



Prototipo de robot cartesiano para ensamblado estructural de cocinas de inducción

Yelena Matias Domínguez, Orestes Arias Rodríguez, Ivón Oristela Benítez González

RESUMEN / ABSTRACT

La fabricación de cocinas de inducción es una línea prioritaria del Grupo Empresarial GELECT y la Empresa de la Industria Electrónica (EIE), impulsada por la necesidad de equipos más eficientes y la sustitución de importaciones mediante soluciones de la industria electrónica cubana. Sin embargo, la producción de cocinas de inducción exige altos niveles de precisión, especialmente en el ensamblaje de componentes y en la aplicación de adhesivos, silicona y resinas epóxicas, que pueden ser sensibles a variaciones de caudal, presión y velocidad con impacto directo en la eficiencia energética, la seguridad y la estabilidad térmica del producto final. Las limitaciones inherentes del ensamblado manual de las cocinas de inducción motivan el desarrollo de soluciones de automatización más integrales, destacándose el uso de los robots cartesianos por su capacidad para realizar aplicaciones uniformes, repetibles y compatibles con tolerancias estrictas. En este contexto, el presente trabajo introduce un prototipo de robot cartesiano diseñado para sustituir la inyección manual de pegamento durante el ensamblado estructural de las cocinas de inducción que se producen en la empresa la EIE. El precedente trabajo, aborda la arquitectura y el modelado del prototipo propuesto, así como las trayectorias y la programación lógica asociada.

Palabras claves: generación de trayectorias, manipuladores industriales, interpoladores, robot cartesiano.

The manufacturing of electric induction cookers is a priority line for the GELECT Group and the Electronic Industry (EIE), guided by the goal of replacing imports through solutions developed within the Cuban electronic industry. However, the fabrication of electric induction cookers demands high levels in their component assembly as well for the adhesive, silicone, and epoxy resin application. These materials can be sensitive to variations in flow rate, pressure, and application speed, which directly impact the product's energy efficiency, safety, and thermal stability. Therefore, the limitations of manual assembly in the manufacturing of electric induction cookers motivate the development of more comprehensive automation solutions. In particular, cartesian robots stand out for this application due to their ability to perform uniform, repeatable applications that comply with strict tolerances. The present work purposes a cartesian robot prototype designed to replace the manual adhesive dispensing during the structural assembly of electric induction cookers produced at the EIE. The paper discusses the architecture and modeling of the proposed prototype, as well as different trajectory generation and associated logical programming.

Key words: generation of trajectories, industrial manipulators, interpolators, cartesian robots

Cartesian robot prototype for structural assembly of induction cookers

1-INTRODUCCIÓN

El Grupo Empresarial de la Industria Electrónica, la Informática, la Automatización y las Comunicaciones, GELECT agrupa diferentes empresas cubanas en el sector tecnológico-electrónico que buscan la modernización tecnológica, la integración de cadenas productivas y la innovación local a fin de fortalecer la autosuficiencia industrial del país. Dentro de estas estrategias,

Recibido: 10/2025 Aceptado: 12/2025

la producción de cocinas de inducción, que tiene lugar en la Empresa Industria Electrónica (EIE), se ha consolidado como una línea prioritaria, impulsada por la necesidad de equipos más eficientes y por el objetivo nacional de sustituir importaciones mediante soluciones fabricadas en la propia industria electrónica cubana. Las cocinas de inducción están compuestas típicamente por un chasis metálico, placa vitrocerámica, bobinas inductoras, módulos electrónicos, sensores térmicos, sistemas de ventilación, aislamientos térmicos y elementos de fijación [1]. Cada una de estas piezas debe ensamblarse con tolerancias muy estrictas para garantizar eficiencia energética, seguridad eléctrica y estabilidad térmica, por lo que los procesos manuales suelen ser más propensos a fallas o inconsistencias. En particular, como se observa en la Fig. 1, la inyección o dispensación de pegamento, silicona, resina epóxica o compuestos de curado tipo sulfuro es una de las etapas más sensibles en la fabricación de cocinas de inducción, debido a que estos materiales no solo fijan la estructura, sino que además cumplen funciones térmicas y de sellado. En el caso de la silicona, su objetivo habitual es crear una barrera flexible entre la placa vitrocerámica y el chasis para absorber dilataciones térmicas; las resinas epóxicas se usan para rigidizar puntos críticos, encapsular componentes electrónicos o reforzar uniones; mientras que compuestos de tipo sulfuro curado pueden emplearse como adhesivos de alta resistencia en zonas donde hay vibración, humedad o temperaturas elevadas. Estos materiales son altamente sensibles a parámetros como caudal, presión, recorrido, velocidad de aplicación y tiempo de gelificación. Un exceso crea rebabas, oclusiones o tensiones térmicas; en tanto la falta de estos materiales puede generar fugas, vibraciones y fallas prematuras de la electrónica. Además, estas sustancias pueden reaccionar químicamente con la humedad o la temperatura ambiente tal que, si el operador cambia involuntariamente la velocidad de aplicación, la presión del cartucho o el ángulo de la boquilla, el cordón resultante pierde homogeneidad y compromete la estabilidad térmica y mecánica del conjunto.



Figura 1:

Proceso manual de inyección de silicona y resina epóxica en el ensamblaje de las cocinas de inducción en la empresa EIE.

Dadas las limitaciones de los procedimientos manual en el ensamblado estructural de cocinas de inducción, resulta conveniente entonces implementar sistemas automatizados que garanticen operaciones uniformes y repetibles dentro de los márgenes técnicos requeridos. Los robots cartesianos representan una solución viable para esta fase particular en la producción de cocinas de inducción ya que permiten controlar el movimiento en un plano lineal con precisión milimétrica, garantizando que el cordón de adhesivo se deposite con ancho, altura y continuidad constantes, incluso cuando el chasis o el vidrio tengan desviaciones dimensionales [2, 3]. Las trayectorias lineales rígidas del robot cartesiano evitan vibraciones en el cabezal dispensador, lo que es crítico para resinas epóxicas o compuestos de curado que requieren una velocidad estable para evitar burbujas y asegurar una correcta adherencia. Como parte del sistema automático pueden integrarse también otros mecanismos de dosificación volumétrica, sensores de presión en la boquilla, medición de caudal en tiempo real y cámaras para verificar el espesor del cordón durante la aplicación. Asimismo, es posible coordinar la dosificación con los tiempos de curado para evitar tensiones en materiales que fraguan rápidamente y compensar automáticamente variaciones en la viscosidad del adhesivo debido a temperatura o humedad en planta.

Considerando los aspectos antes expuestos, este artículo describe un prototipo de robot cartesiano propuesto para sustituir el proceso manual de inyección de silicona y resina epóxica que se realiza durante el ensamblaje de las cocinas de inducción en la empresa EIE. Con el trabajo se intenta aumentar la productividad y lograr soberanía tecnológica [4-7]. El presente trabajo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 realiza una breve descripción del prototipo propuesto. El modelado del robot cartesiano se aborda en la Sección 3. La Sección 4 describe las trayectorias del robot cartesiano y la Sección 5 presenta los principales elementos de su programación lógica. Finalmente se realizan las conclusiones del trabajo y líneas futuras.

2.- BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Para el ensamblado estructural de cocinas de inducción, el presente trabajo desarrolla un sistema robotizado cartesiano que permite el cumplimiento de cada una de sus etapas. El posicionamiento de la inyección de pegamentos en el ensamblaje de las cocinas de inducción es repetitivo y los movimientos son lineales, pero requiere un alto grado de rigidez mecánica, precisión y repetibilidad. La Fig. 2 ilustra el diseño del robot propuesto para el caso de estudio analizado. El prototipo cuenta con una mesa móvil, que se desplaza en el eje de coordenada X, siendo la primera articulación del manipulador. La segunda articulación abarca el recorrido en Y, mientras que la tercera articulación es la encargada del movimiento de los dosificadores de pegamento en Z. Combinando los tres desplazamientos, se realizan trayectorias rectangulares para la inyección de pegamento en los marcos de las cocinas de inducción. En la Fig. 2(c), se muestran los dos dosificadores de pegamento, el primero para la silicona y el segundo que mezcla resina epóxica y sulfuro curado.

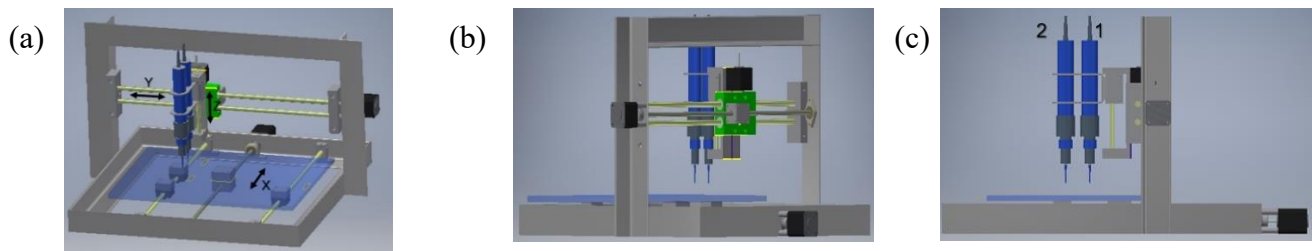


Figura 2

Diferentes vistas del prototipo modelado en 3D: a) vista frontal, b) vista trasera, c) vista lateral.

La Fig. 3 muestra el esquema de conexión del robot manipulador cartesiano de 3 GDL considerando sus tres actuadores y los sensores acoplados que se conectan a las entradas rápidas del PLC. El prototipo cuenta con tres motores paso a paso tipo NEMA 23, que incluyen un controlador angular de posición (*encoder*). Los motores utilizados se conectan a sus correspondientes controladores (*drivers*), que constituyen la etapa de potencia. El prototipo consta de tres drivers CL57T, uno por cada motor. Además, se incluyen *encoders* incrementales acoplados que poseen una resolución de 2000 pulsos por revolución y trabajan con una tensión de 5V y corriente de salida de 55mA. Cuenta con dos canales de señal de salida y su frecuencia de salida puede ser mayor o igual a 1MHz. El sensor de fin de carrera utilizado en el prototipo es el SV-166-1C25, cuyo rango de tensión es de 0-250VAC y rango de corriente de 3 a 16A. Las señales de habilitación y frecuencia necesarias para el control de los actuadores son enviadas desde el PLC a cada driver. Las trayectorias que debe seguir el robot se generan en MATLAB que se comunica mediante OPC con el PLC conectado a la computadora por ethernet [8]. El PLC propuesto es el TM241CE40R del fabricante Schneider Electric, y la fuente de alimentación es de 24V CC e incluye un sistema de reloj en tiempo real.

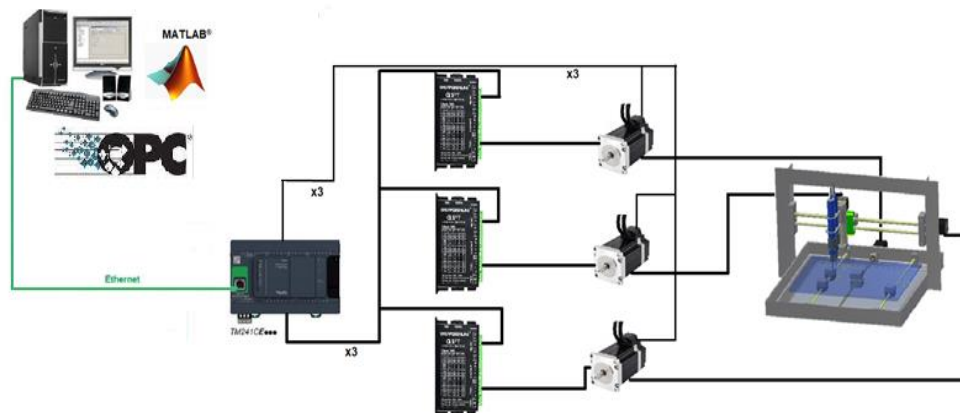


Figura 3

Esquema de conexión del robot manipulador cartesiano.

3.- MODELADO DEL ROBOT CARTESIANO

En el prototipo diseñado, las variables articulares pueden ser leídas directamente de los correspondientes sensores por la unidad de control del robot. Debido a esto, el modelo cinemático directo es utilizado para presentar al usuario información relativa a la localización del extremo del robot cartesiano. La obtención de dicho modelo tiene dos enfoques diferentes: métodos geométricos y métodos basados en cambios de sistemas de referencia [9,10]. En particular, los métodos basados en cambios de sistemas de referencia permiten sistemáticamente abordar la obtención del modelo cinemático directo del robot para n grados de libertad considerando las matrices de transformación homogénea [11]. En el presente trabajo se considera este enfoque mediante la convención Denavit Hartenberg [12,13] como paso inicial y posterior se emplea un planteamiento alternativo mediante la formulación Lagrangiana, basada en consideraciones energéticas, tal que:

$$L = E_c - E_p \quad (1)$$

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (2)$$

donde L representa la Función Lagrangiana, E_c está asociada a la energía cinética involucrada, E_p representa la energía potencial, q_i viene dado por las coordenadas generalizadas en este caso las articulares, τ_i es fuerza o pares aplicado sobre el grado de libertad. Considerando las ecuaciones (1) y (2) en el caso objeto de estudio el modelo dinámico del robot se presenta entonces de la forma:

$$\tau = D \ddot{q} + H + C \quad (3)$$

Siendo q el vector de coordenadas articulares, \dot{q} el vector de velocidades de las articulaciones, \ddot{q} el vector de aceleraciones de las articulaciones, τ el vector de fuerza o pares que se aplica a cada articulación, $D(q)$ la matriz cuadrada de inercias de cuyos elementos son función del vector de coordenadas articulares, $H(q, \dot{q})$ la matriz representando las fuerzas de Coriolis, $C(q)$ la matriz de fuerzas de gravedad, y n el número de grados de libertad del robot. Entonces considerando el vector de fuerzas τ y los pares motores efectivos aplicados sobre cada coordenada q_i , se puede emplear la convención Denavit Hartenberg para obtener la ecuación dinámica del sistema:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \\ \ddot{d}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_3 g \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde F representa la fuerza motora efectiva que actúa sobre cada articulación, \ddot{d}_i es la aceleración de cada articulación. En este caso, a partir de las relaciones de la ecuación (4) se obtienen las siguientes expresiones que representan los modelos dinámicos inversos del robot cartesiano.

$$F_1 = (m_1 + m_2 + m_3) \ddot{d}_1 \quad (5)$$

$$F_2 = (m_2 + m_3) \ddot{d}_2 \quad (6)$$

$$F_3 = m_3 \ddot{d}_3 - m_3 g \quad (7)$$

3.1 MODELADO DINÁMICO DIRECTO DE UN CARTESIANO DE 3 GDL

La ecuación (3) es no lineal, por lo que su integración para obtener el modelo dinámico directo no es sencilla. Por esto, puede ser conveniente realizar este modelado en variables de estado, como se muestra en la Fig. 4.

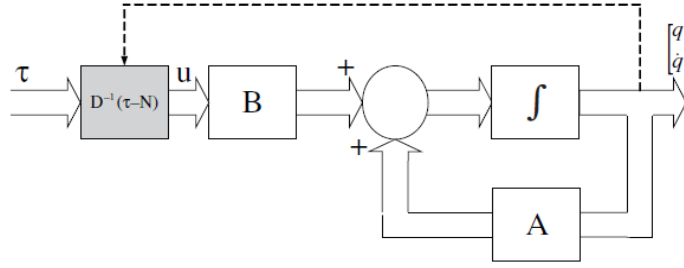


Figura 4
Representación en el espacio de estados.

Las variables de estado naturales del sistema serán las posiciones y velocidades de cada una de las articulaciones, siendo, por tanto, el vector de estado $[q \quad \dot{q}]^T$. Como $N = H + C$, se sustituye N en la ecuación (3) y se despeja en función de \ddot{q} , obteniéndose:

$$\ddot{q} = D^{-1}[\tau - N] \quad (8)$$

Haciendo uso del vector de estado se define:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -D^{-1}N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D^{-1} \end{bmatrix} \tau \quad (9)$$

Además, como D^{-1} es función del vector de coordenadas articulares, la ecuación (8) puede transformarse para lograr una ecuación de estado lineal, de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u \quad (10)$$

donde $u = D^{-1}(\tau - N)$, siendo $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ y $B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$. Note que el bloque sombreado en la Figura 4 realiza una transformación no lineal que depende del estado $[q \quad \dot{q}]^T$. La ecuación (9) permite encontrar la trayectoria $q(t)$ a partir de los pares $\tau(t)$ de manera iterativa. Mediante este se puede obtener $q(t)$ durante todo el intervalo de interés. Entonces, a partir del modelo inverso formado por las ecuaciones (5)-(7), se obtiene el vector de estado y se determina el modelo dinámico para el cartesiano de 3GDL, tal que:

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1 + m_2 + m_3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2 + m_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$u = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1 + m_2 + m_3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2 + m_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 - 0 \\ F_2 - 0 \\ F_3 + m_3 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_1}{m_1 + m_2 + m_3} \\ \frac{F_2}{m_2 + m_3} \\ \frac{F_3 + m_3 g}{m_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \\ \ddot{d}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{F_1}{m_1 + m_2 + m_3} \\ \frac{F_2}{m_2 + m_3} \\ \frac{F_3 + m_3 g}{m_3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 SIMULACIÓN DEL ROBOT CARTESIANO

Para la simulación del Robot Cartesiano se utilizó el *Robotics Toolbox* disponible en Matlab que provee varias funciones que son útiles en la robótica, incluyendo la cinemática, la dinámica y la generación de trayectorias. Este modelo está basado en las ecuaciones (11)- (13). El manipulador cartesiano de 3 GDL se define a partir de los parámetros de la convención Denavit Hartenberg, obteniéndose la simulación del robot como muestra la Fig. 5(a).

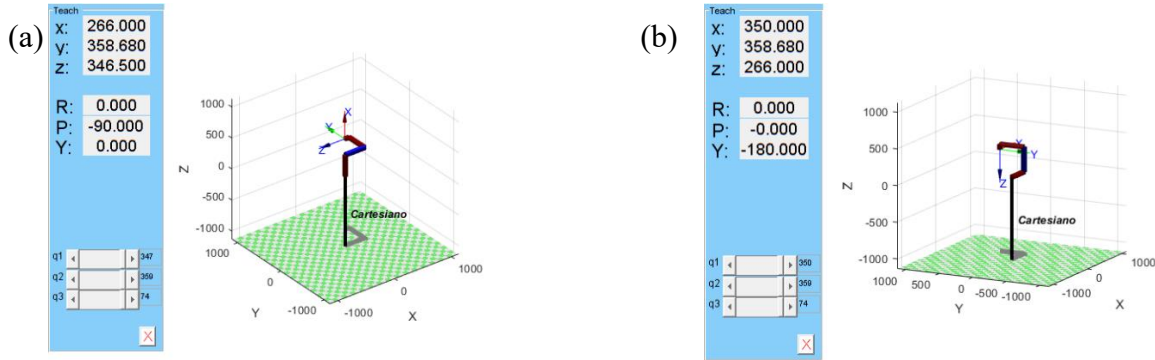


Figura 5

Simulación del robot cartesiano: a) localización girada 90° respecto de Y, b) localización en la posición correcta.

La Fig. 5(a) indica que la simulación obtenida no se corresponde con la localización real del robot, debido a que se encuentra girada 90° respecto de Y. Es decir, siendo el sistema de referencia OXYZ el modelo hallado, el real estaría ubicado como el OUVW. A partir de esto, se define que la orientación OUVW, con el eje OV coincidente con OY. Lo cual da una localización específica a la base obtenida. Si en la primera articulación en lugar de ser entorno a Z se hace con Y o con X, la ubicación de la base del robot cambia como se ilustra en la Figura 5(b). Sin embargo, los parámetros de DH no se modifican.

4.- TRAYECTORIAS GENERADAS

Durante la inyección de pegamento en el marco de las cocinas de inducción se generan siete trayectorias que requieren de la interpolación de los puntos que las conforman. En este caso, las coordenadas (x, y, z) de una trayectoria se transforman en coordenadas articulares (q_1, q_2, q_3), aplicando la cinemática directa y el resultado es interpolado. Con esta última operación, se determinan los valores articulares en que debe posicionarse el extremo final del robot. Dado que las trayectorias usadas son articulares, no requieren cinemática inversa en cada punto [14,15]. Como resultado, en el manipulador robótico diseñado los desplazamientos de las articulaciones q_1, q_2, q_3 coinciden con los desplazamientos en los ejes coordenados x, y, z respectivamente. Las funciones interpoladoras utilizadas son mayormente del tipo polinomial y trapezoidal para obtener las posiciones, velocidades y aceleraciones en función de pasos y no de tiempo. Además, por cada paso el interpolador obtiene un punto y el número de pasos se determina mediante el tiempo en que se quiere hacer una trayectoria y su duración. Los puntos que describen la trayectoria, se obtienen analizando los desplazamientos precisos de las articulaciones. El tiempo de aceleración se halla experimentalmente, de modo que se corresponda con el grado de inclinación necesario en los puntos vía.

En este caso, no se requiere asignar el número de pasos, pues por la velocidad el interpolador lo determina. Los límites de velocidad se determinan por la máxima velocidad aportada por el motor con tiempo de muestreo de 0.1 segundo. Como los actuadores utilizados dan 1.8° por paso, una revolución es 200 pasos. El mismo trabaja a una frecuencia de 500 Hz, lo que significa que el tiempo entre pasos es 2 milisegundos (ms). Por tanto, una revolución se alcanza a los 400 ms y la velocidad máxima soportada por el motor utilizando el husillo es de 5 mm/s. A fin de dispensar la silicona y resina epóxica, además, se necesita una trayectoria rectangular continua, con las esquinas ligeramente redondeadas. Por esto, se utiliza también el ajuste parabólico como interpolador que garantiza la continuidad de la posición tal como ocurre con el interpolador lineal, y además elimina las discontinuidades de velocidad. Para que el manipulador cartesiano propuesto reciba y expulse el marco de las cocinas de inducción correctamente, se emplean trayectorias sencillas que, como se ha mencionado previamente, consideran interpoladores polinomiales y trapezoidales. La Fig. 6 describe aspectos relevantes de las trayectorias generadas.

Al iniciar el procedimiento de inyección de pegamento, se hace necesario que el manipulador vaya de su posición inicial a la final, en busca del marco de la cocina de inducción. Para realizar esta trayectoria se debe desplazar el eje de la mesa y elevar el extremo del robot. Con esto se evita una obstrucción a la entrada del marco. Sin embargo, esta trayectoria solo se ejecuta al iniciar el proceso, una vez terminado el primer marco, se ejecuta la siguiente trayectoria. Como ilustra la Figura 6 (a)-(b), para realizar esta primera trayectoria se obtienen las coordenadas articulares en mm (q_1 , q_2 , q_3), siendo el punto inicial (0 0 340) y el final (350 0 266). A partir de estas se calculan las velocidades y el número de pasos.

La Fig. 6 (a) muestra las variaciones de posición que experimentan las articulaciones en función de los puntos obtenidos por la interpolación. Tal como se ilustra en la Fig. 6(b), durante esta primera trayectoria la articulación q_2 no varía su posición en esta trayectoria, pero se observa que la articulación q_3 cambia su posición levemente. Una vez posicionado el marco de la cocina de inducción, se debe llevar la mesa móvil a la ubicación de inicio para el pegado y el eje z a su posición inicial. Esta segunda trayectoria se muestra en la Fig. 6 (c)-(d) y garantiza la distancia necesaria para el dispensado de silicona. En este caso la Fig. 6(d) muestra que q_2 no varía, pero q_1 y q_3 sí. La tercera articulación realiza el mismo recorrido que en la trayectoria anterior, pero en sentido contrario; mientras que la primera se desplaza a una menor distancia. Finalmente, en la Fig. 6(e)-(f) se ilustra la tercera trayectoria que sigue una ruta rectangular con las esquinas ligeramente redondeadas para garantizar la inyección de silicona en el marco. Los datos a interpolar para obtener dicha ruta son: inicio (308 0 340) y un conjunto de puntos que conforman el camino a seguir (55 0 340; 55 366 340; 331 366 340; 331 0 340; 200 0 340). Este último punto va más allá de donde debe terminar la trayectoria. El objetivo de esto es que el interpolador pueda realizar correctamente la curva de la cuarta esquina del marco. Una vez llegado al punto de inicio de la inyección de silicona, el dosificador se detiene y el robot continúa su trayectoria. Se necesita también indicar los máximos valores de velocidad, siendo en las tres articulaciones 5 mm/s y el tiempo de aceleración 15 segundos. En la Fig. 6(f), se observa que, en este caso, la articulación q_3 se mantiene en su posición inicial permitiendo que el dispensador esté lo suficientemente cerca del marco para colocar el pegamento. En tanto, q_3 se desplaza solo por la necesidad de elevar la plataforma para la entrada y salida del marco, o en caso de obstrucción de los dosificadores. Las articulaciones q_1 y q_2 varían sus posiciones en correspondencia con la trayectoria seguida. También se muestra que en pequeños intervalos de tiempo q_1 y q_2 se mueven a la vez, lo que se corresponde con las curvas de la trayectoria. La Fig. 6(g)-(h) muestra cuánto se deben desplazar los ejes X e Y en milímetros al terminar la inyección de silicona. El objetivo de este movimiento es ubicar el segundo dosificador en la posición inicial necesaria para depositar la resina epóxica.

Además de estas cuatro trayectorias, se hace necesario realizar otras tres trayectorias para la inyección de silicona, la dosificación de resina y la expulsión de un marco terminado. Las trayectorias relacionadas a la inyección de silicona se ilustran en la Fig. 6 (i)-(j), donde el dosificador correspondiente a la resina solo va a depositar pegamento en 8 puntos. Pero para pasar por ellos, es necesario que siga una trayectoria rectangular con las esquinas redondeadas. Esta es similar a la usada para la silicona, pero de menor dimensión. Para la dosificación de resina, es necesario trasladar la mesa móvil a su posición inicial para expulsar el marco terminado. El eje Y debe retornar a su posición inicial, quedando listo para el reinicio del proceso y el eje Z, elevarse para permitir la salida del marco. Con el objetivo de desarrollar estos desplazamientos, se realiza la trayectoria 6 mostrada en la Fig. 6 (k)-(m). Se puede apreciar, en este caso, que q_1 , q_2 y q_3 varían su posición siendo la única trayectoria propuesta en la que se mueven las tres articulaciones a la vez. La primera articulación es la que más se desplaza, mientras que q_2 solo se mueve 6 milímetros. Por último, cuando se expulsa un marco terminado, es necesario retornar de esa posición al extremo opuesto de la mesa para buscar un marco nuevo. Para esto se emplea la trayectoria 7 mostrada en la Fig. 6 (n)-(l), cuyo inicio está determinado en (0 0 266) y su punto de destino es (350 0 266). Además, los límites de velocidad son (0.5 0 0) para 875 pasos.

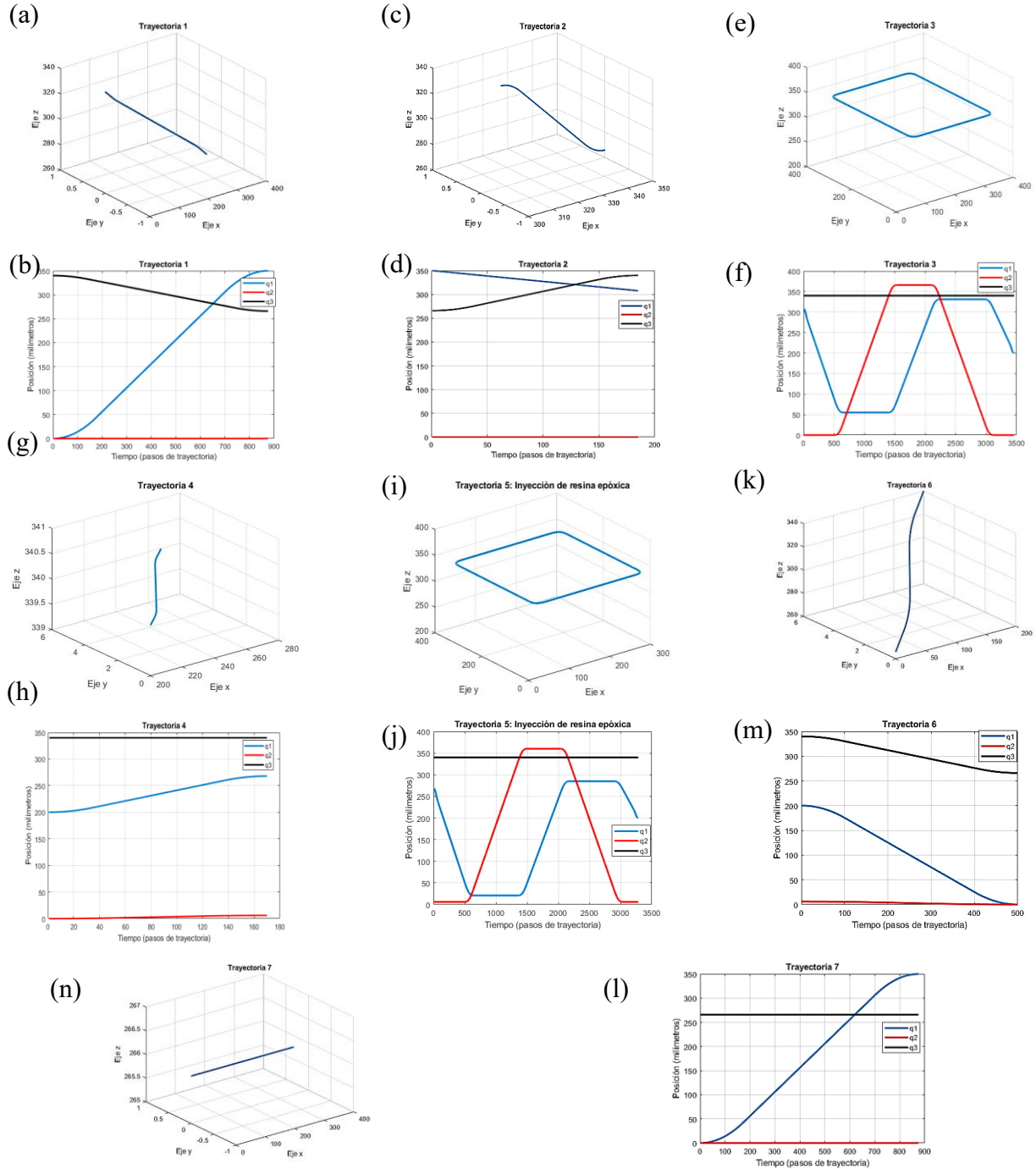


Figura 6

Trajectorias y Articulaciones generadas para el sistema robótico cartesiano: a) y b) para los puntos de interpolación en el posicionamiento inicial del marco de la cocina de inducción; c) y d) para el movimiento de la mesa móvil a la ubicación de inicio para el pegado; e) y f) seguimiento de ruta rectangular con las esquinas ligeramente redondeadas para inyección de silicona; g) y h) desplazamiento de los ejes X e Y unos milímetros (posicionamiento del segundo dosificador); i) y j) seguimiento de ruta rectangular con las esquinas ligeramente redondeadas para inyección de resina epóxica; k) y m) traslación de la mesa móvil a su posición inicial, para expulsar el marco terminado; n) y l) retorno de la posición final al extremo opuesto de la mesa, para buscar un marco nuevo.

5.- PROGRAMACIÓN DEL MANIPULADOR CARTESIANO

Para la programación del manipulador cartesiano se utiliza el software SoMachine. Además, la lógica de programación comprueba la posición actual de cada articulación y compara los puntos obtenidos en el control cinemático. El programa realizado emplea 3 salidas rápidas del PLC que se utilizan para generar los pulsos para el control de los motores mediante los drivers. Se aprovechan también los *encoders* del tipo cuadratura para indicar la distancia recorrida en un sentido e indicar la distancia en el sentido contrario. En el diseño propuesto se dispone de tres *encoders*, y se utilizan seis entradas rápidas del PLC para leer estas señales. La lógica de programación desarrollada emplea cuatro tareas. Las tres primeras enfocadas en las funciones de habilitación y generación de los pulsos para el control de cada motor, y la última en las comparaciones de posición, el conteo de los marcos realizados.

El diagrama mostrado en la Fig. 7 describe la comunicación PLC/Matlab considerando los puntos obtenidos en la interpolación según la trayectoria desarrollada. El programa incluye una pausa que es activada desde el PLC, por distintas causas de seguridad (se recibe un marco, se expulsa o se necesita una pausa externa para inspección o por obstrucción del dosificador). Por otro lado, la Fig. 8 ilustra los procedimientos para habilitar el encendido del motor a través del bloque de modulación de ancho de pulso (PWM). En esta etapa a cada motor se le asigna un bloque de PWM y los pulsos generados son enviados por la salida rápida correspondiente del PLC al driver. Para su operación, se comprueban las condiciones siguientes: proceso iniciado, no ha terminado la trayectoria, no se han procesado todos los marcos, no se está ejecutando una pausa y la distancia a moverse no es cero. Siguiendo esta idea, la Fig. 9 muestra la lógica del proceso de asignar las direcciones de movimiento a los motores, considerando que sus señales son enviadas a los respectivos drivers, dependiendo de las articulaciones. Las direcciones correspondientes a cada motor dependen de la trayectoria que se esté realizando. Todas las funciones descritas anteriormente, tienen en cuenta como condición de parada el fin del proceso de inyección de pegamento, garantizando las condiciones iniciales y arranque del prototipo.

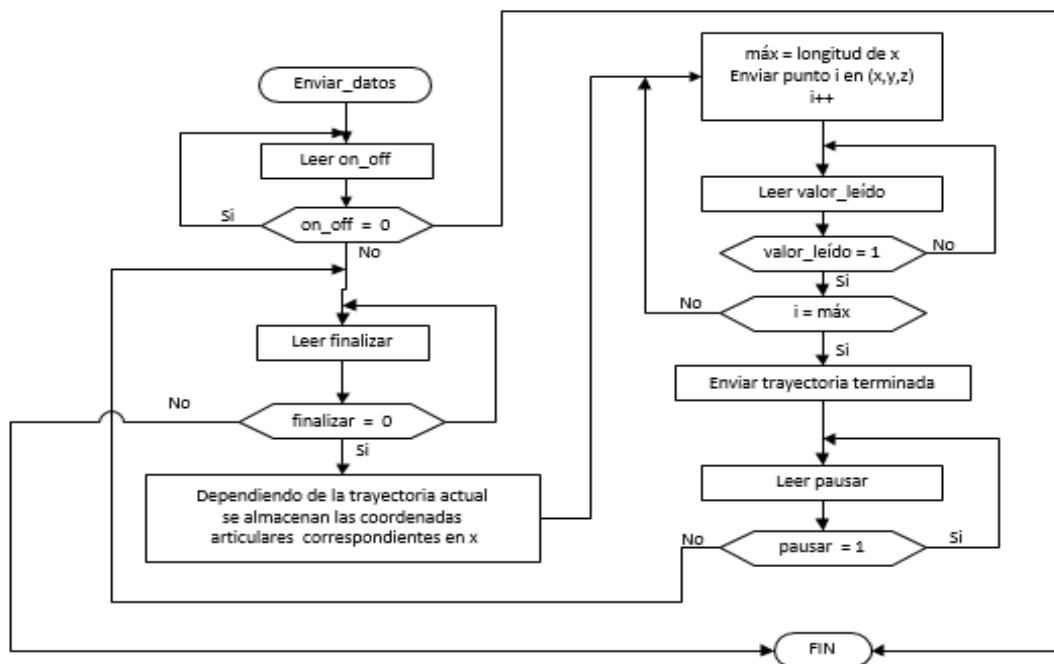


Figura 7
Función de comunicación PLC/Matlab considerando los puntos de interpolación obtenidos.

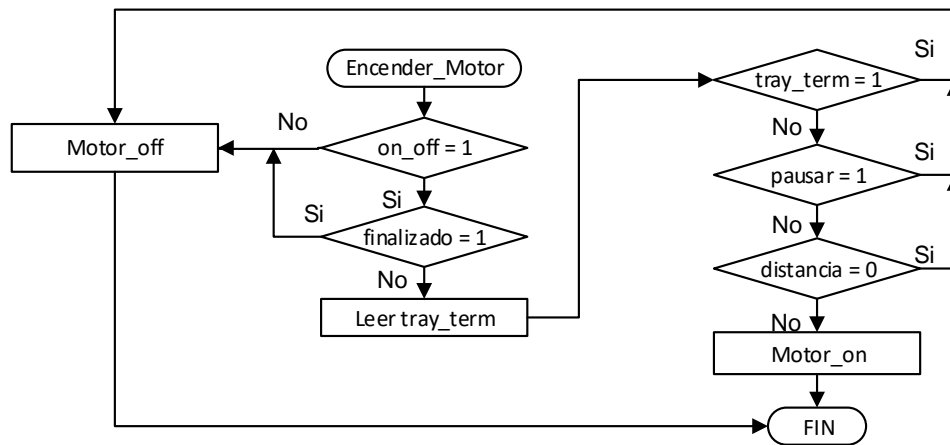


Figura 8
Función de habilitación de motores.

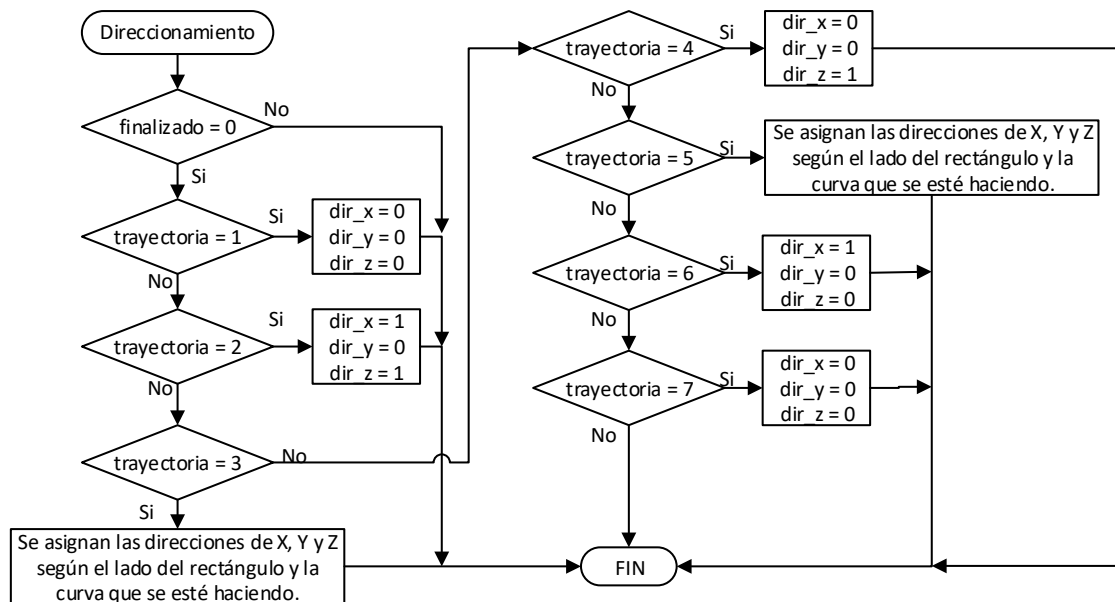


Figura 9
Función de rotación y dirección de motores.

Para la interfaz gráfica de generación de las trayectorias del sistema robótico cartesiano se utilizó el entorno de programación visual GUIDE disponible en MATLAB que posee características básicas de Visual Basic o Visual C++. La interfaz diseñada se muestra en la Figura 10.

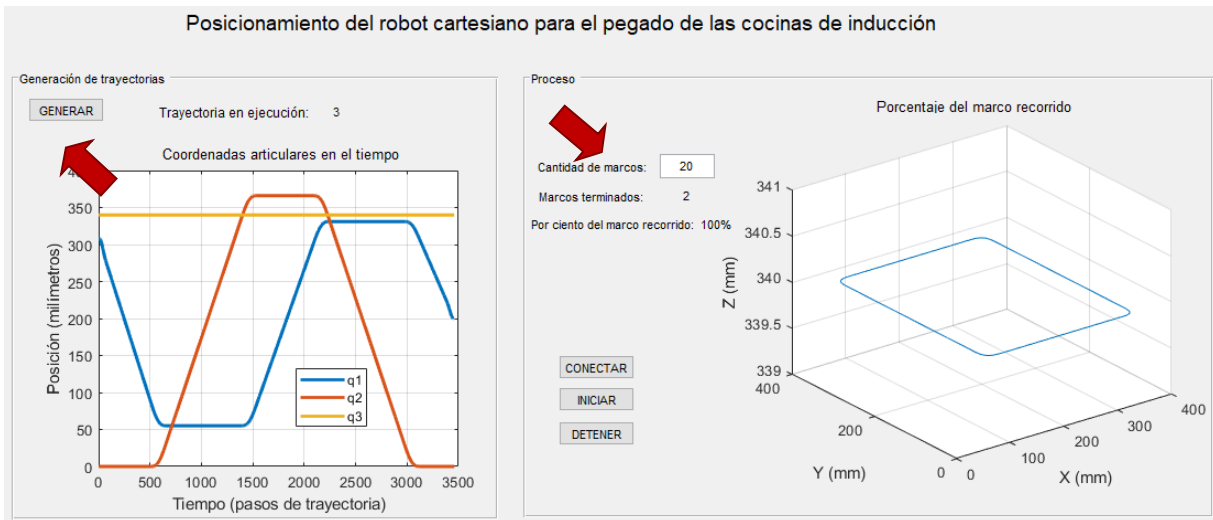


Figura 10
Interfaz gráfica para el posicionamiento del robot cartesiano.

Tal como se observa, la interfaz gráfica tiene a la izquierda el panel para la generación de trayectorias que muestra todos los desplazamientos de las coordenadas articulares del manipulador durante la ejecución de las trayectorias en el proceso. Además, se indica la trayectoria que se está ejecutando. Por otro lado, el panel extremo derecho de la interfaz gráfica indica la cantidad de marcos que serán procesados por el prototipo de inyección de pegamento, y permite habilitar la conexión OPC entre MATLAB y el PLC. Se dispone también en la interfaz las opciones de iniciar y detener el proceso. Una vez iniciado el proceso, será posible observar visualmente el avance en la trayectoria recorrida y la cantidad de marcos cuya inyección de pegamento ha culminado.

6.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propuso un prototipo de robot cartesiano diseñado para sustituir la inyección manual de pegamento durante el ensamblado estructural de las cocinas de inducción que se producen en la empresa la EIE. En particular se describió la arquitectura y modelado del prototipo propuesto, así como las trayectorias y la programación lógica asociada. Las simulaciones realizadas permitieron validar el modelo cinemático obtenido con el movimiento espacial del robot y determinar el valor de sus coordenadas articulares. Si bien las trayectorias generadas logran el posicionamiento del manipulador en el proceso de pegado de las cocinas de inducción de manera satisfactoria, se hace necesario también probar un diseño basado en motores de directa para comprobar el comportamiento de las velocidades. Como una línea de trabajo futuro se establece el control dinámico del robot, así como la implementación de otros algoritmos de control avanzado para que regulen la fuerte dinámica del manipulador. Además, se establece como trabajo futuro también el diseño de una interfaz que amenice la comunicación entre el operador y el robot. Por último, cabe destacar que sería conveniente incorporar un sistema de dosificación más sencillo que permita reducir costos y no necesite importaciones.

REFERENCIAS

1. El-Mashad, H. M., & Pan, Z. (2017). Application of induction heating in food processing and cooking. *Food Engineering Reviews*, 9(2), 82-90.
2. Mehmood, Y., Cannella, F., & Cocuzza, S. (2025). Analytical Modeling, Virtual Prototyping, and Performance Optimization of Cartesian Robots: A Comprehensive Review. *Robotics*, 14(5), 62.
3. Martínez Ochoa, C. E., Benítez González, I. O., Cepero Díaz, A. O., Nuñez-Alvarez, J. R., Miguélez-Machado, C. G., & Llosas Albuerne, Y. (2022). Active disturbance rejection control for robot manipulator. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(5), 622-632.

4. Miguélez Machado, C. G., Benítez González, I. O., Rivera Rivera, A. M., & Moreno Vega, V. (2020). Implementación de sistema operativo robótico en una plataforma de robot móvil. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 79-92.
5. Pérez Villanueva, H., Medina Rodríguez, Z., Alfonso Cordoví, A., Casanova Pacheco, J.L., Corrales Lay, L.R., Prieto Moreno, A.S. Diseño e implementación de un software para dispositivos médicos modulares. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, RIELAC*, 2024, 45(3):16-33.
6. Suárez Concepción, F., Piñero Aguilar, R., Prieto Moreno, A.S., Alfonso Cordoví, A., Carbó Castro, J.C., Llanes-Santiago, O. (2022) Metodología para la automatización de procesos tecnológicos en la industria farmacéutica cubana. *Ingeniería Industrial*, 43(1), 1-14.
7. Vázquez Leiva, J.H., Feito Guerra, A., Mustelier Rivero, R., Buzón Tur, M., Estévez Alonso, A. Sistema de Monitorización basado en AIS y SBC para gestión lógica portuaria. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, RIELAC*, 2025, 46: 1-13.
8. Persin, S., Tovornik, B., & Muskinja, N. (2003). OPC-driven Data Exchange between MATLAB and PLC-controlled System. *International Journal of Engineering Education*, 19(4), 586-592
9. Gu, E. Y. (2013). *Robotic Kinematics and Statics*. In *A Journey from Robot to Digital Human: Mathematical Principles and Applications with MATLAB Programming* (pp. 83-134). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
10. Aspragathos, N. A., & Dimitros, J. K. (1998). A comparative study of three methods for robot kinematics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 28(2), 135-145.
11. Lipkin, H. (2005). A note on Denavit-Hartenberg notation in robotics. In *International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*. Vol. 47446, 921-926.
12. Rocha, C. R., Tonetto, C. P., & Dias, A. (2011). A comparison between the Denavit–Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(4), 723-728.
13. Lettori, J., Raffaeli, R., Bilancia, P., Peruzzini, M., & Pellicciari, M. (2022). A review of geometry representation and processing methods for cartesian and multiaxial robot-based additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(11), 3767-3794.
14. Malhan, R. K., Thakar, S., Kabir, A. M., Rajendran, P., Bhatt, P. M., & Gupta, S. K. (2022). Generation of configuration space trajectories over semi-constrained cartesian paths for robotic manipulators. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(1), 193-205.
15. Weiß, M. G. (2020). Optimization of Cartesian Tasks with Configuration Selection. In *IMA Conference on Mathematics of Robotics* (pp. 153-160). Cham: Springer International Publishing.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Yelena Matias Domínguez: Curación de datos, Conceptualización, Investigación, Metodología, Análisis Formal, Software, Validación – Verificación y Redacción.

Orestes Arias Rodríguez: Conceptualización, Metodología, Análisis Formal, Validación – Verificación.

Ivón Oristela Benítez González: Conceptualización, Investigación, Metodología, Análisis Formal, Software, Validación – Verificación y Redacción.

AUTORES

Yelena Matias Domínguez, Ingeniera Automática graduada en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. Su trayectoria combina la ingeniería aplicada a la investigación e innovación tecnológica. Sus principales áreas de interés son la instrumentación de precisión y el control de sistemas. Correo: yelenamd96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9253-8881>.

Orestes Arias Rodríguez, Ingeniero Mecánico, especialista en diseño y desarrollo mecánico en el Centro de Inmunoensayo (BioCubaFarma), La Habana, Cuba. Posee experiencia en ingeniería de diseño, mantenimiento y desarrollo de componentes mecánicos para equipos y procesos vinculados a la industria biotecnológica. Sus principales intereses profesionales se orientan al diseño mecánico aplicado, la ingeniería industrial y la optimización de sistemas técnicos en entornos biotecnológicos. Correo: orestes.arias@cie.cu , <https://orcid.org/0000-0002-9273-8081>.

Ivón Oristela Benítez González, Doctora en Ciencias Técnicas (PhD, 2017), Máster en Informática Industrial (MSc, 2010) e Ingeniera en Automática (2005) por la Universidad Politécnica de La Habana (CUJAE), Cuba. Actualmente es docente en la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (UNIR), España. Ha sido profesora en la CUJAE (2005-2025) y profesora invitada en el ITESM, México. Sus principales temas de investigación incluyen el control avanzado de procesos, la robótica educativa e industrial y la automatización de procesos. Correo: ivonoristela.benitez-externo@unir.net , <https://orcid.org/0000-0002-1096-305X>.



Esta revista se publica bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional