

# Desarrollo de un robot serial para el metalizado de piezas en la empresa Gecolsa S.A. (Fase I)

Eugenio Yime\*, Franz Quesada\*\*, Richard Aroca\*\*\*, Antonio Saltarín\*\*\*\*

\* Ingeniero Mecánico. PhD. Automatización y Robótica.

Docente Tiempo Completo Universidad Autónoma del Caribe. Grupo de investigación GIIMA. eugenio.yime@uac.edu.co.

\*\* Ingeniero Mecánico. MSc en Materiales y Procesos. Docente Tiempo Completo Universidad Autónoma del Caribe.  
Grupo de investigación IMTEF.

\*\*\* Ingeniero de Sistemas. Doctor en Ciencias. Docente Catedrático Universidad Autónoma del Caribe.

\*\*\*\* Ingeniero Mecánico. Especialista en Gestión Eficiente de la Energía.

Docente Catedrático Universidad Autónoma del Caribe.

## RESUMEN

En el presente artículo se ilustran los avances logrados en el desarrollo de un robot serial de cuatro grados de libertad, el cual será utilizado para la metalización del bloque de un motor. Se presenta el modelamiento cinemático y los cálculos de los requisitos dinámicos, como son los pares y fuerzas que deben ser entregados por los servomotores. Las herramientas utilizadas fueron Matlab en el cálculo de la trayectoria a seguir por el robot, y ProEngineer para el análisis dinámico inverso. Los datos obtenidos serán utilizados para la selección de los servomotores que estarán presentes en el robot.

**Palabras Clave:** Robótica, robot serial, dinámica inversa, thermalspray, servomotor.

## ABSTRACT

This article illustrates the steps performed during the development of a four degree freedom serial robot, which is intended to be used for the metallization process of an engine block motor. Kinematics calculations and dynamics requirements, such as forces and torques produced by the servomotors, are presented. The softwares used were Matlab and ProEngineer, the former was useful to define the path of the robot and the later to compute the inverse dynamic. The results obtained will be used to select the servomotors that the robot will feature.

**Keywords:** Robotics, robot serial, inverse dynamics, thermalspray, servomotor.

## 1. INTRODUCCIÓN

El metalizado es un proceso que realiza una empresa local a ciertos tipos de bloque de motor para restaurar las dimensiones originales del fabricante cuando se alcanza determinadas horas de operación. El proceso actualmente lo realizan de forma manual, ver Figura 1, lo cual conlleva ciertos inconvenientes como son:

Se generan, de manera involuntaria, por parte del ope-

rador, golpes o esfuerzos localizados en las piezas que se están recuperando dado que éste no puede garantizar una distancia constante ideal entre la pieza y la pistola y sus accesorios. Estos eventos posteriormente tienen como consecuencia el desprendimiento de la capa depositada. Es posible que este tipo de defecto no sea detectado en el control de calidad, pero en operación el daño se manifiesta tempranamente, con lo cual el componente recuperado no alcanzará la vida útil esperada; con este suceso se anulan los beneficios

económicos que se pretenden con las operaciones de recuperación de las piezas usadas y se puede colocar en entre dicho la eficiencia de los proceso de metalizado desarrollados por Gecolsa.

- Se generan factores de riesgo para la salud del operario en razón de: los gases presentes en el momento del metalizado, las altas temperaturas de las operaciones y del peso de la pistola de rociado del metal fundido a depositar por capas. (Definir valores).
- El espesor de las capas depositadas puede exigir tiempos adicionales en los procesos de mecanizado, dadas las irregularidades en los espesores depositados, lo anterior debido a que la precisión de estas operaciones dependen del pulso del operador humano, rigidez del sistema, precisión de movimientos, entre otros factores de difícil control por parte de una persona.
- Operaciones adicionales de metalizado y maquinado necesarias para subsanar los daños detectados por control de calidad, que se presentan en las piezas recuperadas que no cumplen con los parámetros establecidos.
- Alteración del orden planeado de las operaciones, por lo cual es necesario reajustar los trabajos y posiblemente trabajar horas extras.
- Agotamiento prematuro del operario.

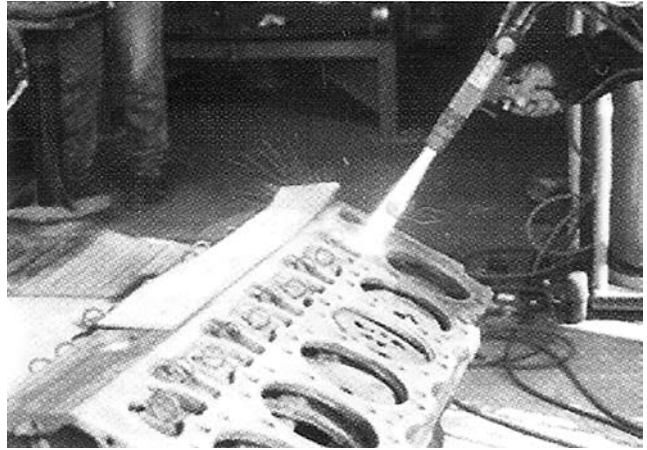
Lo anterior se traduce en baja productividad, altos tiempos de procesamiento, retrabajos y condiciones extremas para los operadores. La propuesta consiste en utilizar un robot para ejecutar la tarea, con la cual se estarían reduciendo los tiempos de procesamiento, además de incrementar la calidad del proceso y la productividad, junto con la mejora en las condiciones laborales de los trabajadores. La figura 1 ilustra el proceso actual realizado de forma manual.

El sistema robótico propuesto es un robot serial formado por un brazo articulado con cuatro grados de libertad, como el que se ilustra en la Figura 2, el cual es un diseño conceptual del prototipo de robot a diseñar. Tres de los grados de libertad se emplean para el movimiento en el plano, de esta forma el robot podrá posicionar y orientar la pistola sobre la superficie a tratar. El cuarto grado de libertad se utiliza para trasladar el robot de forma longitudinal a lo largo del bloque de motor.

El diseño del diseño del robot se dividió en cinco etapas:

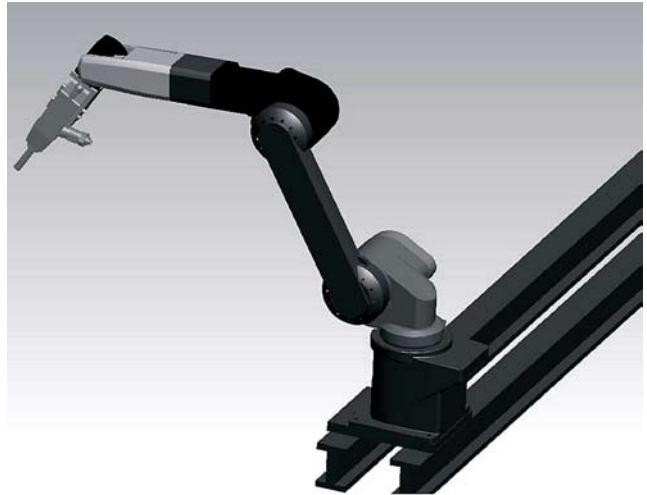
1.- *Análisis cinemático*, el cual tiene por objetivos determinar las longitudes óptimas de los eslabones que conforman el brazo robótico.

**Figura 1.** Metalizado manual de un bloque de motor.



Fuente: Gecolsa

**Figura 2.** Diseño conceptual de un robot de cuatro grados de libertad para el metalizado.



Fuente: Autores

2.- *Análisis dinámico*, en donde se determinan las cargas dinámicas, pares y fuerzas, a ser suministradas por los motores eléctricos.

3.- *Diseño mecánico*, en donde se realiza un diseño completo del robot, considerando las dimensiones mecánicas de los motores previamente seleccionados.

4.- *Ley de control*: en esta etapa se analiza y selecciona la mejor ley de control que permita realizar un movimiento adecuado de la pistola, controlando de esta forma la deposición de metal en la pieza y la temperatura alcanzada.

5.- *Montaje y puesta en marcha*, esta última etapa consiste de montar los elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control para poner en funcionamiento el brazo robótico.

En la actualidad, el proyecto ha avanzado en las dos primeras fases, que son los análisis cinemáticos y dinámicos. En la siguiente sección se describen los pasos metodológicos realizados para cada una de dichas etapas.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada consistió en realizar la síntesis cinemática para el movimiento deseado del robot, con la cual se obtuvieron las longitudes de los eslabones y la disposición espacial de los grados de libertad o juntas. Posteriormente, con esta información se realizaron los análisis cinemáticos directos e inverso. El análisis cinemático directo permite conocer la posición final de la pistola a partir de los valores de movimiento de cada junta. La inversa, por otro lado, permite determinar los valores de desplazamiento a seguir por cada junta para alcanzar un punto y orientación deseados en el espacio.

Los análisis cinemáticos fueron programaron en Matlab como funciones para facilitar el análisis dinámico del robot. De forma paralela, se creó un prototipo virtual del robot en ProEngineer con las longitudes y disposición de juntas previamente calculados con el objetivo de utilizar el módulo dinámico Pro/Motion que se encuentra incluido con ProEngineer y así poder avanzar de forma rápida en el análisis del robot.

El análisis dinámico inverso requirió de los cálculos de posición, velocidad y aceleración del efector final para poder calcular los pares requeridos en los motores. Si bien existe una amplia documentación de cómo realizarlo para una cadena cinemática serial, referencias [1] a [7], se escogió hacer un prototipado rápido utilizando ProEngineer para reducir el tiempo de respuesta al cliente y realizar un estimativo inicial de los costos del proyecto. Para este fin, Pro/Motion requiere que se le suministre la trayectoria a lo largo del tiempo para cada articulación que hace parte del robot. La manera como se calculó el movimiento del robot fue a través de un planificador de trayectorias en el efector final del mismo, el objetivo de dicho planificador fue el de generar una curva continua la cual debe ser seguida por el robot; para ello se consideraron los tiempos de aceleración, velocidad constante y desaceleración de la pistola. El planificador utilizado fue un senoidal con tiempos de aceleración y desaceleración de 500 ms.

Una vez se obtuvo la curva a seguir por el robot, se realizó la cinemática inversa a cada punto del efector final para convertir la trayectoria en los movimientos a seguir por las articulaciones que a su vez fueron alimentadas en Pro/Motion como 'splines' para cada actuador. Por último, se realizó el análisis dinámico inverso en ProEngineer y se generaron las curvas de pares necesarios por

los motores, con estas curvas se procederá a seleccionar los motores adecuados al robot.

## 3. RESULTADOS

En esta sección se ilustrarán los resultados obtenidos durante los análisis cinemáticos y dinámicos del robot. La planificación que se hizo fue el proceso de metalizado del primer cilindro, en donde el motor se mueve de forma lineal para cubrir las tres áreas alrededor del agujero y posteriormente realiza un movimiento circular alrededor del mismo. La figura 3 muestra el movimiento espacial a seguir por el efector final del robot, las dimensiones están en milímetros. La figura 4 ilustra la transformación del movimiento del efector final en el movimiento de las tres primeras articulaciones del robot usando para ello la cinemática inversa.

Figura 3. Movimiento del efector final del robot.

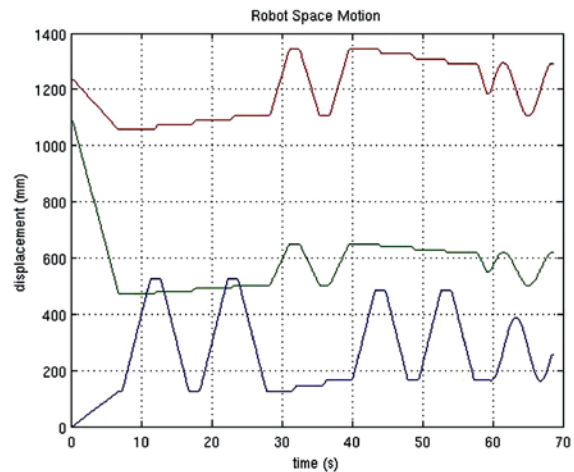
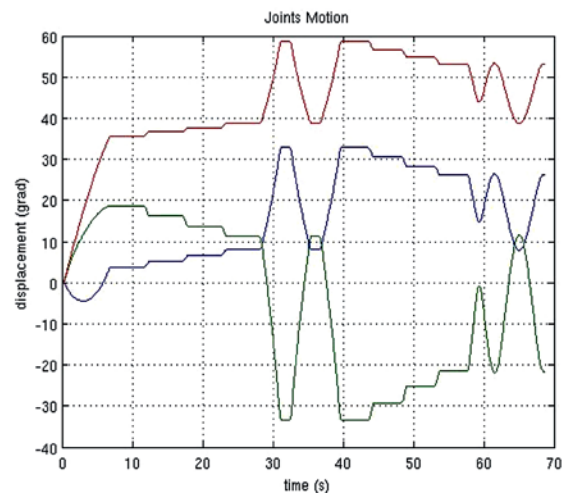


Figura 4. Movimiento articular del robot.



En ambas figuras se puede apreciar que existe un movimiento suave y continuo de tanto el efector final como de las articulaciones; en estas gráficas no se logra apre-

ciar los tiempos de aceleración y desaceleración de las juntas, que son los valores críticos con los cuales se calculan los pares de arranque y frenado del motor.

La figura 5 ilustra la velocidad alcanzada por la articulación del motor 1, en donde se puede apreciar picos de velocidad los cuales están asociados con las aceleraciones del motor. Al usarse un planificador en el efector final, la aceleración uniforme de la pistola no siempre se transforma en un par pico homogéneo e igual en cada articulación, tal como se puede apreciar en la figura 6 donde se aprecian picos de par durante las paradas, que a su vez ocurren en los cambios de trayectorias de la pistola. A partir de ambas gráficas se obtienen los valores para la selección del primer motor del robot, que son un par de arranque de 25 Nm, un par en continuo de 5 Nm y una velocidad máxima de 15 grados/seg.

Figura 5. Gráfica de velocidad en el motor 1.

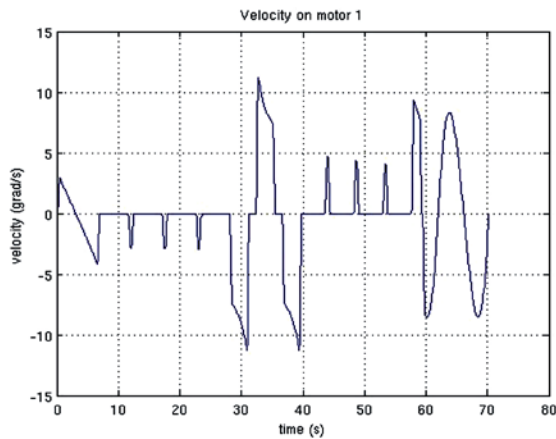
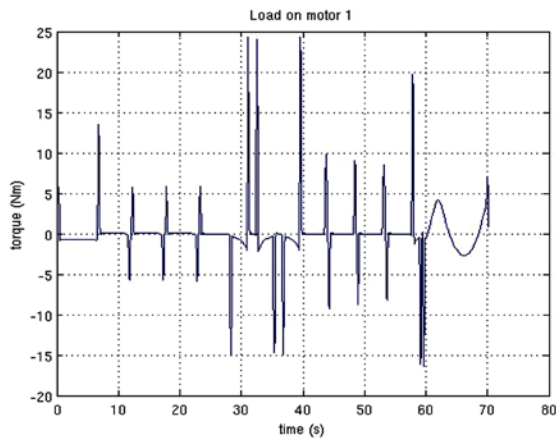


Figura 6. Gráfica de par en el motor 1 del robot.



Los valores de selección para el segundo motor se obtienen a partir de las figuras 7 y 8, en ellas se puede apreciar que se necesita un motor que suministre un par de arranque de 4 Nm, un par continuo de 1 Nm y una velocidad máxima de 25 grados/segundo.

Figura 7. Gráfica de par en el motor 2.

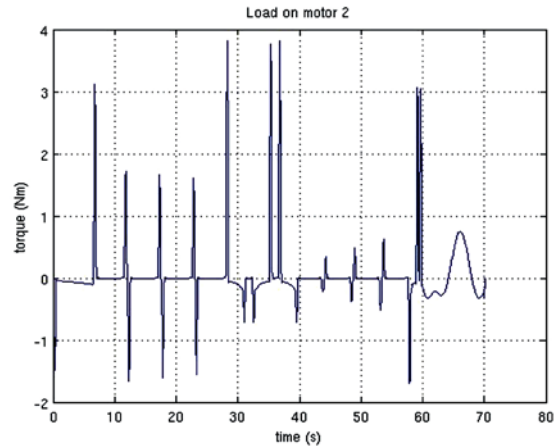
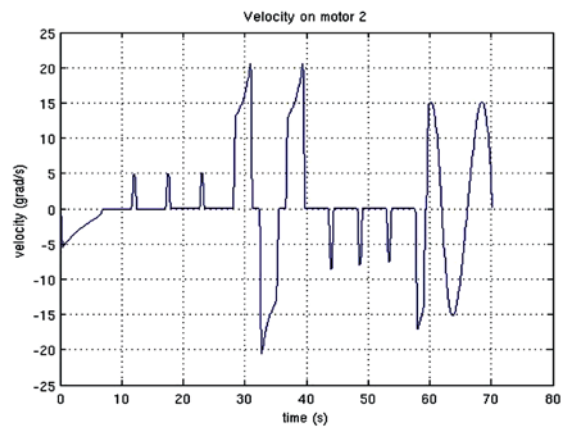


Figura 8. Gráfica de velocidad en el motor 2.



Para el caso del tercer motor se utilizarán las figuras 9 y 10, en las cuales se puede apreciar que dicha articulación requiere de un motor que suministre un par de arranque de 0.2Nm, par en continuo de 0.05Nm y una velocidad máxima de 10 grados/seg. Al igual que en los casos anteriores, los picos de par ocurren durante los frenados y aceleraciones que ocurren en los cambios de trayectoria del efector final.

Figura 9. Gráfica de par del motor 3.

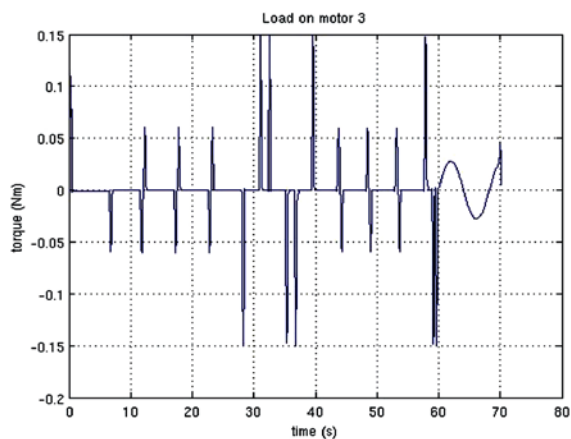
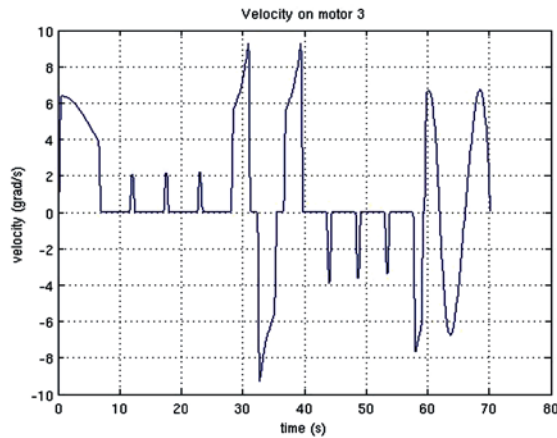


Figura 10. Gráfica de velocidad del motor 3.



Para la selección del cuarto motor, el cual se utilizará para la traslación del robot a lo largo del bloque de motor, se requiere que el conjunto a diseñar sea capaz de suministrar una fuerza de arranque de 150N, una fuerza en continuo de 50N y una velocidad máxima de 120mm/s. Ver Figuras 11 y 12.

Figura 11. Gráfica de par del motor 4.

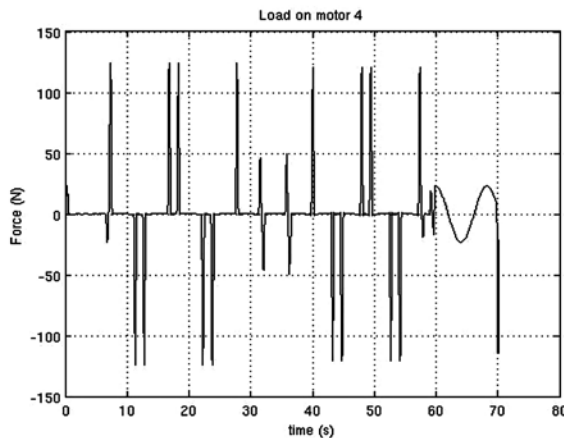
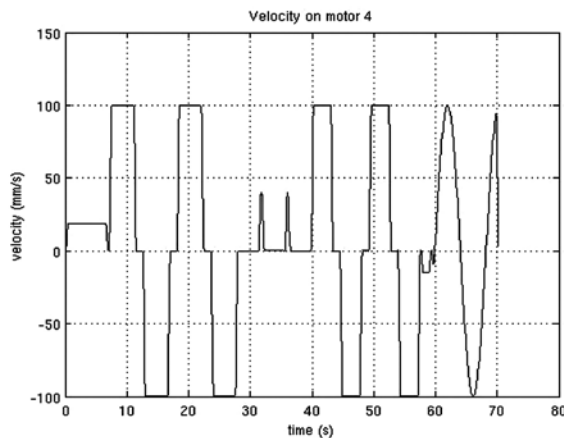


Figura 12. Gráfica de velocidad del motor 4.



#### 4 CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha ilustrado la manera como se desarrollaron los pasos metodológicos en las primeras etapas del diseño de un robot serial de cuatro grados de libertad, el cual será utilizado para la metalización de bloques de motor empleados en maquinaria pesada. Los análisis cinemáticos y dinámicos del robot se realizaron utilizando Matlab y ProEngineer como herramientas informáticas útiles para reducir los tiempos de cálculo, aumentando de esta forma la respuesta al cliente en cuanto a costos, tiempo de duración del robot y características del mismo. Gracias a Pro/Motion fue posible obtener gráficas que permitirán seleccionar de forma adecuada los motores eléctricos para la aplicación.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lung Wen Tsai. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Wiley-Interscience, 1999.
- [2] Jorge Angeles. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms. Springer-Verlag, 2006.
- [3] Marco Ceccarelli. Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation. Springer, 2004.
- [4] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano. Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer, 2001.
- [5] Jhon J. Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Prentice Hall, 2004.
- [6] Mark Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar. Robot Modelling and Control. Wiley, 2005.
- [7] Reza N. Jazar. Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control. Springer, 2007.