

Control Difuso PID de un Sistema de Control para una Grúa Puente

Ing. Juan José Salas Cervantes, Dr. Dennis Barrios Aranibar

1. Introducción

En las grúas puente el problema que al movilizar cargas de un lugar a otro presentan una oscilación, las cuales producen pérdida de tiempo ya que el operador tiene que estabilizar la carga por seguridad. Lo anterior se traduce en pérdidas de tiempo y dinero para la empresa.

Como antecedentes a Valera García et al [1]. En esta propuesta, el control de posición es por medio del Control Inteligente basadas en Algoritmos Genéticos y Redes Neuronales.

No limitándonos, tenemos la propuesta de González Álvarez [2], quien, desarrollo un simulador basado en Marilou Robotic Studios y Matlab, además, desarrolló una versión simple del algoritmo de control "Input Shaping".

Otras soluciones, fueron propuestas por Betancur Parra, Tafur Corrales [3] y por Didier Giraldo, Eduardo Giraldo [4]. Parra y Corrales utilizan un controlador LQR, que luego es remplazado por un algoritmo genético para realizar el mismo trabajo. Así mismo Didier Giraldo y Eduardo Giraldo presentan una variante en los controladores LQR; en la misma incluye el uso de un observador. Como última la propuesta de Sánchez Bermúdez et al [5], la cual controlaron la oscilación utilizando 3 controladores difusos.

Todo lo anterior mostrado nos sirve para tener el conocimiento de las posibles soluciones a diversos problemas como de carga/descargar y de transporte de cargas pesadas, así también como los riesgos que con lleva el operar una Grúa Puente o simple estar parado o trabajado cerca de una Grúa Puente así mismo. La lógica nos proporciona un tipo de control que más se adapta mejor al mundo real en el que vivimos ya que nos permite funcionar y comprender con nuestras propias experiencias y poder plasmarlas en las reglas difusas. El cual nos permite resolver problemas varias tan solo con la experiencia aprendida a lo largo de los años de trabajo y lo cual se explica con mayor detenimiento en la siguiente sección

2. Controladores Difusos

Para poder entender cómo se debe de implementar un controlador PID difuso, se procede a analizar los aspectos siguientes, en cuanto a las entradas de un controlador PID difuso y las cuales son: Con una entradas: El error (e) como ejemplo la Figura 1 [7], con dos entradas: El error (e) y la

derivada del error (d.e). Como ejemplo la Figura 2[8], con tres entradas: El error (e), la derivada del error (d.e) y la segunda derivada del error (d².e). Como ejemplo la Figura 3 y la Figura 4[9].

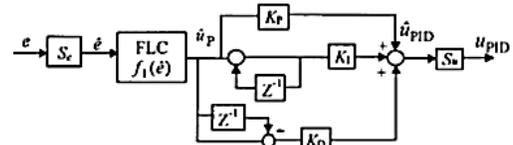


Figura 1. Una entrada PID difuso

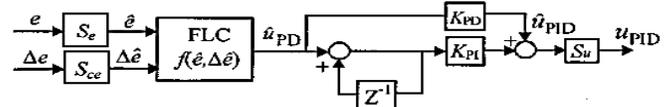


Figura 2. Dos entradas PID difuso

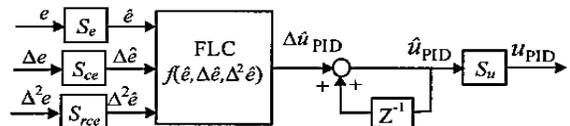


Figura 3. Tres entradas PID difuso (tipo I)

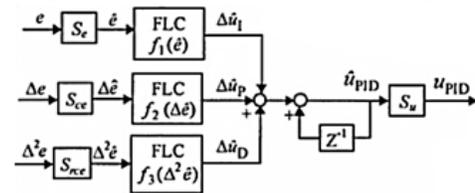


Figura 4. Tres entradas PID difuso (tipo II)

En ninguno de los casos anteriores, se ve que la integral no es señales de entrada, por lo que produce los mismos efectos que la derivada, por eso que se utiliza a la salida del bloque difuso, lo que proporciona un mejor control del proceso.

Para funciones de pertenencia, la mejor opción de función de pertenecía es la función triangular pues reduce el tiempo de operación, aumentando la velocidad de respuesta y además las funciones están solapadas en un 50% [10]. Para las reglas difusas varios autores tienen la misma base para realizar sus reglas, como los autores Godjevac [11], Xionh Li y Gatland [12]. También tenemos más propuestas como Ngamroo [13], Weibin y Qingjian [14] y por ultimo Yang et al [15] con la única diferencia entre ellos es la aplicación en la que se usa el controlador.

Todo lo que hemos aprendido en esta sección, nos ayuda a entender como realmente funciona un controlador difuso y todas las partes de que está compuesto, como la forma en que

se procesan las entradas y salidas para dar un respuesta, la manera en que se escogen las funciones de membrecía, la forma de las funciones de membrecía, la manera en que se desarrollan las reglas y la lógica en que se construye ese conjunto de reglas y para qué tipo de problema en específico. Todo esto nos proporciona las herramientas necesarias para poder realizar nuestro propio controlador difuso, teniendo todas las características de un controlador de alto nivel. En este sentido en la siguiente sección proponemos un controlador PID difuso para una Grúa Puentes tomando como base el análisis realizado en esta sección.

3. Propuesta de Control

En la Figura 5 (DCL del carro) y Figura 6 (DCL de la carga) se representa el diagrama de cuerpo libre para una Grúa Puentes

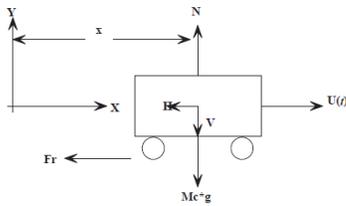


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre del carro

$$U(t) - Fr - H = Mc \cdot \ddot{x} \quad (1)$$

Donde Fr es la fricción del carro $Fr = fc \cdot \dot{x}$ (2)

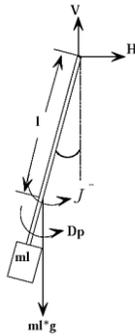


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de la carga

$$H = ml \frac{d^2}{dt^2} (x - l \sin \theta) \quad (3)$$

$$V - ml \cdot g = ml \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta) \quad (4)$$

Dónde: $\frac{d^2}{dt^2} (x - l \sin \theta) = \ddot{x} - l \ddot{\theta} \cos \theta + l \dot{\theta}^2 \sin \theta$

$$\frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta) = -l \ddot{\theta} \sin \theta + l \dot{\theta}^2 \cos \theta$$

Haciendo suma de momentos en el centro de masas de la carga se tiene:

$$J \ddot{\theta} + Dp - Hl \cos \theta + Vl \sin \theta = 0 \quad (5)$$

Donde Dp es la fricción rotacional, $Dp = fp \dot{\theta}$

Remplazando las anteriores formulas en (1) y (5) $U(t) = (Mc + ml) \ddot{x} - ml \cdot l \ddot{\theta} \cos \theta + ml \cdot l \dot{\theta}^2 \sin \theta + Fr$ (6)

$$J \ddot{\theta} + fp \dot{\theta} - ml \cdot l \cos \theta (\ddot{x} - l \ddot{\theta} \cos \theta + \dot{\theta}^2 \sin \theta) + l \sin \theta [mlg - ml \cdot l (\ddot{\theta} \sin \theta - \dot{\theta}^2 \cos \theta)] = 0 \quad (7)$$

Linealizando alrededor del punto de operación $\theta = 0$ tenemos las funciones de transferencia

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{ml \cdot l \cdot s^2}{\left[\frac{(Mc + ml)J}{(Mc \cdot ml) \cdot l^2} \right] s^4 + \left[\frac{(Mc + ml)fp}{(J + ml \cdot l^2) \cdot fc} \right] s^3 + \left[\frac{(Mc + ml)l \cdot ml \cdot g}{fp \cdot fc} \right] s^2 + [fc \cdot ml \cdot l \cdot g] s}$$

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{(J + ml \cdot l^2) s^2 + fp \cdot s + ml \cdot l \cdot g}{\left[\frac{(Mc + ml)J}{(Mc \cdot ml) \cdot l^2} \right] s^4 + \left[\frac{(Mc + ml)fp}{(J + ml \cdot l^2) \cdot fc} \right] s^3 + \left[\frac{(Mc + ml)l \cdot ml \cdot g}{fp \cdot fc} \right] s^2 + [fc \cdot ml \cdot l \cdot g] s}$$

Tenemos esta propuesta para el control de una Grúa Puentes. Como se puede apreciar en la Figura 7.

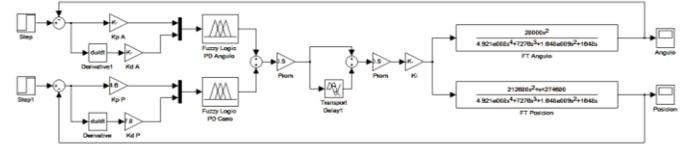


Figura 7. Propuesta Control PID Difuso

En cuento a las entradas de esta propuesta tenemos la entrada error del ángulo el rango [-4.5 4.5], la entrada derivada del error del ángulo, el rango [-0.9 0.9], la entrada error del carro dentro el rango [-18.75 18.75], la entrada derivada del error del carro, el rango [-9.375 9.375] y las salidas, la salida el ángulo el rango [-93750 93750], para la salida del carro, el rango [-93750 93750]. En todos los casos son 7 funciones de membrecía (BN), (MN), (SN), (ZR), (SP), (MP), (BP). En cuento a las reglas difusas (tabla N°1)

Tabla N°1. Reglas Difusas

error	D. error						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
3	-1	-1	-1	1	2	3	3
2	-1	-1	-1	1	2	3	3
1	-2	-1	-1	1	1	3	3
0	-3	-2	-1	0	1	2	3
-1	-3	-3	-1	-1	1	1	2
-2	-3	-3	-2	-1	1	1	1
-3	-3	-3	-2	-1	1	1	1

4. Simulador Grúa Puentes

En esta tesis se adopta el método de integración de Euler. Para realizar la simulación tenemos en cuenta las siguientes formulas (6) y (7) las cuales nos permiten obtener las componentes \ddot{x} y $\ddot{\theta}$. Y se reemplaza en el siguiente sistema de ecuaciones de espacio de estados

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \theta + \dot{\theta} dt \\ \dot{\theta} &= \dot{\theta} + \ddot{\theta} dt \\ \dot{x} &= x + \dot{x} dt \\ \dot{x} &= \dot{x} + \ddot{x} dt\end{aligned}$$

$$\ddot{x} = \frac{(J + ml * l^2)(U(t) - fc * \dot{x}) + ml * l[-fp\dot{\theta} - ml * lg\theta]}{Mc(J + ml * l^2) + ml * J}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{ml * l(U(t) - fc * \dot{x}) - (Mc + ml)[fp\dot{\theta} + ml * lg\theta]}{Mc(J + ml * l^2) + ml * J}$$

Como se puede apreciar en la Figura 8. Se tiene la interface de dicho simulador,

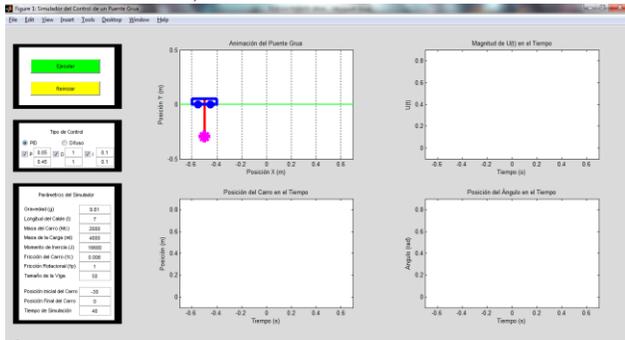


Figura 8. Interface Simulador

5. Resultados Experimentales

Tabla N°2 Parámetros Grúa Puentes

Parámetro	Valor
Límites del riel	50 [m]
Gravedad (g)	9.81 [m/s ²]
Longitud del cable (l)	7 [m]
Masa del carro (Mc)	2000 [Kg]
Masa de la carga (ml)	4000 [Kg]
Momento de inercia (J)	16680 [Kg·m ²]
Coefficiente de fricción de rotación (fp)	1
Coefficiente de fricción del carro (fc)	0.006

Función de transferencia de la posición.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{212680s^2 + s + 274680}{4.921e008s^4 + 7276s^3 + 1.648e009s^2 + 1648s}$$

Función de transferencia del ángulo.

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{28000s^2}{4.921e008s^4 + 7276s^3 + 1.648e009s^2 + 1648s}$$

Entonces, teniendo los parámetros y las respectivas funciones de transferencia se procede a analizar cada sistema de control, los tres controles convencionales (PD, PI y PID) y el control difuso.

Los Resultados del control PD son las ganancias obtenidas fueron para la posición son Kp = 8500, Kd = 19500 y para el ángulo son Kp = 40, Kd = 60 (Fig. 9 y Fig10)

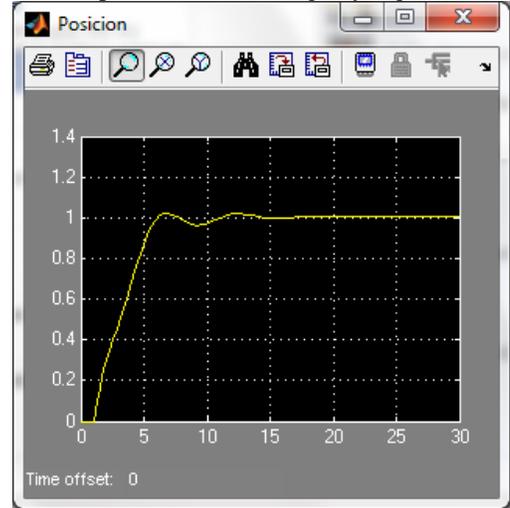


Figura 9. Comportamiento de la posición, control PD

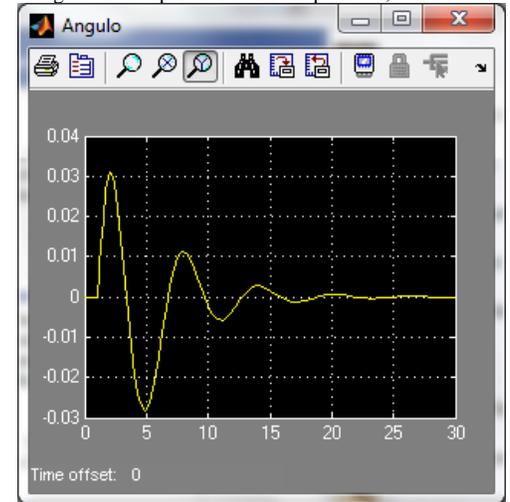


Figura 10. Comportamiento del ángulo, control PD

Los Resultados del Control PI, las ganancias fueron para la posición son Kp = 1400, Ki = 8 y para el ángulo son Kp = 40, Ki = 3. (Fig. 11 y Fig. 12)

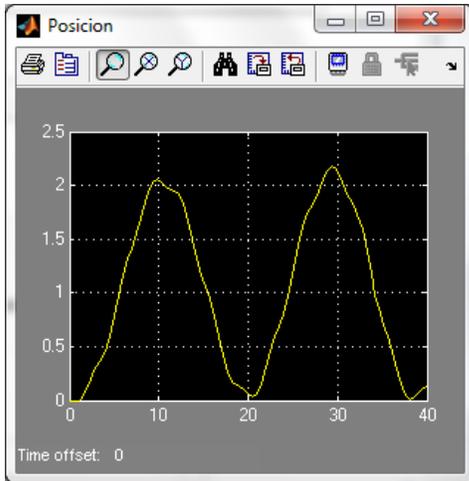


Figura 11. Comportamiento de la posición, control PI

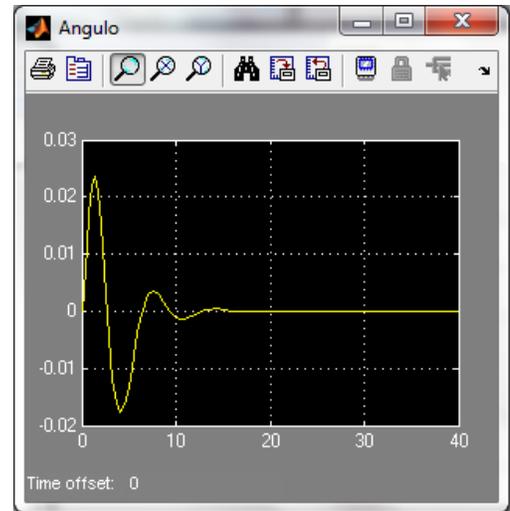


Figura 14. Comportamiento de la posición, control PID

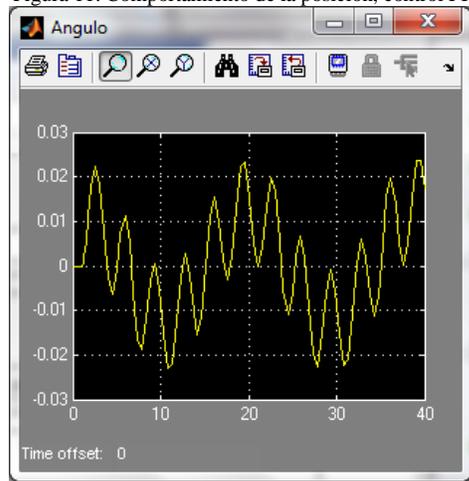


Figura 12. Comportamiento del ángulo, control PI

Los resultados del Control PID son las ganancias obtenidas fueron para la posición son $K_p = 5000$, $k_d = 1400$, $K_i = 2$ y para el ángulo son $K_p = 25$, $k_d = 6000$, $K_i = 0.5$ (Fig. 13 y Fig. 14)

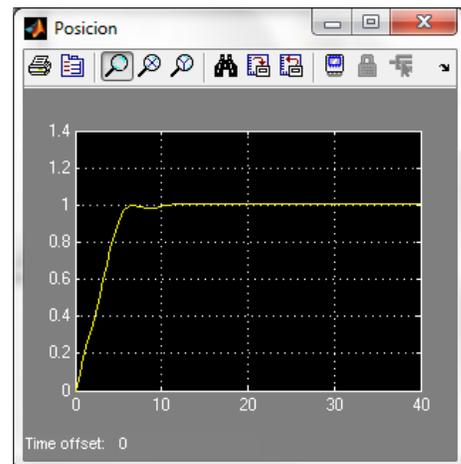


Figura 13. Comportamiento de la posición, control PID

Por último los Resultados Control Difuso son las ganancias obtenidas fueron para la posición son $K_p = 4.6$, $k_d = 7.8$, y para el ángulo son $K_p = 0.0001$, $k_d = 0.001$ y para los dos casos el valor de k_i es el mismo para los dos, $k_i = 0.13$ (Fig. 15 y Fig.16)

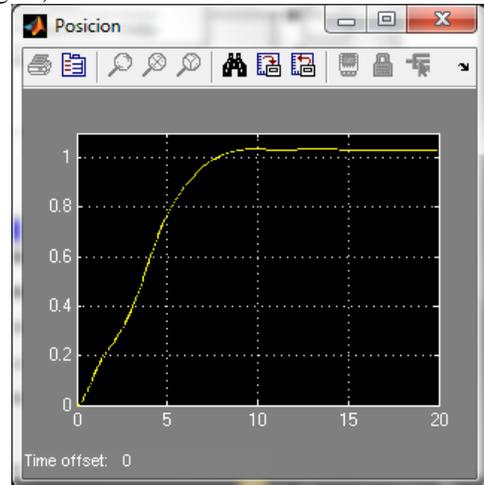


Figura 15. Comportamiento de la posición, control difuso

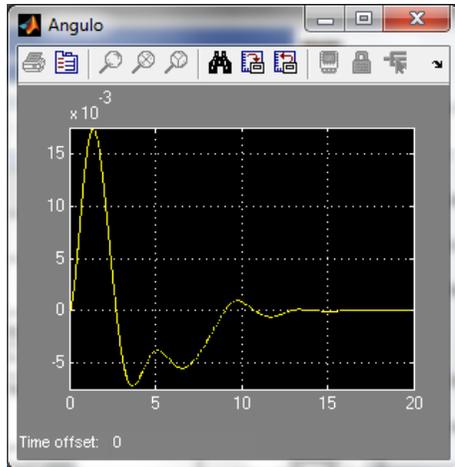


Figura 16. Comportamiento de la posición, control difuso

Ahora procedemos a analizar los resultados con el simulador. Los resultados del Control PD, fueron para la posición son $K_p = 9000$, $K_d = 30000$ y para el ángulo son $K_p = 150$, $K_d = 2500$ (Fig. 17 y Fig. 18)

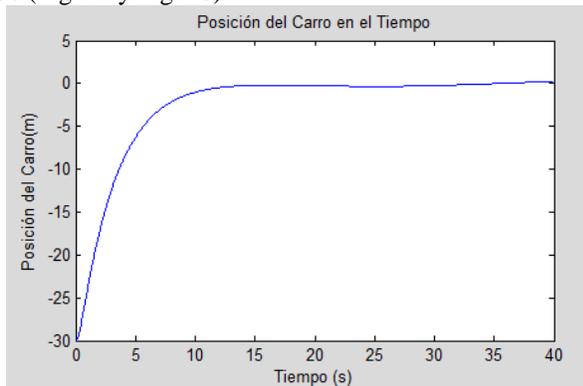


Figura 17. Comportamiento de la posición, control PD

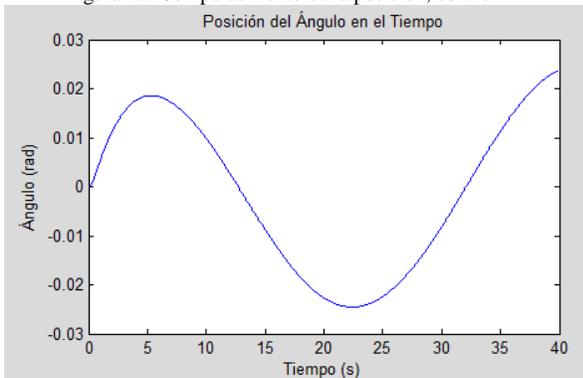


Figura 18. Comportamiento del ángulo, control PD

Los Resultados del Control PID, fueron para la posición son $K_p = 16000$, $k_d = 45000$, $K_i = 3900$ y para el ángulo son $K_p = 1500$, $k_d = 2000$, $K_i = 500$ (Fig. 19 y Fig. 20)

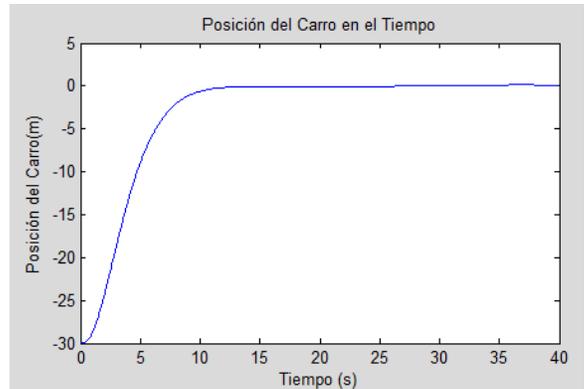


Figura 19. Comportamiento de la posición, control PID

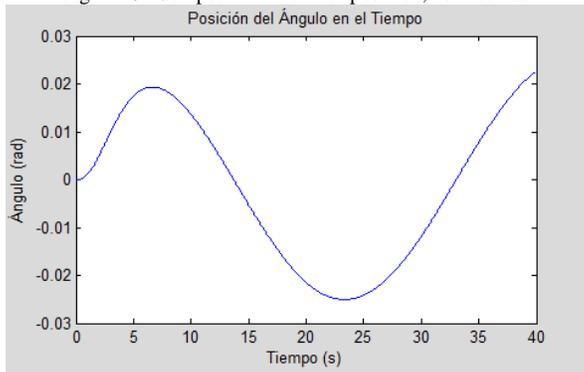


Figura 20. Comportamiento de la posición, control PID

Los resultados del Resultados Control Difuso, fueron para la posición son $K_p = 0.198$, $k_d = 2.4$, y para el ángulo son $K_p = 0.001$, $k_d = 1.1$ y para los dos casos el valor de k_i es el mismo para los dos, $k_i = 1.45$ (Fig 21 y Fig. 22)

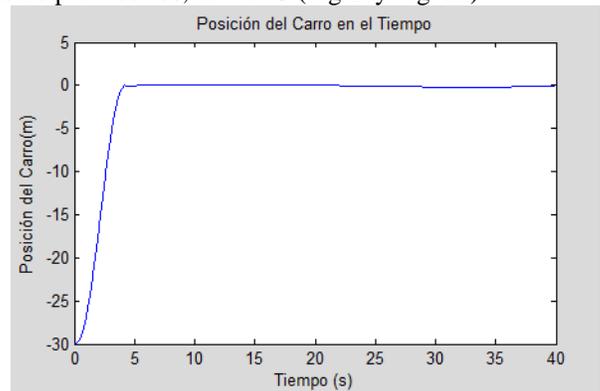


Figura 21. Comportamiento de la posición, control difuso

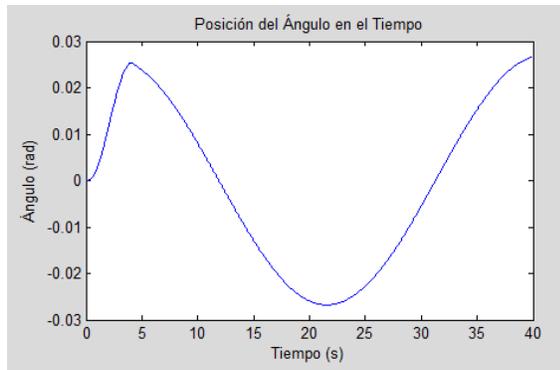


Figura 22. Comportamiento de la posición, control difuso

6. Conclusiones

1. El controlar PID difuso cumple mejor con la tarea en el proceso de transporte.
2. Las ganancias obtenidas en el Simulink son el punto de partida para obtener las ganancias en el simulador.
3. Teniendo en cuenta los resultados, se puede observar que el tiempo de estabilidad de la posición y de la carga es mucho menor en relación a los otros controladores, con lo significa que el tiempo de trabajo se reduce, es decir la productividad aumenta.
4. Teniendo en cuenta que la productividad aumenta al utilizar un controlador PID difuso se puede concluir que también aumenta la cantidad de objetos realmente trasladados; es decir la eficiencia del proceso también aumenta.

7. Referencias Bibliográficas

- [1]Aplicaciones de Técnicas Neuro-genéticas en la resolución del problema de control cinemático en grúa puente. Juanjo Valera García, Eloy Irigoyen, Vicente Gómez-Garay y Mikel Larrea.
- [2]Entorno de simulación basado en Marilou y Matlab para control antibalaceo de Grúas puente. Silvia Gonzáles Álvarez.
- [3]Sintonización de un control óptimo cuadrático con computación evolutiva para una grúa puente. Carlos Eduardo Betancur P. y Leonardo Taffurht C.
- [4]Aplicación de un controlador lineal cuadráticos usando un observador de orden mínimo sobre una grúa puente. Didier Giraldo y Eduardo Giraldo.
- [5]Control de oscilaciones en grúas viajeras con Reguladores Fuzzy. Jorge Sánchez Bermúdez, Gilberto Machado Burguesa y Concepción Gómez.
- [6]Introducción a la Lógica Difusa, Tomas Arredondo.

[7]Analysis of Direct ActionFuzzy PID Controller Structures George K. I. Mann, Bao-Gang Hu, Member, IEEE, and Raymond G. Gosine, Member, IEEE.

[8]Analysis of Direct ActionFuzzy PID Controller Structures George K. I. Mann, Bao-Gang Hu, Member, IEEE, and Raymond G. Gosine, Member, IEEE.

[9]Analysis of Direct ActionFuzzy PID Controller Structures George K. I. Mann, Bao-Gang Hu, Member, IEEE, and Raymond G. Gosine, Member, IEEE.

[10]Analysis of Direct ActionFuzzy PID Controller Structures George K. I. Mann, Bao-Gang Hu, Member, IEEE, and Raymond G. Gosine, Member, IEEE.

[11]Comparison between PID and fuzzy control. Jelena Godjevac.

[12]Conventional Fuzzy Control and Its Enhancement. Han-Xiong Li and H. B. Gatland.

[13]Application of electrolyzer to alleviate power fluctuation in a stand alone microgrid based on an optimal fuzzy PID control. Issarachai Ngamroo.

[14]Base don PLC temperatura PID – Fuzzy control system design and simulation. Cao Weibin and Meng Qingjian.

[15]Modeling and Fuzzy-PID Control of Hydraulic-Rolls Coupled System in Cold Rolling Mills. Xu Yang, Bo Wen and Chao-nan Tong.