

## Comparación en el desempeño de controladores PD, PD Difuso y PD Neurodifuso en el control de posición de la llanta de dirección de un robot móvil

D. Cruz-Hernández<sup>a</sup>, K. Granados-Albarrán<sup>b</sup>, A. Dávila-Jáuregui<sup>c</sup>, R. Anaya-García<sup>d</sup>, J. Aguilar-Martínez<sup>e,\*</sup>, A. Templos-Carbajal<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Colegio de Ciencia y Tecnología, UACM, San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa, 09790 México, D.F.

<sup>b</sup>Colegio de Ciencia y Tecnología, UACM, San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa, 09790 México, D.F.

<sup>c</sup>Colegio de Ciencia y Tecnología, UACM, San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa, 09790 México, D.F.

<sup>d</sup>Facultad de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad 3000 Coyocacán, CU, 04510 México, D.F.

<sup>e</sup>Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, ITT, Blvd. Industrial y Av. ITR Tijuana S/N, Otay, 22500 Tijuana, B.C.

<sup>f</sup>Facultad de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad 3000 Coyocacán, CU, 04510 México, D.F.

### Resumen

Los robots móviles son un campo en desarrollo constante que en los últimos años ha tenido un fuerte impulso y un avance importante a nivel mundial debido a los beneficios tecnológicos y sociales que puede traer consigo. Existen diversos tipos y configuraciones para los robots móviles, una de las más utilizadas es la configuración triciclo, ésta cuenta con dos ruedas traseras que giran libremente y una rueda delantera con un motor que le da tracción y otro que da la dirección. La trayectoria que define el movimiento de un robot móvil con configuración triciclo, depende de la posición que guarda la llanta delantera con respecto al cuerpo del robot, en esta configuración y en otras que utilizan un sistema similar en el posicionamiento de las llantas que definen su movimiento, es fundamental posicionarlas con exactitud para lograr un buen desempeño en el seguimiento de trayectorias, por lo tanto en el desarrollo de las tareas asignadas al robot. En este trabajo se exploran tres alternativas para el control del motor de dirección del robot móvil. Se implementan varios controladores, un controlador PD tradicional, un controlador PD Difuso y un PD Neurodifuso, se evalúa el desempeño de cada uno, se analizan los tiempos de asentamiento y sobrepaso para diferentes señales de entrada, así como diferentes superficies de prueba.

### Palabras Clave:

Control difuso, Controlador PD, Controlador PID, Controladores, Control Neuronal Aplicado, Navegación de Robots.

### 1. Introducción

Los robots móviles pueden considerarse como una estructura mecánica dotada de un sistema de locomoción capaz de navegar en un determinado ambiente de trabajo con cierto nivel de autonomía; estos tienen la capacidad de interactuar con el entorno en mayor o menor grado dependiendo de la complejidad de su sistema de sensado. Sus aplicaciones pueden ser muy variadas y generalmente están relacionadas con tareas que normalmente son riesgosas o nocivas para la salud humana, tareas que son tediosas o que simplemente el humano no quiere hacer, como ejemplos tenemos los robots para el traslado y acopio de

materiales, tareas de mantenimiento a reactores nucleares, manipulación de materiales explosivos, exploración subterránea, etc. (A.L. Nelson, 2009). En la actualidad la tendencia es aplicar cada vez más estos robots a tareas de la vida cotidiana. Se tienen robots que ayudan a personas discapacitadas, robots que asisten en hospitales para el traslado de medicamentos, realización de cirugías, robots limpiadores, podadoras de césped, etc., sólo por mencionar algunas aplicaciones. Los robots móviles son un campo en desarrollo constante que en los últimos años ha tenido un fuerte impulso y un avance importante a nivel mundial debido a los beneficios tecnológicos y sociales que puede traer consigo, se estima que en pocos años los robots móviles de servicio superen al de la robótica industrial (Nilsson, 2003).

#### 1.1. Sistema de locomoción

Los robots móviles pueden tener varias formas de locomoción, las más comunes son por llantas, extremidades u orugas (Sanchez, Enero 2011). La locomoción más utilizada en robots

\*Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: diana.aurora.cruz@uacm.edu.mx (D.

Cruz-Hernández), karina.granados@estudiante.uacm.edu.mx (K.

Granados-Albarrán), amaranto.davila@uacm.edu.mx (A.

Dávila-Jáuregui), ranaya\_garcia2004@yahoo.com.mx (R. Anaya-García),

jeannete.aguilar@tectijuana.edu.mx (J. Aguilar-Martínez),

teca61@fi-b.unam.mx (A. Templos-Carbajal)

móviles es por medio de llantas; aunque su principal desventaja es, que al moverse sobre terrenos desiguales tiene un bajo desempeño. Como regla un vehículo rodante tiene problemas si la altura del obstáculo supera el radio de las llantas. Una solución simple es que las llantas sean tan grandes como los obstáculos que tiene que superar, sin embargo en muchos casos esto es bastante impráctico. En nuestro proyecto esto no representará ningún inconveniente dado que el robot está diseñado para superficies planas, así que conviene la locomoción por llantas. Para un robot móvil con llantas, se pueden escoger diferentes configuraciones de tracción. Estos arreglos son: diferencial, síncrono, triciclo y tipo carro (ver Figura 1).

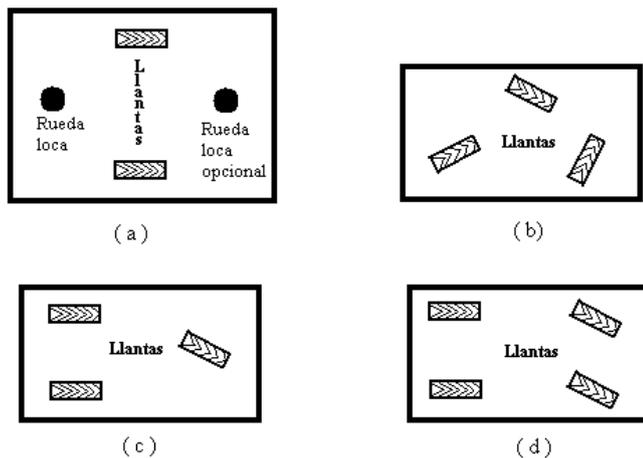


Figura 1: Arreglos de llantas vistos desde abajo. (a) Diferencial: Usa una o posiblemente dos ruedas locas. (b) Síncrono: Todas las llantas giran al mismo tiempo. (c) Triciclo: Tiene el motor de dirección en una llanta y la de tracción en el par trasero. (d) Carro: Las dos llantas delanteras rotan para dar la dirección.

Este proyecto tiene una configuración tipo triciclo, cuenta con dos ruedas traseras que giran libremente y una rueda delantera con un motor que le da tracción y otro que da la dirección. La trayectoria que define el movimiento del robot móvil, depende de la posición que guarda la llanta delantera con respecto al cuerpo del robot. En esta configuración y en otras que utilizan un sistema similar en el posicionamiento de las llantas que definen el movimiento, es fundamental posicionarlas con exactitud para lograr un buen desempeño en el seguimiento de trayectorias y por lo tanto en el desarrollo de sus tareas.

## 2. CONTROL PARA EL POSICIONAMIENTO DE LA LLANTA DE DIRECCIÓN

En un robot móvil las tareas de navegación dependen en gran medida de una correcta odometría en el robot, la cual es mucho más sencilla de determinar cuando se garantiza que la dirección deseada del robot es alcanzada con mayor exactitud (León, 2000). Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la indus-

tria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite y los requerimientos de desempeño son sencillos (Martínez, 1991). En este caso dadas las características del sistema a controlar puede funcionar relativamente bien el prototipo con un controlador PD. Uno de los problemas que presenta este controlador en estos sistemas, es la fricción de las superficies sobre las cuales se desplaza el robot, que al ser diferentes modifican las condiciones de diseño, también la fuerza necesaria para posicionar la llanta a un ángulo deseado es diferente cuando está en reposo y cuando está en movimiento (J. Aguilar Martínez, 2000). Los controladores tradicionales PD suelen tener un desempeño limitado en este tipo de aplicaciones, ya que el robot en su conjunto es un sistema no lineal, sin embargo, al combinarse con otras técnicas de control es posible mejorar el desempeño del controlador. Por esta razón se implementaron tres controladores digitales, un controlador PD convencional, PD Difuso y un PD Neurodifuso, se evalúa el desempeño de cada uno, se analizan los tiempos de asentamiento y sobrepasos para diferentes señales de entrada, así como diferentes superficies de prueba. Los resultados obtenidos demuestran que las limitaciones del controlador PD convencional se pueden compensar al incorporar técnicas no lineales basadas en la lógica difusa y en redes neuronales, alcanzando mejores desempeños en diversas superficies. Además estas técnicas hacen posible la implementación de algoritmos relativamente sencillos ganando tiempo de procesamiento que puede ser utilizado para otras tareas.

## 3. SISTEMA ELECTROMECHANICO

El sistema electrónico utilizado para la implementación de los controladores consta de tres bloques principales, el primero es el sistema de sensado, el cual está basado en un potenciómetro lineal de precisión de 10 [K $\Omega$ ], éste se utiliza para determinar la posición de la llanta con respecto a la estructura del robot móvil, el segundo es el sistema de control, basado en una microcomputadora tipo RISC (PIC16F887) de 8 bits, en esta microcomputadora se implementan los controladores digitales. El tercer bloque es la interfaz de potencia el cual es un puente H el cual soporta 3 [A] de corriente, la Figura 2 muestra el diagrama general del sistema electrónico.

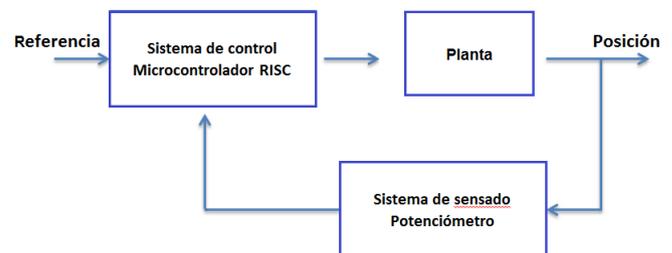


Figura 2: Esquema de control.

El motor utilizado para mover la rueda de dirección del ro-

bot es un motorreductor de C.D. con un voltaje nominal de 12 [V], corriente sin carga de 300 [mA], torque de 18 [kg-cm] y 80 rpm. Este está acoplado al eje de dirección a través de un cadena de rodillo con engranes cuya relación de transmisión es de 3:1, lo cual aumenta el torque del motorreductor, la llanta también tiene acoplado el motor de tracción de todo el robot, lo cual aumenta la fuerza necesaria para mover al prototipo.

#### 4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

El primer controlador implementado fue el controlador PD convencional, a partir de éste se incorpora el conocimiento adquirido para la implementación de los otros controladores, ya que en particular las dos técnicas probadas requieren de un conocimiento previo del sistema.

##### 4.1. PD CONVENCIONAL

La Figura 3 muestra la estructura del controlador PD implementado. La señal  $R(s)$  es la señal de referencia la cual es proporcionada digitalmente al controlador,  $E(s)$  es la señal de error,  $K_p$  es la constante proporcional y  $K_d$  la constante derivativa,  $G_p(s)$  representa la función de transferencia de la planta,  $G_c(s)$  es la función de transferencia del controlador.

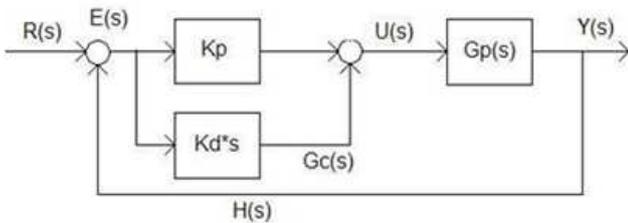


Figura 3: Esquema de un PD convencional

La ecuación del controlador PD queda expresada de la forma:

$$U(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

donde  $U(t)$  es la señal de entrada al sistema,  $K_p$  y  $K_d$  son las constantes proporcional y derivativa y  $e(t)$  es el error de la señal (Kuo, 1996).

Para poder implementar la Ecuación (1) en la microcomputadora se discretiza obteniendo,

$$U(KT) = K_p e(KT) + K_d \frac{e(KT) - e(KT - T)}{T} \quad (2)$$

Para el diseño de un controlador se debe modelar la planta para determinar los parámetros del controlador; sin embargo el modelado no resulta tarea fácil por ello se recurre a métodos experimentales para la sintonización de los controladores, en este caso se utiliza la técnica de *Ziegler Nichols* cuya regla para determinar los valores de  $K_p$  (ganancia estática),  $T_i$

y  $T_d$  (constantes de tiempo) se basan en las características de la respuesta transitoria de la planta, cuando se logra un 25 % de sobrepaso máximo en la respuesta al escalón unitario (Ruiz, 2005).

En este caso, la función de transferencia se aproxima mediante un sistema de primer orden, obteniendo,

$$G(s) = \frac{K_e^{-L_s}}{T_s + 1} \quad (3)$$

donde  $K_e$  es la constante de ganancia,  $L_s$  es el tiempo de retardo y  $T_s$  es la constante de tiempo. Como se observa en la Figura 4 la respuesta al escalón del sistema tiene la forma de una *S* alargada, por lo tanto se puede aplicar el método en lazo abierto de *Ziegler Nichols*; dibujando una recta tangencial en el punto de inflexión de la curva con forma de *S* y determinando las intersecciones de la tangente con el eje del tiempo se pueden obtener los parámetros de  $K_e = 4.51$ ,  $L_s = 0.1$  y  $T_s = 0.3$ .

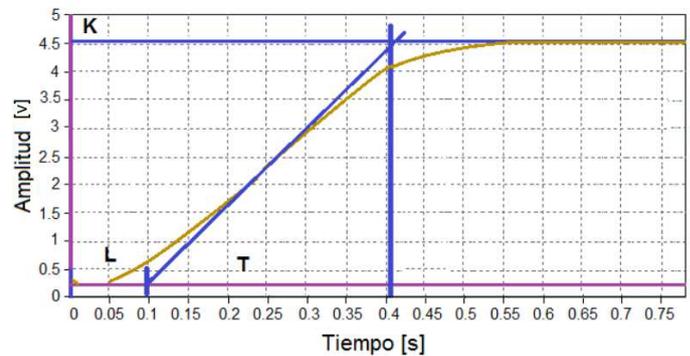


Figura 4: Respuesta del motor de dirección a una entrada escalón, con recta tangencial en el punto de inflexión.

Con estos valores y mediante las ecuaciones de *Ziegler Nichols* se obtiene la función de transferencia del motor y la del controlador, se tiene respectivamente,

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{4.5}{0.03s^2 + 0.4s + 1} = \frac{4.5}{0.03s^2 + 0.4s + s} \quad (4)$$

$$G(s) = 0.18s + 3.6. \quad (5)$$

A partir de las Ecs. (4) y (5), se obtiene  $K_p = 2$  y  $K_d = 1$ , así la ecuación a implementar es:

$$U(KT) = 2e(KT) + \frac{e(KT) - e(KT - T)}{T}. \quad (6)$$

Después de haber realizado la implementación física del controlador se obtiene la respuesta escalón, para ello se utiliza una tarjeta de adquisición de datos de *National Instruments* y el software de *labview* para adquirir la señal. La Figura 5 muestra la respuesta del controlador PD a una entrada escalón.

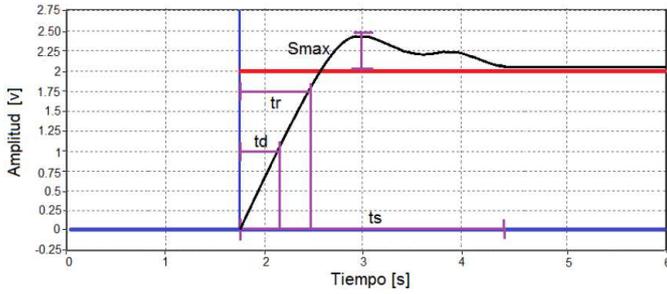


Figura 5: Respuesta del controlador PD a una entrada escalón, aplicado al motor del robot móvil en una superficie de formica.

#### 4.2. PD DIFUSO

La estructura del controlador difuso está dado por:

1. El proceso de fuzificación.
2. El mecanismo de inferencia.
3. El proceso de defuzificación.

Para el controlador difuso del control de posición del motor, las etapas son:

##### 4.2.1. PROCESO DE FUZIFICACIÓN

Para el proceso de fuzificación se definieron los conjuntos difusos con base en el conocimiento adquirido en el diseño del controlador PD digital. La variable de entrada (error) se dividió en cinco conjuntos difusos de acuerdo al tamaño de éste: error mínimo (emin), error regular (ereg), error mediano (emed), error alto (ealt) y error máximo (emax). Para la variable de salida (PWM), se asignaron cinco conjuntos difusos para definir el porcentaje: salida mínima (smin), salida regular (sreg), salida mediana (smed), salida alta (salt) y salida máxima (smax). Para definir los conjuntos difusos se toma el valor absoluto de la variable de entrada y la variable de salida, esto con el objetivo de disminuir el número de conjuntos y facilitar el diseño,  $u$  representa el valor digital del convertidor analógico digital del microcontrolador, éste tiene una resolución de 10 bits. Las funciones de membresía para la variable de entrada (error) y para la variable de salida (PWM), se muestra en la Figuras 6 y 7 respectivamente, definiéndose los siguientes conjuntos:

$$\mu_{emin}(u) = \begin{cases} 0 & u < 20 \\ 1 & 20 \leq u \leq 40 \\ -0.05u + 3 & 40 < u \leq 60 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{ereg}(u) = \begin{cases} 0.033u - 1.33 & 40 < u < 70 \\ -0.05u + 4.5 & 70 \leq u \leq 90 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{emed}(u) = \begin{cases} 0.05u - 4 & 80 \leq u \leq 100 \\ -0.05u + 6 & 100 < u < 120 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{ealt}(u) = \begin{cases} 0.05u - 5.5 & 110 \leq u \leq 130 \\ -0.05u + 7.5 & 130 < u < 150 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{emax}(u) = \begin{cases} 0.05u - 5 & 140 \leq u \leq 160 \\ 1 & u > 160 \end{cases} \quad (11)$$

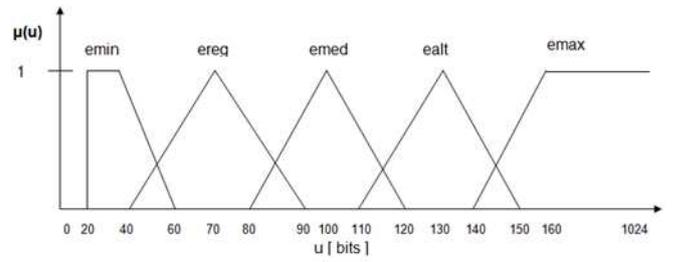


Figura 6: Funciones membresía de los conjuntos difusos para la variable de entrada error.

$$\mu_{smin}(u) = \begin{cases} 0.05u & 0 \leq u \leq 20 \\ -0.1u + 3 & 20 < u < 30 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{sreg}(u) = \begin{cases} 0.05u - 1 & 20 \leq u \leq 40 \\ -0.02u + 2 & 40 < u < 80 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{smed}(u) = \begin{cases} 0.033u - 2 & 60 < u \leq 90 \\ -0.05u + 5.5 & 90 < u < 110 \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{salt}(u) = \begin{cases} 0.05u - 5 & 110 < u \leq 120 \\ -0.033u + 5 & 120 < u < 150 \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{smax}(u) = \begin{cases} 0.033u - 4.33 & 130 < u \leq 160 \\ 1 & u > 160 \end{cases} \quad (16)$$

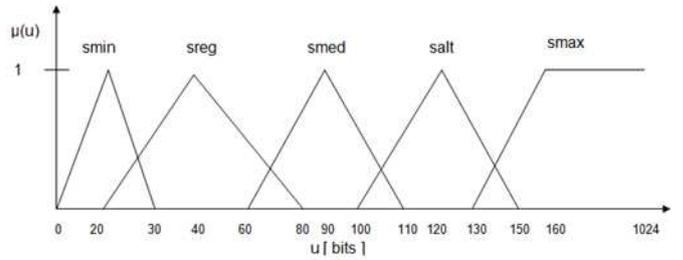


Figura 7: Funciones membresía de los conjuntos difusos para la variable de salida PWM.

##### 4.2.2. MECANISMO DE INFERENCIA

Como el sistema de posición sólo tiene una entrada, la base de reglas para el control es la siguiente:

1. Si el error es mínimo entonces el porcentaje de salida será mínimo.
2. Si el error es regular entonces el porcentaje de salida será regular.
3. Si el error es mediano entonces el porcentaje de salida será mediano.
4. Si el error es alto entonces el porcentaje de salida será alto.
5. Si el error es máximo entonces el porcentaje de salida será máximo.

### 4.2.3. PROCESO DE DEFUZIFICACIÓN

El proceso de defuzificación se realizó utilizando el método matemático de *Singleton* por ser relativamente sencillo de programar, mediante el cual el proceso de defuzificación se convierte ahora en el cálculo de una media ponderada.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^K B_i u_i}{\sum_{i=1}^K B_i} \quad (17)$$

El diseño anterior considera la sustitución del controlador PD por un controlador difuso basado en el comportamiento de éste, sin embargo se probó también la alternativa de combinar ambas técnicas para mejorar el desempeño del controlador, considerando lo planteado por (A. Bouza, 1997), en el cual proponen un esquema difuso para la sintonización del controlador cuya base de reglas considera la respuesta del sistema, la cual se divide en 5 zonas dependiendo del valor del error (e) y del cambio de error (ce) ver Figura 8.

1. Zona1 (z1): e > 0 y ce < 0.
2. Zona2 (z2): e < 0 y ce < 0.
3. Zona3 (z3): e < 0 y ce > 0.
4. Zona4 (z4): e > 0 y ce > 0.
5. Zona5 (z5): e ≈ 0 y ce ≈ 0

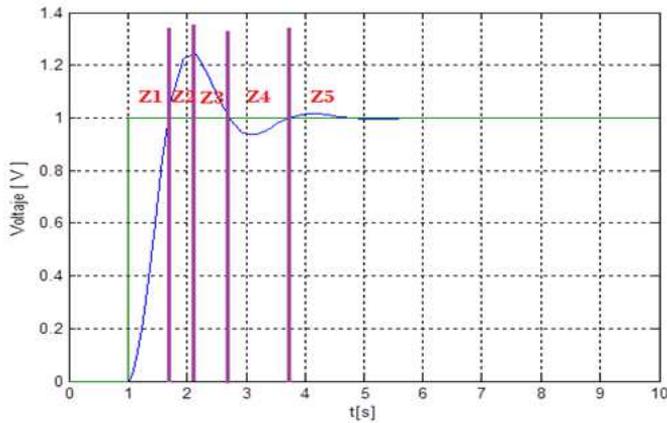


Figura 8: Respuesta dividida en cinco zonas de acuerdo a la magnitud del error y del cambio de error.

A partir de esto la base de reglas es la siguiente:

- Si el error > 0 y ce < 0 no se ajustaran los parámetros del controlador.
- Si el error < 0 y ce < 0 si se ajustaran los parámetros del controlador.
- Si el error < 0 y ce > 0 no se ajustaran los parámetros del controlador.
- Si el error > 0 y ce > 0 si se ajustaran los parámetros del controlador.
- Si el error ≈ 0 y ce ≈ 0 no se ajustaran los parámetros del controlador.

La defuzificación para la sintonización de los parámetros del controlador PID usando operaciones difusas (Natsheh, 2005) es la siguiente:

$$K_{FP} = \frac{\sum_{i=1}^m K_p \mu_j(e)}{\sum_{i=1}^m \min(\mu A(u), \mu B(u))} \quad (18)$$

$$K_{FI} = \frac{\sum_{i=1}^m K_i \mu_j(\int edt)}{\sum_{i=1}^m \min(\mu A(u), \mu B(u))} \quad (19)$$

$$K_{FD} = \frac{\sum_{i=1}^m K_d \mu_j(ce)}{\sum_{i=1}^m \min(\mu A(u), \mu B(u))} \quad (20)$$

donde  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son los valores iniciales de los parámetros del controlador PID.  $K_{FP}$ ,  $K_{FI}$  y  $K_{FD}$  son los valores que van cambiando de acuerdo a cada operación difusa.

Sustituyendo los parámetros  $K_{FP}$ ,  $K_{FI}$  y  $K_{FD}$  en la Ecuación (2) la salida del controlador es la siguiente:

$$U(KT) = K_{FP}e(KT) + K_{FD} \frac{e(KT) - e(KT - T)}{T} \quad (21)$$

La Figura 9 muestra la respuesta del sistema a una entrada escalón.

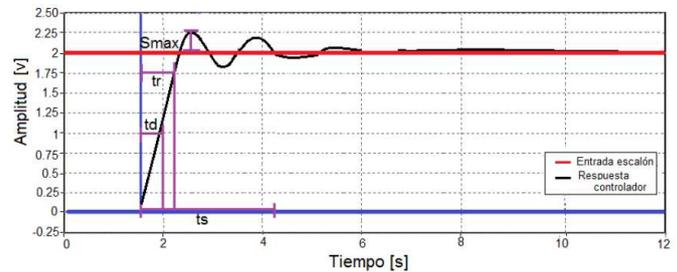


Figura 9: Respuesta del controlador PD difuso a una entrada escalón, aplicado al motor del robot móvil en una superficie de formica.

### 4.3. PD NEURODIFUSO

La otra alternativa considerada fue el utilizar técnicas de redes neuronales para el ajuste de los parámetros del controlador en vez de lógica difusa, para lo cual se define la red neuronal que se muestra en la Figura 10.

La neurona artificial, célula o autómatas, es un elemento que posee un estado interno, llamado nivel de activación, y recibe señales que le permiten, en su caso, cambiar de estado (A.J. Dávila Jáuregui, 2005).

La configuración del controlador neurodifuso consiste en sustituir el proceso de fuzificación, el mecanismo de inferencia y el proceso defuzificación del controlador difuso por redes neuronales [11]. Esta configuración se realiza con el modelo neuronal artificial *Adaline* (Dayhoff, 1900). El proceso de aprendizaje definido por la regla *Delta* de acuerdo a (Vinuela, 2000), está dado por seis pasos:

1. Iniciar los pasos de forma aleatoria.

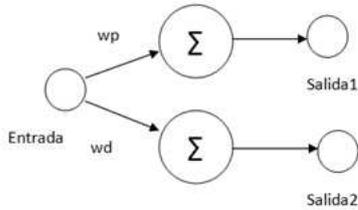


Figura 10: Esquema de la red neuronal para el controlador PID Neurodifuso.

2. Introducir un patrón de entrada.
3. Calcular la salida de la red, compararla con la deseada y obtener la diferencia:  $(d - y)$ .
4. Para todos los pasos, multiplicar dicha diferencia por la entrada correspondiente y ponderarla por una tasa de aprendizaje.
5. Modificar el paso 3 restando del valor antiguo la cantidad obtenida en 4.
6. Si no se ha cumplido el criterio de convergencia, regresar al paso 2; si se han acabado todos los patrones, empezar de nuevo a introducir patrones.

Debido a que la sintonización del controlador PD consiste en determinar los parámetros de  $K_{FP}$  y  $K_{FD}$ , es necesario producir dos conjuntos de entrenamiento, uno para el parámetro  $K_{FP}$  y otro para el parámetro  $K_{FD}$ . La Tabla 1 muestra el conjunto de entrenamiento para determinar el parámetro  $K_{FP}$  y la Tabla 2 muestra el conjunto de entrenamiento para determinar el parámetro  $K_{FD}$  del controlador PD. Los conjuntos de entrenamiento se obtuvieron mediante un programa en lenguaje C, siguiendo el algoritmo de entrenamiento de la regla *Delta*. Este proceso no es necesario que sea ejecutado por la microcomputadora del sistema.

Tabla 1: Conjunto de entrenamiento para determinar el parámetro  $K_{FP}$  del controlador PD.

Error	$K_{FP}$
40.98	2
81.96	1.95
122.95	1.97
163.93	2.057
204.9	2.13

Se utiliza un modelo neuronal artificial *Adaline* por ser un modelo capaz de utilizar aprendizaje, para los ejemplos de aprendizaje se toman lecturas del controlador PID difuso, con los cuales se entrena a la red mediante la regla *Delta*, de tal forma que se obtuvieron los pasos para la red neuronal, simplificándose el controlador. Los datos resultantes después del entrenamiento son y se denotan como,  $\omega_p = 0.008520$  y  $\omega_d = 0.000042$ . La Figura 11 muestra la respuesta al escalón del controlador neurodifuso en una superficie de formaica.

Tabla 2: Conjunto de entrenamiento para determinar el parámetro  $K_{FD}$  del controlador PD.

Error	$K_{FD}$
40.98	0.00810
81.96	0.00913
122.95	0.00918
163.93	0.00923
204.9	0.00927

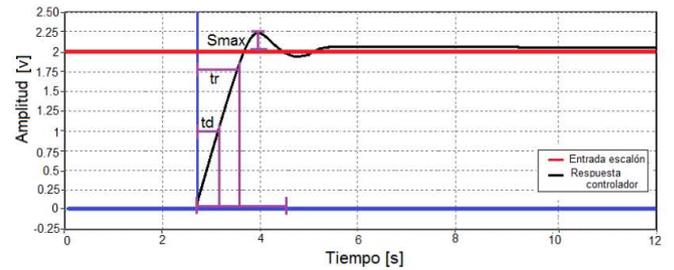


Figura 11: Respuesta del controlador PD Neurodifuso a una entrada escalón, aplicado al motor del robot móvil en una superficie de formica.

## 5. RESULTADOS

Las pruebas de los tres controladores se llevaron a cabo colocando al robot móvil en tres diferentes superficies, la primera superficie de prueba fue en una mesa de formica, la segunda en una tabla de madera barnizada, y la tercera en un piso de concreto, cada una de estas superficies cuenta con una rugosidad diferente, el objetivo de la prueba es verificar el desempeño de cada uno de los controladores en superficies distintas, la Tabla 3 muestra los resultados obtenidos a una entrada escalón de cada uno de los controladores en una superficie de formica. Se realizó la misma prueba pero ahora colocando al robot móvil en una superficie de madera barnizada, se obtuvieron las respuestas a una entrada escalón para cada uno de los controladores. Los resultados del análisis de las tres gráficas se muestran en la Tabla 4. Para la última prueba se colocó al robot móvil sobre una superficie de concreto, se obtuvieron las respuestas a una entrada escalón para cada uno de los controladores. Los resultados del análisis de las tres gráficas se muestran en la Tabla 5.

## 6. CONCLUSIONES

En general los tres controladores tuvieron un mejor desempeño en la superficie formica debido a que presenta una menor fricción, el controlador PD neurodifuso tuvo el mejor desempeño de los tres, teniendo un error de 0.06, una frecuencia natural de  $\omega_n = 5.2$  que ocasionó que los tiempos de retardo, levantamiento y asentamiento fueran menores, también el sobrepaso máximo fue de 12.5 % menor que los otros dos y un factor de amortiguamiento mayor de  $\zeta = 0.96$ .

Tabla 3: Características principales de la respuesta de los tres controladores a una entrada escalón, aplicados al motor del robot móvil en una superficie de formica.

	<i>PD</i>	<i>PD Difuso</i>	<i>PD Neurodifuso</i>
<i>Sobrepaso máximo (Smax)</i>	25 %	12.5 %	12.5 %
<i>Tiempo de retardo (td)</i>	0.35s	0.2s	0.2s
<i>Tiempo de levantamiento (tr)</i>	0.65	0.3s	0.3s
<i>Tiempo de asentamiento (ts)</i>	2.4s	1.3s	0.8s
<i>Error en estado estable</i>	0.12	0.06	0.06
<i>Frecuencia natural (<math>\omega_n</math>)</i>	2.4	5.2	5.2
<i>Factor de amortiguamiento (<math>\zeta</math>)</i>	0.69	0.59	0.96

Tabla 4: Características principales de la respuesta de los tres controladores a una entrada escalón, aplicados al motor del robot móvil en una superficie de madera barnizada.

	<i>PD</i>	<i>PD Difuso</i>	<i>PD Neurodifuso</i>
<i>Sobrepaso máximo (Smax)</i>	25 %	18.75 %	12.5 %
<i>Tiempo de retardo (td)</i>	0.35s	0.2s	0.2s
<i>Tiempo de levantamiento (tr)</i>	0.65s	0.3s	0.3s
<i>Tiempo de asentamiento (ts)</i>	1.75s	0.3s	0.3s
<i>Error en estado estable</i>	0.12s	0.10s	0.10s
<i>Frecuencia natural (<math>\omega_n</math>)</i>	2.4s	5.2s	5.2s
<i>Factor de amortiguamiento (<math>\zeta</math>)</i>	0.95s	0.77s	0.96s

Tabla 5: Características principales de la respuesta de los tres controladores a una entrada escalón, aplicados al motor del robot móvil en una superficie de concreto.

	<i>PD</i>	<i>PD Difuso</i>	<i>PD Neurodifuso</i>
<i>Sobrepaso máximo (Smax)</i>	28.57 %	14.28 %	14.28 %
<i>Tiempo de retardo (td)</i>	0.4s	0.4s	0.4s
<i>Tiempo de levantamiento (tr)</i>	0.8s	0.8s	0.8s
<i>Tiempo de asentamiento (ts)</i>	2.4s	2.2s	1.5s
<i>Error en estado estable</i>	0.12s	0.20s	0.10s
<i>Frecuencia natural (<math>\omega_n</math>)</i>	1.96s	1.96s	1.96s
<i>Factor de amortiguamiento (<math>\zeta</math>)</i>	0.85s	0.92s	1.36s

El controlador PD Neurodifuso es el controlador que tiene un mejor desempeño en las tres superficies y mantiene al sistema más estable en la superficie formica, en consecuencia es el controlador que responde mejor a las tres señales de prueba que se le aplicaron (tren de pulsos, seno y diente de sierra).

Se puede concluir que la combinación de técnicas inteligentes de control a los esquemas tradicionales permite mejorar el desempeño de éstos en situaciones donde las condiciones cambian durante la operación de la planta.

### English Summary

**Performance comparison of PD, Fuzzy PD and NEURO Fuzzy PD controllers in positioning a steering tire of a mobile robot.**

### Abstract

Mobile robotics is a field in constant development that has significantly grown globally in recent years due to its high technological and social benefits. There are different types and configurations of mobile robots, and one of the most used is the tricycle configuration. This configuration has two rear wheels that rotate freely and one front wheel equipped with two engines one for direction and another for traction. The trajectory that defines the movement in mobile robots with tricycle configuration, depends of the position of the front wheel with respect to body of the mobile robot. In some systems with these configurations (tricycle), is essential to have precision in the positioning of the wheels to achieve a good performance in monitoring paths, further with this precision can be assigned more complex tasks to the robot. Three alternatives for motor control of steering tire are explored in this paper, is important to observe the performance of each one. Overshoot and settling time for different input signals are analyzed. It is noteworthy that the tests were performed on different surfaces.

*Keywords:*

Fuzzy Control, Controller PD, Controller PID, Applied neural control, mobile robots.

### Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado durante el año sabático otorgado por la Universidad Autónoma de la Ciudad de México a los autores Diana Cruz-Hernández, Amaranito Dávila-Jáuregui. Gracias por el apoyo brindado. Asimismo los autores agradecen el apoyo financiero del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM, IN116712.

### Referencias

- A. Bouza, O. A., 1997. Microcontroladores estándar en el desarrollo de sistemas de Lógica difusa. CACIC, UNLP, Instituto de Ingeniería y Ciencias en Computación, Universidad Nacional del Sur.
- A.J. Dávila Jáuregui, D. C. H., 2005. Diseño construcción y control difuso de un robot móvil de competencia. Tesis Profesional.
- A.L. Nelson, J. G., 2009. Fitness functions in evolutionary robotics: A survey and analysis. *Robotics and Autonomous Systems*. 57(4), 345-370.
- Dayhoff, J., 1990. *Neural Networks Architectures: An Introduction*. Van Nostrand Reinhold.
- J. Aguilar Martínez, L. A. I., 2000. Caracterización y control de un banco de pruebas para estudiar la fricción llanta-pavimento. Congreso AMCA.
- Kuo, B., 1996. *Sistemas de control automático*. McGrawHill. 7th edición. 57(4).
- León, G. M., 2000. Protocolo de comunicaciones para robots móviles vía bluetooth. Tesis Profesional.
- Martínez, I. G., 1991. Diseño de controlador de temperatura tipo proporcional integral y derivativo. Tesis Profesional., 345-370.
- Natsheh, E., 2005. Comparison between conventional and Fuzzy Logic PID controllers for controlling DC motors. *International Journal of Computer Science* 7(5).
- Nilsson, N., 2003. Shakey the Robot. Technical Report, Informe técnico.
- Ruiz, V. A., 2005. Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols. *San José Costa Rica Ingeniería* 15(1,2):39-52. ISBN:1409-2441,.
- Sanchez, M. B., Enero 2011. Diseño y construcción de un robot humanoide. Technical Report, Informe técnico.
- Vinuela, I., 2000. *Redes neuronales artificiales*. Prentice Hall 2004.