

# Location control of a mobile robot based on fuzzy PID and adaptive filtering LMS and RLS

Christian Salamea-Palacios, Ph.D.<sup>1</sup>, Diego Zhindón, Eng<sup>1</sup>, and Luciano Cabrera, Eng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, [csalamea@ups.edu.ec](mailto:csalamea@ups.edu.ec), [dzhindond@ups.edu.ec](mailto:dzhindond@ups.edu.ec), [lcabrerac@ups.edu.ec](mailto:lcabrerac@ups.edu.ec)

**Abstract**— *The development of traditional PID control systems requires mathematics to find the optimal tuning constants. In contrast, fuzzy controllers are simpler to use because their implementation is based on inference rules created by an expert. In this work, a PID fuzzy controller and an adaptive filter have been implemented in a children healthy treatment mobile robot prototype to control its position, evaluating different membership functions and the behavior of the adaptive filter against external disturbances. Simulink and Arduino have been used for this purpose by means of serial communication. The robot prototype has been designed using inventor, printed with 3D technology. The most efficient controller has been the PD controller, reaching a stability not achieved by the other controllers. The PD controller has been complemented with an adaptive RLS filter, which in turn was the one that obtained the minimum error compared to the LMS filter.*

**Keywords**—PID, Fuzzy Logic, Adaptive Filtering, LSM, RLS.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Control de posición de un robot móvil basado en control PID difuso y filtros adaptativos LMS y RLS

Christian Salamea-Palacios, Ph.D.<sup>1</sup>, Diego Zhindón, Eng<sup>1</sup>, and Luciano Cabrera, Eng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, [csalamea@ups.edu.ec](mailto:csalamea@ups.edu.ec), [dzhindond@ups.edu.ec](mailto:dzhindond@ups.edu.ec), [lcabrerac@ups.edu.ec](mailto:lcabrerac@ups.edu.ec)

**Resumen**– El desarrollo de sistemas de control PID tradicionales requiere de una matemática para encontrar las constantes óptimas de sintonización. En cambio, los controladores difusos son más simples de usar debido a que su implementación se basa en reglas de inferencia creadas por un experto. En este trabajo se ha implementado un controlador PID difuso y un filtro adaptativo en un robot prototipo móvil usado para procesos de rehabilitación infantil con el fin de controlar su posición, evaluando diferentes funciones de pertenencia y el comportamiento del filtro adaptativo frente a perturbaciones externas. Para ello, se ha utilizado Simulink y Arduino por medio de comunicación serial. El robot prototipo ha sido diseñado en inventor, impreso mediante tecnología 3D. El controlador más eficiente resultó ser el PD, alcanzando una estabilidad no conseguida por los otros controladores. El controlador PD se ha complementado con un filtro adaptativo RLS, que, a su vez, fue el que obtuvo el mínimo error al ser comparado con el filtro LMS.

**Palabras clave**-- PID, Lógica difusa, Filtro adaptativo, LMS, RLS.

## I. INTRODUCCIÓN

La robótica ha hecho posible que los humanos puedan llegar a zonas prohibitivas a su naturaleza, por ejemplo, el espacio exterior, el fondo del océano, o zonas contaminadas. Esto ha llevado a que los robots sean utilizados en diferentes ámbitos y aplicaciones según la necesidad. En general, en ellos se conjugan diferentes áreas de estudio como la física, la programación y la inteligencia artificial [1] que es lo que les permite ser flexibles al momento de dar respuesta a una necesidad puntual.

Los robots, al interactuar con humanos, siguen reglas que contemplan la ética y el cumplimiento de las tareas. Asimismo declaró el conjunto de reglas que regulan la interacción humana – robot [2]. Según ellas, un robot no puede hacer daño a un ser humano, ni tampoco, por su inacción, permitir que un humano sea lesionado. Así mismo, un robot debe obedecer las órdenes de los humanos y finalmente deben proteger su propia existencia, salvo que esto esté en conflicto con la existencia de los humanos [2].

La robótica brinda soluciones eficientes también en el ámbito industrial, particularmente en los sistemas de automatización, debido a su flexibilidad, adaptación y su solvencia para afrontar problemas en ambientes laborales [3]. También es utilizada en ámbitos de la salud, en hospitales o centros terapéuticos infantiles donde los robots “sociales” son utilizados para tratar trastornos psicológicos como: ansiedad, déficit de atención, autismo, entre otros [3].

Los robots en el ámbito educativo aportan beneficios en el aprendizaje, principalmente en niños con capacidades especiales, donde la manipulación y la observación, son aspectos fundamentales para procesos de rehabilitación y entretenimiento. Tal como lo menciona Barrera [4], la robótica educativa es un medio que permite desarrollar la capacidad de exploración, construcción de significados, la estimulación de la creatividad y de la curiosidad científica. Entre los objetivos de la robótica educativa está la relación de los niños con la tecnología de tal manera que favorezca el proceso de enseñanza-aprendizaje, además de sus habilidades cognitivas y su autoconfianza. [5].

Cuando se aplican en tratamientos psicológicos o médicos, los robots pueden aliviar la carga psicológica de los infantes, quienes, por su naturaleza, se sienten atraídos por ellos, liberando a los niños de presiones y favoreciendo el aprendizaje [6], no solo en la parte psicológica, sino también en el desarrollo de habilidades motrices. Se entiende por motricidad a la función de un niño de mover el cuerpo o una parte de él [8]. Para que un niño desarrolle una buena locomoción que favorezca su correcto crecimiento, la acción y los procesos psicológicos son esenciales. Estos dos factores pueden llevar al planteamiento de varias interrogantes, entre ellas, ¿Cuáles son los cambios o reacciones que experimenta un bebé o niño en el cerebro al momento de iniciar el aprendizaje de locomoción?, ¿Qué papel emplea el desarrollo de la locomoción en la psicología del niño?, ¿Cuáles son los beneficios en las afecciones que pueden presentarse cuando un niño tiene una discapacidad? [9]. Estas preguntas marcan la pauta sobre cuáles son las características constructivas y funcionales con las que deberá contar un robot para dicho fin.

Para conseguir la funcionalidad de un robot es esencial su equilibrio, el cual se puede conseguir, ya sea mediante un proceso mecánico o mediante control automático. El robot propuesto en este trabajo consiste en una base esférica con sus respectivos actuadores, que permiten el movimiento en cualquier dirección. Para ello, se han usado controladores difusos y controladores clásicos. El controlador se ha elegido en base de la verificación de las perturbaciones del sistema, el conocimiento de la planta, la superficie de desplazamiento, entre otros [10].

Existen dos clases de filtrado que ajustan los parámetros del controlador y la planta con respecto a los datos de entrada y salida: los directos y los indirectos [13]. El filtro adaptativo requiere de una señal de referencia que esté correlacionada con el ruido presente, esta señal de interés es la señal deseada que va a ser comparada con la señal de salida que se va a

ajustar para reducir las perturbaciones del sistema [14]. Por otra parte, los controladores clásicos ofrecen un rendimiento robusto y confiable a la hora de ser implementados en sus configuraciones más comunes: PI, PD y PID. En [15], Penco y Modesti realizaron una comparación entre controladores PID y controladores difusos en un sistema de bola y plataforma, evaluando el sistema en base de dos tipos de trayectorias, una circular y otra rectangular. El controlador PID consiguió estabilizar el sistema, pero se produjo un error de estado estacionario y un retardo en régimen permanente. El controlador difuso, por su parte, redujo el ruido y cumplió con la trayectoria, consiguiendo una dinámica del sistema más estable y coherente. Esto muestra que, para el caso referido, el controlador difuso tiene un mejor resultado, anulando el error estacionario, debido a que proporciona robustez frente a perturbaciones de diferentes niveles de ruido [16]. Otro de los problemas del uso del PID clásico, es la dificultad de encontrar los modelos matemáticos precisos de las plantas de control.

Los controladores PID difusos, en cambio, se basan en teorías de decisión o reglas de inferencia. Estas reglas relacionan las variables de entrada con la variable de salida permitiendo tomar acción con respecto a una condición. Los movimientos del robot están directamente enlazados a estas condiciones con respecto a la señal de entrada del robot y la respuesta de los motores [17]. Por esta razón, se incluyó un filtro adaptativo que lleve a cabo el control de los motores. Así mismo, si bien una estructura esférica está pensada para lograr un rango completo de movimiento, se requiere de un equilibrio dinámico, el cual conlleva una corrección constante para mantenerse en equilibrio [18]. El diseño del robot móvil ha sido orientado con un enfoque de asistencia de niños con dificultades de locomoción.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

En base de prototipos previamente construidos, se concluyó que el hecho de colocar el centro de gravedad lo más abajo posible, permite conseguir la estabilización mecánica del robot y facilita la tarea del controlador automático.

En la Figura 1, se muestran las etapas del funcionamiento del robot desde la adquisición de datos, la normalización y la aplicación del filtro adaptativo que reduce el ruido del sistema frente a las perturbaciones. La señal filtrada pasa por el controlador difuso y luego es transmitida al sistema que produce el movimiento de los actuadores.



Figura 1: Diagrama de bloques

La primera etapa del sistema está orientada a la lectura de los valores del giroscopio. Esto determina la posición del robot sobre el eje X, datos que son transmitidos serialmente y que tienen solo valores reales positivos, por lo que se lleva a

cabo un procesamiento con compuertas lógicas para determinar el signo del ángulo. Esto permite tener el rango de medición angular entre los valores de -45 a 45 grados.

La siguiente etapa consiste en introducir el valor previamente procesado al sistema de control difuso para conseguir la estabilidad de la planta a controlar. De las salidas del controlador difuso se envían las señales a los controladores que indican el sentido de giro y los pasos del motor que estabilizan al robot.

Para la implementación del controlador difuso, se realizó el análisis del desempeño de la planta, de la variación existente de los grados de inclinación del prototipo y la cantidad de pasos que requieren los motores para la estabilización.

Con esas consideraciones, se propuso que las entradas al sistema de control difuso tengan una variación entre -45 a 45 grados distribuidos en 9 funciones de pertenencia, utilizando como punto de referencia de estabilidad a la función (ZE). Luego se determinó la cantidad de pasos requeridos configurando el hardware con pasos de 1/16, obteniendo mayor precisión al momento de generar el paso de los motores.

En la salida del controlador difuso se obtuvo un conjunto de 20 pasos, distribuidos en 5 funciones de pertenencia: cero (ZE), Muy\_Lento (ML), Lento (L), Rápido (R), Muy\_Rápido (MR). Todas estas funciones, tanto para el giro a la derecha (Positivo - P), como para el giro a la izquierda (Negativo - N) se describen en la Tabla I. En la misma tabla también se incluyen las salidas derivativas (d) del controlador.

TABLA I  
REGLAS DE INFERENCIA

Error	Derivativo	Salida
ZE	Zed	ZE
MLN	MLNd	MUY LENTO
LN	LNd	LENTO
RN	RNd	RÁPIDO
MRN	MRNd	MUY RAPIDO
MLP	MLPd	MUY LENTO
LP	LPd	LENTO
RP	RPd	RAPIDO
MRP	MRPd	MUY RAPIDO

Todo el sistema difuso completo donde se describen las entradas, las reglas de inferencia y las salidas se muestran en la Figura 2.

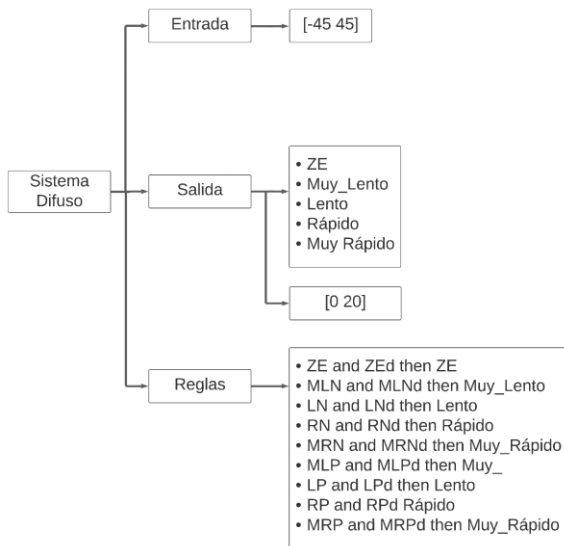


Figura 2: Diagrama de bloque de un sistema difuso

### III. RESULTADOS

El sistema mecánico del prototipo se diseñó en base a la experiencia y a los criterios de estabilidad basados en el centro de gravedad (CG), tal como se muestra en la Figura 3.

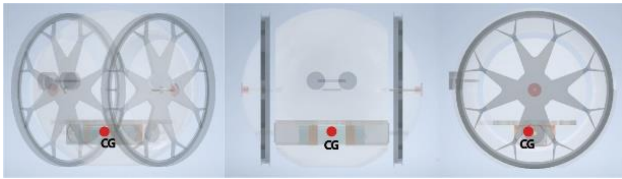


Figura 3: Centro de gravedad

Dos prototipos fueron previamente construidos sin considerar el posicionamiento de los componentes electrónicos. Esto provocaba que, al momento de montarlos, el prototipo girara sobre el eje horizontal sin regresar a la posición de reposo, generando perturbaciones que incrementaban las oscilaciones en la planta.

TABLA II  
CENTRO DE GRAVEDAD

Centro de Gravedad	Coordenada X cm	Coordenada Y cm	Coordenada Z cm
Prototipo 1	0.3	0.35	8.5
Prototipo 2	0.41	2.1	6.2
Prototipo 3	0	0.82	3.2

Para atender dicho problema, se obtuvieron los datos de los centros de gravedad de los tres prototipos construidos, como se muestra en la Tabla II, y con ellos se detectaron y eliminaron los errores de las anteriores propuestas, pudiendo ubicar los componentes electrónicos en el sistema mecánico adecuadamente y consiguiendo una mayor estabilidad del

robot prototipo final al disminuir considerablemente las oscilaciones descritas anteriormente (Tabla III).

TABLA III  
INCLINACIÓN DE LOS TIPOS DE PROTOTIPOS ANTERIORES VS ACTUAL

Prototipo	Inclinación
1	$\pm 12^\circ$
2	$\pm 7^\circ$
3	$\pm 3^\circ$

Así, el diámetro de la esfera que representa el cuerpo del robot prototipo quedó de 17 cm y el conjunto de aro más llanta tiene 19 cm de diámetro, con un peso total de 954g. El diseño final mecánico del prototipo se puede ver en la Figura 4.

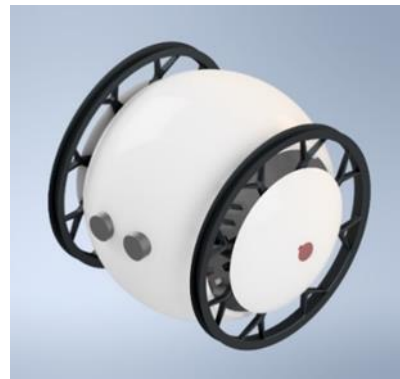


Figura 4: Diseño final mecánico del robot prototipo

La planta del sistema fue obtenida a partir de un controlador automático basado en reglas, las cuales generan una cantidad de pasos en base de un rango establecido de grados. Los pasos configurados por software tienen una variación comparados con los configurados mediante hardware en el controlador del motor. También existe una variación en la cantidad de pasos programados por rango de grado de inclinación presente en el prototipo. La comparación entre los pasos generados por software y hardware en la planta del robot se ven en la Tabla IV.

TABLA IV  
PASOS HARDWARE PARA OBTENCIÓN DE LA PLANTA

Pasos Hardware	Pasos Software	Inclinación	Estabiliza	Tiempo (seg)
Full Step	2	$5^\circ$	NO	60
Half Step	2	$5^\circ$	SI	25
1/8 Step	2	$5^\circ$	SI	18
1/16 Step	2	$5^\circ$	SI	12
Full Step	4	$10^\circ$	NO	60
Half Step	4	$10^\circ$	NO	60
1/8 Step	4	$10^\circ$	SI	28

1/16 Step	4	10°	SI	21
Full Step	6	15°	NO	60
Half Step	6	15°	NO	60
1/8 Step	6	15°	SI	28
1/16 Step	6	15°	SI	16

Con la información de la variación de pasos en el robot se obtuvo la planta del sistema (Figura 5) y con (1), se mide la diferencia entre la horizontal y la inclinación del robot.

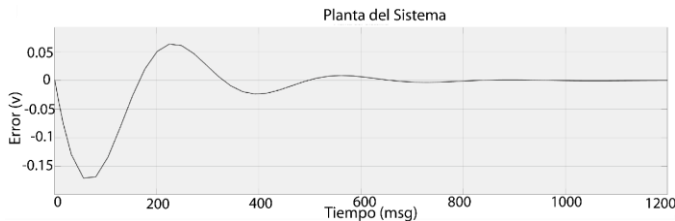


Figura 5: Planta del sistema

$$H(s) = \frac{-0.0052s + 0.00001}{1.0000s^2 + 0.0121s + 0.0004} \quad (1)$$

Con la planta del sistema, se generaron las reglas de inferencia para el controlador difuso. La entrada del controlador está representada por los grados de inclinación que entrega el giroscopio y su salida por el número de pasos que corresponde a la señal del controlador que maneja los motores (Tabla V).

TABLA V  
REGLAS DE INFERENCIA

Señal	Rango	Medida	# Función de Pertenencia
Entrada	[-45, 45]	grados	9
Salida	[0, 20]	pasos	5

Las reglas de inferencia se basaron en el conocimiento de base obtenido al analizar el comportamiento del prototipo sin controlador y en base del comportamiento que debe tener el sistema para estabilizarse.

En este proceso se realizaron varias pruebas con las diferentes configuraciones de un controlador PID difuso. Esto con el propósito de definir la mejor configuración para estabilizar el prototipo. A continuación, en la Figura 6 se muestra la gráfica que se obtuvo aplicando el controlador P, consiguiéndose la estabilización a los 900 milisegundos.

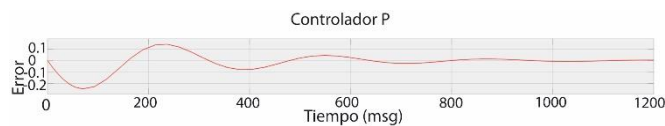


Figura 6: Controlador P

En la Figura 7, se muestra el resultado obtenido con el controlador PI. Se puede ver que el sistema no llega a su referencia, pero alcanza a una estabilidad en 600 milisegundos.

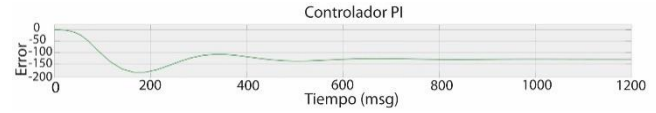


Figura 7 Controlador PI

A continuación, se muestra la Figura 8 el resultado de aplicar el controlador PD. En este caso, el sistema se estabiliza en un tiempo de 500 milisegundos.

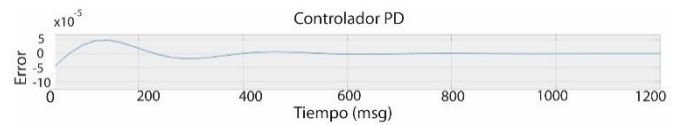


Figura 8 Controlador PD

A continuación, se muestra la gráfica que se obtuvo aplicando el controlador PID. El tiempo de estabilización es en 550 milisegundos.

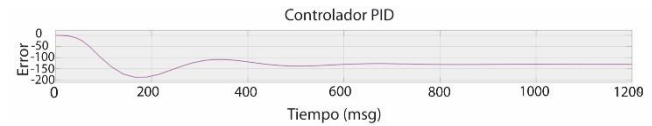


Figura 9: Controlador PID

Así, el controlador óptimo fue el PD, ya que el tiempo de estabilización es menor que el obtenido con los controladores P y PID. Así, el sistema requiere dos señales de entrada, una que pertenece al error y la otra a la derivada del error.

Los datos de entrada llegan del sensor de ángulo y son adquiridos por el Arduino, para a su vez, ser enviados a Simulink, tal como se muestra en la Figura 10. Luego de acondicionar la señal de entrada se obtiene el valor del grado de inclinación del prototipo. Dado que se visualiza únicamente el valor positivo, se lo transforma mediante bloques de operación lógica y decisiones al rango extendido de la parte positiva y negativa del muestreo de la señal de entrada.



Figura 10: Comunicación serial del robot al simulink

Ya con la señal completa, se procedió a incorporar los filtros adaptativos LMS y RLS.

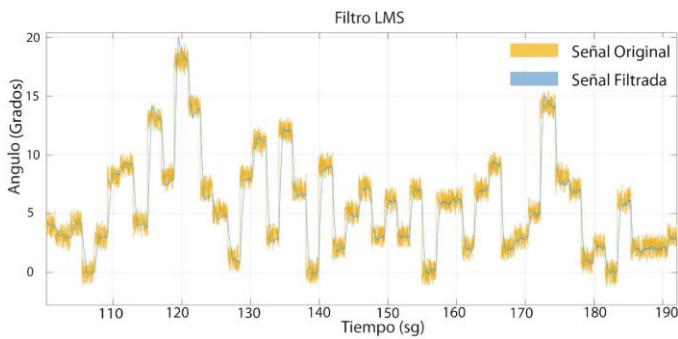


Figura 11: Señal original con ruido

En la Figura 11, se muestra la amplitud del filtro LMS incluido el ruido y en la Figura 12 se visualiza la señal filtrada del filtro RLS.

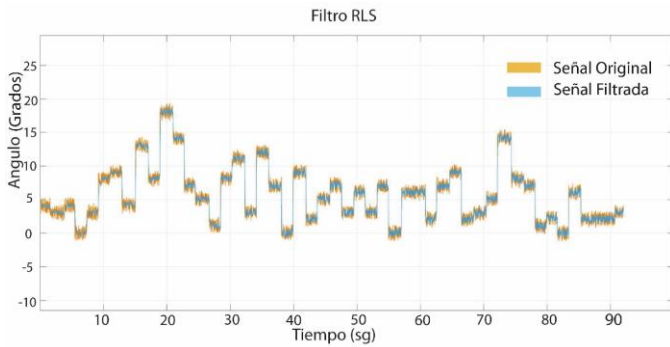


Figura 12: Señal filtrada

Seguido de este proceso, tal como se puede ver en la Tabla VI, se realizaron 5 pruebas de los filtros con el fin de obtener el promedio del error generado y así comparar cuál de ellos se adaptaba mejor al sistema completo.

TABLA VI  
MEDIA DEL ERROR

Prueba	LMS	RLS
1	0.5409	0.648
2	0.8895	0.35
3	0.289	-0.55
4	0.13	-0.14
5	-0.055	0.088
Promedio	0.38088	0.3552

Las pruebas se realizaron con tres tipos de funciones de pertenencia, triangular, gaussiana y gbelimf, que se muestran en la Figura 13. Esto permitió identificar el comportamiento del controlador con las reglas de inferencia y la salida en pasos para ser transmitida por comunicación serial desde Simulink al Arduino para controlar los motores a pasos.

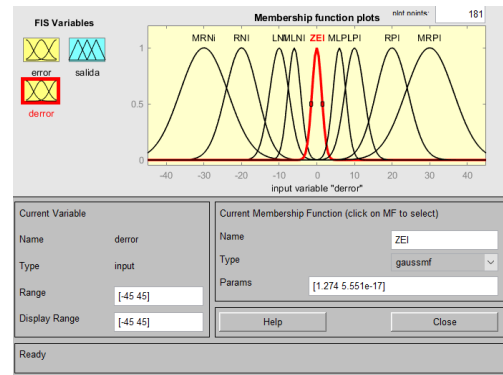


Figura 13: Funciones de pertenencia posibles

La función empleada para el controlador difuso fue la gaussiana, dado que permite tener una curva suavizada al tomar las decisiones con las reglas de inferencia. La función de pertenencia Gaussiana se incorporó tanto en la entrada como en la salida del controlador difuso, tal como se muestra en la Figura 14.

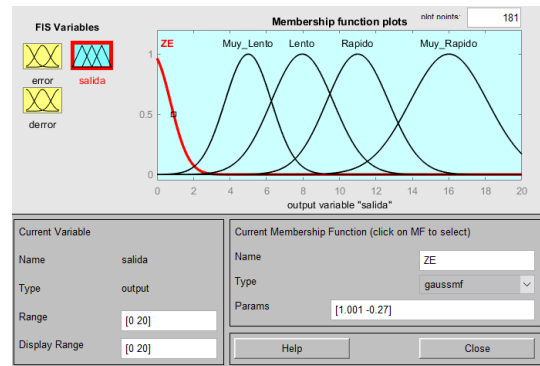


Figura 14: Función de pertenencia utilizada

#### IV. DISCUSIÓN

La comparación entre los filtros adaptativos LMS y RLS, demuestran que el filtro adaptativo LMS funciona de mejor manera al atenuar mejor el ruido de ingreso. Esto se presentó en la Tabla VI, donde se mostró el promedio del error entre cinco pruebas para los dos tipos de filtro. El error es la diferencia de la señal con ruido menos la señal original. El tamaño del paso (MU) se estableció heurísticamente en 0.000005, ya que, para valores mayores, el filtro se vuelve inestable y provoca la interrupción de la adquisición de datos.

En la Figura 15 se comparan los filtros evaluados y se puede ver que el filtro adaptativo LMS reduce más el ruido al compararlo con el RLS.



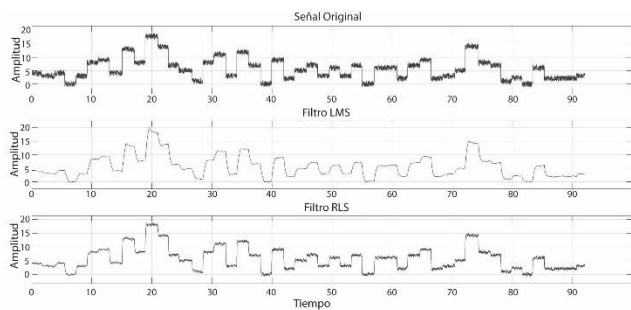


Figura 15: Señal Original, Filtro LMS, Filtro RLS

La comparación entre las tres funciones de pertenencia, se basan en las pruebas y registros que se visualizan en la Tabla 7.

TABLA VII  
TIPOS DE FUNCIONES DE PERTENENCIA

Triangular		Gaussiana		Gbelimf	
Ángulo	Pasos	Ángulo	Pasos	Ángulo	Pasos
0	1.45	0	0.73	0	1.46
1	1.57	1	1.19	1	1.6
2	1.86	2	3.05	2	3.04
3	5	3	5.13	3	5.45
4	5	4	5.57	4	5.41
5	5.89	5	5.83	5	5.5
6	6.32	6	6.23	6	5.91
7	6.66	7	6.64	7	6.51
8	7.02	8	7.15	8	7.23
9	7.45	9	7.71	9	7.88
10	8	10	8.13	10	8.11
12	8.74	12	8.78	12	8.42
14	9.64	14	10.2	14	10.1
16	11.6	16	11.4	16	11.2
18	12.4	18	12.1	18	11.6
20	12.9	20	12.7	20	12.2
25	14	25	14.1	25	14.3
30	15.9	30	15.5	30	15.7
35	15.9	35	15.8	35	15.9
40	15.9	40	15.7	40	15.7
45	10	45	15.1	45	14.8

Se muestra el comportamiento de la salida en pasos del controlador al variar el ángulo de ingreso tanto para la entrada como para la derivada del error. También se muestra la diferencia entre las salidas donde se había definido el uso de la función de pertenencia “gaussiana”, ya que esta tiene un paso suavizado en comparación con la “triangular” por su pendiente y con la función “gbelimf” por su característica plana que presenta la función en su punto más alto. Con la comparación,

se demuestra que los pasos son más pequeños al momento de equilibrar el sistema completo. Los grados y pasos, tanto para el lado positivo y negativo, son los mismos en las reglas de inferencia. Sin embargo, se considera la dirección del motor por medio del signo leído en el sensor.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el diseño y construcción de los componentes mecánicos y electrónicos que llevaron a la creación de un prototipo de un robot que pudiera conseguir el equilibrio frente a perturbaciones. En proyectos posteriores se pretende incorporar sensores e inteligencia artificial para que cumpla con el propósito de ayudar o intervenir en el desarrollo de los niños para mejorar su motricidad gruesa y fina.

El uso de un controlador PID difuso en lugar de un controlador tradicional redujo significativamente la matemática en el proceso de la sintonización, por lo que hizo más sencillo el uso de reglas de inferencia.

El uso de un filtro adaptativo resultó apropiado considerando que en las pruebas con el incremento de ruido y modificando el buffer, a su salida, el filtro se adapta a la señal de referencia adecuadamente. La transmisión de datos juega un papel importante en la lectura de datos del sensor. Esta información tiene un byte de tamaño, por lo que no registra números negativos, para ello se hace un cálculo si el número es negativo en la lectura, pasarlo como positivo y agregar el signo. Esto posibilita dos tipos de eventos, el primero es cambiar el sentido de giro del motor y el segundo es el dato real que ingresa al controlador difuso para convertirlo a paso y luego ser interpretado por el driver.

Todo el sistema en su conjunto logra la estabilidad del prototipo mediante el movimiento mecánico, complementado con el controlador PD difuso, dando como resultado que el robot alcance el reposo en  $\pm 2^\circ$  de inclinación.

## REFERENCES

- [1] Reyes, F. (2011). *Robótica-control de robots manipuladores*. Alfaomega grupo editor.
- [2] Vilarnovo, A. (1996). Mito, comunicación y las tres leyes de la robótica. *Communication & Society*, 9(1-2), 221-236.
- [3] Meghdari, A., Alemi, M., Khamooshi, M., Amoozandeh, A., Shariati, A., & Mozafari, B. (2016, October). Conceptual design of a social robot for pediatric hospitals. In *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)* (pp. 566-571) IEEE.
- [4] Barrera, N. (2015). Uso de la robótica educativa como estrategia didáctica en el aula. *Praxis & Saber*, 6(11), 215-234.
- [5] Villagrà, J., Milanés, V., Pérez, J., & de Pedro, T. (2010). Control basado en PID inteligentes: aplicación al control de crucero de un vehículo a bajas velocidades. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial IRAI*, 7(4), 44-52.
- [6] Qidwai, U., Shakir, M., & Connor, O. B. (2013, November). Robotic toys for autistic children: Innovative tools for teaching and treatment. In *2013 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)* (pp. 188-192) IEEE.
- [7] Murcia, J. A. M., & García, P. L. R. (1996). El aprendizaje por el juego motriz en la etapa infantil. *Murcia, JAM y García, PLR, Aprendizaje deportivo*, 70-103.
- [8] Schwartzmann, A. K. (2006). La motricidad infantil: entre la experiencia corporal y el mundo exterior. *Pensamiento Educativo*, 38, 186-201.

- [9] The role of locomotion in psychological development. (2020, 6 julio). PubMed Central (PMC). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3719016/#>
- [10] Yunong, Y., Ha, H. M., Kim, Y. K., & Lee, J. M. (2015, October). Balancing and driving control of a ball robot using fuzzy control. In 2015 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) (pp. 492-494) IEEE.
- [11] Lombeida Ayala, Mario David.(2008). Diseño e implementación de un robot que ayude al entrenamiento de paro inhibitorio e hiperactividad para niños especiales, basado en comunicación infrarroja y microcontroladores
- [12] Espinoza Rodriguez Andres Eduardo (2015). Desarrollo del Software de integración del proyecto Sistema de Analisis de Movimiento (SAM). <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8063>
- [13] Karna-Lin, E., Pihlainen-Bednarik, K., Sutinen, E., & Virnes, M. (2006, July). Can robots teach? Preliminary results on educational robotics in special education. In Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'06) (pp. 319-321) IEEE.
- [14] Godoy Ortega, J., 2011. Control Adaptativo En Tiempo Real. [Online] [bibdigital.epn.edu.ec](http://bibdigital.epn.edu.ec). Available at: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3780/1/CD-3515.pdf> [Accessed 28 July 2020].
- [15] Penco, J. J., & Modesti, M. R. (2019). Control difuso versus PID para un sistema de bola y plataforma. *Revista Tecnología y Ciencia*, (36), 155-168.
- [16] Palacios, C. S., & Romero, S. L. (2019). Calibración automática en filtros adaptativos para el procesamiento de señales EMG. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 16(2), 232-237.
- [17] Bansal, U. K., & Narvey, R. (2013). Speed control of DC motor using fuzzy PID controller. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(9), 1209-1220.
- [18] Su, X., Wang, C., Su, W., & Ding, Y. (2016, May). Control of balancing mobile robot on a ball with fuzzy self-adjusting PID. In 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC) (pp. 5258-5262) IEEE.