

CONTROL DIFUSO DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS DE UPB MEDELLÍN.

Juan Patiño V, Rafael Angulo R.

Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, Medellín, Colombia,

Juan.patino@pascualbravo.edu.co, tel. (+574) 4911033.

ranguloruiz@hotmail.com, tel. (+574) 2659497.

Resumen: En este artículo se muestran los resultados obtenidos al simular la utilización de un controlador difuso en el proceso del túnel de viento del laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Se compara el comportamiento de este controlador difuso con el de un controlador PID sobre el mismo proceso. Copyright © 2010 UPB

Abstract: this paper presents the results obtained by the simulation of a fuzzy controller applied in the wind tunnel process located in the fluid mechanic lab at Universidad Pontificia Bolivariana in Medellín. Also the behaviour of this fuzzy controller is compared with the behaviour of a PID controller applied on the same process.

Keywords: Fuzzy Logic controller, PID, Wind Tunnel, Fuzzy Inference System, Model.

Palabras claves: Controlador de lógica difusa, PID, Túnel de viento, Sistema de inferencia difuso, modelo.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan los resultados obtenidos a partir de la identificación del modelo dinámico y la simulación de un controlador basado en lógica difusa aplicado sobre el túnel de viento del laboratorio de mecánica de fluidos de la UPB.

La planta utilizada es el ventilador del laboratorio de Ingeniería Mecánica, el cual está instrumentado para llevar a cabo labores de control de velocidad de viento. Éste consta de:

PLC: marca Telemecanique, modelo TwidoTWDLCAE40DRF.

Computador con LabVIEW® y Matlab®.

Variador: marca: Siemens, modelo: DL12075AB, trifásico, entrada alimentación: 230 V, 50-60 Hz, salida: 0 – 230 V, 0 – 60 Hz.

Sonda de velocidad: marca: Omega, modelo: FMA 604I, rango: 0 – 2000 fpm, entrada alimentación: 15VDC, salida: 4 – 20 mA DC.

En primer lugar se determina la zona de operación lineal del proceso, luego se hace la identificación del modelo dinámico por el método de los dos puntos y mínimos cuadrados. Se determina la eficiencia de los modelos obtenidos haciendo una simulación ante estímulos de tipo escalón. Luego se escoge el modelo que mejor se haya ajustado a los datos experimentales. Se muestran los esquemas de simulación tanto para el controlador difuso como para un controlador PID aplicado sobre la misma planta, se explican los conjuntos de entrada y salida y las reglas aplicadas. Se muestran los resultados obtenidos a partir de cada simulación y se analizan. Por último se hacen las respectivas conclusiones. La razón de ser del experimento realizado es la falta de eficiencia que ha demostrado el esquema de control PID aplicado al túnel de viento a lo

largo de su funcionamiento. Por tanto, se decidió probar un esquema de control inteligente para el control de la velocidad del viento en el túnel y así comprobar si hay una mejora en la eficiencia para el control del proceso.

2. ZONA LINEAL

La zona lineal del sistema se escoge para una entrada entre 800 y 1200 (en mAx100) y una salida entre 525.207921 y 858.039216 fpm respectivamente. (Hanselman, 2005).

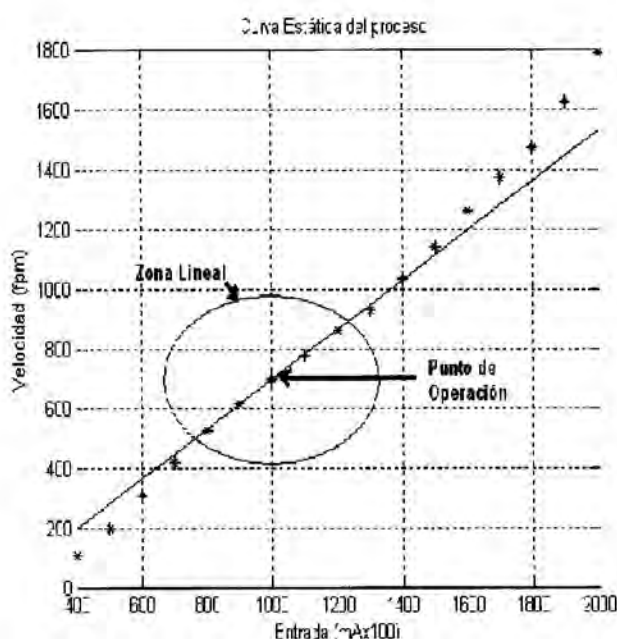


Fig. 1. Curva Estática y Modelo Lineal

El punto de operación (punto Q) se escoge para una acción de control de 1000 mAx100. El sistema es no lineal, ya que ante variaciones en la entrada del proceso, la salida no presenta cambios que vayan en la misma proporción, además la curva estática así lo representa, tal y como se observa en la figura 1. Se puede entonces usar un modelo lineal limitando el proceso a una zona de operación específica en la que la curva estática tiene un comportamiento aproximadamente lineal.

“Sí el sistema opera alrededor de un punto de equilibrio y si las señales involucradas son pequeñas, es posible, aproximar el sistema no lineal mediante un sistema lineal. Tal sistema

lineal es equivalente al sistema no lineal, considerado dentro de un rango de operación limitado” (Ogata, 1997).

Al linealizar el modelo alrededor de la zona de operación se obtiene que

$$\Delta y = 0.8321 \Delta u, \quad (1)$$

Donde:

u : Entrada del proceso

y : Salida del Proceso

$$\Delta u = u - 1000$$

$$\Delta y = y - 696.745098$$

3. MODELO DE PRIMER ORDEN MÁS RETARDO POR MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS

Al utilizar el método de los dos puntos (Smith y Corripio, 2006), en el experimento dinámico se obtiene lo siguiente:

$t_1 = 11.428$ seg. , $t_2 = 12.076$ seg., luego se reemplazan en

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1), \quad (2)$$

$$t_R = t_2 - \tau, \quad (3)$$

donde:

τ : Constante de tiempo del sistema

t_R : Tiempo de retardo del sistema

t_1 : Tiempo en el 28.3% de la excursión total

t_2 : Tiempo en el 63.2% de la excursión total

Reemplazando en las dos ecuaciones anteriores

$\tau = 0.972$ seg. y $t_R = 11.104$ seg., se obtiene

$$G(S) = \frac{e^{-11.104S}}{0.972S + 1}, \quad (4)$$

donde:

$G(S)$: Función de transferencia del modelo

4. MODELO DE PRIMER ORDEN MÁS RETARDO

Al utilizar el método de mínimos cuadrados para ajustar el modelo de la planta a un sistema de primer orden más retardo se tiene que

$$G(S) = \frac{0.8988e^{-2.7994S}}{6.6186S + 1} \quad (5)$$

Donde:

$G(S)$: Función de transferencia del modelo
 $\tau = 1.4328 \text{ seg.}$

En la figura 2 se muestra el modelo de primer orden más retardo obtenido para la subida.

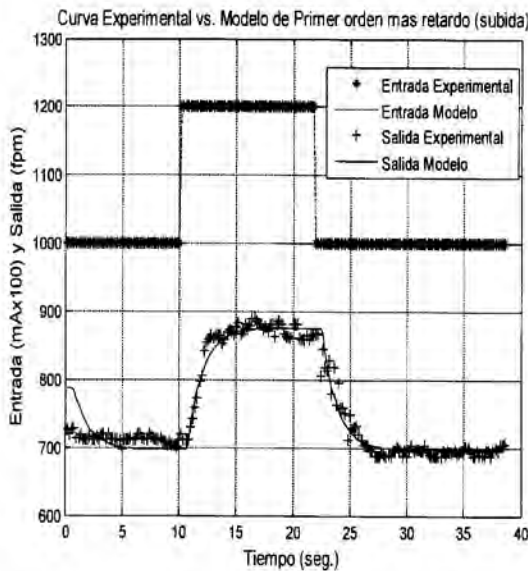


Fig. 2. Curva experimental vs. Modelo dinámico

Para la bajada se tiene que

$$G(S) = \frac{0.8921e^{-6.7978S}}{9.8186S + 1} \quad (6)$$

En la figura 3 se muestra el modelo de primer orden más retardo obtenido para la bajada.

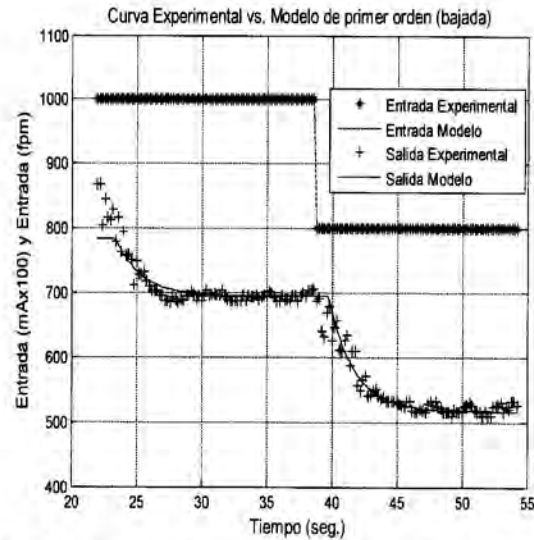


Fig. 3. Curva experimental vs. Modelo dinámico

5. MODELO DE SEGUNDO ORDEN POR MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Al utilizar el método de mínimos cuadrados para ajustar el modelo de la planta a un sistema de segundo orden subamortiguado se tiene que

$$G(S) = \frac{0.9417}{9.3354S + 1} \frac{1}{0.003S + 1} \quad (7)$$

En la figura 4 se muestra el modelo de segundo orden subamortiguado obtenido para la subida.

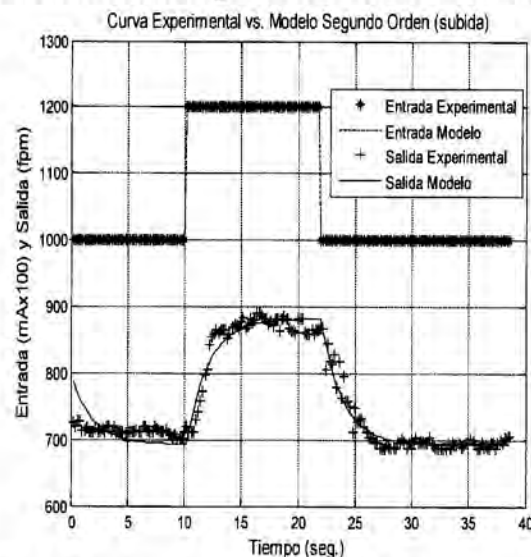


Fig. 4. Curva experimental vs. Modelo dinámico
Para la bajada se obtiene

$$G(S) = \frac{0.9417}{9.3354S + 1} \frac{1}{0.003S + 1} \quad (8)$$

La figura 5 muestra la curva de aproximación para el modelo de segundo orden en bajada.

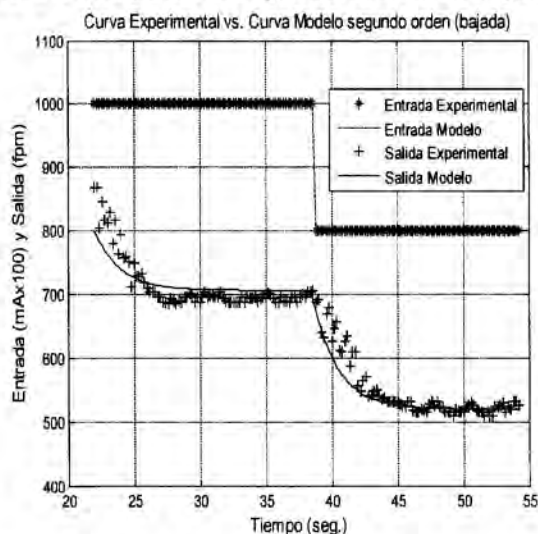


Fig. 5. Curva experimental vs. Modelo dinámico

6. SIMULACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS

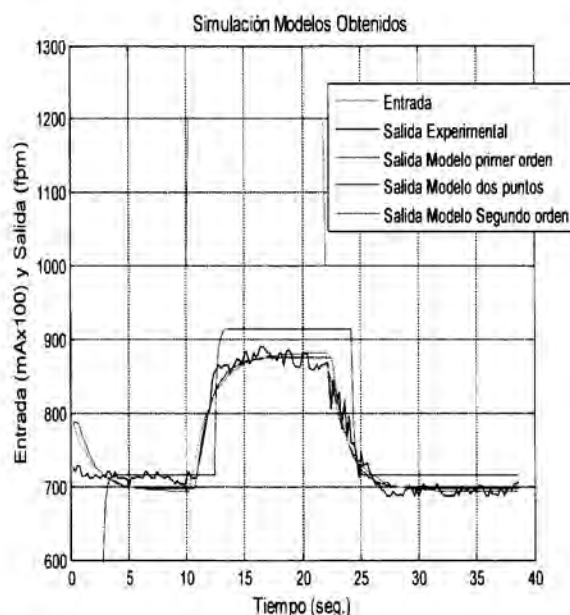


Fig. 6. Simulación modelos obtenidos

7. MODELO DINÁMICO DE MEJOR APROXIMACIÓN

En la tabla 1 se muestran los errores cuadráticos que arrojó cada uno de los ajustes realizados a modelos candidatos.

Tabla 1. Error cuadrático en los Modelos

Modelo	Error Cuadrático (mA ²)
Primer Orden+Retardo	2.7221 x10 ⁴
Primer Orden (2 puntos)	4.0268 x10 ⁵
Segundo Orden	2.2234x10 ³

Según lo observado en la tabla y teniendo en cuenta la respuesta en el tiempo de cada uno de los modelos candidatos, el que mejor se ajusta es el de primer orden más retardo.

8. MODELO DEL TÚNEL DE VIENTO

El modelo del túnel de viento se obtuvo a través del método de aproximación por mínimos cuadrados. El modelo es de segundo orden subamortiguado y no lineal. Su eficiencia se verificó mediante pruebas experimentales reiteradas.

El modelo de la planta como sistema de segundo orden subamortiguado es

$$G(s) = \frac{0.9417}{9.3354s + 1} \frac{1}{0.003s + 1} \quad (9)$$

La gráfica de la dinámica del túnel de viento realizada en una zona lineal se muestra en la figura 7.

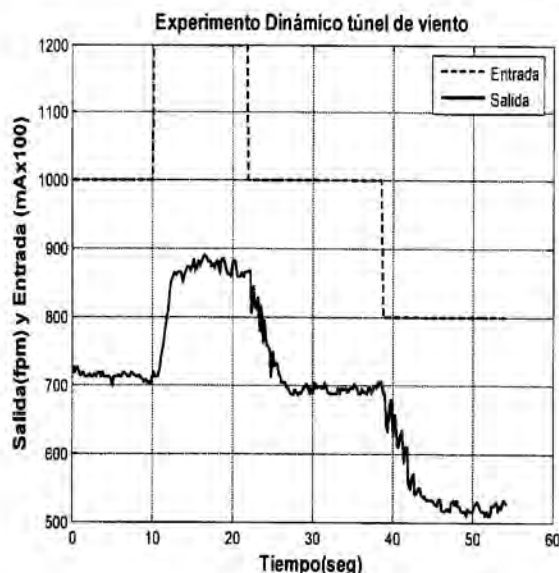


Fig. 7. Experimento dinámico del túnel de viento
La figura 7 muestra que el proceso a controlar tiene mucho ruido, por lo cual se pone mucha atención a la escogencia de las reglas del controlador difuso.

9. ESQUEMAS DE SIMULACIÓN

Para lograr la simulación del control del proceso por métodos de lógica difusa y para el control del mismo proceso por medio de un esquema PID, el cual se usa para establecer comparaciones, se utiliza la herramienta SIMULINK de MATLAB. (Hanselman, 2005) (Klee, 2007)

Con respecto al controlador difuso se utiliza el toolbox de lógica difusa que tiene MATLAB, el cual posee una interfaz de usuario o GUI que permite la fácil construcción de los conjuntos de pertenencia para la entrada y la salida, la base de reglas y el establecimiento del método de defuzzificación.

Se utilizaron dos bloques difusos, cada uno de ellos con dos entradas, las cuales se escogieron como el error y la derivada del error. Uno de los bloques se encarga de transformar a valores difusos dichas entradas y tomar una decisión de acuerdo a los valores del error y su

derivada (Betancur, 2007). El otro bloque toma las decisiones con las mismas entradas pero teniendo en cuenta que a la salida hay un bloque de integración, razón por la cual la base de reglas es diferente.

Cada una de las entradas a los dos bloques poseen 5 conjuntos de entrada y cada uno tiene una salida con tres conjuntos. El método de defuzzificación utilizado es el del centro de gravedad. En la tabla 2 se muestran los conjuntos para la entrada de cada uno de los dos bloques, en la tabla 3 se muestran los conjuntos de salida para cada bloque difuso.

Tabla 2. Conjuntos de entrada para los bloques difusos del controlador.

Entrada	Conjuntos
Error	NG
	NP
	Z
	PP
	PG
Derivada del Error	dNG
	dNP
	dZ
	dPP
	dPG

Tabla 3. Conjuntos de salida para los bloques difusos del controlador.

Salida	Conjuntos
Bloque 1	AZ
Error y derivada	AM
	AG
Bloque 2	IZ
Error y derivada	IM
	IG

A continuación se muestran los bloques de SIMULINK utilizados en la simulación del proceso bajo un controlador de tipo difuso en el proceso del túnel de viento planteado.

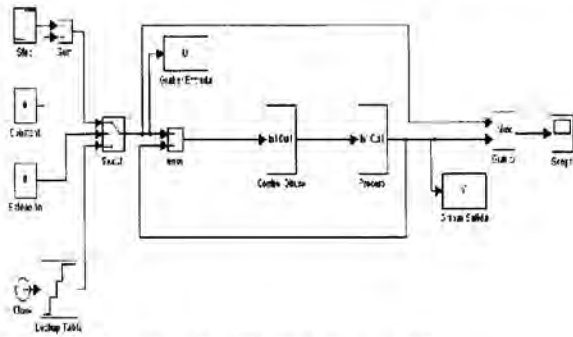


Fig. 8. Simulación del controlador difuso.

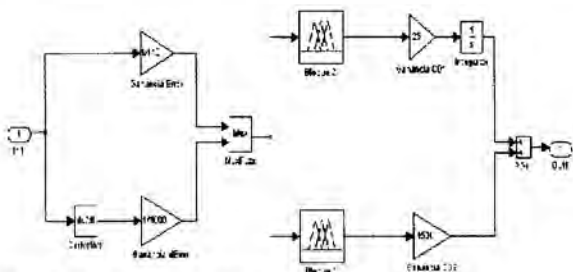


Fig. 9. Bloque de control difuso.

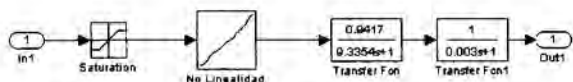


Fig. 10. Bloque del proceso.

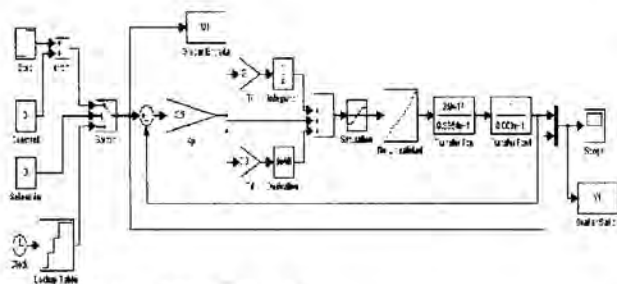


Fig. 11. Control PID aplicado.

10. EXPLICACIÓN BASE DE REGLAS

La base de reglas escogida se basa en la acción que se le debería ordenar al actuador ante la combinación de dos entradas, como lo son el error y la derivada del error.

10.1 Base de Reglas del Bloque 1

Para el bloque 1 se tuvieron en cuenta los efectos del error y la derivada del error solamente. La base de reglas tuvo como criterio que si el error era negativo y de cualquier magnitud e independientemente del valor de la derivada, la orden enviada al actuador fuera cero, ya que este no actúa en dos sentidos, razón por la cual se espera que la dinámica del sistema lo lleve a un error aproximadamente cero.

Cuando el error es cero, el actuador también recibe la orden de no hacer nada independiente del valor de la derivada del error.

Por el contrario si el error es positivo, se toman diversas acciones. Cuando el error es positivo pequeño y el error tiende a disminuir, se hace que se le envíe al actuador una orden de acción mediana. Si el error tiende a aumentar se emplea entonces una acción grande al actuador para corregir rápidamente el crecimiento del error.

Cuando el error es positivo grande y el error tiende a disminuir se hace una acción mediana, si el error tiende a mantenerse constante o a aumentar, se emplea una acción grande para transmitir al actuador, para elimina el error.

10.2. Base de Reglas del Bloque 2

En el caso del bloque 2, se tienen las mismas entradas, pero en este caso se tiene en cuenta que hay un integrador a la salida, que se encargará de proporcionar la parte integral del control.

En esta situación se considera que se debe enviar acción al actuador sólo cuando se tengan errores de magnitud pequeña y que tiendan a disminuir, pues en otros casos, dado el valor elevado del error, habría un windup, que llevaría al sistema a un sobreimpulso considerable y a un tiempo de estabilización mayor.

Cuando los errores son positivo pequeño y negativo pequeño, y el error tiende a disminuir lentamente o a permanecer constante, se aplica una acción integral mediana.

Cuando los errores son positivo pequeño y negativo pequeño, y el error tiende a disminuir rápidamente, se aplica una acción integral grande, para acelerar el error cero en estado estable.

En los otros casos, se aplica un valor nulo a la integral del sistema.

11. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la realización del control del túnel de viento mediante lógica difusa se muestran a continuación. Uno de los aspectos esenciales para el análisis recae en la comparación que se hace teniendo en cuenta los resultados para un control PID convencional.

En las figuras 12 y 13 se muestra el control difuso y PID respectivamente, cuando se lleva la referencia desde un valor cero hasta 1200 fpm.

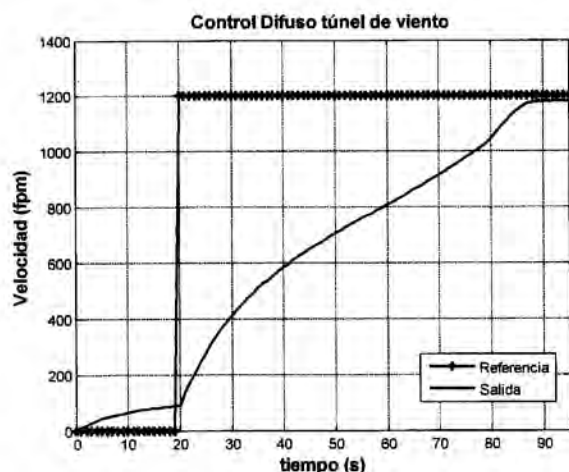


Fig. 12. Control Difuso aplicado, referencia 1.

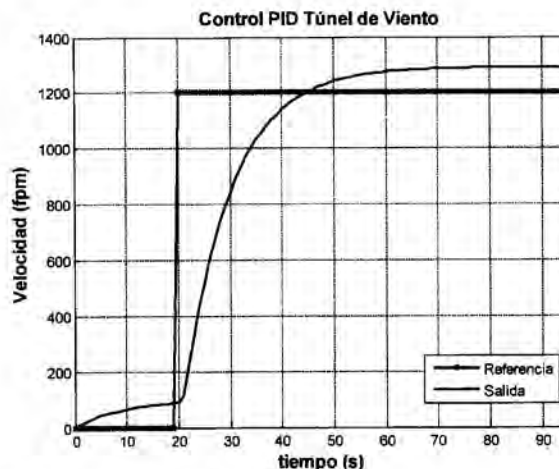


Fig. 13. Control PID aplicado, referencia 1.

En las figuras 14 y 15 se muestra el control difuso y PID respectivamente, cuando se sube de forma escalonada la referencia hasta 1200 fpm.

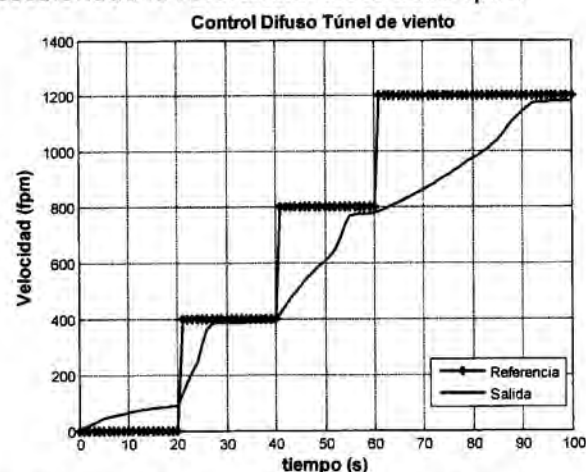


Fig. 14. Control Difuso aplicado, referencia 2.

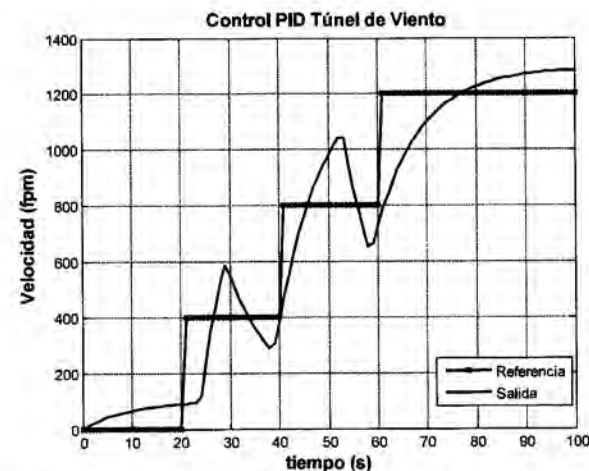


Fig. 15. Control PID aplicado, referencia 2.

12. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Ante la aplicación de un escalón de 1200 fpm, el

control realizado a través de lógica difusa, la salida logra un error que es aproximadamente cero, el sistema no tiene sobre impulsos, el inconveniente se presenta en el tiempo en el que se demora en llegar a la referencia, pues es más lento que el PID, clásico, pero en realidad no es un tiempo muy elevado. En el caso del PID clásico, el sistema llega rápido a la referencia, pero tiene un sobreimpulso considerable y como se nota en la figura 13, nunca va a llegar a la referencia.

Cuando se aplican múltiples escalones hasta llegar a 1200 fpm, el controlador difuso se comporta de manera muy eficiente, ya que nunca hay sobre impulsos y el sistema llega a la referencia, no de una forma muy rápida, pero lo logra. En un principio logra controlar de manera muy rápida, y en las transiciones a escalones mayores se vuelve la subida un poco más lenta, pero realiza un control bueno. En el caso del PID, ante este tipo de entrada, el sistema no se estabiliza y posee sobre impulsos muy elevados, se nota también que no se va a lograr un error aproximadamente igual a cero.

13. CONCLUSIONES

La curva del proceso presenta mucho ruido, razón por la cual los ajustes realizados no representan en una proporción exacta la salida del sistema, sin embargo, son una buena aproximación dada la forma de la respuesta y el recorrido que la curva del modelo pasa por valores promedio de la salida.

El experimento estático a pesar de tener ruido, presenta una zona aproximadamente lineal en la cual se pudieron hacer consideraciones importantes para modelar el proceso.

El controlador difuso demuestra que realiza un control del proceso más eficiente que un controlador PID convencional, ya que los errores tienden a cero, no hay sobre impulsos y el tiempo de subida no es elevado.

Al utilizar el control de tipo difuso, se nota que el bloque 2 o de acción integral funciona de forma muy buena, ya que se logran errores de estado estable pequeños y no se presentan sobre impulsos, dado que la base de reglas esta diseñada para evitar el efecto de *windup*.

El controlador difuso es muy eficiente ya que actúa sobre todas las zonas del proceso y controla dentro de zonas lineales y no lineales, cosa que no sucede con el controlador PID clásico, el cual no respondió de forma adecuada al proceso, dado que éste es no lineal en la mayoría de las zonas.

La implementación de un controlador de tipo difuso en el túnel de viento del laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad Pontificia Bolivariana sería una estrategia de control muy eficiente, que sería de mucha utilidad para lograr un control más preciso. Esto se ha demostrado con el trabajo y las simulaciones realizadas.

REFERENCIAS

Ogata, K. (1997). *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice-Hall.

Dorf, R. (2005). *Sistemas De Control Moderno*. Pearson, España.

Kuo, B. (1995). *Sistemas de control automático*. Prentice Hall, México.

Betancur, M.J. (2007). *Presentación Lógica Difusa*. En *LogicaDifusaIntro070917.pdf*, en Línea [<http://amasd.upb.edu.co/postautomatica/controlInteligente.html>] consultado en Diciembre de 2009.

Vásquez, R.E. y M.J. Betancur (2007).

Modelación experimental de procesos dinámicos, en *Lab_ProCont.zip*, en línea [http://amasd.upb.edu.co/postautomatica/procesos_continuos.html] consultado en Diciembre de 2009.

García, Luis Eduardo. (2002). *Control digital. Teoría y práctica*. Medellín: Politécnico Colombiano JIC, 350 p.

Hanselman, Duane y Littlefield, Bruce (2005). *Mastering Matlab 7*. Prentice-Hall.

Klee Harold (2007). *Simulation of Dynamics Systems with Matlab and Simulink*. Crc Press.

Mohammad, Jamshidi (1997). *Applications of Fuzzy Logic*. Aula Magna.

Martin del Brío, Bonifacio. (2005). *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*. Alfaomega.