



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**BENCHMARK DE CONTROLADORES PID, FUZZY Y LQR APLICADOS A
UN BEAN&BALL MEDIANTE UN WNCS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica y Automatización

AUTORES: Alex Fernando Andrade Quezada

Fernando Tobias Loor Vivas

TUTOR: Carlos Germán Pillajo Angos

Quito-Ecuador

2025

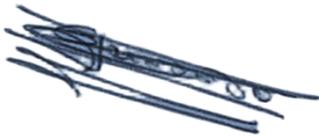
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Alex Fernando Andrade Quezada con documento de identificación N° 0605046093 y Fernando Tobias Loor Vivas con documento de identificación N° 1725371551; manifestamos que:

Somos autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 27 de febrero del año 2025

Atentamente,



Alex Fernando Andrade Quezada
0605046093



Fernando Tobias Loor Vivas
1725371551

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Alex Fernando Andrade Quezada con documento de identificación N° 0605046093 y Fernando Tobias Loor Vivas con documento de identificación N° 1725371551, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Benchmark de controladores PID, FUZZY y LQR aplicados a un bean&ball mediante un WNCS”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica y Automatización, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 27 de febrero del año 2025

Atentamente,



Alex Fernando Andrade Quezada
0605046093



Fernando Tobias Loor Vivas
1725371551

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Germán Pillajo Angos con documento de identificación N°1709255119, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: BENCHMARK DE CONTROLADORES PID, FUZZY Y LQR APLICADOS A UN BEAN&BALL MEDIANTE UN WNCS, realizado por Alex Fernando Andrade Quezada con documento de identificación N° 0605046093 y Fernando Tobias Loor Vivas con documento de identificación N° 1725371551, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 27 de febrero del año 2025

Atentamente,



Ing. Carlos Germán Pillajo Angos, PhD
1709255119

DEDICATORIA

Con profundo amor y gratitud quiero dedicar este proyecto a Dios, que actuó como fuente de mi fortaleza y quien me ha concedido la salud y el ánimo necesarios para culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mi madre Rosa Quezada y mi hermana Andrea Andrade, quienes han sido mi refugio y apoyo incondicional en cada paso que he dado en este camino y aunque no siempre lo demuestro. A mi padre Gonzalo Andrade, quien desde su partida se ha convertido en mi mayor fuente de inspiración y guía; este logro también es suyo.

A Akamaru, mi leal y querido compañero, quien con su presencia constante lleno de ánimo mis largas noches de estudio y trabajo, su compañía me recordaba que incluso en los momentos más difíciles, no estaba solo.

También quiero dedicar este trabajo a dos 2 personas que he conocido en mi vida, uno en mi etapa de colegio y otro en la etapa universitaria, Vinicio Garcia y Jossue Pallo quienes han sabido estar ahí en los momentos necesarios y difíciles, supieron escuchar y ser apoyo cuando necesitaba un pequeño empujón para no dar paso atrás a mis propósitos, más que amigos los aprecio como mis hermanos.

Por último, pero no menos importante, quiero extender un agradecimiento a los docentes que, con su dedicación, apoyo y conocimiento marcaron mi camino universitario. Su compromiso y esfuerzo me impulsaron a alcanzar metas que parecían inalcanzables y por ello les estaré agradecido.

Alex Fernando Andrade Quezada

Dedico este trabajo a Dios por haberme otorgado la fuerza de voluntad para poder vencer todas las adversidades que se han presentado a lo largo de mi vida y por lograr concluir el presente trabajo de titulación.

A mi madre, Ketty Vivas por ser mi guía y mi luz en los momentos de oscuridad, por brindarme todo su amor, paciencia y sabiduría lo cual ha sido la base sobre la que he construido mis sueños, por cada sacrificio suyo, cada consejo y palabra de aliento los cuales me han permitido llegar hasta aquí, quiero que sepa que este logro es tanto suyo como mío pues sin ella esto no hubiera sido posible.

A mi familia, a mis hermanas Martha, Nancy, Maryuri, Laura por ser ese refugio en el cual siempre encuentro fuerzas gracias por su apoyo y amor incondicional, a mi hermano Juan por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, cada consejo y palabras de aliento.

A mi novia, Maolly Estrada por caminar junto a mí con amor, paciencia y comprensión, por los detalles, cada gesto de amor, su presencia en mi vida, su amor ha sido de gran apoyo y una fuente constante de alegría y motivación en mi vida, te agradezco por todo, te amo.

A mi padre, Tobias Loor que, aunque ya no se encuentre físicamente aquí con nosotros, su memoria y ejemplo han sido fuente de inspiración y ejemplo para todos nosotros.

A todos ustedes, les doy las gracias por ser mi fuerza, mi motivación, mi inspiración y mi refugio. Este trabajo es el resultado no solo de mi esfuerzo, sino del amor y la fe que siempre han depositado en mí.

Fernando Tobias Loor Vivas

RESUMEN

La teoría de control se ha visto integrada a la tecnología desde tiempos de la revolución industrial, existiendo casos de la vida cotidiana los cuales son simples de resolver mientras que a nivel industrial se presentan situaciones complicadas en los sistemas lo cual los vuelve inestables sea por las variables que manejen o perturbaciones que infieran sobre el sistema, para estos casos una solución es la aplicación de métodos de control más complejos y robustos, partiendo de este punto y basándonos en una investigación detallada se identificó un modelos de prueba de diferentes controladores el cual presente una dinámica inestable, siendo este un benchmark de controladores PID, FUZZY y LQR aplicados a un sistema barra y bola, investigaciones previas han explorado diversas alternativas como la implementación de modelos LQR, PID, FUZZY y PD resaltando la importancia de que se adapten los algoritmos de control dependiendo de las características que presenten los sistemas. Mientras que el control en redes inalámbricas (WNCS) combina teoría de control y telecomunicaciones con la finalidad de desarrollar sistemas ciberfísicos en tiempo real, de esta manera se realizó la comparativa entre los diferentes controladores. Los resultados muestran que en dependencia del setpoint un controlador puede ser mejor que los otros dos sin embargo se determinó un dominio del controlador LQR basándonos en tiempos de establecimiento y error en estado estacionario.

Palabras clave: Benchmark, Control PID, Control FUZZY, Control LQR, Node-red.

ABSTRACT

The control theory has been integrated into technology since the time of the industrial revolution, there are cases of everyday life which are simple to solve while at the industrial level complicated situations arise in systems which makes them unstable either by the variables that handle or disturbances that inflict on the system, for these cases a solution is the application of more complex and robust control methods, Based on this point and based on a detailed investigation was identified a test model of different controllers which present an unstable dynamics, this being a benchmark of PID controllers, FUZZY and LQR applied to a system bar and ball, previous research has explored various alternatives such as the implementation of LQR models, PID, FUZZY and PD highlighting the importance of adapting the control algorithms depending on the characteristics presented by the systems. While wireless network control (WNCS) combines control theory and telecommunications in order to develop real-time cyber-physical systems, a comparison was made between the different controllers. The results show that depending on the setpoint, one controller may be better than the other two; however, a dominance of the LQR controller was determined based on settling times and steady state error.

Keywords: Benchmark, Control PID, Control FUZZY, Control LQR, Node-red

Benchmark de controladores PID, FUZZY y LQR aplicados a un bean&ball mediante un WNCS

Alex Fernando Andrade Quezada
aandradeq1@est.ups.edu.ec

Fernando Tobias Loor Vivas
floorv@est.ups.edu.ec

Carlos German Pillajo Angos
cpillajo@ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana, UPS, 170146, Quito, Ecuador

1. Introducción

La teoría de control a estado inmersa en el ámbito tecnológico desde tiempos de la revolución industrial [1], generalmente la mayoría de los problemas que aparecen en la vida real son sencillos de resolver [2] mientras que a nivel industrial existen sistemas que son inestables los cuales no operan de una manera consistente y predecible a lo largo del tiempo, presentando ciertas características en los resultados lo cual conlleva a una disminución en calidad y aumento en costos y tiempos de producción [3]. El sistema barra y bola, así como otros sistemas surgen de la necesidad de aprender técnicas de control [4] este tipo de sistemas son ampliamente utilizados como modelos para evaluar diferentes algoritmos de control en procesos no lineales y sistemas en lazo abierto por su naturaleza inestable que presentan [5].

Existen varias alternativas de controladores para sistemas barra y bola entre los más empleados están: LQR (Lineal quadratic regulator), PID (controlador proporcional integrador derivador), y PD (proporcional-derivativo) [6], que se han empleado en diferentes artículos, en los cuales los investigadores han tomado la iniciativa de diseñar diferentes controladores para mejorar el rendimiento del sistema empleando una gran variedad de métodos y equipos empleados [7]. Investigaciones como las siguientes: Rosales realizó la construcción de un sistema barra y bola en material acrílico empleando un potenciómetro lineal para el control de la posición de la bola y un sensor codificador para medir el ángulo de inclinación de la barra [8], Rahmat, Wahid y Wahab realizaron una comparativa del rendimiento de controladores convencionales, modernos e inteligentes encontrando con esto que el PID era el que mejor resultados presentaba [9], Keshmiri, Jahromi y Mohebbi realizaron comparativas en controladores PID basados en modelos LQR con ajuste de parámetros y no basados en modelos determinando que los que eran basados en modelos superaban a su contra parte [10], Muawia, Nordin y Rosdiazli diseñaron controladores Fuzzy estáticos y dinámicos concluyendo que los controladores Fuzzy estáticos eran los que mejores resultados presentaban obteniendo un mejor control sobre la bola [11], Reza y Minh realizaron una

comparativa entre PID con lógica difusa determinando que la lógica difusa presentaba una superioridad para señales cuadradas mientras que Valluru analizo diferentes controladores concluyendo que un controlador LQR robusto presentaba mejores resultados [12], Moezzi, Minh y Tamre, compararon un controlador PID con dos diferentes lógicas difusas reafirmando la superioridad que la lógica difusa presenta sobre ciertos modelos de controladores [13].

A medida que la tecnología avanza va abriendo paso a aplicaciones de sistemas de control en redes inalámbricas [14], al hablar Wireless networked control systems (WNCS) nos referimos a una integración de conceptos entre la teoría de control y la teoría de comunicaciones con la finalidad de crear sistemas ciberfísicos inteligentes en los que tanto los sensores, controladores y actuadores se comuniquen a través de redes inalámbricas [15], las características que presentan las comunicaciones inalámbricas se presentan con la finalidad de mejorar los recursos de las comunicaciones los cuales son esenciales para los sistemas que empleen un control en lazo cerrado en tiempo real [16].

La contribución de este artículo radica en establecer un benchmark entre los controladores PID, Fuzzy y LQR en un sistema barra y bola operada mediante un WNCS con la finalidad de evaluar los diferentes controladores antes mencionados y como responden ante la naturaleza inestable y no lineal de este tipo de sistemas.

El presente documento está conformado de la siguiente manera, sección 1 introducción, sección 2 metodología, sección 3 análisis de resultados, sección 4 discusión y finalmente la sección 5 conclusiones.

2. Metodología

Considerando que el sistema barra y bola como el que se puede observar en la Figura 1 es un ejemplo clásico en la teoría de control que consiste en una barra horizontal que puede rotar sobre un eje y una pelota o bola que rueda a lo largo de la barra, cuyo objetivo principal es controlar la posición de la bola sobre la barra.

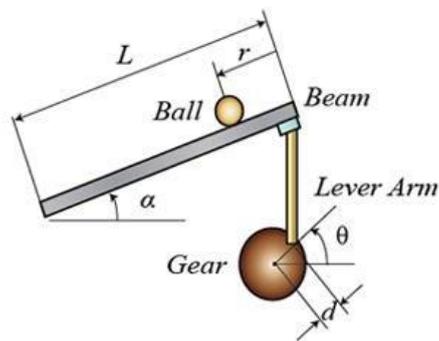


Fig. 1. Sistema de barra y bola [17].

En la Figura 2 se muestra un sistema barra y bola al cual se le incorporó varios componentes para su mejor rendimiento para los 3 sistemas de control y por medio de un equipo podrá acceder a la dashboard de node-red podrá configurar los parámetros de que desee utilizar, utilizando la comunicación graficada en la Figura 3.

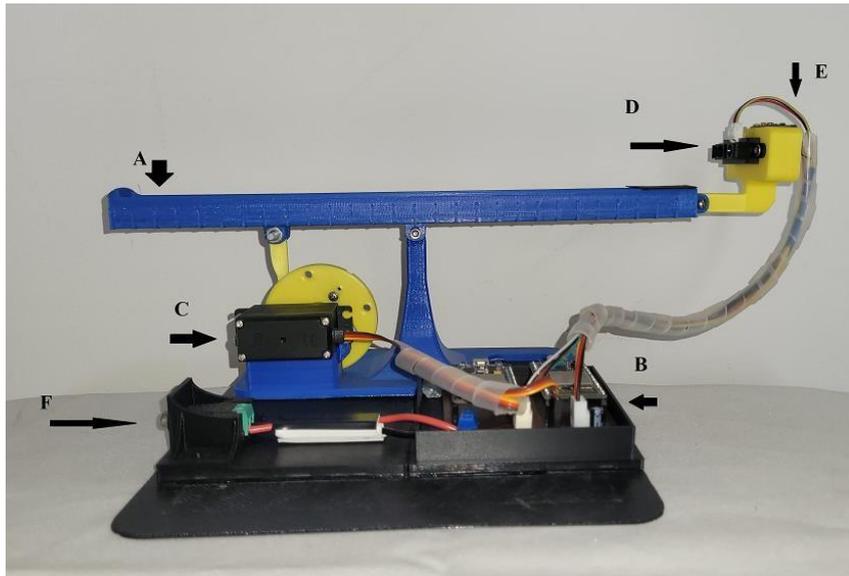


Fig.2. Planta barra y bola para los 3 sistemas de control

Literal	Componente	Descripción
A	Barra	Barra horizontal con fulcro central
B	Placa Controlador	Sistema de control de la planta
C	Actuador servo	Servomotor MG995 180 grados
D	Sensor de distancia	Sensor Sharp GP2Y0A41SK0F 4-30cm
E	Giroscopio	MPU6050
F	Adaptador fuente	Conector Jack DC bornera hembra

Tabla.1. Tabla de la figura 2

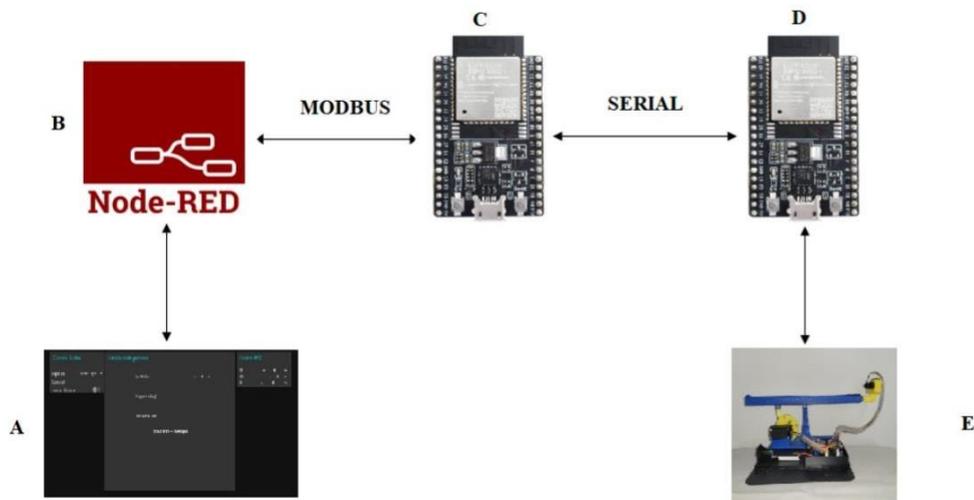


Fig.3. Diagrama de comunicación bidireccional del sistema

Literal	Descripción
A	Interfaz de control (Dashboard) en Node-red
B	Plataforma de adquisición de datos
C	Tarjeta de comunicación con Node-red
D	Tarjeta de control
E	Planta barra y bola

Tabla.2. Tabla de la Figura 3

2.1 Sistemas de control

Un paso primordial es la elaboración de los algoritmos a utilizar para los diferentes sistemas de control.

Para los diferentes algoritmos se utilizó el microcontrolador ESP32 de 38 pines, se tuvo la limitante de memoria del microprocesador para realizar los códigos de los diferentes controladores e implementar la comunicación modbus y por ende se optó por añadir otro microcontrolador comunicándose entre sí de manera serial, como se puede observar en la Figura 4, siendo la ESP32 de la derecha el microcontrolador que contiene los sistemas de control y el de la izquierda hace la comunicación modbus.

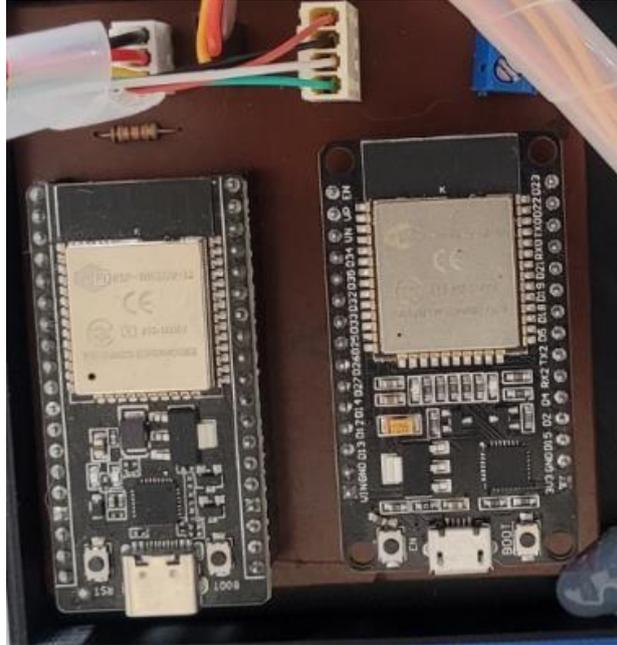


Fig.4. Placa para el sistema de control y comunicación

A continuación, se detalla los algoritmos empleados para la realización del presente trabajo.

- 1.1.1 PID: Para este algoritmo de control se determina en primera instancia la función de transferencia como se observa en la ecuación 1 empleando el software Matlab definiendo el número de polos igual a dos y el número de ceros igual a dos presentando un máximo sobre impulso del 8.83%.

$$Y(S) = \frac{0.0002193S^2 + 0.00002484S - 0.0000003265}{S^2 + 0.1163S + 0.00000000000001947}$$

Ecuación.1. Función de transferencia de la planta.

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema, se obtiene los valores correspondientes de k_p , k_i y k_d como se puede observar en la tabla 3.

VARIABLE	VALOR
K_p	1
K_i	300
K_d	0.008

Tabla.3. Valores de las constantes del controlador PID.

1.1.2 FUZZY: Para el algoritmo fuzzy lo que se debía tener más en consideración es el conjunto de reglas que se establecen basándonos en el modelo Mamdani estableciendo los conjuntos difusos de entrada como se los puede observar en la tabla 4a.

0	-9	-6	-2	1	5
1	-9	-4.5	-1	2.5	7.5
1	-7.5	-2.5	1	4.5	9
0	-5	-1	2	6	9

Tabla. 4a. Valores del conjunto difuso para las entradas

Mientras que el conjunto difuso gráficamente es como se lo muestra en la Figura 5a.

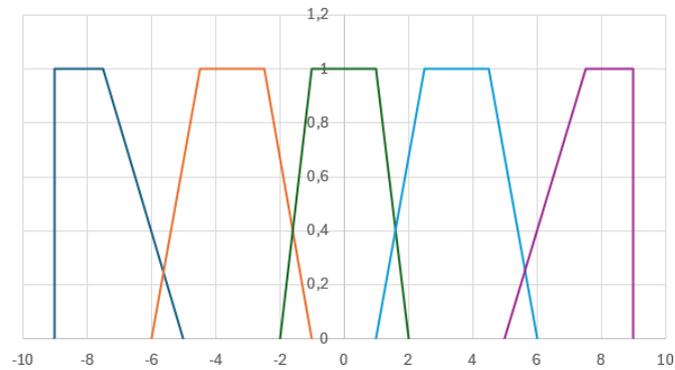


Fig.5a. Grafica del conjunto difuso de entrada

Mientras que el conjunto difuso para las salidas se indica en la tabla 4b.

0	-15	-10	-3	1.5	7.5
1	-15	-7.5	-1	5	13
1	-13	-5	1	7.5	15
0	-7.5	-1.5	3	10	15

Tabla. 4b. Valores del conjunto difuso para las salidas

Y para observar de una manera grafica el conjunto difuso para la salida como se indica en la Figura 5b

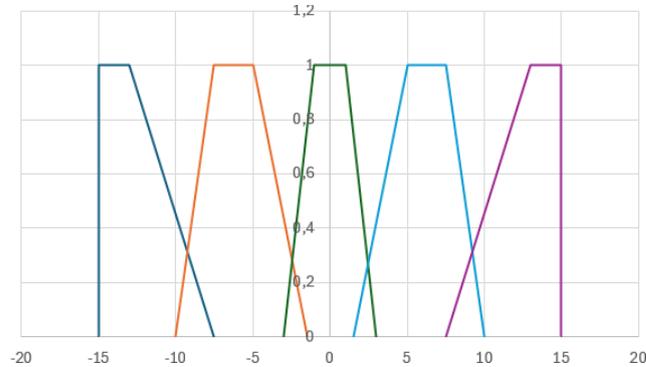


Fig.5b. Grafica del conjunto difuso de salida

1.1.3 LQR: Para este algoritmo el primer paso a realizar fue el de determinar la matriz de ganancias K del sistema, en el cual se utilizó el software de visual studio para la obtención de esta, tuvimos en consideración las siguientes variables como: la gravedad, longitud del péndulo y la masa de la bola obteniendo así la matriz de ganancias k a utilizar en el sistema. Definiendo la matriz de estado A como se muestra en las ecuaciones 2.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{m}{g} & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación.2. Matriz de estados A

Mientras que la matriz de estados B se define como se indica en la ecuación 3.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{ml^2} \end{bmatrix}$$

Ecuación.3. Matriz de estados B

Los valores empleados en las variables mencionadas en las ecuaciones 2 y 3 son los siguientes:

Variable	Valor
$m(g)$	0.003
$g \left(\frac{m}{s^2}\right)$	9.81
$l(cm)$	0.28

Tabla. 5. Valores empleados en las matrices de estado

Finalmente, los valores obtenidos de la matriz de ganancia K para el controlador LQR son los obtenidos en la ecuación 4.

$$K = [3.01317996 \quad 0.69325357]$$

Ecuación.4. Matriz de ganancias K del controlador LQR

2.2 Comunicación modbus planta-Node-red

Después de cargar los diferentes códigos en cada uno de los microcontroladores tanto de la comunicación modbus con los sistemas de control se deben considerar los siguientes puntos:

- En el código de comunicación que se sube a nuestro microcontrolador debe tener el nombre y contraseña de una red wifi para poder funcionar de la mejor manera, en nuestro caso utilizamos la red wi-fi de un celular.
- Debemos tener en la dirección IP de la red para poder así hacer la comunicación entre node-red con la planta, podemos obtener la dirección IP conectando la ESP a nuestro ordenador.
- En node-red tenemos que configurar tanto la red como la dirección IP para que exista una correcta comunicación entre la dashboard o interfaz gráfica y nuestra planta.

2.3 Dashboard de node-red para el control de la planta

Debido a que en un inicio se requiere que el sistema sea inalámbrico a excepción de la fuente de energía de la planta, se dispone de un sistema de control manual por medio del software NODE-RED y por medio de este se diseñó la siguiente interfaz gráfica o dashboard para poder controlar nuestra planta y las diferentes variables necesarias para el correcto funcionamiento de esta, como podemos observar en la Figura 6a.

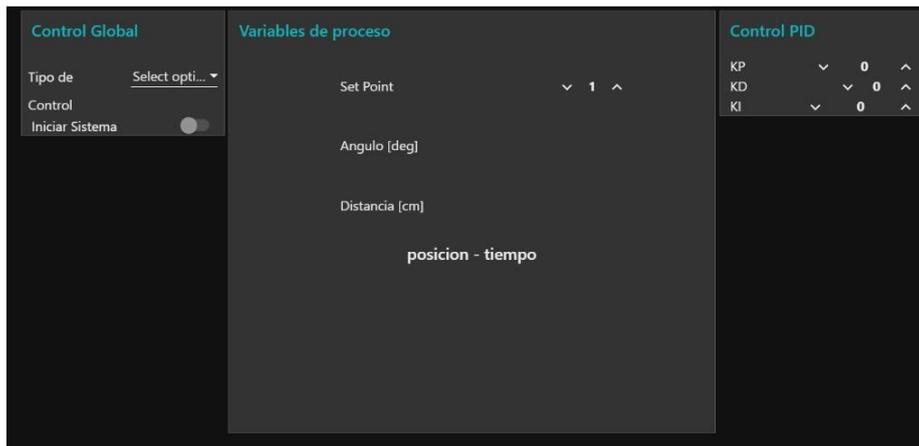


Fig. 6a. Interfaz gráfica de control



Fig. 6b. Ejemplo de grafica en tiempo real.

Control Global. Encontrándose en la parte superior izquierda de nuestra interfaz de la Figura 6a, es donde nosotros seleccionamos el sistema de control que deseamos utilizar entre: PID, FUZZY y LQR y también la activación del control de la planta.

Variables de proceso. Encontrándose en la parte central de nuestra interfaz gráfica de la Figura 6a, en este apartado es donde ubicamos el setpoint que nosotros deseamos, podemos ver el ángulo de inclinación que tiene la planta mostrando la distancia en la que el sensor detecta el objeto de nuestra planta en este caso la pelota.

En el mismo apartado podremos encontrar la gráfica en tiempo real de la lectura de datos de nuestro sistema haciendo una relación de tiempo y posición de este como referencia podemos observar la Figura 6b.

Control PID. Encontrando este apartado en nuestra interfaz gráfica de la Figura 6a de lado superior derecho donde encontramos las 3 variables principales del control PID que son: KP, KI y KD, donde podemos modificar dichas variables a los valores que se desee.

3. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en el sistema barra y bola nos permitieron evaluar el desempeño del sistema y sus diferentes algoritmos de control modificando sus condiciones de operación, para lo cual se tomaron 240 muestras de diferentes setpoints variando su punto de partida en función de la longitud de la barra que fueron: inicio, medio y final, mostrando en las tablas los valores más significativos para la evaluación.

En la Figura 7a se observa los valores obtenidos de la variable medida con el sensor durante la toma de datos estableciendo un valor de setpoint de 7cm para cada uno de los controladores y en la Figura 7b el tiempo que se demoró en establecerse el sistema:

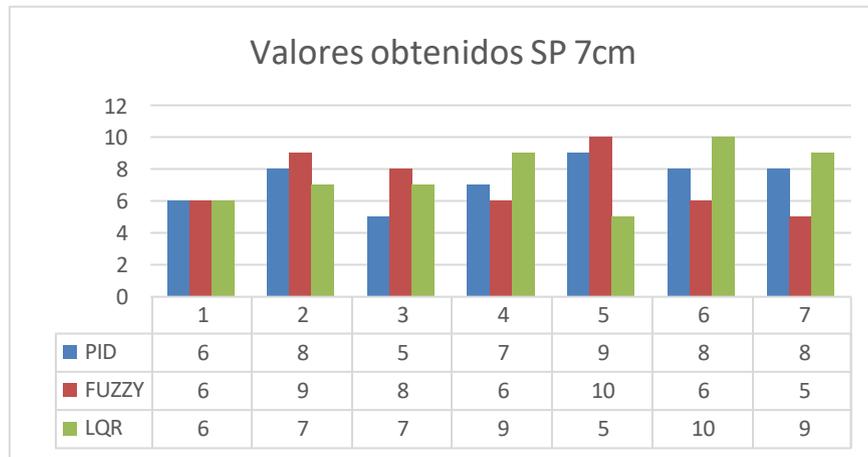


Fig.7a. Valores SP 7cm PID, FUZZY y LQR

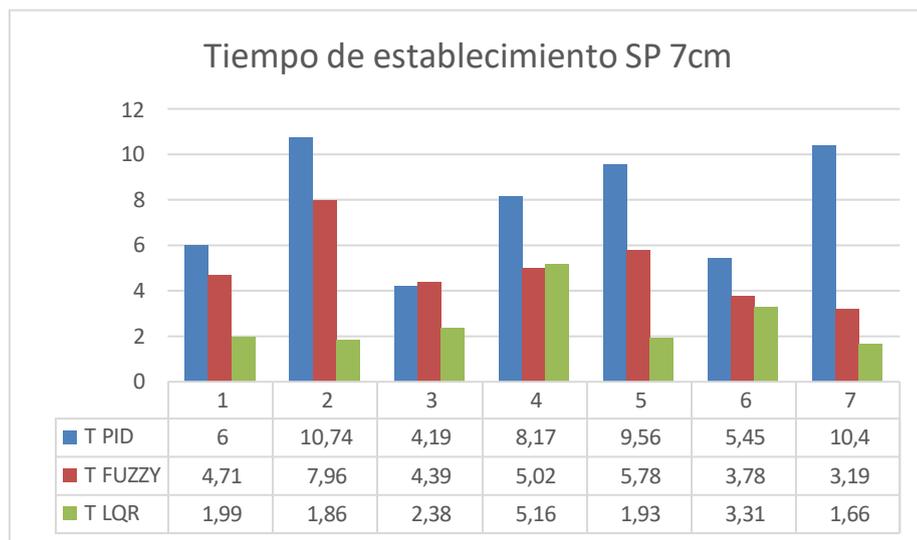


Fig.7b. Tiempo de establecimiento del SP 7cm PID, FUZZY y LQR

Se modifico el valor del setpoint para cada uno de los controladores al valor de 14cm como se puede apreciar en la Figura 8a siendo está el valor obtenido de la medición del sensor y la Figura 8b el tiempo de establecimiento.

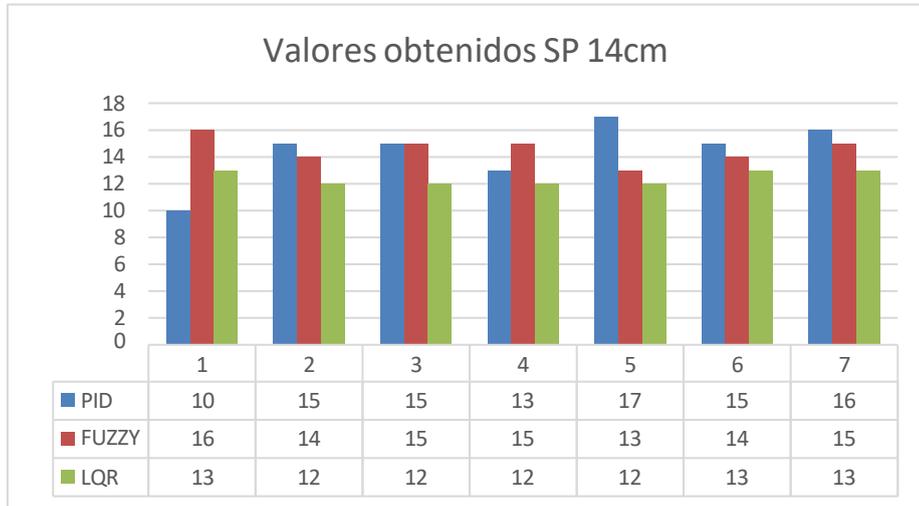


Fig.8a. Valores SP 14cm PID, FUZZY y LQR

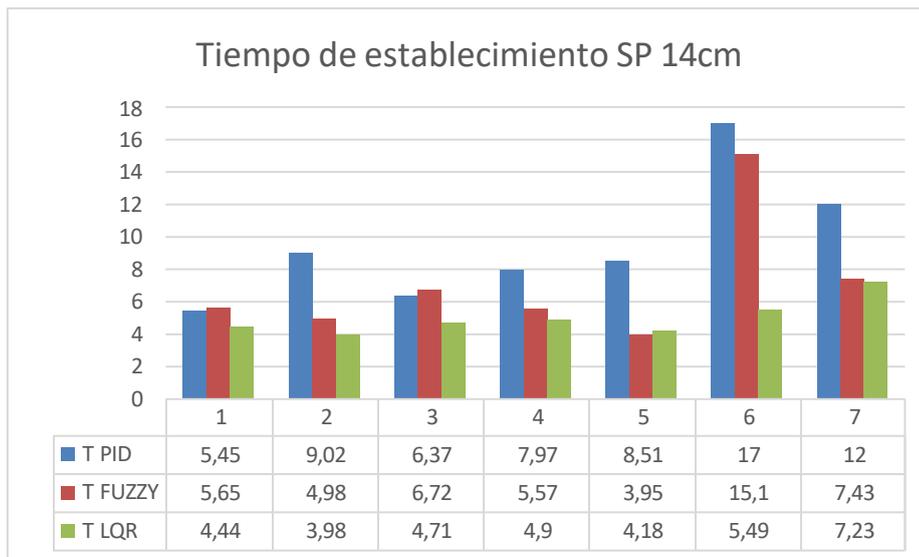


Fig.8b. Tiempo de establecimiento del SP 14cm PID, FUZZY y LQR

Una vez tomadas las muestras de los dos primeros setpoint se varió el valor del setpoint para cada uno de los controladores al valor de 21cm como se puede apreciar en la Figura 9a siendo está el valor obtenido de la medición del sensor y la Figura 9b el tiempo de establecimiento.

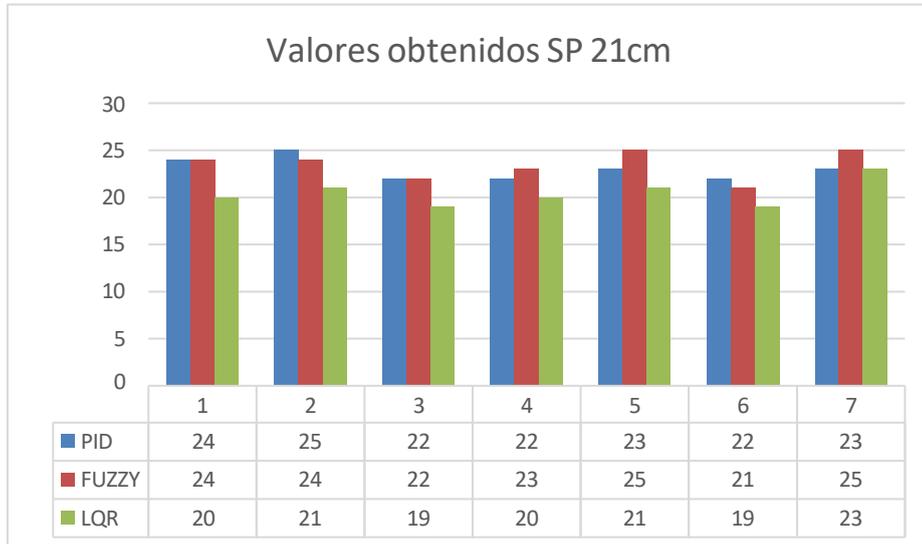


Fig.9a. Valores SP 21cm PID, FUZZY y LQR

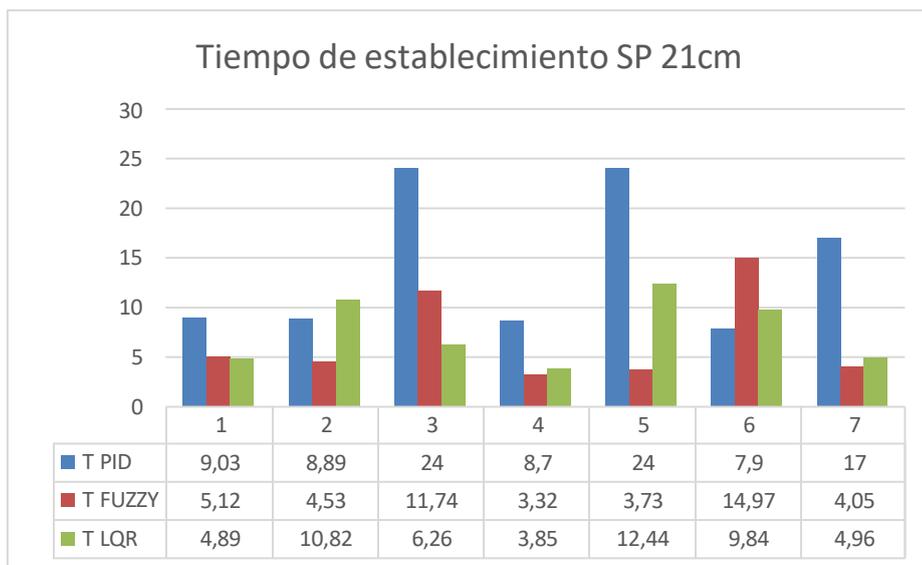


Fig.9b. Tiempo de establecimiento del SP 21cm PID, FUZZY y LQR

Finalmente se probó el último valor del setpoint para cada uno de los controladores tomando este el valor de 28cm como se puede apreciar en la Figura 10a siendo éste el valor obtenido de la medición del sensor y la Figura 10b el tiempo de establecimiento.

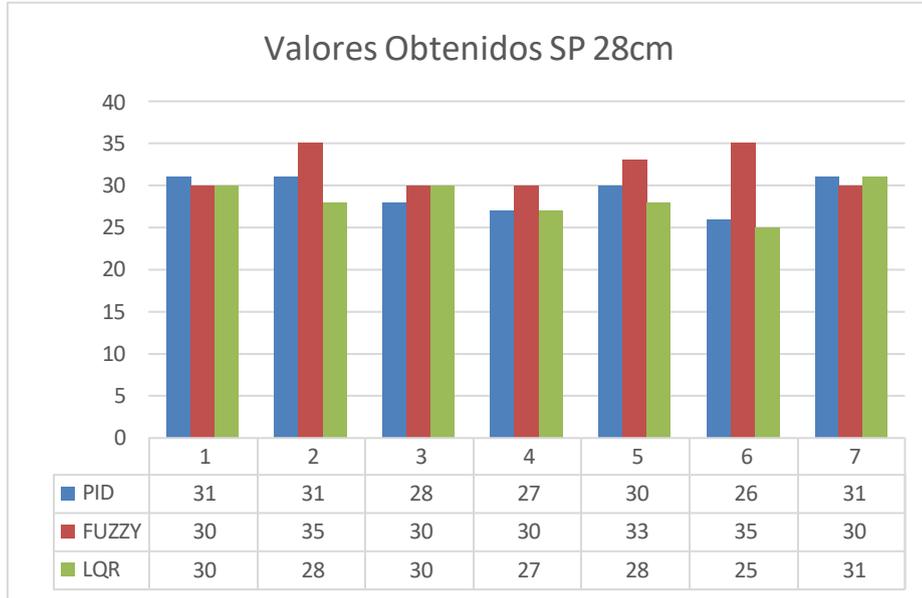


Fig.10a. Valores SP 28cm PID, FUZZY y LQR

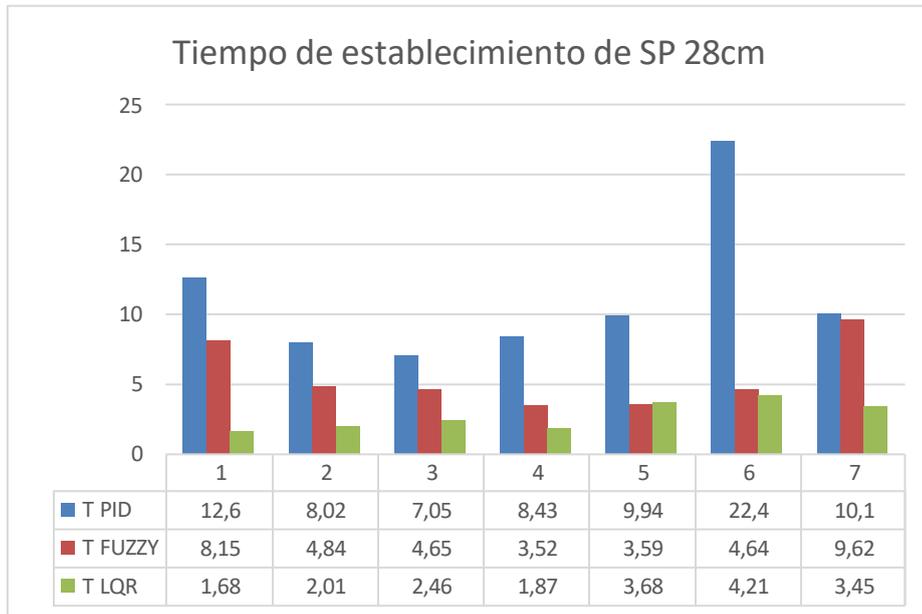


Fig.10b. Tiempo de establecimiento del SP 28cm PID, FUZZY y LQR

Como se puede observar en cada una de las figuras de los resultados obtenidos cada uno de los controladores presentaban error en estado estacionario y en algunos casos

llegaban a valores más cercanos al setpoint establecido con la diferencia principal de que el tiempo de establecimiento es diferente para cada controlador, siendo el de mayor rapidez el control LQR ya que en el caso del control FUZZY depende principalmente del conjunto de reglas establecidas y por ende el control era oscilatorio y en el caso del PID si llega a estabilizarse a un valor cercano al setpoint pero el tiempo que le demando fue el más alto entre los 3 controladores evaluados.

4. Discusión

De la revisión sistemática de información, tanto en artículos, tesis, se utilizó esta planta como modelo para dar una comparativa de los controladores PID, FUZZY y LQR los cuales pueden ser utilizados para el control de sistemas inestables.

En esta comparativa se evaluó el desempeño de cada controlador en términos de estabilidad, tiempo de establecimiento, error en estado estacionario, la robustez que pueden presentar ante perturbaciones. Uno de los inconvenientes que se presentaron durante la realización de las pruebas fue la perturbación al sensor sharp que se empleó para medir la distancia debido a que la estabilidad del sistema se vio afectada por la presencia de luz directa que insidia sobre este.

Debido a las características de la dashboard diseñada mediante node-red, los resultados de los tiempos de establecimiento se tomaron de forma manual, es decir hubo un operario que se encargó de activar el sistema en la dashboard mientras que otro se encargaba de tomar los tiempos de establecimiento manualmente mediante un cronómetro.

En base a los resultados obtenidos y las diferencias significativas que se pudieron observar la determinación del mejor método dependerá del tipo de aplicación, recursos computacionales y recursos económicos, basándonos en los datos obtenidos se empleó el test wilcoxon con el cual se puede determinar que el controlador LQR mostró diferencias significativas ante los otros dos controladores (PID y FUZZY) en la mayoría de distancias exceptuando valores cortos como fue el setpoint de 7cm con lo cual se puede determinar que el controlador más robusto es el LQR.

En el caso del controlador FUZZY se determinó que es una alternativa intermedia cuando no se desee implementar un sistema tan complejo como en el caso del LQR, debido a que este comparte similitudes con el controlador PID a distancias cortas y medias como en el caso de 7 y 14 cm, empezando a diferenciarse cuando el setpoint aumento de distancia como en el caso de 21 y 28 cm.

Finalmente, para el controlador PID presenta una ventaja ante los otros dos controladores (FUZZY y LQR) que es la simplicidad del control, aunque presentando un menor desempeño frente al LQR y al FUZZY en distancias altas.

5. Conclusiones

Cuando se establece el setpoint en distancias bajas como fue en el caso de 7cm ningún controlador presento diferencias significativas ante las otras alternativas, por ende, la selección del controlador a utilizar dependerá de factores como la complejidad del sistema, facilidad de implementación y los recursos disponibles.

Después de realizar las pruebas se determinó que a distancias medianas y grandes el LQR se presenta como la mejor opción de controlador debido a que presenta un mejor tiempo de establecimiento y error en estado estacionario como se puede observar en la sección 3(análisis de resultados).

Se realizó la toma de datos a los diferentes controladores con una muestra de 20 mediciones por cada setpoint se utilizó el test de wilcoxon con el cual se determinó que se tiene un 80% de fiabilidad.

Se comparo los tres controladores en un setpoint pequeño (SP=7 cm), mediante el test de wilcoxon como se puede observar en la tabla #, se determinó que existe un p-valor > 0.05 con lo cual se concluyó que no existe una diferencia significativa entre los grupos comparados

Se comparo los controladores PID vs FUZZY estableciendo un SP=14 cm, empleando el test de wilcoxon se obtuvo un p-valor > 0.05 con lo cual se determinó que no existe diferencia significativa entre los dos controladores.

Finalmente, los controladores PID y FUZZY al tratarse de distancias bajas son las opciones más viables debido a que presentan un equilibrio entre simplicidad de desarrollo y adaptabilidad al sistema.

Referencias

- [1] A. Del negro y G. Hurtado, «REGULADOR CUADRÁTICO LINEAL (LQR) PARA UN SISTEMA DE BOLA Y BARRA,» UNIVERSIDAD RAFAEL URDANETA , Maracaibo, 2014.
- [2] I. Gallego Baleriola, «COMPARATIVA DE DIFERENTES TECNICAS DE CONTROL CON FINALIDAD DIDACTICA SOBRE UNA MAQUETA BOLA Y VIGA DE BAJO COSTE,» Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 2016.
- [3] N. Sakinah Abdul, R. Adnan y M. Tajjudin, «SEMANTIC SCHOLAR,» 1 AGOSTO 2017. [En línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-evaluation-of-fuzzy-PID-controller-for-Aziz-Adnan/c810721db68a324d6131c5edb28d4c9a4ff7cf8a> . [Último acceso: 6 ENERO 2025].
- [4] M. BARRAZA , F. MATIA y B. M. AL-HADITHI, «COMPARACIÓN DE TECNICAS DE CONTROL LQR Y BORROSO EN UN SISTEMA BOLA Y BARRA,» REPOSITORIO UNIVERSIDADE CORUÑA, CORUÑA, 2022.
- [5] A. AbdulrahmanA., «FUZZY CONTROL FOR NONLINEAR BALL AND BEAN SYSTEM,» *International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS)*, ENERO 2013.

- [6] A. Rasaienya, M. Nazari y H. Habibi, «Hardware in the Loop (HIL) Analysis of Fuzzy Controller for Ball and Beam System,» *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, p. 29, 2016.
- [7] NuraMusaTahir, ukumanAboloreYekinni, UsmanIsyakuBature, IbrahimYahuza, AliNuhuShuaibu y AliyuUmarSambo, «CONTROLANDSTABILITYSTUDIESOFBALL ANDBEAMSYSTEM,» *Journal of Modern Technology and Engineering*, 2019.
- [8] A. Rosales Evencio, «A ball-on-beam project kit,» MIT, Massachusetts, 2004.
- [9] R. Mohd Fuaad, H. Wahid y N. Abdul Wahab, «APPLICATION OF INTELLIGENT CONTROLLER IN A BALL,» *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS*, pp. 45-60, MARZO 2010.
- [10] K. Mohammad , J. Ali Fellah , M. Abolfazl , A. Mohammad Hadi y X. Wen-Fang Xie, «ODELING AND CONTROL OF BALL AND BEAM SYSTEM USING MODEL BASED AND NON-MODEL BASED CONTROL APPROACHES,» *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS*, Marzo 2012.
- [11] M. Muawia A. , S. Nordin B. y I. Rosdiazli B. , «Simulation of a Ball on a Beam Model Using a Fuzzy-dynamic and a Fuzzy-static Sliding-mode Controller,» *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 10 Julio 2014.
- [12] M. Reza y V. T. Minh, «SEMANTIC SCHOLAR,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/FUZZY-LOGIC-CONTROL-FOR-NON-LINEAR-MODEL-OF-THE-AND-Reza-Minh/8a4da27d3f98926e5e6607788c5182c8d100a4ac>. [Último acceso: 6 Enero 2025].
- [13] R. Moezzi , T. Minh Vu y M. Tamre, «Fuzzy Logic Control for a Ball and Beam System,» *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences (IJITIS)*, 20 Noviembre 2018.
- [14] C. Pillajo y R. Hincapie, «Stochastic Control for a Wireless Network Control System (WNCS),» *IEEE ANDESCON*, 13 Octubre 2020.
- [15] A. López Terán y D. Zapata Narváez, «DSpace,» JUNIO 2018. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15651>. [Último acceso: 6 Enero 2025].
- [16] . B. Sánchez Pozo y A. Tupiza Bastidas, «DSpace,» SEPTIEMBRE 2020. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19198>.
- [17] N. Musa Tahir, L. Abolore Yekinni, U. Isyaku Bature, I. Yahuza, A. Nuhu Shuaibu y A. Umar Sambo, «CONTROL AND STABILITY STUDIES OF BALL AND BEAN SYSTEM,» *Journal of Modern Technology and Engineering*, p. 124, 2019.