

# REVISIÓN DE LOS TIPOS DE CONTROL PARA LOS SISTEMAS BOLA Y PLACA

## REVIEW OF CONTROL TYPES FOR BALL AND PLATE SYSTEMS

Darío Fernando Yépez Ponce<sup>1</sup> Héctor Mauricio Yépez Ponce<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior Tecnológico Eloy Alfaro, Esmeraldas, Ecuador  
E-mail: dfyp1991@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador  
E-mail: mauroyeppez32@gmail.com

### Resumen

En este artículo se realizó una revisión de los diferentes tipos de control para el posicionamiento de sistemas bola y placa (B&P). Se inició analizando la estructura básica que debe tener un sistema B&P, sus propiedades y problemas que se presentan para el control de seguimiento de ruta; el mismo se subdivide en dos: el control de posición de la bola y el control del ángulo de placa. Posteriormente, se revisaron los algoritmos generales básicos; para el modelado matemático los más utilizados son las ecuaciones de Euler-Lagrange, la teoría de estabilidad de Lyapunov y los criterios de estabilidad de Routh. Para el control lo más común son los ciclos con doble retroalimentación utilizando las técnicas de control más comunes: control de modo deslizante (SMC, por sus siglas en inglés), controlador proporcional-integral-derivativo (PID) y los controladores de lógica difusa (FLC, por sus siglas en inglés). En algunos artículos no se utiliza estos controladores solos; sino también en combinación de los mismos con otras técnicas como inteligencia artificial, redes neuronales, visión artificial, entre otros. Finalmente, se muestra una tabla en la que se observa el rendimiento del algoritmo de cada control revisado.

**Palabras clave**– bola y placa, sistemas de control, técnicas de control, no-linear, multivariable.

### Abstract

In this article, a review of the different types of control for the positioning of ball and plate systems (B&P) was carried out. It began by analyzing the basic structure that a B&P system must have, its properties and problems that arise for route tracking control; it is subdivided into two: the ball position control and the plate angle control. Subsequently, the basic general algorithms were reviewed; For mathematical modeling, the most widely used are the Euler-Lagrange equations, Lyapunov's theory of stability and Routh's stability criteria. For control, the most common are double feedback loops using the most common control techniques: slider mode control (SMC), proportional-integral-derivative controller (PID) and fuzzy logic controllers (FLC). In some articles these drivers are not used alone; but also in combination with other techniques such as artificial intelligence, neural networks, artificial vision, among others. Finally, a table is shown in which the performance of the algorithm of each revised control is observed.

**Key Words**-- ball and plate, control systems, control techniques, non-linear, multivariable.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos educativos facilitan la prueba de algoritmos que simulan el funcionamiento de un sistema real en una réplica simplificada. Por ejemplo, diseñar y probar una estrategia de control en un robot humanoide sería imprudente y económicamente costoso experimentar directamente en el robot; sin embargo, un péndulo invertido, que imita la caminata de un ser humano, sería la opción más adecuada y económicamente alcanzable tanto para la experimentación como para la investigación (A.N. Hunde, 2011; Fabregas, Chacón, Dormido-Canto, Farias, & Dormido, 2015; Kalúz, Klaučo, Ćirka, & Fikar, 2019; Lian, Xu, Zuo, & Huang, 2014; Parga, Yu, & Li, 2015).

Para Nguyen, Olaru, Gutman, & Hovd (2012), los sistemas B&P en términos simples se describen como sistemas constituidos por una placa plana que puede ser rectangular o circular, la misma se encuentra fijada de forma móvil en su centro por un apoyo para que pueda inclinarse libremente en dos direcciones ortogonales; una bola generalmente de acero rueda libremente sobre la placa; una cámara; dos servomotores y una placa de control como se puede ver en la Figura 1. El principal objetivo de estos sistemas, es ordenar que la bola se coloque en un lugar determinado dentro de la placa o indicarle la trayectoria a seguir sin que la misma salga fuera de los bordes de la placa. Los sistemas B&P son sistemas no lineales que tiene más de una variable, en estos sistemas los grados de libertad son mayor que la cantidad de actuadores que accionan el sistema. El control de este tipo de sistemas se dificulta debido a las fricciones, reacción de los efectos en la transmisión, retrasos en las mediciones y parámetros inestables que afectan al control del sistema (KOSE, KAPLAN, & Ertunc, 2018; Sun & Li, 2012).

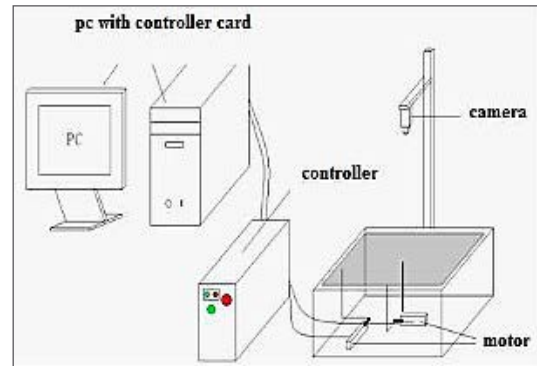


Figura 1: Hardware para un sistema B&P.  
Fuente: Sun & Li, 2012.

En Sun & Li (2012), se propone un diagrama de bloques que podría representar el control del sistema B&P como se indica en la Figura 2.

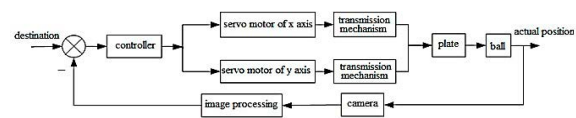


Figura 2: Bloque de control de los sistemas B&P.  
Fuente: Recuperado de (Sun & Li, 2012).

Los sistemas B&P tienen cuatro grados de libertad (dos movimientos independientes de la bola sobre el plano de la placa y otros dos movimientos de las inclinaciones combinadas de la bola y la placa sobre el pivote fijo en el centro de la placa). Los sistemas B&P ofrecen la oportunidad de estudiar problemas relacionados al seguimiento de trayectorias y de estabilidad. El sistema B&P fue establecido por primera vez en los laboratorios de Rockwell de la Universidad de Checoslovaquia en 1990 (Chevalier, Copot, Ionescu, & Keyser, 2016; KASSEM, HADDAD, & ALBITAR, 2015; H. Liu & Liang, 2010).

Las técnicas de control más utilizadas para controlar este tipo de sistemas suelen ser: PID, SMC y FLC.

La técnica del control PID, es una técnica de control muy usada para controlar sistemas dinámicos debido a su simplicidad en la aplicación. El cálculo y la determinación de los parámetros PID es un tema importante en el diseño del controlador; estos parámetros pueden ser sintonizados y ajustados durante la operación y en tiempo real utilizando redes neuronales artificiales o técnicas de control de lógica difusa (Köse, Kaplan, Ertunç, & Üniversitesi, 2013).

El SMC es conocido por su incertidumbre sobre el sistema y su insensibilidad a los efectos perturbadores. Este método de control, es esencialmente discontinuo, espera que las condiciones del sistema alcancen la superficie deslizante para que el controlador mueva la situación a la superficie deslizante generando una señal de salida repentina (Köse E., Abacı K., 2010).

El FLC a diferencia de los métodos de control tradicionales, no requiere de un modelo matemático, es una técnica muy ocupada en el control de sistemas no lineales, genera grupos difusos usando variables lingüísticas. Para este tipo de control es necesario disponer de una tabla de reglas que conste las variables lingüísticas y la relación entre los grupos de entrada y salida en el FLC (Köse et al., 2013).

Por lo descrito anteriormente, el objetivo de esta revisión es analizar las técnicas de control desarrolladas en el pasado y las comúnmente utilizadas en los sistemas B&P. Se describen y comparan los principios de funcionamiento, ventajas, desventajas y revisión de trabajos relacionados con cada técnica de control. Por lo tanto, de esta revisión, las técnicas de control de sistemas B&P pueden ser estudiadas más a fondo y servir de base para investigaciones de mayor complejidad.

Este artículo consta de 3 secciones. La sección 1 cubre la introducción de los sistemas B&P y sus diferentes tipos de control. La Sección 2 describe la metodología empleada para obtener la información relevante acerca del tema en estudio y una revisión literaria; revisión del modelo matemático y técnicas de control. Se discuten los principios de funcionamiento de cada método con sus ventajas y limitaciones a tener en cuenta en los sistemas B&P, también se describe y compara las ventajas, desventajas y revisión de trabajos pasados relacionados con cada técnica. Finalmente, en la Sección 3 se describen las conclusiones a las que se ha llegado luego de la revisión.

## DESARROLLO

### 2.1. Metodología

Se diseñó una investigación teórica aplicando la metodología Prisma (Moher, Liberati, Tetzlaff, Altman, & Grp, 2009). La investigación se fundamentó en la pregunta: ¿Cuáles son las técnicas de control usadas en sistemas B&P?

Con base en la pregunta de investigación planteada y con la finalidad de especificar la investigación, se emplearon los términos booleanos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1:  
Ecuaciones de Búsqueda.

N	Ecuaciones de búsqueda
1	"ball and plate system" AND "control techniques"
2	"ball and plate system" AND "PID Controller"
3	"ball and plate system" AND "artificial vision"
4	"PID Controller" AND "ball and plate system" AND "artificial vision"
5	"ball and plate system" AND "artificial intelligence"
6	"bio controllers" AND "ball and plate systems"

Fuente: Propia

La búsqueda de información se realizó en cuatro bases de datos reconocidas e indexadas: IEEExplorer, Scopus, ScienceDirect y Web of Science; al no obtener mucha información del tema de investigación propuesto, se tomaron en cuenta las conferencias y artículos publicados entre los años 2002 y 2019; se encontró información en tres de las seis ecuaciones planteadas. Para garantizar la exhaustividad de la información, se usó como criterio de exclusión "controladores para motores DC" y se complementó con la literatura científica no indexada.

### 2.1.1. Plan de análisis

La revisión de los artículos de investigación se realizó en base al título de la publicación con la finalidad de extraer y segregar la información útil para desarrollar satisfactoriamente la investigación. En primer lugar, se buscó información referente a la definición de los sistemas B&P, tipos de control empleados en estos sistemas y sus aplicaciones. Esta información se halló en el resumen y la introducción de los artículos investigados. Consecutivamente, con base en los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas, se describió las técnicas de control más utilizadas en estos sistemas. Finalmente, se realizó un cuadro comparativo con las diferentes

técnicas de control para los sistemas B&P y sus respectivas ventajas y desventajas.

### 2.1.2. Resultados

La búsqueda de los artículos de investigación se llevó a cabo en las bases de datos anteriormente descritas, en abril de 2020. Los resultados que se obtuvieron fueron 15 en IEE-Explorer, 28 en Scopus, 31 en ScienceDirect y 4 en Web of Science; dando un total de 78 resultados. Partiendo de estos resultados, se buscaron archivos duplicados en el gestor de referencias Mendeley, encontrando 27 archivos duplicados; fusionando estos archivos quedaron 51 artículos resultantes. Posteriormente, se aplicaron los criterios de búsqueda de inclusión y de exclusión para eliminar los artículos que no pertenecieran a la temática; de esta manera, se obtuvieron 36 artículos de investigación indexados. Referente a la literatura científica no indexada, se encontró en Google Académico 4 artículos de investigación y 2 tesis. Finalmente, aplicando los criterios de sensibilidad, especificidad y exhaustividad, la revisión sistemática realizada dio como resultado final 42 investigaciones en el tema propuesto como se ve en la Figura 3.

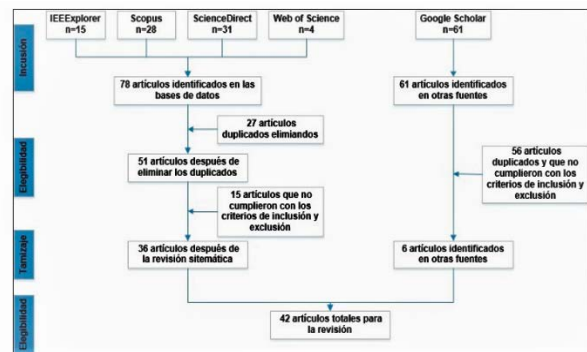


Figura 3: Proceso de búsqueda de información.

Fuente: Propia

De las 42 publicaciones utilizadas en la revisión sistemática, se halló que la mayoría de estas proceden de China y Suecia como se aprecia en la Figura 4.

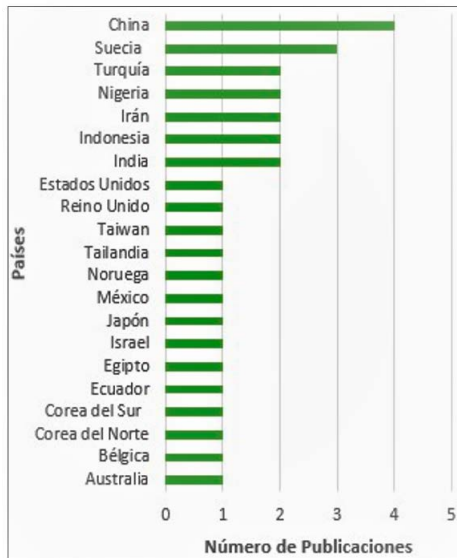


Figura 4: Publicaciones por país.  
Fuente: Propia

### 2.1.3. Revisión de la literatura

A continuación, se muestra un resumen de la literatura publicada acerca de los sistemas B&P.

H. Liu y Y. Liang (2010), propusieron un algoritmo de control de modo deslizante de seguimiento de trayectoria para el control de posición de la bola, logrando demostrar la estabilidad asintótica del sistema lazo cerrado por medio de la teoría de estabilidad de Lyapunov. Lo característico de este artículo es la estructura de la placa, debido a que en lugar de usar una sola placa plana como lo hacen en la mayoría de los casos; usaron dos placas como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, en el artículo se menciona sobre un control de doble retroalimentación, pero no se presentó el modelo del lazo interno por lo que se desconoce la naturaleza de los controladores utilizados en el diseño.

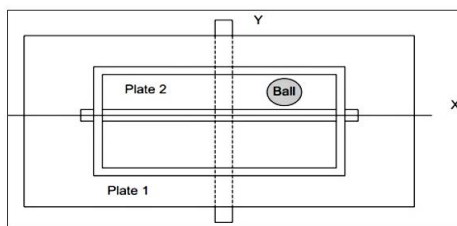


Figura 5: Mecanismo para el sistema B&P.  
Fuente: Liu y Y. Liang 2010.

En (Andrews, Hermann, & Colasuonno, 2004; Yaovaja, 2018), se utiliza un mecanismo de placa similar al propuesto en el artículo anterior y se emite un comentario similar del mecanismo de control de la placa propuesto.

H. Wang, Y. Tian, Z. Sui, X. Zhang y C. Ding (2007), propusieron un control de doble retroalimentación para el seguimiento de los sistemas B&P en la plataforma experimental BPVS-JLU I; el sistema utiliza dos codificadores fotoeléctricos para medir las inclinaciones de las placas, para controlar utilizaron un único controlador de lógica difusa de módulos de reglas de entrada con grado de importancia dinámica. Para el lazo de retroalimentación interna se usaron el FLC, el control bang-bang y el control PD. El FLC fue utilizado para mejorar el rendimiento servo-dinámico, el control PD y el control bang-bang fueron utilizados para acelerar la respuesta del sistema y finalmente se empleó un esquema de conmutación para determinar el algoritmo que debe elegirse. El lenguaje del programa de control fue escrito en lenguaje C++ a diferencia de (Knuplei, Chowdhury, & Sveeko, 2003; Yuan, 2009).

D.H. Yuan (2009), propuso un mecanismo de accionamiento neumático compuesto de una placa de circuito amplificador de potencia, una válvula proporcional controlada por flujo, un cilindro oscilante y un mecanismo de varilla de empuje para usar en los sistemas B&P, disponible comercialmente por HUMUSOFT. A diferencia de (Knuplei et al., 2003), Yuan implementó una estructura de doble lazo con el lazo interno y el lazo externo compensados con los controladores PID y PD-Fusy. El FLC es de doble entrada y salida única. La posición y la velocidad de la bola son las entradas, de las cuales la posición se mide mediante una pantalla táctil y el observador de estado diseñado obtiene la velocidad. El ángulo de inclinación de la placa es la salida del controlador.

A. Knuplei, A. Chowdhur y R. SveEko (2003), utilizaron un producto comercial de HUMU-

SOFT de B&P llamado CE151 para demostrar la estabilidad de la bola. El aparato utiliza un servo-drive con un controlador y dos motores paso a paso para controlar la inclinación de la placa. Para calcular la posición de la bola, se utiliza un sistema de video inteligente compuesto por una cámara CCD, una interfaz de marco de imágenes y un programa para el procesamiento de imágenes en tiempo real (suministrado con el aparato). La interfaz de encuadre de la imagen recibe la señal de video analógica, que se digitaliza con el convertidor AD y se guarda como hoja de datos en un medio de almacenamiento. Una computadora determina, a partir de los datos recibidos, la posición de la bola y calcula la diferencia entre el valor de referencia y el real sobre el cual el controlador genera la señal necesaria para los motores paso a paso. Las regiones aceptables para la ubicación de los dos parámetros, la ganancia y el cero del controlador; se determinan a partir de los criterios de estabilidad de Routh para garantizar la estabilidad de la función de transferencia de lazo cerrado.

D. Liu, Y. Tian y H. Duan (2009), propusieron basándose en el modelo dinámico no lineal obtenido de la ecuación de Euler-Lagrange, un observador de elementos inciertos, es decir, los términos de acoplamiento a menudo descuidados en el diseño. Aplicaron la estimación para diseñar un SMC para el sistema B&P. Los resultados de la simulación no incluyen los efectos de la dinámica del actuador y no se pueden comparar con los resultados de otros documentos.

G. Andrews, C. Colasuonno y A. Herrmann (2004), basados en un modelo dinámico no lineal obtenido de la ecuación general de movimiento para un sistema multicuerpo desarrollaron un modelo matemático. Se realizaron linealizaciones para poder aplicar la teoría de control lineal. El esquema de control para el sistema de equilibrio B&P consta de dos lazos: un lazo interno para controlar el torque del motor basado en un ángulo de la placa deseado y un lazo externo para controlar un ángulo de pla-

ca basado en la ubicación deseada de la bola. Para visualizar mejor los resultados de la simulación, se generó una animación tridimensional utilizando el Toolbox de realidad virtual de MATLAB. Propusieron también un diseño idéntico al de (H. Liu & Liang, 2010). En general, esta disposición requiere un motor costoso con un mayor requisito de par de lo que normalmente es necesario y elimina las ventajas obtenidas como resultado del diseño simétrico de los dos movimientos independientes.

H. Duan, Y. Tian y G. Wang (2010), presentaron un documento sobre una técnica de control de rechazo de perturbaciones activas (ADRC, por sus siglas en inglés). El ADRC se aplicó al control de seguimiento de trayectoria del sistema B&P. En el marco ADRC, la perturbación y el acoplamiento se tratan como variables de estado adicionales, que luego se estiman usando el observador de estado extendido (ESO, por sus siglas en inglés) y se compensan en tiempo real. Los resultados obtenidos fueron interesantes, pero se necesitan varios parámetros para ser ajustados.

N. Mohajerin, M. B. Menhaj (2010), aplicaron técnicas de FLC para controlar la posición estática de la bola en la placa. Se utilizó el HUMUSOFT CE 151 y la idea de diseño era dividir (idealmente) la placa en pequeñas regiones rectangulares para aproximar la ubicación de la bola rodante. Estas regiones se usaron como una indicación de la medida de la distancia de la bola desde el centro de la placa. La acción de control se ajustó en base a un mapeo difuso de la distancia de la bola al ángulo de inclinación de la placa. Para el control combinado de la pelota en ambas direcciones ortogonales, se requieren un total de 22 reglas, por lo que la determinación de las reglas difusas y las funciones de membresía es complicada y depende del conocimiento de un experto, no sería lo más adecuado por el tiempo.

M. Moarref, M. Saadat y G. Vossoughi (2008), introdujeron un sistema de actuación compues-

to por motores paso a paso y un mecanismo paralelo espacial de cinco enlaces. Al no estar los motores conectados directamente a la placa, se derivaron relaciones cinemáticas. Basado en las ecuaciones dinámicas de B&P, la estructura de control de doble circuito y tratando el problema multivariable de control de posición de B&P como dos sistemas SISO separados, se propuso un FLC de supervisión para ajustar las ganancias de PD obtenidas en el diseño. El error y la derivada del error fueron las dos variables difusas definidas para ajustar las dos ganancias PD.

X. Fan, N. Zhang y S. Teng (2004), implementaron un esquema jerárquico de FLC en el modelo educativo HUMUSOFT B&P. El esquema estaba compuesto por tres niveles. El nivel más bajo es un controlador de tachuelas difusas; el nivel medio es un controlador de supervisión difuso que realiza acciones en situaciones extremas; y el nivel superior es un controlador de planificación difuso que determina la trayectoria deseada. Para optimizar la trayectoria de movimiento de la bola; se introdujo un algoritmo genético para ajustar las funciones de membresía de salida del controlador de planificación difusa. Los desafíos planteados en este artículo son similares a los de (Moarref et al., 2008).

## 2.2. Modelo matemático de los sistemas B&P

Para Awtar et al. (2002), las características esenciales que debe tener un sistema B&P se muestran en la Figura 6.

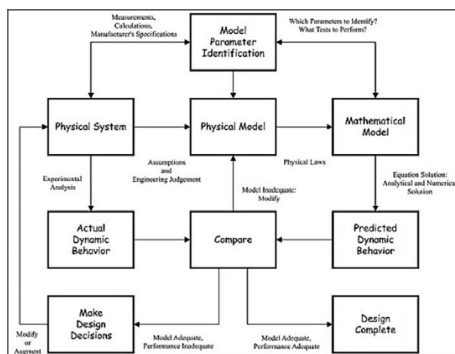


Figura 6: Proceso dinámico de un sistema.  
Fuente: Awtar et al., 2002.

En (KOSE et al., 2018; Morales, Camacho, Leica, & Chávez, 2017), se sugiere un modelo físico para el sistema B&P como se muestra en la Figura 7 y en la Figura 8 se muestra los grados de libertad.

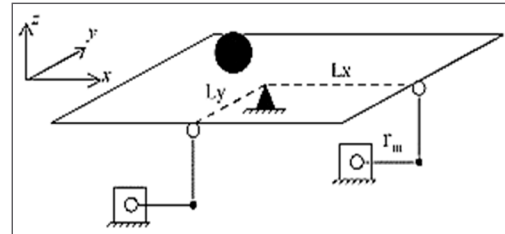


Figura 7: Modelo físico de los sistemas B&P.  
Fuente: KOSE et al., 2018.

Para el modelado de los sistemas B&P, en su mayoría utilizan el método de Euler-Lagrange, debido a que es una poderosa alternativa para sistemas que tienen muchos grados de libertad. Para el modelado de los sistemas B&P se deben asumir las siguientes suposiciones (A.N. Hunde, 2011; Wellstead, 2008):

- La bola siempre debe estar en contacto con la placa.
- No hay deslizamientos entre la bola y la placa.
- No se consideran las fuerzas de fricción.
- La bola debe ser simétrica y homogénea.
- No hay límite para la pendiente de la placa.

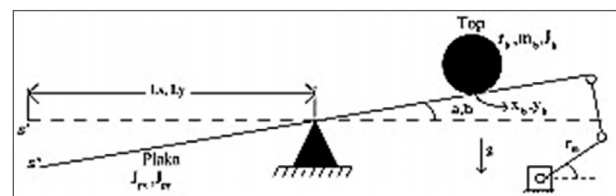


Figura 8: Diagrama de cuerpo libre.  
Fuente: KOSE et al., 2018.

Las ecuaciones de la energía cinética y potencial de la bola se muestran en (1) y (2) respectivamente, mientras que la ecuación de la energía cinética de la placa se indica en (3) (KOSE et al., 2018).

$$T_b = \frac{1}{2} \left( m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) \quad (1)$$

$$V_b = -m_b g (x_b \sin \alpha + y_b \sin \beta) \quad (2)$$

$$T_p = \frac{1}{2} \left[ J_{px} \dot{\alpha}^2 + J_{py} \dot{\beta}^2 + J_b (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + m_b (x_b \dot{\alpha} + y_b \dot{\beta})^2 \right] \quad (3)$$

Tabla 2:  
Parámetros de los sistemas B&P.

Símb.	Unid.	Explicación
$m_b$	kg	Masa de la bola
$r_b$	m	Radio de la bola
$r_m$	m	Longitud del brazo del motor
$g$	m/s <sup>2</sup>	Aceleración gravitacional
$L_x$	m	Longitud del eje x de la placa
$L_y$	m	Longitud del eje y de la placa
$x$	m	Posición de la bola en el eje x
$y$	m	Posición de la bola en el eje y
$\alpha$	grados	Ángulo en el eje x de la placa
$\beta$	grados	Ángulo en el eje y de la placa
$\theta_x$	grados	Ángulo en el eje x del motor
$\theta_y$	grados	Ángulo en el eje y del motor
$J_b$	kgm <sup>2</sup>	Momento de inercia de la bola
$J_{px}$	kgm <sup>2</sup>	Momento de inercia del eje x de la placa
$J_{py}$	kgm <sup>2</sup>	Momento de inercia del eje y de la placa

## 2.3. Tipos de control para los Sistemas B&P

### 2.3.1. Control del modo deslizante (SMC)

Es una técnica de control potente que es capaz de hacer que un sistema de circuito cerrado sea robusto con respecto a las variaciones limitadas de los parámetros de la planta y las perturbaciones externas limitadas (Jeon & Hyun, 2017). En la descripción teórica más básica, un SMC usa un control acotado, que cambia infinitamente rápido, para conducir la trayectoria del espacio de estado sobre una superficie diseña-

da independientemente de los parámetros de la planta (Suleiman et al., 2018). Los parámetros de la superficie están directamente relacionados con la dinámica de bucle cerrado, y el movimiento del espacio de estado en esta superficie se llama modo deslizante. Dado que los parámetros de la superficie se eligen independientemente de los parámetros de la planta, la respuesta de bucle cerrado puede hacerse teóricamente invariable a las variaciones de la planta (Rojko & Jezernik, 2002). A pesar de tal poder, el uso real del control de estructura variable en sistemas prácticos de ingeniería es algo limitado. La renuencia a aplicar el SMC a menudo se debe a la preocupación de que exista charla en el sistema práctico de estructura variable (VSC, por sus siglas en inglés) (Hung & Hung, 1994).

En KOSE et al. (2018), se propone un esquema general del sistema B&P para el lazo SMC como se puede ver en la Figura 9.

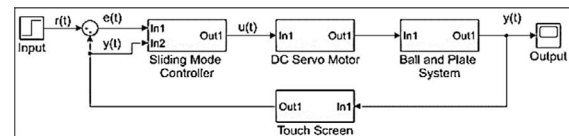


Figura 9: Esquema del SMC en un sistema B&P.

Fuente: KOSE et al., 2018.

En la ecuación (4), se muestra la ecuación que describe en forma general el sistema con incertidumbres y perturbaciones externas:

$$\dot{x}_t = f(x, t) + \Delta f(x, \theta, t) + \{B(x, t) + \Delta B(x, \theta, t)\} \mu(t) + d(x, \theta, t) \quad (4)$$

donde,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estados,  $\mu(t) \in \mathbb{R}^m$  es el vector de control,  $f(x, t) + \Delta f(x, \theta, t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $B(x, t) + \Delta B(x, \theta, t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $\Delta f(x, \theta, t)$  y  $\Delta B(x, \theta, t)$  representan el sistema de incertidumbres,  $\theta$  el parámetro desconocido del vector y  $d(x, \theta, t)$  incluye dinámicas no modeladas y perturbaciones externas (Rojko & Jezernik, 2002).

Para mejorar los resultados Roy et al. (2017), propone realizar un diseño de SMC en cascada para el sistema B&P, en este diseño el sistema se divide en dos sistemas idénticos independien-



tes a lo largo de los ejes X e Y. Por lo tanto, el movimiento a lo largo del eje X se considera para la síntesis del controlador y lo mismo se replica para el movimiento a lo largo del eje Y.

### 2.3.2. Controlador PID

En KOSE et al. (2018), se propone un esquema general del sistema B&P para el lazo de control PID como el que se muestra en la Figura 10.

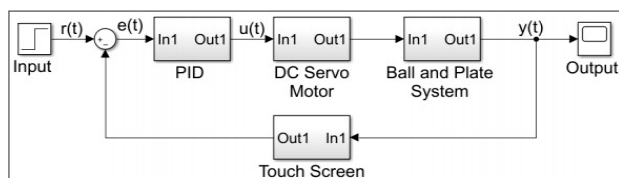


Figura 10: Esquema del PID para sistemas B&P.  
Fuente: KOSE et al., 2018.

Los controladores PID en el lazo exterior están diseñados por separado para ambos ejes y los parámetros PID son independientes entre sí. Por otro lado, la salida PID paralela para ambos ejes se calcula como en (5) y (6).

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (5)$$

$$\mu(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (6)$$

A pesar de que en las últimas décadas han aparecido muchas técnicas de control sofisticadas y avanzadas, Borah, Roy, & Roy, (2018), sugieren no dejar de lado los controladores de la familia PID de enteros de orden (IOPID, por sus siglas en inglés) debido a su simplicidad en diseño e implementación, rentabilidad y robustez aceptable.

### 2.3.3. Controlador de lógica difusa (FLC)

En (KOSE et al., 2018; Mansouri, Teshnehlab, & Aliyari Shoorehdeli, 2015), usaron el modelo difuso de Mamdani, y como método de defuzzificación, el método del centro de gravedad para lograr resultados realistas. El esquema de control se indica en la Figura 11.

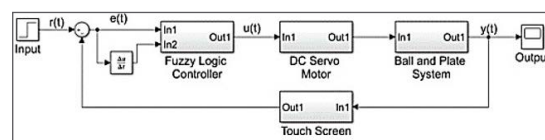


Figura 11. Esquema del FLC para sistemas B&P.  
Fuente: KOSE et al., 2018.

La pantalla táctil detecta la posición de la bola sobre la placa. Una vez que la bola se coloca sobre la palca, la pantalla táctil envía directamente la posición de la bola a la computadora a través de un controlador de pantalla táctil. Y donde sea que la bola se deslice, el cambio de posición se enviará al computador. La tecnología de pantalla táctil es muy eficiente, pero calcula un punto a la vez. Si se tocan dos puntos en la pantalla, el sensor no sabe la entrada a calcular, creando un error en las posiciones de detección. La pantalla táctil tiene cuatro cables, dos de los cuales son para la alimentación (Sinaga, Manurung, Chee, & Djajadi, 2011).

### 2.3.4. Controlador borroso integrado neuronal

El controlador neuro-difuso combina los méritos de la red neuronal difusa y artificial mediante una sola estructura. Por lo tanto, el controlador neuro-difuso tendrá la fácil interpretación de la lógica difusa y el aprendizaje que caracteriza a la técnica de optimización neuronal (K. Han, Tian, Kong, Li, & Zhang, 2012; Singh & Bhushan, 2018).

### 2.3.5 Discusión

El mayor inconveniente para controlar satisfactoriamente este tipo de sistemas es el retraso que se da durante el procesamiento de información recibida en la tarjeta microcontroladora y su procesamiento para ejecutar una acción, para solventar este inconveniente Braescu, Ferariu, Gilca, & Bordianu (2012), adoptaron una solución de código abierto, utilizaron la FreeRTOS; esta placa facilita obtener una comprensión profunda de cómo funciona un kernel en tiem-

po real. Vale la pena mencionar que FreeRTOS ilustra las instalaciones que son comunes para una gran variedad de sistemas operativos en tiempo real, como los mecanismos específicos para la ejecución multitarea en combinación con las rutinas de servicio de interrupción (ISR), la comunicación entre procesos a través de mensajes en cola y sin cola y recurso compartido pasivo a través de sincronizaciones basadas en mutex/semáforo; mientras que Žáková & Rábek (2018), sugieren utilizar una Raspberry Pi debido a su procesador y otros autores como (Kasula, Thakur, & Menon, 2018; Zheng, Li, Wang, & Ding, 2011) recomiendan usar una placa Arduino en conjunto con LAbVIEW y MATLAB.

Al usar el filtro clásico de Kalman, (J. Han & Liu, 2016), recomiendan tener en cuenta que la precisión de la estimación del estado depende del modelo discreto exacto del sistema controlado. El modelo discreto del sistema B&P es un modelo lineal simplificado y de discretización, por lo que el modelo discreto no reflejará completamente el sistema B&P real. El uso de este filtro clásico de Kalman para estimar el estado de un modelo tan discreto dará como resultado una divergencia de filtrado, por lo que es necesario superar el error del modelo de una manera efectiva. Para ello recomienda usar adicionalmente el método de filtrado de memoria que desaparece para superar efectivamente la divergencia de filtrado, su idea general es aumentar la influencia de los nuevos datos de medición y reducir la influencia de los datos de medición antiguos al realizar el filtrado.

En la Tabla 3, se muestran los mejores resultados obtenidos con las tres técnicas de control convencional aplicadas experimentalmente por varios autores de la revisión realizada.

Tabla 3:  
Resultados de las experimentaciones.

Criterio de Rendimiento	SMC	
	Eje X	Eje Y
Sobreimpulso	0.0 %	25.0 %
Tiempo de subida	1.0 s	0.7 s
Tiempo de asentamiento	4.3 s	3.5 s
Error en estado estacionario	$\pm 8.0$ mm	$\pm 4.0$ mm

Criterio de Rendimiento	PID	
	Eje X	Eje Y
Sobreimpulso	0.0 %	38.7 %
Tiempo de subida	1.0 s	4.3 s
Tiempo de asentamiento	9.0 s	10.0 s
Error en estado estacionario	9.5 mm	-8.0 mm

Criterio de Rendimiento	FLC	
	Eje X	Eje Y
Sobreimpulso	9.5 %	0.0 %
Tiempo de subida	0.6 s	2.5 s
Tiempo de asentamiento	6.3 s	2.8 s
Error en estado estacionario	$\pm 6$ mm	$\pm 4.5$ mm

Fuente: Propia

El estado del arte realizado, sirve de base para el desarrollo del tema de tesis de Maestría "Desarrollo de una estrategia de optimización híbrida basada en un algoritmo de forraje bacterial (BFA) y un algoritmo por enjambre de partículas (PSO) para la sintonía de controladores tipo PID". El desarrollo de esta nueva estrategia

de control, será de utilidad para las aplicaciones lineales y no lineales que usen el controlador PID como es el caso de los sistemas B&P. Para el procesamiento del algoritmo se hará uso del software MATLAB y para el accionamiento del sistema la placa Raspberry Pi 4. Además, el sis-

tema será retroalimentado por Visión Artificial; con esto se estaría implementando un controlador totalmente híbrido que usaría lo mejor de cada técnica de control tradicional para mejorar el rendimiento y consumo energético.

## CONCLUSIONES

La mayoría de los autores concuerdan que utilizar una sola técnica de controlador no basta para mejorar la obtención de los resultados por lo que los nuevos estudios se enfocan en la utilización de dos o más técnicas e incluso están proponiendo mejoras a los controles comunes, todo con el fin de mejorar los resultados que se han obtenido hasta el momento en este tipo de sistemas.

El controlador de lógica difusa es uno de los más sencillos de implementar debido al uso de reglas en lugar de modelos matemáticos, pero al ser los sistemas B&P muy dinámicos y sus-

ceptibles a muchas perturbaciones externas hacen que esta técnica use demasiadas reglas lo cual toma demasiado tiempo para su puesta en marcha.

Para la optimización de los parámetros varios autores usan los software LabVIEW y MATLAB para procesar los modelos matemáticos y obtener mejores resultados, ya que las placas de control solo adquieren los datos y accionan los actuadores y todos los procesos matemáticos se realizan en la computadora, es así que al usar herramientas de estos software los sistemas B&P actuales cuentan con visión artificial.

## REFERENCIAS

- A.N. Hunde. (2011). Design of Fuzzy Sliding Mode Controller for The Ball and Plate System.
- Andrews, G., Hermann, A., & Colasuonno, C. (2004). Ball on Plate Balancing System.
- Awtar, S., Bernard, C., Boklund, N., Master, A., Ueda, D., & Craig, K. (2002). Mechatronic design of a ball-on-plate balancing system. *Mechatronics*, 12(2), 217-228. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(01\)00062-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0957-4158(01)00062-9)
- Borah, M., Roy, P., & Roy, B. K. B. K. (2018). Enhanced Performance in Trajectory Tracking of a Ball and Plate System using Fractional Order Controller. *IETE Journal of Research*, 64(1), 76-86. <https://doi.org/10.1080/03772063.2017.1343157>
- Braescu, F. C., Ferariu, L., Gilca, R., & Bordianu, V. (2012). Ball on plate balancing system for multi-discipline educational purposes. 2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2012 - Joint Conference Proceedings, 1-6.

- Chevalier, A., Copot, C., Ionescu, C. M., & Keyser, R. De. (2016). Automatic calibration with robust control of a six DoF mechatronic system. *Mechatronics*, 35, 102–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.01.005>
- Duan, H., Tian, Y., & Wang, G. (2010). Trajectory tracking controller design of high-order ball and plate system based on improved auto-disturbance rejection controller. *ISSCAA2010 - 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics*, (m), 80–85. <https://doi.org/10.1109/ISSCAA.2010.5633233>
- Fabregas, E., Chacón, J., Dormido-Canto, S., Farias, G., & Dormido, S. (2015). Virtual Laboratory of the Ball and Plate System. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 152–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.229>
- Fan, X., Zhang, N., & Teng, S. (2004). Trajectory planning and tracking of ball and plate system using hierarchical fuzzy control scheme. *Fuzzy Sets and Systems*, 144(2), 297–312. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(03\)00135-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-0114(03)00135-0)
- Han, J., & Liu, F. (2016). Positioning control research on Ball&Plate system based on Kalman filter. *Proceedings - 2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2016*, 1, 420–424. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2016.196>
- Han, K., Tian, Y., Kong, Y., Li, J., & Zhang, Y. (2012). Tracking control of ball and plate system using a improved PSO on-line training PID neural network. *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012*, 2297–2302. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2012.6285702>
- Hung, J. Y., & Hung, J. C. (1994). Chatter reduction in variable structure control. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 3, 1914–1918. <https://doi.org/10.1109/iecon.1994.398110>
- Jeon, J.-H., & Hyun, C.-H. (2017). Adaptive sliding mode control of ball and plate systems for its practical application. *2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2017*, 119–123. <https://doi.org/10.1109/ICCRE.2017.7935054>
- Kalúz, M., Klaučo, M., Čirka, L., & Fikar, M. (2019). Flexy2: A Portable Laboratory Device for Control Engineering Education. *IFAC-PapersOnLine*, 52(9), 42–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.121>
- KASSEM, A., HADDAD, H., & ALBITAR, C. (2015). Comparison Between Different Methods of Control of Ball and Plate System with 6DOF Stewart Platform. *IFAC-PapersOnLine*, 48(11), 47–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.158>
- Kasula, A., Thakur, P., & Menon, M. K. K. (2018). GUI based Control Scheme for Ball-on-Plate System using Computer Vision. *2018 IEEE Western New York Image and Signal Processing Workshop, WNYISPW 2018*. <https://doi.org/10.1109/WNYIPW.2018.8576461>
- Knuplei, A., Chowdhury, A., & Sveeko, R. (2003). Modeling and control design for the ball and plate system. 1064–1067.
- Köse E., Abacı K., A. S. (2010). Mekanik Sistemlerin PID ve Kayma Kipli Kontrol ile Modellenmesi ve Analizi, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*. 2–6.

- KOSE, F., KAPLAN, K., & Ertunc, H. M. M. (2018). Real time position and trajectory control of ball and plate system using different control techniques. 2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018, (October), 25–27. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751946>
- Köse, F., Kaplan, K., Ertunç, H. M., & Üniversitesi, K. (2013). PID ve Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda STM32F407 Tabanlı Hız Kontrolü. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 26–28.
- Lian, C., Xu, X., Zuo, L., & Huang, Z. (2014). Adaptive critic design with graph Laplacian for online learning control of nonlinear systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 28(3–5), 290–304. <https://doi.org/10.1002/acs.2344>
- Liu, D., Tian, Y., & Duan, H. (2009). Ball and Plate Control System based on sliding mode control with uncertain items observe compensation. *Proceedings - 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, ICIS 2009*, 2(60974067), 216–221. <https://doi.org/10.1109/ICICISYS.2009.5358057>
- Liu, H., & Liang, Y. (2010). Trajectory tracking sliding mode control of ball and plate system. *CAR 2010 - 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 3, 142–145. <https://doi.org/10.1109/CAR.2010.5456649>
- Mansouri, M., Teshnehlab, M., & Aliyari Shoorehdeli, M. (2015). Adaptive variable structure hierarchical fuzzy control for a class of high-order nonlinear dynamic systems. *ISA Transactions*, 56, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.11.014>
- Moarref, M., Saadat, M., & Vossoughi, G. (2008). Mechatronic design and position control of a novel ball and plate system. 2008 Mediterranean Conference on Control and Automation - Conference Proceedings, MED'08, 1071–1076. <https://doi.org/10.1109/MED.2008.4602212>
- Mohajerin, N., Menhaj, M. B., & Doustmohammadi, A. (2010). A Reinforcement Learning Fuzzy Controller for the Ball and Plate system. 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, WCCI 2010. <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2010.5584025>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Grp, P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Physical Therapy*, 89(9), 873–880. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Morales, L., Camacho, O., Leica, P., & Chávez, D. (2017). A sliding-mode controller from a reduced system model: Ball and plate system experimental application. *ICINCO 2017 - Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 1, 590–597. <https://doi.org/10.5220/0006425905900597>
- Nguyen, H.-N., Olaru, S., Gutman, P.-O., & Hovd, M. (2012). Improved vertex control for a ball and plate system. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 45(13 PART 1), 400–405. <https://doi.org/10.3182/20120620-3-DK-2025.00151>
- Parga, C., Yu, W., & Li, X. (2015). A low-cost ball and plate system for advanced control education. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 52(4), 370–384. <https://doi.org/10.1177/0020720915591582>

- Rojko, A., & Jezernik, K. (2002). Adaptive fuzzy sliding mode motion control of robot manipulator. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(1), 49-54. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.01079>
- Roy, P., Acharjee, S., Ram, A., Das, A., Sen, T., & Roy, B. K. (2017). Cascaded sliding mode control for position control of a ball in a ball and plate system. *2016 IEEE Students' Technology Symposium, TechSym 2016*, 79-84. <https://doi.org/10.1109/TechSym.2016.7872659>
- Sinaga, E. F., Manurung, E. B., Chee, V. A., & Djajadi, A. (2011). Building and Controlling a Ball and Plate System. In *Communications in Computer and Information Science: Vol. 142 CCIS* (pp. 600-608). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19542-6\\_118](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19542-6_118)
- Singh, R., & Bhushan, B. (2018). Real-time control of ball balancer using neural integrated fuzzy controller. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9658-7>
- Suleiman, H. U. H. U., Murazu, M. B. B. M. B., Zarma, T. A. T. A. A., Salawudeen, A. T. T. A. T., Thomas, S., & Galadima, A. A. A. A. (2018). Methods of chattering reduction in sliding mode control: A case study of ball and plate system. *IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology, ICAST, 2018-Augus*. <https://doi.org/10.1109/ICASTECH.2018.8506783>
- Sun, S. Q., & Li, L. (2012). The Study of Ball and Plate System Based on Non-Linear PID. *Applied Mechanics and Materials*, 187, 134-137. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.187.134>
- Wang, H., Tian, Y., Sui, Z., Zhang, X., & Ding, C. (2007). Tracking control of ball and plate system with a double feedback loop structure. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007*, 1114-1119. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303704>
- Wellstead, P. E. (2008). Introduction to Physical System Modelling. In *Essays in Biochemistry* (Vol. 45). <https://doi.org/10.1042/BSE0450001>
- Yaovaja, K. (2018). Ball Balancing on a Stewart Platform using Fuzzy Supervisory PID Visual Servo Control. *ICAICTA 2018 - 5th International Conference on Advanced Informatics: Concepts Theory and Applications*, 170-175. <https://doi.org/10.1109/ICAICTA.2018.8541349>
- Yuan, D. H. (2009). Pneumatic servo ball & plate system based on touch screen and oscillating cylinder. *2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, ISA 2009*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/IWISA.2009.5073011>
- Žáková, K., & Rábek, M. (2018). Remote Control of Thermo-opto-mechanical Plant via Raspberry Pi. *IFAC-PapersOnLine*, 51(6), 479-483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.188>
- Zheng, F., Li, X., Wang, S., & Ding, D. (2011). Position control of ball and plate system based on switching mechanism. *IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL*, (61074055), 233-237. <https://doi.org/10.1109/ICAL.2011.6024719>