

Redesign of a 5 DOF robot for industrial manipulator control teaching

Héctor Pérez-Alba* José Daniel Castro-Díaz* Marco A. Arteaga**

* Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, Estado de México 57130, México. (e-mail: hectorperez222@aragon.unam.mx, josecastrocad@aragon.unam.mx) ** Departamento de Control y Robótica, División de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México 04510, México. (e-mail: marteagp@unam.mx)

Resumen:

Robot control is an area where concepts from different science and engineering disciplines, that at first are difficult to associate, converge. To illustrate and integrate such concepts, functional experimental platforms with actualized software and hardware components are required. For this reason, in this work we present the reconditioning of a 5 DOF manipulator robot, out of service, manufactured in the nineties. Its rehabilitation process presents an excellent opportunity to illustrate the essential theoretical and practical knowledge in a first approach to learning the industrial manipulator robots control.

Palabras clave: Industrial manipulator, kinematic analysis, sensors, actuators, robot control.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la acelerada democratización de la tecnología, actualmente la robótica juega un papel creciente en la vida del ser humano. Esto ha permitido que cada vez más personas integren algún tipo de robot a su cotidianeidad, desde drones para llevar a cabo tomas de video aéreas (Nalamati et al., 2019) hasta robots móviles con ruedas, que llevan a cabo tareas de limpieza en el hogar (Midhun et al., 2024). Una razón de tal penetración es que el usuario final no necesita conocimientos especializados para usar dichos dispositivos; caso contrario ocurre con los ingenieros que los diseñan, implementan y prueban su funcionamiento.

Un caso concreto se ha dado en el área de los ambientes virtuales. Por ejemplo, la empresa Novint Technologies diseñó y fabricó su robot Falcon como interfaz háptica, originalmente pensado como un *joystick*, que aumentara el grado de inmersión del usuario en distintos videojuegos (Rodríguez y Velázquez, 2012). Posteriormente, dicho dispositivo comenzó a utilizarse como plataforma experimental para la investigación en control de robots (Michelotti, 2011). Su bajo costo y código abierto lo convirtió en una plataforma experimental profusamente utilizada en otro tipo de desarrollos, sobre todo en el ámbito académico (Alonso-Torres et al., 2022).

No hay que perder de vista que el caso mencionado y otros más, pertenecientes a diferentes áreas de desarrollo, tienen su raíz cuando el concepto *robótica* comenzó a extenderse gracias al diseño, implementación y uso de los robots manipuladores industriales (Spong et al., 2006); comenzando en 1961 con la instalación del robot Unimate en una cadena de montaje. Posteriormente, surge en 1973 el robot Famulus de la marca KUKA, el primero con 6 GDL (Siciliano et al., 2010). Es por ello por lo que estos dispositivos son considerados los predecesores de todos los tipos de robots con los que se cuentan hoy en día.

Debido a lo anterior, lo que universidades de todo el mundo, buscan integrar robots industriales seriales a sus cursos de licenciatura, con el fin de que los estudiantes integren correctamente la teoría y la práctica de la robótica, en escenarios similares a los encontrados en la industria (Garduño-Aparicio et al., 2018). Sin embargo, el alto costo de dichos dispositivos, vuelve una tarea difícil que la mayoría de las instituciones proporcionen a los estudiantes una educación que abarque tanto la teoría como la práctica (Jung, 2013). Es por ello que se buscan alternativas, como la reutilización de modelos antiguos.

En este artículo se presenta el reacondicionamiento del robot manipulador C-4/EV de 5 GDL, cuyo uso fue interrumpido en la década de los noventa. Su proceso de análisis y puesta en funcionamiento esboza los pasos para integrar los conocimientos necesarios, tanto teóricos como prácticos, en una aplicación de robótica industrial. Se pretende ilustrar, de manera sucinta, cómo los conceptos teóricos aplicados al análisis de los robots manipuladores, además de las herramientas de software y hardware utilizadas, son la base para desarrollos más avanzados en el área de la robótica (Molotla et al., 2023).

El texto está organizado de la siguiente manera: los fundamentos matemáticos utilizados para el análisis del dispositivo, además de una breve reseña de los elementos que lo distinguen como robot industrial, se presentan en la Sección 2. Posteriormente, en la Sección 3 se abordan los materiales y el método utilizados durante el reacondicionamiento del robot, con el fin de relacionar la parte práctica de la implementación con los conceptos teóricos previamente establecidos. La Sección 4 muestra los resultados de la implementación con un enfoque de control del manipulador. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. PRELIMINARES TEÓRICAS

Para comprender el funcionamiento de un robot industrial, es necesario contar con conocimientos teóricos y técnicos. En el primer caso, se hace uso de ciencias básicas como geometría analítica, álgebra lineal, cinemática y dinámica, mientras que en el segundo es necesario comprender, sobre todo, conceptos de control automático como señal de referencia, retroalimentación, error de seguimiento, etc. Por ello, en esta sección se presentarán, de una manera breve, los aspectos teóricos y técnicos más relevantes que fueron necesarios para el reacondicionamiento del robot C-4/EV utilizando un enfoque de robótica industrial.

2.1 Cinemática directa

La representación simbólica así como la asignación de sistemas de referencia para el robot C-4/EV se puede observar en la Figura 1.



Fig. 1. Representación simbólica del robot y asignación de ejes de sistemas de referencia

A partir de dicha asignación y utilizando el algoritmo de Denavit-Hartenberg (Spong et al., 2006) se obtuvieron los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

En donde d_i , a_i están en metros y θ_i , θ_{mi} , α_i , en grados.

Es importante señalar que los dos últimos grados de libertad están restringidos al funcionamiento de un mecanismo de tracción diferencial, que acciona la muñeca semiesférica del robot, con una relación de transmisión r. Por esta razón, en la Tabla 1 se añadió una columna en donde

Articulación \boldsymbol{i}	θ_i	$ heta_{\mathrm{m}i}$	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	$\theta_{\mathrm{m}1}$	d_1	0	90
2	θ_2	θ_{m2}	0	a_2	0
3	θ_3	$ heta_{\mathrm{m}3}$	0	a_3	0
4	θ_4	$r(\theta_{\rm m4} + \theta_{\rm m5})$	0	0	-90
5	θ_5	$r(\theta_{\rm m4} - \theta_{\rm m5})$	d_5	0	0
Table 1 Pau	cómo	tros de Denas	rit_H	orton	horg

Table 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot C-4/EV

 θ_{mi} representa el ángulo asociado al movimiento de la flecha de los motores de cada articulación.

Con los parámetros de la Tabla 1 se pueden obtener las matrices de transformación homogénea que relacionan el sistema de referencia de cada articulación con el de la anterior, obteniendo

$${}^{0}\boldsymbol{A}_{1} = \begin{bmatrix} c_{1} & 0 & s_{1} & 0 \\ s_{1} & 0 & -c_{1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_{1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{1}\boldsymbol{A}_{2} = \begin{bmatrix} c_{2} & -s_{2} & 0 & a_{2}c_{2} \\ s_{2} & c_{2} & 0 & a_{2}s_{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(1)
$${}^{2}\boldsymbol{A}_{3} = \begin{bmatrix} c_{3} & -s_{3} & 0 & a_{3}c_{3} \\ s_{3} & c_{3} & 0 & a_{3}s_{3} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{3}\boldsymbol{A}_{4} = \begin{bmatrix} c_{4} & 0 & -s_{4} & d_{5}c_{4} \\ s_{4} & 0 & c_{4} & d_{5}s_{4} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2)

$${}^{4}\boldsymbol{A}_{5} = \begin{bmatrix} c_{5} & 0 & s_{5} & 0 \\ s_{5} & 0 & -c_{5} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3)

en donde $c_i = \cos \theta_i$ y $s_i = \sin \theta_i$ para $i = 1, 2, \dots, 5$.

Multiplicando las ecuaciones (1)-(3) se obtiene la matriz que relaciona la orientación y posición del sistema de referencia del efector final respecto a la base inmóvil del robot

$${}^{0}\boldsymbol{T}_{5} = \begin{bmatrix} c_{1}c_{5}c_{234} - s_{1}s_{5} & -c_{1}s_{234} & c_{5}s_{1} + c_{1}s_{5}c_{234} & x\\ c_{1}s_{5} + c_{5}s_{1}c_{234} & -s_{1}s_{234} & s_{1}s_{5}c_{234} - c_{1}c_{5} & y\\ c_{5}s_{234} & c_{234} & s_{5}s_{234} & z\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(4)$$

en donde $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3), c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3), s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4), c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ y

$$x = c_1(a_3c_{23} + a_2c_2 + d_5c_{234}) \tag{5}$$

$$y = s_1(a_3c_{23} + a_2c_2 + d_5c_{234}) \tag{6}$$

$$z = d_1 + a_3 s_{23} + a_2 s_2 + d_5 s_{234} \tag{7}$$

es la posición del centro del efector final ${}^{0}\boldsymbol{x}_{5} = [x \ y \ z]^{\mathrm{T}}$ respecto a la base del robot.

2.2 Cinemática inversa de posición

Por medio del desacople cinemático, es posible dividir el problema de la cinemática inversa en posición inversa (P_{inv}) y orientación inversa (O_{inv}). Para el primer caso, haciendo el análisis geométrico correspondiente a la Figura 1 pero con $\theta_i \neq 0, \pm 90^\circ, \pm 180^\circ, \ldots$, para i = 1,...3, y asumiendo que la posición deseada ${}^{0}x_{5d} = [x_{d} \ y_{d} \ z_{d}]^{T}$ para el efector final del robot es conocida, se tienen las ecuaciones para calcular la cinemática inversa de posición

$$\theta_1 = \operatorname{atan2}(y_d, x_d),\tag{8}$$

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}\left(\frac{z_{\mathrm{d}} - d_1}{r}\right) - \operatorname{atan2}\left(\frac{a_3 \sin \theta_3}{a_2 + a_3 \cos \theta_3}\right), \quad (9)$$

en donde $r = \sqrt{x_{d}^{2} + y_{d}^{2}}$. Adicionalmente

$$\theta_3 = \operatorname{atan2}(\sqrt{1-D^2}, D), \tag{10}$$

y en donde

$$D = \frac{h^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3},\tag{11}$$

se obtuvo utilizando la ley de cosenos y considerando que $h = \sqrt{x_d^2 + y_d^2 + (z_d + d_1)^2}$.

2.3 Cinemática inversa de orientación

(

Asumiendo que la orientación dese
ada 0R_5 también es conocida y estableciendo la notación

$${}^{D}\boldsymbol{P}_{5} = \begin{bmatrix} P_{x} \\ P_{y} \\ P_{z} \end{bmatrix}.$$
 (12)

De la cinemática directa se obtienen las matrices de rotación para llevar a cabo el desacople cinemático (Murray et al., 1994)

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{3} = \begin{bmatrix} c_{23}c_{1} & -s_{23}c_{1} & s_{1} \\ c_{23}s_{1} & -s_{23}s_{1} & -c_{1} \\ s_{23} & c_{23} & 0 \end{bmatrix}$$
(13)

у

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{5} = \begin{bmatrix} c_{1}c_{5}c_{234} - s_{1}s_{5} & -c_{1}s_{234} & c_{5}s_{1} + c_{1}s_{5}c_{234} \\ c_{1}s_{5} + c_{5}s_{1}c_{234} & -s_{1}s_{234} & s_{1}s_{5}c_{234} - c_{1}c_{5} \\ c_{5}s_{234} & c_{234} & s_{5}s_{234} \end{bmatrix} .$$
(14)

Usando la notación

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{5} = \begin{bmatrix} r_{11_{\mathrm{P_{inv}}}} & r_{\mathrm{P_{inv}}} & r_{13_{\mathrm{P_{inv}}}} \\ r_{21_{\mathrm{P_{inv}}}} & r_{22_{\mathrm{P_{inv}}}} & r_{23_{\mathrm{P_{inv}}}} \\ r_{31_{\mathrm{P_{inv}}}} & r_{32_{\mathrm{P_{inv}}}} & r_{33_{\mathrm{P_{inv}}}} \end{bmatrix},$$
(15)

se puede determinar la posición del centro de la muñeca semi-esférica

$${}^{0}\boldsymbol{P}_{\rm 5d} = {}^{0}\boldsymbol{P}_{\rm 5} - {}^{0}\boldsymbol{R}_{\rm 5}d_{\rm 5}. \tag{16}$$

Desarrollando

$${}^{0}\boldsymbol{P}_{5d} = \begin{bmatrix} x_{d} \\ y_{d} \\ z_{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{x} \\ P_{y} \\ P_{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{11_{P_{inv}}} & r_{P_{inv}} & r_{13_{P_{inv}}} \\ r_{21_{P_{inv}}} & r_{22_{P_{inv}}} & r_{23_{P_{inv}}} \\ r_{31_{P_{inv}}} & r_{32_{P_{inv}}} & r_{33_{P_{inv}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{5} \end{bmatrix}$$
(17)

y al final

$$\begin{bmatrix} x_{\rm d} \\ y_{\rm d} \\ z_{\rm d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x - r_{13_{\rm P_{\rm inv}}} d_5 \\ P_y - r_{23_{\rm P_{\rm inv}}} d_5 \\ P_z - r_{33_{\rm P_{\rm inv}}} d_5 \end{bmatrix}.$$
 (18)

La orientación se puede determinar mediante ${}^{3}\mathbf{R}_{5}$, dada por

$${}^{3}\boldsymbol{R}_{5} = {}^{0}\boldsymbol{R}_{3}^{\mathrm{T0}}\boldsymbol{R}_{5}. \tag{19}$$

Usando la notación

у

$${}^{3}\boldsymbol{R}_{5} = \begin{bmatrix} r_{11_{O_{\text{inv}}}} & r_{12_{O_{\text{inv}}}} & r_{13_{O_{\text{inv}}}} \\ r_{21_{O_{\text{inv}}}} & r_{22_{O_{\text{inv}}}} & r_{23_{O_{\text{inv}}}} \\ r_{31_{O_{\text{inv}}}} & r_{32_{O_{\text{inv}}}} & r_{33_{O_{\text{inv}}}} \end{bmatrix},$$
(20)

y resolviendo la ecuación (19) y conforme a los ángulos de Euler en la configuración ZYZse obtienen los ángulos θ_4 y θ_5 como

$$\psi = \theta_4 = \operatorname{atan2}\left(\sqrt{1 - r_{33_{O_{\text{inv}}}}^2}, r_{33_{O_{\text{inv}}}}\right)$$
(21)

$$\vartheta = \theta_5 = \operatorname{atan2}(r_{33_{O_{\mathrm{inv}}}}, -r_{31_{O_{\mathrm{inv}}}}), \qquad (22)$$

donde ψ y ϑ se corresponden con los ángulos *yaw* y *pitch* en el espacio de trabajo del robot.

2.4 Control del manipulador

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques general de un sistema de control de posición y orientación (considerando sólo los ángulos ψ y ϑ) de un robot de 5 GDL, mismo que puede empatarse al implementado para el robot C-4/EV. En este caso particular $\boldsymbol{x}_{d} \in \mathbb{R}^{5}$ es el vector de referencia que se requiere que el efector final del robot ejecute, $\boldsymbol{q}_{d} \in \mathbb{R}^{5}$ es la referencia en el espacio articular obtenida a partir de las ecuaciones de cinemática inversa, $\tilde{\boldsymbol{q}} \in \mathbb{R}^{5}$ es el vector de errores, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{5}$ es el vector de control que mueve los eslabones del robot, $\boldsymbol{q} \in \mathbb{R}^{5}$ es el vector de coordenadas generalizadas, cuyos valores son medidos por sensores y $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^{5}$ es la posición y orientación que ejecuta el efector final.

Es importante señalar que, en términos básicos, todos los robots industriales cumplen con el esquema de control de la Figura 2. Adicionalmente, se deben integrar etapas de potencia, acondicionamiento, comunicación etc., además de distinguir entre la parte analógica y digital del sistema.

De manera introductoria a la robótica industrial, el control que se programó fue un PID, que en tiempo continuo tiene la forma

$$\boldsymbol{\tau} = K_{\rm p} \tilde{\boldsymbol{q}} + K_{\rm I} \int_0^{t_0} \tilde{\boldsymbol{q}} \, dt + K_{\rm D} \frac{d}{dt} \tilde{\boldsymbol{q}}, \qquad (23)$$

en donde $K_{\rm P}$, $K_{\rm I}$ y $K_{\rm d}$ son las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente y cuyo valor se debe sintonizar. En términos generales, el objetivo del controlador definido por la ecuación (23) es que $\tilde{q} \to 0$ de manera asintótica y en tiempo finito para que $x \to x_{\rm d}$.

2.5 Diseño de trayectorias

Hay diferentes maneras de definir las trayectorias del vector $\boldsymbol{x}_{\rm d}$ que ha de seguir el efector final del robot. La primera a la que se enfrentan quienes comienzan en el estudio del control de robots manipuladores son los polinomios de quinto orden (Spong et al., 2006), lo que se conoce como tarea de seguimiento. Sin embargo, también es común llevar a cabo tareas de regulación, es decir, se define una referencia constante en el tiempo, que cada una

Congreso Nacional de Control Automático 2024, 8-11 de Octubre, 2024. Ciudad de México, México.



Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema de control de posición y orientación de un robot de 5 GDL

de las articulaciones debe alcanzar, de manera asintótica y en tiempo finito.

3. MATERIAL Y MÉTODO

En esta sección se presentan los elementos de hardware principales utilizados para la rehabilitación del robot. Además, de manera resumida, el proceso de reacondicionamiento llevado a cabo, tanto mecánico como electrónico.

Es importante destacar, que el objetivo es aproximar lo mencionado a la implementación práctica del diagrama de bloques de la Figura 2.

3.1 Materiales utilizados

- Motores NEMA 17. Son motores a pasos que fungen como actuadores para las articulaciones del robot. Sus características eléctricas son: voltaje nominal de 3.1 [V], corriente de fase de 2.5 [A], resistencia de fase de 1.25 [Ω] e inductancia por fase de 1.8 [mH].
- ESP32 C-V4. Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32. Cuenta con un procesador de doble núcleo Xtensa LX6 de 32 bits, que puede funcionar a velocidades de hasta 240 [MHz] y ofrece una amplia gama de pines GPIO (entrada/salida de propósito general), que permiten la conexión de sensores, actuadores y otros dispositivos.
- Driver A4988. Configuran la etapa de potencia capaz de administrar los niveles de voltaje y corriente necesarios para la activación de los motores NEMA17. Permiten controlar la dirección así como el número de pasos con precisión. También cuentan con una protección en caso de sobrecorrientes. Cuenta con dos bloques principales:
 - Doble Puente H: Cada uno está compuesto por un MOSFET de canal N, los cuales conmutarán de la zona de corte a la activa. Dependiendo del orden de esta conmutación, será la forma en la que se polarizarán las bobinas del motor y función de ello su flecha girará en dirección de las manecillas del reloj o al revés.
 - Módulo PWM: Es el encargado de suministrar el voltaje y corriente necesarios para que se activen los motores. Funciona mediante *chopping* para vencer los torques de retención y activarlos.

• Encoders de cuadratura. Son los encargados de proporcionar la posición de las articulaciones. Cuentan con una resolución de 600 pulsos por revolución. Esto quiere decir que se puede medir el movimiento de las articulaciones cada 0.6 [°].

3.2 Proceso de reacondicionamiento

El objetivo del trabajo fue implementar el diagrama de bloques de la Figura 2, en donde el bloque con la leyenda *Robot* corresponde a la cadena cinemática del robot C-4/EV. Para ello, primero fue necesario una rehabilitación mecánica y electrónica ya que el dispositivo dejó de ser usado a finales de la década de los noventa.

3.2.1 Rehabilitación mecánica

Los motores originales del robot ya no se encontraban en óptimas condiciones ya que al realizar un movimiento paso a paso el torque no era lo suficientemente grande como para mover los eslabones del robot. Para solucionar este problema se cambiaron por los motores Nema 17, compatibles con los drivers A4988. Uno de dichos motores, con las piezas montadas para adaptarlo al robot, mismas que fueron fabricadas mediante manufactura aditiva, se muestra en la Figura 3-(a).





Fig. 3. (a) Motor Nema 17 adaptado y (b) nuevo efector final manufacturado

Dado que el efector final original del robot se encontraba deteriorado, se decidió diseñar uno nuevo utilizando el software Autodesk Inventor. También se fabricó éste mediante manufactura aditiva y el resultado se puede observar en la Figura 3-(b).

3.2.2 Rehabilitación electrónica

Originalmente, el robot C-4/EV no contaba con ningún tipo de instrumentación electrónica. Es por ello que se implementó lo siguiente:

• Etapa de potencia. El principal componente de esta etapa es el driver A4988 cuya imagen se puede observar en la Figura 4. En los pines A1 y B1 se conectan los dos extremos de la primer bobina de un solo motor a pasos, mientras que en los pines A2 y B2 los de la segunda bobina del mismo motor. Por otro lado las terminales MS1, MS2 y MS3 sirven para configurar la resolución de los micropasos del driver.

ENABLE	EN 21416 18 17 2	Vm
MS1		GND
MS2		B2
MS3		A2
RESET		A1
SLEEP	A4988 C4 BI	B1
STEP	R3 () EVOD	Vdd
DIR	DIR	GND

Fig. 4. Placa del driver A4988

Para ajustar la corriente máxima que el driver proporciona al motor, sobre la placa se cuenta con un potenciómetro en forma de tornillo. El valor de corriente que se le suministra al motor debe ser el 70.71 % de su corriente máxima en el caso de la configuración en pasos completos.

- Etapa de control. El principal componente de esta etapa es la tarjeta ESP32, dividiendo sus tareas en dos principales: la adquisición de los datos provenientes de los encoders y la generación de las señales que activarán los motores.
 - Lectura de encoders: La recepción de datos se hace a través del canal serial cero de la tarjeta ESP32 mediante el protocolo UART (universal asynchronous receiver/transmitter). Éste funciona con dos pines: la línea de transmisión (TX) y una línea de recepción (RX), sin necesidad de alguna señal de reloj compartida. Adicionalmente, para poder leer la señal entregada por los encoders, se debe tomar en cuenta que al realizar una lectura activa de su estado en el programa principal, se podrían causar demoras en las tareas, pérdida de pulsos. Con el fin de evitar esto se hace uso de interrupciones externas.
 - Control de los motores: El control de movimiento a través de los drivers A4988 requiere de la entrega de pulsos al pin STEP, al igual que un nivel lógico en el pin DIR. Para lograr esto desde el microcontrolador se debe identificar el tiempo que va a durar cada uno de los pulsos. En el caso

del robot, es de 750 $[\mu {\rm s}],$ con lo que se logra un movimiento fluido en las articulaciones.

Sin lugar a dudas, la instrumentación electrónica que se realizó para el robot C-4/EV es mucho más extensa que lo que se describe en esta sección. Se resaltaron los aspectos más relevantes que están relacionados con la implementación del diagrama de bloques de la Figura 2.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la implementación del controlador de la ecuación (23) utilizando las ganancias $K_{\rm P} = 23.5$, $K_{\rm I} = 0.011$ y $K_{\rm D} = 0.125$. En las Figuras 5-9 se puede observar que todas las articulaciones comienzan su movimiento a partir de 0 [°] para alcanzar la señal de referencia de $\mathbf{x}_{\rm d} = [180 \ 90 \ 40 \ 180 \ 90]^{\rm T}$ [°]. Esto lo logra después de un tiempo de 5.5 [s] para la articulación de la cadera, 11 [s] para la articulación del hombro, 6 [s] para la articulación del codo, 5.5 [s] para la primera articulación de la muñeca semiesférica (ψ) y 7.1 [s] para la segunda (ϑ).

Es importante señalar que se trata de una tarea de regulación en donde todas las articulaciones alcanzan la señal de referencia en los tiempos mencionados, con lo que se comprueba el funcionamiento del controlador PID. Sin embargo, los resultados muestran que es necesario llevar a cabo una mejor sintonización de las ganancias $K_{\rm P}, K_{\rm I}$ y $K_{\rm D}$ para lograr que se alcancen las referencias de una manera más rápida. Otra opción es implementar un controlador más avanzado y con un enfoque de sistemas no lineales ya que el robot manipulador es uno.



Fig. 5. Regulación de la primer articulacion q_1



Fig. 6. Regulación de la segunda articulación q_2



Fig. 7. Regulación de la tercera articulación q_3



Fig. 8. Regulación de la cuarta articulación q_4



Fig. 9. Regulación de la quinta articulación \boldsymbol{q}_5

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó la rehabilitación y reacondicionamiento del robot manipulador C-4/EV de 5 GDL para la enseñanza en control de robots manipuladores. En primer lugar se abordó, de manera breve, los aspectos matemáticos esenciales para el análisis del robot, lo que fue indispensable para llevar a cabo su control. En segundo lugar, se resaltaron los aspectos más relevantes de la rehabilitación mecánica e instrumentación electrónica del dispositivo. Finalmente, se mostraron los resultados del control implementado mediante una tarea de regulación, en donde el robot alcanzó una señal de referencia que se definió constante. Con ello se comprobó el correcto funcionamiento del robot en una primera aproximación, identificando las áreas de oportunidad a explorar.

Como trabajo futuro se pretende llevar a cabo tareas de seguimiento e integrar el robot a una celda automatizada en donde se encuentre inmerso en un proceso industrial a pequeña escala.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió apoyo de **PAPIME–DGAPA– UNAM** con número de proyecto **PE102823** y de **PAPIIT–DGAPA–UNAM** con número de proyecto **IN102723**.

Se agradece a Juan Orozco, Axel Moreno y Saúl Reyes por la colaboración en diversas actividades que contribuyeron significativamente a la rehabilitación del robot manipulador C-4/EV.

REFERENCES

- Alonso-Torres, B., Castro-Díaz, J.D., López-Rodríguez, M., y Arteaga-Pérez, M.A. (2022). Development of a 6-DOF robot for haptic interaction with complex virtual environments. *Memorias del Congreso Nacional* de Control Automático 2022, 351–356.
- Garduño-Aparicio, M., Rodríguez-Reséndiz, J., Macias-Bobadilla, G., y Thenozhi, S. (2018). A multidisciplinary industrial robot approach for teaching mechatronics-related courses. *IEEE Transactions on Education*, 61(1), 55–62. doi:10.1109/TE.2017.2741446.
- Jung, S. (2013). Experiences in developing an experimental robotics course program for undergraduate education. *IEEE Transactions on Education*, 56(1), 129–136. doi:10.1109/TE.2012.2213601.
- Michelotti, M.B. (2011). Application of the Novint Falcon haptic device as an actuator in real-time control. Master's thesis, University of Illinois.
- Midhun, V.S., Pondurai, M., y Vairaprakash, S. (2024). Floor cleaning robot with android-based voice command. In 2024 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), 1–4. doi:10.1109/WiSPNET61464.2024. 10533035.
- Molotla, O., Peña-Cabrera, J.M., y Lomas-Barrie, V. (2023). Configurable hybrid integral manufacturing platform: subtractive-additive process with industrial robot arm, proof of concept results. *IEEE Latin America Transactions*, 21(11), 1227–1235. doi:10.1109/TLA.2023.10268281.
- Murray, R.M., Li, Z., y Sastry, S.S. (1994). A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press.
- Nalamati, M., Kapoor, A., Saqib, M., Sharma, N., y Blumenstein, M. (2019). Drone detection in longrange surveillance videos. In 2019 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 1–6. doi:10.1109/AVSS. 2019.8909830.
- Rodríguez, L. y Velázquez, R. (2012). Haptic Rendering of Virtual Shapes with the Novint Falcon. Proceedings of the 2012 Iberoamerican Conference on Electronics and Computer Science, 132–138.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., y Oriolo, G. (2010). Robotics Modelling, Planning and Control. Springer Verlag.
- Spong, M.W., Hutchinson, S., y Vidyasagar, M. (2006). Robot modeling and control, volume 3. Wiley New York.