

# Diseño y construcción de un sistema monoaxial semi-automático para la fabricación de recubrimientos en sustratos estáticos

Luis Edgar Alanís Carranza, Moisés Vicente Márquez Olivera,  
Ricardo Cuenca Álvarez, Octavio Sánchez Olivera,  
Héctor Abraham Flores Avalos, Viridiana G. Hernández Herrera

Instituto Politécnico Nacional,  
Centro de Investigación e Innovación Tecnológica,  
México

samyol9@hotmail.com,  
{mvmarquez, rcuenca, vhernandezhe}@ipn.mx  
{osanchez0112, steenguitar777}@gmail.com

**Resumen.** Se presenta el desarrollo de un sistema mono axial de manipulación de una pistola de rociado térmico por flama para la manufactura de recubrimientos sobre sustratos estáticos. Esta técnica presenta alrededor de 45 variables, las cuales condicionan las características del recubrimiento que se construye. En la actualidad, el control de estas variables dependen directamente de la experiencia del operador debido que esta técnica se realiza de manera manual, produciendo heterogeneidades en el producto final. Dada esta premisa, se presenta la necesidad de construir un sistema de un eje cartesiano que controle el desplazamiento de la pistola de rociado térmico, controlando variables que mejoren la calidad de los recubrimientos permitiendo asegurar la homogeneidad de las características microestructurales de los sustratos empleados. Para llevar a cabo el diseño y construcción del mecanismo de sujeción y desplazamiento de la pistola de proyección, se determinaron las variables de estudio del proceso. Posteriormente, se implementó el controlador INTECMX14 al sistema monoaxial para la regulación de la velocidad de giro del motor sin escobillas y consecuentemente, el desplazamiento del mecanismo. Finalmente, el diseño de una interfaz GUI permite tanto la interacción del usuario con el dispositivo como el monitoreo del recorrido de la pistola. Se construyeron recubrimientos por aplicación manual y con el mecanismo propuesto. Los resultados muestran que la aplicación manual conduce al depósito de partículas sobre trayectorias erráticas, mientras que el sistema monoaxial deposita partículas sobre bandas de forma regular que siguen trayectorias rectilíneas, controlando el calentamiento del sustrato. Se concluye que el dispositivo mecatrónico permite realizar el rociado térmico en flama bajo las condiciones impuestas por el operador.

**Palabras clave:** Rociado térmico, recubrimiento, automatización.

## Design and Construction of a Semiautomatic Monoaxial System for Coatings Manufacturing in Static Substrates

**Abstract.** In this work, the development of a monoaxial system is presented, which enables manipulation the flame spray pistol to manufacture coatings on static substrates. The flame spraying technique presents about 45 variables that condition the coating's characteristics built. Nowadays, controlling these variables depends directly on operator experience because this technique is performed manually, which produces heterogeneities on the final product. Under this idea, there is a need to build a Cartesian axis system that controls the displacement of the flame spray gun, controlling variables that improve coatings' quality, this allows ensure the homogeneity of the microstructural characteristics of the substrates. To make the mechanism design and construction for holding and moving the projection pistol, the variables of the process study were determined. Subsequently, an INTECMX14 driver was implemented in a monoaxial system to regulate the rotation speed of the brushless direct current motor and consequently, the movement of the mechanism. Finally, the GUI interface allowed the interaction between the user-machine and monitoring the pistol's path. The coatings were built by manually application and the device proposed. The results show that manual application produces deposition of particles on erratic trajectories, while the monoaxial system deposits particles on bands with a regular shape that follow rectilinear trajectories, controlling the substrate heating. In conclusion, the flame spraying process is performed, under the conditions imposed by the operator trough a mechatronic device.

**Keywords:** Thermal spraying, coating, automation.

### 1. Introducción

En la actualidad existen sistemas automatizados que eliminan o reducen la intervención humana durante los procesos de manufactura. Tal es el caso del rociado térmico, el cual consiste en el depósito de un recubrimiento sobre la superficie de un material. Durante este proceso, son formadas pequeñas gotas fundidas o semi-fundidas desde un polvo para generar un recubrimiento, generalmente, el nombre que reciben estas gotas son "splats" [1]. Existen diferentes tipos de rociado térmico (por flama, plasma y eléctrico) siendo una de sus ventajas la gran variedad de materiales que se pueden emplear para la fabricación de recubrimientos [2]. Este artículo está enfocado en el rociado térmico por flama ya que esta técnica es de las más utilizadas en la industria por su bajo costo y fácil uso. No obstante, el rociado térmico por flama es realizado de manera manual, por lo que, la calidad del producto depende de la experiencia del operador.

Durante los últimos años, la mecatrónica ha desarrollado distintos robots cartesianos para la manipulación controlada de herramientas usadas en la fabricación de productos, los más comunes son los sistemas de Control Numérico por Computadora o por sus siglas en inglés CNC. Acuña et al. [3] diseñaron y construyeron un sistema automático de 4 ejes (X, Y, Z y B) para el transporte de materia prima y productos maquinados, haciendo uso de una interfaz desarrollada en Labview, un microcontrolador Atmega328

y procesamiento digital de imágenes para el reconociendo de material con forma circular o rectangular. Rangel y Castro [4] desarrollaron el control de un sistema de coordenadas X, Y con el fin de identificar los puntos de una superficie y la transporta, por medio del uso de motores a pasos y de una placa Arduino. Con el programa que tiene cargado el microcontrolador, el usuario coloca los valores de X,Y y el mecanismo comienza a moverse.

Jhan y Ricardo [5] diseñaron e implementaron una fresadora de 3 ejes coordenados para la fabricación de placas PCB utilizando Arduino y un sistema HDI que monitorea los datos. Su sistema redujo tiempo de maquinado y costos.

Aguirre et al. [6] construyeron un equipo de tres grados de libertad con la finalidad de darle el uso de manipulador en aplicaciones de pick y place o como CNC para la fabricación de piezas. Utilizaron Arduino UNO y una interfaz GUI desarrollada en Matlab para la interacción con el usuario y la máquina. Su sistema puede utilizarse para la realización de prácticas en laboratorios de mecatrónica.

Jayachandriah et al. [7] desarrollaron un CNC de bajo costo que permite el fabricado de piezas pequeñas utilizando la tarjeta Arduino. El sistema puede moverse en los tres ejes cartesianos (X,Y,Z) de manera simultánea.

El enfoque de este documento es el desarrollo de un sistema de un solo eje cartesiano (X) para la manipulación de la pistola de rociado térmico por flama y fabricar recubrimientos en la superficie del material. El diseño, adquisición, manufactura, ensamble, etapa de control y potencia, además del desarrollo de la interfaz GUI son presentados en la sección II, sección III examina los resultados obtenidos, las conclusiones son mostradas en la sección IV. referencias o trabajos citados en sección V.

## **2. Materiales y métodos**

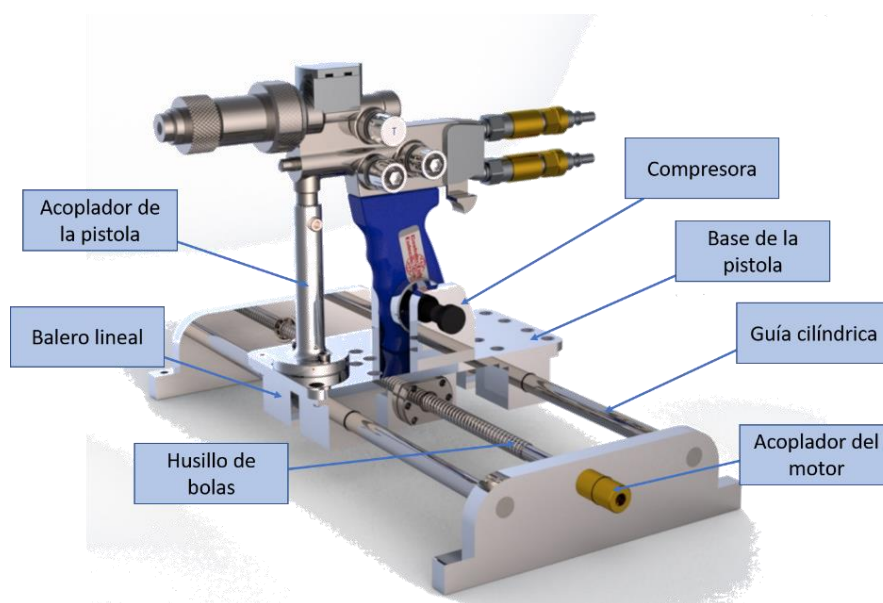
Se consideran 4 etapas para la construcción y puesta en marcha del sistema propuesto: (i) identificación de variables, (ii) diseño mecánico, (iii) manufactura y ensamble, y (iv) etapa de potencia y control.

### **2.1. Identificación de variables**

El proceso de rociado térmico está influenciado por alrededor de 45 variables, siendo imposible de variarlas simultáneamente. Algunas de estas variables, que definen la calidad del recubrimiento, son: las propiedades de la flama, características del polvo, inyección del material de recubrimiento y los parámetros de trabajo [8], [9]. Después de realizar el rociado térmico de partículas sobre sustratos estáticos, en forma manual, la información obtenida fue la siguiente: la distancia de proyección es cambiante, dado que influye en la adhesión de las partículas en el sustrato, el desplazamiento de la pistola describe variaciones tanto en la trayectoria como en la velocidad, por lo que se presentan diferencias en el tiempo de exposición a la flama. Por estas razones, la geometría y el espesor del recubrimiento depositado son heterogéneos. Entonces, la *distancia* de tiro con el sustrato, la *velocidad* y el *movimiento rectilíneo* de la pistola son escogidos como las variables a controlar y que rinden la condición homogénea del recubrimiento.

**Tabla 1.** Características requeridas para diseño del dispositivo mecatrónico.

Parámetro	Unidad
Longitud del dispositivo	70 cm
Ancho máximo del sustrato	30 cm
Grados de libertad	1
Carga	Pistola de rociado térmico de 4,3 kg
Estructura mecánica	Rígida y liviana



**Fig. 1.** Diseño del dispositivo.

## 2.2. Diseño mecánico

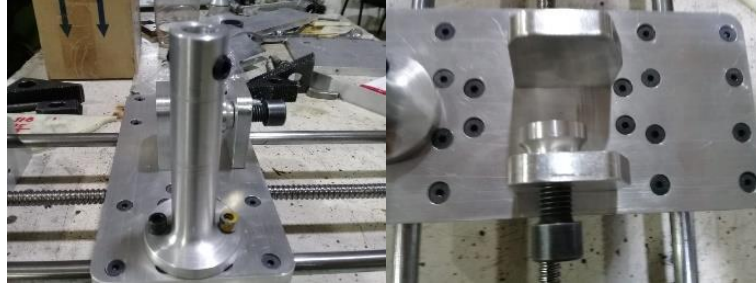
Los parámetros que arroja el análisis anterior permiten la fabricación de un recubrimiento homogéneo y son considerados para el diseño del mecanismo. Las características requeridas del dispositivo se muestran en Tabla 1.

El diseño del manipulador fue desarrollado en SolidWorks, mostrado en la Fig. 1. está compuesto por dos guías cilíndricas, cuatro deslizadores, un acoplador para la pistola y motor, un husillo de bolas con paso de 4 mm y un sujetador manual.

La tabla 1 indica que la estructura debe ser ligera y transportable, así que, el aluminio fue seleccionado como material para la construcción del eje.

## 2.3. Manufactura y ensamble

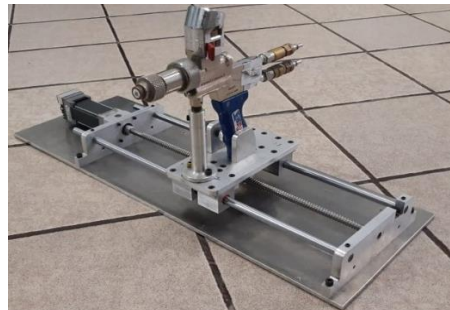
El material fue adquirido para el ensamble de las partes del dispositivo. No obstante, algunos componentes con medidas específicas no son comerciales, por lo que fueron



**Fig. 2.** Piezas maquinadas en CNC.



**Fig. 3.** Subensambles del dispositivo.



**Fig. 4.** Sistema mono axial.

manufacturadas en CNC. La (Fig. 2) muestra algunas de estas piezas fabricadas. En la (Fig. 3) algunos subensambles son mostrados y requeridos para generar el desplazamiento de la pistola por medio del motor.

Los deslizadores están sujetos a una base que permite colocar todos los elementos necesarios para sujetar la pistola ver (Fig. 2). La base sostiene un acoplador de forma cilíndrica y su función es sujetar a la pistola de rociado. El acoplador tiene dos opresores de cada lado para asegurar el apriete. También, el dispositivo cuenta con un sujetador de mango que permite la disminución de vibraciones y asegura el disparo sin tener cambios de ángulo de la boquilla. Finalmente, los subensambles de la (Fig. 3) permiten el desplazamiento de la base por medio del husillo de bolas. La Fig. 4. muestra el ensamble de todo el material adquirido y maquinado.

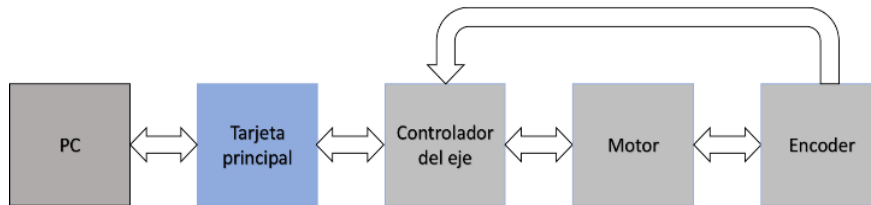


Fig. 5. Diagrama general de control de un motor.

## 2.4. Etapa de control y potencia

La etapa de control del motor debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Variar la velocidad angular,
- Controlar la posición del eje rotario,
- Variar la aceleración/desaceleración.

Por lo general, el control de la velocidad y posición de un motor DC requiere de una tarjeta principal y un controlador, disponibles en el mercado y de origen extranjero. En la Fig.5 se muestra el diagrama general de control del motor.

No obstante, el controlador de origen mexicano INTECMX14 [10] [11] [12] fue implementado para la manipulación del actuador. Este controlador ofrece ventajas tales como:

- La manipulación de 2 o más motores al mismo tiempo,
- Dentro de la tarjeta incluye el módulo de potencia y control,
- Es menos costoso que otros controladores.

Considerando el uso del controlador INTECMX14, el diagrama general se modifica y resulta como se muestra en la Fig. 6, en la que se muestra que solo se requiere de una tarjeta para la manipulación del motor, ya que en el controlador se encuentran los módulos de control y potencia.

**Control:** el usuario establece los parámetros de velocidad, aceleración y posición desde la interfaz. El módulo supervisor recibe los valores para generar un perfil de trayectoria, mostrado en la Fig. 7.

Todo sistema con desplazamiento de un punto A hacia un punto B debe de contar con un perfil de trayectoria para evitar desplazamientos con la menor cantidad de vibraciones posibles y daños en el mecanismo. El controlador INTECMX14 tiene agregado un algoritmo PID. Este utiliza operaciones básicas de suma, resta y multiplicación, facilitando su programación en el FPGA, por lo que se considera más fácil de implementar que otros algoritmos de control. El algoritmo PID recibe la señal calculada por el perfil de trayectoria y el valor real del sensor óptico de posición (Encoder) calculando el error y en consecuencia, regular la energía que se requiere para poder llegar a la posición deseada. Finalmente, la carta de conmutación electrónica genera el movimiento del motor por medio del cambio de bobinas A, B y C. El diagrama general del módulo de control es mostrado en la Fig. 8.



Fig. 9. Interfaz GUI del dispositivo.



Fig. 10. Diagrama a bloques de la etapa de potencia.



Fig. 11. Motor BLDC DMA0204024B101, marca Microchip.

La interfaz GUI (Fig. 9) permite activar y desactivar el dispositivo, mandar parámetros (tamaño del sustrato a rociar, la aceleración y la velocidad deseada), cuenta con botones de arranque y paro de emergencia, una visualización del recorrido que va a tener la pistola en el sustrato, y finalmente incluye etiquetas que indican el tipo de sustrato y polvo a utilizar.

**Potencia:** se implementó una protección entre el módulo de control y potencia, aislando a las dos etapas, previniendo el caso de que algún problema generado en una etapa no afecta a la otra. Luego, el puente H permite el cambio de sentido del flujo de la corriente con el fin de regular y producir el movimiento del motor. El diagrama general es mostrado en la Fig. 10.

El motor utilizado es el modelo DMA0204024B101, marca Microchip (Fig. 11) de la familia de motores BLDC (motor de corriente directa sin escobillas) y, en comparación con otros motores de corriente directa, tiene las siguientes ventajas:

- Torque máximo desde la primer RPM,

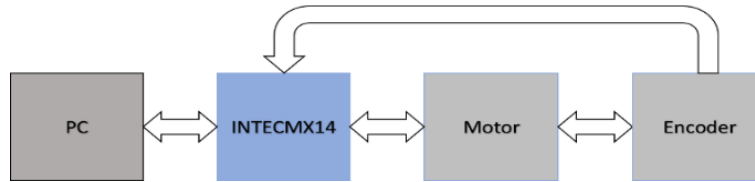


Fig. 6. Diagrama general de control de un motor utilizando INTECMX14.

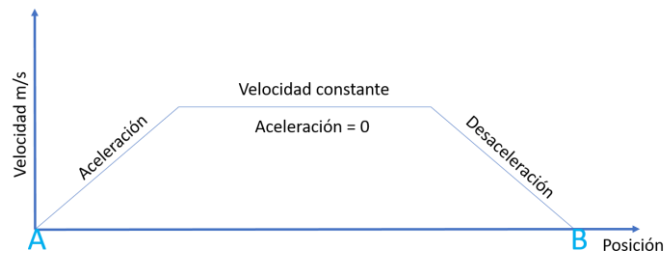


Fig. 7. Perfil de trayectoria.



Fig. 8. Diagrama a bloques de la etapa de control.

- Mayor durabilidad,
- Mínimo ruido eléctrico,
- Mínimo mantenimiento.

### 3. Resultados

Los recubrimientos fueron manufacturados manualmente y con el dispositivo. El sustrato utilizado para estas pruebas fue acero AISI 1018 con longitud de 30 cm. El polvo utilizado para los experimentos fue cobre. En la Fig. 12, son mostrados algunos recubrimientos fabricados manualmente por operadores, donde se aprecia que el ancho de la banda del recubrimiento no es constante. Esto conduce a identificar zonas con mayor cantidad de material depositado, además, las regiones con recubrimiento depositado pueden presentar oxidar con mayor rapidez. Finalmente, la prueba con el dispositivo muestra los siguientes resultados Fig. 13.

La banda del recubrimiento de la Fig.13. es constante en todo momento. No obstante, las esquinas muestran diferentes tonalidades de color, a consecuencia de que la velocidad no fue constante debido al perfil de trayectoria. Se puede considerar que el desempeño del dispositivo es homogéneo y repetible, ya que el recubrimiento de la Fig. 13 A) bajo los parámetros de la tabla 2.



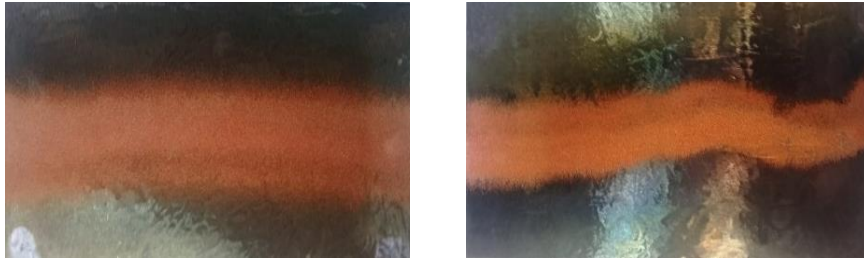


Fig. 12. Recubrimientos de aplicación manual.

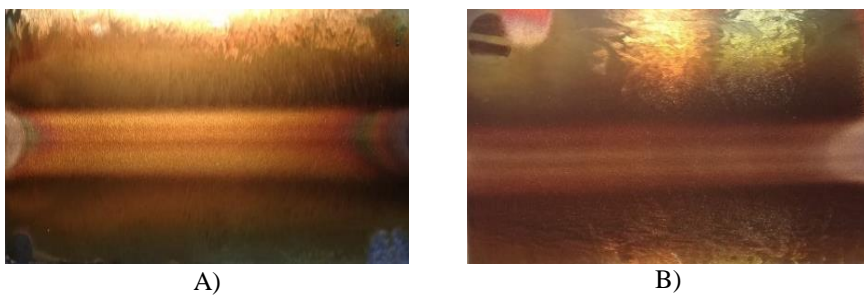


Fig. 13. Recubrimientos fabricados por el dispositivo A) prueba 1 y B) prueba 2.

Tabla 2. Parámetros para recubrimiento de la prueba 1.

Distancia Boquilla/sustrato	Relación De gases	Velocidad de tiro	Temperatura del sustrato	Número de pasadas	Largo de la banda
12.5 cm	O-25 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -50	0.01 m/s	85-90 °C	1	≈ 3.8 cm

Tabla 3. Parámetros para recubrimiento de la prueba 2.

Distancia Boquilla/sustrato	Relación De gases	Velocidad de tiro	Temperatura del sustrato	Número de pasadas	Largo de la banda
12.5 cm	O-25 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -50	0.02 m/s	85-90 °C	1	≈ 3.8 cm

Por lo tanto, una banda de recubrimiento aproximada a 3.8 cm es obtenida al utilizar los mismos parámetros.

Los parámetros de la tabla 3 permiten la manufactura de un recubrimiento con características de la figura 13 B) y una franja del mismo tamaño. Sin embargo, el cambio de tonalidad a más oscura puede perjudicar en el siguiente pase de recubrimiento. El sustrato estuvo expuesto a mayor tiempo ante la flama en esta prueba.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se realizó el diseño y construcción de un dispositivo que permite el control del desplazamiento de la pistola de rociado térmico por flama en un eje coordinado. Los mecanismos de sujeción y desplazamiento fueron diseñados en SolidWorks y posteriormente manufacturados en máquinas CNC. La aceleración y velocidad constante de recorrido se genera por medio del motor BLDC y este es manipulado por el controlador INTECMX14. Además, el dispositivo tiene una interfaz GUI capaz de recibir parámetros de desplazamiento y tiene una visualización previa del recorrido de la pistola.

Los resultados muestran que el dispositivo propuesto tiene un desplazamiento constante a diferentes velocidades y manufactura recubrimientos más homogéneos. No obstante, las características del recubrimiento dependen de la velocidad de tiro, por lo que el estudio del sustrato y del polvo a rociar debe ser previo para obtener las velocidades requeridas para cada material y evitar modificaciones en el recubrimiento como se mostró en la figura 13. B).

## Referencias

1. Champagne, V.K.: The cold spray materials deposition process. Elsevier (2007)
2. Pawlowski, L.: The science and engineering of thermal spray coatings. John Wiley & Sons (2008)
3. Capilla-Falcon, C.A., Pulloquina-Zapata, J.L.: Diseño y construcción de un prototipo de sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS), para sistemas flexibles de manufactura en el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga, utilizando procesamiento digital de imágenes. BS tesis Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga (2014)
4. Rangel-Domínguez, H.E., Castro-Sánchez, R.: Control de coordenadas en xy de un mecanismo de motores a pasos y un microcontrolador. Jóvenes en la Ciencia, 3, pp. 2273–2277 (2019)
5. Ore, J., Palomares, R.J.: Diseño e implementación de una fresadora CNC de 3 gdl para fabricación de tarjetas electrónicas usando arduino y ubuntu linux (2016)
6. Aguirre, A., Gomez-Suarez, F.J., Ramirez-Bernal, G., Aguirre-Carillo, F.A.: Manipulador mecatrónico de tres grados de libertad: Sistema pick and place y CNC. I Encuentro de Jovenes Investigadores de Sinaloa (2013)
7. Jayachandriah, B., Krishna, O.V., Khan, P.A., Reddy, R.A.: Fabrication of low cost 3-Axis CNC router. International Journal of Engineering Science Invention, 3, pp. 1–10 (2014)
8. Rodríguez-Santos, E.G.: Recubrimientos compósitos: Alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionado por corrosión húmeda. Tesis, Instituto Politécnico Nacional (2018)
9. Posada, B.A., Gamboa, D., Marulanda-Arevalo, J.L.: Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico. Scientia et Technica, pp. 251–256 (2009)
10. Sánchez-García, O.: Controlador Senoidal para motor PMBLDC en tracción de vehículos eléctricos. Tesis Instituto Politécnico Nacional (2016)
11. García-Sotuyo, E., Hernández-Herrera, V.G., Sánchez-García, O., Márquez-Olivera, M.V.: Diseño e implementación de un hexápodo robótico empleando el driver “intecmx14” para el control paralelo de motores. Pistas Educativas, 39(125) (2017)

12. Martínez-Fernández, G., Cruz-Contreras, A., Hernández-Herrera, V.G., Márquez-Olivera, M.V.: Sistema de control distribuido embebido en FPGA para motores de CD en aplicaciones multieje. *Pistas Educativas*, 39(125) (2017)