

# Control descentralizado de un vehículo guiado automáticamente por redes neuronales artificiales

Fernando Martínez Ramírez, Carlos D. García Beltrán, Gerardo V. Guerrero Ramírez, Manuel Adam Medina, Carlos M. Astorga Zaragoza  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira Cuernavaca, Morelos. C.P. 62490  
f.martinez@cenidet.edu.mx

**Resumen**—En este artículo se presenta un algoritmo de control utilizando la técnica de Block Control en conjunto con un identificador neuronal basado en una Red Neuronal de Alto Orden, un Vehículo Guiado Automáticamente es utilizado para aplicar la técnica de control. Los resultados obtenidos en simulación e implementación son presentados.

**Palabras clave:** control automático, redes neuronales, robótica, vehículo guiado automáticamente.

## I. INTRODUCCIÓN

EL control de robots ha sido de gran interés debido al gran avance que se tiene en diversas disciplinas la electrónica y computación.

Los robots móviles son máquinas que se trasladan mediante rodamientos o extremidades flexibles controladas, pueden implementar capacidades de aprendizaje y de tipo evolutivo, lo que le puede llevar a reconocer y aprender ante las situaciones que se les presenten en su interacción con el mundo que les rodea [1]. Se entiende como autonomía de un robot móvil, al dominio que tiene éste para terminar su curso de acción, mediante su propio proceso de razonamiento basado en sensores que le permiten percibir el espacio de trabajo.

En este trabajo se hablará particularmente del Vehículo Guiado Automáticamente (VGA por sus siglas en español) tipo Two Wheel Mobile Robot (TWMR, por sus siglas en inglés); estos tipos de robots son utilizados en la industria para cargar cosas que pueden ser peligrosas o muy pesadas para un ser humano, y trasladarlas de un punto a otro. Comúnmente la trayectoria que siguen siempre es la misma y se encuentra prediseñada. El seguimiento de trayectorias se puede definir como la sucesión de la posición de un robot que permite llevarlo de un estado actual a uno siguiente de acuerdo a lo deseado; entendiéndose como estado a la descripción de la ubicación del robot referenciado a un marco absoluto generalmente expresado por la combinación de la coordenadas cartesianas del centro del robot o un punto específico de éste, y la posición angular del eje principal [2]. La configuración que adquiere la trayectoria deseada se define por la geometría del robot, así como sus restricciones de movimiento.

Se han propuesto diversos esquemas de control para el problema de seguimiento de trayectoria para un VGA tipo TWMR; en [3] hace uso de técnicas difusas; en [4] y [5] se utiliza el análisis de Lyapunov; en [6] se presenta un esquema de control robustos  $H_\infty$ ; en [7] presentan un método de control llamada “artificial potentialtrech” el cual se basa en las relaciones del gradiente de la potencia total del robot.

El VGA es un sistema no-holonómico, es decir que tiene un número menor de grados de libertad controlables respecto al número de grados de libertad total. Para el caso particular del tipo TWMR el número total de grados de libertad son 3 (posición  $x$ ,  $y$ , más su orientación  $\varphi$ ), sin embargo únicamente se puede controlar el desplazamiento hacia adelante y hacia atrás así como su orientación, quedando como incontrolable el desplazamiento transversal.



Figura 1. VGA – Cenidet

El VGA utilizado en este trabajo se muestra en la figura 1 al cual se le llamara VGA-Cenidet. Se considera que el modelo matemático y sus parámetros son desconocidos; mientras que los estados del sistema están disponibles, esto hace que se tenga que realizar una identificación al sistema.

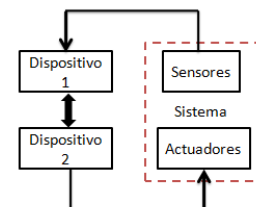


Figura 2. Distribución del algoritmo de control

El algoritmo para realizar el control se divide en dos partes en: una parte la identificación del sistema y en la segunda parte el control; esto se realiza con dos dispositivos que se encuentran intercomunicados dentro del VGA-Cenidet. Como se muestra en la figura 2, en el primer dispositivo recibe toda la información de los sensores del sistema y el segundo dispositivo se encarga de realizar las acciones de control hacia los actuadores del sistema.

## II. IDENTIFICADOR NEURONAL

Las redes neuronales artificiales (RNA) son mecanismos de procesamiento paralelo de datos. Las cuales presentan beneficios: en cuestión de control, identificación de sistemas y otras aplicaciones, como: procesamiento distribuido en paralelo, tolerancia a fallas, capacidad adaptativa, robustez a incertidumbres [8] y [9].

Para tareas de control se usan diversas extensiones del modelo de primer orden de Hopfield llamado Redes neuronales recurrentes de alto orden (RHONN por sus siglas en inglés), que presentan una mayor interacción entre las neuronas, que son propuestas en [10] y [8].

Considerando el problema de identificación de un sistema no lineal de la forma:

$$x(k+1) = F(x(k), u(k)) \quad (1)$$

Donde  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^m$  y  $F \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$  son funciones no lineales. El modelo general de una RHONN en tiempo discreto en su representación serie-paralelo para la identificación de un sistema no lineal, esta dado según [Rovithakis'00] por:

$$\hat{x}_i(k+1) = \omega_i^T Z_i(x(k), \sigma(k)) + g_i e_i(k) \quad (2)$$

Donde  $\hat{x}_i$  es la estimación del estado,  $g_i$  es una ganancia,  $Z_i(x(k), \sigma(k))$  está definida en (3) y (4),  $\omega_i^T$  son los pesos sinápticos y el error se define como  $e_i = x_i(k) - \hat{x}_i(k)$ . Con la suposición de que se conoce todo el estado del sistema a identificar [9]. Cabe mencionar que los pesos sinápticos son calculados en línea, cada iteración son nuevos valores y para ellos se hace uso del Filtro del Kalman extendido (FKE por sus siglas).

$$Z_i(\hat{x}(k), \sigma(k)) = \begin{bmatrix} z_{i_1} \\ z_{i_2} \\ \vdots \\ z_{i_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \prod_{j \in I_1} \xi_{ij}^{dij} \\ \prod_{j \in I_2} \xi_{ij}^{dij} \\ \vdots \\ \prod_{j \in I_L} \xi_{ij}^{dij} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \xi_{i_1} \\ \vdots \\ \xi_{i_n} \\ \xi_{i_{n+1}} \\ \vdots \\ \xi_{i_{n+m}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(x_1) \\ \vdots \\ S(x_n) \\ S(\sigma_1) \\ \vdots \\ S(\sigma_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S(\zeta) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta\zeta)}, \quad \beta > 0$$

El FKE que se utiliza para el entrenamiento de la red es de la forma:

$$\begin{aligned} K_i(k) &= P_i(k) H_i(k) \left[ R_i(k) + H_i^T(k) P_i(k) H_i(k) \right]^{-1} \\ \omega_i(k+1) &= \omega_i(k) + \eta_i K_i(k) e_i(k) \\ P_i(k+1) &= P_i(k) - K_i(k) H_i^T(k) P_i(k) + Q_i(k) \\ H_i(k) &= \frac{\partial \hat{x}_i}{\partial \omega_j} \end{aligned} \quad (5)$$

Comúnmente  $Q_i(0)$ ,  $R_i(0)$ ,  $P_i(0)$  son inicializadas en diagonal y  $Q_i$ ,  $R_i$  contienen valores fijos durante todo el proceso de identificación. Es importante mencionar que los valores que se seleccionan como valores iniciales de estos se calculan de forma heurística así como las ganancias  $g_i$  y los parámetros  $\eta_i$ ,  $\omega_i(0)$  se inicializan con valores aleatorios.

Cabe mencionar que es posible tener un FKE por cada estado a estimar así también se puede tener una para todo el estado [11].

## III. BLOCK CONTROL

La técnica llamada Block Control (BC por sus siglas), es un método de control donde se hace uso de modos deslizantes. Se requiere para hacer uso de este control que el sistema se encuentre en forma controlable por bloques. Los problemas de diseño de control deslizante de sistemas complejos son regidos por ecuaciones diferenciales no lineales que se pueden desglosar en un conjunto de subproblemas de control independientes de menores dimensiones con los mismos estados, la idea es utilizar los estados de cada bloque como un control ficticio del bloque anterior [12].

Esta técnica es fácil de aplicar ya que contiene una forma canónica para ver el modelo del sistema [12], [13], [9] y [14] presenta la técnica de BC con unión de otras técnicas para resolver el seguimiento de trayectorias en un motor de inducción, [15] presentan el uso de la técnica de BC para el





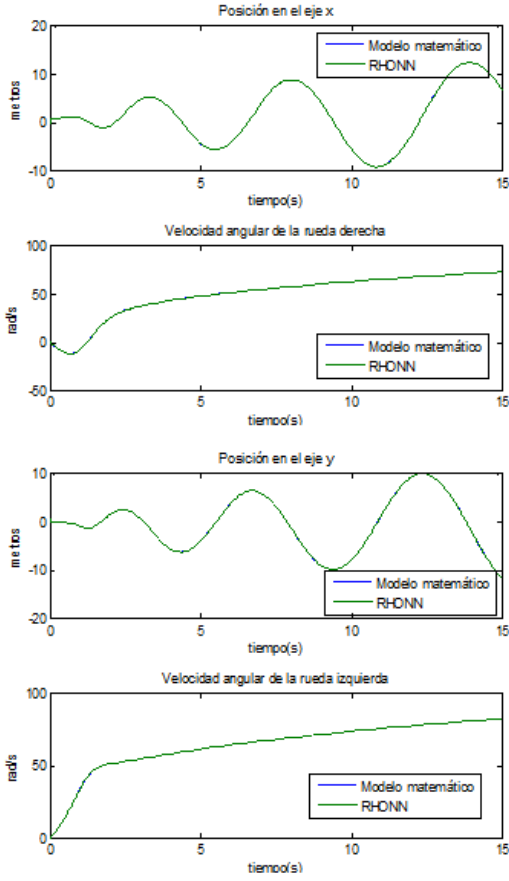


Figura 3. Identificación neuronal del modelo del VGA generalizado. En orden de arriba abajo: Posición en el eje  $x$ , velocidad angular de la llanta derecha, posición en el eje  $y$  y velocidad angular de la llanta izquierda.

El sistema (23) se puede reescribir como:

$$\begin{aligned}
 \tilde{x}(k+1) &= f_x(x(k)) + B_x V \\
 \tilde{y}(k+1) &= f_y(y(k)) + B_y V \\
 \tilde{\theta}_d(k+1) &= f_{\theta_d}(\theta_d(k)) + B_{\theta_d} V \\
 \tilde{\theta}_i(k+1) &= f_{\theta_i}(\theta_i(k)) + B_{\theta_i} V \\
 \tilde{v}_1(k+1) &= f_{v_1}(V, \Theta) + B_{v_1} u \\
 \tilde{v}_2(k+1) &= f_{v_2}(V, \Theta) + B_{v_2} u \\
 V &\in \mathfrak{R}^2, \quad \Theta \in \mathfrak{R}^2, \quad u \in \mathfrak{R}^2, \\
 B_x, B_y, B_{\theta_d}, B_{\theta_i}, B_{v_1}, B_{v_2} &\in \mathfrak{R}^{1 \times 2}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Se requiere llevar el sistema a una forma controlable a bloques para poder aplicar la técnica del BC. Por lo que se tiene:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= f_1(x_1(k)) + B_1 x_2 \\
 x_2(k+1) &= f_2(x_1(k), x_2(k)) + B_2 u
 \end{aligned} \tag{25}$$

Donde

$$f_1 = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_{\theta_d} \\ f_{\theta_i} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_{\theta_d} \\ B_{\theta_i} \end{bmatrix}, f_2 = \begin{bmatrix} f_{v_1} \\ f_{v_2} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B_{v_1} \\ B_{v_2} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

Ya con esto se aplica el procedimiento del BC y se tiene la transformación:

$$\begin{aligned}
 z_1(k) &= x_1(k) - \omega_1(k) \\
 z_2(k) &= f_1(x_1(k)) + B_1 x_2 - \omega_1(k+1) - k_1 z_1
 \end{aligned} \tag{26}$$

Y la ley de control es:

$$u = -U_0 \sin g(\bar{z}_2) \rightarrow \bar{z}_2 = (B_1 B_2)^T z_2 \tag{27}$$

Se aplica esta ley de control al sistema y los resultados se muestran en la figura 4.

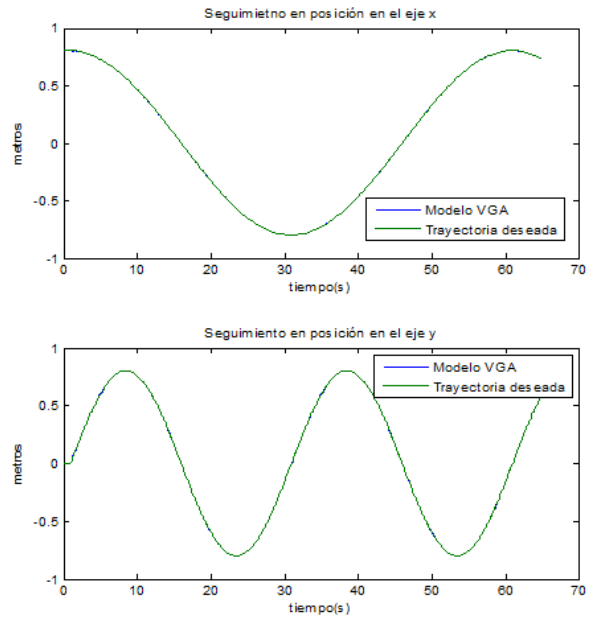


Figura 4. Seguimiento de trayectorias usando BC en conjunto con RHONN a un modelo de un VGA generalizado en simulación. Parte superior seguimiento de la posición del eje  $x$  y en la parte inferior seguimiento de posición en el eje  $y$ .

## VI. IMPLEMENTACIÓN

Con los mismos modelos que se proponen en Simulación se realiza pruebas con la maqueta VGA-Cenidet, y los resultados de identificación se muestran en la figura 5 y los resultados de control se muestran en la figura 6.

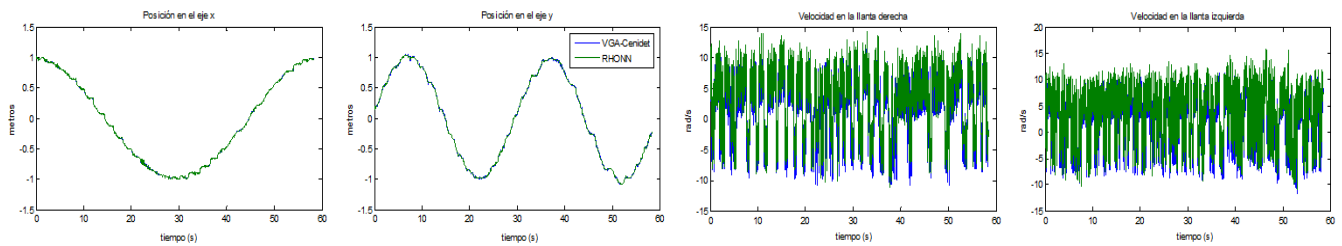


Figura 5. Identificación neuronal del VGA-Cenidet en lazo cerrado. De izquierda a derecha: Posición angular del eje  $x$ , posición angular del eje  $y$ , velocidad angular de la llanta derecha y velocidad angular de la llanta izquierda.

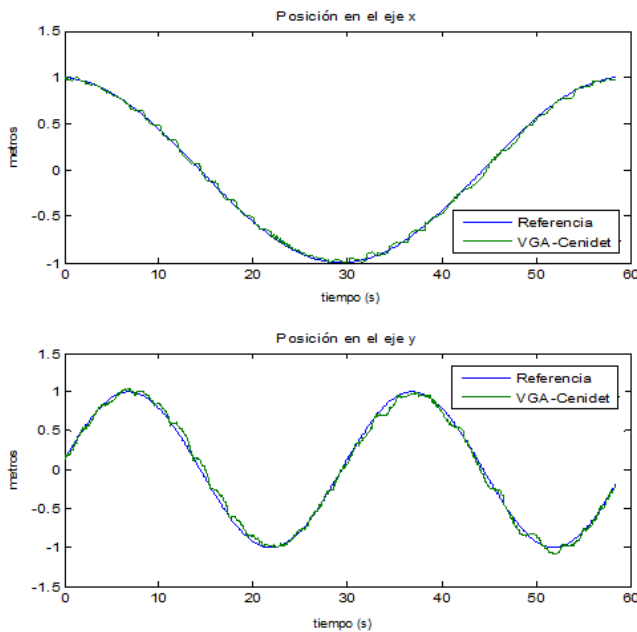


Figura 6. Seguimiento de trayectoria del VGA-Cenidet. Parte superior seguimiento de la posición del eje  $x$  y en la parte inferior seguimiento de posición en el eje  $y$ .

## VII. Conclusiones

Se logró identificar un VGA del que se desconoce el modelo matemático así como sus parámetros, con un modelo neuronal tipo RHONN que se ha propuesto basado en un modelo de un VGA generalizado.

La técnica del BC fue capaz de seguir la trayectoria deseada del modelo generalizado del VGA en simulación.

El VGA-Cenidet fue capaz de seguir la trayectoria propuesta con el BC en conjunto con la RHONN.

## Referencias

- [1] A. B. Ollero, "Robotica Manipuladores y Robots Móviles", Libro de texto, España, 2001.
- [2] J. G. V. E. Freire, M. Molina Becerra, "Comportamiento dinámico de un sistema no holónomo: El sistema de Heisenberg modificado", XXI Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicadas, pp. 1-8, 2009.
- [3] S.-H. T. Ming-Ying Hsiao, Tzuu-Hseng S. Li, Kai, Chi-Hua Liu, "The Design of Interval Type-2 Fuzzy Kinematic Control and Interval Type-2 Fuzzy Terminal Sliding- Mode Dynamic Control of the Wheeled Mobile Robot", Proceedings of the 2009 IEEE International

Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1045 - 1050, Octubre 2009.

- [4] T. U. Kazuo Tsuchiya, Katsuyoshi Tsujita, "A Motion Control of a Two-Wheeled Mobile Robot", IEEE Transactions Automatic Control, pp. 690 - 696, 1999.
- [5] Z. Li, "Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Mobile Robot Based on Neuronal Networks", IEEE Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 1077-1081, 12-15 July 2009 2009.
- [6] G. K. K. M. J. Yazdanpanah, "Robust Control of Mobile Robots Using the Computed Torque Plus  $H_{\infty}$  Compensation Method", Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2920-2925, 2003.
- [7] J. W. Peter Chen, A. N. Poo, S. S. Ge, "Tracking Control of Mobile Robots and its Application to Formation Control", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 3132-3137, 2008.
- [8] G. A. Rovithakis y M. A. Chitoudoulou, "Adaptive Control with Recurrent High-Order Neural Networks", Springer, London, 2000.
- [9] Edgar N. Sanchez, Alanis Y. Alanis and Alexander G. Loukianov, "Discrete-Time High Order Neural Control", Springer, Berlin, 2008.
- [10] Kumpati S. Narendra and Kannan Parthasarathy, "Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks", IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 1, No. 1, pp. 4-27, March 1990.
- [11] Alma Y. Alanís, "Entrenamiento de redes neuronales con filtro de Kalman" Tesis Maestría Departamento de Electrónica, CINVESTAV, Guadalajara, Mexico, 2004.
- [12] S. Rao, H. Brandtstädter, V. Utkin y M. Buss, "Generalized Block Control Principle", IFAC 2005.
- [13] Alexander G. Loukianov, José M. Canedo, Orlando Serrano, Vadim I. Utkin, Sergey Celikovskiy, "Adaptive Sliding Mode Block Control of Induction Motors", Proceeding of the American Control Conference, Arlington, VA, June 25-27 2001.
- [14] Omar G. Rios Gastelum, B. Castillo Toledo, Alexander G. Loukinov, "Nonlinear Block Integral Sliding Mode Control: Application to Induction Motor Control", Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA, December 2003.
- [15] Héctor Huerta, Alexander Loukianov and José M. Cañedo, "Integral Sliding Modes with Block Control of Multimachene Electronic Power Systems", Systems, Structure and Control, 2008.
- [16] Carlos E. Castañeda, Edgar N. Sanchez, Alexander G. Loukianov, Bernardino Castillo-Toledo "Real-Time Torque Control for a DC Motor Using Recurrent High Order Neural Networks", IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. pp 1809-1814, July 2009.