

Técnicas de Inteligencia Artificial para el Control de Estabilidad de un Manipulador Paralelo 3RRR

Villaseñor A. Marcos, Álvarez T. Erik, Ramírez A. Agustín, Orozco M. Horacio, Padilla M. José A.

Artificial Intelligence Techniques for a Parallel Planar Manipulator 3RRR Control.

Abstract—This paper describes a comparison of the design and implementation of a neuronal control and a fuzzy control. Both controls were designed in order to get a better stability performance for a 3RRR (Revolute-Revolute-Revolute) planar parallel manipulator. The manipulator has as a main feature that uses three servomotors, each one with a different capacity; it means that every servomotor has a different torque limit. The performance of the manipulator depends on both, the joints configuration and the parameter values used for the proportional integral control (PI) in each servomotor. The proposed controls have the objective of dynamically changing the response of the servomotor based on three parameters. These are the position proportional gain (PG), the velocity proportional gain (VG) and the velocity integral gain (VI). In the original design of the manipulator, constant values were used for each parameter. The main purpose of this paper is to study the establishment of these parameters by developing a neural network control and a fuzzy control to optimize the dynamic response of the manipulator.

Keywords— Inverse model controller, Neuronal network, Fuzzy control, Parallel manipulator, Servomotor.

Resumen— Este artículo describe la comparación entre el desarrollo de un control neuronal y el de un control difuso diseñados

Este trabajo fue respaldado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato.

Marcos Villaseñor Aguilar. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en Junio del 2011 (email: marcosjesus1982@hotmail.com).

Erik de Jesús Álvarez Torres. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Celaya en Abril del 2010 (email: erik_alto@hotmail.com).

Agustín Ramírez Agundis. En 2008 obtuvo el grado de Doctor en Diseño de Sistemas Digitales por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es profesor-investigador del Instituto Tecnológico de Celaya, su trabajo se orienta a la instrumentación de máquinas industriales y sistemas hardware basados en redes neuronales (email: agustin.ramirez@itcelaya.edu.mx).

Horacio Orozco Mendoza. Posee el título de Ing. Industrial Mecánico por el Instituto Tecnológico de Celaya, el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecánica por el ITESM y el grado de Doctor en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Texas en el año 2000. Desde 1983 es Profesor-investigador de tiempo completo del Dpto. de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya. Su principal área de interés es la de Sistemas Dinámicos y Control (email: horacio.orozco@itcelaya.edu.mx).

José Alfredo Padilla Medina. Obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica en 1992 por el Instituto Tecnológico de Celaya y en 2003 el grado de Doctor en Ciencias (Óptica) por el Centro de Investigaciones en Óptica. Ha realizado cerca de 20 publicaciones en revistas indizadas y en congresos internacionales. Desde el 2002 es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya donde desarrolla investigaciones en las áreas de controladores difusos, sistemas de visión y teoría ROC (email: alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx).

ambos para mejorar el desempeño de la estabilidad de un manipulador planar paralelo 3RRR (Revolute-Revolute-Revolute). El manipulador tiene como característica que utiliza tres servomotores de diferente capacidad; es decir, cada servomotor posee un límite diferente en cuanto a su capacidad para aplicar el par requerido por la articulación a la que se encuentra acoplado. El desempeño del manipulador depende tanto de la configuración de las articulaciones como de los parámetros que utiliza el control proporcional integral (PI) de cada servomotor. Los sistemas de control que se comparan tienen la finalidad de modificar la respuesta de los servomotores con base en tres parámetros que son: la ganancia proporcional de posición (PG), la ganancia proporcional de velocidad (VG) y la ganancia integral de velocidad (VI). En el diseño original del manipulador se establecieron valores constantes para cada uno de los parámetros. El propósito de estudio de este trabajo es el establecimiento de estos parámetros mediante el desarrollo de una red neuronal y un control difuso para optimizar la respuesta dinámica del manipulador.

Palabras clave— Control por modelo inverso, manipulador paralelo, servomotor, red neuronal, control difuso.

I. INTRODUCCIÓN

El Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya (ITC) diseñó un manipulador paralelo con propósito de uso académico y experimental. Su control se realiza para seguir trayectorias establecidas como secuencias de posiciones a través de LabVIEW. Las ganancias de los servomotores se ajustaron originalmente a prueba y error. Por lo tanto, el manipulador no opera de manera óptima ya que el control supone una inercia constante del sistema, condición que en la práctica es inviable por las características físicas del manipulador. Por lo anterior, los valores de las ganancias o parámetros de velocidad que se tienen en el controlador de cada servomotor son inadecuados para ciertas trayectorias que implican mayores esfuerzos, lo que impide programar tareas más exigentes.

Asimismo, han sido desarrollados dos sistemas basados en técnicas de inteligencia artificial, uno por medio de una red neuronal y el otro con base en un control difuso, con el objetivo de optimizar dinámicamente los parámetros de control del manipulador con el propósito de obtener la mayor velocidad, sin sobrecarga de sus servomotores, con pesos variables aplicados sobre el elemento efector del manipulador. Este trabajo tiene como propósito efectuar una comparación entre estos dos sistemas.



Fig. 1 Manipulador paralelo desarrollado en el ITC.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL ORDENADOR

Procesador	Intel Pentium IV
Memoria RAM	256 MB DDR 1
Disco Duro	20 GB
Sistema operativo	Windows NT
Plataformas de programación	Labview 7.1 Matlab R13

II. GENERALIDADES DEL MANIPULADOR Y DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DESARROLLADOS

A. Manipulador paralelo 3RRR

Un manipulador paralelo 3RRR consiste en una plataforma móvil y una base fija, conectada a tres cadenas cinemáticas, cada una con tres juntas de revolución (Figura 1). Se subraya la primera R debido a que las juntas activas, para cada cadena, son las que están conectadas a la plataforma fija, las demás son pasivas. Cada junta de par inferior de revolución permite un grado de libertad. Dos eslabones conectados con una junta de revolución forman una junta de pasador rotatoria con cierre de forma. El movimiento de los mecanismos paralelos puede ser restringido por tres diferentes factores: existencia de limitaciones mecánicas sobre las juntas pasivas, interferencia entre eslabones y limitaciones debido a los actuadores. El manipulador paralelo construido en el ITC con propósito experimental para casos de estudio en robótica es de este tipo [1]. El modelo dinámico para esta clase de manipuladores se puede revisar en [2].

B. Elementos del sistema de control del manipulador

Existen diferentes tipos de controles para manipuladores, siendo los de posición y velocidad los más usuales [3][4][5]. Este manipulador emplea un control cinemático de posición que lleva el centro de la plataforma móvil a las posiciones que le sean especificadas. El ordenador empleado para controlar el manipulador tiene las características mostradas en la Tabla I. La tarea del sistema de control consiste en situar el centro de la plataforma móvil en posiciones específicas, es decir, un posicionamiento punto a punto. El sistema de control del manipulador se muestra en la Figura 2, en la que se ilustran los bloques de los componentes que se emplean para controlar los movimientos.

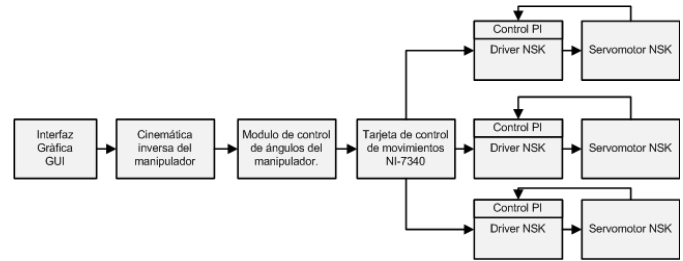


Fig. 2 Esquema del sistema de control integrado.

La interface Gráfica GUI, desarrollada en LabView, es el medio a través del cual se le proporcionan las coordenadas con las cuales se desea posicionar el elemento efector $[X, Y, \phi]$.

Se tiene un bloque, el cual también es un VI de Labview, que se utiliza para evaluar la cinemática inversa del manipulador y así realizar los cálculos de los ángulos de las coordenadas articulares.

Además se tiene un módulo que permite determinar el ángulo que debe girar cada uno de los servomotores del manipulador. Los ángulos obtenidos para cada eje se le proporcionan a la tarjeta de control de movimientos del manipulador.

La tarjeta de control de movimiento NI-7340 se utiliza para realizar el control de los servomotores en tiempo real, debido a su facilidad para el control de múltiples ejes simultáneos.

El driver del servomotor NSK recibe el ángulo en grados que debe girar el motor, calcula el número de pulsos que se deben aplicar al servomotor para obtener ese giro y establece el perfil trapezoidal de velocidad.

El servomotor realiza el posicionamiento y giro del elemento efector de acuerdo a la cantidad de pulsos que se le envíen al driver y la señal de control para el sentido del giro.

C. Parámetros del manipulador

Los servomotores del manipulador operan en base a una serie de parámetros. El uso de esos parámetros permite controlar la respuesta de los servomotores. Los tres parámetros son: la ganancia proporcional de posición (PG), la ganancia proporcional de velocidad (VG) y la ganancia integral de velocidad (VI). Adicionalmente, se utiliza el parámetro de la banda muerta (DBP), el cual permite disminuir las oscilaciones presentes en el servomotor cuando se encuentra estático [6].

Una de las principales características del manipulador es que utiliza tres servomotores de diferentes tamaños y especificaciones. Los tres servomotores son diferentes debido a que el diseño del manipulador está orientado hacia su uso académico y de investigación, empleando las características dinámicas del manipulador. El servomotor A (M-YS3040FN501) es el más pequeño de los tres, en cuanto a par aplicado, con capacidad de hasta 40 N-m; el servomotor B (M-YS4080FN001) es el mediano y proporciona un par de hasta 80 N-m y el servomotor C (M-YS5120FN001) es el más grande, con capacidad de hasta 120 N-m.

Los parámetros que se presentan en la Tabla II fueron los que se establecieron en el diseño y puesta en operación del manipulador. Estos parámetros se fijaron con base en prueba y error del funcionamiento del manipulador siguiendo un procedimiento propuesto por el fabricante NSK.

TABLA II
PARÁMETROS AJUSTADOS MANUALMENTE

Ganancia	Servomotor A	Servomotor B	Servomotor C
PG	0.1	0.1	0.1
VG	1.0	4.0	4.0
VI	1.5	5.0	8.0

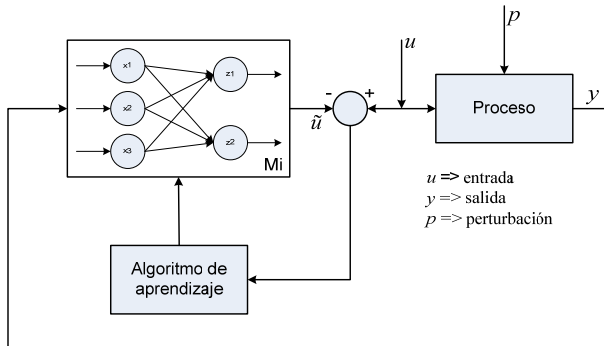


Fig. 3 Esquema del control neuronal por modelo inverso, etapa de entrenamiento.

D. Control por modelo inverso y red neuronal

La técnica del modelo inverso, cuando se utiliza y se ajusta apropiadamente, es una base muy poderosa para el diseño de sistemas de control eficaces [7][8].

El desarrollo de controles empleando redes neuronales es comúnmente utilizado para controlar procesos dinámicos y cambiantes debido a su ventaja en cuanto a que no es necesario conocer el modelo matemático de la planta a controlar, en otras palabras, como resultado de un proceso de aprendizaje establece un mapeo entre los datos de entrada y los de salida.

El control neuronal por modelo inverso se caracteriza porque la red neuronal artificial (RNA) se utiliza como modelo inverso del proceso a controlar. Es decir, se manejan las salidas del proceso como entradas de la RNA y las entradas del proceso son las salidas de la RNA. Usando el esquema neuronal por modelo inverso se desarrollan controles que proporcionan una respuesta adecuada para el proceso a controlar. De este modo, para el entrenamiento de la RNA, los vectores están formados por las salidas del proceso como entradas de la RNA, y las entradas del proceso como salidas de la RNA.

En la Figura 3 se muestra el esquema de control neuronal por modelo inverso durante la etapa de entrenamiento. Se puede observar que la salida del proceso y es empleada como entrada de la RNA. La entrada u del proceso es comparada con la salida \hat{u} de la RNA. Durante el entrenamiento, con el error obtenido por la resta de u y \hat{u} se realiza el ajuste de los pesos de todas las capas de la RNA mediante el empleo del algoritmo de aprendizaje. El ajuste de los pesos se realiza de manera iterativa con todo el conjunto de entrenamiento para que el control tenga una adecuada respuesta. El aprendizaje de la red depende del

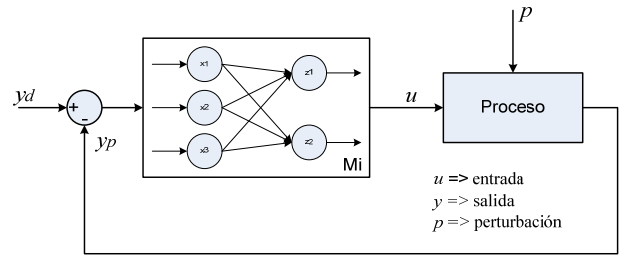


Fig. 4 Esquema del control neuronal por modelo inverso, etapa de recall.

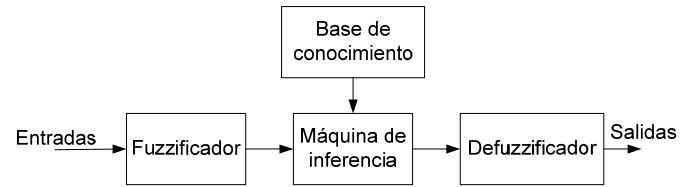


Fig. 5 Elementos de un control difuso.

conjunto de entrenamiento, entre mayor sea el conjunto de entrenamiento, la red tendrá una mejor respuesta en cuanto que su comportamiento se asemeja en mayor medida al modelo inverso del proceso.

En la Figura 4 se muestra el control neuronal por modelo inverso en la etapa de recall. El control es el obtenido después de completar el entrenamiento de la RNA. El error que se genera al realizar la comparación de la salida deseada y_d y la salida real y_p es utilizado como la entrada de la RNA. Con la diferencia de y_d y y_p , la RNA proporciona su salida u. Con el valor de u, el control empieza a corregir el error del proceso ocasionado por las perturbaciones y con ello se obtendrá una mejor respuesta.

E. Control difuso

El control difuso consta de una serie de etapas, como se muestra en la Figura 5. La primera etapa es la fuzzificación que se encarga de la transformación de las variables de entrada, entregadas por el proceso, en variables lingüísticas. Se tiene también un conjunto de reglas difusas que encierran el conocimiento necesario para la solución del problema de control. Otro elemento que integra el control difuso es la máquina de inferencia que realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida. La última parte del control es la defuzzificación de manera que el resultado de la inferencia difusa sea traducido de un concepto lingüístico a una salida física.

El método de defuzzificación empleado para el desarrollo del control difuso fue el del Centroide de Área (CoA), que emplea la ecuación 1.

$$y_d = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} y f(y) dy}{\int_{y_{min}}^{y_{max}} f(y) dy} \quad (1)$$

donde y_d es el valor defuzzificado, y es el valor de la variable lingüística, y_{min} y y_{max} definen el rango de la variable lingüística.

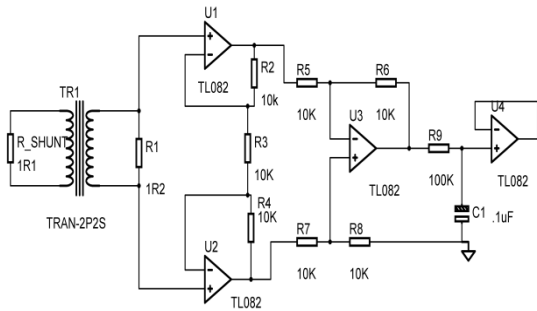


Fig. 6 Circuito para medir la corriente del servomotor.

III. DESARROLLO Y RESULTADOS

A. Desarrollo de la instrumentación

Uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de la red neuronal es el uso del sistema de adquisición y procesamiento de señales.

Para la medición de la corriente, se colocó un resistor shunt de 1Ω en una de las fases del servomotor más pequeño debido a que es el que tiene mayor demanda y exigencia. La conexión del resistor permite medir la corriente de la fase del servomotor por medio de la caída de voltaje respectiva.

Para obtener una adecuada medición del voltaje en el resistor shunt fue necesario realizar un acondicionamiento mediante un amplificador de instrumentación. Además, se le agregó a la salida del amplificador de instrumentación un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 1kHz, para suprimir el ruido de alta frecuencia [9][10]. También se utilizó una etapa de aislamiento entre el resistor shunt y el amplificador de instrumentación para protección de éste.

En la Figura 6 se muestra el diagrama esquemático del circuito desarrollado para medir la corriente en una de las fases del servomotor.

El acelerómetro empleado para realizar la medición de las vibraciones es el MMA7361L de Freescale, el cual tiene como característica principal que proporciona las vibraciones en los tres ejes coordenados. Contiene una terminal que permite elegir entre dos sensibilidades, siendo éstas de 250 mV/g y 800 mV/g (ésta por omisión). Para obtener el conjunto de entrenamiento de las vibraciones, se utilizó la salida del eje z del acelerómetro (Figura 7), debido a que es en este eje donde se presenta la mayor sensibilidad a las vibraciones que ocurren por el desplazamiento del manipulador. Este hecho se constató por medio de una serie de pruebas, en las que se monitorearon las señales correspondientes a los tres ejes, observándose que la del eje z es la más significativa, ya que, por la orientación del acelerómetro, es el eje que coincide con el del movimiento de la articulación.

El acelerómetro se ubicó en el primer eslabón del manipulador (como se muestra en la Figura 8), el cual está conectado directamente al eje del servomotor. Se determinó la colocación del acelerómetro en este punto del manipulador para tener mayor sensibilidad y detectar las pequeñas vibraciones producidas por el sobre esfuerzo del actuador en las posiciones en las que se presenta.

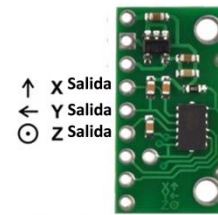


Fig. 7 Orientación de los ejes del acelerómetro.

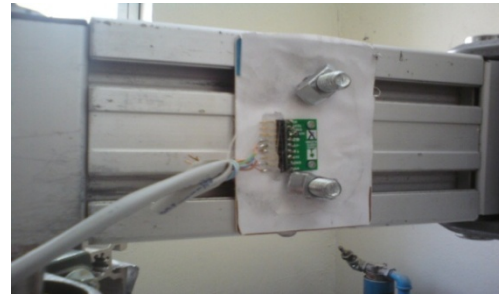


Fig. 8 Montaje del acelerómetro en el manipulador.

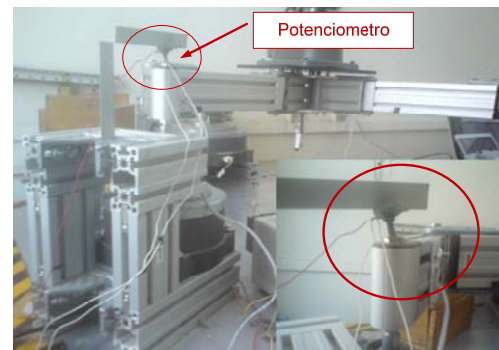


Fig. 9 Montaje del potenciómetro en el manipulador.

Se desarrolló la instrumentación para conocer el ángulo de giro del servomotor A en el transcurso de un movimiento, con el se logró conocer el comportamiento del manipulador en cuanto a la magnitud de las vibraciones y la corriente en función de la posición.

Para conocer el ángulo de giro del servomotor A, se utilizó un potenciómetro lineal de $1K\Omega$ acoplado sobre una de las juntas activas del manipulador, tal como se muestra en la Figura 9.

En la Figura 10 se observan las gráficas correspondientes al ángulo de giro, vibración y corriente del servomotor en el transcurso del movimiento entre dos puntos.

La mayor vibración ocurre en las zonas de aceleración y desaceleración. Esto se corrobora con la mayor demanda de corriente y con el incremento de la vibración al acelerar y al desacelerar en el transcurso del movimiento del servomotor de un punto a otro. Además, se observa que la vibración y la corriente tienen un comportamiento similar en sus formas de onda.

Para poder leer y almacenar los datos de las diferentes variables se utilizó el módulo de adquisición de datos DAQmx USB 6009 (National Instruments). Se creó un instrumento virtual (VI) en LabVIEW, el cual permite realizar la lectura y procesamiento de la corriente, la vibración y la posición [11].

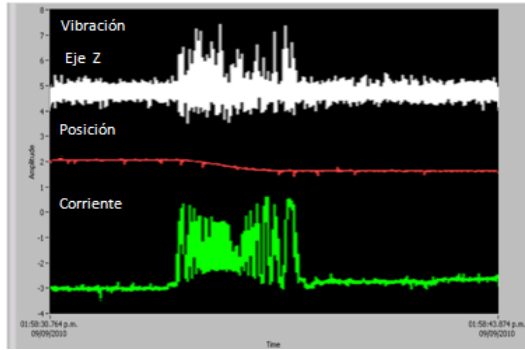


Fig. 10 Interrelación de vibración, corriente y posición.

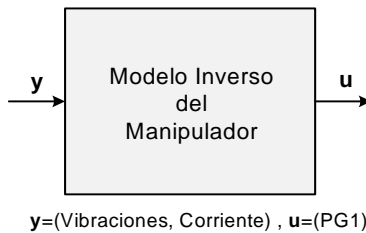


Fig. 11 Modelo inverso propuesto de la RNA.

B. Desarrollo del control por RNA

Se propuso un modelo inverso simplificado del manipulador para observar su comportamiento con respecto al uso de diferentes valores para la ganancia proporcional de posición del servomotor A (PG1), se centró la atención en éste por ser el crítico en cuanto a que por su menor capacidad tiene un mayor nivel de exigencia. En la Figura 11 se muestra el modelo, para el cual las entradas son la corriente y la vibración del servomotor A que conforman el vector y . Como salida se tiene el parámetro PG1 que forma el vector u .

En la Figura 12 se muestra la arquitectura de la RNA utilizada como modelo inverso del manipulador. Como se puede observar, la red consta de dos unidades en la capa de entrada, una capa oculta y una neurona en la capa de salida. Como se verá más adelante, se experimentó con varias cantidades de neuronas en la capa oculta.

Así, la red utilizada es un perceptrón multicapa con una sola capa oculta. El algoritmo de entrenamiento utilizado es el de retropropagación. Se seleccionó como función de activación la sigmoideal, por ser la más adecuada para procesar cambios continuos en señales de entrada bipolares.

Se experimentó con cuatro variantes para la RNA del modelo inverso del manipulador. La diferencia entre ellas es la cantidad de neuronas en la capa oculta, siendo ésta 25, 50, 100 y 300. Para todas ellas se utilizaron como entradas la vibración y la corriente, y como salida el parámetro PG1 del servomotor A. Para el entrenamiento se utilizó una razón de aprendizaje de 0.1 y el método de entrenamiento empleado fue el Levenberg-Marquardt (“trainlm”), que es el que permite la mejor convergencia [12].

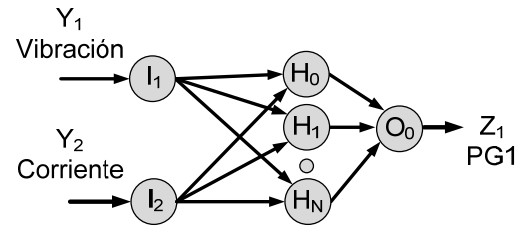


Fig. 12 Arquitectura de la RNA.

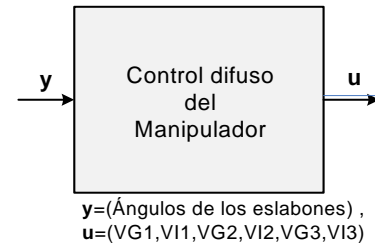


Fig. 13 Modelo del control difuso.

La RNA de 100 neuronas en la capa oculta es la que finalmente se empleó para el desarrollo del control neuronal por modelo inverso. Esta RNA se seleccionó porque tiene la mejor respuesta al entrenamiento, en cuanto a que el error se acerca más rápidamente a la meta propuesta. Otro factor que se consideró para la elección de la RNA es la menor cantidad de neuronas en la capa oculta y el menor tiempo de entrenamiento. La RNA tiene dos unidades de entradas [X_1, X_2], utiliza una capa oculta con cien neuronas [H_1, \dots, H_{100}], y una neurona de salida [Z_1].

C. Desarrollo del control difuso

En la Figura 13 se muestra el control difuso, siendo sus entradas los ángulos de giro de los eslabones, que conforman el vector y . Como salida se tienen los parámetros VG (ganancia proporcional de velocidad) y VI (ganancia integral de velocidad) de los servomotores que forman el vector u .

La estimación de los parámetros del controlador se lleva a cabo por medio de entradas que afectan directamente al comportamiento en el movimiento del manipulador paralelo. Las variables empleadas son: el ángulo existente entre el eslabón motriz y su eslabón adyacente y la medición de la “suavidad” del movimiento mediante la varianza de la aceleración. Estos datos de entrada deben ser fuzzificados, para lo cual se requiere de funciones de membresía que representen los valores lingüísticos de las variables. En la Figura 14 se muestran las funciones triangulares que se utilizaron para este propósito en el sistema difuso [13], la gráfica superior muestra la función de membresía para el ángulo y la gráfica inferior la función de membresía de la varianza de la aceleración.

En la Tabla III se muestra la definición lingüística de las entradas del control difuso.

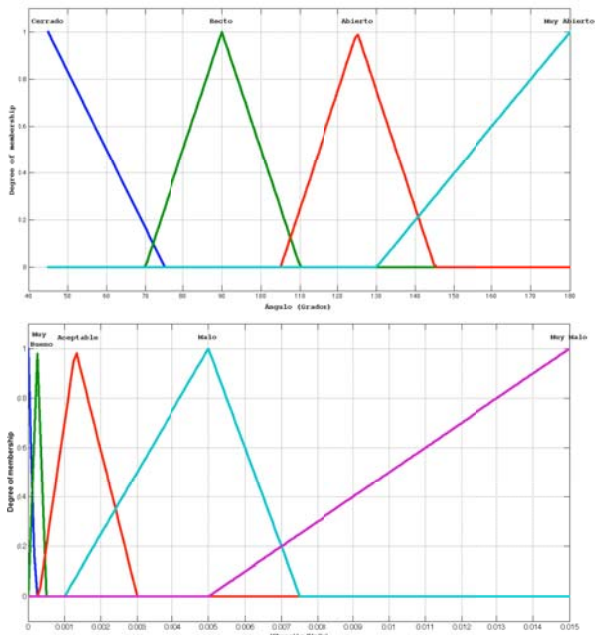


Fig. 14 Variables de entrada.

TABLA III
DEFINICIÓN LINGÜÍSTICA DE LAS ENTRADAS DEL CONTROL DIFUSO

Ángulo (grados)		Vibración (volts)	
Cerrado	45° a 75°	Excelente	0 a 2E-5
Recto	70° a 110°	Muy bueno	1E-5 a 5E-4
Abierto	105° a 135°	Aceptable	3E-4 a 0.003
Muy abierto	130° a 180°	Malo	0.001 a 0.0075
		Muy malo	0.005 a 0.015

TABLA IV
REGLAS DE CONTROL

Varianza	Ángulo			
	Cerrado	Recto	Abierto	Muy abierto
Excelente	VIB/VGB	VIB/VGB	VIR/VGR	VIR/VGR
Muy bueno	VIR/VGR	VIR/VGM	VIM/VGM	VIM/VGM
Aceptable	VIM/VGM	VIM/VGM	VIM/VGA	VIA/VGA
Malo	VIA/VGA	VIA/VGA	VIE/VGE	VIE/VGE
Muy malo	VIE/VGE	VIE/VGE	VIE/VGE	VIE/VGE

Un ángulo cercano a los 90° es el ideal para la aplicación del par del motor que produzca el movimiento en la trayectoria, ángulos cercanos a los 180° son los menos favorables para dicha tarea, ya que el torque motriz de los demás servomotores se verá aplicado sobre el eje del servomotor donde sus eslabones forman un ángulo de 180°.

En el caso de las varianzas de la aceleración, es lógico considerar que una varianza cercana a cero implica que hay un mejor comportamiento en el manipulador paralelo. Por este motivo y con ayuda de las pruebas realizadas con los

TABLA V
VALORES LINGÜÍSTICOS DE LOS PARÁMETROS DE SALIDA

Parámetro VG		Parámetro VI	
VGB	VG Baja	VIB	VI Baja
VGR	VG Regular	VIR	VI Regular
VGM	VG Media	VIM	VI Media
VGA	VG Alta	VIA	VI Alta
VGE	VG Excesiva	VIE	VI Excesiva

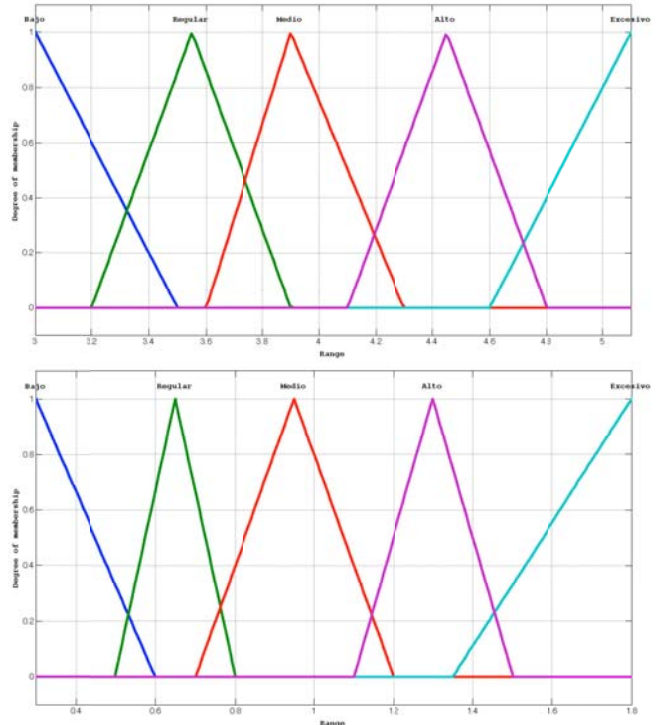


Fig. 15 Funciones de membresía de las salidas para el servomotor A.

servomotores desacoplados y de la prueba del manipulador sin el control de velocidad, se determinó que valores de la varianza por debajo de 2E-5 (las unidades de la varianza son volts por las características de los acelerómetros) serían excelentes para la valoración numérica de un buen comportamiento del manipulador paralelo; mientras que valores por arriba de 0.005 se considera que corresponden a un comportamiento desequilibrado y perjudicial.

La Tabla IV muestra las reglas de control. Contiene como antecedentes la varianza de la aceleración y el ángulo de los eslabones. Como consecuentes se tienen las ganancias proporcional e integral de velocidad.

En la Tabla V se muestran los valores lingüísticos de las variables de salida, es decir la ganancia proporcional de velocidad (VG) y la ganancia integral de velocidad (VI).

Las funciones de membresía para las salidas se presentan gráficamente en las Figuras 15, 16 y 17. La primera corresponde a los parámetros del servomotor A, la segunda a los del servomotor C y la última a los del servomotor C. En cada una de

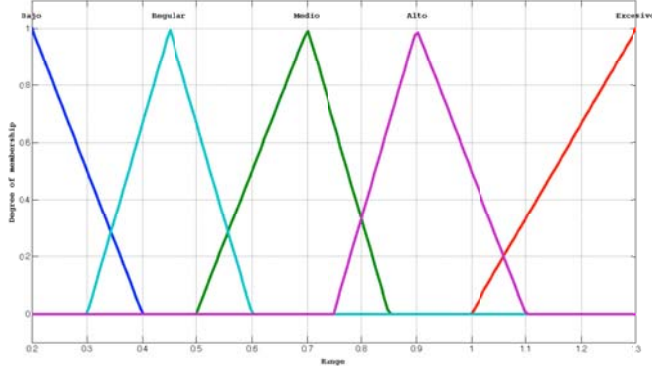
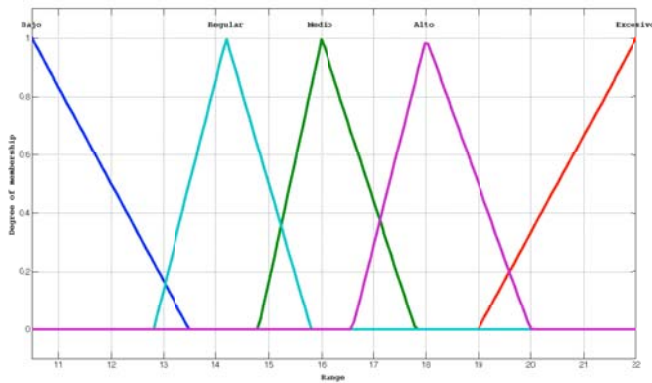


Fig. 16 Funciones de membresía de las salidas para el servomotor B.

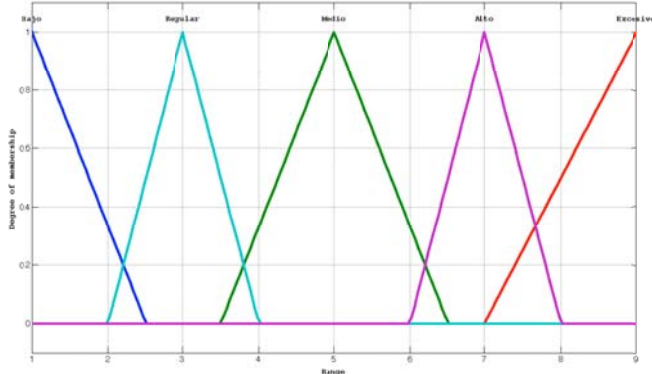
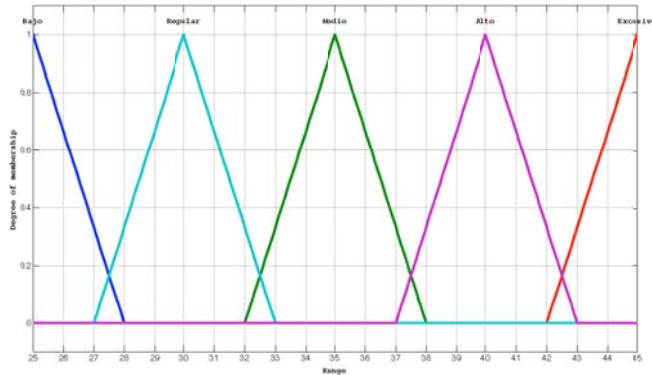


Fig. 17 Funciones de membresía de las salidas, servomotor C.

las figuras, la gráfica superior muestra las funciones para la ganancia proporcional de velocidad y la inferior para la ganancia integral.

TABLA VI
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

	RNA			Lógica Difusa		
	Varianza sin control	Varianza con control	Razón de mejora %	Varianza sin control	Varianza con control	Razón de mejora %
ServomotorA	0.3513	0.2138	39.12	0.00700	.00160	77.14
ServomotorB	0.3772	0.2386	36.73	0.0270	.00280	89.62
ServomotorC	0.2874	0.1823	36.54	0.0070	.00480	31.42
Promedio	0.3386	0.2115	37.46	0.0346	0.0025	66.06

D. Resultados

En la Tabla VI se presenta la comparación de los resultados de la experimentación usando los dos controles tomando como base el desempeño del manipulador usando como indicador la varianza de las vibraciones en cada uno de los servomotores. Se compara la varianza obtenida usando valores constantes para los parámetros de operación de los servomotores (columnas 2 y 5 de la tabla) contra la que se produce al modificar dinámicamente los parámetros (columnas 3 y 6), a partir de esta comparación se calcula la razón de mejora (columnas 4 y 7).

Con el conocimiento del comportamiento del manipulador se pudo establecer como variables de entrada de la RNA la vibración y la corriente del servomotor Tomando como referencia los valores obtenidos para la varianza en las vibraciones del manipulador, la implementación del modelo inverso simplificado del manipulador con base en una red neuronal redujo la vibración en un 37.46% en todos los servomotores, como valor promedio. Asimismo, mejoró el comportamiento del servomotor de menor capacidad, logrando una reducción de 39.12% en la vibración.

Para el control difuso se propusieron como variables de entrada la vibración de cada una de las articulaciones activas del manipulador. Como salidas los parámetros VG y VI de cada servomotor. Tomando como referencia los valores obtenidos para la varianza en las vibraciones del manipulador, la incorporación del control difuso redujo la vibración en un 66% en todos los servomotores, como valor promedio.

IV. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo se propuso un control neuronal y uno con lógica difusa que mejorara el desempeño de un manipulador planar paralelo 3RRR. Para el desarrollo de ambos controles fue necesario diseñar la instrumentación y realizar pruebas experimentales sobre el manipulador que permitieran obtener la información del comportamiento de cada uno de los servomotores.

El desarrollo de la instrumentación del manipulador permitió ampliar el conocimiento del comportamiento del manipulador como respuesta a los cambios en los valores de los parámetros de control. Más precisamente, la instrumentación permitió medir la posición, la vibración y la corriente del servomotor en el transcurso del movimiento. Como era de esperarse, la mayor

vibración ocurre en las regiones de aceleración y desaceleración del perfil trapezoidal.

Como síntesis, la estructura del control difuso empleado, conjuntamente con la elección del parámetro de control proporcional de velocidad y control integral de velocidad, ayudó a mejorar significativamente el comportamiento del manipulador en lo que a su estabilidad se refiere.

Los trabajos futuros que se consideran de relevancia son desarrollar una RNA que también realice el modelo inverso del manipulador empleando la corriente y la vibración de cada uno de los tres servomotores y emplear como parámetros de salida los mismos del control difuso.

REFERENCIAS

- [1] Richard A. J., Diseño y construcción de un manipulador híbrido controlado por computadora, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Tecnológico de Celaya, 2008.
- [2] Kang B, Mills J. K., Dynamic Modeling and Vibration Control of High Speed Planar Parallel Manipulator, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Noviembre 2001.
- [3] Cho G-B, Kim P-H, A precise control of AC servo motor using neural network PID controller, *Current Science*, Vol. 89, No. 1, Julio 2005.
- [4] Kariyappa B. S., Uttara-Kumari M., FPGA Based Speed Control of AC Servomotor Using Sinusoidal PWM, *International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 8, No. 10, Octubre 2008.
- [5] Kariyappa B. S., Hariprasad S. A., Nagaraj R., Position Control of an AC Servo Motor using VHDL & FPGA, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 49, No. 10, Enero 2009.
- [6] NSK, MEGATORQUE® MOTOR SYSTEM User s Manual (ESA23 Driver Unit System), C20053-06.
- [7] Gerasimov D.N., Javaherian H., Nikiforov V.O., Data Driven Inverse-model Control of SI Engines, *American Control Conference*, Julio 2011.
- [8] Pupkov K.A., Egupov N.D., Gavrilov A. I., Methods of Robust, Neuro-Fuzzy and Adaptive Control, *Bauman MSTU Publ*, Moscú 2001.
- [9] Pertence A., Filtros activos: fundamentos, en *Amplificadores operacionales y filtros activos: Teoría, proyectos y aplicaciones prácticas*, 1ª Edición, España: Mc-Graw Hill, 1991.
- [10] Franco S., Circuito con retroalimentación resistiva, en *Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos*, 3ª Edición, México DF, McGraw Hill, 2005.
- [11] Bishop R., LabVIEW student edition 6i Upper Saddle River, 1ª Edición, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2009.
- [12] The MathWorks, Neural Networks Toolbox, 3.6, 2008.
- [13] Álvarez T. E., Ajuste de parámetros del control de velocidad en un manipulador paralelo mediante un sistema de lógica difusa, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Tecnológico de Celaya, 2010.
- [14] Maestría en Ciencias, Instituto Tecnológico de Celaya, 2010.



Marcos Villaseñor Aguilar. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en Junio del 2011. (e-mail: marcosjesus1982@hotmail.com).



Erik de Jesús Álvarez Torres. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Celaya en Abril del 2010 (e-mail: erik_alto@hotmail.com).



Agustín Ramírez Agundis. En 2008 obtuvo el grado de Doctor en Diseño de Sistemas Digitales por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es profesor-investigador del Instituto Tecnológico de Celaya, su trabajo se orienta a la instrumentación de máquinas industriales y sistemas hardware basados en redes neuronales (e-mail: agustin_ramirez@itcelaya.edu.mx).



Horacio Orozco Mendoza. Posee el título de Ing. Industrial Mecánico por el Instituto Tecnológico de Celaya, el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecánica por el ITESM y el grado de Doctor en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Texas en el año 2000. Desde 1983 es Profesor-investigador de tiempo completo del Dpto. de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya. Su principal área de interés es la de Sistemas Dinámicos y Control (e-mail: horacio.orozco@itcelaya.edu.mx).



José Alfredo Padilla Medina. Obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica en 1992 por el Instituto Tecnológico de Celaya y en 2003 el grado de Doctor en Ciencias (Óptica) por el Centro de Investigaciones en Óptica. Ha realizado cerca de 20 publicaciones en revistas indexadas y en congresos internacionales. Desde el 2002 es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya donde desarrolla investigaciones en las áreas de controladores difusos, sistemas de visión y teoría ROC (e-mail: alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx).