

Identificación y control digital con redes neuronales para un sistema hidráulico

Rubén Darío Cárdenas Espinosa^a, Robinson Giraldo Cárdenas^b

^a PhD Technology Information, Instructor, SENA Distrito Capital, Centro Metalmecánico. Grupo de Investigación GICEMET. Bogotá D.C., Colombia.

^b Candidato a Mg en Sistemas Automáticos de Producción, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

Recibido: 18/05/2017. Aprobado: 28/07/2017

RESUMEN

Este artículo presenta la identificación de parámetros dinámicos para modelar un sistema hidráulico y el diseño de su controlador digital utilizando redes neuronales. En el estudio se analizó el modelo matemático existente y se realizó la identificación a través de un sistema electrónico de adquisición de señales con los programas MATLAB y LabVIEW.

La metodología empleada en el proyecto corresponde a una investigación experimental y se enmarca en un enfoque empírico analítico de carácter descriptivo y corte transversal, desarrollada en cuatro etapas: análisis, planeación, ejecución y evaluación. El resultado obtenido es la identificación del sistema hidráulico y el desarrollo de su controlador digital a base de redes neuronales. Se logró desarrollar el control de posición para un cilindro hidráulico empleando como elemento de control una servoválvula 4/3 vías referencia 158351, un sensor de posición potenciómetro lineal, una tarjeta de adquisición de datos conectada a un computador utilizando un algoritmo implementado en LabVIEW, el cual es el encargado de recibir y enviar las señales al sistema por medio de un programa de control.

Palabras clave: MATLAB, LabVIEW, sistema hidráulico, control digital, redes neuronales.

Identification and digital control with neural networks for a hydraulic system

ABSTRACT

This article presents the identification of dynamic parameters to model a hydraulic system and the design of its digital controller using neural networks. The existing mathematical model was analyzed in the study, and the identification through an electronic signal acquisition system was carried out using the MATLAB and LabVIEW programs.

The methodology used in the project corresponds to an experimental research and is put in the frame of an empirical analytical approach of descriptive character and transversal nature, developed in four stages: analysis, planning, execution and evaluation. The result obtained is the identification of the hydraulic system and the development of its digital controller based on neural networks. It was possible to develop the position control for a hydraulic cylinder using as a control element a 4/3-way servo valve reference 158351, a linear potentiometer position sensor, a data acquisition card connected to a computer using an algorithm implemented in LabVIEW, which is responsible for receiving and sending the signals to the system by means of a control program.

Key words: MATLAB, LabVIEW, hydraulic system, digital control, neural networks.

1. Introducción

La hidráulica se puede definir como un medio para transmitir energía al empujar un líquido confinado (siguiendo el mencionado Principio de Pascal), en donde el punto de entrada se da en la bomba hidráulica (que puede ser de pistones, de paletas o engranajes) y

el punto de salida se da en el actuador (que puede ser un cilindro hidráulico –lineal– o un motor hidráulico –rotativo–). Recordar que el sistema hidráulico no es una fuente de potencia, ya que la bomba principal es accionada por un motor eléctrico (por ejemplo), y que dicho sistema resulta ser más eficiente y versátil que otros métodos de transmisión de energía, dándonos a entender que no es factible conectar directamente el actuador primario (como el motor eléctrico) con el equipo o componente a accionar (definido como el punto final del sistema hidráulico). Este preliminar se ha elaborado para dar a conocer sobre las instalaciones hidráulicas en las embarcaciones (Cabello, 2011).

* Autor de correspondencia.

E-mail: rdcardenas75@misena.edu.co (R.D. Cárdenas)

orcid.org/0000-0002-2417-844X

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=XHYbtiEAAA&hl=es>

E-mail: robinsong@misena.edu.co (J.R. Cárdenas)

orcid.org/0000-0001-9727-6617

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=OFVKPaAAAA&hl=es&authuser=1>

Cómo citar este artículo:

Cárdenas Espinosa R.D. y Giraldo Cárdenas R. (2017). Identificación y control digital con redes neuronales para un sistema hidráulico. *Revista Vector*, 12: 32-39.



Los equipos hidráulicos son utilizados en aplicaciones industriales, como: manufactura, máquinas, herramientas; industrias papelera, textil, médica, plástica, espacial, vehicular, automatización, entre otras. El fundamento principal de sus amplios usos industriales es la capacidad de gran potencia que pueden ejercer (en comparación con sus semejantes de corriente continua, CC; o corriente alterna, CA), conservando al mismo tiempo una buena respuesta dinámica del sistema. El uso de dispositivos de retroalimentación y microprocesadores en las unidades hidráulicas permite la aplicación de diferentes algoritmos de control que dan lugar a un mejor funcionamiento en estado estacionario y dinámico en sistemas de control servohidráulicos.

El empleo de equipos y software de programación ha permitido agilizar la obtención de modelos matemáticos adecuados para el control de diferentes sistemas de plantas físicas como es el caso de los sistemas hidráulicos, los cuales son altamente no lineales y complejos para su modelado por medio de la aplicación de ecuaciones matemáticas.

El objetivo es llevar a cabo control de posición de un cilindro hidráulico empleando como elemento de control una servoválvula 4/3 vías, referencia 158351, la retroalimentación del sistema de control se efectúa mediante el empleo de un potenciómetro lineal referencia 159303, que permita obtener el valor de la posición del vástago la cual es llevada a una tarjeta de adquisición de datos a través de un computador por medio de un algoritmo implementado en el software LabVIEW de *National Instruments*.

Inicialmente se hace una recopilación de información sobre las características de funcionamiento de las válvulas proporcionales y las servoválvulas empleadas en el control de posición, los diferentes tipos de control, sus componentes y las variables que definen estos sistemas hidráulicos para el control de posición. La realización de un modelo matemático empleando ecuaciones matemáticas, seguidamente se hace la identificación del sistema empleando herramientas de LabVIEW y MATLAB para la obtención de la función de transferencia de la planta. Una vez determinado el modelo a trabajar, se aplica una técnica de control por medio de lugar geométrico de las raíces compensador en adelante, con el fin de llevar el sistema a unos parámetros de diseño establecidos para mejorar tiempo de respuesta, adicionalmente se aplica una red neuronal al modelo identificado con el fin de observar su respuesta. Después se realizó el montaje para el control de posición de cilindro con el fin de validar la respuesta del modelo previamente obtenido con la identificación. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

La metodología empleada en el proyecto corresponde a una investigación experimental y se enmarca en un enfoque empírico analítico de carácter descriptivo y corte transversal, desarrollada en cuatro etapas: análisis, planeación, ejecución y evaluación.

1.1 Objetivos del fluido hidráulico

a. Transmisión de potencia: El fluido hidráulico debe ser capaz de poder circular fácilmente por las líneas y orificios de los elementos del circuito. Cuando hay demasiada resistencia al flujo se originan pérdidas de potencia considerables, además que el fluido sea activo instantáneamente, cuando se ponga en marcha una bomba o entre en acción una válvula de control cualquiera (Cabello, 2011).

b. Lubricación: En la mayoría de los elementos hidráulicos, la lubricación interna la proporciona el fluido. Los elementos de las bombas y otras piezas desgastables se deslizan unos sobre otros en una película del fluido. Para que la duración de los componentes sea larga, el aceite debe contener los aditivos necesarios para asegurar buenas características de antidesgaste. No todos los aceites hidráulicos contienen estos aditivos, de ahí viene la correcta selección de aquellos (Cabello, 2011).

c. Estanqueidad: En muchos casos, el fluido hidráulico es el único cierre contra la presión dentro de un componente hidráulico, generando una especie de "anillo de cierre" (de fina película) entre una corredora de la válvula y su cuerpo, para reducir las fugas entre los pasajes de alta y baja presión. El ajuste mecánico y la viscosidad del aceite determinan el porcentaje de fugas posibles (Cabello, 2011).

d. Enfriamiento: La circulación del aceite a través de las líneas y alrededor de las paredes del depósito disipa parte del calor generado en el sistema hacia el medio ambiente, que se determina en función de la complejidad de las líneas y capacidades de los equipos y reservorios. A veces, esto origina un calentamiento prematuro en el compartimiento del buque donde se encuentra el sistema del tanque hidráulico y su circuito respectivo (Cabello, 2011).

e. Calidad: El aceite hidráulico debe tener algunos requerimientos de calidad tales como impedir la oxidación, formación de lodos, goma y barniz; reducir la formación de espuma; mantener su propia estabilidad y, por consiguiente, reducir el costo del cambio del fluido; mantener un índice de viscosidad relativamente estable entre amplios límites de temperatura; impedir la corrosión y la formación de picaduras; separar el agua y tener compatibilidad con cierres y juntas. Estos requerimientos presentados son el resultado de una composición especial y pueden no estar presentes en todos los fluidos (Cabello, 2011).

1.2 Clases de válvulas de control eléctricas

a) Válvulas de conmutación ON – OFF. Son ampliamente utilizadas para permitir o no el flujo de aceite hidráulico (Morales, 2012).

b) Válvulas electrohidráulicas proporcionales. Utilizadas ampliamente en los sistemas de lazo abierto (sin un sensor de posición) son controladas electrónicamente para producir una presión de salida o la rapidez del flujo proporcional a la señal de entrada (Morales, 2012). Éstas ofrecen las ventajas de inversión de sentido, variación continua de los parámetros controlados y permite reducir el número de dispositivos hidráulicos requeridos para tareas particulares de control.

c) Servoválvulas electrohidráulicas. Generalmente se usan en sistemas de control de lazo cerrado. El concepto de servo es una expresión ampliamente utilizada. Indica que es un sistema en el cual una señal de entrada de baja potencia es amplificada para generar una señal o salida de alta potencia. Por ejemplo, una señal de baja potencia de 0,08 watts puede producir un control analógico de potencia alcanzando los 100 KW.

Los sistemas servo electrohidráulicos producen uno de los mejores tipos de controladores desde el punto de vista de precisión y tiempo de respuesta. Se utilizan para controlar casi todos los parámetros hidráulicos y mecánicos tales como la presión, presión diferencial, velocidad angular, desplazamiento, desplazamiento angular, fuerza y otros parámetros (Morales, 2012).

d) Válvulas digitales. En este tipo de válvulas, un motor de pasos, controlado por los pulsos de un microprocesador, regula el posicionamiento de la válvula (Morales, 2012).

1.3 Identificación del sistema

Identificación es la obtención de modelos dinámicos, ecuaciones para describir el comportamiento de un sistema a través del estudio de las señales de entrada y de salida. Podría definirse entonces como el campo de construir modelos a partir de datos experimentales, con el fin de tener herramientas fundamentales en el diseño sistemas de control (Avilés, 2016).

En el sistema del servoactuador hidráulico se puede distinguir dos tipos de señales que son:

- Señal de entrada: Es aquella que se envía al sistema, en este caso la señal creada y que el actuador debe reproducir (señal que se envía a la servoválvula).

- Señal de salida: Es la señal que indica cómo se está comportando el servoactuador (señal recogida del sensor de posición potenciómetro lineal).

Las señales del sistema están en el dominio del tiempo y deben ser manipuladas matemáticamente para llevarlas al dominio de la frecuencia. (Aguirre y Larco, 2010).

Aunque, para efecto de identificación las señales son muestreadas solo a tiempos discretos que usualmente están igualmente distanciados en unidades de tiempo. En consecuencia, el problema del modelado es describir cómo están relacionadas las señales entre sí. La relación básica entre las señales es una ecuación diferencial lineal.

En consecuencia, el problema de la identificación de un sistema consiste en determinar una función de transferencia que cumpla con los parámetros del modelo previamente desarrollado (Garrido, Moreno y Balaguer, 1999).

En el diseño de sistemas de control, la consideración más importante es un modelo bien definido para la planta que se desea controlar (Ogata, 2003). La razón es que todo el diseño se basará en este modelo matemático. Una forma de obtener este modelo es el uso de valores numéricos del proceso conocido como sistema de identificación (Groover, 1997).

1.4 Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos para el sistema en lazo cerrado control posición del servoactuador hidráulico se realizó por medio de tarjeta de adquisición NIDAQ-USB6009 con el fin de poder encontrar la respuesta experimental del servoactuador y así compararla con el modelo matemático linealizado (Nikolov y Nikolova, 2008). Aquí se tiene en cuenta el teorema de muestreo que establece los criterios para reconstruir el contenido de frecuencia de una señal medida con exactitud, la relación de muestreo debe ser de más del doble de la frecuencia más alta contenida en la señal de muestra (Oppenheim, Willsky y Nawab, 1998). Donde la máxima frecuencia de la señal análoga como f_m y la velocidad de muestreo f_s , el teorema de muestreo requiere: $f_s = 2 * f_m$ (Ecuación 1).

1.5 Redes neuronales

Según Barrera (sf) las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos matemáticos que intentan reproducir el funcionamiento del sistema nervioso, constituidos por un conjunto de unidades llamadas neuronas o nodos conectados unos con otros. El primer modelo de red neuronal fue propuesto por McCulloch y Pitts (1943) en términos de un modelo computacional de actividad nerviosa. Este modelo era un modelo binario, donde cada neurona tenía un escalón o umbral prefijado, y sirvió de base para los modelos posteriores. Las redes neuronales permiten obtener un modelo no explícito que relaciona un conjunto de variables de salida con un conjunto de variables de entrada. Así, estos modelos permiten predecir cuál es el valor de salida, dados unos valores de entrada del modelo. Para estimar el modelo es necesario disponer de un conjunto

de observaciones de las variables. Estas observaciones son usadas como patrones de entrenamiento para que la red aprenda y sea capaz de predecir una salida del modelo, ante nuevas observaciones. Por tanto, las capacidades de la red van a depender en gran medida de esta fase de entrenamiento. En la fase de entrenamiento es necesario controlar muchos parámetros y distintos algoritmos de optimización.

Las redes neuronales artificiales permiten la solución de problemas complejos al operar de forma paralela como es el reconocimiento de formas o patrones, predicción, codificación, control y optimización entre otras aplicaciones (Matich, 2001).

2. Materiales y métodos

Los materiales que se utilizaron fueron: cilindro hidráulico, electroválvula, potenciómetro, banco de montajes hidráulicos del SENA, sensores y actuadores, Software LabVIEW, MATLAB, Office.

El tipo de investigación realizada es experimental y se trabajó la metodología con enfoque empírico analítico de carácter descriptivo y corte transversal, en cuatro etapas: análisis, planeación, ejecución y evaluación.

3. Resultados y discusión

La figura 1 muestra la conexión de un servosistema hidráulico para el control de posición.

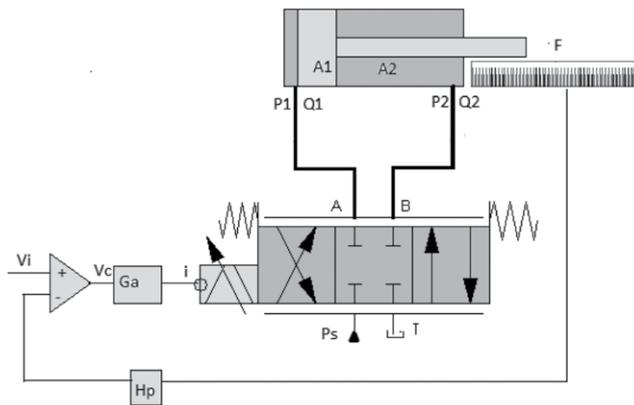


Figura 1. Control de posición del cilindro hidráulico
(Fuente: Autor).

En la tabla 1 se resumen las constantes del modelo y se encuentra el valor de aquellas que pueden ser calculadas de acuerdo con los componentes empleados en el diseño.

Tabla 1. Parámetros conocidos para el modelo matemático del servoactuador.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Presión de suministro	P_s	60	Bar
Módulo de Bulk	B	7.60×10^8	N/m^2
Densidad fluido	ρ	858	Kg/m^3
Masa de prueba	M	20	Kg
Diámetro embolo	A_1	0,000201	m^2
Diámetro embolo	A_2	0,0001225	m^2
Carrera total	L_t	0,2	m
Relación de área	γ	1.640	
Caudal nominal	Q_n	4,2	l/min

A continuación, se presenta el modelado matemático de la función de transferencia (Ecuación 3) para el sistema de control (posición) del cilindro:

$$G(s) = \frac{2K_p}{s[1 + 3,9431 \times 10^{-6}s^2 + 1,205 \times 10^{-4}s]}$$

La Ecuación 4 muestra la función de transferencia obtenida mediante la identificación del sistema, seleccionando la que obtuvo un 92,82% de las especificaciones esperadas del sistema.

$$G(s) = \frac{7250}{[s^3 + 161.11s^2 + 8530s]}$$

Al confrontar las dos funciones de transferencia a partir del análisis del lugar geométrico de las raíces, se eligió diseñar el controlador a base de redes neuronales de la Ecuación 4. Una vez se tiene la configuración de todos los parámetros de la tarjeta de adquisición de datos, se procede a realizar el programa LabVIEW con el fin de adquirir los datos provenientes del sistema para su posterior almacenamiento en un archivo, el cual es analizado desde el software de MATLAB para la identificación de la planta (figura 2).

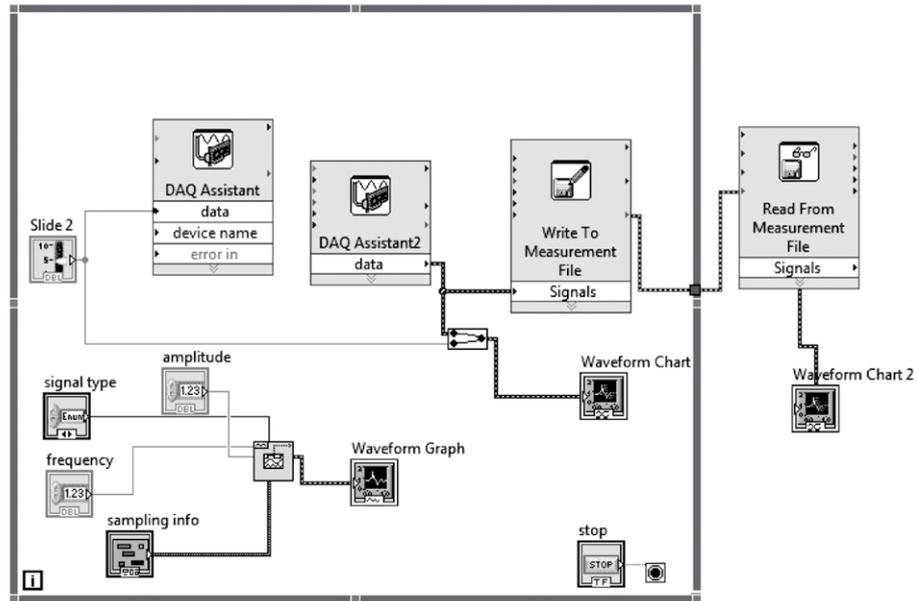


Figura 2. Programa para adquisición de datos (Fuente: Autor).

Para la validación del modelo teórico obtenido en la identificación, se exportan los datos a MATLAB. Estos son cargados desde el archivo previamente grabado para tal fin al *Workspace* de MATLAB. A través del módulo *System Identification Toolbox* (SIT) de MATLAB (Figura 3), se importan del workspace la señal de entrada (*in*) y la señal de salida (*out*), y se introduce el intervalo de muestreo.

Se trabaja con un segmento de la señal, pues debido a que se realizaron pruebas de lazo abierto, la señal de respuesta tiene un corrimiento o tendencia lineal del

offset, y esto se ve en la operación de la máquina, ya que no permanece el actuador en la posición central. El modelo matemático obtenido es de tercer orden, el cual aplica para pequeñas perturbaciones alrededor de la posición central, y obtener un mejor ajuste de la señal simulada.

Una vez se carga el archivo realiza el proceso de identificación del sistema por medio de la función *process models* (Figura 3) cuyo objetivo es seleccionar la respuesta del sistema que más alto porcentaje tenga con la entrada del sistema a analizar.

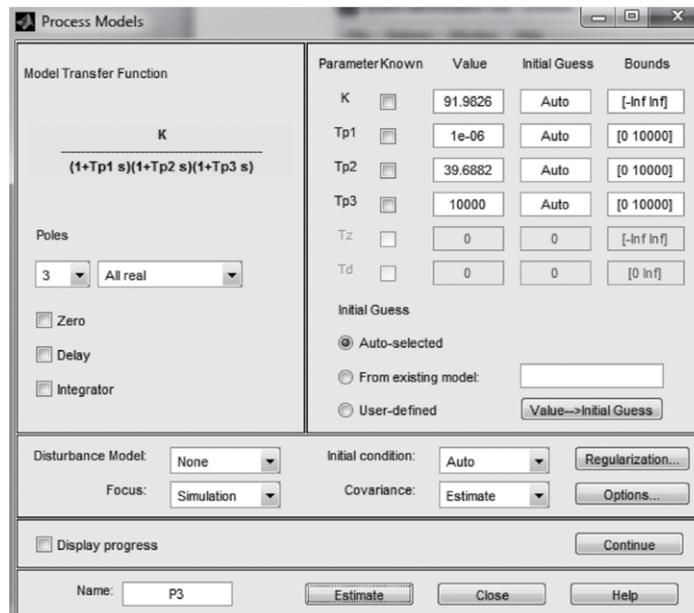


Figura 3. Interfaz *process models* (Fuente: Autor).

Una vez se tienen analizados varios sistemas se procede a dejar el sistema que presenta mejor porcentaje de respuesta (figura 4). La señal resultante es cargada en el *Working data* para estimar el modelo de tercer orden; en este caso se seleccionó modelo P3 con 92,82%, el cual cumple con las especificaciones esperadas del sistema.

$$G(s) = \frac{7250}{[s^3 + 161.11s^2 + 8530]}$$

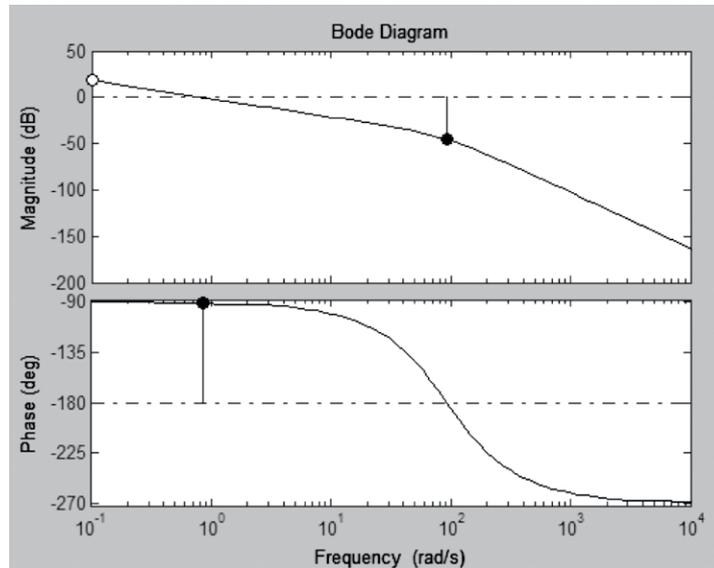


Figura 4. Respuesta del sistema identificado (Fuente: Autor).

Diversos autores (Wildberger, 1996; Pulgarín, 2001; Barber *et al.*, 2002; Trujillo y Gómez, 2007) coinciden en definir la inteligencia artificial como una ciencia que tiene por objetivo el diseño y la construcción de máquinas capaces de imitar el comportamiento inteligente de los seres humanos.

Partiendo de la función de transferencia ecuación 5 previamente identificada por el *toolbox ident* de Matlab, la cual se le hizo un análisis de respuesta en lazo abierto (figura 5) para determinar la estabilidad del sistema, se definieron los parámetros con el fin de mejorar la respuesta del sistemas como es el tiempo establecimiento t_s , sobre impulso M_p , y el error de estado estacionario por medio de un compensador adelante, usando lugar geométrico de las raíces y una sintonización automática de ganancias controlador PID; los resultados obtenidos por ambos métodos presentan una respuesta similar en cuanto a los parámetros establecidos para el control de posición del cilindro.

Con base en esta información se pretende desarrollar un controlador por medio de una red neuronal empleando *Neural Network Toolbox* de

En el diagrama de la figura 4 se determina el comportamiento del sistema en frecuencia de la ecuación 5 para el sistema identificado; en éste se observa que cumple con los parámetros del modelo matemático.

MATLAB, empleando la ecuación 5 del modelo identificado, a fin de contrastar las respuestas obtenidas para el sistema control de posición.

El neurocontrolador utilizado en la figura 6 es conocido por dos nombres diferentes: Controlador de linealización por realimentación. Cuando el modelo de la planta tiene una forma particular (*companion form*) y NARMA-L2 cuando el modelo de la planta se puede aproximar por la misma forma. La idea central de este tipo de control es la de transformar la dinámica de sistemas no lineales en dinámica lineal mediante la cancelación de las no linealidades.

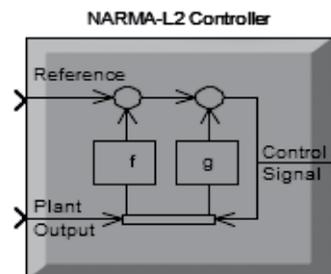


Figura 6. Neurocontrolador.

Durante la implementación de la red neuronal se definieron los parámetros del controlador NARMA-L2” de la siguiente manera: Número de capas ocultas: 10; Pruebas de entrenamiento: 1000; Número entrada: 1; Número de salidas: 2; Función red empleada es: trainlm (actualiza los valores de peso y sesgo de acuerdo con Levenberg-Marquardt Back propagation).

Después de realizar varios entrenamientos con diferentes tipos de capas, esta configuración fue la más óptima.

Terminado el número de pruebas de entrenamiento de la red neuronal, se procede a generar la red neuronal en la función *Train Network*, (figura 7), en la cual se observa la estructura de la red.

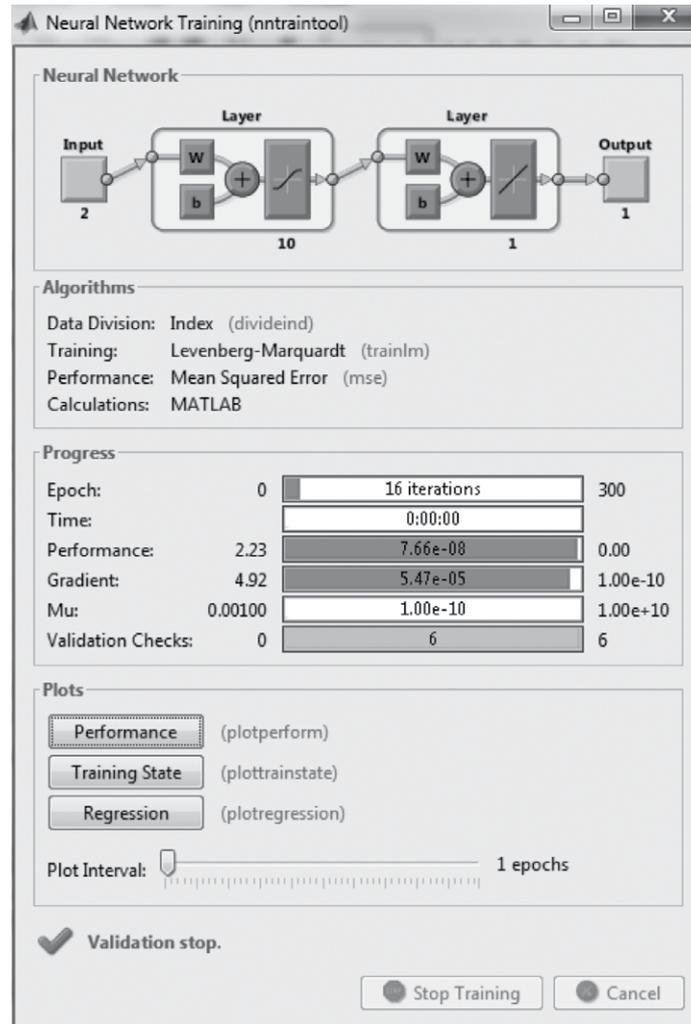


Figura 7. Train Network.

El proceso finaliza con 16 iteraciones, y a través de la función ‘regresión’ se puede determinar la validación del sistema para verificar la respuesta esperada con respecto al margen de error. La figura 8 muestra la respuesta final de la red neuronal, entrenada con el controlador ante una entrada aleatoria del sistema.

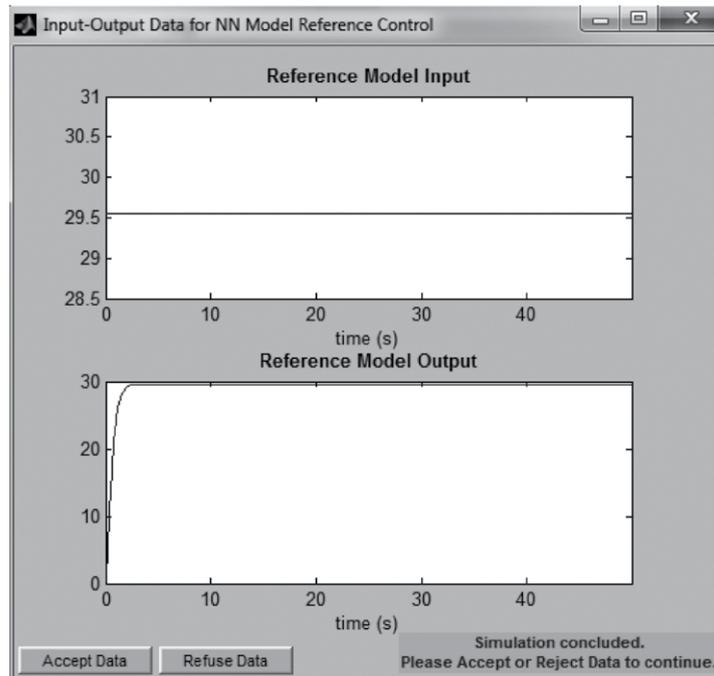


Figura 8. Respuesta del sistema red neuronal entrenada.

6. Conclusiones

El modelado matemático se realizó a partir de los criterios establecidos por el autor Jhon Watton y reemplazando las variables que se tienen en el sistema por las variables reales del cilindro hidráulico disponible en el SENA.

Se logró identificar el sistema hidráulico a partir de los programas MATLAB y LabVIEW, tomando como base los parámetros obtenidos del modelado del sistema para el orden del mismo (tercer orden), seleccionando como criterio la respuesta que contenía el modelo con mayor porcentaje de respuesta de entrada.

La función de transferencia seleccionada para realizar el diseño del controlador del cilindro hidráulico fue la obtenida mediante la identificación del sistema teniendo en cuenta el criterio de estabilidad de Ruth, el lugar geométrico de las raíces del sistema modelado e identificado en lazo abierto y su respectiva respuesta en lazo cerrado.

El desarrollo del algoritmo de la red neural empleó 10 neuronas mediante las cuales se obtuvo la implementación de controladores a base redes neuronales; para sistemas hidráulicos, son una solución de bajo costo con respuestas similares a las obtenidas por sistemas servohidráulicos, convirtiéndose en una alternativa viable para la solución de las necesidades del sector industrial en Colombia y en el mundo.

Referencias

- Larco A.M., Aguirre P.A., Martin C. (2010). Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de temperatura en un cuarto térmico. Refrigeración como Tesis de Maestría.
- Avilés O.F. (2016). Identificación de sistemas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 11, 75-79.
- Barber F., Botti V.J., Koehler J. (2002). AI: Past, Present and Future. *UPGRADE*, Vol. 3, No. 5, pp. 2-5.
- Barrera J.A.T. (Sin fecha). Redes Neuronales. Universidad de Guadalajara Disponible en: http://www.cucei.udg.mx/sites/default/files/pdf/toral_barrera_jamie_areli.pdf [Visitada en octubre de 2016].
- Cabello A.E. (2011). Sistema hidráulico de gobierno de un remolcador de puerto de 20 TM BP. ..
- Garrido S., Moreno L., Balaguer C. (1999). *Identificación, estimación y control de sistemas no-lineales mediante RGO*. Universidad Carlos III.
- Groover M.P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación.
- Matich D.J. (2001). *Redes neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones*. Cátedra de informática aplicada a la ingeniería de procesos-Orientación I.
- Morales R.A. (2012). Diseño de circuitos de control para válvulas proporcionales en sistemas hidráulicos...
- Nikolov G., Nikolova B. (2008). Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors. *RECENT Journal for Industrial Engineering*, ISSN, 2065-4529...
- Ogata K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
- Oppenheim A.V., Willsky A.S., Nawab S.H. (1998). *Señales y sistemas*. Pearson Educación.
- Pulgarín P., A.J. (2001). *Aplicación de herramientas de Inteligencia Computacional en la Planificación de Recursos*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Col...
- Trujillo H. A.D. y Gómez A., L.E. (2007). Inteligencia Artificial: Emulación de mecanismos. *Tecno INTELLECTO*, Vol. 4, No. 2,
- Wildberger M.D. (1996). *Soziale Angst: ist Schüchternheit ein Makel?* (Doctoral dissertation).