

Implementación de un controlador difuso para la regulación de posición de un cilindro hidráulico lineal

Implementation of a Fuzzy Controller for Position Regulation of a Linear Hydraulic Cylinder

JOSÉ DANILO RAI RÁN ANTOLINES

Ingeniero Electricista y Magíster en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor e investigador, director del grupo de investigación en Control Electrónico, en categoría B de Colciencias. Docente de tiempo completo adscrito al programa de Tecnología en Electricidad en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C.

drairan@udistrital.edu.co

LIBIA SUSANA URREGO RIVILLAS

Ingeniera en control electrónico e instrumentación de la universidad distrital francisco José de caldas, investigadora del grupo de investigación en control electrónico de la misma universidad, bogotá, d.C.

lsurregor@udistrital.edu.co

Clasificación del artículo: *investigación*

Fecha de recepción: 18 de abril de 2006

Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2006

Palabras clave: controlador difuso, servohidráulica, control de posición, cilindro lineal.

Keywords: fuzzy controller, servohydraulic, position control, linear cylinder.

RESUMEN

En este artículo se presenta el proceso de diseño de un controlador difuso aplicado a un sistema hidráulico, compuesto por una servoválvula, un cilindro lineal, un sensor de posición, una unidad hidráulica y un filtro. Se utilizó un modelo no lineal aproximado, resultado de la experiencia de los autores y a partir

de él se crearon los conjuntos difusos denominados error y velocidad; éstos y sus reglas fueron probados en *Matlab*. Finalmente, el controlador en *Matlab* es enlazado con *Lab View*, para adquirir los datos en tiempo real desde este último. La variable de salida del controlador es el voltaje de alimentación de la servoválvula que regula el caudal y la presión en el cilindro. El propósito de este trabajo es continuar

con el estudio de estrategias de control útiles en la implementación de una mesa para mecanizado XY, habiendo analizado antes un PID digital.

ABSTRACT

This paper presents the design process of a fuzzy controller applied to a hydraulic system, composed by a servovalve, a linear cylinder, a position sensor, a hydraulic unit and a filter. A nonlinear approximate model was used, which resulted from the authors'

experience, through which fuzzy sets denominated "error" and "velocity" were created; these and their rules were proved in *Matlab*. Finally, the controller in *Matlab* is linked to *Lab View*, to acquire the data in real time from that. The output variable of the controller is the source voltage to the servovalve, which regulates the cylinder flow and pressure. The purpose of this project is to continue with the control strategy study, useful in the implementation of an XY table used in mechanized work; before, a digital PID controller has been already designed and tested.

* * *

1. Introducción

El grupo de investigación en Control Electrónico inició actividades en 1999, con un proyecto de investigación en levitación magnética que culminó en 2003. En la actualidad, se desarrolla el segundo proyecto que tiene como objetivo implementar controladores digitales en un DSP. Hasta ahora, se han publicado más de diez artículos referentes al desarrollo e implementación de diferentes controladores, como PID, de estado y neuronal. Algunos de ellos se resumen en [1]; otros son [2] y [3].

El control difuso es una tecnología en auge que ha conquistado el terreno de las aplicaciones domésticas, como el funcionamiento de algunas cámaras fotográficas y de video; también se encuentra en el aire acondicionado y en el manejo de ciclos de trabajo en lavadoras. Además, existen aplicaciones a nivel industrial, como la dirección de helicópteros no tripulados [4], de aviones [5], el control de grúas y trenes, la navegación de robots, el control de alimentación de gasolina de motores [6]; algunas no tan pacíficas como barcos de guerra [7], y otras más osadas como la vigilancia de algunos parámetros en plantas nucleares [8]. Otro campo de trabajo es el reconocimiento de la voz o de la escritura manual.

A continuación, se realiza una breve descripción de algunos trabajos que implementan controladores inteligentes en la regulación de posición de cilindros. Los resultados que presentan sirvieron de motivación para el inicio de este trabajo.

- En [9] la histéresis y banda muerta de un cilindro hidráulico se tienen en cuenta en su modelado, y el cilindro se controla mediante una red neuronal. Además, la efectividad de la red se compara con un controlador *PI* convencional. De este último se asegura que no puede trabajar en forma adecuada con todas las alinealidades del sistema; en lugar de ello, se demuestra que el controlador neuronal sí mejora el rendimiento del cilindro.
- En [7] el método de programación de ganancias se usa como estrategia de control. El elemento a controlar es un cilindro hidráulico, usado en un dispositivo que sigue objetivos desde un barco en movimiento. Un controlador difuso se implementa en un lazo interno, con salida velocidad, para eliminar todas las alinealidades. Además, un controlador PID se anexa en un lazo externo, para regular la posición; así se obtiene un mejoramiento sobre el comportamiento de un controlador convencional, comprobado, entre otros indicadores, por una estabilidad mayor.

- En [10] un controlador por modos deslizantes y uno PI difuso que actúa como apoyo se utilizan con excelentes resultados, aunque la dinámica no sea bien caracterizada y existan disturbios. El resultado es un controlador con precisión en la regulación de la posición y con un rechazo a disturbios alto.
- Finalmente, en [11] se trabaja con un cilindro neumático de dos metros de carrera. Los autores deciden utilizar un controlador difuso luego de haber encontrado muchos problemas con la implementación de un controlador PID y otro de estado; el controlador seleccionado tiene dos conjuntos: error y cambio del error. Al igual que en este caso, la plataforma de desarrollo es *Lab View*.

En este artículo el controlador difuso regula la posición de un cilindro hidráulico, que puede ser utilizado, por ejemplo, en la construcción de una mesa XY para mecanizado. El documento está dividido en siete secciones. La segunda se refiere al modelado de la planta; la tercera, a la realización del controlador difuso en Matlab; en la cuarta se estudia la implementación en *Lab View*; en la quinta se exponen los resultados y se concluye que es necesaria una variable de entrada adicional, que es estudiada en la sección sexta. En la última parte del artículo se consignan las conclusiones.

2. Modelado

En esta sección se explicará el proceso de identificación del sistema a controlar. Se comienza enunciando los elementos que componen la planta y luego se expone el proceso experimental que permitió la obtención del modelo.

Una de las partes más importantes del sistema es la válvula proporcional 4/3 vías, también conocida como *Moog*, que sirve de interfaz entre el controlador y la planta. Su corredera es dirigida por un motor eléctrico lineal, que regula el caudal y la presión en el cilindro [12]. Otro elemento del sistema es la unidad lineal o cilindro que tiene 200 mm de recorrido y 15,7 kg de peso. En el diagrama 1 se muestra la conexión del sistema.

Además de los dos dispositivos mencionados se utiliza un sensor de posición (con salida entre 0 y 10 V), una fuente de alimentación de 24 V, una unidad hidráulica abastecedora con presión máxima de 25 Mpa, un filtro de presión, una válvula reguladora de presión y varios manómetros. Con el fin de conectar el controlador al sistema, se utilizaron dos tarjetas de adquisición de datos que permiten registrar la posición del cilindro, leer la referencia proveniente de un generador de señales y entregar el voltaje de control con que se alimenta la válvula proporcional entre -10 y 10 V.

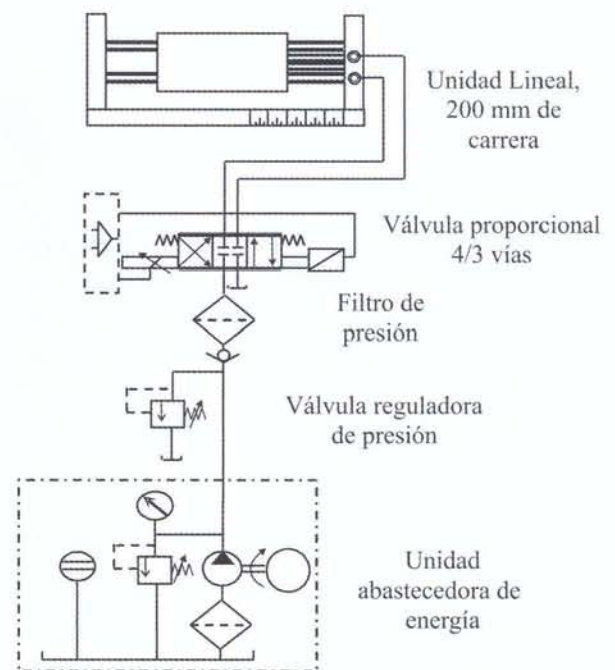
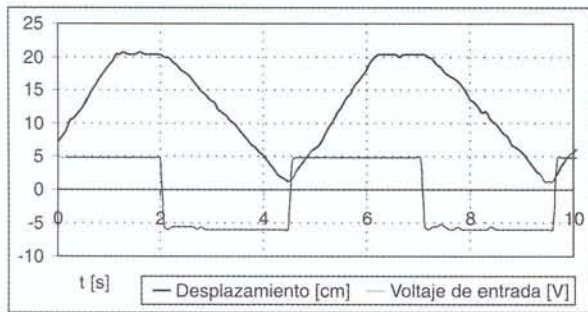


Diagrama 1. Montaje hidráulico del proceso a controlar

Luego de describir los principales componentes del sistema hidráulico, ahora se explica el proceso de modelado que permite obtener el diagrama de bloques. Este modelo cumple con dos propósitos; es útil para demostrar que el sistema puede controlarse con el esquema propuesto y permite la definición de las funciones de membresía y las variables de entrada y salida, de manera que en laboratorio sólo se requieran ajustes pequeños.

En la definición del modelo se tuvo en cuenta que la lógica difusa utiliza la experiencia del *experto* en el proceso a controlar; en consecuencia, se realizaron pruebas experimentales en lazo abierto. Se adquirieron, entre otras, las curvas mostradas en la gráfica 1, de las que se concluye que la planta se comporta de manera similar a un integrador, debido a que la posición aumenta en forma constante, cuando la señal de entrada se mantiene; en este caso, lo hace sólo hasta llegar al límite físico, que es de 20 cm.



Gráfica 1. Comportamiento de la planta

La siguiente aproximación al comportamiento de la planta está asociada con la diferencia entre el tiempo de avance (t_a) y el de retroceso (t_r), mostrado en la gráfica 1. Ésta no debiera presentarse, pues en los dos casos la planta se alimenta con la misma amplitud de voltaje; sin embargo, ella es causada porque las áreas interiores del cilindro, que definen el caudal y por tanto la velocidad, son distintas. La relación entre t_a y t_r define la constante K_r , como se indica en (1); por medio de ella se simula la no linealidad generada por el cambio de velocidad.

$$\left(\frac{t_a}{t_r}\right) = K_r \quad (1)$$

Una vez incluido el efecto de las áreas internas del cilindro sobre la velocidad, el voltaje de entrada de la gráfica 1 se aplica sobre el sistema en el diagrama 2, y se cambia el valor del bloque *Ganancia* hasta que la salida experimental y la del modelo coincidan. El resultado es una constante igual a 0,05.

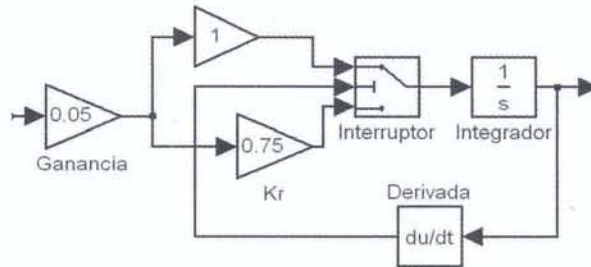


Diagrama 2. Modelo de la planta: t_r , t_a , K_r

El paso siguiente es incluir otras características no lineales, como la banda muerta [10, 13], visible en forma experimental, porque el cilindro comienza a desplazarse sólo hasta ser alimentado con voltajes superiores a 0,6 V; asimismo, la saturación resultante de la construcción del cilindro hace que el recorrido se limite al rango entre 0 y 20 cm.

El último efecto incluido en el modelo está relacionado con la imposibilidad del cilindro para cambiar la velocidad instantáneamente, debido a su inercia [14]. En su lugar pasa de un valor a otro en un tiempo experimental de 0,25 s; esto puede modelarse empleando un sistema de primer orden con constante de tiempo 0,05 s, como se muestra en el diagrama 3.

Debe mencionarse que todos los datos experimentales se recopilaron a una presión fija en 50 Bar; de lo contrario algunas constantes serían función de la presión y la complejidad del modelo se incrementaría más allá de lo necesario. El modelo final utilizado en el diseño del controlador se muestra en el diagrama 3. No se incluyen otros parámetros porque la diferencia entre las curvas experimentales y las del modelo ya es menor al 10%.

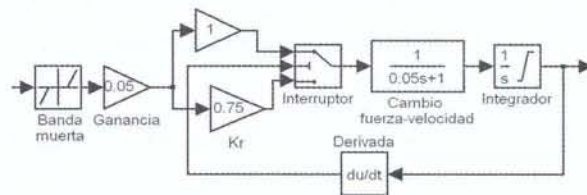


Diagrama 3. Modelo final de la planta

3. Sintonización en *Matlab*

Una vez obtenido el modelo del sistema, el controlador se define y ajusta, por ahora de manera virtual; esto es más seguro, rápido y económico. El programa que se utiliza es el *toolbox* de *Matlab* para control difuso.

En las primeras pruebas se utilizó el operador tipo *Mamdani* [15], con números reales como entradas y salidas [16]; además se utilizaron el método de implicación *min*, el método de agregación *máx* [17], el motor de inferencia *if then*, el fusificador *singleton* y el defusificador con el método centroide [18].

En la definición de las variables –error, velocidad y válvula– se retomaron las pruebas de laboratorio con la planta, que además son útiles para la selección del tipo y cantidad de las funciones de membresía, el motor de inferencia y las reglas de asociación [19].

Después de seleccionar la estructura del controlador se realizaron pruebas en *Matlab* hasta obtener la respuesta adecuada a una entrada escalón; esto se logró mediante cambios por ensayo-error en la definición de las funciones de membresía. La primera variable, error, es alimentada con la diferencia entre el voltaje de referencia y el de realimentación (entregado por el sensor); por esto su rango varía entre -10 y 10 [V]. La segunda variable: velocidad tiene en cuenta la velocidad máxima positiva experimental (0,6 m/s) y máxima negativa (0,5 m/s). Por último, la variable de salida: válvula, oscila entre -10 y 10 [V], que es el rango de operación de la válvula.

Las funciones de membresía de las variables error y válvula tienen forma *sigmoide*; ésta se seleccionó luego de probar varias alternativas observando el tiempo y la forma en que la posición del cilindro llegaba a un valor estable, luego de alimentarlo con una función escalón.

Las funciones de membresía para el error son: error grande negativo (gN), mediano negativo (mN), pequeño negativo (pN), cero (c), pequeño positivo (pP), mediano positivo (mP) y grande positivo (gP).

La variable velocidad cuenta con dos funciones: velocidad negativa (N) y positiva (P). Asociadas a la variable de salida se definen siete funciones de membresía: voltaje grande negativo (gN), mediano negativo (mN), pequeño negativo (pN), cero (c), pequeño positivo (pP), mediano positivo (mP) y grande positivo (gP).

Definidas las variables y sus funciones de membresía ellas se relacionan, por ejemplo mediante el siguiente análisis: si se desea que el cilindro se ubique en 20 cm y actualmente está en 0 cm, deberá alimentarse con un voltaje alto y de signo positivo; esto se escribe de la siguiente manera:

- Si (Error es gP), entonces (Válvula es gP).
- Con este mismo procedimiento se evalúan las demás posibilidades y se definen las siguientes reglas:
 - Si (Error es gP), entonces (Válvula es gP).
 - Si (Error es gN), entonces (Válvula es gN).
 - Si (Error es c), entonces (Válvula es c).
 - Si (Error es mP), entonces (Válvula es mP).
 - Si (Error es mN), entonces (Válvula es mN).
 - Si (Error es pN) y (Velocidad es N), entonces (Válvula es c).
 - Si (Error es pP) y (Velocidad es P), entonces (Válvula es c).

El *toolbox* de *Matlab* lee el error actual y la velocidad, con el esquema que se muestra en el diagrama 4; a partir de estos valores calcula el valor de corrección, también conocido como voltaje de control, que es el que alimenta la válvula.

Dado que el error y la velocidad son variables independientes, es posible construir una superficie de control, como se muestra en la gráfica 2. A cada dupla error-velocidad corresponde un voltaje de válvula equivalente a la altura de la superficie de control.

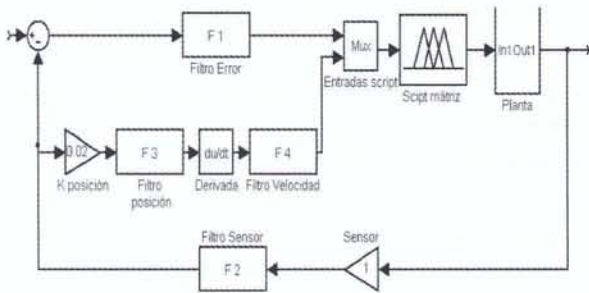
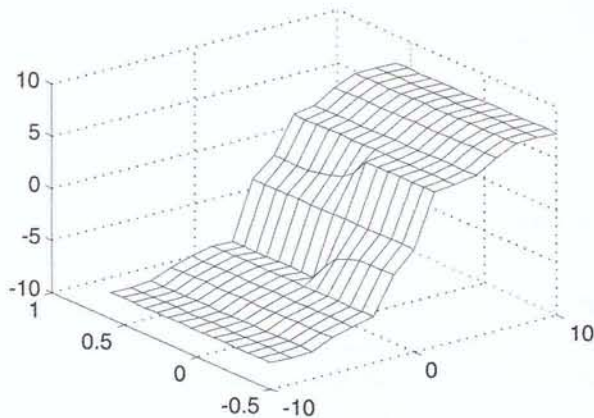


Diagrama 4. Diagrama de bloques de la planta en Lab View



Gráfica 2. Superficie de control

Cuando la respuesta en el tiempo es adecuada se realiza la implementación en *Lab View*, como se explica en el siguiente apartado.

4. Implementación en *Lab View*

Lab View es una herramienta de programación gráfica que facilita la visualización y el control de sistemas; sobre ella se realizó un instrumento virtual (VI) capaz de adquirir los datos, procesarlos y generar el voltaje de alimentación de la válvula 4/3 vías.

Por facilidad, el instrumento virtual se presentará en tres partes, aunque en verdad es un solo programa. La primera es el acondicionamiento de las señales de entrada (error y velocidad); para ello se diseñó un subVI llamado *filtro*, con el cual la señal del sensor se *limpia*, pues ella contiene ruido de alta frecuencia que impide alcanzar un valor estable para la salida del sistema (figura 1).

El filtro equivale a la digitalización de un sistema de primer orden, con ganancia unitaria y constante de tiempo fija, definida en función del desempeño del mismo. La ecuación de diferencias de este filtro está escrita en (2); en ella r es la entrada, y la salida y T es 0,05s.

$$y(k+1) = r(k) \frac{\Delta T}{\tau} + y(k) \left(1 - \frac{\Delta T}{\tau} \right) \quad (2)$$

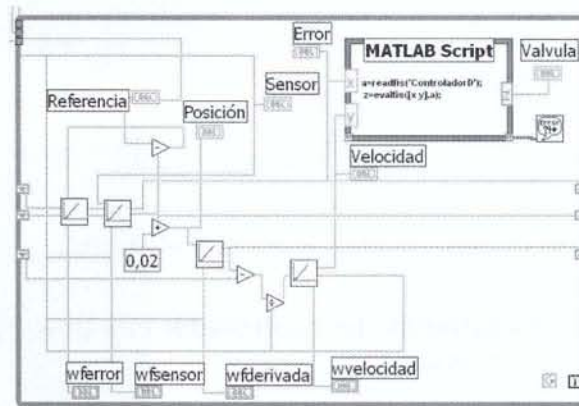


Figura 1. Acondicionamiento de señales en *Lab View*

En la segunda parte del instrumento virtual se enlaza la versión 5.3 de *Matlab* y la 6 de *Lab View*, mediante la herramienta denominada *Script*; esta última ejecuta las instrucciones de *Matlab*, desde el entorno *Lab View*. En su estructura, el *script* está compuesto por un marco con terminales de entrada y salida tipo escalar o vector, mediante los cuales se alimentan las instrucciones de *Matlab* (figura 2). Como resultado, en el terminal de salida del marco se lee el voltaje de la válvula correspondiente al error y velocidad actuales.

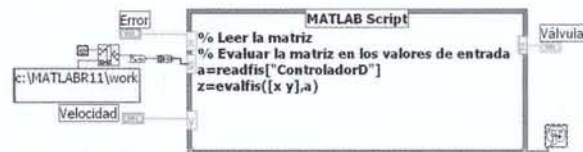


Figura 2. *Script*. Código para enlazar Matlab con *Lab View*

En la tercera parte del instrumento virtual se configura la tarjeta PCI6711; ésta dispone de dos DAC de 12 bits y salidas entre -10 y 10 V; asimismo, se utiliza la tarjeta PCI6023E que cuenta con un convertor ADC de 12 bits y ocho canales de entrada, configurables entre -10 y 10 V. En la figura 3 se muestra un aparte del instrumento virtual con la configuración de las tarjetas [20].

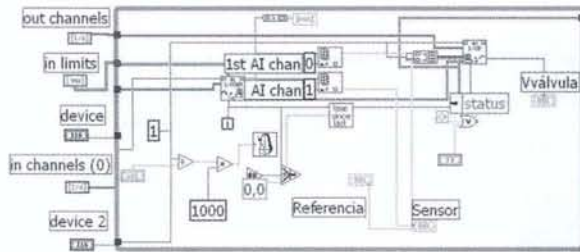


Figura 3. Configuración de las tarjetas de adquisición

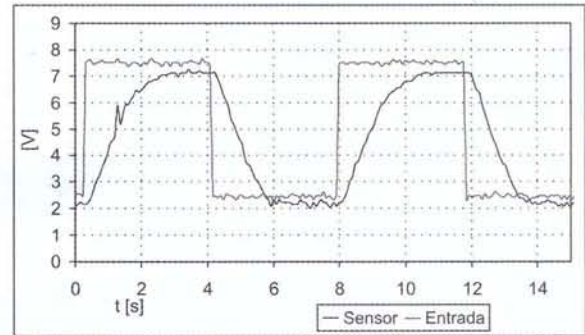
5. Resultados del controlador con dos conjuntos

En este punto de desarrollo del proyecto ya se simuló la planta, se sintonizó el controlador en *Matlab*, se realizó la interfaz *Matlab-Lab View* y se configuraron las tarjetas de adquisición de datos. Ahora se realizan las pruebas en lazo cerrado. En primera instancia se conectaron las tarjetas PCI, con una referencia entre 0 y 10 V. Por conveniencia, se utiliza una señal cuadrada que simula las transiciones más difíciles que experimentará el sistema.

Una vez conectados los componentes del sistema se trabaja con el controlador y se busca que éste regule la posición del cilindro. Este proceso, conocido como implementación, finaliza cuando se encuentran las mejores definiciones de las funciones de membresía, de tal forma que la curva de respuesta cumpla con los criterios asignados desde el comienzo del diseño.

Las pruebas se realizaron con voltajes de entrada diferentes, también conocidos como valores de referencia, cuyo propósito es representar una posición deseada; en la gráfica 3 se visualiza la señal de entrada con un voltaje aproximado de 7,8 V, equivalente

a una posición de 0,156 m, dado que la ganancia del sensor es 50. Se observa que el cilindro sigue la entrada en un tiempo aproximado de 2,5 seg., aunque no alcanza el punto de consigna, es decir, se produce un error de estado estacionario.

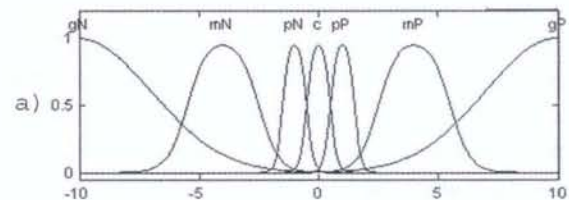


Gráfica 3. Resultado de la implementación del controlador

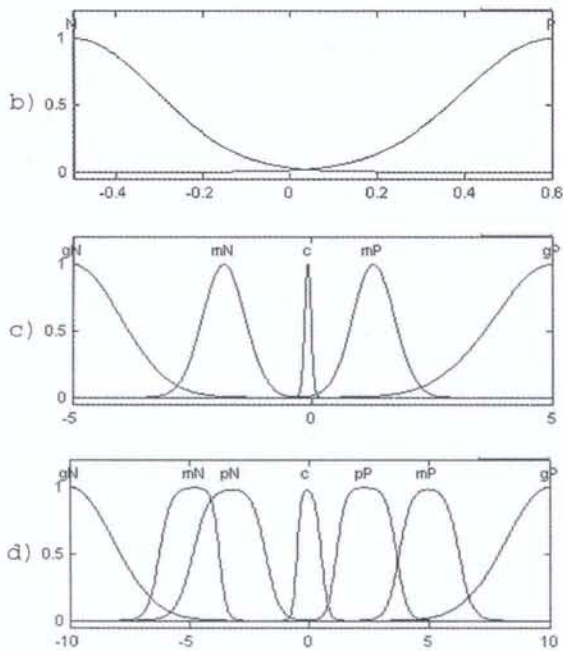
Para eliminar el error de estado estacionario es necesario incluir una nueva variable, que estaría definida por la acumulación del error [21], como se explica a continuación.

6. Controlador con tres variables de entrada

La variable de entrada nueva es la integral del error y fue denominada *acumulación*. Su universo está entre -5 y 5, de acuerdo con el comportamiento experimental de la planta. Las funciones de membresía asociadas son la acumulación grande negativa (gN), mediana negativa (mN), pequeña (c), mediana positiva (mP) y grande positiva (gP). Todas ellas son de forma *sigmoide*, como se presenta en la gráfica 4, en la que además se aprecia la definición final de las demás variables.



(continúa)



Gráfica 4. Funciones de membresía. a) Del error, b) de la velocidad de cambio del error, c) de la acumulación del error, y d) del voltaje de la válvula.

El objetivo de la definición de las reglas es eliminar el error de estado estacionario. Para ello, existen dos formas de afrontar el problema: en la primera, se hacen correcciones sólo cuando el cilindro está cerca del estado estacionario; en ese momento se incrementa o disminuye el voltaje para que el cilindro supere la banda muerta y alcance la referencia. La segunda forma consiste en adicionar el voltaje antes de que el cilindro llegue a velocidades bajas, para tener la inercia necesaria para llegar al punto deseado.

Con la primera solución no fue posible corregir el efecto de la banda muerta, pues el cilindro comienza a oscilar alrededor de la referencia. A continuación, se presentan las reglas para la solución seleccionada.

- Si (Error es gN), entonces (Válvula es gN).
- Si (Error es gP), entonces (Válvula es gP).
- Si (Error es mN), entonces (Válvula es mN).
- Si (Error es mP), entonces (Válvula es mP).

- Si (Error es pP) y (Velocidad es no P), entonces (Válvula es pP).
- Si (Error es pN) y (Velocidad es no N), entonces (Válvula es pN).
- Si (Error es c) y (Acumulación es c), entonces (Válvula es c).
- Si (Velocidad es P) y (Acumulación es gP), entonces (Válvula es mP).
- Si (Velocidad es P) y (Acumulación es mP), entonces (Válvula es pP).
- Si (Velocidad es N) y (Acumulación es mN), entonces (Válvula es pN).
- Si (Velocidad es N) y (Acumulación es gN), entonces (Válvula es mN).

Luego de establecer las reglas se realizaron simulaciones en *Matlab* (el diagrama 5 y gráfica 5); de esta manera, se ajustan los conjuntos hasta conseguir una respuesta adecuada. A la acumulación del error, que es una integral, se adiciona una señal que la lleva a cero cuando la referencia cambia, con el propósito de que la integral no se sature.

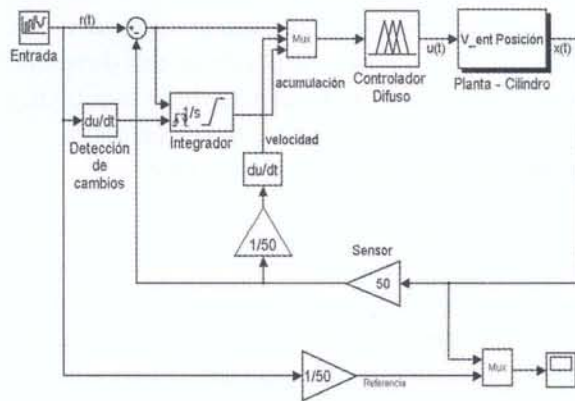
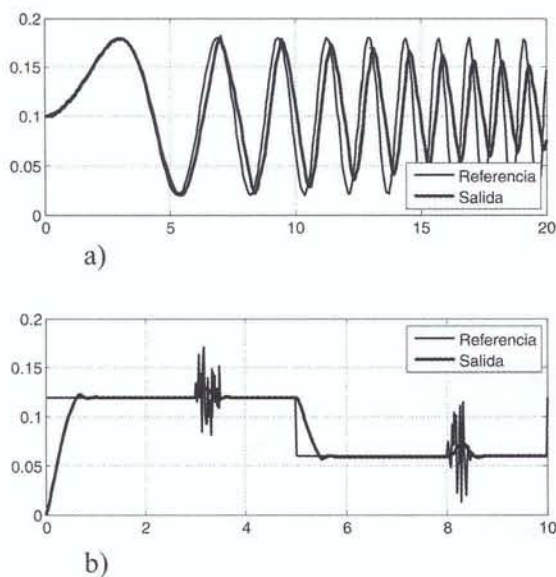


Diagrama 5. Sistema final. Modelo en Simulink



Gráfica 5. Sistema final. a) Respuesta ante cambios en frecuencia, b) Respuesta a un escalón y disturbios.

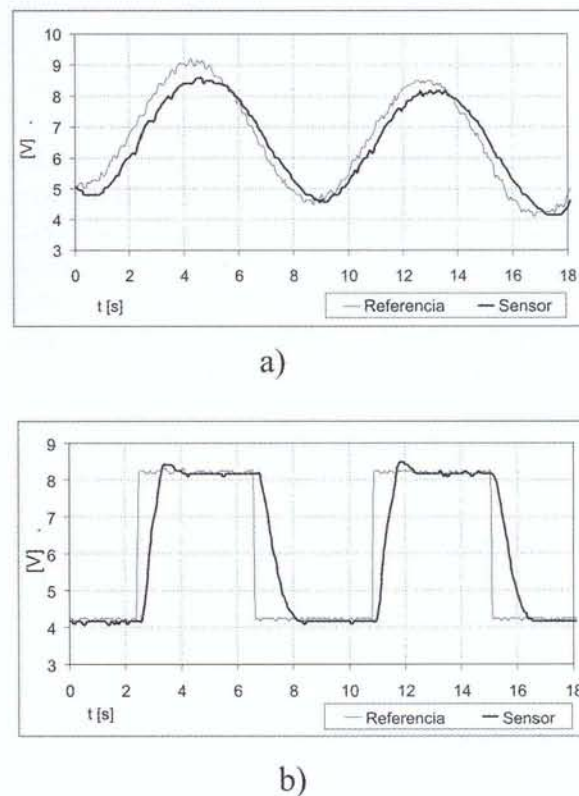
La gráfica 5a) presenta la respuesta del sistema ante cambios en la frecuencia de una señal sinusoidal, que comienzan en 0,01 Hz y finalizan en 1 Hz; se observa que el cilindro no alcanza a hacer un seguimiento adecuado cuando la señal llega a 1 Hz. En la gráfica 5b) se muestra el seguimiento del cilindro a un escalón. También se muestra la forma en que el sistema en lazo cerrado responde ante un disturbio; esto se simuló aplicando tal disturbio a la entrada y en la salida del controlador y del comparador, con excelentes resultados en los tres casos.

La implementación de la variable nueva conllevó algunos cambios y adiciones a los programas ya desarrollados en *Lab View*. Por ejemplo, se incluyó la integral, cuidando que ella comience en cero cuando el programa inicie o cuando la referencia cambie, y que tenga límites de acumulación. El detector del cambio de la referencia es una derivada discreta; sin embargo, ya en el laboratorio se observó que sólo debía limpiar el integrador cuando la referencia cambiara 0,1 V de un instante de muestreo a otro.

Finalmente, se elaboró otro sub VI, llamado *banda muerta*, con el que se reduce el efecto de la banda

de este nombre incrementando el voltaje que entrega el controlador en 0,6 V, cuando la señal es positiva, y en -0,6 V, cuando es negativa. Este rango se obtuvo a partir de pruebas con distintos valores en laboratorio, pues él depende de la construcción misma de cada cilindro.

Varios tipos de señales de referencia se utilizaron, con el fin de probar la última configuración del controlador; en la gráfica 6 a) se muestra una señal sinusoidal, con un voltaje entre 5 y 9 V, y en la 6 b), entre 4 y 8 V. Se observa que, con respecto a los presentados en la gráfica 3, los tiempos de respuesta mejoraron y el error de estado estacionario desapareció. El tiempo de estabilización t_s es 1,7 s, el tiempo de elevación t_r 1 s, y el sobrepico no supera el 5%, aunque aún el comportamiento de avance y retroceso del cilindro es diferente.



Gráfica 6. Sistema controlado. a) Señal de referencia sinusoidal, b) cuadrada.

Con el propósito de evaluar la efectividad del controlador difuso se implementó un PID digital. Como resultado los tiempos de respuesta y estabilización mejoraron un segundo en cada caso. Esta comparación se hizo utilizando el algoritmo discreto PID en [2], con el que además es posible lograr respuestas ante escalón sin sobrepico.

7. Conclusiones

El controlador difuso con entradas error, variación del error y acumulación del error, y salida voltaje de la válvula, mejora los tiempos de respuesta del sistema, en relación con los obtenidos con un controlador PID discreto; ello indica que su aplicación es recomendable. Sin embargo, el trabajo de sintonización es más complejo; en lugar de tratar con tres ganancias (K_p , K_r , K_d), como ocurre en el caso PID, deben definirse adecuadamente veintiuna funciones de membresía y once reglas que las combinan, lo que es más difícil. Asimismo, el comportamiento del sistema es muy sensible ante cambios en la definición de las funciones de membresía o de las reglas.

El modelado de una planta basado sólo en experimentación hace necesario realizar muchas pruebas; la claridad total acerca de cada uno de los fenómenos que suceden es necesaria para poder parametrizarlos en forma adecuada. No obstante, casi siempre es más complejo realizar el modelo

matemático [2], dado que los sistemas hidráulicos presentan alinealidades fuertes [14], como la diferencia entre el área de retroceso y avance y la banda muerta, entre otras.

Cuando los universos de entrada y salida están definidos, el diseño del controlador empleando *Matlab* facilita la consecución de las funciones de membresía; este programa permite cambiar el tipo de función (trapezoidal, triangular, sigmoidea) y el método (Mamdani o Sugeno), de acuerdo con las necesidades. Por tanto, para diseños similares se recomienda emplear el *Toolbox* de control difuso, aunque también sea conveniente explorar otras herramientas de programación, por ejemplo el *Toolbox* de control difuso de *Lab View* [11].

Aplicaciones futuras deben explorar una alternativa para que el controlador difuso elimine el sobrepico de la respuesta. Asimismo, con el fin de disminuir la complejidad del controlador debe procurarse la reducción del número de funciones de membresía y de reglas.

La aplicación propuesta deberá explorarse en la etapa de mecanizado, pues hasta el momento sólo se ha trabajado en vacío. Trabajos futuros también deberán tener en cuenta el efecto del cambio de presión y de carga sobre la dinámica del cilindro, y profundizar en el análisis de estabilidad; esto último es desarrollado con alto grado de suficiencia en [22].

Referencias bibliográficas

- [1] Rairán D. (2003). *Levitación magnética. Alternativa para el transporte de pasajeros*. Fondo de Publicaciones Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C.
- [2] _____ y Martínez M. (2001). "Control de posición de un sistema hidráulico mediante un controlador PID digital". *Tecnura* (9), II semestre, pp. 28-36.
- [3] _____ y Millán F. (2002). "Levitación magnética de una esfera, utilizando un compensador PID digital y etapa de potencia PWM". *Tecnura* (10), I semestre.
- [4] Lower M., Szlachetko B., and Krol D. (2005). "Fuzzy Flight Control System for Helicopter Intelligence in Hover". *ISDA, 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'05)*, pp. 370-374.
- [5] Streifel R., Marks R., Reed Russell, Choi J. and Healy M. (June 1999). "Dynamic Fuzzy Control of Genetic Algorithm Parameter Coding". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part b: cybernetics*, Vol. 29 (3), pp. 426-433.
- [6] Babuska R., and Molloy S. (2005). *Fuzzy Control of Multivariable Processes*. Delft Center for Systems and Control, Research Report, Netherlands, pp. 23-24.

- [7] Brdy's M. and Littler J. (2002). "Fuzzy Logic Gain Scheduling for Non-Linear Servo Tracking. *Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 12 (2), pp. 209-219.
- [8] Chou F. (December 2000). "Online Transient Behavior Prediction in Nuclear Power Plants". *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 14 (10), pp. 967-1001.
- [9] Pinsopon U., Hwang T., Cetinkunt I.S., Ingram R., Zhang Q., Cobo M., Koehler D., y Ottman R. (1999). "Hydraulic Actuator Control with Open Centre Electro-hydraulic Valve Using a Cerebellar Model Articulation Controller Neural Network Algorithm". *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 213, part I, pp. 33-48.
- [10] Miroslav M., Vlastimir N. and Dragan A. (2002). "Position Control of an Electro-Hydraulic Servo System Using Sliding Model Control Enhanced by Fuzzy PI Controller". *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering*, Vol. 1 (9), pp. 1217-1230.
- [11] Moreno H., and De las Heras S. (2000). *Control of a Pneumatic Servosystem Using Fuzzy Logic*. Proc. of 1st FPNI-PhD Symp. Hamburg, Germany, pp. 189-201.
- [12] Poley R. (2005). *DSP Control of Electro-Hydraulic Servo Actuators*, Application Report SPRAA76-January, DSP Field Applications. Texas Instruments, pp. 1-25.
- [13] Zhang Q. Meinhold D. and Krone J. (1999). "Valve Transform Fuzzy Tuning Algorithm for Open-centre Electro-hydraulic". *Journal of Agricultural Engineering Research*, pp. 331- 339.
- [14] Zimmermann A., y D Scholz. (1995). *Hidráulica en bucle cerrado, nivel básico – Libro de trabajo TP-511*. Sección B, Festo Italia.
- [15] Chevríe F., y Guély F. (2002). *La lógica difusa*. Cuaderno Técnico nº 191 Biblioteca Técnica, Schneider Electric España, S.A., pp. 1-32.
- [16] Dimiter D., Hallendoor H., and Reinfrank M. (1993) *An introduction to Fuzzy Control*. Ed. Springer [Verlag].
- [17] Mendel J. (March 1995). "Fuzzy Logic System for Engineering: A Tutorial". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83 (3), pp. 345-377.
- [18] Von Altrock C. (1995). *Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Applications Explained*. Ed. Prentice-Hall.
- [19] Del Brio B., Sánz A. (2002). *Redes neuronales y sistemas difusos*. Ed. Alfaomega, México.
- [20] Lazaro A. (2001). *Lab View 6i*. Ed. Paraninfo, España.
- [21] Franklin G., Powell D., y Abbas E.N. (1991). *Control de sistemas dinámicos con retroalimentación*. Ed. Adisson Wesley Iberoamericana, Estados Unidos.
- [22] Precup R.E., and Preitl S. (2006). "Stability and Sensivity Analysis of Fuzzy Control Systemas. *Machatronics Applications*". *Journal of Applied Sciences at Budapest Tech*, Vol. 3 (1), pp. 61-76.