

# Sistema de Control Difuso Ball&Plate mediante PDI

*J. Sifuentes-Mijares<sup>1\*</sup>, F. Camacho-Villalobos<sup>1</sup>, M.A. Lara-Molina<sup>1</sup>, K.A. Heredia-Mendoza<sup>1</sup>.*

**Resumen**— Este documento muestra la implementación de un control difuso aplicado a un mecanismo diseñado no lineal subactuado llamado “Ball&Plate”. El objetivo principal de control es llevar a una posición deseada una esfera que está sobre una plataforma plana. Otro objetivo de control es lograr que esta esfera siga una trayectoria específica. Para conseguir el movimiento de la esfera, el mecanismo de dos grados de libertad utiliza dos servomotores para modificar los ángulos de inclinación X-Y de la plataforma, logrando así mover indirectamente la esfera. Se utiliza una cámara, en conjunto con MATLAB y el entorno de programación visual de Simulink, para realizar los cálculos del control. Así es que se obtiene la posición actual de la esfera; mediante el procesamiento digital de las imágenes capturadas por la cámara. Posteriormente, la señal de salida de control es enviada vía puerto serie a una tarjeta Arduino, a la cual están conectados los dos servomotores que mueven la plataforma. Este trabajo se realizó con la finalidad de contar con un sistema para pruebas didácticas en laboratorio, de un sistema de control no lineal subactuado.

**Palabras claves** — Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), Control Difuso, Ball&Plate, Subactuado.

**Abstract**— This document shows the implementation of a fuzzy control applied to a designed nonlinear underactuated mechanism called “Ball & Plate”. The main purpose of the control is to bring a sphere on a flat platform to a desired position. Another objective of control is to ensure that this sphere follows a specific path. To get the motion of the sphere, the mechanism of two degrees of freedom uses two servomotors to modify the X-Y inclination angles of the platform, thus achieving to move the sphere indirectly. A camera, together with MATLAB and Simulink visual programming environment are used to compute the control. In addition, the current position of the sphere is obtained by digital processing of the captured images by the camera. Subsequently, the control output signal is sent via the serial port to an Arduino card, to which are connected the two servomotors that move the platform. This work was carried out in order to have a didactic system for lab practices with an underactuated nonlinear control system.

**Keywords** — Digital Image Processing (DIP), Fuzzy Control, Ball & Plate, underactuated.

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de la Laguna, DIE & DEPI, Boulevard Revolución y Av, Tecnológico de la Laguna, Centro SN, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

\* [jsifuentesm@correo.itlaguna.edu.mx](mailto:jsifuentesm@correo.itlaguna.edu.mx).

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control automático han llegado a tener una participación muy importante en el avance de la ingeniería y la ciencia. Estos han llegado a formar parte de la vida cotidiana. El sistema de control Ball&Plate representa uno de los equipos didácticos más importantes en el estudio de los sistemas de control no lineal subactuados. Este sistema ayuda a los estudiantes de ingeniería y posgrado a comprender de manera más sencilla este tipo de sistemas de control, permitiendo probarlos de forma práctica. El sistema de control, junto con el mecanismo Ball&Plate, es un equipo muy utilizado para la enseñanza, el cual también es complejo y cuyo objetivo es el de controlar la posición de una esfera, que rueda libre sobre una plataforma, un plano de dos dimensiones. Este sistema, es un sistema subactuado de dos grados de libertad, el cual usa la inclinación de la plataforma para influir indirectamente en la posición de la esfera [1].

En este proyecto se busca implementar un control difuso en este sistema, el cual debe tener las siguientes restricciones:

- La esfera no se desliza sobre la plataforma.
- La esfera es simétrica y de material homogéneo.
- Se desprecian las fricciones.
- La esfera se mantiene siempre en contacto con la plataforma (no rebota).

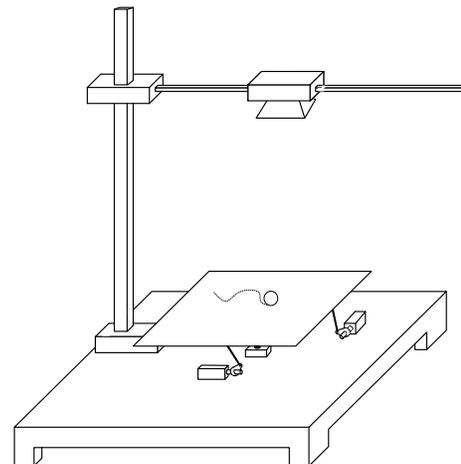


Figura 1. Sistema Ball&Plate.

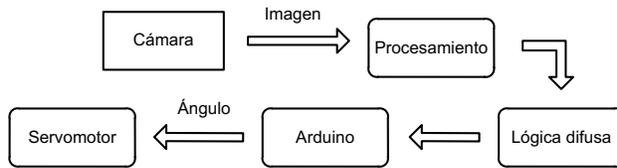


Figura 2. Diagrama general del sistema Ball&Plate.

En la Figura 1 se puede observar el diseño del sistema para el que se implementó el control. En éste se pueden apreciar dos servomotores bajo la plataforma, ubicados a 90° uno del otro, para poder controlar el eje X y el eje Y [2]. Además, se ve como existe un soporte para sujetar la cámara, justo arriba del plano, para poder medir la posición y velocidad de la esfera. El flujo del proceso de este sistema puede resumirse en la Figura 2.

## II. MODELO FÍSICO

Para la creación del sistema físico del Ball&Plate se utilizaron los siguientes materiales [3]:

Una tabla de madera 30cm x 30cm (plano del sistema).

- Una cámara Logitech C920 HD Pro Webcam.
- Un Arduino UNO.
- Una base de madera 45cm x 45cm.
- 2 servomotores MG995 con torque de 11 kg/cm (alimentados con 6V cada uno).
- Una esfera montada en una carcasa, llamada “bola loca”.
- Una varilla de metal de ¼”.
- Una barra de madera (para hacer el soporte de la cámara).
- Piezas metálicas (para hacer los soportes de los servomotores y la articulación de la cámara).
- Tornillos de 1/8”.
- Una pelota amarilla fosforescente para tenis de mesa (esfera del sistema).

Primero, lo que se hizo fue poner soportes para los motores, sobre la base.

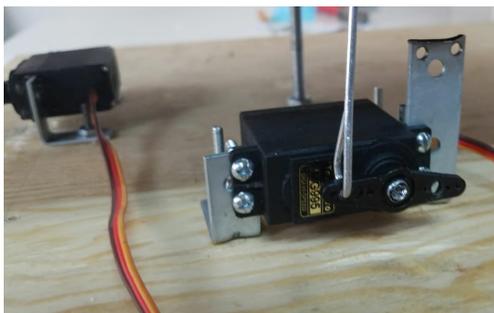


Figura 3. Soportes y servomotores.



Figura 4. Soporte principal del sistema.

En la Figura 3 se puede observar cómo se colocaron los servomotores a 90° uno del otro y cómo en la flecha del motor se colocaron unas varillas que se unen a la plataforma del sistema [4].

Los servomotores son actuados por una señal modulada en ancho de pulso. Mediante esta señal se indica al servomotor a cuántos grados debe de ubicarse.

En seguida, se colocó el soporte principal del plano. En la Figura 4 se observa cómo una varilla de ¼” de diámetro está soldada a la “bola loca”. También se fijó esta varilla a la base del todo el sistema. Este soporte principal permite colocar el plano principal arriba. La bola loca se utiliza como articulación universal para que el plano pueda moverse en toda dirección, además de funciona como soporte y ayuda a que los servomotores no carguen todo el peso del plano y la esfera.

En la Figura 5 se aprecia cómo se colocó un soporte de madera para la cámara. También, se utilizaron piezas metálicas para emular una articulación y así desplazar la barra de madera horizontal y hacer pruebas con la cámara a distintas distancias.

En la Figura 6 se aprecia el sistema físico construido del Ball&Plate, preparado para probar el control de éste.



Figura 5. Soporte de la cámara.



Figura 6. Sistema físico del Ball&Plate.

### III. COMUNICACIÓN

Ahora algo importante en este proyecto es cómo se hará que los datos que genera el controlador se transformen en señales de entrada a los actuadores para que los servomotores se muevan y así poder probar el controlador difuso. Lo que se hizo fue crear un programa para la interfaz de Arduino, para que este reciba los datos que se le mandarán desde Simulink, adecuando la información para que el sistema responda como se desea. En la Figura 7 se observa el listado del programa hecho para Arduino, con el cual recibe una serie de datos desde Simulink. El Arduino es el encargado de mover los servomotores como le es indicado desde el sistema de control.

```
#include <Servo.h>
Servo servox;
Servo servoy;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  servox.attach(9);
  servoy.attach(10);
}
void loop() {
  while (Serial.available() > 0) {

    float X = Serial.parseInt();
    float Y = Serial.parseInt();

    if(Serial.read() == '\n')
    {
      Serial.println(X);
      servox.write(X);
      delayMicroseconds(50);

      Serial.println(Y);
      servoy.write(Y);
      delayMicroseconds(50);
    }
  }
}
```

Figura 7. Programa de Arduino utilizado.

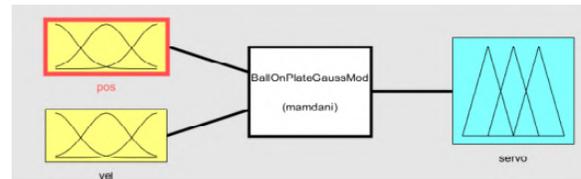


Figura 8. Sistema de lógica difusa utilizado.

La función Serial.parseInt de Arduino ayuda a separar datos recibidos, esta función es útil porque Simulink envía los movimientos de X y Y de manera codificada en conjunto, y así mediante esta instrucción se pueden separar y leer para que cada servomotor realice un movimiento independiente.

### IV. LÓGICA DIFUSA

Para este proyecto se tuvo que diseñar un sistema de lógica difusa apropiado para este controlador.

Algo importante a tomar en cuenta es que cada eje (X y Y, para el movimiento del plano) tendrá su propia lógica difusa. Esto se logra teniendo como salida un valor en grados para cada servomotor, lo que significa que cada servomotor tendrá su lógica difusa, aunque para este caso será la misma.

En la Figura 8 se observa la lógica difusa que se utilizó.

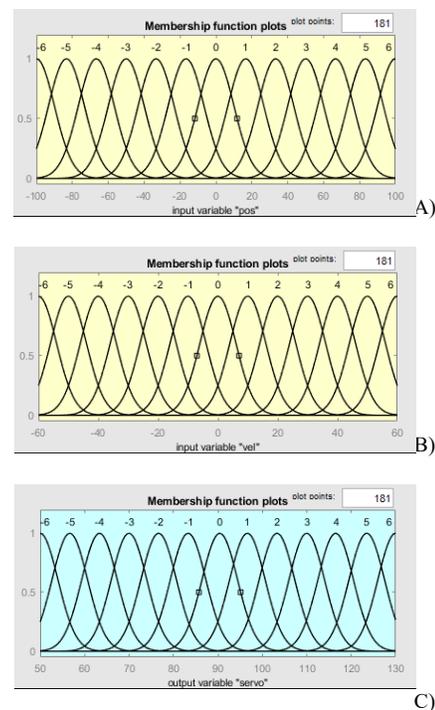


Figura 9. A) Función de membresía de la entrada del error de posición. B) Función de membresía de la entrada de velocidad. C) Función de membresía de la salida del ángulo del servomotor.

TABLA I

Reglas Difusas del sistema Ball&Plate

		Error de posición (pos)												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Velocidad (vel)	-6	6	6	6	5	5	4	4	3	2	0	-1	-2	-3
	-5	6	6	6	5	4	4	4	2	1	0	-2	-3	-3
	-4	6	6	5	4	4	3	3	2	1	-1	-2	-3	-3
	-3	6	6	5	4	3	2	2	1	1	-1	-3	-3	-3
	-2	5	5	4	4	2	2	1	1	0	-2	-3	-3	-3
	-1	5	4	4	4	1	1	1	0	0	-2	-3	-4	-4
	0	4	4	4	3	1	1	0	0	-1	-1	-3	-4	-4
	1	4	4	3	2	0	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4	-4
	2	3	3	3	2	0	-1	-1	-2	-2	-4	-4	-5	-5
	3	3	3	3	1	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-5	-6	-6
	4	3	3	2	1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-6	-6
	5	3	3	2	0	-1	-2	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-6
	6	3	3	1	0	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6

Ésta consiste en 2 entradas y una salida. Las entradas son error de posición “pos” y velocidad “vel”, mientras que la salida es un valor de ángulo al que se moverá el servomotor “servo”.

Nota: Algo importante que hay que tener en cuenta es que el valor del ángulo al que se mueve el servomotor no es el mismo al que se mueve el plano.

En la Figuras 9 se puede observar que esta lógica difusa está conformada por 13 funciones de membresía cada una (entradas y salidas), lo cual hace que la lógica difusa sea más exacta, ya que es mejor tener una mayor cantidad de funciones de membresía.

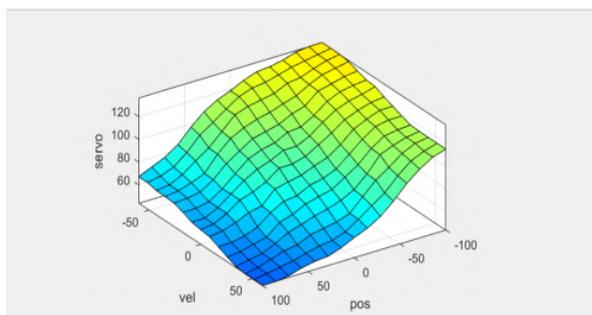


Figura 10. Superficie de control.

En la Tabla I se puede observar la entrada que ha sido nombrada error de posición de la esfera, ubicada horizontalmente; por su parte, la velocidad de la esfera está situada verticalmente. Al relacionar las dos entradas con la salida, se generan las 169 reglas difusas de este sistema Ball &Plate [5].

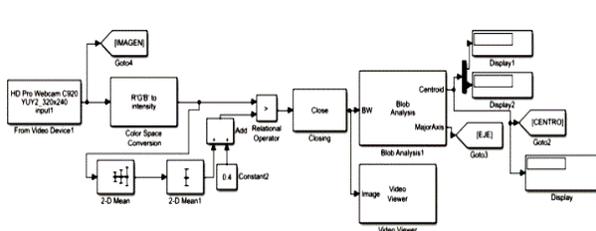


Figura 11. Sistema para la detección del centroide, en Simulink.

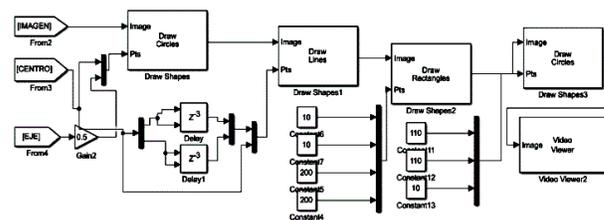


Figura 12. Sistema para señalar a la esfera y su dirección.

En la Figura 10 se observa la superficie de control, la cual se puede notar que tiene una caída suave, y es casi plana en la vecindad cercana del origen, siendo esto una característica deseada en los sistemas de control difuso.

### V. SISTEMA DE CONTROL

La primera parte del sistema es la detección del centroide, como se muestra en la Figura 11. La imagen en RGB es convertida a escala de grises y se utilizan dos bloques “2-D Mean” para sumarle el radio de la esfera que observa la cámara. Luego, mediante el bloque “Closing” se hacen las operaciones de erosión y dilatación, haciendo que la esfera se vea blanca y el plano se vea negro [6].

Posteriormente, en la Figura 12 se observa cómo se introduce el centroide y el eje mayor de la esfera para dibujar un círculo alrededor de él. Además, se utiliza un delay para obtener una línea que indique la dirección hacia la que se mueve la esfera. Finalmente, se agrega un cuadrado para observar el área de operación del control difuso y un círculo para observar el radio en el que buscará estar la esfera, el cual representa el centro [7].

En la Figura 13 se observa una resta del centroide menos una constante igual a 110, haciendo así que el centro de la imagen sea 0,0. Esto es porque, como la resolución de la cámara se ajustó a 220x220, su centro se ubica en el renglón 110, columna 110. Posteriormente, se coloca un switch con una condición, debido a que cuando en la imagen no se detecta ningún centroide, este por default da -1,-1, entonces se busca anular esto sustituyendo ese -1,-1, por un 0,0.

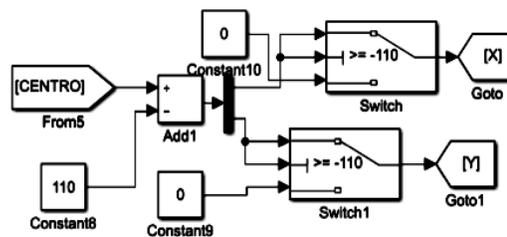


Figura 13. Sistema para hacer que el centroide esté en 0,0.

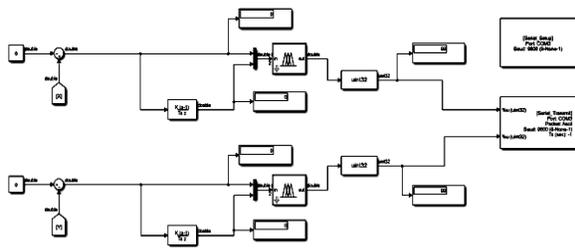


Figura 14. Sistema de control con referencia igual a cero para el sistema Ball&Plate.

Para finalizar, se desarrolló el sistema de control (ver Figura 14). Se introdujo una referencia igual a cero y el centroide es restando. La referencia indica dónde se quiere que se posicione la esfera en la imagen. La salida del sumador es el error de posición, que sirve como una de las entradas al bloque correspondiente al controlador difuso; por otra parte, este mismo error de posición se toma para unirlo a un derivador discreto, ya que esto hace que a la salida del derivador se obtenga la velocidad de la esfera, siendo ésta otra entrada. Estas dos entradas se conectan al controlador difuso mediante un multiplexor. La salida del multiplexor corresponde a los grados que debe girar el servomotor y ésta es conectada a un convertidor uint32, ya que sólo se necesitan grados superiores a cero. La salida del convertidor se transporta a hacia un bloque llamado “WaijungBlockset”, el cual sirve para establecer la comunicación serial con el Arduino.

Sin embargo, para que esta comunicación funcionara, se tuvo que cargar antes un programa en el Arduino, para que los datos obtenidos sean leídos por los servomotores como grados (mediante el uso de una librería), y que estos vayan separados (estos son los datos enviados por el sistema de control difuso, para controlar a cada servomotor independiente).

Cabe señalar que el sistema de control utilizado para el servomotor X es el mismo utilizado para el servomotor Y, pero su respuesta varía es diferente porque no es el mismo error de posición en el eje X que en el eje Y.

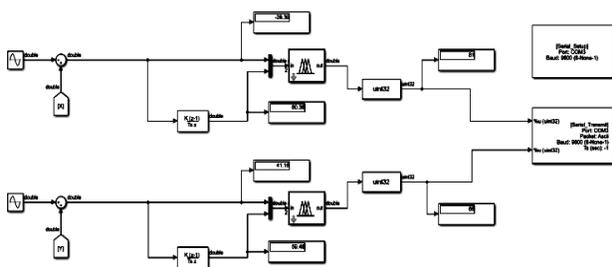


Figura 15. Sistema de control para realizar las trayectorias circular y elipsoidal con el sistema Ball&Plate.

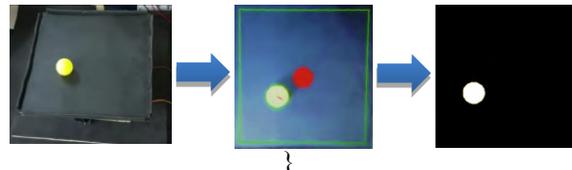


Figura 16. Procesamiento digital de la imagen capturada por la cámara.

También, se logró que la esfera realizara una trayectoria circular sobre el plano (ver Figura 15). Para esto se introdujo como referencia una señal cosenoidal (o señal senoidal desfasada 90° respecto a la señal de referencia del eje Y) para el eje X y una señal senoidal para el eje Y, ambas de amplitud 50Vp y frecuencia de 2 rad/seg.

Para que la esfera realizara una trayectoria elipsoidal, se aumentó la amplitud de la señal de referencia del eje X a 70Vp, dejando la amplitud de la señal de referencia del eje Y a 50Vp.



Figura 17. Seguimiento de la esfera hacia el centro.

## VI. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al probar el funcionamiento del sistema Ball &Plate.

Primeramente, se probó el procesamiento digital de una imagen capturada (ver Figura 16).

En la Figura 17 se observa que la esfera se depositó en el plano utilizando un guante oscuro. Esto se realizó de esa manera debido a que: al procesar las imágenes digitalmente, la cámara ignora cualquier color oscuro, para así enfocarse únicamente en la esfera, que es de un tono más claro.

Finalmente, se observa que la esfera termina en el centro del plano, que representa la posición deseada, cumpliendo así uno de los objetivos de control establecidos.

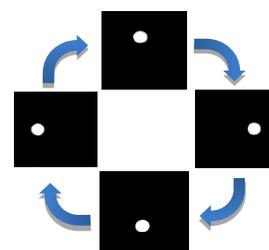


Figura 18. Trayectoria circular de la esfera.

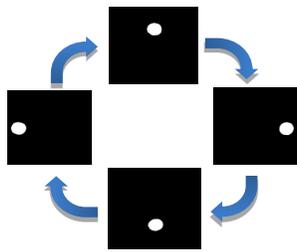


Figura 19. Trayectoria elipsoidal de la esfera.

Otro objetivo que se cumplió fue el de lograr que la esfera siguiera una trayectoria específica. En la Figura 18 se observan las capturas de imágenes mientras la esfera seguía una trayectoria circular; también, en la Figura 19 se observa la trayectoria elipsoidal que siguió la esfera al cambiar la referencia del sistema de control del eje X.

### VII. CONCLUSIÓN

El control difuso resultó ser de gran utilidad al aplicarlo en un sistema Ball&Plate, ya que se cumplió con los dos objetivos de control planteados, siendo el principal llevar a la esfera a una posición deseada (en este caso, el centro del plano). También se logró que esta misma siguiera dos trayectorias diferentes (circular y elipsoidal). Sin embargo, para que este sistema fuera de alta precisión se necesitó hacer uso de 13 funciones de membresía gaussianas para las entradas y la salida. Además, si la tabla donde se mueve la esfera no es lo suficientemente plana, el sistema perderá precisión, lo cual no es deseable.

Hay que tomar en cuenta que se necesita una cámara con un alto número de fotogramas por segundo (fps) para que el movimiento de la esfera no vaya demasiado retrasado en comparación con el tiempo real.

También, las flechas de los servomotores tienen que ir ajustadas al principio de tal manera que la esfera no se mueva en el plano cuando los servomotores estén estáticos a 90°.

Por otra parte, es necesario resaltar que este sistema no utiliza para nada el modelo matemático del Ball&Plate para lograr controlarlo.

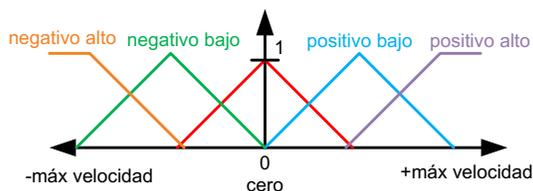


Figura 20. Funciones de membresía del control difuso de un péndulo invertido.

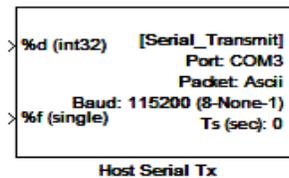


Figura 21. Bloque Host Serial Tx.

Se concluye que el sistema construido del Ball&Plate, si cumple para funcionar didácticamente y poder probar el funcionamiento de controladores difusos utilizando PDI.

### VIII. APÉNDICES

#### A. Control Difuso

Los controladores difusos son de las aplicaciones más importantes de la teoría difusa. Ellos trabajan de una forma bastante diferente a los controladores convencionales; el conocimiento del experto se usa en vez de ecuaciones diferenciales para describir un sistema.

Este conocimiento puede expresarse de una manera muy natural, empleando las variables lingüísticas que son descritas mediante conjuntos difusos.

Como ejemplo se tiene un péndulo invertido, del cual sus funciones de membresía se pueden observar en la Figura 20 [8].

#### B. Lógica Difusa

La lógica difusa es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta. En general la lógica difusa imita como una persona toma decisiones basada en información con las características mencionadas.

La lógica difusa arroja una gráfica llamada “Superficie de control” la cual entre más “suave” sea su caída es mucho mejor y más exacto para el sistema.

#### C. Host Serial Tx

El bloque Host serial Tx (ver Figura 21) recibe los valores que lanza el control difuso y los envía como un vector a la interfaz de Arduino. Y este se complementa con el HOST SERIAL SETUP en el cual se configura a dónde quieres mandar los datos, en este caso Arduino. Cabe mencionar que este bloque se obtiene instalando el WaijungBlockset en Simulink desde el sitio web <http://waijung.aimagin.com/>.

### IX. REFERENCIAS

- [1] Devono, D; Bugeja, M. (2015). “Application of Sliding Mode Control to the Ball and Plate Problem”, in *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, pp. 412-419.

- [2] M. Polanía, E. C. (2016). "Diseño, implementación y control de sistema de balance ball on plate", *Revista SENNOVA*, Vol. 2, No. 2, pp. 135-149.
- [3] Araujo Puerta, A. (2018), "Diseño y control de un sistema Ball and Beam con realimentación visual con Raspberry-Pi", Depto. Ing. de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [4] Sáez, D. (2011). "Apuntes Control Difuso", Dpto. Ing. Eléctrica, U. Chile, Tech. Rep. El. 5205.
- [5] Kuncan, M.; Kaplan K.; Acar, F.;Kundakçi, I. y Ertunç, H. (2016) "Fuzzy Logic Based Ball on Plate Balancing System Real Time Control by Image Processing, *"International Journal of Natural and Engineering Sciences"*, pp. 28-32.
- [6] Pérez Olvera, C. A. (2009), "Control visual difuso de un sistema no-lineal", Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional.
- [7] Rastogi, A.; Shooja, R. y Chiru, C. (2013), "BALANCING BALL ON PLATE USING FUZZY LOGIC", Suecia, Mälardalen University, Tech. Rep. DVA 406.
- [8] Sánchez Haro, D. (2017). "Plataformas de bajo coste para experimentación en control", Eng. dissertation, Escolad'Enginyeria de Barcelona Est, Universitat Politècnica de Catalunya.

## X. BIOGRAFÍA



**Sifuentes Mijares, Juan.** Nació en Gómez Palacio Durango, México, el 5 de agosto de 1968. Es Ingeniero Industrial en Electrónica por el Instituto Tecnológico de La Laguna. Es Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control Automático por el Instituto Tecnológico de La Laguna. También es Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control Automático por el Instituto Tecnológico de la Laguna. Estuvo en Valencia,

España, realizando estudios de Doctorado en Diseño de Sistemas Digitales.

Ha trabajado como profesoren diferentes escuelas, tales como: La Universidad Iberoamericana IBERO, el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, la Universidad Autónoma del Noreste UANE y actualmente se desempeña como profesor investigador del Instituto Tecnológico de la Laguna (TecNM Campus La Laguna).

El Dr. Sifuentes-Mijares recibió el premio al mejor artículo de su área durante el congreso internacional World Automation Congress, celebrado en la Gran Isla de Hawaii en el 2014. Es miembro del consejo de posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica.

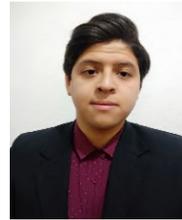


**Camacho Villalobos, Fernando.** Nació en Torreón, Coahuila, México, el 19 de enero de 1998. Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de la Laguna (TecNM Campus La Laguna), Torreón, Coahuila, México, egresado en 2019.

Él actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (perteneciente al PNPC), en la Línea de Investigación de Instrumentación Electrónica, en el Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila, México. En 2019 realizó su Residencia Profesional en el Departamento de Ingeniería de Cervecería Modelo de Torreón. Durante el estudio de su carrera se especializó en Mecatrónica y Control.

El Ing. Camacho participó en la Feria de Proyectos 2019-1 del Departamento de Eléctrica-Electrónica y Energías Renovables del Instituto Tecnológico de la Laguna.

**Lara Molina, Mario Alberto.** Nació en Torreón, Coahuila, México, el 5 de julio de 1998.



Él actualmente cursa el último semestre de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de la Laguna (TecNM Campus La Laguna), Torreón, Coahuila, México. Durante el estudio de su carrera se ha estado especializando en Mecatrónica y Control.

Lara participó en las Ferias de Proyectos 2018-1 y 2019-1 del Departamento de Eléctrica-Electrónica y Energías Renovables del Instituto Tecnológico de la Laguna.

**Heredia Mendoza, Kevin Antonio.** Nació en Torreón, Coahuila, México, el 23 de junio de 1996. Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de la Laguna (TecNM Campus La Laguna), Torreón, Coahuila, México, egresado en 2019.



Él actualmente labora como Especialista en Sistemas Fotovoltaicos en Fronius México, Santa Catarina, Nuevo León, México. Durante el estudio de su carrera se especializó en Mecatrónica y Control y Electrónica de Potencia.

El Ing. Heredia participó en la Feria de Proyectos 2019-1 del Departamento de Eléctrica-Electrónica y Energías Renovables del Instituto Tecnológico de la Laguna.