

Aplicación de un Sistema Robusto al Control de Posición de un Cilindro Neumático, expuesto a perturbaciones.

Camilo Leonardo. Sandoval Rodríguez*, Rodrigo. Meza Pedrozo**

*Universidad Antonio Nariño, camisandoval@uan.edu.co **, rodrigomez7@yahoo.com

Resumen — En las aplicaciones industriales los procesos son bastante complejos, con presencia de retardos, sometidos a perturbaciones y marcadamente no lineales como ocurre en los sistemas neumáticos. Si bien los controladores convencionales pueden ajustarse para corregir este tipo de cambios, los transitorios presentes derivados de las perturbaciones pueden ser en extremo desfavorables para los actuadores involucrados en el sistema. Por tanto, se planteó una técnica de control avanzado (Robusto) y se aplicó al modelo matemático de un sistema de control de posición de un cilindro neumático expuesto a perturbaciones, con el fin de verificar numéricamente el desempeño del controlador. En este artículo se reportan los resultados obtenidos al aplicar al sistema un controlador robusto, tras realizar el análisis de la respuesta al escalón, en estado transitorio y estable, antes y después de incluir el controlador. Para tal fin, se realizaron 6 pruebas con 6 controladores usando la técnica H infinito (H^∞), con dichos resultados se pudo evidenciar la mejora de las características dinámicas del sistema.

Palabras clave — Control robusto, sistemas neumáticos, perturbaciones, H infinito.

Abstract — In industrial applications, the processes are very complex, with delays, disturbances and non-linear behavior, as this is the case for pneumatic systems. Though the conventional controllers can be adjusted to correct these changes, the transients from the disturbances can be extremely unfavorable for the actuators involved in the system. This is the reason why an advanced control technique (Robust) has been proposed and applied to the mathematical model of a position control system of a pneumatic cylinder exposed to disturbances, in order to verify numerically the controller's performance. This paper shows the results obtained by applying the robust control system, after performing the analysis of step response in transient and steady state, before and after including the controller. For this, six tests were conducted with six controllers by using the technique H-infinity (H^∞), and the results showed that the dynamic conditions in the system were enhanced.

Keywords — Robust control, pneumatic systems, disturbances, H-infinity

I. INTRODUCCIÓN

En el control de procesos en la industria, los diseñadores e ingenieros de procesos, saben que las perturbaciones están presentes en todo sistema de control; afectando los resultados negativamente, desestabilizando una o más variables y dependiendo del control aplicado se afecta el tiempo de estabilización. Estas perturbaciones se pueden encontrar en la entrada o salida del proceso magnificando aún más sus efectos.

Por otro lado, en este siglo, con la tecnología cambiando cada día y las necesidades actuales de la industria, han quedado en el pasado las teorías simples de control lineal y sin disturbios. Ahora se introducen conceptos relacionados

con control avanzado, para limitar los efectos negativos de la no linealidad y las perturbaciones. En este sentido, al usar software de última generación y con la ayuda de cálculos matemáticos, se puede obtener un control casi insensible a las perturbaciones [1] (variables y perturbaciones son la clave en un proceso de control automático).

Teniendo en cuenta lo anterior, en el actual documento se determinan características y criterios de desempeño de controladores robustos, usando la técnica H^∞ , dentro de un sistema no lineal y expuesto a perturbaciones (cilindro neumático y válvula de accionamiento proporcional). De igual forma se establece una metodología para la aplicación de la técnica de control Robusto H^∞ , usando como punto de partida el análisis de las perturbaciones típicas de sistemas neumáticos, a partir del estudio de la rigidez neumática para vehículos propuesta en [2]. Así mismo, es importante aclarar que la verificación del desempeño de los controladores robustos, obtenidos a partir de la aplicación de H^∞ en este trabajo, se realizó por simulación, introduciendo a Matlab el modelo matemático del sistema completo que ha sido linealizado y validado por [3].

II. MATERIALES

Como se mencionó anteriormente, la aplicación del control robusto propuesto en este artículo, se realizó usando Matlab, a partir de la inclusión del modelo matemático del sistema neumático total, constituido por un cilindro y una válvula de accionamiento proporcional, que corresponde a la función de transferencia del sistema total. No obstante, en esta sección se muestra una breve descripción del sistema real y la descripción del esquema utilizado para la identificación paramétrica, propuesta y validada por [3].

A. Sistema Neumático

El sistema neumático estudiado, está constituido por un cilindro al cual se le quiere realizar el control de posición y una válvula de accionamiento proporcional, que se encarga de regular el aire proveniente del compresor para controlar la posición. Adicionalmente el sistema cuenta con otro cilindro, quien se encarga de generar la perturbación, el esquema del sistema completo se puede ver en la Fig 1.

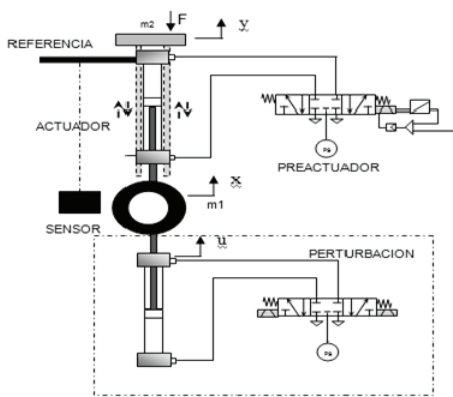


Fig. 1: Esquema del sistema completo para el estudio. Fuente [3]

Como se ve en la Fig. 1, la referencia para la medida del desplazamiento se encuentra en la parte superior del sistema, de tal forma que el sensor óptico capta la distancia que ha recorrido el cilindro conforme este se acerca al sensor. El modelo real que se implementó en [3], para emular el funcionamiento de un control de un cilindro neumático se observa en la Fig. 2. Los componentes del módulo son en su mayoría accionados por aire comprimido (neumática), los otros son componentes que sirven de interface hombre maquina (tarjetas de adquisición de datos, sensor óptico).

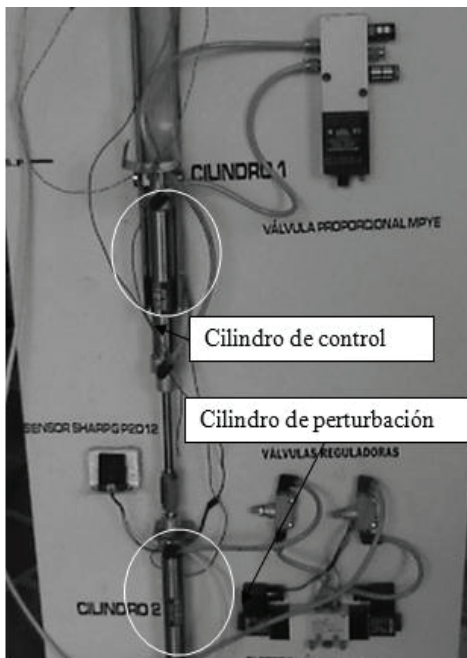


Fig. 2: Módulo para el control. Fuente [3]

Además de los elementos anteriormente mencionados, en la Fig. 2 se ven algunos elementos adicionales que complementan el funcionamiento del módulo. Para un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema completo, en la tabla 1 se relacionan los componentes y las funciones que cumplen cada uno dentro del módulo según [3].

TABLA I

RELACIÓN DE ELEMENTOS USADOS EN EL MÓDULO

Nombre del elemento	Descripción	función
Cilindros de doble efecto	Marca AIRTAC, referencia AMI25125, el embolo tiene 25 mm diámetro y 125 mm de carrera.	Cilindro 1: de Control Cilindro 2: de perturbación
Válvulas reguladoras de Caudal	Manufacturadas por AS 2000, presión máxima de 10 Bar, cuerpo inoxidable.	Suavizar la respuesta del cilindro que actúa como perturbación.
Válvula electro-neumática Proporcional.	Marca FESTO, 5/3 vías. 1/8 de diámetro, tensión de alimentación 24 [V] DC, presión máxima : 10 [bar]	Regular el paso de aire para controlar la posición del cilindro de control.
Sensor óptico compacto	Marca SHARP GP2D12 (óptico) de distancias, usa tecnología infrarroja.	Medir el desplazamiento del cilindro respecto a la referencia.
Tarjeta de adquisición de datos:	Referencia NI USB 6008, ocho canales de entrada analógica, resolución de 12 bits, salidas analógicas rango de voltaje de 0 a 5 [V DC], 12 líneas digitales una resolución de 32 bits.	Comunicar tanto la señal del sensor como la señal de control que va a la electroválvula, con el PC, donde se efectúan los ajustes para el control.

B. Modelo matemático del sistema completo

El modelo matemático del sistema completo, en este caso, según [3] se obtuvo usando identificación paramétrica bajo la técnica de aproximación de coeficientes autoregresivos por promediado móvil.

Para obtener el modelo del sistema entonces en [3] se recurrió a la técnica de identificación experimental planteada por [4], quien identifica el sistema en lazo abierto (Fig. 2) con una señal pseudoaleatoria binaria o por sus siglas en inglés PRBS (Pseudo Random Binary Signal) de diferentes amplitudes [4]. La particularidad de esta señal es que tiene una amplia variedad de frecuencias que son esenciales para el proceso de identificación.

Para tener una metodología de identificación se debe seguir un orden o tener referenciado ciertos pasos para el mismo, los que se siguieron son: toma de datos, procesado y análisis de datos, selección del modelo y validación [5].

En la toma de datos se debe tener primero un valor de entrada conocido. La válvula proporcional es excitada con una señal PRBS con tiempos de muestreo de 10 ms, 80 ms, 100 ms, 166ms y 500ms, entre otros. Lo anterior para alcanzar diferentes velocidades de recorrido del cilindro, estos vectores son guardados por Matlab y luego se importan para evaluar la identificación. La amplitud es limitada para evitar la saturación del actuador, por tal motivo en [3] se emplearon amplitudes entre 4.4 y 5.6 voltios para asegurar que la válvula arroje una respuesta moderada y de esta manera obtener una mejor captación de la señal por el sensor.

Es necesario aclarar que la válvula proporcional administra una salida de voltaje en un rango de 0 a 10 voltios, pero debido a que la tarjeta de adquisición de datos utilizada maneja por el puerto análogo solo tensiones de 0 a 5 voltios, en [3] se implementó un amplificador operacional de ganancia 2 para así poder usar todo el rango de operación de la válvula. Por consiguiente, cuando la válvula está recibiendo 4.4 ó 5.6 voltios, de la tarjeta de adquisición de datos se están enviando realmente 2.2 ó 2.8 voltios respectivamente.

El vector de entrada para la identificación del sistema es la señal PRBS, para remover la media en [3] se consideró que el valor cero para la entrada es 2.5 voltios ya que este es el valor que se debe enviar de la tarjeta USB hacia la válvula proporcional para que esta asuma su posición media neumática. Por tal razón antes de ingresar los datos al identificador de sistemas de Matlab, en [3] se indica una resta de 2.5V al vector entrada; así mismo al vector salida que corresponde a la posición del cilindro, se sustrajo el valor de 20 cm puesto que esta es la distancia mínima a la que la referencia estará del sensor y por lo tanto se consideró como el cero. Los vectores de entrada y salida con los que se encontró el mejor modelo a través de la identificación se presentan en la Fig. 3, donde la señal ubicada en la parte superior es la salida (posición medida por el sensor óptico) y la inferior es la entrada. Con dichos vectores, y mediante la aproximación de Padé, en [3] se obtuvo la función de transferencia que se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{7.015 e^{-0.15s} + 1.279 e^{-0.13s} + 427.25 + 103.3}{s^4 + 17.745s^3 + 84.015s^2 + 48.655} \quad (1)$$

Relación salida/entrada de la función de transferencia.

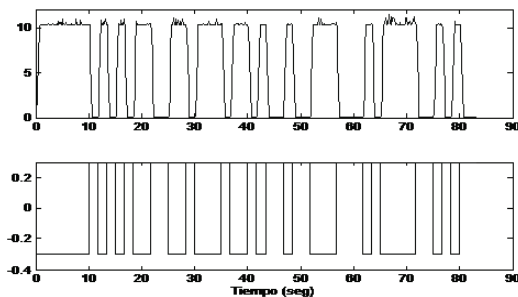


Fig. 3: Señales de entrada y salida para la identificación.

Es importante tener en cuenta que la aproximación del modelo encontrado es de 76,48 %, por tal motivo se puede inferir la necesidad de aplicar una técnica de control robusto para mitigar el impacto de la incertidumbre en el modelo según se propone en [6]. Así mismo, la presencia de perturbaciones, es un factor a tener en cuenta en el desempeño del sistema.

En la siguiente sección se muestra la definición de los procedimientos aplicados para el diseño del controlador robusto, usando la técnica H^∞ . También se muestra las características dinámicas de las perturbaciones típicas para este tipo de sistemas que han sido propuestas en [2].

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR ROBUSTO USANDO LA TÉCNICA H^∞

Para el diseño del controlador robusto, basado en la técnica de H^∞ , es importante tener idea de la dinámica de las perturbaciones, desde el punto de vista de la respuesta en frecuencia [7]. Así mismo se debe tener como cierto la

posibilidad de incertidumbre en el modelo de la planta, también se debe tener una idea de la dinámica del ruido ocasionado por los sensores.

En esta sección se describen las perturbaciones típicas del sistema de estudio. Así mismo se obtiene la respuesta al escalón unitario, del modelo de la planta (ecuación 1) con el fin de describir las características del sistema en su transitorio. De igual forma se plantea el algoritmo usado para el cálculo del regulador empleando la técnica de diseño H^∞ , para controladores robustos.

A. Perturbaciones

Para la evaluación de perturbaciones típicas en el sistema de estudio, se pueden tomar como base, las presentes en sistemas de suspensión activa, ya que se basan en el mismo principio de funcionamiento.

En [2], se muestra una comparación en la respuesta de los desplazamientos de suspensiones neumáticas, al aplicarse diferentes rangos de frecuencias como perturbaciones a las suspensiones (neumáticas) instaladas en un vehículo. En el estudio realizado por [2], se propusieron figuras de merito, para establecer la incidencia en la suspensión respecto a la frecuencia de las perturbaciones aplicadas al sistema. Las variables propuestas fueron: la fuerza ejercida por el cilindro para reponerse a la perturbación, el calor transferido al mecanismo por acción de la liberación de energía por aumento en la presión del aire al ocurrir la perturbación y el aumento de la temperatura. Como conclusión [2] demuestra que las perturbaciones de baja frecuencia (0 y 10Hz) provocan efectos mayores en estas variables. Esta condición es importante, puesto que es requerida para el diseño del controlador robusto.

B. Respuesta al escalón unitario del sistema en estudio (modelo descrito por la ecuación 1)

La planta descrita por la ecuación 1, fue analizada en la herramienta sisotool de Matlab mostrando las características evidenciadas en la Fig. 4.

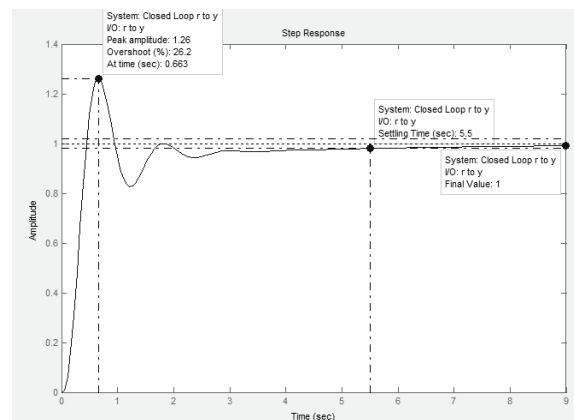


Fig. 4: Respuesta al escalón unitario del sistema en lazo cerrado.

En la Fig. 4 se pueda verificar el sobrepaso máximo de 26,6%, un tiempo de asentamiento 5,5s y un error en estado estable de 0%. Es importante aclarar que en este caso el error en estado estable es 0%, dado que la grafica corresponde a la respuesta en lazo cerrado, es decir, para el error en estado estable, fue suficiente con aplicar realimentación para que fuera corregido. No obstante, al incluir el controlador, si fuese convencional podría empeorar la condición de estado estable [1].

C. Algoritmo para el diseño del controlador robusto usando la técnica H^∞

Existen diversos métodos para la obtención de controladores robustos, entre los más usados se pueden destacar: Diseño de controladores óptimos y subóptimos H^∞ , solucionando la ecuación algebraica de RICCATI, diseño de controlador a partir de desigualdades lineales matriciales (LMI) [8].

El método H^∞ está relacionado con la minimización del valor de pico de la respuesta en frecuencia de cierta función en bucle cerrado. Para entender mejor supóngase que se tienen el sistema descrito por la Fig. 5. Y se define la función de sensibilidad como: $S = \frac{1}{1+K*G}$, el objetivo es entonces encontrar una función de transferencia K (controlador) que minimice S, atenuando el efecto de las perturbaciones (d_i y d_o) y el ruido de los sensores (n)

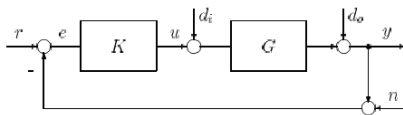


Fig. 5: Diagrama de bloques del sistema junto con el controlador. Fuente [6]

El cálculo del controlador se realiza entonces a través de una aplicación de Matlab que usa el método de diseño óptimo continuo de controladores H^∞ , resolviendo fórmulas de Doyle, esto facilita el proceso de cálculo. Para definir los procedimientos involucrados en el diseño, se debe tener en cuenta el diagrama de bloques del sistema con el controlador mostrado en la Fig. 6.

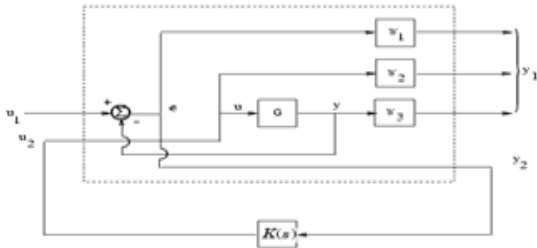


Fig. 6: Diagrama de bloques del sistema junto con el controlador para el diseño. Fuente [6]

Para el diseño por H^∞ , se debe primero describir la planta en matrices de estado. Seguidamente se debe obtener la planta aumentada P, que se muestra en la Fig. 7.

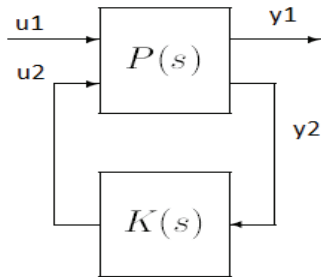


Fig. 7: Diagrama de bloques del sistema reducido. Fuente [6]

Para obtener el sistema simplificado de la Fig. 7 debe obtenerse la planta P, que se denomina la planta aumentada (línea punteada en Fig.6). Ésta incluye la función de transferencia de la planta estudiada (G en Fig. 6) y las funciones de transferencia W1, W2 y W3. Es importante tener en cuenta que las funciones W1, W2 y W3 son pesos asignados por el diseñador, de acuerdo al conocimiento que el diseñador posea de las perturbaciones incertidumbre en el modelo y dinámica del ruido en los sensores, respectivamente. Una vez obtenida la planta aumentada usando Matlab se obtiene la función de transferencia del controlador que minimiza la función de sensibilidad. Si el controlador encontrado no cumple con el desempeño deseado, deben modificarse tanto W1 como W2 y W3. Este proceso se repite hasta lograr un salida que se adecue a las especificaciones del sistema estudiado [2], [8]. El algoritmo presentado en esta sección, puede entonces resumirse en el flujo grama de la Fig. 8

IV. RESULTADOS

La selección de las funciones de transferencia W1, W2 y W3, se hizo teniendo en cuenta las frecuencias de mayor incidencia en el sistema neumático (ver sección de perturbaciones) adicionalmente como las frecuencias de incertidumbre en el modelo se encuentran entre 1 y 10Hz, se escogió W2 como un filtro pasabajas con frecuencia de corte en 10Hz. Y W1 con una frecuencia de corte menor a 10Hz. Con estos datos se calculó el controlador usando Matlab, el cual se describe en la ecuación 2.

$$\frac{6379s^5 + 1.197e5s^4 + 5.778e5s^3 + 3.836e5s^2 + 2.691e5s + 3.038e5}{s^6 + 6422s^5 + 1.437e5s^4 + 1.129e6s^3 + 1.267e6s^2 + 2.747e5s + 26112} \quad (2)$$

Relación salida/entrada de la función de transferencia del controlador.

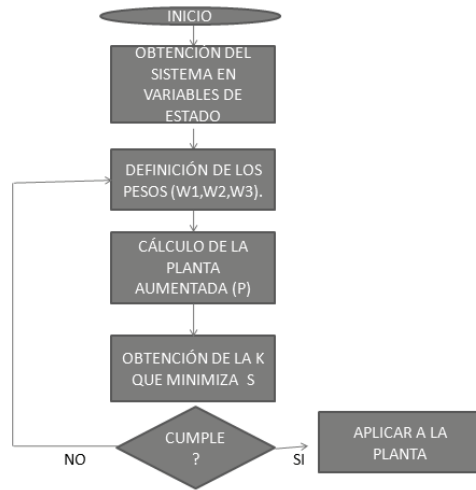


Fig. 8: Diagrama de flujo, para el algoritmo de diseño de controlador H^∞ usando Matlab.

Las respuestas en frecuencia se pueden apreciar en los diagramas de bode mostrados en la s Fig. 9 y 10, para W1 y W2 respectivamente.

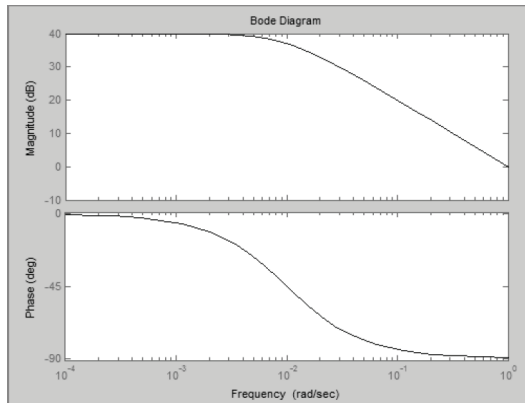


Fig. 9: Diagrama de Bode para W1

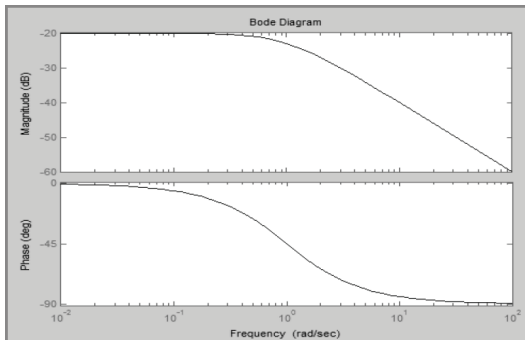


Fig. 10: Diagrama de Bode para W2

Al aplicar el controlador calculado, se obtuvo la respuesta al escalón unitario que se muestra en la Fig. 11.

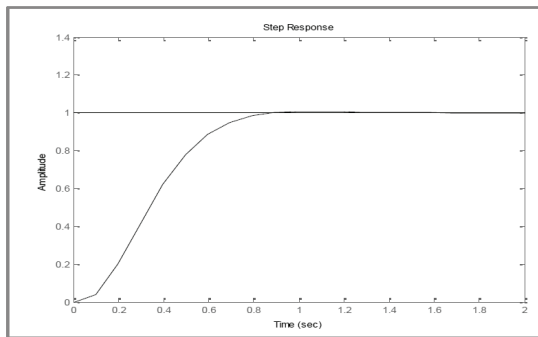


Fig. 11: Respuesta del sistema Completo (planta y controlador).

Al evaluar las características de desempeño para el sistema completo en lazo cerrado (planta y controlador) se obtiene un sobrepaso máximo de 0.699% y un tiempo de asentamiento de 0.781s con un error en estado estable de 0%. Es importante destacar que para obtenerse este controlador se hicieron 6 iteraciones (cambiando los valores de los pesos (W1,W2 y W3), aunque no se han incluido en el presente artículo.

V. CONCLUSIONES

En el documento presente se ha planteado la técnica de control H^∞ , como una alternativa para disminuir el efecto de las perturbaciones y mejorar el desempeño del control de posición de un cilindro neumático, en su estado transitorio y permanente. Aunque no existe una técnica estándar para la selección de los pesos (W1,W2 y W3), es importante tener en cuenta que el conocimiento a priori de las posibles perturbaciones y dinámica de la incertidumbre en el modelo de la planta y ruido de los sensores, facilita el cálculo del compensador. Así mismo al no conocerse la dinámica del ruido proveniente de los sensores, se puede asumir una dinámica nula con el fin de tener un punto de partida para el diseño iterativo usando la técnica H^∞ .

Para finalizar se comprobó que los sistemas de control avanzado son eficientes, los resultados de la aplicación de ésta técnica de control dependen del diseño de la planta y se deben tener en cuenta las características dinámicas del sistema-planta, así mismo de los actuadores empleados.

VI. TRABAJOS FUTUROS

Realizar estudios comparativos entre técnicas avanzadas de control (lógica difusa vs robusto, neuronal vs robusto, óptimo vs neuronal.), aplicado al sistema de cilindro neumático y establecer con los resultados obtenidos de este trabajo, el sistema con mejor comportamiento e invariabilidad frente a perturbaciones.

REFERENCIAS

- [1] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid: Editorial Prentice Hall, 2003.
- [2] A. M., Guijón, "Estudio de la Rigidez Neumática de Suspensiones para Vehículos". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. España, página 30. 2006.
- [3] L. F. Vega, N. Tarazona, "Estudio Comparativo de un Sistema de Control Clásico respecto a un sistema de control difuso, aplicado a un cilindro neumático expuesto a perturbaciones", Tesis para Ingeniería Electromecánica Universidad Antonio Nariño, Bucaramanga. 2010.
- [4] A. Zorlu., C. Özsoy., y A. Kuzucu," Experimental Modeling of pneumatic system", Fac. of Mech. Eng., Istanbul Tech. Univ., Turkey , *Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference. 2003.*
- [5] S. Garrido, "Identificación y control de sistemas lineales", Phd, thesis Universidad Carlos III. pp. 16-17. 1999.
- [6] R. F. Rodríguez, *Control Adaptativo y Robusto*. Capítulo 2 página 9; Capítulo 4 página 47; Capítulo 5 página 73 y Capítulo 10 página 229. España: Editorial Pinelo, 1996.
- [7] F. Calabrese, G. Celentano, "Multi-valued robust control technique for uncertain systems", *Decision and Control, CDC 2008. 47th IEEE Conference. 2008.*
- [8] A. M. AbdelGhany, A. Bensenouci, "Robust output feedback control design using H^∞ /LMI and SA/Lead-Lag for an ANN-adaptive power system stabilizer", *Control & Automation, MED '07. Mediterranean Conference. 2007.*