

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT MANIPULADOR DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD PARA UNA ESTACIÓN DE TRABAJO DIDÁCTICA

J. Ortiz-Mata<sup>1</sup>, Alberto León-Batalla<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Km 1.5 vía Km 26, Ciudadela Universitaria Milagro 09150, Ecuador; jortizm2@unemi.edu.ec; orcid.org/0000-0003-0466-4093

<sup>2</sup>Facultad Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Km 1.5 vía Km 26, Ciudadela Universitaria Milagro 09150, Ecuador; aleonb2@unemi.edu.ec; orcid.org/0000-0001-6643-4694

Recibido (18/01/18), aceptado (18/03/18)

---

**Resumen:** Este artículo se basa en el diseño y construcción de un robot manipulador o antropomórfico de cinco grados de libertad para una estación de trabajo con fines didácticos. El robot manipulador puede ser operado de manera local, desde la estación de trabajo y de manera remota mediante una aplicación móvil. El diseño constructivo se desarrolló usando herramientas CAD (Computer-Aided Design) y su control se realizó mediante programación desarrollada en software libre. Además, se presenta la descripción del modelo cinemático directo.

---

**Palabras Clave:** Cinemática directa, grados de libertad, robot antropomórfico, robot manipulador.

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MANIPULATOR ROBOT WITH FIVE DEGREE OF FREEDOM FOR A DIDACTIC WORKSTATION

---

**Abstract:** This article is based on the design and construction of an anthropomorphic or manipulator robot of five degrees of freedom for a workstation with didactic purposes. The manipulator robot can be operated locally from the workstation, and remotely through a mobile application. The constructive design was developed using CAD (Computer-Aided Design) tools and its control was realized by programming developed in free software. In addition, the description of the direct kinematic model is showed.

---

**Key words:** Anthropomorphic robot, direct kinematics, degrees of freedom, robotic manipulator.

## I. INTRODUCCIÓN

El área de la robótica ha ido creciendo con perspectivas brillantes para el futuro, por ello es necesario que los jóvenes estén familiarizados con la tecnología del siglo XXI para hacer frente a los desafíos. Para este propósito es muy importante desarrollar metodologías y equipos que permitan actualizar el proceso de enseñanza-aprendizaje. Existen varios trabajos previos donde se utilizan diversos medios para la enseñanza de la robótica, algunos utilizan plataformas de software de bajo costo, la cual permite una transición fluida desde un entorno virtual hasta un robot manipulador real [1]. Para la enseñanza de la robótica, también se utilizan la estructura flexible y la interfaz gráfica, donde los parámetros del sistema se pueden cambiar fácilmente a distintos puntos de operación [2]. Otro enfoque de la enseñanza de la robótica, se basa en el desarrollo de modelos matemáticos mediante software [3].

El uso de nuevas tecnologías debe estar presente en las asignaturas de las carreras de ingeniería de manera sistemática, para ello se requiere tener en los laboratorios la Base Material y Técnica que permita mostrarlas, para fomentar el desarrollo de habilidades en los estudiantes al resolver problemas de ingeniería y de investigación [4].

En el desarrollo de una clase de robótica, una preocupación muy importante es trabajar con presupuestos limitados [5]. Por lo cual se sugiere implementar componentes de bajo costo y software libres.

El Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería (FACI) de la Universidad Estatal de Milagro, UNEMI, Ecuador, no cuenta con robots manipuladores que permitan realizar prácticas con respecto al área de la robótica y automatización. Por lo cual se desarrolla una estación de trabajo didáctico de bajo costo, que cuenta con un robot manipulador de cinco grados de libertad y será utilizado como una herramienta de aprendizaje.

Un robot manipulador es un mecanismo integrado por una serie de articulaciones, que tienen como principal objetivo el desplazamiento y orientación de objetos [6].

Este artículo muestra el diseño de las piezas y los elementos utilizados para la construcción del manipulador.

La cinemática directa describe la posición y orientación del efector final tomando en cuenta la geometría del robot, se plantean matrices homogéneas, las cuales representan la posición y orientación de un elemento en el espacio [7].

El robot tiene un control manual, el cual cuenta con

dos modos de operación: local y remoto. La operación local se la realiza en la estación de trabajo por medio de potenciómetros y la operación remota se ejecuta mediante una aplicación móvil.

## II. DESARROLLO

### 1. Diseño del robot

Para la construcción de la estación de trabajo son necesarios varios elementos, que debidamente implementados permiten la correcta interacción entre los mismos. La Tabla I, muestra el listado de componentes utilizados.

**Tabla I. Lista de elementos de la estación de trabajo.**

Elementos	Cantidad
Fuente de voltaje de computadora	1
Piezas de aluminio	15
Tarjeta Arduino Mega	1
Conector 12V	1
Borneras tipo fusible	3
Borneras simples	3
Servomotor MG996R	6
Módulo HC-05 (Bluetooth)	1
Potenciómetros	6
Caja plástica	1
Canaletas plásticas	2
Fusible de 5 A	3
Base de madera	1

Las especificaciones del Servomotor MG996R se describen en la Tabla II, y sus dimensiones se muestran en la Figura 1.

**Tabla II. Especificaciones del Servomotor MG996R.**

Característica	Especificación
Peso	55 g
Dimensiones	40,7 x 19,7 x 42,9 mm
Par de torsión	9,4 kgf · cm (4,8 V), 11 kgf · cm (6 V)
Velocidad de funcionamiento	0,17 s / 60° (4,8 V), 0,14 s / 60° (6 V)
Tensión de servicio	4,8 V a 7,2 V
Corriente de funcionamiento	500 mA - 900 mA (6V)
Corriente de bloqueo	2,5 A (6V)
Anchura de banda muerta	5 μs
Diseño de doble rodamiento de bolas	Estable y resistente a golpes
Rango de temperatura	0 °C - 55 °C

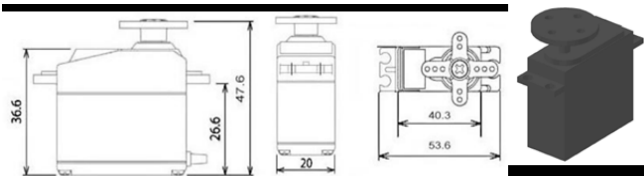


Figura 1. Dimensiones del Servomotor MG996R. Fuente: Hoja de especificaciones MG996R.

El manipulador está compuesto por una base, cinco articulaciones y el efector final o pinza; estos están enlazados por piezas que sirven de unión, entre estos elementos y los servomotores. Se utilizó AutoCAD® como herramienta para el diseño del robot. La Figura 2, muestra las piezas de unión que interconectan las articulaciones del manipulador.



Figura 2. Piezas de unión en articulaciones.

Las dimensiones de la base, eslabones y efector final, del robot manipulador se especifican en la Figura 3.

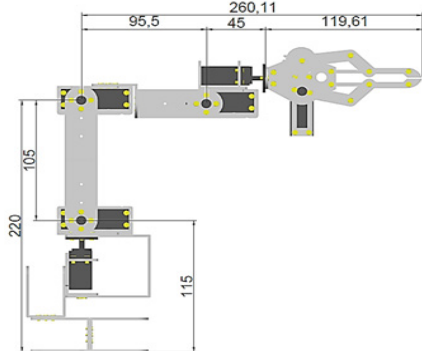


Figura 3. Dimensiones del robot manipulador.

El diseño de la estación de trabajo didáctica en donde interviene el robot manipulador, se muestra en la Figura 4.

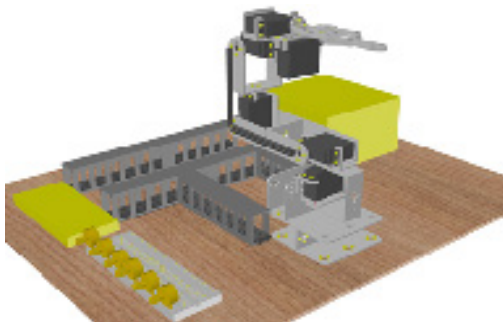


Figura 4. Estación de trabajo didáctica.

**2.Cinemática directa**

En el modelo cinemático directo del robot manipulador, se reconocen las trayectorias de cada una de las articulaciones, identificando los grados de libertad con la finalidad de encontrar la posición del efector final del manipulador [8].

Para el planteamiento del modelo cinemático directo se establece el esquema de la Figura 5, que describe la configuración y distribución de las articulaciones de los diferentes grados de libertad.

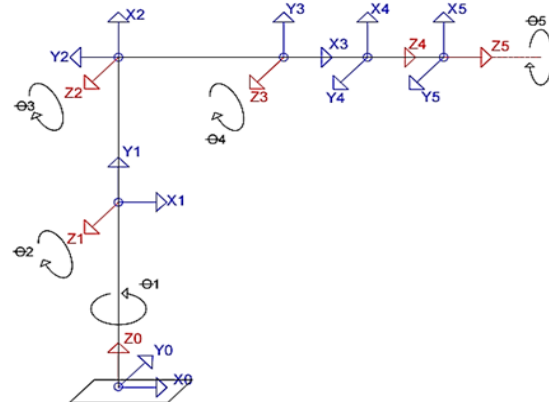


Figura 5. Ejes de las articulaciones.

Una vez definido el esquema de articulaciones, se ejecuta el algoritmo de Denavit– Hartenberg [9], que incluye la posición de los ejes de cada articulación y su orientación. Se plantea un sistema de referencia en cada articulación, con el objetivo de realizar los movimientos necesarios para trasladar el sistema de coordenadas, de la base hacia el efector final. Estos parámetros se describen en la Tabla III.

**Tabla III Parámetros Denavit – Hartenberg**

Articulación n	$\theta_z$	$d_z$	$a_x$	$\alpha_x$
1	$q_1$	115	0	90°
2	$q_2 + 90^\circ$	0	105	0°
3	$q_3 + 90^\circ$	0	95.5	0°
4	$q_4 + 90^\circ$	45	0	90°
5	$q_5$	119.61	0	0°

Se obtiene una matriz de transformación homogénea por cada grado de libertad, que representan los desplazamientos de los sistemas de referencia [10].

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos^{(1)}(q_1) & 0 & \text{sen}(q_1) & 0 \\ \text{sen}(q_1) & 0 & -\cos^{(1)}(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 115 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & -\text{sen}(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 105 \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) \\ \text{sen}(q_2 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 105 \text{sen}(q_2 + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & -\text{sen}(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 95.5 \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) \\ \text{sen}(q_3 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 95.5 \text{sen}(q_3 + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 & \text{sen}(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 \\ \text{sen}(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 & -\cos(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\text{sen}(q_5) & 0 & 0 \\ \text{sen}(q_5) & \cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 119.61 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

El producto de todas las matrices de transformación homogénea da como resultado final la matriz de traslación T [11].

$$T = {}^0A_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \quad (6)$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

- T: representa la orientación y posición de un sistema rotado y trasladado con respecto al sistema de referencia.

- [n, o, a] es una terna ortonormal que representa la orientación y p es un vector que representa la posición.

### 3.Diagrama de componentes

El robot manipulador se alimenta con 5 y 12 VDC. La primera fuente alimenta al servomotor y la segunda a la tarjeta Arduino MEGA. Se instala un selector para elegir el modo de operación local o remota. Para el modo de operación local se instalan seis potenciómetros de 10kΩ. Para el modo de operación remota se conecta el módulo de Bluetooth a la tarjeta de Arduino, esto permitirá recibir la señal de posición, que es enviada mediante un dispositivo móvil. La tarjeta de Arduino envía los pulsos para posicionamiento de 0 a 180 grados a los servomotores [12]. La Figura 6 muestra la interacción entre los componentes de la estación de trabajo.

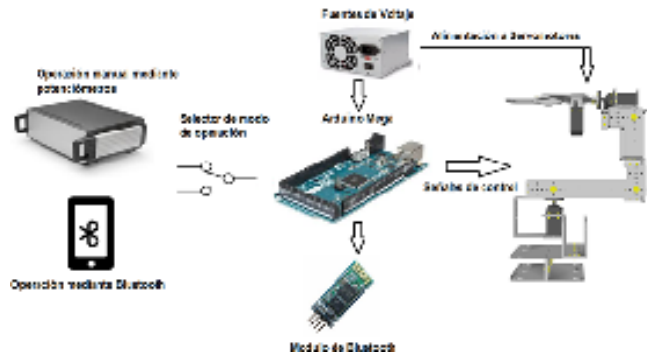


Figura 6. Componentes de la estación del robot manipulador.

### 4.Descripción de funcionamiento

El control manual del robot manipulador interacciona directamente con los servomotores que permiten el movimiento de las articulaciones; el robot puede ser operado de forma local por medio de potenciómetros o de forma remota mediante una aplicación en un dispositivo móvil. La selección de operación se da mediante un interruptor de dos estados que se encuentra conectado a una de las entradas digitales del microcontrolador. Si la entrada digital programada para el selector es uno, entra en modo de operación local realizando el posicionamiento mediante potenciómetros, si es cero se activa el modo de operación remoto, que se ejecuta mediante una aplicación móvil. La Figura 7, muestra el diagrama de flujo que describe la programación que ejecuta el microcontrolador.

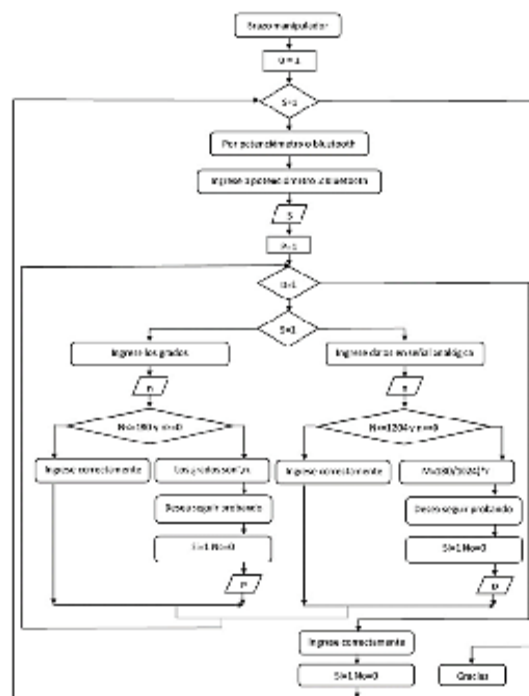


Figura 7. Diagrama de flujo del funcionamiento.

#### 4.1. Modo de operación local

Para la operación local, los terminales uno y tres de los potenciómetros de 10k $\Omega$  son polarizados por la fuente de 5VDC, los terminales “2” de los potenciómetros van conectados a las entradas analógicas del microcontrolador, desde A0 hasta A5. Mediante la programación se escala la señal de los potenciómetros de 0-1024 a 0-180 grados. La Figura 8 muestra el diagrama esquemático de las conexiones de los potenciómetros con la tarjeta Arduino.

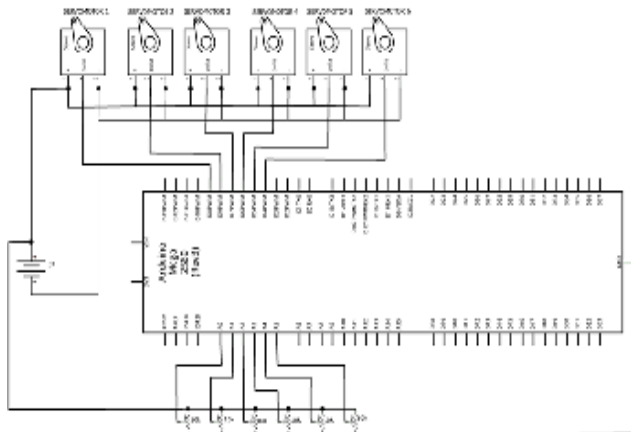


Figura 8 Diagrama de conexión de potenciómetros para operación local.

#### 4.2. Modo de operación remota

La operación remota inicia con el envío de las señales de posicionamiento a los servomotores, por medio de la aplicación móvil que fue desarrollada en un Software libre denominado App Inventor®. Con esta aplicación el usuario podrá elegir que servomotor desea mover, se hace el ingreso en grados por medio de una barra de desplazamiento que podrá tener como valor máximo 180 grados y como valor mínimo 0 grados; posteriormente las señales serán enviadas por Bluetooth, las cuales serán receptadas por el módulo HC-05 conectado al microcontrolador

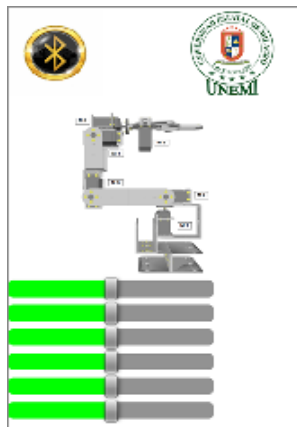


Figura 9. Aplicación móvil para operación remota del

robot manipulador.

#### 5. Prototipo

Los elementos del robot manipulador están sobre una base de madera. Los potenciómetros, la tarjeta Arduino MEGA y el módulo HC-05 de Bluetooth, se ubican en una caja plástica. Los cables de alimentación y de control van por canaletas. Los dispositivos de protección contra sobre-corriente de los servomotores son fusibles de 5 amperios. La estación de trabajo que se muestra en la Figura 10, será aplicada para prácticas de robótica y automatización.



Figura 10. Estación de trabajo.

### III. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño y la implementación de un robot manipulador de cinco grados de libertad ubicado en una estación de trabajo, consiguiendo la operación en modo local por medio de potenciómetros y operación remota mediante una aplicación móvil. Este trabajo tiene como finalidad generar un recurso didáctico, el cual puede ser aplicado para realizar prácticas y estudios en las áreas de: robótica, automatización, análisis de mecanismos y control automático.

El trabajo elaborado con respecto al diseño del manipulador se realizó de manera sencilla. El uso de herramientas CAD para el dimensionamiento de las piezas, hace que el proyecto sea fácilmente replicable. Además, se utilizaron componentes de fácil adquisición y software libre, por lo cual el proyecto resulta factible debido a su bajo costo, en comparación a manipuladores comerciales.

Se desarrolló el modelo cinemático directo del robot manipulador tipo serie, utilizando los parámetros de Denavit-Hartenberg, la matriz de traslación obtenida nos permitirá implementar posteriormente el control cinemático.

La construcción de la estación de trabajo robótica

incentiva al estudio y ejecución de futuros proyectos, por lo cual se plantea la implementación de sistemas de secuencia automatizada.

#### IV. REFERENCIAS

- [1] L. Cehovin, A. Rezelj, and D. Skocaj, "Open-Source Robotic Manipulator and Sensory Platform," vol. 457, 2017.
- [2] M. Cakir and E. Butun, "An educational tool for 6-DOF industrial robots with quaternion algebra," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 15, no. 2, pp. 143–154, 2007.
- [3] A. Gil, O. Reinoso, J. M. Marin, L. Paya, and J. Ruiz, "Development and deployment of a new robotics toolbox for education," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 23, no. 3, pp. 443–454, 2015.
- [4] A. H. Odorico and M. Teórico, "La robótica desde una perspectiva pedagógica," vol. 2, no. 5, pp. 33–48, 2005.
- [5] S. Jung, "Experiences in developing an experimental robotics course program for undergraduate education," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 56, no. 1, pp. 129–136, 2013.
- [6] K. Subir, *Introducción a la Robótica*. México: McGraw, 2008.
- [7] A. Ollero, *Robotica Manipuladores y robots moviles*. Barcelona, España: Alfaomega - Marcombo, 2001.
- [8] J. J. Craig, *Robótica*, 3era Ed., vol. 1, no. 8020. México: Pearson Education, 2006., 2006.
- [9] J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices.," *J. Appl. Mech.*, vol. 77, pp. 215–221, 1955.
- [10] A. Barrientos, L. Penín, C. Balaguer, and R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*. Madrid, España: McGraw de España, 2007.
- [11] M. Song, S. Hutchinson, and M. Vidsayagar, *Robot Modeling and Control*, First Edit. New York: