

# An Embedded Hardware for Implementation of a Tracking Control in WMRs

C. M. Sánchez, R. S. Ortigoza, J. R. G. Sánchez, V. M. H. Guzmán,  
M. A. Cruz, M. M. Aranda and G. S. Ortigoza

**Abstract**—The implementation of a hierarchical controller for the trajectory tracking control of a wheeled mobile robot (WMR) is presented in this work. The experimental development of such a controller is performed with the low-cost embedded hardware Jetson TK1 from NVIDIA. In the programming of the controller, free license software with short learning curve is used. To validate the performance of the embedded hardware, a comparison between the results obtained from the WMR in closed-loop is presented when using: a) the embedded hardware Jetson TK1 and b) the fast prototyping DS1104 board from dSPACE. The experimental results show that the Jetson TK1 board could be suitable for the control of autonomous mechatronic systems.

**Keywords**— Embedded hardware, Jetson TK1, DS1104, Trajectory tracking, Wheeled mobile robot, Hierarchical controller.

## I. INTRODUCCIÓN

LOS recursos de hardware embebido han jugado un papel importante en el desarrollo tecnológico de diferentes áreas del quehacer humano. En la actualidad, tales recursos se han utilizado para brindar una mayor autonomía en robots aéreos [1]-[4], acuáticos [5]-[7] y terrestres [8]-[12]. Esto se ha logrado en conjunto con la implementación de controles para resolver las tareas de regulación [1], seguimiento de rutas [13], navegación [14], evasión de obstáculos [15] y seguimiento de trayectoria [16], entre otras. Siendo la tarea de seguimiento de trayectoria para robots terrestres una de las más estudiadas en la literatura. Así, este trabajo está enfocado en la implementación de un control de seguimiento vía recursos de hardware embebido en robots terrestres; específicamente robots móviles de ruedas (RMRs). Algunos de los trabajos más sobresalientes sobre esta temática son presentados a continuación.

Viet-Tuan *et al.* [17] propusieron un controlador diferencial por modos deslizantes. La implementación experimental se realizó a través de un sistema conformado por siete microcontroladores: un maestro y seis esclavos. Por su parte, Duy y Myung-Eui [18] diseñaron un control en el que se proponen las velocidades lineal y angular del RMR. Su implementación experimental se realizó utilizando un

microcontrolador ARM Cortex-M3 con un sistema operativo en tiempo real (RTOS). Mientras que Hongjun y Byung-Koo [19], estudiaron el problema de generación de trayectorias con mínima energía para un robot omnidireccional. La implementación del algoritmo se llevó a cabo con una tarjeta EZ-X5 de Falinux y el sistema operativo (SO) Ubuntu Server. Hedjar y Bounkhel [20] propusieron un algoritmo para resolver el problema de generación de trayectorias en múltiples RMRs. En la realización experimental de mencionado algoritmo, se utilizó un procesador Intel Xscale PXA-270 bajo un SO Linux. Por otro lado, Chih-Lyang y Chin-Yuan [21] presentaron un esquema de control descentralizado basado, a su vez, en tres controles difusos de estructura variable para resolver las tareas de seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos. El control fue implementado en un RMR a través de una PC y un DSP comunicados inalámbricamente. Chih-Yang *et al.* [22] reportaron un control cinemático basado en programación evolutiva y en un control dinámico adaptable difuso por modos deslizantes. En la implementación experimental de la estrategia de control se utilizó una PC y un DSP montado en el robot. Asimismo, Chih-Yang *et al.* [23] propusieron un control dinámico adaptable basado en modos deslizantes. En la realización experimental se utilizó una PC, mediante la cual se enviaron los comandos del control a un DSP montado en el RMR. Mientras tanto, Hsiang-Chen *et al.* [24] diseñaron un control de seguimiento basado en un esquema adaptable no lineal, cuya implementación se llevó a cabo a través de un dsPIC. Por su parte, Hsu-Chih *et al.* [25] presentaron un controlador de movimiento adaptivo para las tareas de seguimiento de trayectoria y estabilización para un robot móvil omnidireccional. El controlador se implementó en una FPGA Altera Stratix la cual incorpora un RTOS. En [26], Hsu-Chih propuso un controlador inteligente, basado en un algoritmo de sistema inmunológico artificial, para resolver la tarea de seguimiento y estabilización en robots omnidireccionales. El controlador fue implementado mediante una FPGA Altera y un RTOS. Otro trabajo, en la solución de la tarea de seguimiento de trayectoria, fue introducido por Oryschuk *et al.* [27], donde realizaron tanto el diseño de un control lineal así como su implementación experimental en un RMR utilizando una tarjeta WEECS de Quanser.

C. M. Sánchez, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, Estado de México, México/ Área de Mecatrónica, CIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, celso-marquez@hotmail.com

R. S. Ortigoza, Área de Mecatrónica, CIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, rsilvao@ipn.mx

J. R. G. Sánchez, Área de Mecatrónica, CIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, jrgs\_ipn@hotmail.com

V. M. H. Guzmán, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., México, vmhg@uaq.mx

M. A. Cruz, Área de Mecatrónica, CIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, mayra.antonio.cruz@gmail.com

M. M. Aranda, SEPI, UPIICSA, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, mmarcelino@ipn.mx

G. S. Ortigoza, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue., México, gsilva@fcfm.buap.mx

Corresponding author: Ramón Silva Ortigoza

De acuerdo con la revisión de la literatura anteriormente presentada, se encontró que la implementación experimental de estrategias de control que resuelven la tarea de seguimiento de trayectoria en RMRs, se ha realizado vía hardware embebido basado en diferentes tecnologías. Por ejemplo, microcontrolador [17]-[20], DSP [21]-[24], FPGA [25], [26], entre otras [27]. Relativo a la programación del hardware embebido, en estos trabajos se encontró: i) que la mayoría de los aportes requieren software con licencia, donde algunos no utilizan computadoras [17], [18], y otros si [21]-[26]; y ii) que pocas contribuciones hacen uso de software libre y no requieren de una computadora [19], [20].

Por lo anterior, este trabajo aborda la implementación de un control que soluciona la tarea de seguimiento de trayectoria de un RMR diferencial vía un hardware embebido de bajo costo. Este hardware embebido tiene la característica de no requerir de una computadora para su programación. En la programación del control se emplea lenguaje Python y el SO Ubuntu; ambos de licencia libre. Para evaluar el desempeño del hardware embebido se presenta una comparación de los resultados experimentales en lazo cerrado cuando se emplea: a) el hardware embebido Jetson TK1 y b) la tarjeta de prototipado rápido DS1104 de dSPACE. Esto con la intención de mostrar

que la tarjeta Jetson TK1 logra un desempeño similar al de la tarjeta DS1104, y en consecuencia es útil para dotar de mayor autonomía a un RMR.

El resto del trabajo se divide de la siguiente forma. En la Sección II se presenta el controlador jerárquico que resuelve la tarea de seguimiento de trayectoria en un RMR. La generalidad de implementación del controlador vía la tarjeta Jetson TK1 se describe en la Sección III. Mientras que los resultados experimentales se reportan en la Sección IV. Finalmente, las conclusiones del trabajo se dan en la Sección V.

## II. CONTROLADOR JERÁRQUICO PARA LA TAREA DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA

En esta sección se presentan dos controles independientes.

Uno para el modelo cinemático del RMR (nivel alto), el cual se desarrolló en [28], y otro para los actuadores del robot (nivel bajo). La integración de estos controles, vía un esquema de control jerárquico [16], [29]-[31], permite ejecutar la tarea de seguimiento de trayectoria en el RMR. Los componentes del controlador jerárquico son:

- 1) Control del nivel alto. Es un control cinemático que logra resolver la tarea de seguimiento de trayectoria en el RMR.
- 2) Control del nivel bajo. Consta de dos controles PI que permiten a los motores seguir los perfiles de velocidad angular impuestos por el nivel alto.

### Control del nivel alto

El control aquí presentado tiene como objetivo lograr que un RMR siga una trayectoria deseada impuesta por un RMR de referencia. El robot bajo estudio se desplaza en el plano  $XY$ , ver Fig. 1. En dicha figura  $(x, y)$  representa la posición del punto medio del eje que une las dos ruedas,  $\varphi$  la orientación del RMR,  $r$  es el radio de las ruedas y  $2l$  es la separación entre ellas. Mientras que  $\omega_d$  y  $\omega_i$  son las velocidades angulares de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente. Además,  $v$  es la

velocidad lineal y  $\dot{\varphi}$  la velocidad angular del RMR.

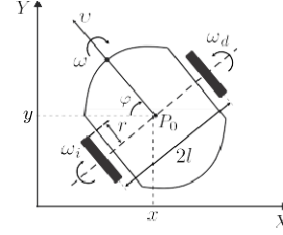


Figura 1. RMR tipo diferencial.

De acuerdo con [32], el modelo cinemático del RMR está dado por,

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \varphi, \\ \dot{y} &= v \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \omega,\end{aligned}\quad (1)$$

donde

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

Mientras que el robot de referencia se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{x}^* &= v^* \cos \varphi^*, \\ \dot{y}^* &= v^* \sin \varphi^*, \\ \dot{\varphi}^* &= \omega^*,\end{aligned}\quad (3)$$

siendo  $(x^*, y^*, \varphi^*)$  la trayectoria deseada que debe seguir el robot real,  $v^*$  y  $\omega^*$  son las entradas de referencia del robot. Además, se definen las siguientes señales de error:

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \cos \varphi & x_2 \sin \varphi & 0 \\ -x_2 \sin \varphi & x_2 \cos \varphi & \varphi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^* - x \\ y^* - y \\ \varphi^* - \varphi \end{pmatrix}, \quad (4)$$

donde  $x_2$  y  $\varphi$  son constantes positivas. Nótese que el determinante de la matriz de esta expresión es igual a  $x_2^2$ , i.e., la matriz es globalmente no singular. Al calcular la derivada con respecto al tiempo de (4), tras utilizar (1) y (3), se tiene:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_2 \dot{\varphi} \sin \varphi & x_2 \dot{\varphi} \cos \varphi & 0 \\ 0 & -x_2 \dot{\varphi} - \dot{\varphi} & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{x}^* \cos \varphi_3 \\ \dot{y}^* \sin \varphi_3 + \dot{\varphi}^* \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Las siguientes funciones para  $e_1$  y  $e_2$  están definidas en [33]:

$$e_f = \dot{x}^* \cos \varphi_3 + e_1 \varphi_1, \quad (6)$$

$$e_f = \dot{y}^* + \dot{x}^* \varphi_2 e_2 + e_3 \sin \varphi_3, \quad (7)$$

donde  $\varphi_1$  y  $\varphi_3$  son constantes positivas. Para verificar estabilidad en lazo cerrado, en [28] se consideró la función definida positiva siguiente:

$$V(e_1, e_2, e_3) = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + (1 - \cos \varphi_3).$$

Mediante el análisis de la derivada con respecto al tiempo de  $\dot{\mathbf{q}}$  a lo largo de las trayectorias (5), cuando  $\mathbf{q} = \mathbf{q}_f$  y  $\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}_f$ , se demostró estabilidad asintótica de  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) = (0, 0, 0)$ . De esta manera, el control (6)-(7) logra que el RMR siga al RMR de referencia, i.e.,  $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \rightarrow (\mathbf{q}^*, \dot{\mathbf{q}}^*, \ddot{\mathbf{q}}^*)$  cuando  $t \rightarrow \infty$ , debido a que la matriz en (4) es no singular. Asimismo, de acuerdo al análisis de estabilidad realizado en [28] se mostró que  $\mathbf{q} = \mathbf{q}_f$ .

En la implementación experimental de (6)-(7), tras utilizar (2), se encuentra que los perfiles de velocidad angular que los motores de CD deberán seguir, vía los controles PI, son:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}_d \\ \dot{\mathbf{q}}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\bar{\mathbf{q}}} & \frac{1}{\bar{\mathbf{q}}} \\ 1 & -\frac{1}{\bar{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}_f \\ \dot{\mathbf{q}}_f \end{pmatrix}, \quad (8)$$

donde  $\dot{\mathbf{q}}_d$  y  $\dot{\mathbf{q}}_i$  son los perfiles de velocidad angular deseados que deberán seguir las flechas de los motores de CD.

### Control del nivel bajo

Se compone de dos controles PI, los cuales logran que las salidas de los motores  $\dot{\mathbf{q}}_d$  y  $\dot{\mathbf{q}}_i$  sigan a los perfiles deseados  $\dot{\mathbf{q}}_d$  y  $\dot{\mathbf{q}}_i$ , respectivamente. Estos controles están determinados por,

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{p}_d \mathbf{q}_d + \mathbf{i}_d \int_0^t \mathbf{f}(\mathbf{q}_d) dt, \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i + \mathbf{i}_i \int_0^t \mathbf{f}(\mathbf{q}_i) dt, \quad (10)$$

donde  $(\mathbf{p}_d, \mathbf{p}_i)$  y  $(\mathbf{i}_d, \mathbf{i}_i)$  son las ganancias proporcionales e integrales, respectivamente. Mientras que  $\mathbf{q}_d$  y  $\mathbf{q}_i$  son los errores de seguimiento de velocidad angular, definidos por,

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_d &= \dot{\mathbf{q}}_d^* - \dot{\mathbf{q}}_d, \\ \mathbf{q}_i &= \dot{\mathbf{q}}_i^* - \dot{\mathbf{q}}_i, \end{aligned} \quad (11)$$

con

$$(\dot{\mathbf{q}}_d^*, \dot{\mathbf{q}}_i^*) = (\dot{\mathbf{q}}_d, \dot{\mathbf{q}}_i), \quad (12)$$

siendo  $\dot{\mathbf{q}}_d$  y  $\dot{\mathbf{q}}_i$  los perfiles de velocidad angular deseados determinados por (8).

### Integración de los controles del nivel alto y bajo

El control del nivel alto asociado al modelo cinemático del RMR que logra  $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \rightarrow (\mathbf{q}^*, \dot{\mathbf{q}}^*, \ddot{\mathbf{q}}^*)$  quedó determinado por (6)-(7). Tras reemplazar este en (8) se generan los perfiles de velocidad angular deseados que deben seguir las flechas de los motores de CD. Esto último se logra con los controles PI del nivel bajo, (9)-(10), al conseguir  $(\dot{\mathbf{q}}_d, \dot{\mathbf{q}}_i) \rightarrow (\dot{\mathbf{q}}_d, \dot{\mathbf{q}}_i)$ . La integración de los controles de los niveles alto y bajo dan por resultado el controlador jerárquico ilustrado en la Fig. 2.

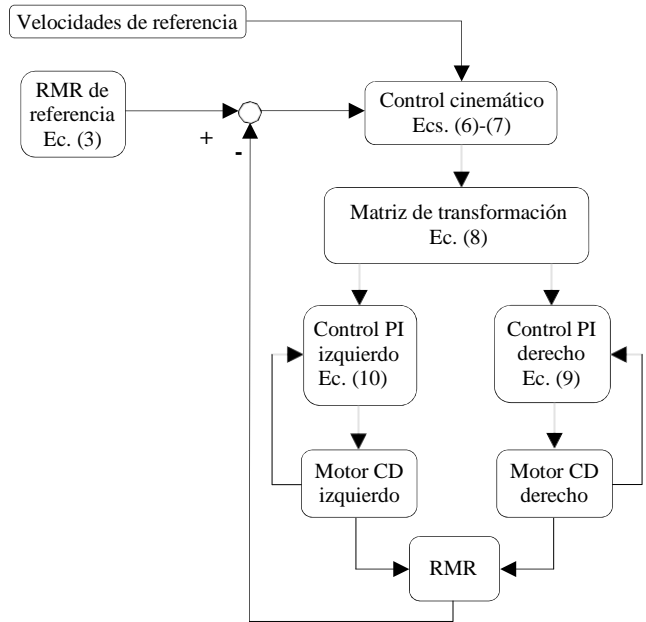


Figura 2. Diagrama a bloques del controlador jerárquico para el RMR.

## III. GENERALIDADES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR VÍA EL HARDWARE EMBEBIDO

En este apartado se presenta una descripción del RMR y del hardware embebido utilizados, así como el diagrama de flujo del programa asociado al controlador jerárquico.

### Prototipo de RMR diferencial

El prototipo empleado corresponde a un RMR diferencial, el cual tiene dos motores de CD modelo GNM3150 con caja de engranes G2.6, ambos de MicroMo. En cada motor se encuentra acoplado un encoder incremental modelo E6B2-CWZ6C de Omron. El RMR también cuenta con una tarjeta Jetson TK1 y una tarjeta Arduino UNO (ambas tarjetas se describen en los siguientes apartados). En la Fig. 3 se muestra el prototipo del RMR diferencial.

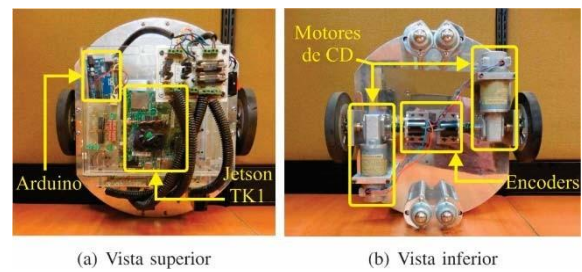


Figura 3. Prototipo del RMR diferencial.

### Hardware embebido

El hardware embebido está conformado por las tarjetas Jetson TK1 de NVIDIA y Arduino UNO. La tarjeta Jetson TK1 cuenta con: CPU ARM Cortex A15 de cuatro núcleos, 2 GB de memoria RAM, 16 GB de memoria eMMC, conexión serial, puertos GPIO y tiene preinstalado el SO Ubuntu 14.04 (para una descripción más extensa ver [34]). Mientras que la tarjeta

Arduino UNO cuenta con un microcontrolador ATmega328, conexión serial, salidas PWM, entradas analógicas, entre otras características [35].

En la Fig. 4 se muestra el diagrama de conexiones del hardware embebido con el RMR. En tal diagrama, por un lado, la tarjeta Jetson TK1 realiza los cálculos del controlador jerárquico y el procesamiento de las señales provenientes de los encoders. Estas últimas son inicialmente acondicionadas eléctricamente y después son acopladas, a través de convertidores de nivel lógico, a la tarjeta Jetson TK1. Por otro lado, la comunicación hacia la tarjeta Arduino UNO se realiza vía el protocolo RS-232. Esta tarjeta se encarga de generar las señales de PWM requeridas por la etapa de potencia (esta etapa aísla y acondiciona eléctricamente las señales de control).

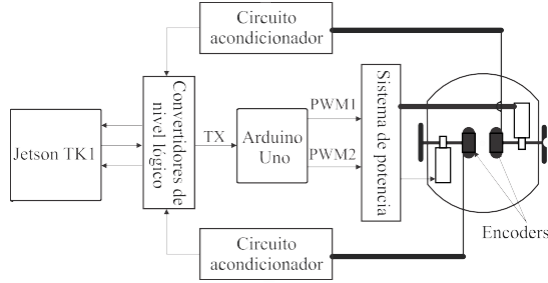


Figura 4. Esquema de conexión general del hardware embebido con el RMR.

### Diseño del programa para el controlador jerárquico

La programación del controlador jerárquico se lleva a cabo en la tarjeta Jetson TK1 en lenguaje Python. Esto, debido a que Python es un lenguaje de programación sencillo y potente [36].

El programa desarrollado se compone de cuatro funciones: *lectura encoder derecho*, *lectura encoder izquierdo*, *controlador jerárquico* y *comunicación serial*, ver Fig. 5. Las funciones *lectura encoder derecho* y *lectura encoder izquierdo* se encargan de calcular  $\dot{\varphi}_d$  y  $\dot{\varphi}_i$ , respectivamente, mediante las señales obtenidas de los encoders. La función *controlador jerárquico* es la función principal; en esta se indica la duración del experimento, se genera la trayectoria deseada ( $\varphi^*$ ,  $\dot{\varphi}^*$ ,  $\ddot{\varphi}^*$ ), se calculan las velocidades angulares deseadas ( $\dot{\varphi}_d$ ,  $\dot{\varphi}_i$ ) y se calculan los voltajes ( $\varphi_d$ ,  $\varphi_i$ ) que deben ser enviados a los motores de CD (ver Fig. 6). La función *comunicación serial*, se encarga de enviar los voltajes ( $\varphi_d$ ,  $\varphi_i$ ) a la tarjeta Arduino UNO vía el protocolo RS-232. Estas funciones son implementadas como subprocesos con ayuda del paquete *multiprocessing*. De esta manera, las cuatro funciones se ejecutan de forma simultánea en los núcleos del procesador de la tarjeta.

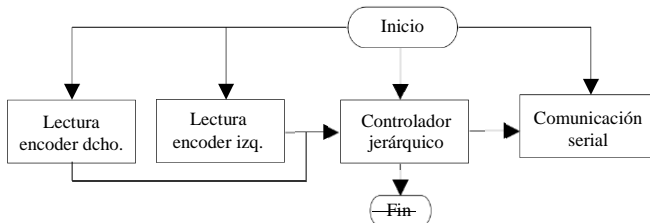


Figura 5. Diagrama de flujo del programa general.

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado, se presenta una comparación del desempeño del controlador jerárquico implementado, en primera instancia, vía hardware embebido y, en segunda instancia, vía un sistema de prototipado rápido. Es decir, se comparan los resultados experimentales en lazo cerrado obtenidos con la tarjeta Jetson TK1 y con la tarjeta DS1104. Para esto, se introduce la trayectoria deseada del RMR.

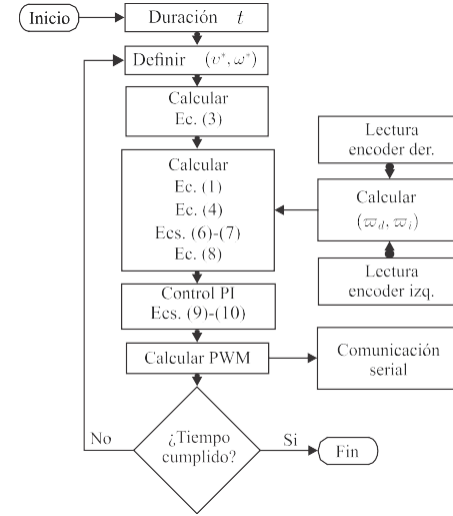


Figura 6. Diagrama de flujo del controlador jerárquico.

### Trayectoria deseada

La propuesta de la trayectoria deseada, asociada a las velocidades lineal y angular del RMR, se realiza siguiendo [37] y con base en la Tabla I.

TABLA I  
VELOCIDADES ASOCIADAS A LA TRAYECTORIA DESEADA

	$\dot{\varphi}^*(\varphi)$	$\ddot{\varphi}^*(\varphi)$
$0 \leq \varphi \leq 2.5$	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 0) = 0.1$ ;	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 0) = 0$ ;
	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 2.5) = 0.8$ ;	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 2.5) = 1.2$ ;
$2.5 \leq \varphi \leq 3.5$	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 2.5) = 0.8$ ;	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 2.5) = 1.2$ ;
	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 3.5) = 0.3$ ;	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 3.5) = 1.2$ ;
$3.5 \leq \varphi \leq 4.75$	$\dot{\varphi}^* = 0.3$ ;	$\dot{\varphi}^* = 1.2$
$4.75 \leq \varphi \leq 5.75$	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 4.75) = 0.3$ ;	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 4.75) = 1.2$ ;
	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 5.75) = 0.8$ ;	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 5.75) = 1.2$ ;
$5.75 \leq \varphi \leq 8.25$	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 5.75) = 0.8$ ;	$\dot{\varphi}_i(\varphi_i = 5.75) = 1.2$ ;
	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 8.25) = 0.01$ ;	$\dot{\varphi}_f(\varphi_f = 8.25) = 0$ .

En cada intervalo de tiempo  $[\varphi_i, \varphi_f]$  estipulado en la Tabla I,  $\dot{\varphi}^*$  y  $\ddot{\varphi}^*$ , cuando así aplica, están determinadas por los polinomios de Bézier siguientes:

$$\dot{\varphi}^*(\varphi) = \varphi(\varphi, \varphi_i, \varphi_f)(\varphi_f - \varphi_i) + \dot{\varphi}_i, \quad (13)$$

$$\ddot{\varphi}^*(\varphi) = \varphi(\varphi, \varphi_i, \varphi_f)(\varphi_f - \varphi_i) + \ddot{\varphi}_i, \quad (14)$$

siendo,

$$\mathbf{p}(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_f) = \left( \frac{\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i}{\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i} \right)^3 \left[ \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i \left( \frac{\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i}{\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i} \right) + \mathbf{p}_f \left( \frac{\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i}{\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i} \right)^2 \right],$$

donde  $\mathbf{p}_i$  y  $\mathbf{p}_f$  son el tiempo inicial y final de la trayectoria, respectivamente. Mientras que  $\mathbf{p}_i$  y  $\mathbf{p}_f$  corresponden a las velocidades lineales constantes sobre las cuales interpola suavemente  $\mathbf{p}$  en el intervalo de tiempo  $[\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_f]$ . De manera

similar,  $\mathbf{p}_i$  y  $\mathbf{p}_f$  son las velocidades angulares constantes sobre las que interpola suavemente  $\mathbf{p}^*$  en el intervalo de tiempo  $[\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_f]$ . Mientras que los coeficientes  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  y  $\mathbf{p}_3$  están determinados por [38],

$$\mathbf{p}_1 = 10, \quad \mathbf{p}_2 = 15, \quad \mathbf{p}_3 = 6.$$

Es importante resaltar que (13)-(14) satisfacen, en los tiempos  $\mathbf{p}_i$  y  $\mathbf{p}_f$ , que  $[\mathbf{p}^*(\mathbf{p}_i), \mathbf{p}^*(\mathbf{p}_f)] = [\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_f]$  y  $[\mathbf{p}^*(\mathbf{p}_i), \mathbf{p}^*(\mathbf{p}_f)] = [\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_f]$ . Finalmente, la trayectoria deseada correspondiente al plano  $\mathbf{p}\mathbf{p}$  se muestra en la primer subfigura de la Fig. 7, la cual resulta de introducir  $\mathbf{p}^*$  y  $\mathbf{p}^*$  de la Tabla I en(3).

### Resultados con el hardware embebido

En la puesta en marcha del RMR en lazo cerrado se requieren los parámetros de construcción del RMR, así como de las ganancias asociadas a los controles (8), (9) y (10).

Por un lado, los valores de los parámetros  $\mathbf{p}$  y  $\mathbf{p}$  del prototipo RMR utilizado son:

$$\mathbf{p} = 0.075 \text{ m}, \quad \mathbf{p} = 0.19 \text{ m}.$$

Por otro lado, los valores de las ganancias asociadas al control cinemático (8) se seleccionaron como:

$$\mathbf{p}_1 = 1, \quad \mathbf{p}_2 = 14, \quad \mathbf{p}_3 = 6.$$

Mientras que las ganancias de los controles PI, (9) y (10), se escogieron como:

$$\mathbf{p}_{pd} = 3, \quad \mathbf{p}_{id} = 8, \quad \mathbf{p}_{pi} = 3, \quad \mathbf{p}_{ii} = 8.$$

Así, tras ejecutar en el hardware embebido la secuencia del diagrama mostrado en la Fig. 5, para la trayectoria deseada de la Tabla I, se obtuvieron los resultados experimentales mostrados en la Fig. 7. En tal figura se observa como la tarea de seguimiento de trayectoria se logra exitosamente, ya que el RMR sigue al robot de referencia, i.e.,  $(\mathbf{p}, \mathbf{p}, \mathbf{p}) \rightarrow (\mathbf{p}^*, \mathbf{p}^*, \mathbf{p}^*)$ .

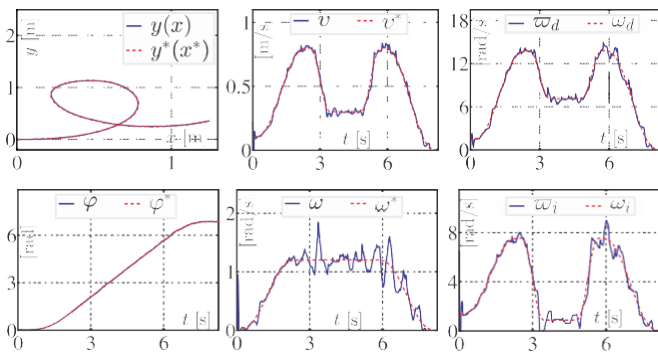


Figura 7. Resultados experimentales obtenidos con el hardware embebido.

### Resultados con el sistema de prototipado rápido

Aquí se presentan los resultados experimentales obtenidos

con la tarjeta de prototipado rápido DS1104 y Matlab-Simulink. Esta tarjeta tiene un procesador de punto flotante PowerPC 603 a 250 MHz y un subsistema DSP-esclavo basado en el DSP TMS320F240. Una descripción más detallada de la DS1104 se puede consultar en [39].

En este experimento, los parámetros  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{p}$  y la trayectoria deseada son iguales a los utilizados previamente. Asimismo, las ganancias del control cinemático (8) y los controles PI (9)-(10) son iguales a los utilizados previamente, i.e.,

$$\mathbf{p}_1 = 1, \quad \mathbf{p}_2 = 14, \quad \mathbf{p}_3 = 6,$$

y

$$\mathbf{p}_{pd} = 3, \quad \mathbf{p}_{id} = 8, \quad \mathbf{p}_{pi} = 3, \quad \mathbf{p}_{ii} = 8.$$

Los resultados experimentales con la tarjeta DS1104 y Matlab-Simulink se muestran en la Fig. 8. De nueva cuenta, en tales resultados se observa que el objetivo de control es alcanzado, pues  $(\mathbf{p}, \mathbf{p}, \mathbf{p}) \rightarrow (\mathbf{p}^*, \mathbf{p}^*, \mathbf{p}^*)$ .

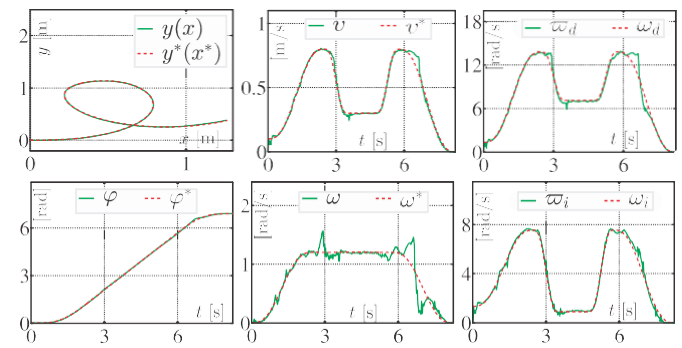


Figura 8. Resultados experimentales obtenidos con la tarjeta DS1104.

### Comentarios sobre los resultados experimentales

Con fines de comparación, los resultados experimentales conseguidos vía el hardware embebido y la DS1104 se muestran en la Fig. 9. En esa figura se han empleado los subíndices HE y DS1104 para representar los resultados asociados con el hardware embebido Jetson TK1 y la DS1104, respectivamente.

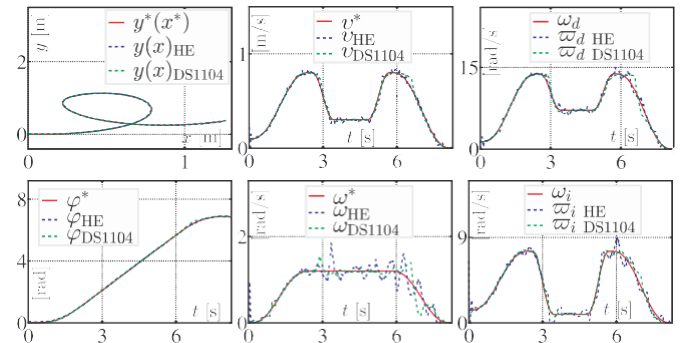


Figura 9. Comparación de resultados experimentales.



En la Fig. 9 se puede observar que los resultados experimentales logrados vía el hardware embebido son similares, en promedio, a los obtenidos con la DS1104. Así, con ambas tecnologías la tarea de seguimiento de trayectoria es lograda satisfactoriamente, pues  $(\square, \square, \square) \rightarrow (\square^*, \square^*, \square^*)$ .

Relativo a la autonomía del RMR es clara la prestación que otorga la Jetson TK1 en comparación con la DS1104. Pues la Jetson TK1 puede ser instalada sobre el RMR, evitando la infraestructura necesaria para conectar la DS1104 al prototipo. Por otro lado, la DS1104 exige una conexión cableada hacia el robot. Lo cual limita el área de trabajo y con esto la autonomía del robot.

Por lo anterior, se ha mostrado que el hardware embebido Jetson TK1 es viable en la implementación experimental de controles complejos. Además, proporciona mayor autonomía en el control de RMRs.

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó la implementación experimental de un control de seguimiento en un RMR. En tal implementación se utilizó, por un lado, el hardware embebido Jetson TK1 y, por otro lado, una tarjeta de prototipado rápido DS1104. Los resultados experimentales mostraron que el desempeño del RMR en lazo cerrado, cuando la síntesis del control se realiza con la tarjeta Jetson TK1 y con la tarjeta DS1104, es similar. Toda vez que en ambos casos se logra  $(\square, \square, \square) \rightarrow (\square^*, \square^*, \square^*)$ . De esta forma, se mostró que el hardware embebido propuesto, junto con el uso de software libre, es una alternativa de bajo costo para la implementación de controles en sistemas robóticos. Lo cual, a su vez, conlleva a que estos sistemas cuenten con mayor autonomía.

Propuestas de trabajos futuros, utilizando el hardware embebido aquí mostrado, incluyen otras tareas relevantes en robótica móvil, así como la implementación de controles que consideren la dinámica de la etapa de potencia [16], [31], [40]. En otra dirección, se pretende también utilizar este hardware embebido en la implementación de controles en sistemas subactuados [41], [42].

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al editor y al revisor por su valioso tiempo asociado con la revisión del presente trabajo. Esta investigación fue apoyada por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN), México. El trabajo de C. Márquez Sánchez, J. R. García Sánchez y M. Antonio Cruz ha sido apoyado a través de becas CONACYT-México y BEIFI-IPN. R. Silva Ortigoza y M. Marcelino Aranda agradecen el apoyo recibido por el SNI-México y los programas EDI y COFAA del IPN. Finalmente, V. M. Hernández Guzmán y G. Silva Ortigoza agradecen el apoyo otorgado por el SNI-México.

## REFERENCIAS

[1] J. de J. Rubio, Z. Zamudio, J. A. Meda, and M. A. Moreno, "Experimental vision regulation of a quadrotor," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2514–2523, 2015.

[2] J. P. Ortiz, L. I. Minchala, and M. J. Reinoso, "Nonlinear robust H-infinity PID controller for the multivariable system quadrotor" *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 3, pp. 1176–1183, 2016.

[3] E. Kayacan and R. Maslim, "Type-2 fuzzy logic trajectory tracking control of quadrotor VTOL aircraft with elliptic membership functions," *IEEE-ASME Trans. Mechatron.*, vol. 22, no. 1, pp. 339–348, 2017.

[4] A. G. Escobar, H. Alazki, J. E. Valenzuela, and O. Garcia, "Embedded super twisting control for the attitude of a quadrotor," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 9, pp. 3974–3979, 2016.

[5] M. Jadhaliha and J. Choi, "Environmental monitoring using autonomous aquatic robots: Sampling algorithms and experiments," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 899–905, 2013.

[6] A. Mazumdar, M. S. Triantafyllou, and H. H. Asada, "Dynamic analysis and design of spheroidal underwater robots for precision multidirectional maneuvering," *IEEE-ASME Trans. Mechatron.*, vol. 20, no. 6, pp. 2890–2902, 2015.

[7] J. Yu, C. Wang, and G. Xie, "Coordination of multiple robotic fish with applications to underwater robot competition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 1280–1288, 2016.

[8] J. G. Jagüey, J. F. V. Medina, M. Á. P. Gándara, and V. F. Herrera, "Shopping market assistant robot," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2559–2566, 2015.

[9] R. M. Caporal, A. V. Leon, R. O. Flores, E. B. Huerta, and J. C. H. Hernandez, "Digital controller for an electric wheelchair based on a low-cost hardware," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 13, no. 10, pp. 3221–3227, 2015.

[10] J. N. D. O. Fernandes, "A real-time embedded system for monitoring of cargo vehicles using controller area network (CAN)," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 3, pp. 1086–1092, 2016.

[11] A. G. Barrientos, J. L. López, E. S. Espinoza, J. Hoyo, and G. Valencia, "Object transportation using a cooperative mobile multi-robot system," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 3, pp. 1184–1191, 2016.

[12] J. A. Brizuela, C. M. Astorga, A. Zavala, and F. Canales, "Instrumentation of a bicycle without driver for experimental testing of automatic control," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 8, pp. 3540–3546, 2016.

[13] V. M. Hernández-Guzmán, R. Silva-Ortigoza, and C. Márquez-Sánchez, "A PD path-tracking controller plus inner velocity loops for a wheeled mobile robot," *Adv. Robot.*, vol. 29, no. 16, pp. 1015–1029, 2015.

[14] O. Zapata, G. A. Acosta, and J. A. Jiménez, "Coordination scheme and behavior fusion based on fuzzy weighting factors for a mobile robotic navigation," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 13, no. 1, pp. 18–26, 2015.

[15] R. Silva-Ortigoza, C. Márquez-Sánchez, F. Carrizosa-Corral, V. M. Hernández-Guzmán, J. R. García-Sánchez, H. Taud, M. Marciano-Melchor, and J. A. Álvarez-Cedillo, "Obstacle avoidance task for a wheeled mobile robot – A Matlab-Simulink-based didactic application," in *MATLAB: Applications for the Practical Engineer*, K. Bennett (Ed.), pp. 79–102. Rijeka, CRO: InTech Europe, 2014. [Online]. Available: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/46868.pdf>

[16] R. S. Ortigoza, J. R. G. Sánchez, V. M. H. Guzmán, C. M. Sánchez, and M. M. Aranda, "Trajectory tracking control for a differential drive wheeled mobile robot considering the dynamics related to the actuators and power stage," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 2, pp. 657–664, 2016. [Online]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/esp/publicaciones.php>

[17] D. Viet-Tuan, H. Nguyen, S. Seung-Mok, K. Hak-Kyeong, K. Sang-Bong, and B. Gi-Sig, "Tracking control of omnidirectional mobile platform with disturbance using differential sliding mode controller," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 1, pp. 39–48, 2012.

[18] N. L. Duy and L. Myung-Eui, "OSEK/VDX Porting to the two-wheel mobile robot based on the differential drive method," *J. Inf. Commun. Conver. Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 372–377, 2012.

[19] K. Hongjun and K. Byung-Kook, "Minimum-energy trajectory generation for cornering with a fixed heading for three-wheeled omnidirectional mobile robots," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 75, no. 2, pp. 205–221, 2014.

[20] R. Hedjar and M. Bounkhel, "Real-time obstacle avoidance for a swarm of autonomous mobile robots," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 11, no. 67, pp. 1–12, 2014.

[21] H. Chih-Lyang and S. Chin-Yuan, "A distributed active-vision network-space approach for the navigation of a car-like wheeled robot," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 846–855, 2009.

- [22] C. Chih-Yang, L. S. Tzuu-Hseng, and Y. Ying-Chieh, "EP-based kinematic control and adaptive fuzzy sliding-mode dynamic control for wheeled mobile robots," *Inf. Sci.*, vol. 179, pp. 180–195, 2009.
- [23] C. Chih-Yang, S. Tzuu-Hseng, Y. Ying-Chieh, and C. Cha-Cheng, "Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots," *Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 156–166, 2009.
- [24] C. Yung-Hsiang, S. L. Tzuu-Hseng, and C. Yung-Yue, "A practical trajectory tracking approach for autonomous mobile robots: Nonlinear adaptive  $\Pi_2$  design," *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 385–394, 2013.
- [25] H. Hsu-Chih, T. Ching-Chih, and L. Shui-Chun, "Adaptive polar-space motion control for embedded omnidirectional mobile robots with parameter variations and uncertainties," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 62, no. 1, pp. 81–102, 2011.
- [26] H. Hsu-Chih, "Intelligent motion control for four-wheeled holonomic mobile robots using FPGA-based artificial immune system algorithm," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–11, 2013.
- [27] P. Oryschuk, A. Salerno, A. M. Al-Husseini, and J. Angeles, "Experimental validation of an underactuated two-wheeled mobile robot," *IEEE-ASME Trans. Mechatron.*, vol. 14, no. 2, pp. 252–257, 2009.
- [28] J. L. Avendaño-Juárez, V. M. Hernández-Guzmán, and R. Silva-Ortigoza, "Velocity and current inner loops in a wheeled mobile robot," *Adv. Robot.*, vol. 24, no. 8–9, pp. 1385–1404, 2010.
- [29] R. Silva-Ortigoza, C. Márquez-Sánchez, F. Carrizosa-Corral, M. Antonio-Cruz, J. M. Alba-Martínez, and G. Saldaña-González, "Hierarchical velocity control based on differential flatness for a DC/DC Buck converter-DC motor system," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–12, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/912815>
- [30] R. Silva-Ortigoza, V. M. Hernández-Guzmán, M. Antonio-Cruz, and D. Muñoz-Carrillo, "DC/DC Buck power converter as a smooth starter for a DC motor based on a hierarchical control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 1076–1084, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6767144>
- [31] J. R. G. Sánchez, S. T. Mosqueda, R. S. Ortigoza, M. A. Cruz, G. S. Ortigoza, and J. de J. Rubio, "Assessment of an average tracking controller that considers all the subsystems involved in a WMR: Implementation via PWM or Sigma-Delta modulation," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 3, pp. 1093–1102, 2016. [Online]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/esp/publicaciones.php>
- [32] H. Sira-Ramírez and S. K. Agrawal, *Differentially Flat Systems*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2004.
- [33] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 16, no. 5, pp. 609–615, 2000.
- [34] August, 2018. [Online]. Available: <http://www.nvidia.com/object/jetson-tk1-embedded-dev-kit.html>
- [35] August, 2018. [Online]. Available: <http://arduino.cl/arduino-uno/>
- [36] J. M. Perkel, "Pick up python," *Nature*, vol. 518, no. 7537, pp. 125–126, 2015.
- [37] C. M. Sánchez, J. R. G. Sánchez, C. Y. S. Cervantes, R. S. Ortigoza, V. M. H. Guzmán, J. N. A. Juárez, and M. M. Aranda, "Trajectory generation for wheeled mobile robots via Bézier polynomials," *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4482–4490, 2016. [Online]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/esp/publicaciones.php>
- [38] L. Biagiotti and C. Melchiorri, *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2008.
- [39] August, 2018. [Online]. Available: <https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/singbord/ds1104.cfm>
- [40] J. R. García-Sánchez, R. Silva-Ortigoza, S. Tavera-Mosqueda, C. Márquez-Sánchez, V. M. Hernández-Guzmán, M. Antonio-Cruz, G. Silva-Ortigoza, and H. Taud, "Tracking control for mobile robots considering the dynamics of all their subsystems: Experimental implementation," *Complexity*, vol. 2017, pp. 1–18, 2017. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2017/5318504/>
- [41] V. M. Hernández-Guzmán, M. Antonio-Cruz, and R. Silva-Ortigoza, "Linear state feedback regulation of a Furuta pendulum: Design based on differential flatness and root locus," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 8721–8736, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2637822>

- [42] M. Antonio-Cruz, V. M. Hernández-Guzmán, and R. Silva-Ortigoza, "Limit cycle elimination in inverted pendulums: Furuta pendulum and pendubot," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30317–30332, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839642>



**Celso Márquez Sánchez** received the B.S. degree in Computer Engineering from the Universidad Autónoma del Estado de México, State of Mexico, Mexico, in 2008, the M.S. degree in Computing Technology from the CIDETEC-IPN, Mexico City, Mexico, in 2014, and the Ph.D. degree in Engineering of Robotic and Mechatronic Systems from the CIDETEC-IPN, Mexico City, Mexico, in 2018.

He is currently a Professor and Researcher at Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. Also, he has published and presented papers in JCR indexed journals and in international conferences, respectively. During his academic trajectory, Márquez-Sánchez obtained the award "Best Academic Performance" in the cycle of schooling 2013–2014. Also he was awarded with the Distinction to Polytechnic Merit: Presea Lázaro Cárdenas 2015, in the Physical and Mathematical Sciences Area at Master Level. In the same year, he obtained the award "Best Postgraduate Thesis" at Master level.

His research interests include the theory and application of automatic control in mobile robotics. Also, he is interested in software development with mobile devices for embedded systems.



**Ramón Silva Ortigoza** received the B.S. degree in Electronics from Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico, in 1999, and the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering (Mechatronics) from the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Mexico City, Mexico, in 2002 and 2006, respectively.

He has been a Researcher at the Department of Mechatronics, CIDETEC-IPN, since 2006, and belongs to SNI-CONACYT, Mexico. He has co-authored the book *Control Design Techniques in Power Electronics Devices* (London, U.K.: Springer-Verlag, 2006) and the book *Automatic Control: Design Theory, Prototype Construction, Modeling, Identification and Experimental Tests* (in Spanish) (Mexico City, Mexico: CIDETEC-IPN, 2013). He was an Editor of the book *Mechatronics* (in Spanish) (Mexico City, Mexico: CIDETEC-IPN, 2010). He has published over 50 papers in JCR indexed journals, three chapters in international books, and he has presented over 40 papers in international conferences. He has been an advisor of over 20 postgraduate students and two B.S. students. Four of his students have been honored with the Presea Lázaro Cárdenas Award in 2012, 2015, 2016, and 2018, the most important prize granted by the Instituto Politécnico Nacional of Mexico to its students. Also, two of these students in 2015 and 2017 have also been honored with The Best Master Thesis Award in the Instituto Politécnico Nacional of Mexico. He has been the leader in more than 10 research projects and he has collaborated in nine additional research projects. His research interests include mechatronic control systems, mobile robotics, control in power electronics, and development of educational technology. His research work has been cited over 600 times. He has been a reviewer in several JCR indexed journals. Also, he has been a referee in several awards of research and engineering in Mexico and in the National Program of Quality Postgraduate and research projects of CONACYT.



**José Rafael García Sánchez** received the B.S. degree in Industrial Robotics from Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN, Mexico City, Mexico, in 2003, the M.S. degree in Automatic Control from Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico, in 2013, and the Ph.D. degree in Engineering of Robotic and Mechatronic Systems from CIDETEC-IPN, Mexico City, Mexico, in 2018.

He is currently a Professor and Researcher at CIDETEC-IPN. Also, he has published and presented papers in JCR indexed journals and in international conferences, respectively. His research interests include the theory and application of automatic control in mobile robotics, teleoperated systems, and power electronic systems.



**Victor Manuel Hernández Guzmán** was born in Querétaro, Qro., Mexico. He received a B.S. in Electrical Engineering from Instituto Tecnológico de Querétaro, Querétaro, Mexico, in 1988, an M.S. in Automatic Control from Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coah., Mexico, in 1991, and a Ph.D. in Mechatronics from the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Mexico City, Mexico, in 2003.

He has been a Professor at Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Mexico, since 1995, where he teaches Classical and Modern (Linear and Nonlinear) Control in undergraduate and graduate academic programs and he is a researcher in the Automatic Control Systems field. He has published about 40 papers in JCR indexed journals. These works are concerned with control of electromechanical systems, i.e. robot manipulators when actuated by different classes of electric motors (brushed DC motors, permanent magnet synchronous motors, induction motors, permanent magnet stepper motors and switched reluctance motors), trajectory and path tracking control in mobile robots, DC/DC Power Electronic Converters control as well as Control Education. He is coauthor of the book *Automatic Control: Design Theory, Prototype Construction, Modeling, Identification and Experimental Tests* (in Spanish) (Mexico City, Mexico: CIDETEC-IPN, 2013). He belongs to the Mexican Researcher's National System (SNI-CONACYT) since 2005. He has been advisor of 4 B.S. students, 15 M.S. students, 3 Ph.D. students and 1 Postdoctoral student. Three of his students have been honored with the Presea Lazaro Cardenas Award (2012, 2015, 2016), the most important prize granted by Instituto Politécnico Nacional of Mexico to its students. One of these students (2015) has also been honored with The Best M.Sc. Thesis Award in Instituto Politécnico Nacional of Mexico. Dr. Hernandez Guzmán has been the leader in 2 CONACYT research projects and he has collaborated in 4 additional projects. He has a particular interest in prototype construction to teach classical and nonlinear control techniques.



**Mayra Antonio Cruz** received the B.S. degree in Mechatronics from Instituto Tecnológico de Reynosa, Tamaulipas, Mexico, in 2012, and the M.S. degree in Computing Technology from CIDETEC-IPN, Mexico City, Mexico, in 2015. She is currently working toward the Ph.D. degree at the Department of Mechatronics, CIDETEC-IPN,

Mexico City, Mexico.

During her academic trajectory, Antonio Cruz obtained the award "Best Academic Performance" in the cycle of schooling 2014–2015. Also she was awarded with the Distinction to Polytechnic Merit: Presea Lázaro Cárdenas 2016, in the Physical and Mathematical Sciences Area at Master Level. Her current research interests include the theory and application of automatic control in underactuated mechanical systems and power electronic systems. Also, she is interested in the development of educational technology.



**Mariana Marcelino Aranda** received the M.S. degree in Business Administration and the Ph.D. degree in Administration Sciences, both from the Instituto Politécnico Nacional, Mexico City, Mexico, in 2004 and 2008, respectively.

She belonged to the Researchers National System of CONACYT-Mexico, with Level I. Also, she currently is a Professor and Researcher at the Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas of the Instituto Politécnico Nacional (UPIICSA-IPN). Her research interests include sustainable business studies and educational technology.



**Gilberto Silva Ortigoza** received the B.S. degree in physics from the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, in 1988, and the M.S. and Ph.D. degrees in physics from the CINVESTAV-IPN, Mexico City, Mexico, in 1991 and 1995, respectively.

He has been a Professor and Researcher at Facultad de Ciencias Físico Matemáticas of the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FCFM-BUAP), since 1991, and belongs to SNI-CONACYT, Mexico. He has published over 60 papers in JCR indexed journals. He has been advisor of four Ph.D., nine M.S., and seven B.S. students. His research interests include geometrical and physical optics and general relativity. He has been a reviewer in several JCR indexed journals.