

Planta robusta de levitación neumática para investigación y formación en control y visión artificial

Revista *Tekhnê*: ISSN 1692-8407. 2013, Vol. 10, No 2, 33–41

Fecha de recepción: 15 de noviembre de 2013

Fecha de aceptación: 25 de noviembre de 2013

Autores, afiliación, e-mail: 1.) Diego Bello. Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. diegobello778@yahoo.com. 2.) Leidy García. Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. kaley@hotmail.com. 3.) Fredy Hernán Martínez Sarmiento. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. fhmartinezs@udistrital.edu.co. 4.) Diego Mauricio Acero Soto. Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. dacero@pedagogica.edu.co

Resumen

Se presenta el diseño y la construcción de una planta de levitación neumática como herramienta de docencia e investigación en aplicaciones de control y visión artificial. La herramienta está orientada a mejorar la comprensión y las habilidades para el análisis y diseño de sistemas de control, así como a ser una planta robusta para evaluación de estrategias de control en investigación. En principio se espera que la planta, complemento natural del proceso de formación, permita incrementar la adquisición de conocimientos y aumentar la motivación del estudiante. El objetivo del sistema, y criterio de control, consiste en mantener suspendidas tres pelotas de ping-pong (tres variables de salida) por un flujo de aire a una altura determinada por el usuario, pero con una fuerte interrelación entre las variables internas. La realimentación de estados se realiza a través de un sistema de visión artificial. Para la prueba y evaluación de desempeño del sistema se diseñó un control basado en sistemas difusos.

Palabras clave: control, formación, levitación neumática, plataforma didáctica, visión artificial

Robust pneumatic levitation plant for research and training in control and machine vision

Abstract

In this paper the design and construction of a pneumatic levitation plant as a tool for teaching and research in control applications and computer vision is presented. The tool is aimed at improving the understanding and skills for analysis and design of control systems as well as robust plant for evaluation of control strategies in research. In principle, it is expected that the plant, natural complement of the training process, allows increasing knowledge acquisition rising student motivation. The aim of the system and control criterion is to keep suspended three ping-pong balls (three output variables) by a flow of air at a height determined by the user, but with a strong interrelationship between internal variables. The state feedback is performed through an artificial vision system. For testing and performance evaluation system based on fuzzy control system was designed.

Key words: artificial vision, control, pneumatic levitation, teaching platform, trainin

Introducción

El papel crucial que juegan los sistemas de control en la industria y en las redes de distribución de información hace que profesionales en áreas de tecnología requieran conocimientos suficientes sobre técnicas de control que sean más eficientes a la hora de resolver problemas reales (Bernstein, 1999).

Además, hay que reconocer que otras áreas, como la economía y la econometría, se han visto grandemente beneficiadas de las técnicas de análisis y diseño de sistemas dinámicos y control (Chow, 1974; Haber, 2001).

La falta de plantas de experimentación que permitan la implementación de estrategias de control para que los estudiantes en formación puedan poner a prueba diversos conocimientos sobre las técnicas aprendidas, y por tanto fomentar un aprendizaje activo de un área altamente teórica, hace que sea de gran importancia diseñar proyectos innovadores que permitan implementar y comparar diferentes estrategias de control para un mismo experimento (Sreenivasan, Levine y Rubloff, 1999). Por eso es pertinente que los centros de educación superior, que tienen como tarea la formación de docentes e ingenieros en el área de ciencia y tecnología, con el objetivo de mejorar la competitividad laboral de sus egresados, promuevan el uso y el desarrollo de experimentos que permitan investigar y poner a prueba las necesidades que se presentan en la vida cotidiana.

Nuestro grupo de investigación se encuentra actualmente desarrollando diferentes herramientas para acompañar el proceso de formación, así como fortalecer nuestros laboratorios de investigación (Martínez y Acero, 2010). Nuestra intención es conformar un entorno de aprendizaje interactivo, integrado por herramientas como hardware, software y textos guía que permitan reducir el protagonismo del aprendizaje pasivo, incrementar la participación activa y estimular un pensamiento más profundo. Todo esto, básicamente modificando el ambiente de aprendizaje (Gao y Hao, 2011; Heywood, 2005; Milentijevic y Ciric, 2007).

Esta etapa del proyecto de investigación se centra en el diseño y desarrollo de una planta robusta de levitación neumática (figura 1). Se trata de una estructura mecánica abierta, con variables de estado interrelacionadas, que permite la implementación y evaluación de diferentes estrategias y técnicas de control, con la intención de realizar comparaciones de desempeño. El objetivo de control radica en mantener tres pelotas de ping-pong, cada una confinada en su tubo cilíndrico, suspendidas por un flujo de aire a una altura determinada. La complejidad en el diseño de las estrategias de control radica en la interrelación dada a las variables del sistema, ya que la alimentación de aire es común a los tres tubos. Además, la realimentación del sistema se realiza por medio de visión artificial a través de una cámara, lo que se convierte en un problema adicional de diseño. De hecho, el complemento ideal del sistema para el desarrollo de esquemas avanzados de control sería un sistema digital embebido de alto desempeño (Esquivel, Marín y Martínez, 2012; Farfán, Martínez y Pirajan, 2011).



Figura 1. Planta de levitación neumática. Prototipo final de laboratorio.

Fuente: elaboración propia.

El documento se encuentra organizado como se describe a continuación. En la siguiente sección se presenta el planteamiento del problema bajo estudio. Se acota el problema y se proyecta su perfil a lo largo de los objetivos perseguidos y la justificación de solución. Luego se

introduce el diseño de la planta y los aspectos relativos a su construcción en laboratorio. Posteriormente se formula una primera posible estrategia de control para la planta, misma que se utiliza para evaluar al prototipo. En particular, se hace énfasis en la técnica de control seleccionada para la evaluación de desempeño y la aplicación de visión de máquina utilizada para la realimentación. A continuación se presentan los resultados alcanzados a través de la evaluación de desempeño del prototipo y las conclusiones derivadas del desarrollo.

Formulación del problema

Asuma tres tubos cilíndricos que comparten un mismo suministro de aire. Asuma la existencia de una pequeña esfera en cada uno de los tres tubos que puede desplazarse a lo largo de ellos, sin pasar a los otros tubos, por medio de la variación del flujo de aire en el sistema de tubos.

Se desea diseñar una estrategia de control para estabilizar la posición en el tubo de las tres esferas, es decir, las tres señales de control que se aplican a los reguladores de flujo de cada tubo, considerando como entradas la posición a lo largo del tiempo de cada esfera y la energía de cada esfera inferida a partir de la aceleración de los movimientos. El sistema de control debe ser capaz de lograr la estabilización a pesar de la interacción existente y desconocida entre las variables de cada tubo (flujo de aire).

La planta robusta que implementa este hardware es un sistema de levitación neumática. Su estructura está compuesta por tres módulos, cada uno de los cuales se encuentra conformado por un tubo de acrílico (metacrilato) transparente, un ventilador que eleva la pelota y un sistema de visión de máquina compuesto por una cámara que identifica la posición de la pelota dentro del tubo. Todo el diseño es transparente para el usuario (acrílico transparente, circuitos a la vista, etc.), lo que permite seguir en todo momento su funcionamiento.

El objetivo final es construir y evaluar el sistema para su posterior uso en los laboratorios del grupo de investigación.

Diseño y construcción del prototipo

Diseño estructural

La estructura mecánica de la planta cuenta con tres tubos verticales de acrílico transparente. En el interior de cada tubo se coloca una pelota de ping-pong que se puede desplazar a lo largo del tubo. Estos tubos se encuentran acoplados a una caja inferior y otra superior. La caja inferior se encuentra dividida en tres compartimientos, donde se ubica un ventilador que proporciona el flujo de aire para cada tubo. La caja superior cuenta con un escape en cada parte lateral que permite el intercambio de aire entre los tubos (figura 2).

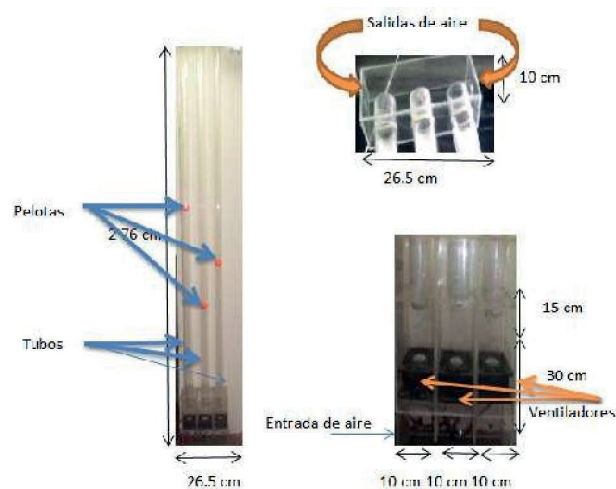


Figura 2. Diseño de la planta de levitación neumática. Estructura de 2.76 m de altura conformada por tres tubos en acrílico. Cada tubo contiene una pelota restringida al tubo, pero que se puede desplazar a lo largo de él. Los tres tubos comparten la alimentación de flujo de aire. Fuente: elaboración propia.

Construcción

La planta está conformada por tres tubos de acrílico transparente, los cuales cuentan con una longitud de 2.76 m y 4.8 cm de diámetro interno. En cada uno de los tubos se ubicó una pelota de ping-pong de 4 cm de diámetro. Los tubos se pegan a la caja inferior con cloruro de metileno. Para evitar fugas de aire se utilizó silicona fría, que le da uniformidad y firmeza estructural a los tubos.

La caja inferior de la planta está conformada por un cajón de acrílico de 45 cm de largo y 26.5 cm de ancho.

Este cajón se encuentra dividido en tres partes verticales, cada una de 30 cm de largo y 8 cm de ancho. En cada una de estas divisiones se coloca un ventilador. En la parte superior de cada división hay un orificio que conecta los tubos. A este diseño se agregó una división horizontal a 36 cm de la base con el fin de darle más soporte a cada tubo y evitar que se rompan por el peso. El cajón cuenta con un orificio en la parte inferior por el cual se realiza la alimentación de aire al sistema (figura 3).



Figura 3. Diseño de la planta de levitación neumática: caja inferior de la estructura. Se detallan los tres ventiladores y la forma en que interactúan con las pelotas de cada tubo. Fuente: elaboración propia.

La caja superior está conformada por un cajón de acrílico de 26 cm de ancho y 10 cm de largo. Esta parte va ensamblada con la parte superior de los tubos. Este cajón cuenta con un orificio en cada uno de sus lados con el fin de darle salida al aire que viene de los tubos. Además, tiene tres huecos para acoplar la parte superior de cada uno de los tubos. Para darle más estabilidad a la estructura se permitió la entrada de 7 cm de cada uno de los tubos a la caja (figura 4).



Figura 4. Diseño de la planta de levitación neumática: caja superior de la estructura. Se detalla la conexión de los tres tubos. Fuente: elaboración propia.

Se utilizaron tres ventiladores de 12 Vdc de 8 x 8 cm, cada uno con una potencia nominal de 6.4 W (consumo máximo estimado por ventilador de 2 A). Los ventiladores, localizados en la parte inferior de cada uno de los módulos de la planta, cuentan con sistemas independientes de control.

La unidad de control está estructurada alrededor de un microcontrolador de 8 bits, el PIC 16F690 de Microchip, funcionando a 20 MHz, y un computador personal encargado de recibir y procesar las señales tanto del microcontrolador como de la cámara digital (variables de la planta). El microcontrolador controla los ventiladores a través de un driver L298, aislado por medio de optocopladores (figura 5). La tarjeta se encarga básicamente del control de los motores y de la comunicación serial con el computador.



Figura 5. Diseño de la planta de levitación neumática: unidad de control. Se detalla el acondicionamiento de las señales y las conexiones. Fuente: elaboración propia.

El control de cada uno de los motores se realiza de forma independiente, por medio de señales cuadradas a una frecuencia de 37 Hz (se utiliza el PWM del microcontrolador). La comunicación con el computador, encargado del sistema de visión artificial y del algoritmo de control, se realiza por puerto serial a una velocidad de 57 600 baudios. Al computador se conecta una cámara digital capaz de enviar frames al software de procesamiento de imagen a una velocidad de 35 fps (fotogramas o imágenes por segundo).

Realimentación por visión artificial

El sistema de realimentación que se utilizó está compuesto por una cámara digital, que se encarga de adquirir de forma continua las imágenes de la planta y alimentarlas al software de procesamiento de imagen en un computador. Para la prueba del prototipo, el tratamiento de imagen utilizado para la detección de las pelotas (posición con respecto al tiempo) emplea herramientas del image acquisition toolbox y filtros del image processing toolbox de Matlab. La imagen es inicialmente capturada en formato RGB con su correspondiente registro temporal. A esta imagen se le hace una conversión a escala de grises para suavizar el ruido. Posteriormente se utiliza binarización con diferentes umbrales para aislar la imagen del fondo y eliminar el ruido.

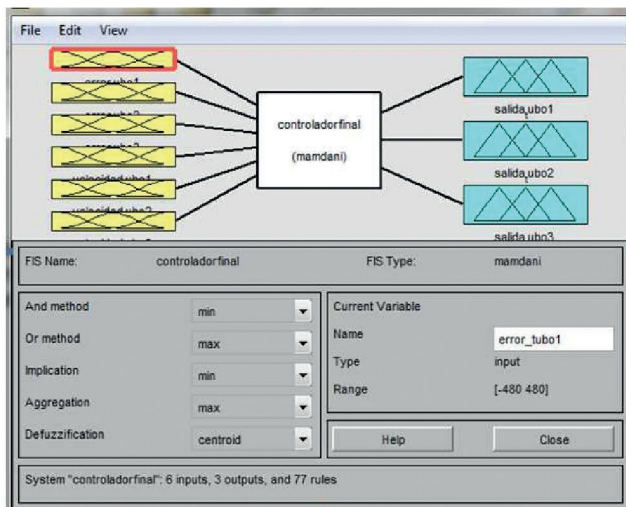


Figura 6. Estructura del controlador. Se detallan las variables de entrada y salida, así como la configuración de los operadores.
Fuente: elaboración propia.

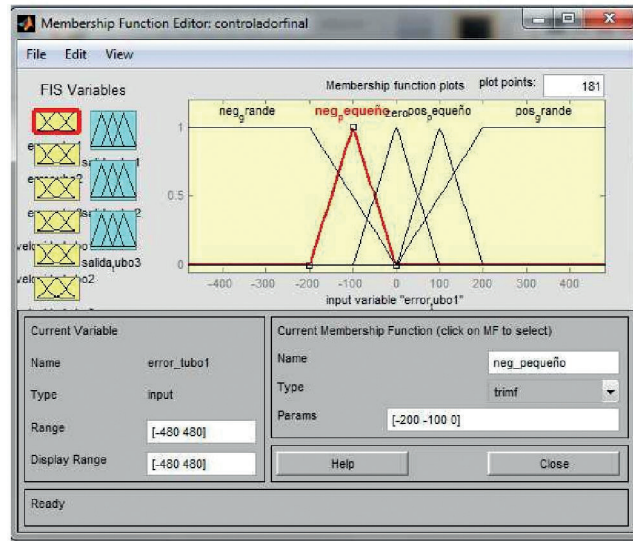


Figura 7. Estructura del controlador. Se detallan los conjuntos difusos definidos para las tres variables de error de posición (una en cada tubo).
Fuente: elaboración propia.

Variable delta del error Δe

Esta variable está dada por el error actual menos el error anterior. Es útil para estimar la energía del sistema (si crece o no, y su dirección de cambio).

Y finalmente se marca el centroide de la pelota plana en la imagen sobre cada uno de los objetos detectados (pelotas) y se obtienen sus coordenadas (x, y).

Evaluación experimental: una primera estrategia de control

Para la evaluación inicial de desempeño de la planta robusta se planteó un primer algoritmo de control difuso sobre MatLab R~. La realimentación al esquema de control por medio de visión artificial se propuso también sobre esta herramienta. Estas herramientas se escogieron dada la facilidad de implementación y garantía de operación, por las características de la dinámica del sistema.

El hecho de tener tres módulos que comparten un recurso limitado hace que las técnicas de control clásicas sean obsoletas, ya que el experimento incluye

variables e interacciones entre variables que no pueden ser descritas con precisión en una expresión analítica, lo que limita la implementación de este tipo de controladores.

Para la evaluación se estableció como estrategia de control mantener las tres pelotas a una misma altura. Así, se diseñó una estrategia de control difuso para estabilizar la posición en el tubo de las tres pelotas, es decir, definir las tres señales de control que se aplican a los reguladores de flujo de cada tubo (ventiladores), considerando como entradas el error de la posición a lo largo del tiempo de cada pelota e y el delta del error Δe de cada pelota inferido a partir de la aceleración de los movimientos. Finalmente, el sistema de control debe ser capaz de lograr la estabilización a pesar de la interacción existente y desconocida entre las variables de cada tubo (flujo de aire).

Se diseña el controlador con un total de seis variables de entrada (error tubo 1, error tubo 2, error tubo 3, delta de error tubo 1, delta de error tubo 2, delta de error tubo 3) y tres variables de salida (salida tubo 1, salida tubo 2 y salida tubo 3). Esto se hace debido a que el comportamiento de los tubos no es independiente (figura 6).

Variable error de posición e

Este es básicamente un control de posición. La variable de error de posición e se define como la diferencia entre la referencia (posición deseada por el usuario) y la posición actual de la pelota dentro del tubo (dato realimentado por la cámara).

$$e = y_{ref} - y_{act} \tag{1}$$

$$\Delta e = e[n] - e[n - 1] \tag{2}$$

Para esta variable se definieron los siguientes conjuntos difusos: Neg_grande, Neg_pequeño, zero, Pos_pequeño y Pos_grande. El universo de discurso para esta variable se definió entre [-480 480] que corresponde directamente al tamaño en pixeles de la longitud del tubo (figura 7).

Para esta variable, al igual que para el error, se definen los mismos cinco conjuntos difusos con las mismas etiquetas lingüísticas: Neg_grande, Neg_pequeño, zero, Pos_pequeño y Pos_grande. El universo de discurso para esta variable se definió entre [-50 50], que corresponde a los valores máximo y mínimo de cambio de la variable (figura 8).

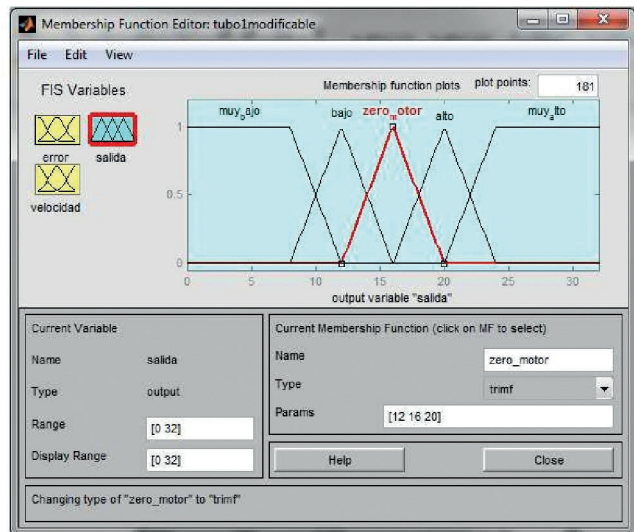
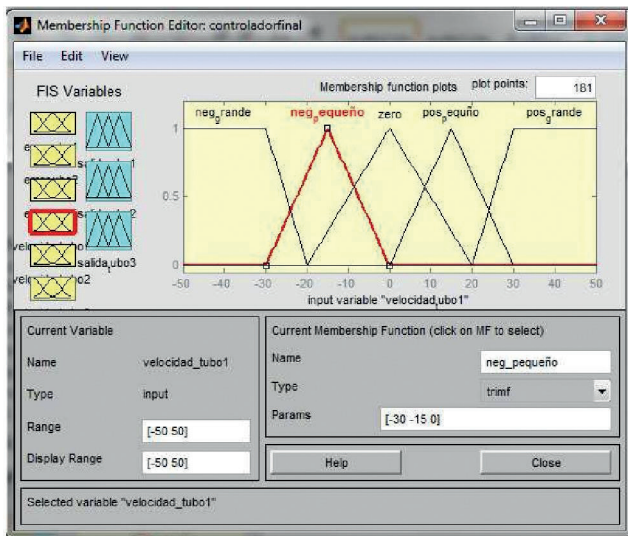


Figura 8. Estructura del controlador. Se detallan los conjuntos difusos definidos para las tres variables de delta error de posición (una en cada tubo). Fuente: elaboración propia.

Variable de salida v

Esta variable corresponde al voltaje que se aplica a los ventiladores, codificado sobre un PWM, para producir el movimiento de las pelotas en los tubos. La definición de los conjuntos difusos para cada tubo de esta variable difiere en cuanto a valor, dado que el voltaje de equilibrio de cada tubo es diferente (depende de qué tan cerca está el suministro de aire y de la comunicación de aire entre los tubos). Se define un conjunto central para cada tubo llamado zero, centrado en el voltaje de equilibrio del tubo. Los otros cuatro conjuntos se distribuyeron alrededor en el universo de la variable, identificados por las siguientes etiquetas lingüísticas: muy_bajo, bajo, alto y muy_alto.

Los voltajes de equilibrio encontrados para cada tubo y los universos de discurso definidos en correspondencia son:

- Tubo 1: 16 voltios, universo de discurso de [0 32] (figura 9).
- Tubo 2: 12 voltios, universo de discurso de [0 24] (figura 10).
- Tubo 3: 47 voltios, universo de discurso de [0 94] (figura 11).

Reglas difusas

Como el criterio de control consiste en estabilizar las tres pelotas a una misma altura, se definieron las reglas a fin de reducir el error, utilizando una acción correctiva fuerte cuando el error es grande, y pequeña cuando el error es pequeño. Sin embargo, a fin de evitar oscilaciones en las salidas del sistema, la definición de las reglas considera también la energía del movimiento indicada por el Δe . Es decir, si el e es grande y el Δe también es grande, es posible ejercer acciones fuertes de control, pero si el e es pequeño y el Δe es grande, se debe amortiguar el movimiento con acción contraria para evitar oscilaciones (figura 12).

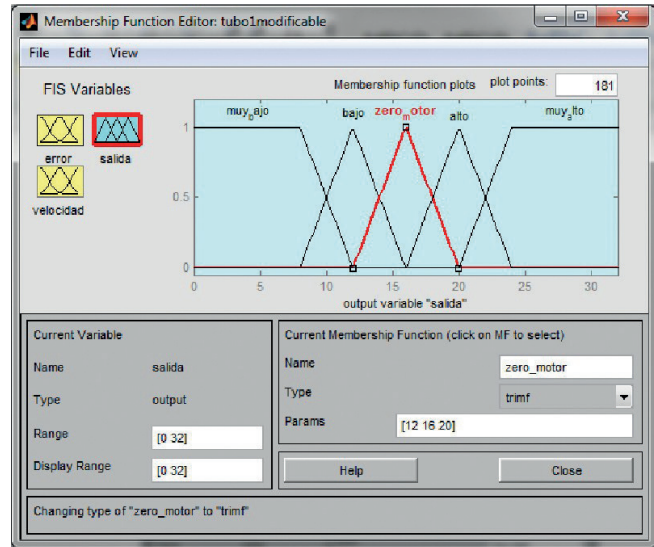


Figura 9. Estructura del controlador. Se detallan los conjuntos difusos definidos para la variable de salida del tubo 1.

Fuente: elaboración propia.

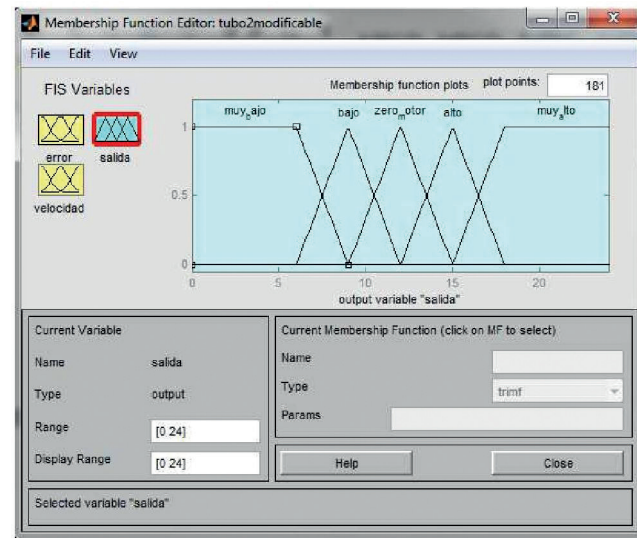


Figura 10. Estructura del controlador. Se detallan los conjuntos difusos definidos para la variable de salida del tubo 2.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se realizó el diseño y la construcción de una planta de levitación neumática para su utilización en formación en tecnología y como herramienta de investigación en laboratorio. La planta permite poner a prueba diferentes estrategias de control, tanto soportadas en

los programas académicos como en diferentes algoritmos propuestos para investigación, entre ellas, esquemas adaptativos, bioinspirados y otras técnicas que permitan el uso de un modelo aproximado basado en caracterización de entradas y salidas para sintonizar un control multivariable. Como estrategia de evaluación de desempeño del prototipo se formuló y desarrolló un esquema de control basado en sistemas difusos. Esta estrategia de control, gracias a su simplicidad de formulación y alto desempeño sobre sistemas complejos o sin modelo dinámico exacto, permitió poner a prueba la planta y verificar su correcto funcionamiento.

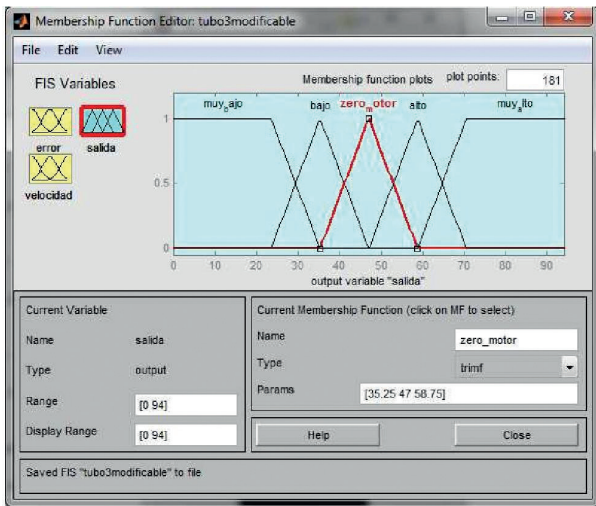


Figura 11. Estructura del controlador. Se detallan los conjuntos difusos definidos para la variable de salida del tubo 3. Fuente: elaboración propia.

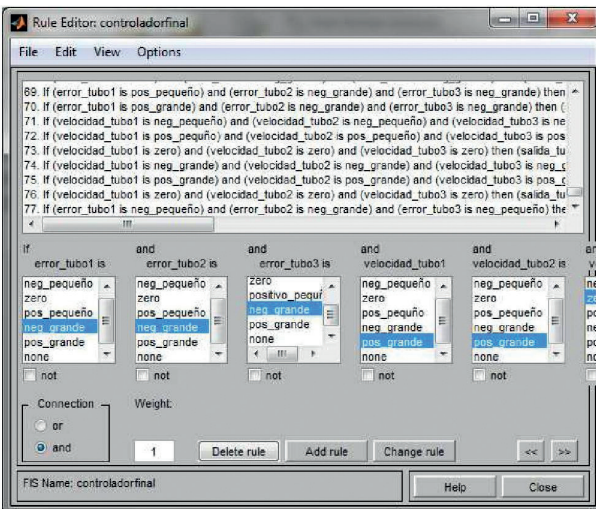


Figura 12. Estructura del controlador. Detalle de las reglas difusas definidas para la operación de prueba. Fuente: elaboración propia.

Como sistema de realimentación de estados se utilizó una cámara digital. En esta primera formulación se utilizó una única cámara para realimentar el estado de los tres tubos mediante procesamiento sobre la imagen (filtrado y binarización) en tiempo real para depurar la información de cada tubo.

Como se esperaba de la formulación inicial, cada tubo tiene un comportamiento diferente (diferente modelo dinámico). Esto se observó en el momento en que se saturaron los tres ventiladores con el mismo dato (las pelotas de ping-pong suben al máximo, pero lo hacen con velocidades diferentes). Se observó un comportamiento similar al utilizar una señal del ventilador mínima (las pelotas caen con diferentes velocidades).

Algunos aspectos actualmente en estudio por parte del grupo de investigación incluyen la aproximación de un modelo de la planta y el diseño de un sistema que permita interactuar con la planta a través de internet.

Referencias

Bernstein, D. S. (1999, ago.). Enhancing undergraduate control education. *IEEE Control Systems*, 19(5), 40-43.

Chow, G. (1974, dic.). Identification and estimation in econometric systems: A survey. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 855-862.

Esquivel, J., Marín, N. y Martínez, F. (2012). Plataforma de desarrollo digital basado en Game Boy Advance y la arquitectura ARM7. *Tekhnê*, 9(1), 5-12.

Farfán, D., Martínez, F. y Pirajan, R. (2011). Sistema de desarrollo para microcontrolador Atmel orientado a PLC. *Tekhnê*, 8(1), 47-54.

Gao, Y. y Hao, C. (2011, sep.). Investigation of teacher training under the project based learning environment. *En 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (Icece)*, 6 644-6 648.

Haber, G. (2001, jun.). Modeling and control of the german economy. *In Proceedings of the 2001 American Control Conference*, 2, 1 068-1 070.

Heywood, C. (2005). *Learning Strategies and Learning Styles*. General Topics for Engineers (Math, Science

- & Engineering). Wiley-IEEE Press.
- Martínez, F. H. y Acero, D. M. (2010). Plataforma robótica como herramienta para el desarrollo y aprendizaje de aplicaciones en control inteligente. En Proc. 9a Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática.
- Milentijevic, I. y Ciric, V. (2007, febrero). Project-based learning environment for special purpose dsp architectures. En 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications ISSPA 2007.
- Sreenivasan, R., Levine, W. S. y Rubloff, G. W. (1999, ago.). Some experiments in dynamic-simulator-based control education. En Proceedings of the 1999 American Control Conference, 1, 485-489.