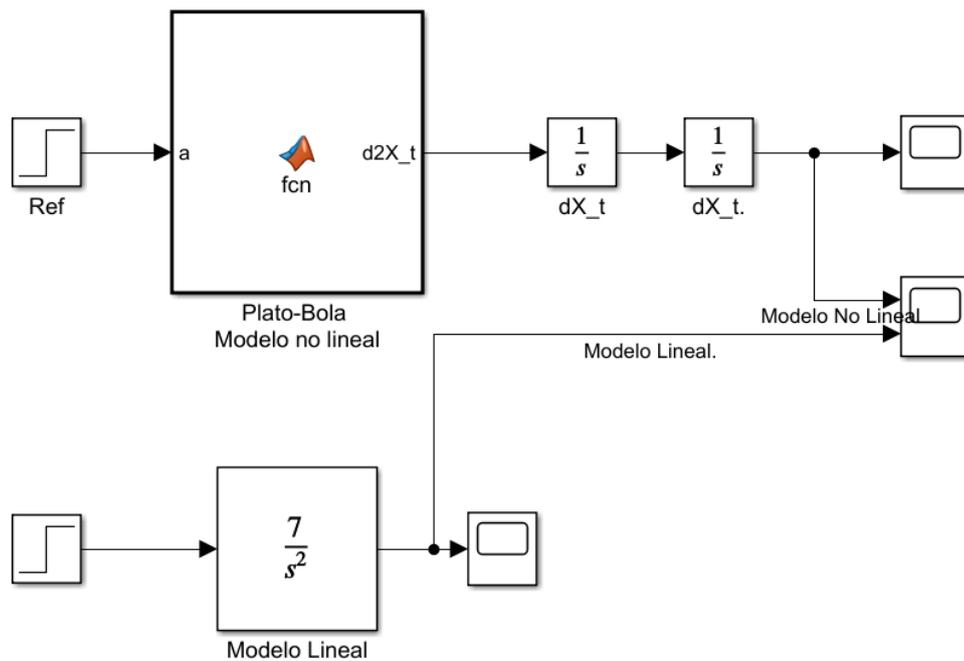


Figura 10. Esquema para la validación de modelo matemático no lineal y aproximación lineal del sistema plato-bola

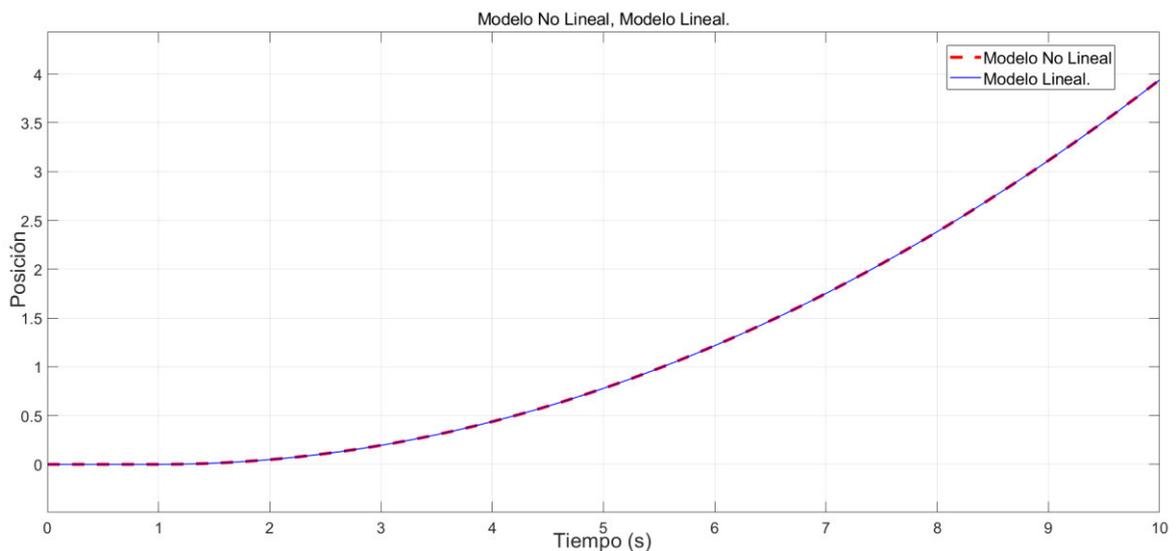


Figura 11. Respuesta de validación de modelo matemático no lineal y aproximación lineal del sistema plato-bola.

Además, se procede a ver la respuesta del modelo matemático y aproximación lineal en lazo cerrado como muestran las Figura 3.3 teniendo como respuesta un sistema inestable altamente oscilatorio como se muestra en la Figura 3.4. Por lo que es necesario la implementación de controladores para poder estabilizar al sistema.

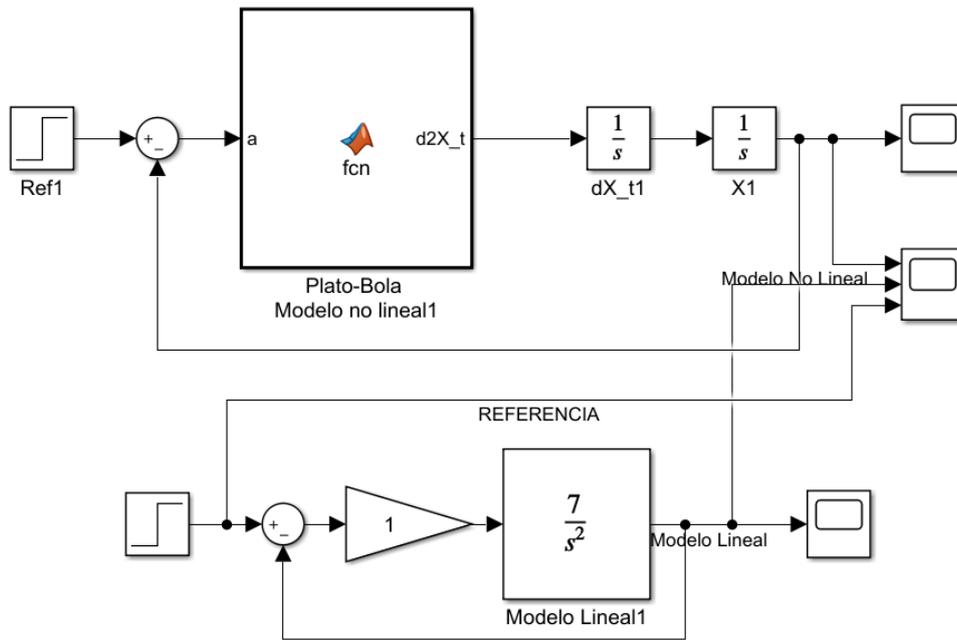


Figura 3.3. Esquema en lazo cerrado del modelo matemático y aproximación lineal del sistema plato-bola.

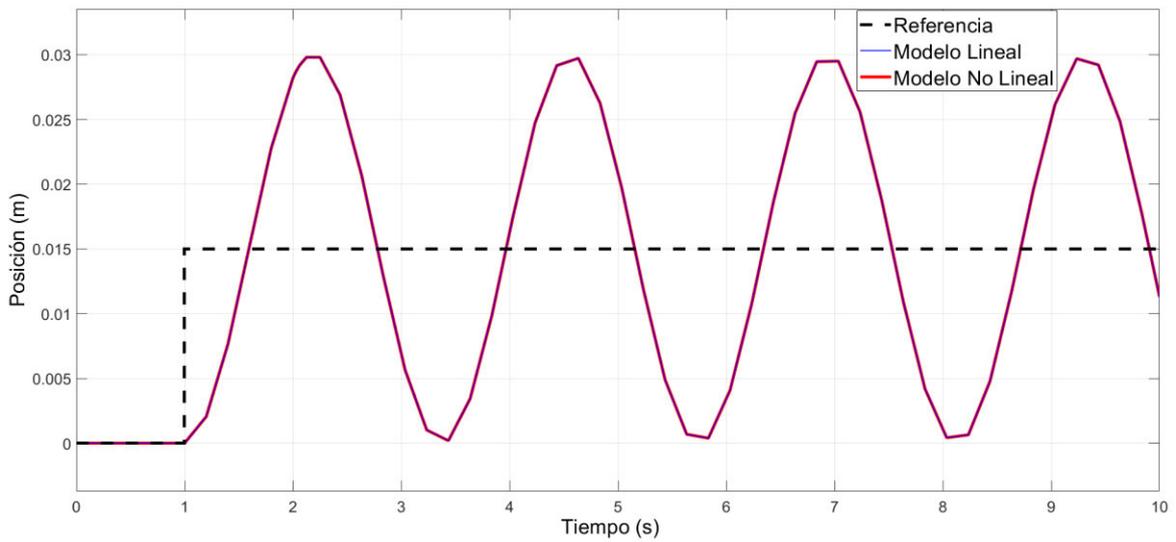


Figura 12. Respuesta en lazo cerrado del modelo matemático y aproximación lineal del sistema plato-bola

3.2 SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL PD MEDIANTE SINTONIZACIÓN ZIEGLERS Y NICHOLS

Una vez determinadas las constantes de un controlador PID mediante el método de Ziegler y Nichols en el capítulo 2, la Tabla 3.2 muestra los valores de la constante proporcional y el tiempo derivativo e integral para el controlador del sistema Plato-Bola

Tabla 3.2. Constantes de la sintonización por Ziegler y Nichols

PID			
Método	kp	Td	Ti
Ziegler y Nichols	0.6	0.291	1.164

Se implementa el controlador PD utilizando las constantes de la Tabla 3.2 utilizando una señal escalón para un cambio de posición desde el punto inicial 0 hasta el punto 4 como se muestra en el esquema de la Figura 3.5 y determinar la estabilidad del sistema Plato-bola como se muestra en la Figura 3.6.

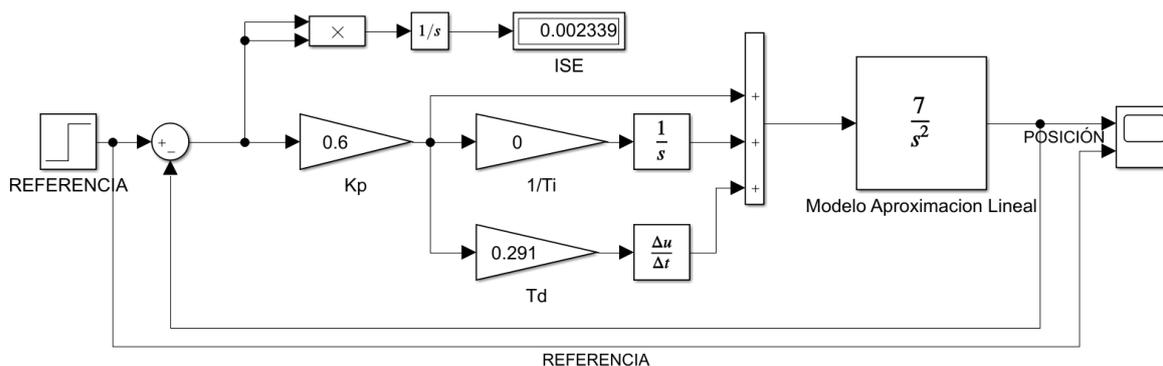


Figura 13. Diagrama de bloques para el control PD en el modelo lineal del sistema Plato-Bola.

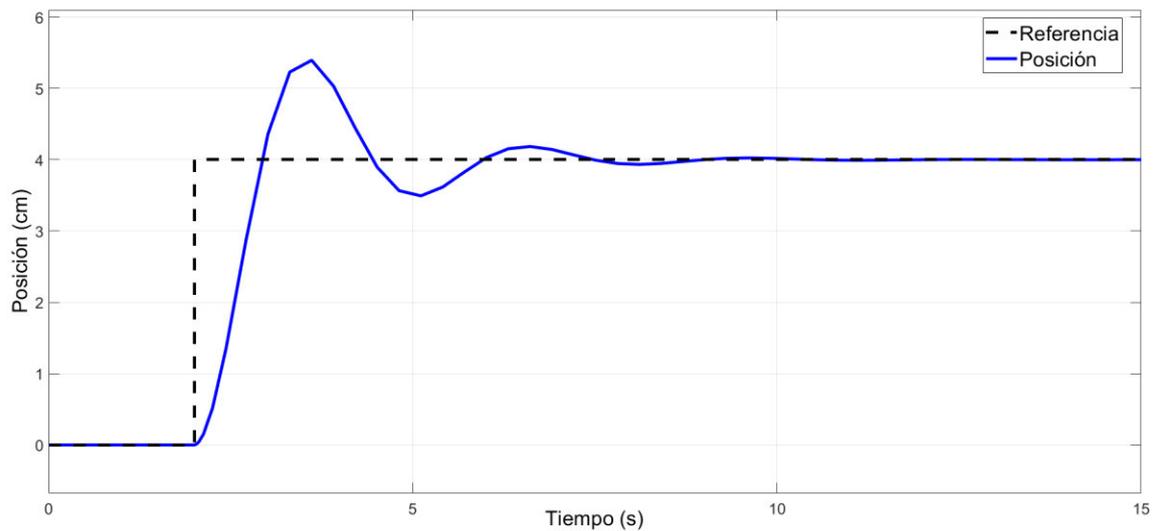


Figura 14. Respuesta del controlador PD al cambio de referencia de una señal escalón.

Para saber cuál es el resultado de la sintonización del controlador se analiza el índice de desempeño como se muestra en la Tabla 3.3. Cabe indicar que el M_p [%] se toma como uno de los puntos más críticos o puntos máximos de desplazamiento de la posición de la bola.

Tabla 3.3. Índice de desempeño del controlador PD

CONTROLADOR	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	Índice de desempeño ISE
PD	35	8	0.0008216

Es importante indicar que no se utiliza la señal integral por que provoca inestabilidad como se muestra en la Figura 3.7 generando una salida para la posición oscilatoria aumentado su tiempo de establecimiento. Sin embargo, el modelo de la planta ya poseé un doble integrador.

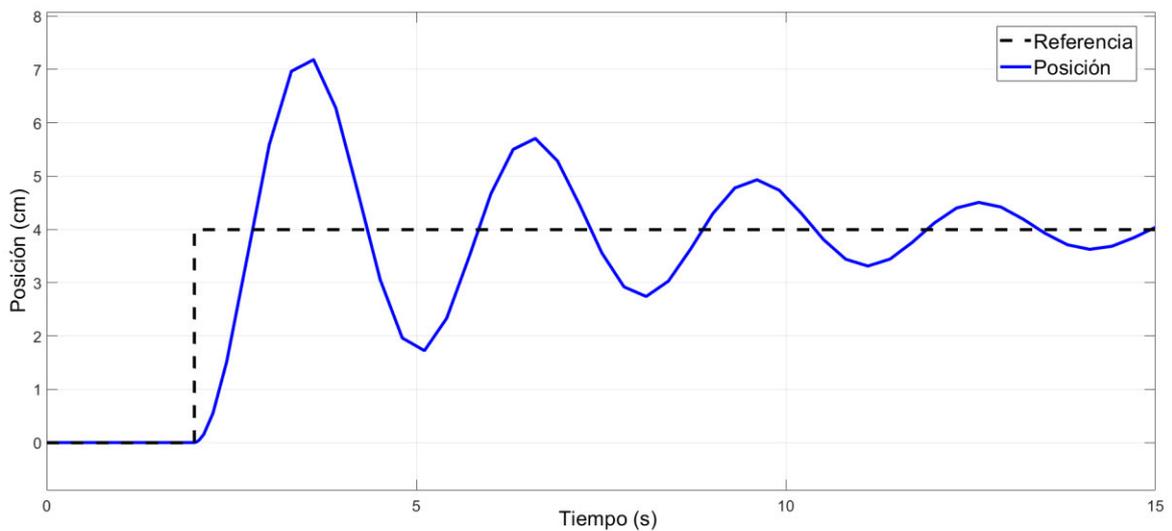


Figura 15. Respuesta del controlador PID al cambio de referencia de una señal escalon.

Basándose en los resultados obtenidos el controlador PD es aplicado tanto para el eje X como para el eje Y, debido a que cada eje tiene el mismo comportamiento, pero son independientes entre sí.

Además, en base a los resultados de la respuesta transitoria obtenida se puede determinar que el controlador PD diseñado presenta un M_p mayor al 30%, por lo que es necesario realizar una sintonización para reducir a un valor inferior al 10%. Es decir, aumentar el valor de la parte diferencia para obtener la respuesta deseada como se muestra en la Figura 3.8.

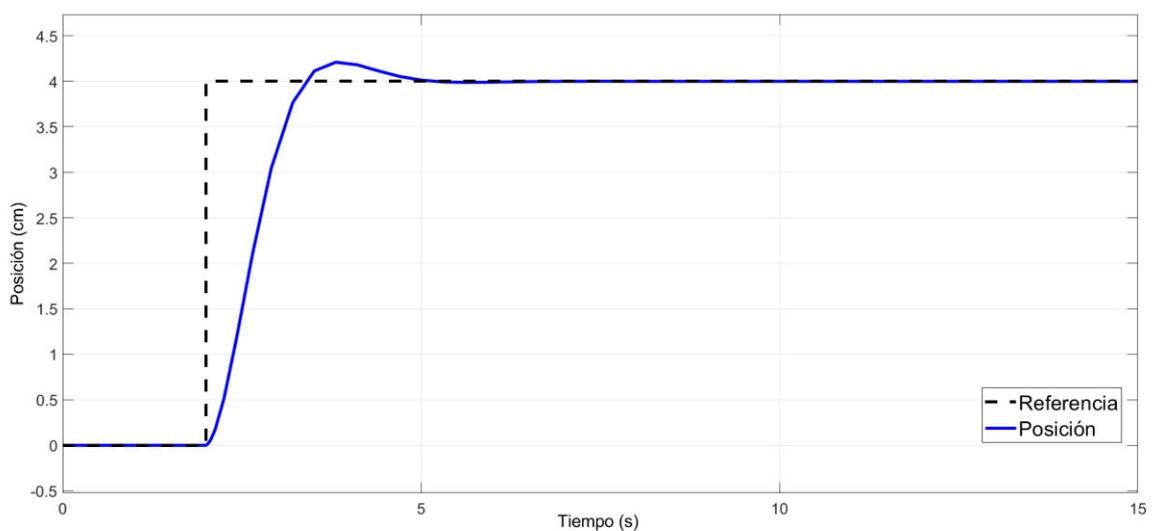


Figura 16. Respuesta de la resintonización del controlador PD al cambio de referencia de una señal escalon.

Visto que, se obtiene los resultados deseados se indica los parameros de la resintonización del controlador PD en la Tabla 3.4 y los valores cuantitativos y el índice de desempeño del controlador en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Constantes de la resintonización de controlador.

PID			
Método	kp	Td	Ti
Ziegler y Nichols	0.6	0.591	0

Tabla 3.5. Índice de desempeño de la resintonización del controlador PD.

CONTROLADOR	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	Índice de desempeño ISE
PD	5.25	5.5	0.0007313

Logrando obtener una mejor respuesta transitoria y reducir el índice de desempeño ISE, a continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación para el control de posición en un punto específico y el seguimiento de trayectorias (circulo, cuadrado y 8).

Control de posición.

Se implementa un cambio de referencia desde la posición (0,0) hasta la posición (3,4). En la Figura 3.8 se muestran los resultados para el cambio de referencia de posición y en la Figura 3.9 el desplazamiento realizado por la bola

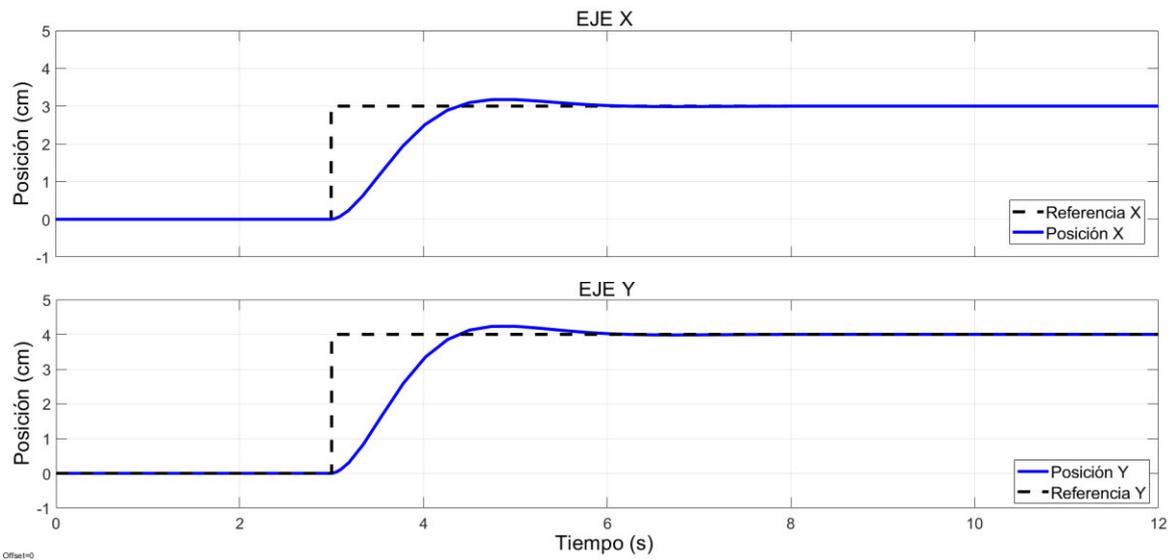


Figura 3.9. Respuesta del controlador PD al cambio de referencia de una señal escalon en eje X y eje Y

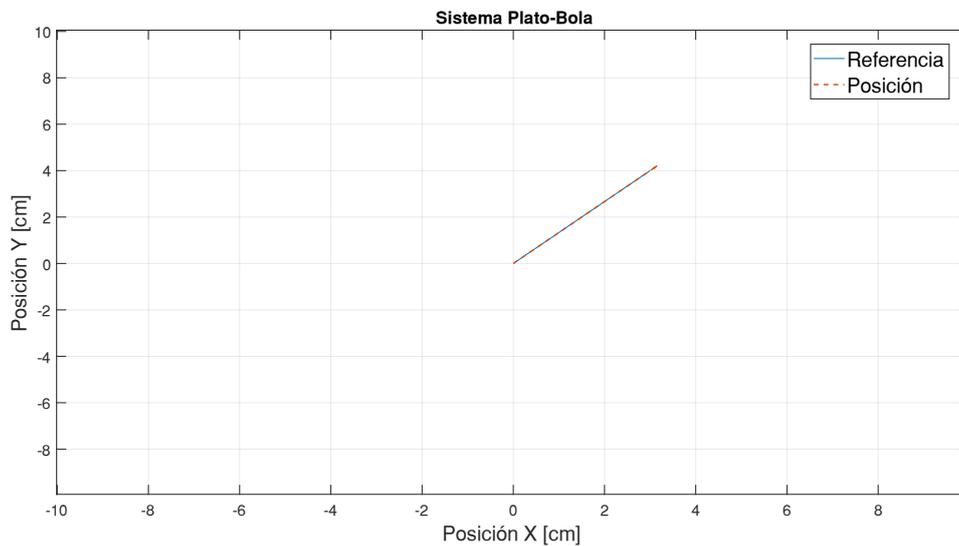


Figura 17. Desplazamiento de la bola al cambio de posición.

Para un tiempo de 12 segundos de simulación se determina el índice de desempeño ISE y la respuesta de estado transitorio para el X y el eje Y como se muestra en la Tabla 3.6. En la Figura 3.10 se puede determinar que la bola se estabiliza en la posición deseada en un tiempo de 6 segundo recorriendo la misma trayectoria que la señal de referencia de color azul.

Tabla 3.6. Índice de desempeño al cambio de referencia de una señal escalón.

	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	ÍNDICE DE DESEMPEÑO ISE
EJE X	5.83	6	0.0004175
EJE Y	5.82	6	0.0007422

Seguimiento de trayectoria cuadrada.

Para el seguimiento de la trayectoria cuadrada se implementa una señal cuadrangular de amplitud 4 como indica la Figura 3.11, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia generando un M_p reducido menor al 10% y error de estado transitorio.

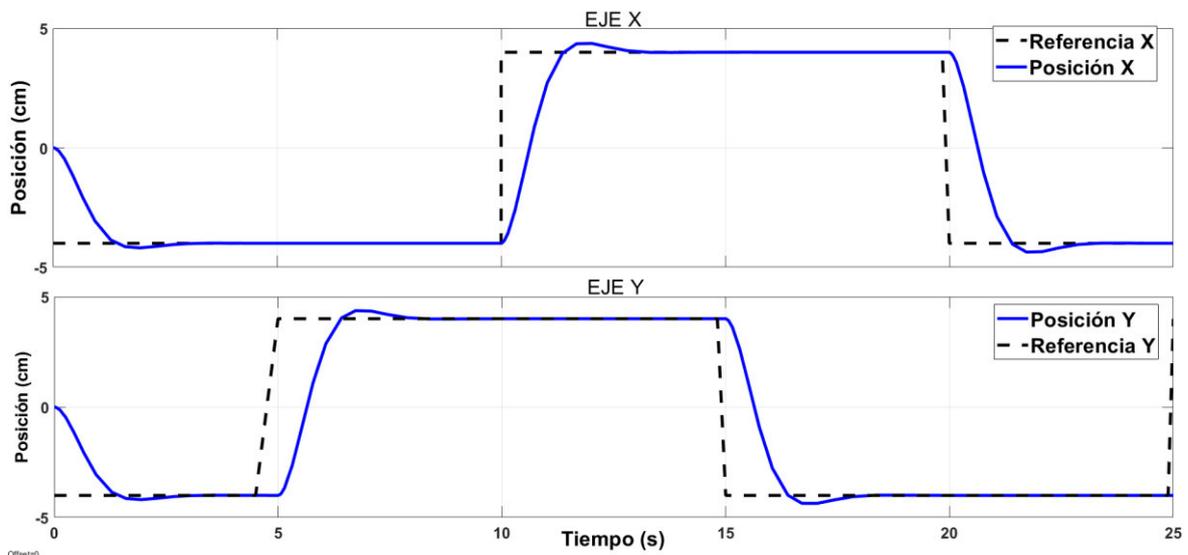


Figura 3.11. Respuesta del controlador PD al cambio de referencia de una señal cuadrada en eje X y eje Y generando una trayectoria cuadrada

En la Figura 3.12 la línea de color rojo sigue la trayectoria de referencia de color azul, generando un pequeño desplazamiento de la trayectoria al momento de realizar los cambios de dirección causado por los sobrepicos de la señal.

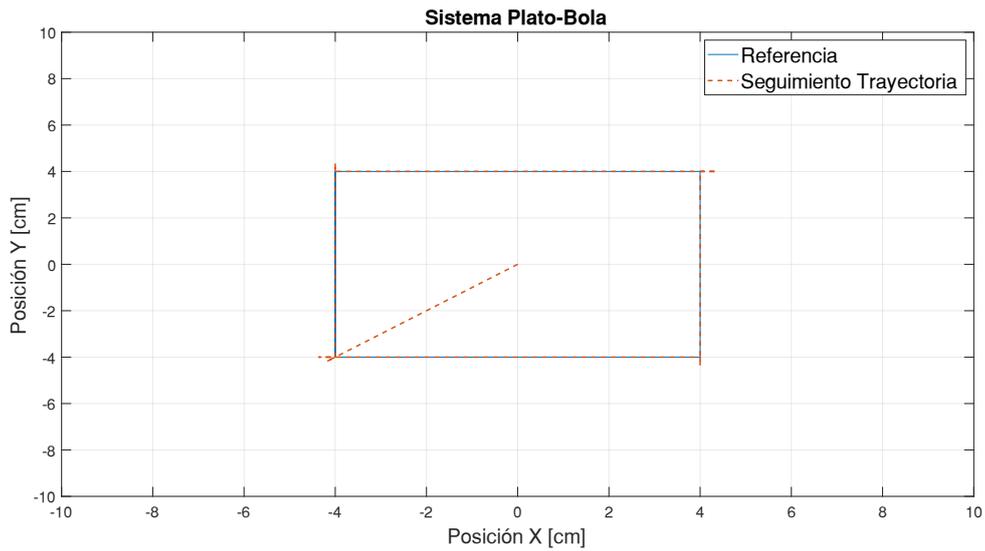


Figura 18. Seguimiento de la bola a una trayectoria cuadrada.

En la Tabla 3.7 se muestra el índice de desempeño ISE para cada uno de los ejes del sistema plato-bola

Tabla 2. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria de un cuadrado

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.006739
EJE Y	0.006821

Seguimiento de trayectoria circular

Para el seguimiento de la trayectoria circular se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes de amplitud 4 como indica la Figura 3.13, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia.

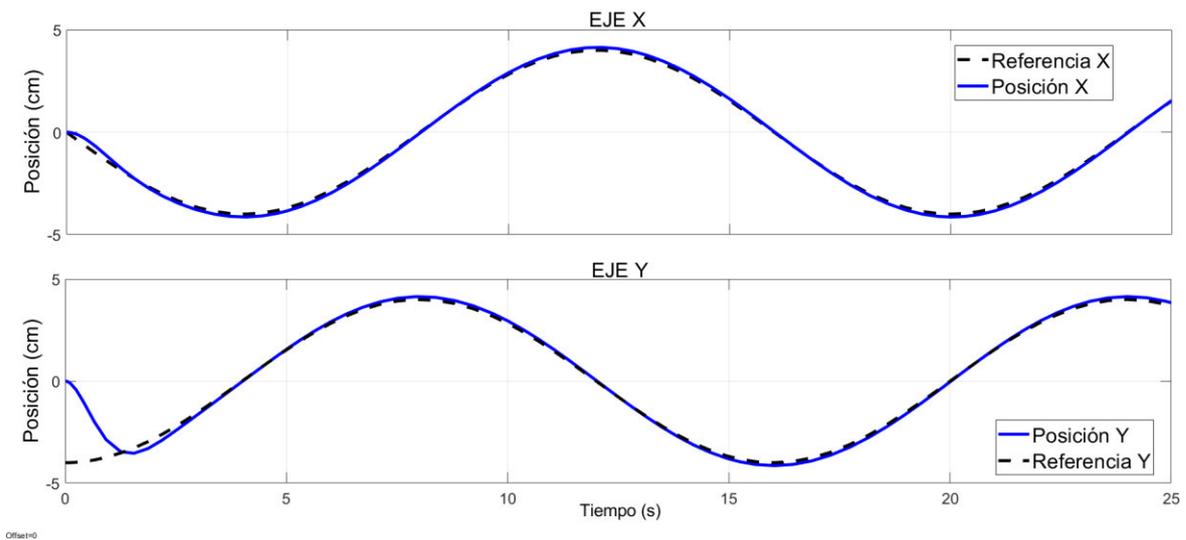


Figura 19. Respuesta del controlador PD al cambio de referencia de una señal senoidal en eje X y eje Y generando una trayectoria circular

En la Figura 3.14 de color azul se encuentra la referencia de la trayectoria circular y de color rojo el seguimiento de la trayectoria del sistema plato-bola, donde se puede determinar que presenta un pequeño error en estado transitorio.

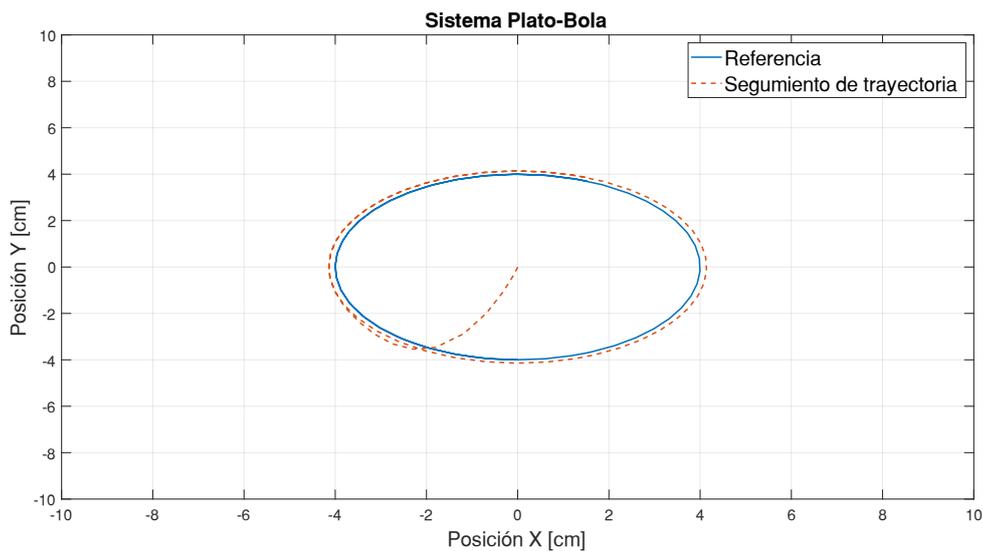


Figura 20. Seguimiento de la bola a una trayectoria circular.

Tabla 3. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria circular

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	3.473e-05
EJE Y	0.000777

Seguimiento de trayectoria lemniscata

Para el seguimiento de la trayectoria lemniscata se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes y diferente frecuencia como indica la Figura 3.15, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia en el eje Y, pero en el eje X se produce el error en estado transitorio debido a que se tiene una señal con mayor amplitud en el seguimiento de la trayectoria.

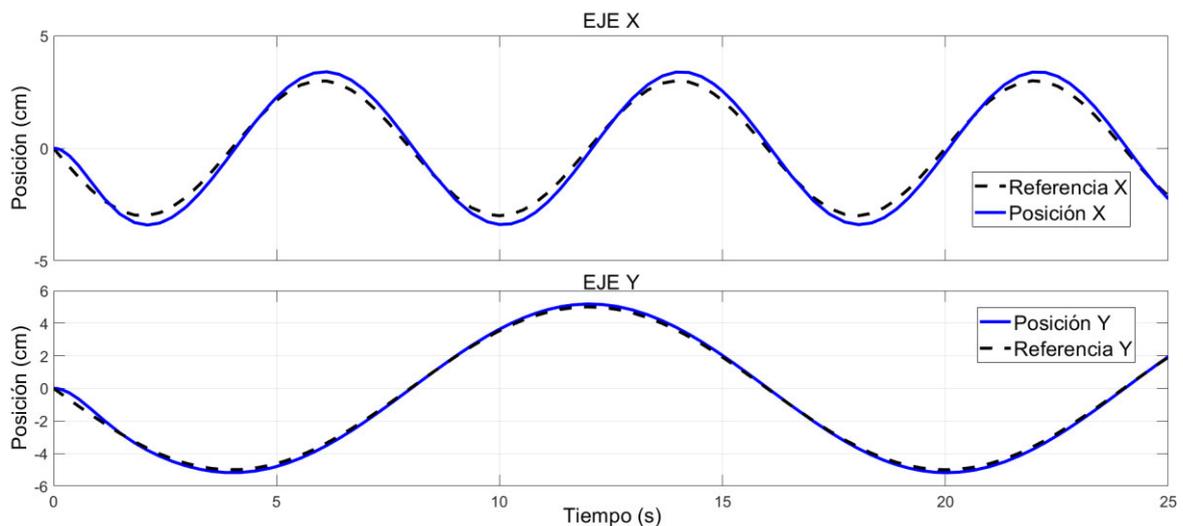


Figura 21. Respuesta del controlador PD al cambio de referencia de una señal senoidal en eje X y eje Y generaron una trayectoria lemniscata

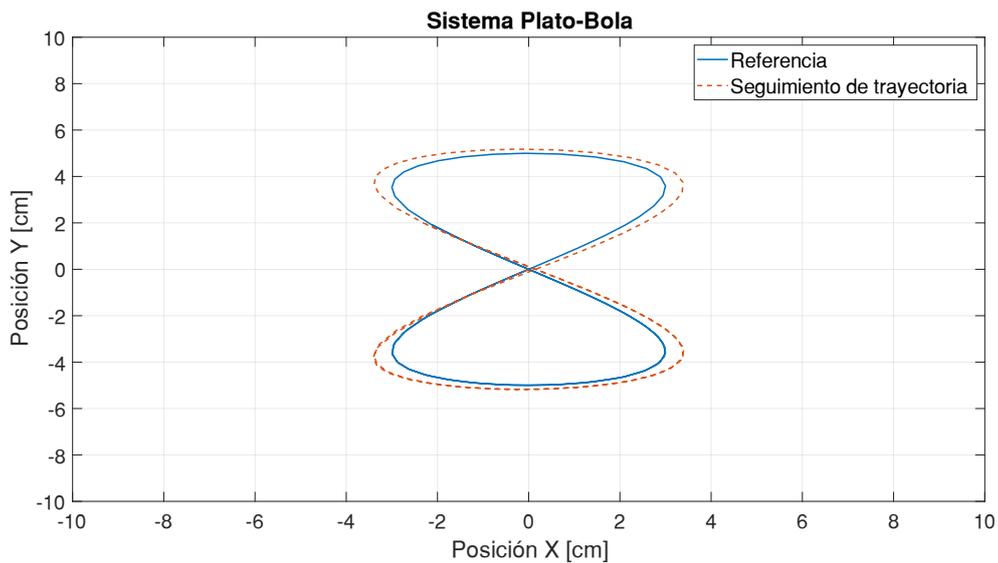


Figura 22. Seguimiento de la bola a una trayectoria lemniscata.

Tabla 4. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria lemniscata.

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.002488
EJE Y	5.474e-5

Una vez realizada la simulación para cada una de las trayectorias y el control de posición, se puede observar que el control PD responde muy bien a la señal de referencia implementada llevando a la bola a la referencia deseada con un bajo índice de desempeño y error en estado transitorio llegando a la referencia determinada o realizando el seguimiento de la trayectoria.

3.3 SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO

Una vez determinadas las funciones de membresía y las ganancias que se muestra en la Figura 2.13 se determina el valor de las constantes en base al PID sintonizado por el método de Ziegler y Nichols como se muestra en la Tabla 3.10 y se realiza la simulación para el análisis de la respuesta del controlador difuso Takagi-Sugeno.

Tabla 5. Ganancias para el controlador PD+I difuso Takagi-Suggeno

PD+I Takagi-Suggeno				
Método	G_e	G_{ce}	G_u	G_{ci}
Base PID	100	0.291*100	0.6/100	0*100

Se implementa el controlador difuso PD utilizando las ganancias de la Tabla 3.10 e ingresando las funciones de membresía descritas en el capítulo 2; utilizando el bloque de Simulink Fuzzy Logic Control y fuzzylogicdesigner, se utiliza una señal escalón para un cambio de posición desde el punto inicial 0 hasta el punto 4 y determinar la estabilidad del sistema Plato-bola como se muestra en la Figura 3.17.

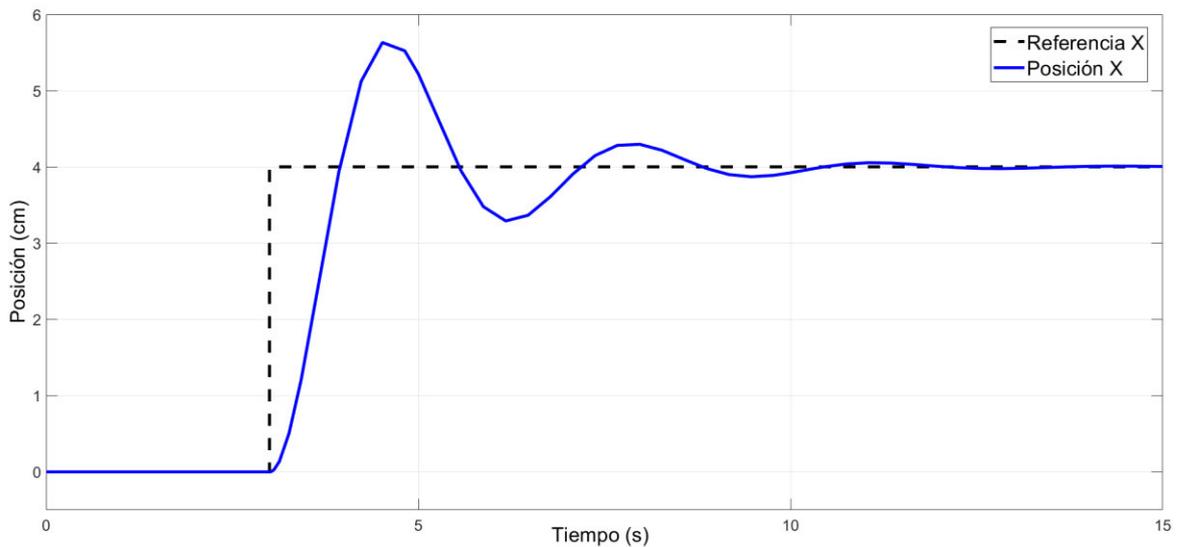


Figura 23. Respuesta del controlador PD difuso Takagi-suggeno al cambio de referencia de una señal escalon.

Para saber cuál es el resultado de la sintonización del controlador se analiza el índice de desempeño como se muestra en la Tabla 3.11. Cabe indicar que el M_p [%] se toma como uno de los puntos más críticos o puntos máximos de desplazamiento de la posición de la bola.

Tabla 6. Índice de desempeño del controlador PD difuso Takagi-Suggeno

	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	Índice de Desempeño ISE
CONTROLADOR DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	40.77	14	0.0009481

En base a los resultados de la Tabla 3.11 el controlado PD difuso Takagi-Suggeno presenta un M_p del 40% presentando un valor muy alto por lo que es necesario reducir a un valor inferior al 10%. Por lo cual se toma las constantes de controlador PD resintonizado de la Tabla 3.4, donde se obtiene una respuesta deseada como se muestra en la Figura 3.18

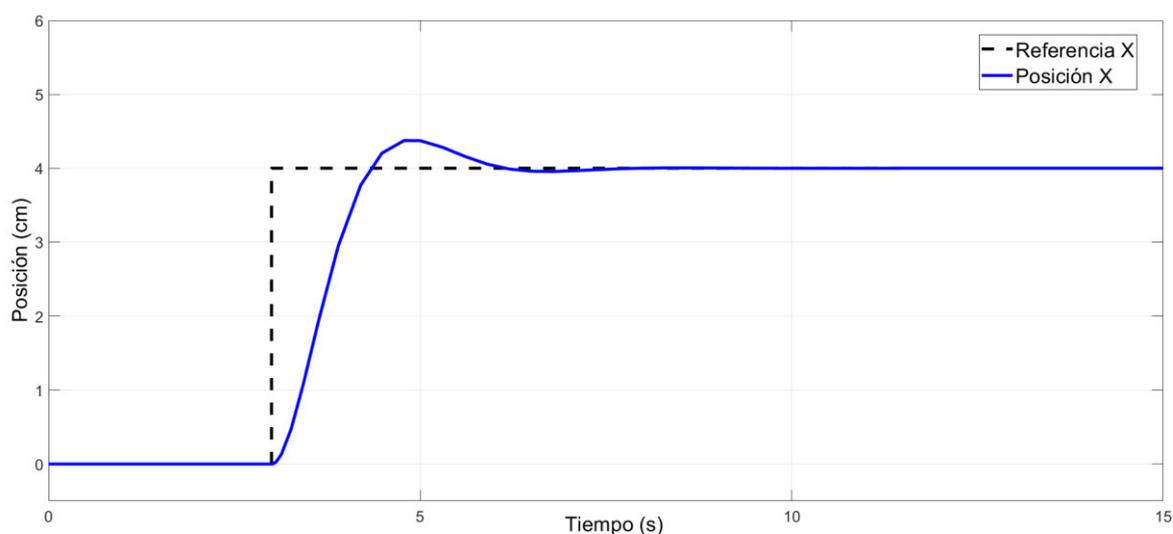


Figura 24. Respuesta de la resintonización del controlador PD al cambio de referencia de una señal escalon.

Visto que, se obtiene los resultados deseados se muestra las ganancias del controlador PD+I difuso Takagi-Suggeno en la Tabla 3.11 y los valores cuantitativos y el índice de desempeño del controlador en la Tabla 3.12.

Tabla 7. Ganancias para el controlador PD+I difuso Takagi-Suggeno

PD+I Takagi-Suggeno				
Método	G_e	G_{ce}	G_u	G_{ci}
Base PID	100	0.591*100	0.6/100	0*100

Tabla 82. Índice de desempeño del controlador PD+I difuso Takagi-Suggeno

	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	Índice de Desempeño ISE
PD	9.37	8	0.0007798

Logrando obtener una mejor respuesta transitoria y reducir el índice de desempeño ISE, a continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación para el control de posición en un punto específico y el seguimiento de trayectorias (circulo, cuadrado y 8).

Control de posición

Se implementa un cambio de referencia desde la posición (0,0) hasta la posición (3,4). En la Figura 3.19 se muestran los resultados para el cambio de referencia de posición y en la Figura 3.20 el desplazamiento realizado por la bola

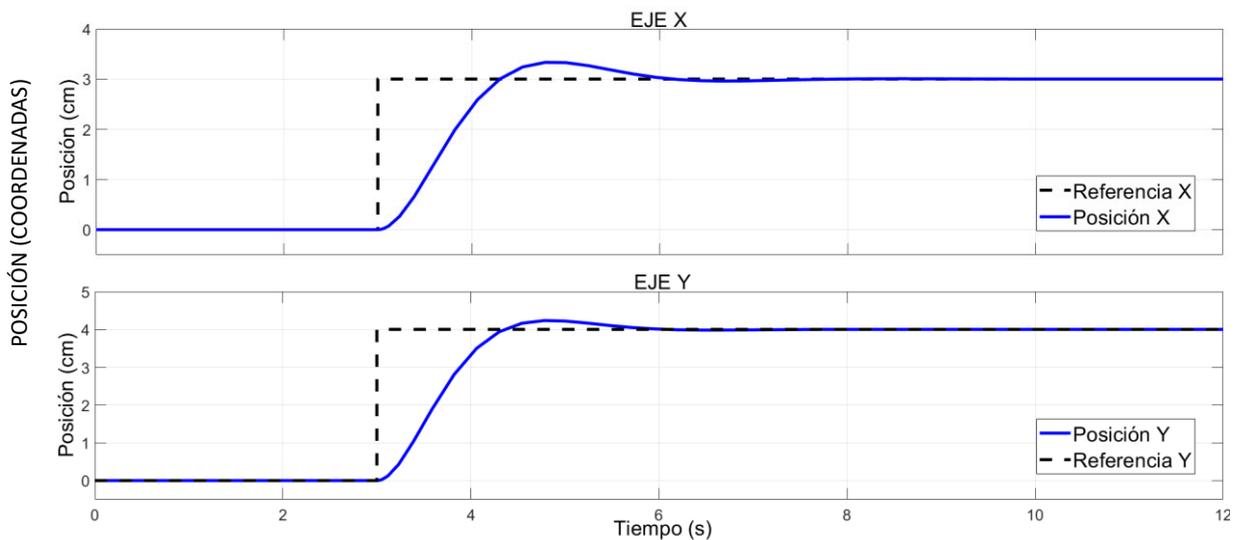


Figura 25. Respuesta del controlador PD+I difuso Takagi-Sugeno al cambio de referencia de una señal escalon en eje X y eje Y

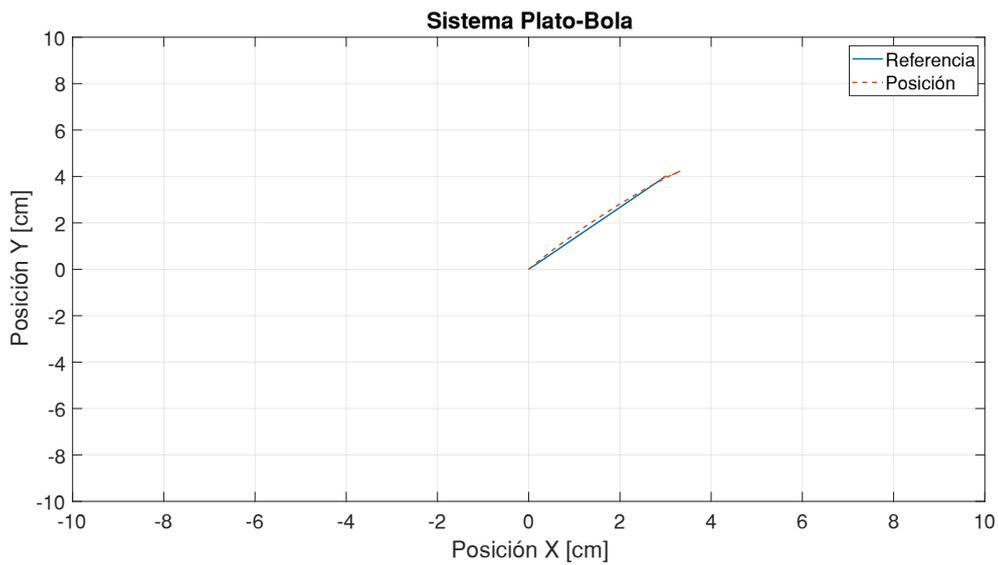


Figura 26. Desplazamiento de la bola al cambio de posición.

Para un tiempo de 12 seg de simulación se determina el índice de desempeño para el eje X y el eje Y como se muestra en la Tabla 3.13. Se puede observar que el controlador tiene una respuesta con mayor oscilación para estabilizar la bola en la posición deseada.

Tabla 9. Índice de desempeño al cambio de referencia de una señal escalón.

	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	Índice de Desempeño ISE
EJE X	11.03	7	0.0004485
EJE Y	5.85	6	0.0007298

Seguimiento de trayectoria cuadrada.

Para el seguimiento de la trayectoria cuadrada se implementa una señal cuadrangular de amplitud 4 como indica la Figura 3.21, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia generando un M_p reducido menor al 10% y error de estado transitorio.

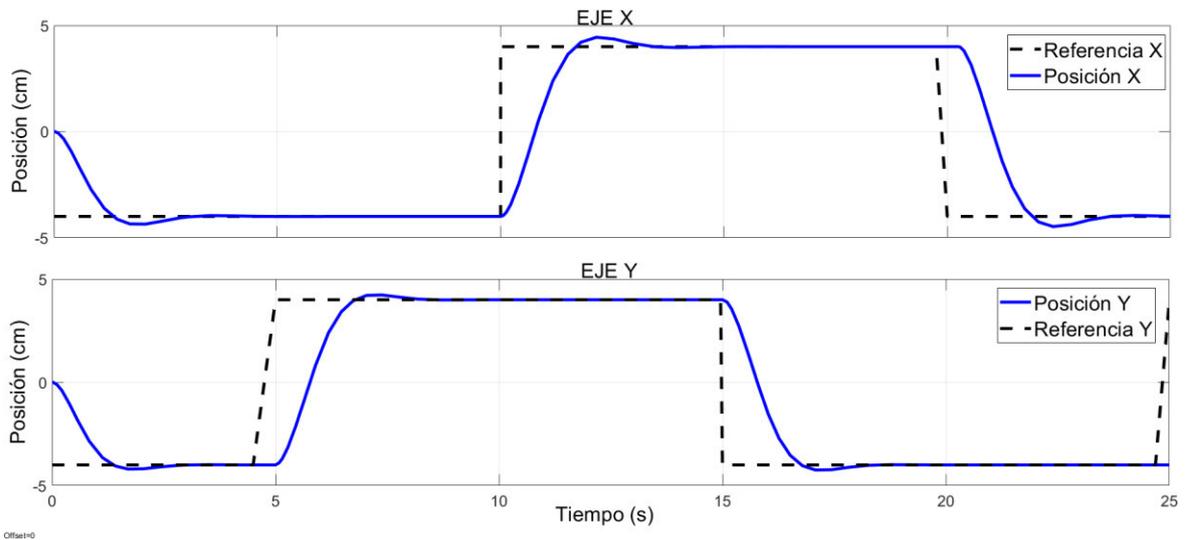


Figura 27. Respuesta del controlador PD+I difuso Takagi-Suggeno al cambio de referencia de una señal cuadrada en eje X y eje Y generando una trayectoria cuadrada

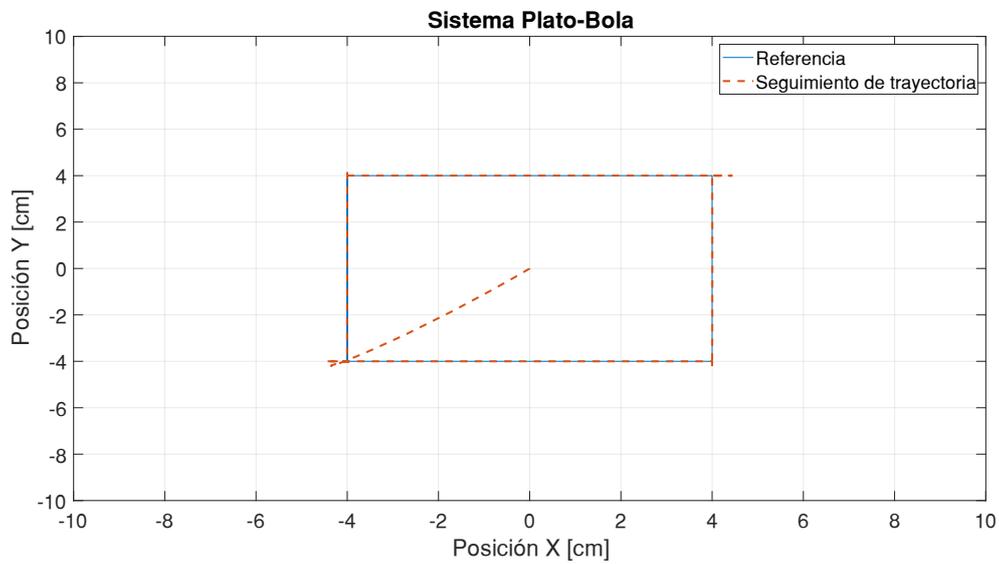


Figura 28. Seguimiento de la bola a una trayectoria cuadrada.

Tabla 10. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria de un cuadrado

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.00964
EJE Y	0.00803

Seguimiento de trayectoria circular

Para el seguimiento de la trayectoria circular se implementa una señal senoidal de amplitud 4 con un desfase en uno de los ejes como indica la Figura 3.23, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia.

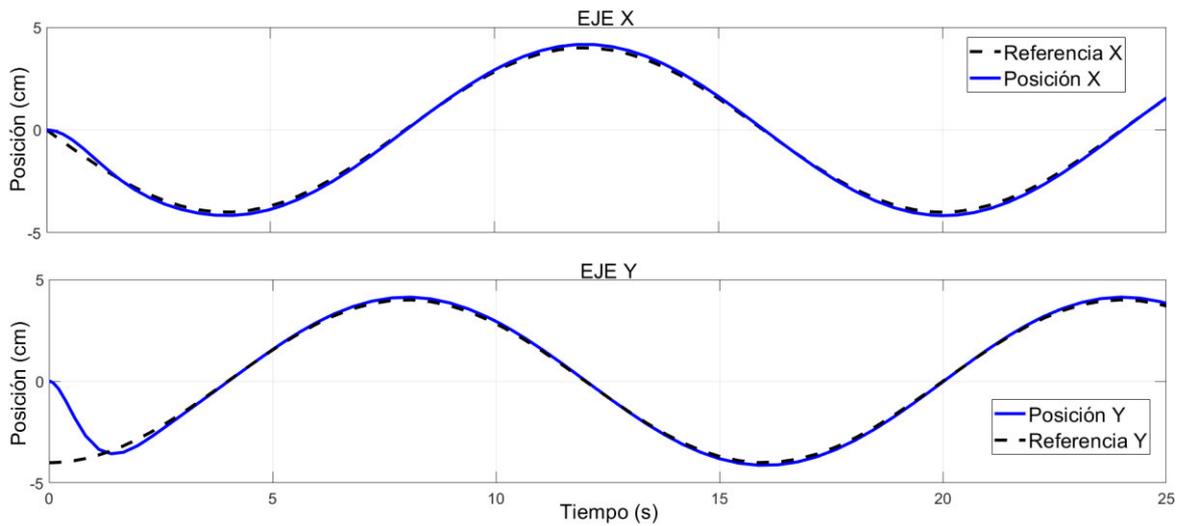


Figura 29. Respuesta del controlador PD+I difuso al cambio de referencia de una señal senoidal en eje X y eje Y generando una trayectoria circular

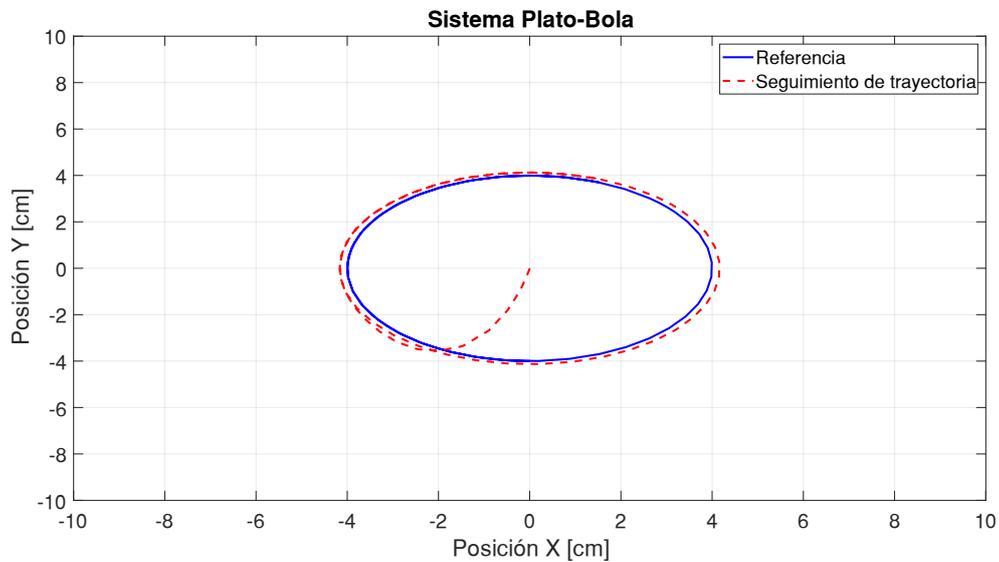


Figura 30. Seguimiento de la bola a una trayectoria circular.

Tabla 11. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria circular

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.0008741
EJE Y	0.001326

Seguimiento de trayectoria lemniscata

Para el seguimiento de la trayectoria lemniscata se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes y diferente frecuencia como indica la Figura 3.25, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia en el eje Y, pero en el eje X se produce el error en estado transitorio debido a que se tiene una señal con mayor amplitud en el seguimiento de la trayectoria.

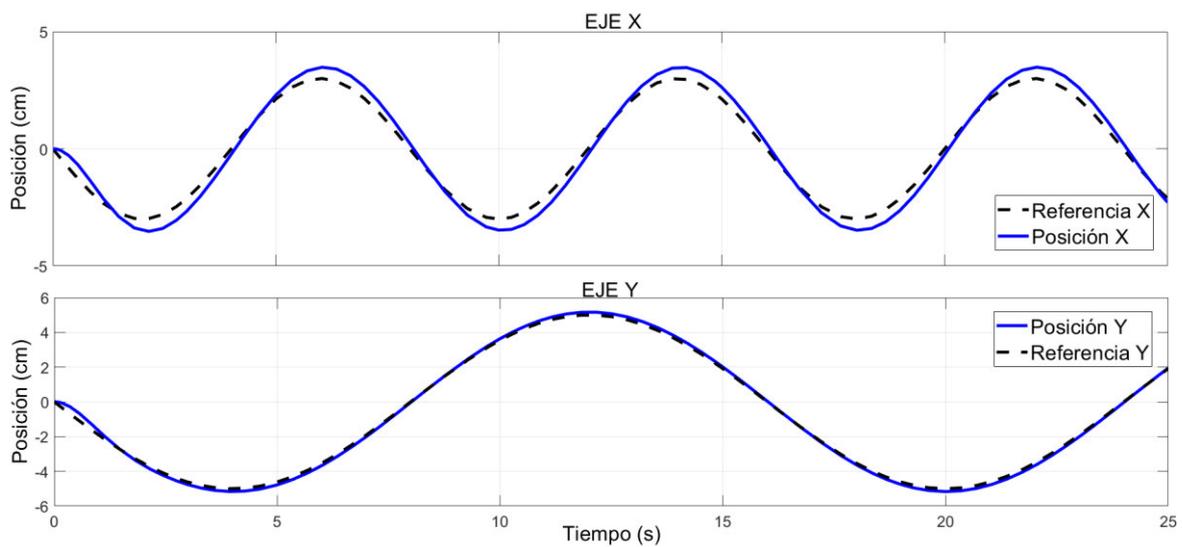


Figura 31. Respuesta del controlador PD+I difuso Takagi-Sugeno al cambio de referencia de una señal senoidal en eje X y eje Y generados una trayectoria lemniscata

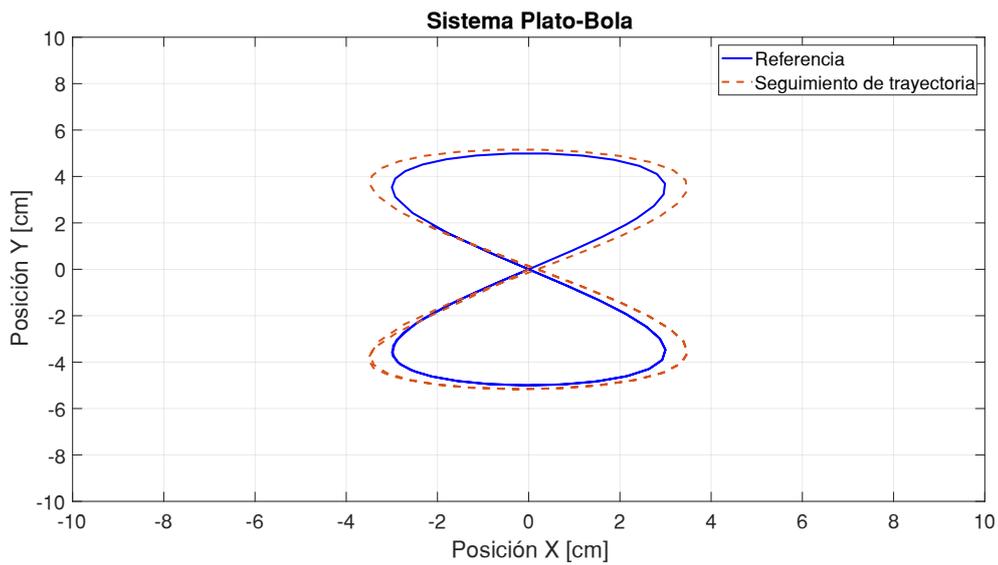


Figura 32. Seguimiento de la bola a una trayectoria lemniscata.

Tabla 12. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria lemniscata.

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.0003633
EJE Y	4.287e-5

El controlador difuso PD+I Takagi-Sugeno es aplicado a sistemas donde no se tiene información del modelo matemático, se realizaron las simulaciones para observar el comportamiento del controlador, pero el objetivo de la implementación de este controlador es en el funcionamiento del sistema utilizando la planta real.

Basándonos en los índices de desempeño del controlador PID y difuso PD+I Takagi-Sugeno en simulación se puede determinar que el controlador con un mejor desempeño es el PID, tiene a estabilizarse en un tiempo menor y su máximo sobrepico es también se reduce ante un cambio de posición con una señal escalón.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL PID SINTONIZADO POR ZIEGLER Y NCHOLS Y ESQUEMA DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO

Una vez realizadas las pruebas de los controladores en simulación se continua a implementar en la planta física realizando las pruebas y obteniendo los resultados para el seguimiento de las trayectorias (cuadrado, circulo, lemniscata) y la estabilización en un punto determinado.

Debido a que la bola no puede iniciar en el punto de coordenadas (0,0) de la tabla debido a que por las condiciones físicas reales tiende a estar en movimiento y evitar tener diferentes resultados se le coloca en dicha posición con la intervención del usuario hasta iniciar la simulación. Así, logramos tener un punto inicial y fijo de partida para la bola y poder realizar una comparación de respuesta entre los controladores implementado teniendo los siguientes resultados.

3.4.1 RESPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID.

Realizando las pruebas del controlador utilizando la planta física, se puede determinar que es necesario incorporar la constante integral, para reducir el error del sistema. De manera que, para los resultados se realiza con la implementación de un control PID como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 13. Constantes del controlador PID.

PID			
Método	kp	Td	Ti
Propuesto Z-N	0.6	0.291	1.164
Implementado Z-N	0.4	0.521	83.33

Control de posición.

Se implementa un cambio de referencia desde la posición (0,0) hasta la posición (3,4). En la Figura 3.27 se muestran los resultados para el cambio de referencia de posición y en la Figura 3.28 el desplazamiento realizado por la bola

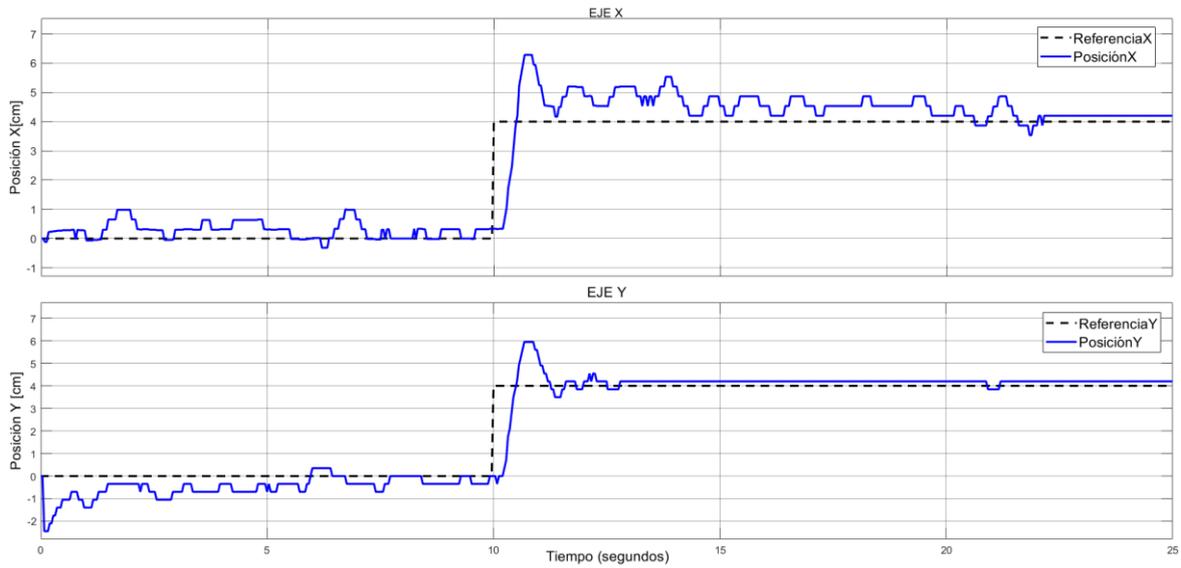


Figura 33. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal paso

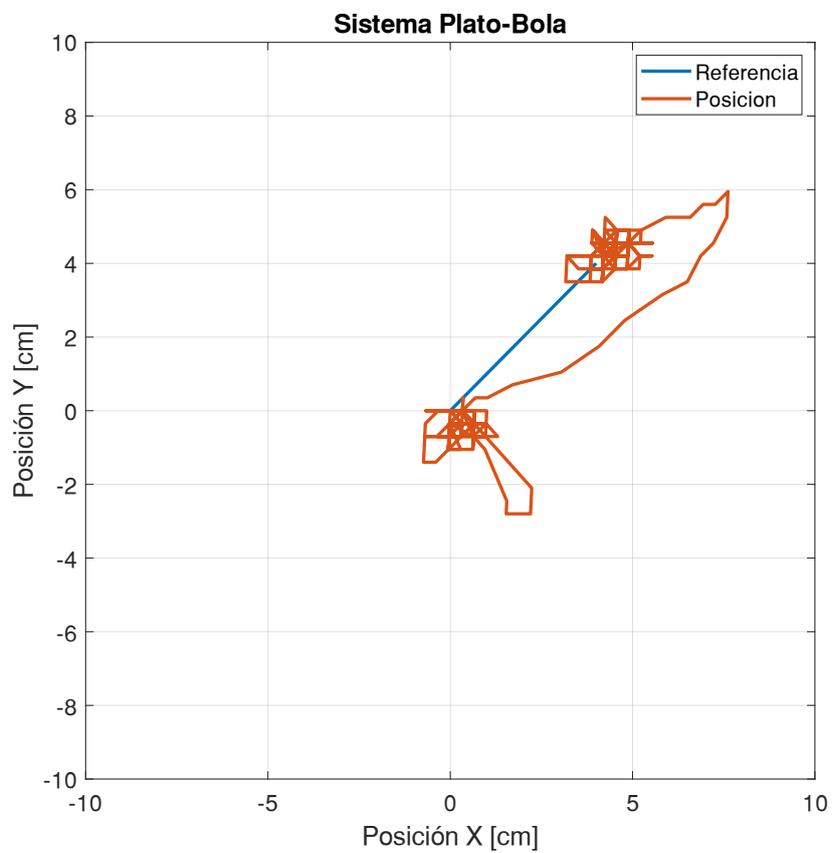


Figura 34. Respuesta de la señal en el eje Y ante una señal paso

Tabla 14. Índice de desempeño al cambio de referencia de una señal escalón.

	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [seg]	Índice de Desempeño ISE
EJE X	4.44	2.88	0.00133
EJE Y	6.023	3.4	0.0012

Con los resultados obtenidos se puede determinar que la bola presenta error en estado estable y llegando a estabilizarse cerca de los puntos establecidos como referencia. Ya que, estas oscilaciones pueden ser causadas por interferencias en el sistema implementado.

Seguimiento de trayectoria cuadrada.

Para el seguimiento de la trayectoria cuadrada se implementa una señal cuadrangular de amplitud 4 con desfase como indica la Figura 3.29 y en la Figura 3.30 la trayectoria realizada por la bola en color rojo respecto a la señal de referencia en color azul.

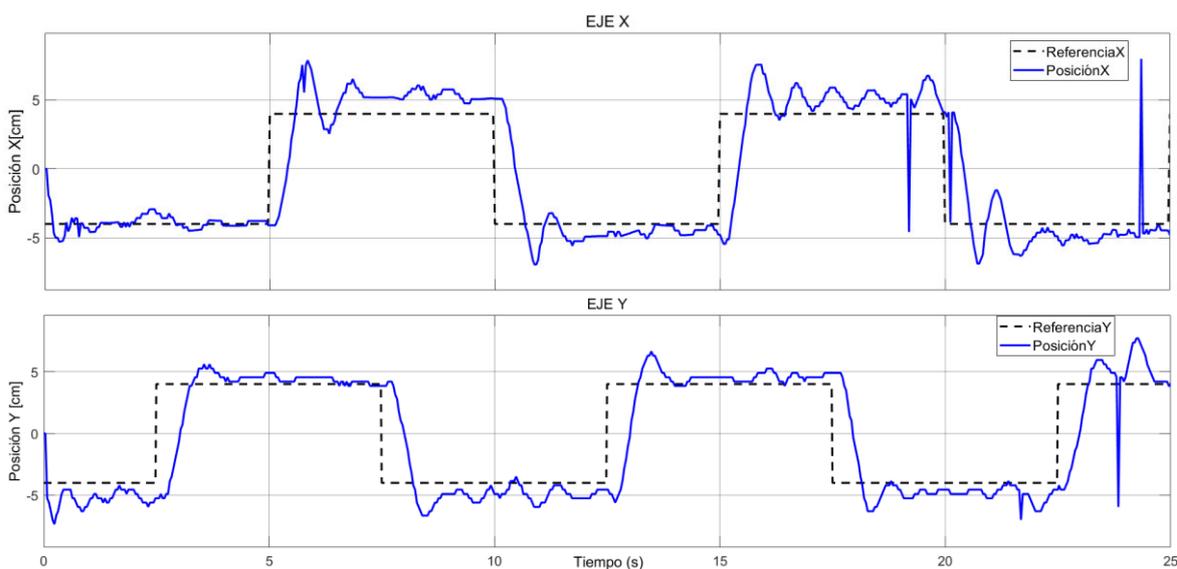


Figura 35. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal cuadrada

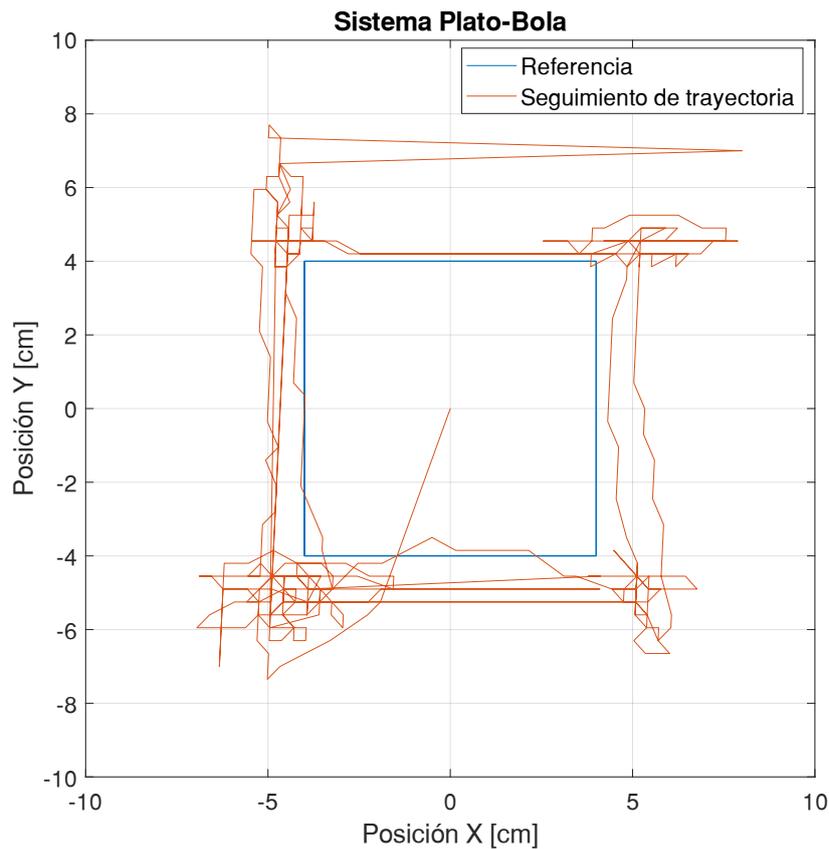


Figura 36. Respuesta del sistema para seguimiento de trayectoria cuadrada

Tabla 15. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria de un cuadrado

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.01474
EJE Y	0.01894

Con los resultados obtenidos se puede determinar que la bola realiza una trayectoria de color rojo con un considerable desfase de la trayectoria de referencia en color azul. Se tiene un error transitorio lo que afecta al índice de desempeño.

Seguimiento de trayectoria circular.

Para el seguimiento de la trayectoria circular se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes de amplitud 4 como indica la Figura 3.13, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia.

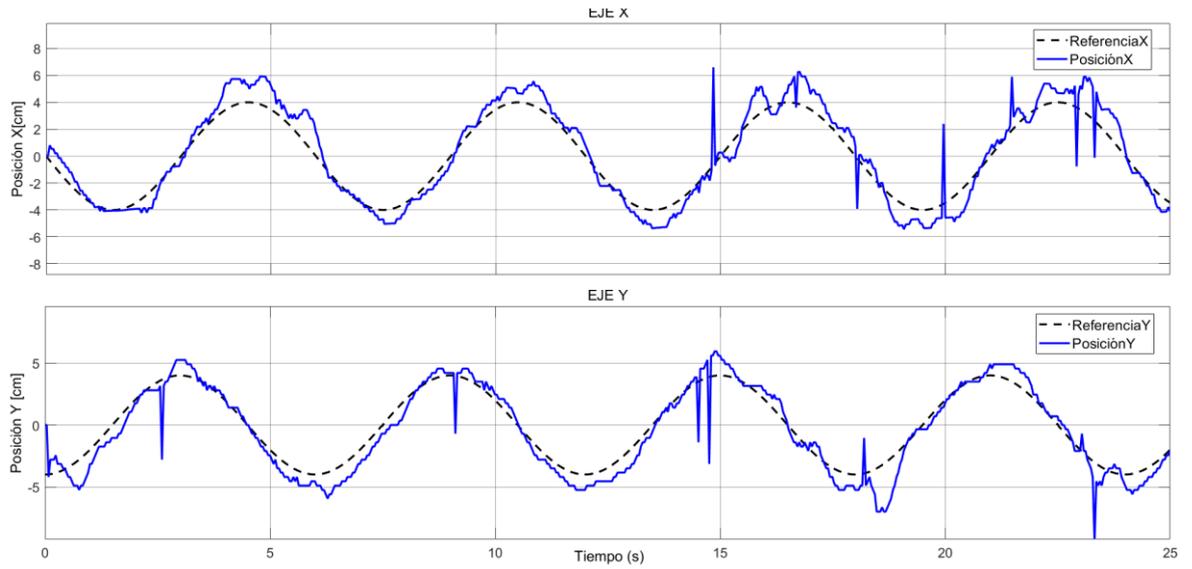


Figura 37. respuesta de la señal en el eje X ante una señal senoidal

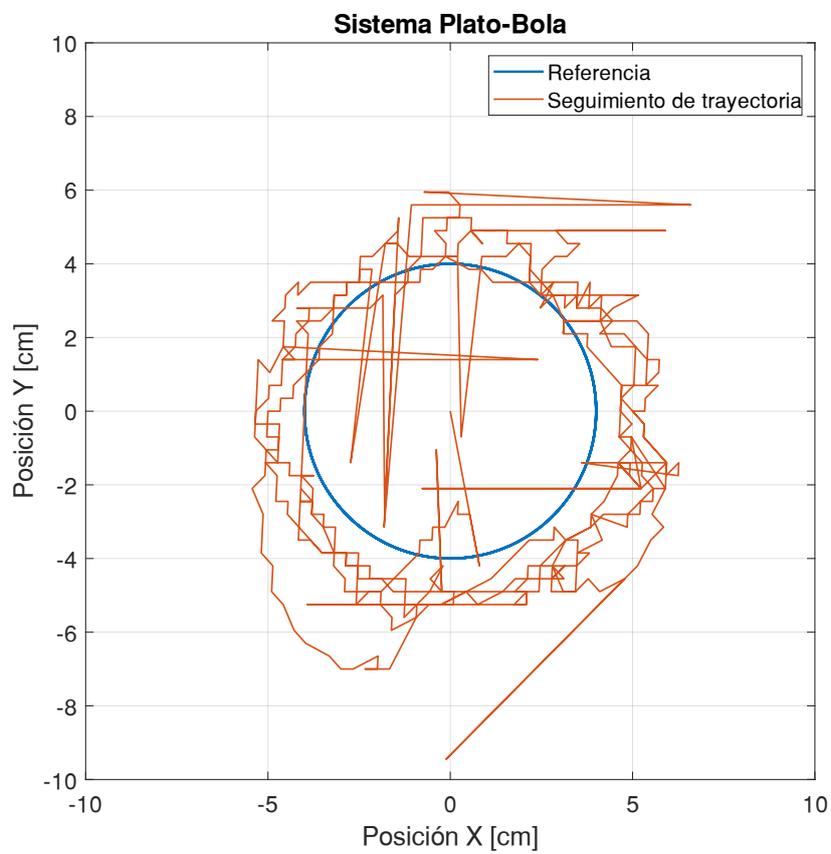


Figura 38. Respuesta del sistemas a la trayectoria circular

Tabla 16. Índice de desempeño para el seguimiento de trayectoria circular

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.00322
EJE Y	0.00452

Ahora bien con los resultados obtenidos se determina un mal desempeño para el seguimiento de una trayectoria circular, teniendo un sistema lento y que presenta oscilaciones continuas lo que provoca que la bola pierda el seguimiento de la trayectoria.

Seguimiento de trayectoria lemniscata

Para el seguimiento de la trayectoria lemniscata se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes y diferente frecuencia como indica la Figura 3.33, además en la Figura 3.34 se muestra el seguimiento de la trayectoria por parte la bola en color rojo y la trayectoria de referencia en color azul.

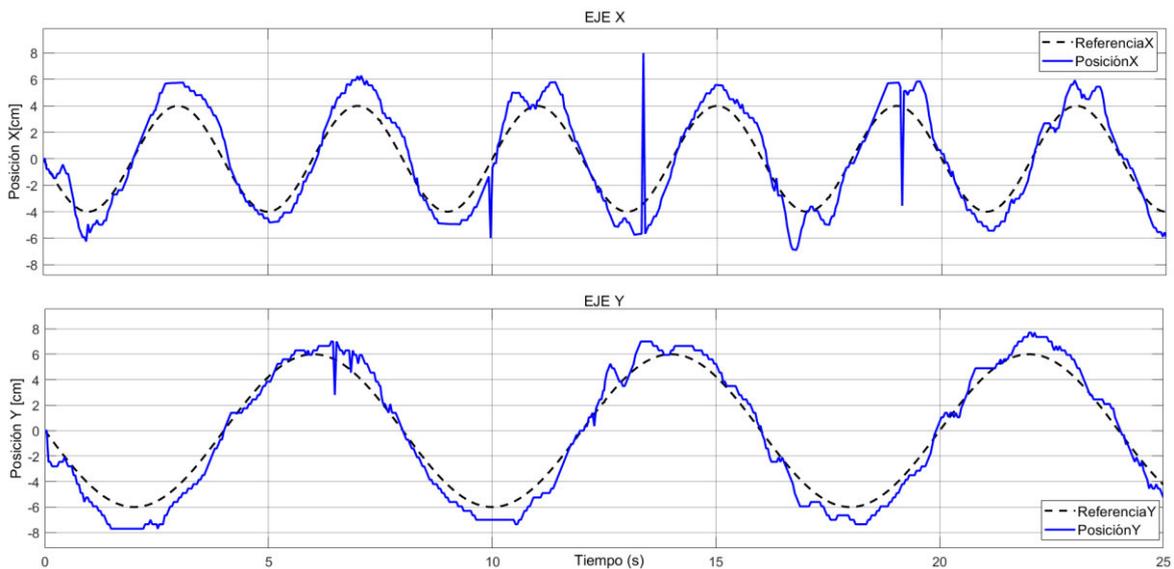


Figura 39. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal senoidal

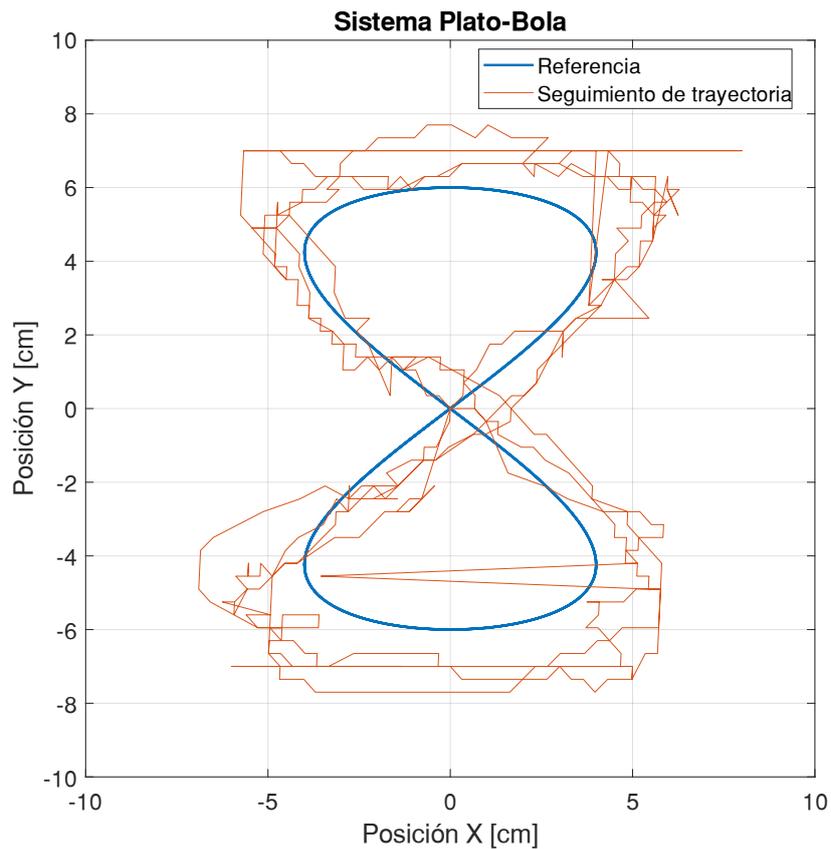


Figura 40. Respuesta del sistema al seguimiento de trayectoria lemniscata

Tabla 17. Índice de desempeño para el seguimiento de trayectoria lemniscata

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.00307
EJE Y	0.00456

En base a los resultados obtenido se puede observar que la posición de la bola tiende a seguir la señal de referencia, teniendo un desfase y generando error en los cambios de dirección para generar la curva de la trayectoria.

3.4.2 RESPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO.

Se implemento el controlador diseñado en el capítulo dos, con las constates de la Tabla 3.32. Para lo cual se realiza las pruebas para el control de posición y seguimiento de trayectorias.

Tabla 18. Índice de desempeño para el seguimiento de trayectoria #8

PD+I Takagi-Suggeno				
Método	G_e	G_{ce}	G_u	G_{ci}
Base PID Propuesto	100	0.291*100	0.6/100	0
Base PID Implementado	100	49.1	0.006	1.2

Control de posición

Se implementa un cambio de referencia desde la posición (0,0) hasta la posición (3,4). En la Figura 3.35 se muestran los resultados para el cambio de referencia de posición y en la Figura 3.36 el desplazamiento realizado por la bola

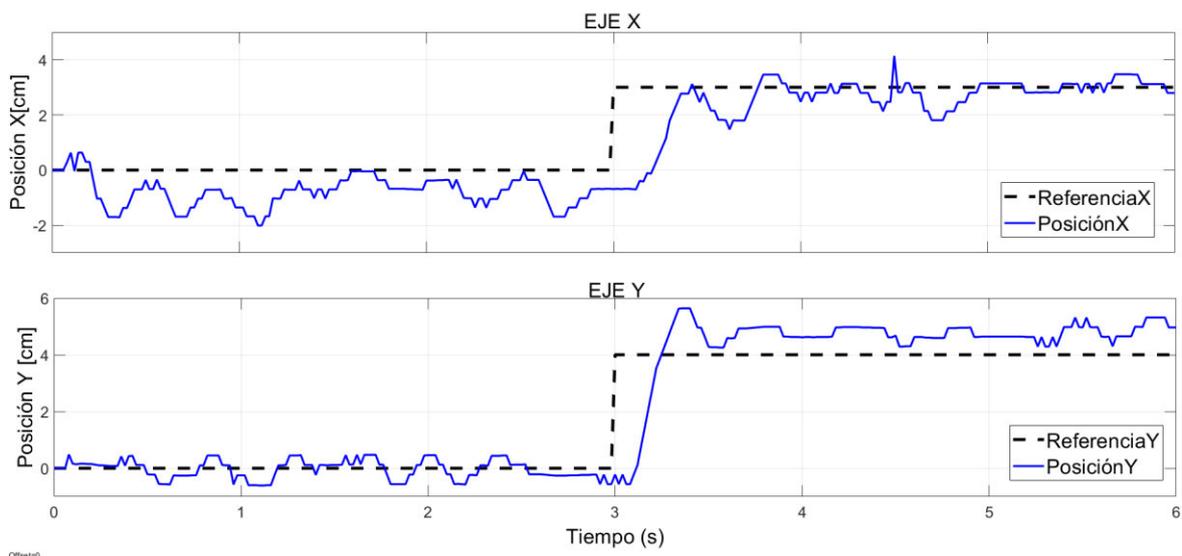


Figura 41. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal paso

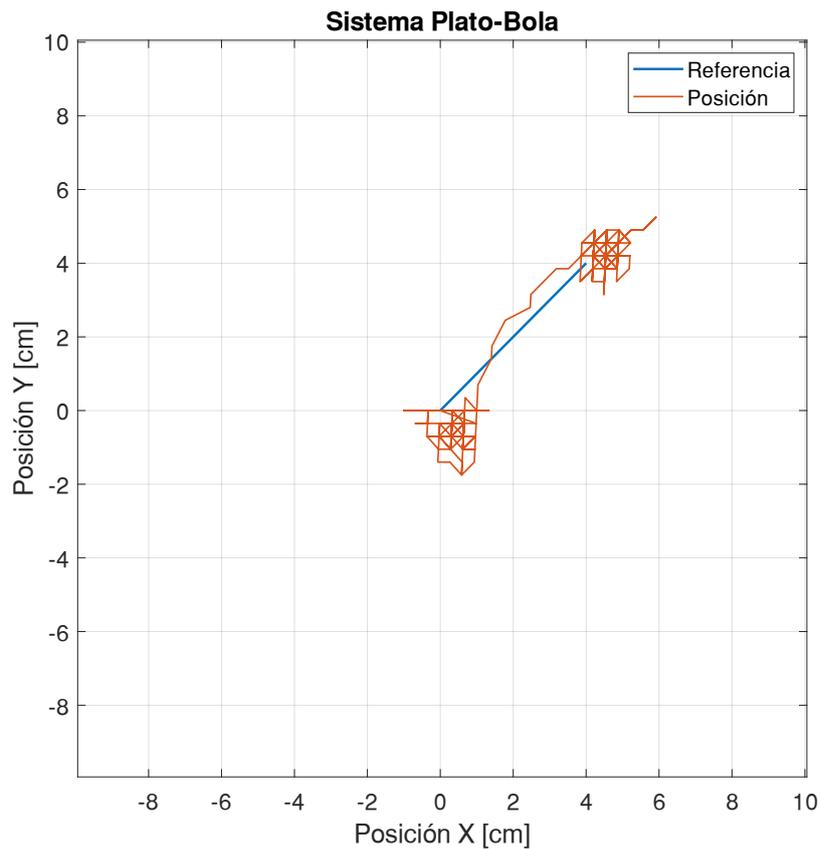


Figura 42. Respuesta del sistema al control de posición.

Tabla 19. Índice de desempeño al cambio de referencia de una señal escalón.

	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [seg]	Índice de Desempeño ISE
EJE X	4.76	3.84	0.00148
EJE Y	6.047	2.24	0.00221

En base a las respuestas obtenidas se puede determinar que el la bola tiende a estabilizarse en la posición de referencia en un tiempo rapido y un sobrepico considerado lo que causa que se genere un movimiento oscilatorio para llegar a la estabilizacion.

Seguimiento de trayectoria cuadrada.

Para el seguimiento de la trayectoria cuadrada se implementa una señal cuadrangular de amplitud 4 con desfase como indica la Figura 3.37 y en la Figura 3.38 la trayectoria realizada por la bola en color rojo respecto a la señal de referencia en color azul.

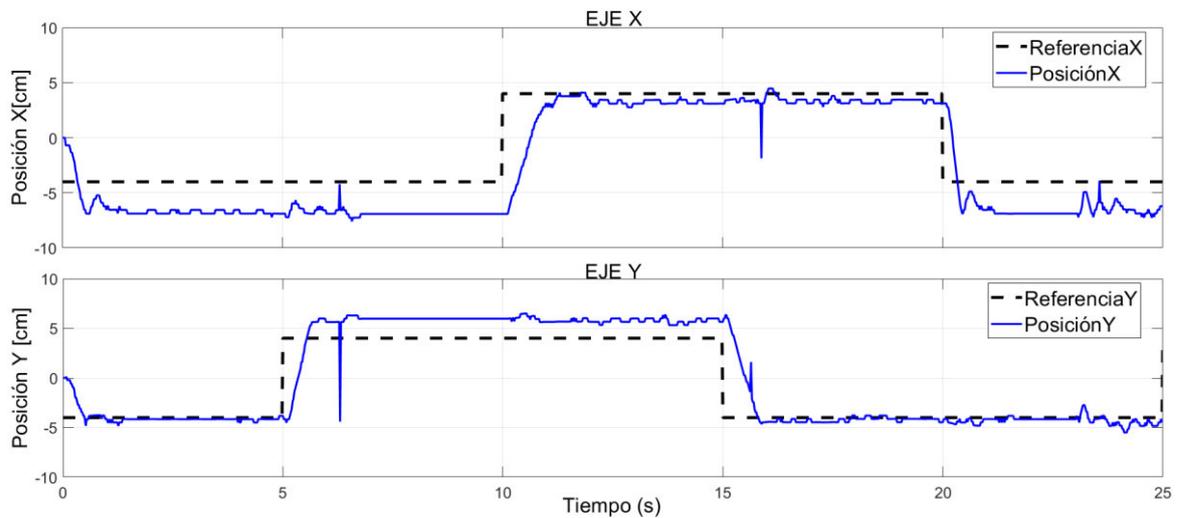


Figura 43. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal cuadrada

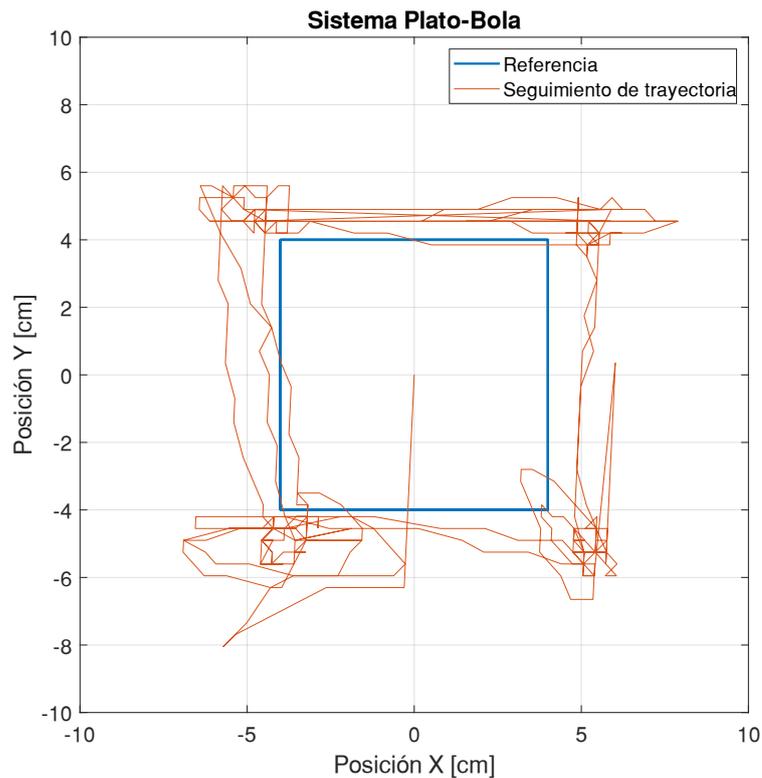


Figura 44. Respuesta del sistema para seguimiento de trayectoria cuadrada

Tabla 20. Índice de desempeño del seguimiento de trayectoria de un cuadrado

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.00686
EJE Y	0.00454

En base a las respuestas obtenidas se puede observar que el sistema genera un error considerable alto en el eje X manteniéndose desfaso de la señal de referencia probocando movimientos brusco en su trayectoria.

Seguimiento de trayectoria circular

Para el seguimiento de la trayectoria circular se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes de amplitud 4 como indica la Figura 3.39, además, se puede observar que el sistema tiende a seguir a la referencia de color azul con una trayectoria de color roja como se muestra en la Figura 3.40.

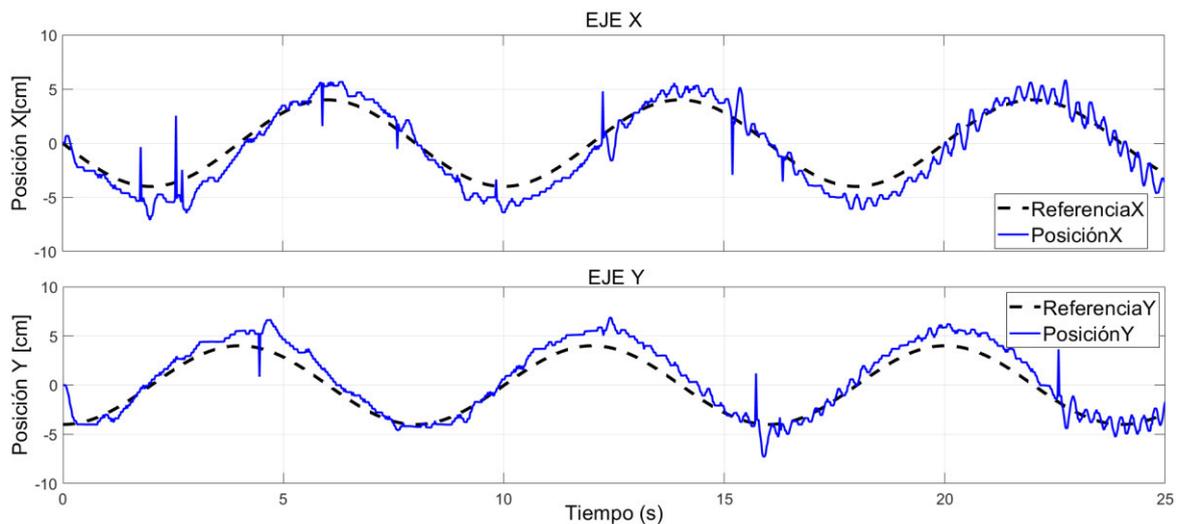


Figura 45. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal senoidal.

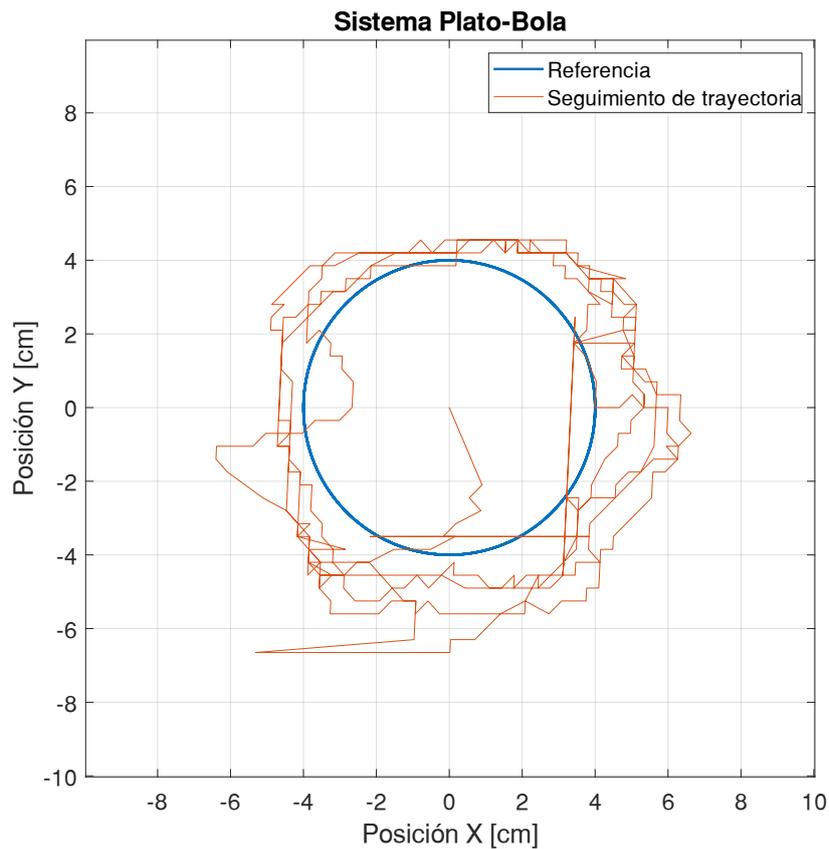


Figura 46. Respuesta del sistemas a la trayectoria circular.

Tabla 21. Índice de desempeño para el seguimiento de la trayectoria circular.

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.00522
EJE Y	0.00514

En base a los resultados obtenidos se puede determinar que con el controlador difuso Takagi-Suggeno la bola tiende a seguir a la referencia, además en toda su trayectoria tiene un error en régimen transitorio lo que genera una señal con pequeñas oscilaciones alrededor de su referencia.

Seguimiento de trayectoria lemniscata

Para el seguimiento de la trayectoria lemniscata se implementa una señal senoidal con un desfase en uno de los ejes y diferente frecuencia como indica la Figura 3.41, además en la Figura 3.42 se muestra el seguimiento de la trayectoria por parte la bola en color rojo y la trayectoria de referencia en color azul.

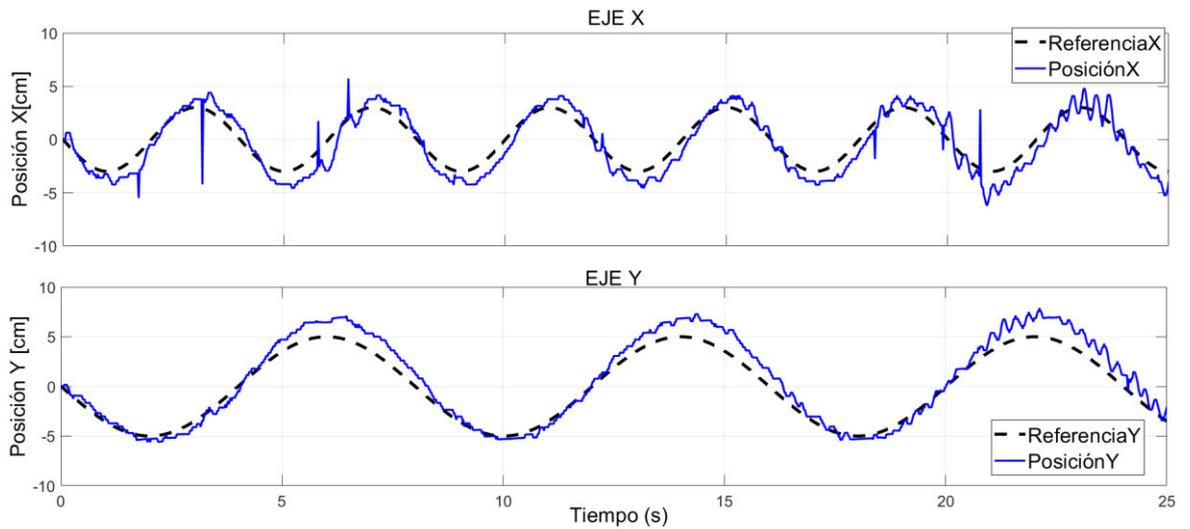


Figura 47. Respuesta de la señal en el eje X ante una señal senoidal.

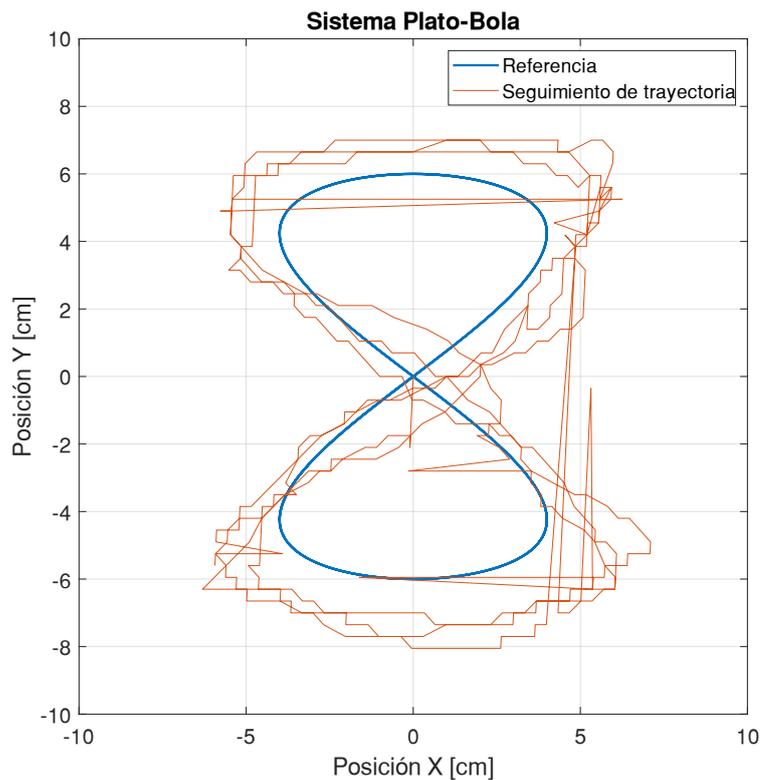


Figura 48. Respuesta del sistema al seguimiento de trayectoria lemniscata.

Tabla 22. Índice de desempeño para el seguimiento de trayectoria lemniscata

EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
	ISE
EJE X	0.00408
EJE Y	0.00308

En base a los resultados obtenidos se determina que el controlador genera movimientos bruscos al realizar el seguimiento de la trayectoria, generando un desfase con la señal de referencia y generando un alto error en el estado transitorio del sistema.

En la implementación y ejecución de los diferentes controladores aplicados al sistema plato-bola para la estabilización en un punto específico o seguimiento de trayectoria, se presentan pequeñas señales de interferencia debido al cableado de conexión entre la pantalla táctil y el Arduino Uno. Estas señales de interferencia pueden ser causadas por la velocidad de transmisión de datos a 115200 baudios y por el movimiento de las conexiones.

3.5 COMPARACIÓN DEL ÍNDICE CUADRÁTICO INTEGRAL DE LOS ESQUEMAS DE CONTROL.

Para determinar cuál de los controladores presenta mejor respuesta al seguimiento de trayectoria y control de posición se realizará la comparación analítica del ISE (integral cuadrática del error) tanto para la simulación y como para la implementación.

Además, para el control de posición como utiliza una señal escalón como referencia podemos analizar el índice de desempeño del t_s (tiempo de establecimiento) y M_p (máximo sobrepico) para determinar que controlador presenta un mejor desempeño.

Índice de desempeño para el control de posición

A continuación, se realiza la comparación en la Tabla 3.27 comparando la respuesta de los índices de desempeño de los controladores para la simulación

Tabla 23. Comparación de índice de desempeño controladores en simulación para el control de posición

CONTROLADOR	EJE	Máximo sobrepico M_p [%]	Tiempo de establecimiento t_s [min]	Índice de Desempeño ISE
PD	EJE X	5.84	7	0.0004395
	EJE Y	5.81	6	0.0007347
DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	EJE X	10.98	8	0.0004547
	EJE Y	5.83	7	0.0007805

En simulación el control PD tiene valores de índice de desempeño menor al control difuso PD+I Takagi-Suggeno, esto favorece al control PD ya que el diseño es basado en la ecuación de la aproximación lineal del modelo matemático de la planta. En la tabla previa de color verde se indica los valores que favorecen al control PD logrando estabilizar a la bola en un menor tiempo, el sobrepico al llegar a la referencia es menor al 10% por lo que genera un menor ISE.

Además, para analizar los valores del índice de desempeño en la implementación se calcula el promedio de la toma de 5 valores de los diferentes índices de desempeño de cada controlador para un mismo tiempo de simulación y se tiene los resultados que se muestra en las siguiente Tabla 3.28

Tabla 24. Comparación de índice de desempeño de los controladores en la implementación para el control de posición.

CONTROLADOR	EJE	ISE
PID	EJE X	0.00099
	EJE Y	0.00144
DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	EJE X	0.001472
	EJE Y	0.001742

En base al índice de desempeño ISE se indica de color verde que para el controlador PID tiene índices más bajo generando un menor error y estabilizando la bola lo más cerca del punto de referencia establecido.

ISE para el seguimiento de una trayectoria cuadrada.

En la Tabla 3.29 se muestran los valores para comparación del ISE de los controladores implementados y de color verde se indica el valor del mejor desempeño de los controladores implementados.

Tabla 25. Comparación del ISE de los controladores en simulación para el seguimiento de una trayectoria cuadrada

CONTROLADOR	EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
		ISE
PD	EJE X	0.006739
	EJE Y	0.006821
DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	EJE X	0.00964
	EJE Y	0.00803

De la misma manera el controlador PD tiene valores de ISE favorables en su diseño y pruebas de simulación demostrando que para el control PD el error es más pequeño.

En la Tabla 3.30 se muestran el promedio de la toma de 5 valores del índice de desempeño ISE de cada controlador para un mismo tiempo de simulación.

Tabla 26. Comparación del ISE de los controladores implementados para el seguimiento de una trayectoria cuadrada

CONTROLADOR	EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
		ISE
PDI	EJE X	0.01153
	EJE Y	0.01271
DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGGENO	EJE X	0.01375
	EJE Y	0.01517

De igual manera de color verde si visualiza los valores más bajos de índice de desempeño y son favorables para el control PID, aunque sus respuestas son muy oscilatorias el seguimiento de trayectoria con el control PID se acerca más a la trayectoria de referencia.

ISE para el seguimiento de una trayectoria circular.

En la Tabla 3.31 se muestran los valores para comparación del ISE de los controladores implementados

Tabla 27. Comparación del ISE de los controladores en simulación para el seguimiento de una trayectoria circular

CONTROLADOR	EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
		ISE
PD	EJE X	3.473 e-5
	EJE Y	0.000777
DIFUSO PD+I	EJE X	0.000874
TAKAGI-SUGGENO	EJE Y	0.00132

De la misma manera el controlador PD tiene valores de ISE favorables en su diseño y pruebas de simulación como se indica de color verde generando un pequeño error en el seguimiento de la trayectoria circular.

En la Tabla 3.32 se muestran el promedio de la toma de 5 valores de ISE de cada controlador para un mismo tiempo de simulación.

Tabla 28. Comparación del ISE de los controladores implementados para el seguimiento de una trayectoria circular

CONTROLADOR	EJE	ÍNDICE DE DESEMPEÑO
		ISE
PID	EJE X	0.005756
	EJE Y	0.0007968
DIFUSO PD+I	EJE X	0.000953
TAKAGI-SUGGENO	EJE Y	0.003118

En base a los resultados cuantitativo del índice de desempeño ISE favorecen al controlador PID como se indica de color verde en la tabla, en los controladores PID y PD+I difuso Takagi-Suggeno se generó oscilaciones alrededor de la trayectoria de referencia generando un seguimiento de trayectoria distorsionado.

ISE para el seguimiento de una trayectoria lemniscata.

En la Tabla 3.33 se muestran los valores del índice de desempeño ISE para realizar la comparación y determinar que controlador tiene un mejor desempeño en pruebas de simulación para el seguimiento de la trayectoria lemniscata.

Tabla 29. Comparación del ISE de los controladores en simulación para el seguimiento de una trayectoria lemniscata

CONTROLADOR	EJE	INDICE DE DESEMPEÑO
		ISE
PD	EJE X	0.008525
	EJE Y	0.0009551
DIFUSO PD+I	EJE X	0.01282
TAKAGI-SUGGENO	EJE Y	0.0008202

De la misma manera el controlador PD tiene valores de ISE favorables en su diseño y pruebas de simulación, demostrando un índice de desempeño ISE bajo, demostrando que en el seguimiento de la trayectoria genera un error pequeño a su referencia.

En la Tabla 3.34 se muestran el promedio de cinco valores de ISE de cada controlador para un mismo tiempo de simulación y poder determinar el controlador con un mejor desempeño de acuerdo con el ISE.

Tabla 30. Comparación del ISE de los controladores implementados para el seguimiento de una trayectoria lemniscata

CONTROLADOR	EJE	INDICE DE DESEMPEÑO
		ISE
PD	EJE X	0.01167
	EJE Y	0.009152
DIFUSO PD+I	EJE X	0.008618
TAKAGI-SUGGENO	EJE Y	0.00745

En base a los resultados obtenidos del seguimiento de trayectoria de un #8 el controlador PD+I difuso Takagi-Suggeno presenta un valor menor en el ISE como se muestra de color verde en la tabla que antecede, de tal manera que es el controlador que aproxima más a la bola a la referencia establecida.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó exitosamente un controlador PID clásico y un control difuso PD+I Takagi-Sugeno lo que permitió comprender los métodos de sintonización, así como, la evaluación del desempeño de cada controlador para el sistema plato-bola.
- En base a la recopilación bibliográfica se identificó que el modelo matemático del sistema plato-bola tiene dos polos por lo que, al simular un controlador tipo PID no es necesaria la parte integral ya que, genera oscilaciones e inestabilidad al sistema.
- Se pudo observar en base a la estructura física del sistema plato-bola que resulta imprescindible un modelamiento del sistema mecánico, con lo cual se puede asegurar un buen desempeño de los controladores implementados consiguiendo así, la estabilidad de la bola en un punto específico y en el seguimiento de trayectorias predeterminadas.
- En la implementación del controlador tipo PID se determinó que la constante integral (I) es necesaria para reducir el error en estado estable de la posición de la bola y se han podido evidenciar oscilaciones bruscas.
- Se pudo notar en la implementación del controlador tipo PID y el controlador difuso PD+I Takagi-Sugeno que este último tiene mayor estabilidad que el tipo PID, debido a que tiene mejores alternativas para su sintonización ya que, se pudo hacer ajustes a través del conocimiento empírico del comportamiento del sistema y tomando en consideración el valor del error de posición.
- Se concluye que el controlador difuso PD+I Takagi-Sugeno posee mayor robustez que el controlador tipo PID en base a los resultados del ISE (error cuadrático integral) obtenidos durante las pruebas realizadas de posición fija en un punto y seguimiento de trayectoria de la bola en el plato.
- Se concluye que la interfaz gráfica implementada con el entorno de desarrollo AppDesigner de MATLAB brinda herramientas que facilitan la creación de apps profesionales con lo cual, se puede ofrecer al usuario una interacción directa y análisis de resultados de los esquemas de control de simulación o implementación.
- Se concluye que la pantalla táctil resistiva no es adecuada para la implementación del sistema tabla bola ya que las dimensiones que presenta son muy pequeñas y limita la movilidad de la bola.

- Se concluye que la pantalla táctil presenta una mala sensibilidad y no es adecuado para aplicaciones donde se necesita mediciones precisas debido a que necesita una considerable presión sobre su superficie para la lectura de datos.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es importante implementar un filtro de señal a cada elemento final de control para evitar generación de pulsos que distorsiona el control de posición de los servomotores provocado por señales parasitas que suelen ingresar por los cables de conexión.
- Es importante seleccionar un sensor con tiempo de respuesta acorde al sistema que se va a incorporar para evitar retrasos en la generación de los datos.
- El sistema plato bola es una planta donde se ha diseñado seguimiento de trayectorias establecidas sin tomar en cuenta el tiempo de control, por lo que se recomienda para estudios futuros implementar esquemas de control que involucren la velocidad de la bola.
- Se recomienda no usar la plataforma para estudios posteriores debido a que la construcción de su estructura y elementos como los servomotores y pantalla táctil no cumple con las características necesarias para esta aplicación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Molina, "Sistema de control bioinspirado en el modelo del cerebelo implementado en un sistema no lineal multivariado", Proyecto de grado Maestría, Ingeniería Eléctrica, UTP, Pereira, Colombia, 2017.
- [2] E. Sarabia, "Desarrollo de un controlador en espacio de estados para un sistema ball and plate realimentado por visión artificial", Tesis de Ingeniería, UPS, Quito, Ecuador, 2019.
- [3] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, España, Editorial Pearson. Quinta edición, 2005.
- [4] F. Robayo, S. Brand y L. Aristizábal, "Fuzzy and PID Controllers applied to ball and plate system", IEEE CCAC, Medellín, Colombia, 2019.
- [5] Y. Pattanapong y C. Deelertpaiboon, "Ball and Plate position control based on fuzzy logic with adaptive integral control action", IEEE ICMA, Takamatsu, Japan, 2013.
- [6] Á. Cedeño y M. Gordón, "Implementación de una plataforma de estabilización para control de posición y seguimiento de camino de una esfera", Tesis ingeniería, EPN, Quito, Ecuador, 2016.
- [7] C. Moriones, "Diseño, implementación y control de sistemas de balance ball and plate", Revista SENNOVA, vol. 2, nº 2, pp. 134-149, 2016.
- [8] S. Galvan, M. Moreno, W. Yu y F. Ortiz, "Modeling and nonlinear PD regulation for ball and plate system", World Automation Congress, pp. 1-6, 2012.
- [9] A. Cedeño, M. Gordón y L. Morales, "Control de posición y seguimiento de caminos en el sistema Bola-Plataforma", XXVII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, vol. 27, pp. 47-53, 2017.
- [10] A. Cedeño, M. Gordón y L. Morales, "Control de posición y seguimiento de caminos en el sistema Bola-Plataforma", XXVII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, vol. 27, pp. 46-53, 2017.
- [11] L. Rojas y D. Molina, "Construcción de tarjeta de desarrollo para verificar programas de microcontroladores PICs de la familia 18FXXX para el laboratorio de microprocesadores de la ESFOT", Tesis tecnología, EPN, Quito, Ecuador, 2010.
- [12] W. Yu, "Nonlinear PD Regulation for Ball and Beam System", The International Journal of Electrical Engineering & Education, 46(1), 59–73.,2009.

- [13] O. Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, Tercera edición. Edición Prentice Hall, 2012.
- [14] A. Matute y W. Bernal, "Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control", *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT)*, vol. III, pp. 125-135, 2017.
- [15] M. Espinoza, "Diseño de un controlador difuso basado en el esquema del compensador paralelo distribuido PDC", *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 26, nº 1, pp. 1-8, 2011.
- [16] S. Luchetti, "Sistemas embebidos y sus características. Conceptos fundamentales", TRIBALYTE, 2017.
- [17] A. Fernández, "Diseño e implementación de sistemas de control de tiempo real mediante herramientas de generación automática de código", 2013.
- [18] E. Zuñiga, "Diseño e implementación de un sistema de control embebido en tiempo real para las variables de caudal, nivel, presión y velocidad", Tesis ingeniería, Electronica, UNSAA, Arequipa, Perú, 2019.
- [19] MathWorks, "MATLAB y Simulink para sistemas de control. Diseña, prueba e implemente sistemas de control", Madrid, España, 2018.
- [20] L. Carvajal, *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado*, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [21] W. Agila y V Huilcapi, "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", Trabajo final para la obtención del título de Magíster, Automatización y Control Industrial, ESPOL, Guayaquil, 2015.
- [22] K. Passino y S. Yurkovich. "Fuzzy Control", Addison Wesley, 2018.
- [23] Jantzen, J. *Tuning Of Fuzzy PID Controllers*. 1998.
- [24] O Garzón, Y Garzón, "Diseño e implementación de una plataforma bola y plato, para la Aplicación de técnicas de control PID y LQR". Monografía para optar al título de ingeniero, UDFJC Bogotá, 2016.

ANEXO A

CÓDIGO DE EJECUCIÓN

Lista de instrucciones para determinar las constantes que se utiliza en el acondicionamiento del Pantalla táctil.

```
clc
clear all

XD_0 = (-6);
XD_1 = 6;
XD_2 = 0;
YD_0 = 9;
YD_1 = 0;
YD_2 = (-9);
X_0 = 630;
X_1 = 310;
X_2 = 510;
Y_0 = 250;
Y_1 = 480;
Y_2 = 700;

K=(X_0-X_2)*(Y_1-Y_2)-(X_1-X_2)*(Y_0-Y_2)
A=((XD_0-XD_2)*(Y_1-Y_2)-(XD_1-XD_2)*(Y_0-Y_2))/K
B=((X_0-X_2)*(XD_1-XD_2)-(XD_0-XD_2)*(X_1-X_2))/K
C=(Y_0*(X_2*XD_1-X_1*XD_2)+Y_1*(X_0*XD_2-X_2*XD_0)+Y_2*(X_1*XD_0-X_0*XD_1))/K
D=((YD_0-YD_2)*(Y_1-Y_2)-(YD_1-YD_2)*(Y_0-Y_2))/K
E=((X_0-X_2)*(YD_1-YD_2)-(YD_0-YD_2)*(X_1-X_2))/K
F=(Y_0*(X_2*YD_1-X_1*YD_2)+Y_1*(X_0*YD_2-X_2*YD_0)+Y_2*(X_1*YD_0-X_0*YD_1))/K
```

ANEXO B

MANUAL DE USUARIO DEL APP DESIGN.

El siguiente manual de usuario proporciona el procedimiento para iniciar la aplicación del producto final demostrable de este proyecto.

El requisito para la ejecución de la interfaz gráfica en App Design es disponer la versión de Matlab igual o superior a R2019b para evitar errores de compilación.

Todos los documentos que se encuentran en la carpeta HMI deben encontrarse adjunta en la carpeta y evitar borrar o cambiar de ubicación de carpeta por que se encuentran archivos tipo imagen, archivos tipo .slx que realizan la ejecución en Simulink y archivos .mlapp que son los encargados de ejecutar las diferentes ventanas de la interfaz gráfica.

INICIO DE LA INTERFAZ GRAFICA

La ejecución de la interfaz grafica se realiza ejecutando el archivo HMI_MENU, al ejecutar el archivo se inicia el software Matlab y la ventana principal como se muestra en la Figura B.1.

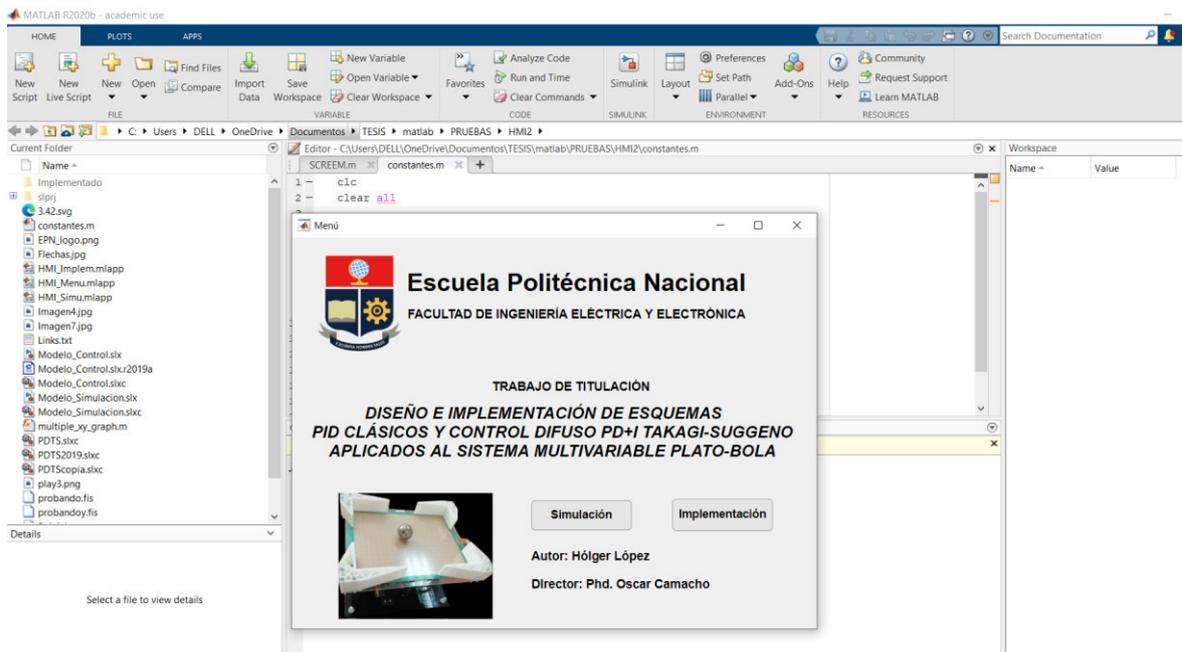


Figura B.1. Inicio de interfaz gráfica.

Una vez abierto la ventana es importante abrir y ejecutar el archivo “constantes” dando click en “Run” para guardar las diferentes constantes con las que trabaja y se iniciara la ejecución de cada una de las ventanas.

El siguiente paso es escribir el comando “fuzzyLogicDesigner” en la ventana de comandos de Matlab y se abre una ventana como la que se muestra en la Figura B.2.

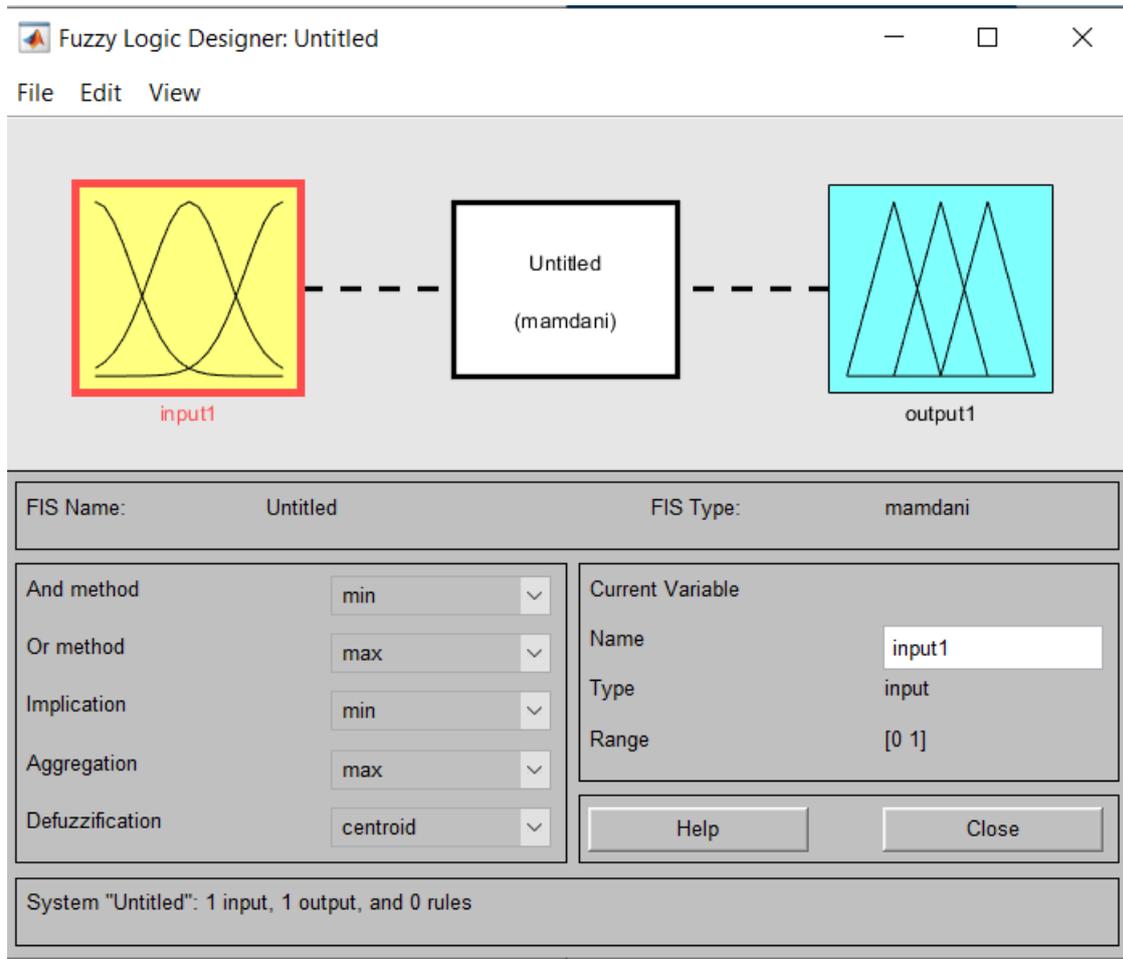


Figura B.2. ventana fuzzy logic designer

Se ingresa a la pestaña “File”, luego importar, desde una carpeta y buscamos el archivo “probando.fis” una vez abierto el archivo procedemos a importar a “to workspace” con el mismo nombre y realizamos el mismo procedimiento para el archivo “probandoy.fis”.

Una vez realizado estas indicaciones podemos continuar a cualquiera de las ventanas del nivel 2 presionando sobre el botón “SIMULACIÓN” o “IMPLEMENTACIÓN” de acuerdo a lo que desee el usuario interactuar.

ORDEN DE EMPASTADO