

Diseño mecatrónico y prototipado rápido de un robot antropomórfico utilizando manufactura aditiva

Mechatronics design and rapid prototyping of an anthropomorphic robot using additive manufacturing

J. I. Anaya-Serrano ^a, R. D. Cruz-Morales ^{a,*}, E. A. Padilla-García ^b, J. González-Sierra ^c, G. H. López-Mera ^a, D. Sánchez-García ^a

^aDepartamento de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, 54714, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México.

^bDepartamento de Ingeniería, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 42184, Ecatepec, Estado de México, México.

^cUPIIH, Instituto Politécnico Nacional, Carretera Pachuca—Actopan Kilómetro 1+500, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, San Agustín Tlaxiaca 42162, México.

Resumen

En este artículo se presenta el diseño mecatrónico secuencial de un robot antropomórfico desarrollado mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD). Las etapas iniciales del proceso incluyen: la selección de los componentes electrónicos y materiales estructurales del robot. A partir de este diseño, se implementa un proceso de prototipado rápido mediante manufactura aditiva, usando impresoras 3D, para fabricar y ensamblar el prototipo. En esta fase, se integran los distintos componentes del robot, como los eslabones, los actuadores, las conexiones eléctricas y la tarjeta de control. Todo el proceso se realiza siguiendo el diseño mecatrónico que involucra métodos iterativos para cumplir con los requerimientos del usuario y la tarea a realizar. La propuesta incluye un prototipo piloto funcional que puede servir como base para futuras mejoras que cumplan los requerimientos de optimización definidos por el usuario. Finalmente, como parte del proceso de validación del diseño, se realiza la construcción física y el movimiento del robot.

Palabras Clave: Robótica, Manufactura aditiva, Diseño mecatrónico, Robot antropomórfico.

Abstract

This article presents the sequential mechatronic design of an anthropomorphic robot developed using computer-aided design (CAD) tools. The initial stages of the process include selecting the robot's electronic components and structural materials. Based on this design, a rapid prototyping process is implemented using additive manufacturing, with 3D printers, to manufacture and assemble the prototype. In this phase, the various components of the robot, such as links, actuators, electrical connections, and the control card, are integrated. The entire process is carried out following the mechatronic design, which involves iterative methods to meet user requirements and the task to be performed. The proposal includes a functional pilot prototype that can serve as a basis for future improvements that meet the optimization requirements defined by the user. Finally, as part of the design validation process, the physical construction and movement of the robot are carried out.

Keywords: Robotics, Additive Manufacturing, Mechatronics design, Anthropomorphic robot.

*Autor para correspondencia: rdcruz@comunidad.unam.mx

Correo electrónico: irvinganayaserrano150@gmail.com (José Irving Anaya-Serrano), rdcruz@comunidad.unam.mx (Raúl Dalí Cruz-Morales), erickaxelpadilla-garcia@gmail.com (Erick Axel Padilla-García), gonzalosieben@gmail.com (Gonzalo Hedain López-Mera), jagonzalezsi@ipn.mx (Jaime González-Sierra), dgo-sanchez@comunidad.unam.mx (Diego Sánchez García)

Historial del manuscrito: recibido el 28/06/2025, última versión-revisada recibida el 06/11/2025, aceptado el 03/02/2026, publicado el 25/03/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15388>



1. Introducción

Actualmente, la robótica ha cobrado mayor fuerza debido a los avances tecnológicos, los cuales han impulsado la investigación e innovación en este campo, por lo tanto, las mejoras han sido más rápidas y significativas que durante las décadas anteriores (Sanchez-Garcia *et al.*, 2023). Una de las tecnologías que han impulsado significativamente el desarrollo y la investigación en el campo de la robótica es la manufactura aditiva, en particular la impresión 3D. En (Blasiak *et al.*, 2024) se habla de cómo es una de las tecnologías que más se han desarrollado, han tenido avances y han aportado innovación a diferentes ingenierías, en particular a la robótica, con el desarrollo de la manufactura de piezas más baratas y rápidas de fabricar. Los materiales más utilizados en la manufactura aditiva son el PLA (Ácido poliláctico) y el PET-G (Polietileno tereftalato y glicol), los cuales tienen un auge debido a su facilidad de reciclaje, versatilidad en el diseño de productos y relativamente buena resistencia como materiales para prototipos generales. Además, este material puede ser degradado y absorbido por distintos materiales, pero en especial el agua, como se menciona en (Moreno Nieto *et al.*, 2021), por lo cual es un material que por sus características es fácil de reciclar y reutilizar.

Estas características de flexibilidad y versatilidad han servido para que se puedan desarrollar e investigar áreas en la robótica que antes solo se estudiaban en teoría debido a la complicación de manufacturar ciertas piezas, como es el caso de la robótica “suave”, como en (Terrile, 2022) donde se habla sobre el diseño y control de aplicaciones de robótica, específicamente sobre los efectores finales, ya que la suavidad se ocupa en el agarre de materiales frágiles, en prótesis que sean más realistas y no dañen la interacción entre los manipuladores en contacto con material frágil o con personas que tengan prótesis e interactúen con otras personas. A partir de el uso de materiales suaves en el diseño y la manufactura de piezas para la robótica, se ha visto que estos materiales tienen una gran aceptación y una amplia área de oportunidad, por este motivo se han desarrollado metodologías para el diseño de materiales suaves aplicados a la robótica, estas metodologías utilizan manufactura aditiva para la fabricación de piezas enfocadas a la robótica (Cohen *et al.*, 2015), mezclando material rígido con material más suave y flexible.

El diseño mecatrónico integra diversas ingenierías en el proceso de desarrollo de un prototipo, como la mecánica, la electrónica, el control y el software, entre otras. Janscheck en (Janscheck, 2011) menciona que el diseño mecatrónico empieza desde el modelado matemático del sistema, continúa con el modelado CAD, realiza la simulación de la respuesta del sistema y del modelo mecánico, y se integra todo esto para que su enfoque sea multidisciplinario y capaz de concebir productos integrales como robots, vehículos, prótesis, etc. (Yan y Zante, 2010). Al ser este un modelo de diseño concurrente, se promueve la colaboración entre el diseño del producto y el proceso de su obtención como prototipo, para permitir la reducción del tiempo y costo del diseño (Mcharek *et al.*, 2019), consiguiendo estructurar una metodología que armoniza el ciclo del diseño desde el proceso inicial de concepción hasta la obtención del prototipo final.

La esencia de una metodología de diseño mecatrónico radica en su capacidad para integrar, desde las etapas iniciales, las

diversas disciplinas de la ingeniería en un proceso unificado que armoniza el ciclo completo de desarrollo, desde la concepción hasta el prototipo final Alvarez Cabrera *et al.* (2010). La metodología puede aplicarse mediante tres enfoques fundamentales: el secuencial, de estructura lineal y ordenada, donde cada disciplina actúa de forma sucesiva; el iterativo, que incorpora ciclos de retroalimentación para perfeccionar progresivamente el sistema Morales-Cruz *et al.* (2021); y el concurrente, que promueve la integración simultánea de todas las áreas, fortaleciendo la colaboración interdisciplinaria, la innovación y la eficiencia en tiempo y costo Van Brussel *et al.* (2001). Este trabajo propone el uso del enfoque secuencial, ya que facilita la organización y la gestión de las etapas e introduce ciclos de retroalimentación que permiten revisar y perfeccionar el sistema en cada fase de manera independiente, favoreciendo la mejora continua y la optimización del desempeño global.

Por otra parte, y como complemento al diseño mecatrónico, se tiene el enfoque de diseño frugal (De Marchi *et al.*, 2022), en el cual se recopilan distintos métodos sobre diseño con un enfoque de utilizar herramientas innovadoras, en el cual, se desarrollan soluciones más rápidas, sostenibles y económicas en cuanto a la construcción de prototipos, al reducir costos y reutilizar materiales. Como se menciona en (Lim y Fujimoto, 2019), un enfoque de diseño frugal busca optimizar recursos y reducir costos sin comprometer la funcionalidad, promoviendo una fuerte interrelación entre los aspectos sociales, ambientales y económicos. En este mismo tono, el autor (Rao, 2017) habla sobre como un diseño y desarrollo sustentable de la ciencia y tecnología ha aumentado debido a la innovación y diseño frugal, ya que además de ser más rápido, es de bajo costo y busca reducir los desperdicios tanto de materiales, tiempo y el impacto ambiental de desarrollar prototipos y tecnología que no ha sido probada a profundidad, esto lo muestra con 25 distintos ejemplos de como se han beneficiado sectores industriales, urbanos y rurales con este método. También en (Jagtap, 2021) se integra una metodología de diseño frugal en el diseño mecatrónico de prototipos e innovaciones para utilizar la menor cantidad de recursos posible y alcanzar un buen fin en el diseño que se está realizando. Por lo tanto, el diseño mecatrónico y el frugal se complementan: mientras uno se enfoca en el diseño mecánico, electrónico, modelado, CAD y simulaciones, el otro permite desarrollar prototipos de bajo costo para realizar pruebas y experimentos y, de esta forma, cumplir el ciclo de diseño concurrente mecatrónico.

En este artículo se presenta el diseño de un robot de tipo antropomórfico de 5 grados de libertad (GDL), el cual se diseña de manera mecatrónica y utilizando prototipado rápido se obtiene un prototipo funcional del mismo, y se realizan los ajustes necesarios para obtener el mejor rendimiento de este prototipo, es importante resaltar que por ahora el prototipo se encuentra en lazo abierto ya que solamente se realizó el proceso de diseño y construcción, sin ahondar en su control preciso. Se presentan la metodología del diseño, las diferentes piezas diseñadas en CAD, los dispositivos electrónicos y motrices que se tomaron en cuenta para este diseño y finalmente la fabricación y ensamble del robot.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la metodología desarrollada, que se basa en el modelo del robot, con el fin de determinar el movimiento y

las restricciones características del sistema. La sección 3 presenta el diseño en CAD utilizando el software Fusion y los dispositivos electrónicos que se tomaron en consideración para el diseño CAD y un ensamble adecuado de las piezas diseñadas y los dispositivos elegidos. En la Sección 4 se muestran los resultados de este diseño, en el que se utiliza manufactura aditiva para la impresión del prototipo y se ensamblan los dispositivos electrónicos con las impresiones en PETG para obtener finalmente el prototipo de robot antropomórfico de 5 GDL, mostrando además la interfaz de control y el trabajo futuro sobre el mismo. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Metodología

Se emplea la metodología de diseño mecatrónico y frugal como la mostrada en (Santiago y Pinto, 2024); esta metodología es compatible debido a que la parte mecatrónica se enfoca en lo mecánico, lo electrónico, la instrumentación y el control, mientras que la parte frugal está orientada a la optimización de recursos y la reducción de costos en el desarrollo físico del prototipo. Esta metodología ha sido ocupada por la industria (de Carvalho *et al.*, 2021), la academia (Kaneps *et al.*, 2016) y la comunidad científica (Wang *et al.*, 2013) en general para presentar soluciones y contribuciones en diversas áreas reduciendo costos, optimizando los recursos y el diseño y obteniendo la funcionalidad esperada por el diseñador. Las mejoras que se puedan realizar en el diseño mecatrónico y frugal se explican con un marco estructurado en (Singh *et al.*, 2020), con lo cual el prototipo aquí mostrado sigue estos pasos para mejorar su diseño, desde la concepción hasta su fabricación.

Considerando la necesidad de optimizar el uso del espacio en el diseño, se propone la utilización de materiales de fácil manipulación y reciclaje, que permitan futuras modificaciones al prototipo. Esto facilita la validación y el análisis de los cambios, tanto en el modelo CAD virtual como en el prototipo físico, de manera ágil.

Para esto, considere un vector de coordenadas generalizadas $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ y proponga características de movimiento deseadas para un robot antropomórfico de 5 GDL. A partir de estas especificaciones, se determinan los parámetros cinemáticos del sistema y se construye la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg 1 de acuerdo con los marcos de referencia mostrados en la Figura 1,

Con estas referencias, y siguiendo la convención de la mano derecha aplicada en la robótica, también considerando el punto central de cada servomotor como el origen de cada marco de referencia, exceptuando el punto en donde las reglas del método de Denavit-Hartenberg (Craig, 2006), piden mover el origen del marco de referencia, se obtiene la tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg, útil para obtener el modelo cinemático del robot,

Tabla 1: Parámetros DH del robot de 5 GDL

Eslabón	θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i (grados)
1	θ_1	11.5	4.0	90°
2	θ_2	0.0	14.82	0°
3	$\theta_3 - 90^\circ$	0.0	0.0	-90°
4	θ_4	18.92	0.0	90°
5	$\theta_5 + 90^\circ$	0.0	14.22	0°

donde, θ_i representa la posición angular del eslabón i . El parámetro d_i es la distancia que hay entre el marco de referencia $i - 1$ a i , a_i representa el largo del eslabón medido entre el marco de referencia $i - 1$ a i , y α_i es el ángulo de torsión entre marcos de referencia.

Para cada sistema de referencia i , se construye la matriz de transformación homogénea general T_{i-1}^i y se aplican los parámetros de Denavit-Hartenberg de la forma,

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sustituyendo los elementos necesarios en cada una de las matrices (de Wit *et al.*, 2012), con la ecuación 1 de cada sistema de referencia, es posible obtener el modelo cinemático (Sciavicco y Siciliano, 2012) de la siguiente forma

$${}^0T_5 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5, \quad (2)$$

para tener la relación total desde la base del robot hasta el efector final y de esta manera poder obtener los ángulos de cada articulación para enviar los movimientos a los servomotores encargados de cada articulación y poder lograr la posición deseada, se hace el cálculo necesario y la relación final es,

$$T_0^5 = \begin{bmatrix} {}^0R_5 & \begin{matrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{matrix} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

donde

$${}^0R_5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{12} & r_{22} & r_{23} \\ r_{13} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$r_{11} = c_1 c_{23} c_5 + s_1 s_4 s_5 - c_1 s_{23} c_4 s_5$$

$$r_{12} = c_1 c_{23} s_5 - s_1 s_4 c_5 - c_1 s_{23} c_4 c_5$$

$$r_{13} = s_1 c_4 + c_1 s_{23} s_4$$

$$r_{21} = s_1 c_{23} c_5 - c_1 s_4 s_5 - s_1 s_{23} c_4 s_5$$

$$r_{22} = s_1 c_{23} s_5 + c_1 s_4 c_5 - s_1 s_{23} c_4 c_5$$

$$r_{23} = s_1 s_{23} s_4 - c_1 c_4$$

$$r_{31} = s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5$$

$$r_{32} = -s_{23} s_5 + c_{23} c_4 c_5$$

$$r_{33} = -c_{23} s_4$$

Por simplicidad, se usa la siguiente notación $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ y $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$. Adicionalmente, se utiliza la notación P_x , P_y y P_z para definir la posición en el espacio cartesiano $[X, Y, Z]$,

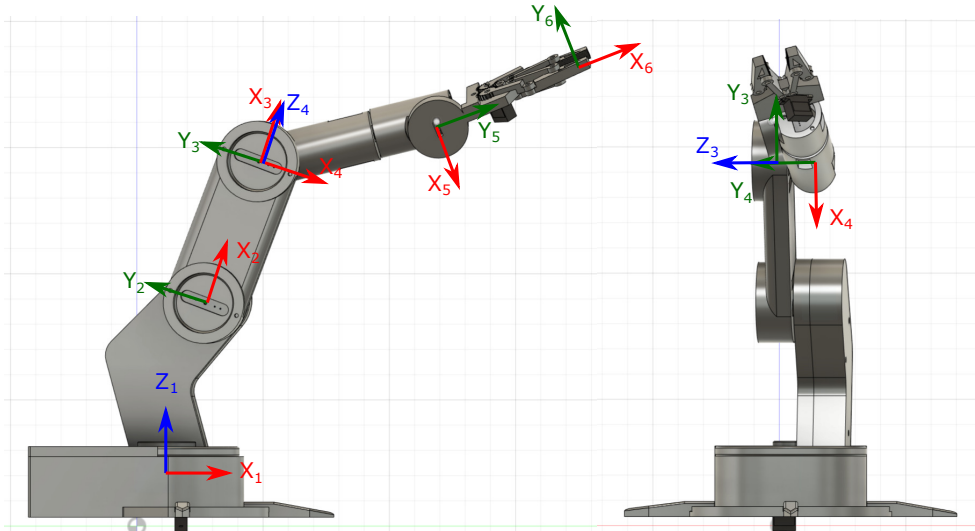


Figura 1: Robot completo con sus marcos de referencia para obtener los parámetros D-H

$$\begin{aligned}
 P_x &= 4c_1 + 14,82c_1c_2 + 18,92c_1c_{23} \\
 &\quad + 14,22(c_1c_{23}c_5 - s_1s_4s_5 - c_1s_{23}c_4s_5) \\
 P_y &= 4s_1 + 14,82s_1c_2 + 18,92s_1c_{23} \\
 &\quad + 14,22(s_1c_{23}c_5 - c_1s_4s_5 - s_1s_{23}c_4s_5) \\
 P_z &= 11,5 + 14,82s_2 + 18,92s_{23} + 14,22(s_{23}c_5 + c_{23}c_4s_5)
 \end{aligned}$$

Con estas consideraciones, se obtiene la matriz de transformación homogénea del robot mostrado en la Figura 1.

Esto es útil en caso de que el diseño del prototipo requiera cambios pequeños y rápidos en los eslabones o en el área de trabajo, debido a que se puede sustituir el nuevo parámetro dentro de la tabla 1 y con el uso de las ecuaciones 1 y 2, obtener nuevamente la ecuación 2 y por lo tanto la nueva cinemática del robot modificado.

3. Diseño

Para el diseño en CAD se utiliza una computadora DELL G15 con procesador Intel 7, tarjeta de video NVIDIA GeForce RTX DE 4 Gb y 8 GB de RAM, con Windows 11; además, se utiliza el software Fusion 2.0.21550 de la familia AutoDesk, con licencia estudiantil.

Para diseñar el prototipo de robot antropomórfico de 5 GDL, se tomaron como base del diseño, aquellos elementos que sean fácil de adquirir comercialmente, de bajo costo, de arquitectura y software libre en su manejo y material reciclable o reusable, el material y sus características se mencionan a continuación.

Se inicia con el diseño de la base, en la cual se colocan varios elementos importantes, como la tarjeta electrónica, las baterías, los controladores y, además, debe servir como contrapeso del robot para poder ser utilizado en su máxima extensión. La base se muestra en la Figura 2

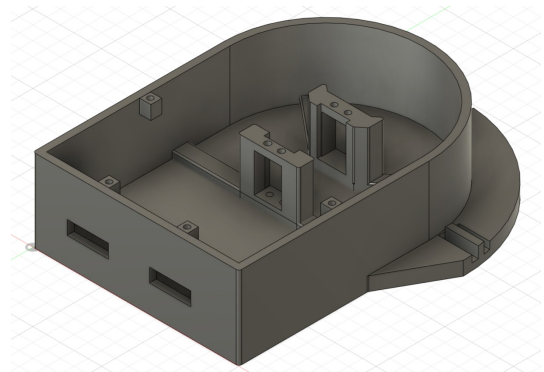


Figura 2: Diseño CAD de la base del robot

Se considera en el diseño de la base, que debe poder contener una placa arduino UNO R3 (Figura 3), la cual cuenta con un microcontrolador de la marca microchip ATmega328, trabaja con 5 v, tiene 14 pines de entrada/salida digitales de propósito general, las cuales 6 son del tipo PWM, también cuenta con 6 pines de entradas analógicas, 32 Kb de memoria y una velocidad de reloj de 16 MHz.

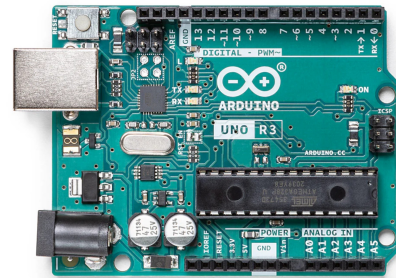


Figura 3: Placa Arduino UNO R3 de acuerdo con docs.arduino.cc

Adicionalmente en esta base, se encuentra el primer servomotor, el robot cuenta en total con 5 servomotores.

Para este robot se plantea que en cada eslabón se ensamble directamente el eje de cada servomotor, pero las primeras tres articulaciones están diseñadas para el servomotor modelo

MG995 Towerpro, con un par de $15 \frac{kg}{cm}$, un giro de 180° , con un voltaje de operación de entre 5.7 – 7.2 v, consume una corriente de 100 mA y tiene dimensiones de 40.7 x 19.7 x 42.9 mm con un peso de 50 g cada uno. El servomotor y sus accesorios ocupados se muestran en la Figura 4



Figura 4: Servomotor MG995 Towerpro con sus accesorios para ensamble.

Como se mencionó, los servomotores MG995 se utilizan tanto en la base mostrada en la Figura 2, como en el eslabón 1, en donde, el servomotor de la base se une con el eslabón y en la parte superior del mismo se coloca el segundo servomotor, en la Figura 5 se pueda notar el espacio designado para esto, y se une con el eslabón 2 del lado izquierdo, donde finalmente en su otro extremo se ensambla el tercer servomotor de este tipo, esto se puede observar en la Figura 6

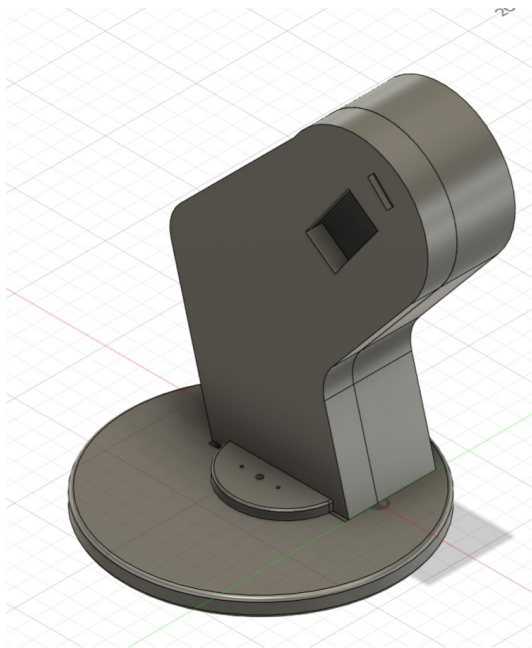


Figura 5: Eslabón 1 con tapas muestra el eje que se une a la base, el desplazamiento y la apertura en donde va el servomotor.

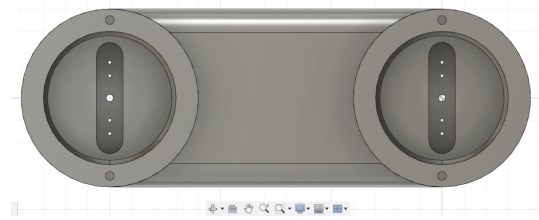


Figura 6: Eslabón 2 sin tapas permite ver el diseño para su unión con servomotores.

En la parte superior de robot, se utilizan 3 servomotores más pequeños, tanto para reducir el peso, como la dinámica generada por el movimiento y torque de los servomotores, además el espacio es menor y servomotores más grandes no serían una opción óptima en el diseño. Estos servomotores son modelo SG 90 Towerpro de un par de $1,6 \frac{kg}{cm}$ con un voltaje de trabajo de 5v, un giro de 180° , con dimensiones de 24 x 26 x 7 mm y un peso de 12 g, además cuenta con accesorios para su ensamble, los cuales se pueden ver junto con el servomotor en la Figura 7.



Figura 7: Servomotor SG 90 Towerpro con sus accesorios para ensamble.

Estos servomotores se utilizan para la unión entre el eslabón 3 (Figura 8) y la muñeca, también en el movimiento de giro de la garra que actúa como efector final y para la apertura y cierre de la misma

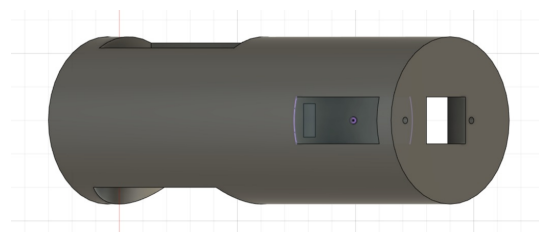


Figura 8: Eslabón 3, el diseño contempla el servomotor internamente.

En la Figura 9 y 10, se muestran el eslabón número 4 y el efector final o eslabón número 5, el cual consta de una pinza y un servomotor que da la apertura o cierre de la misma, el ensamble de estos dos eslabones y la posición de los servomotores

se puede observar en la Figura 10 en donde se tiene una vista lateral de la unión y los dispositivos mencionados.

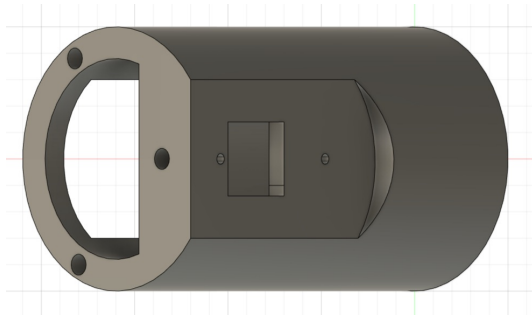


Figura 9: Eslabón 4 o muñeca, en el cual se contempla un servomotor internamente.

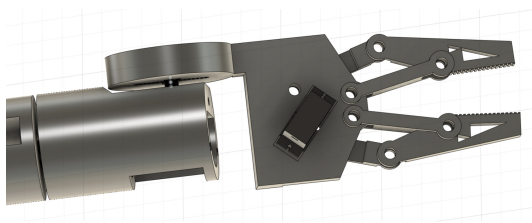


Figura 10: Muñeca y efector final, se puede observar el servomotor que hace el movimiento de la pinza.

Por último, se muestra el ensamble en CAD de todas las piezas diseñadas, desde la base con sus estabilizadores hasta el efector final, cabe destacar que este diseño contiene internamente los servomotores y la arduino UNO por lo que garantiza que todos los elementos necesarios para su funcionamiento, son los adecuados y tendrán el espacio y movimiento requeridos por el usuario, este ensamble completo se muestra en la Figura 11

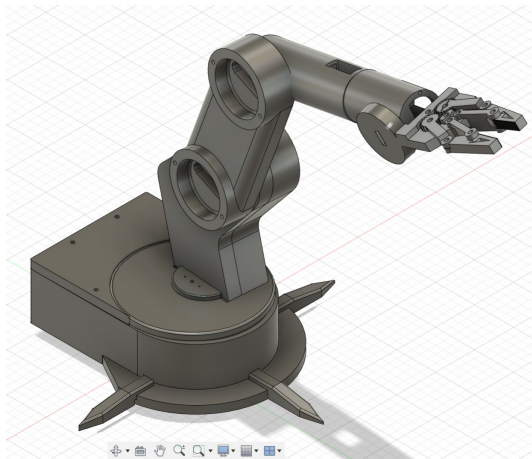


Figura 11: Ensamble completo del robot antropomórfico de 5 GDL

4. Resultados

4.1. Prototipado rápido

Para la fabricación del diseño en CAD del robot antropomórfico de 5 GDL mostrado, se utiliza una impresora 3D de la marca Artillery 3D modelo Sidewinder X2, que puede

trabajar con material PETG, PLA, ABS, PLU entre otros, teniendo en cuenta la boquilla y otras condiciones, tiene un área de impresión de 300x300x400mm, y una velocidad de impresión máxima de 150mm/s, nivelación automática y una pantalla táctil para su uso, esta impresora se muestra en la Figura 12.



Figura 12: Impresora 3D de la marca Artillery 3D modelo Sidewinder X2

Con esta impresora se fabrica la estructura del robot. Para elegir los materiales adecuados para la fabricación del prototipo, se presenta una comparativa entre los materiales más utilizados en el prototipado rápido en la Tabla 2

Tabla 2: Comparativa de propiedades mecánicas y costo de materiales comunes en impresión 3D

Material	E (GPa)	σ_R (MPa)	ϵ	Costo
PLA	≈ 3.5	≈ 75	3 – 10	≈ 400
PETG	≈ 2.2	≈ 65	10 – 30	≈ 500
ABS	≈ 2.1	≈ 50	10 – 50	≈ 450
PET	≈ 2.7	≈ 65	20 – 100	≈ 500

En esta tabla, E es el módulo de Young, σ_r es la resistencia a la tracción del material, ϵ es el porcentaje de elongación del material y el costo se expresa en pesos mexicanos por kilogramo de material. Según las características mostradas en la Tabla 2, se eligen el PETG y el PLA para el prototipo. El PETG como material de impresión, se debe trabajar con una temperatura de extrusor de 240 °C, una temperatura de cama de 70°C y una velocidad de impresión de 30 $\frac{mm}{s}$, también se utiliza el PLA el cual trabaja con una temperatura de extrusor de 220 °C, una temperatura de cama de 60°C y una velocidad de impresión de 30 $\frac{mm}{s}$ ambos materiales son adecuados para prototipado rápido del robot y por lo tanto se combinan piezas realizadas con PETG y con PLA (Prajapati *et al.*, 2024).

Una vez que se tiene el modelo CAD realizado en el software Fusion, se ocupa un programa laminador que permite convertir el código empleado para el diseño CAD en código G y M que es interpretado por la impresora 3D y con esto se controla el movimiento, las láminas, velocidad de impresión y si se imprimirán soportes o no dentro de la estructura principal del diseño, el software elegido para esta conversión es UltiMaker Cura 5.7.1, en dónde se establecieron los parámetros previamente dados para una correcta impresión del material PETG. Se activaron los soportes de tipo árbol para imprimir adecuadamente cada uno de los eslabones.

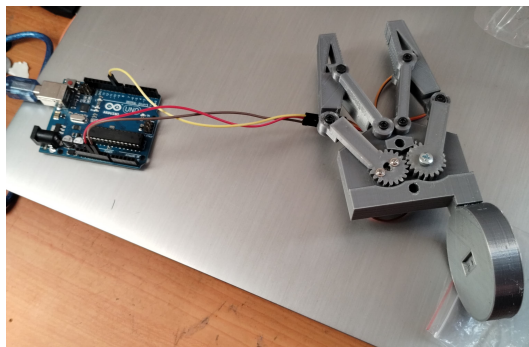


Figura 14: Efector final y Arduino Uno, realizando pruebas de funcionamiento.

En la Figura 13, se muestran las diferentes partes del robot, donde se incluye la base, soportes de la base, el eslabón 1 junto con su tapa, el eslabón 2 junto con sus dos tapas circulares, el eslabón 3 y el eslabón 4 (muñeca), donde cabe destacar que todas estas piezas son de color gris, pero debido a que las uniones del eslabón 3 y 4 resultaron muy delgadas, no soportaban los esfuerzos generados por el movimiento de los demás eslabones y de los servomotores internos en ellos mismos, por lo cual, fue necesario aplicar el diseño concurrente y mejorar estos dos eslabones en cuanto a espesor y relleno, por lo tanto estos dos eslabones fueron rediseñados e impresos nuevamente también con PETG pero ahora de color negro.

El efector final, junto con el Arduino UNO utilizado, se muestra en la Figura 14 en donde se realizaron pruebas de funcionamiento del efector final para realizar los ajustes necesarios.

Finalmente se ensambla el robot con tornillos, tuercas, pijas, cables y demás accesorios necesarios para su ensamble. Y se obtiene el prototipo final, que cabe recordar es el segundo diseño, debido a lo explicado con la muñeca y el eslabón 3; sin embargo, con este rediseño el robot funciona adecuadamente y soporta los esfuerzos de los movimientos combinados y de los servomotores de cada articulación. Este ensamble final se muestra en las Figuras 15 y 16.



Figura 13: Impresión en PETG de la base, eslabones 1, 2, 3 y 4 del robot antropomórfico



Figura 15: Ensamble final del prototipo del robot antropomórfico de 5 GDL.



Figura 16: Ensamble final del prototipo del robot antropomórfico de 5 GDL en su máximo alcance.

En la Figura 16 se nota cómo los eslabones 3 y 4 son de un color negro y no gris, como los mostrados en la Figura 13. Debido al diseño recurrente y gracias al prototipado rápido, los problemas fueron solventados de manera sencilla y el prototipo fue realizado en tiempo y forma.

En la Tabla 3 se presentan mediciones básicas para realizar una comparación entre los resultados estimados contra los resultados reales medidos en experimentación, como el peso estimado por los programas CAD y los distintos movimientos del robot. Se realizan movimientos controlados en el efector final del robot, para obtener el tiempo que tarda en realizar este movimiento y la precisión del mismo.

Tabla 3: Comparativa entre los resultados estimados contra los resultados reales al mover el brazo robótico

Medición	Estimada	Real
Tiempo de movimiento	$0,9 \frac{rad}{s}$	$\approx 0,7 \frac{rad}{s}$
Precisión de movimiento	1°	3°
Peso final del robot	1000 g	1070 g
Torque	$11 \frac{kg}{cm}$	$10 \frac{kg}{cm}$

4.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se está realizando una interfaz entre la computadora y el robot fabricado con impresión 3D, por el momento, la interfaz actual necesita tener una conexión cableada entre la computadora y el robot para que se puedan mover directamente los servomotores de cada articulación, la mejora de esta interfaz está siendo diseñada para que tenga una conectividad inalámbrica con el robot. Por lo cual también se deberá cambiar la placa Arduino UNO o agregar un shield para lograr

este objetivo. La interfaz actual que mueve el robot se muestra en la Figura 17. Se plantea la integración de sensores, el diseño de una ley de control en lazo cerrado, el desarrollo de estrategias de control en tiempo real y el análisis dinámico del sistema para aplicaciones más complejas. Esto se complementará con una interfaz de usuario diseñada específicamente para mejorar la interacción entre el usuario y el robot y para que se pueda conocer claramente la posición y el movimiento del robot.

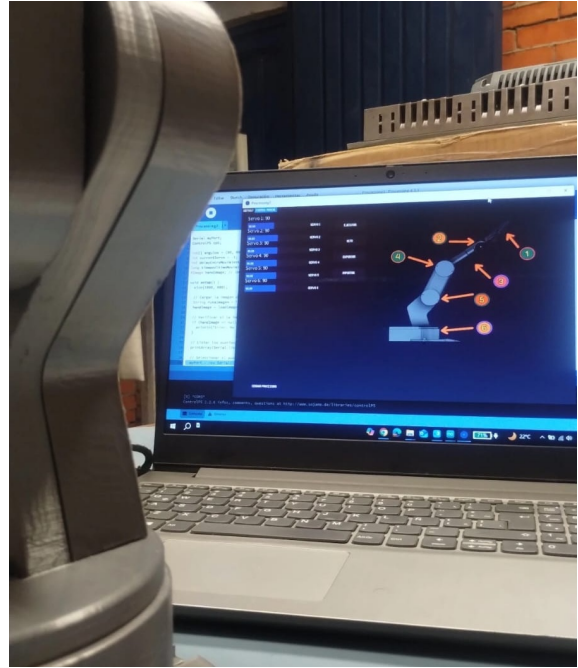


Figura 17: Interfaz actual para movimiento del robot de 5 GDL.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el diseño y prototipado rápido de un robot antropomórfico de 5 grados de libertad, empleando herramientas CAD y tecnologías de manufactura aditiva. A través de la metodología de diseño mecatrónico y frugal, fue posible desarrollar un sistema funcional, de bajo costo y fácil replicación, manteniendo una adecuada relación costo-beneficio sin comprometer su funcionalidad esencial.

La implementación de materiales como el PETG, PLA y el uso de impresión 3D tipo FDM permitieron realizar ajustes iterativos sobre la estructura del robot de manera eficiente, lo cual demuestra la viabilidad de esta tecnología para el desarrollo ágil de los cambios necesarios. Finalmente, se logró construir un prototipo físico completamente funcional, que puede utilizarse como base para desarrollos posteriores en áreas como el control automático, la visión artificial, la robótica educativa y la optimización estructural desde el punto de vista del diseño mecatrónico, la correcta modelación cinemática mediante parámetros Denavit-Hartenberg permitió definir y validar el comportamiento del robot antes de su fabricación. Esto facilitó la identificación de posibles mejoras, tanto en su estructura como en la disposición de los actuadores y del espacio de trabajo.

Agradecimientos

R. D. Cruz-Morales Agradece el apoyo de la UNAM, FES-Cuautitlán con el Programa Interno de Cátedras de Investigación CI 2446.

Referencias

- Alvarez Cabrera, A. A., Foeken, M. J., Tekin, O. A., Woestenenk, K., Erden, M. S., De Schutter, B., y Van Tooren, M. J. L. (2010). Towards automation of control software: A review of challenges in mechatronic design. *Mechatronics*, 20(8):876–886.
- Blasiak, S., Bochnia, J., Takosoglu, J., Kozior, T., Nowakowski, L., Skrzyniarz, M., Krzysztofik, I., Blasiak, M., Dindorf, R., y Wos, P. (2024). 3d 4d printing in advanced robotics system recent developments and applications. *Sustainability*, 16(24):11174.
- Cohen, E., Vikas, V., Trimmer, B., y McCarthy, S. (2015). Design methodologies for soft-material robots through additive manufacturing, from prototyping to locomotion. En *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volumen 57137, p. V05BT08A015. American Society of Mechanical Engineers.
- Craig, J. J. (2006). *Robótica: John J. Craig*. Pearson Educación.
- de Carvalho, R. A., da Hora, H., y Fernandes, R. (2021). A process for designing innovative mechatronic products. *International Journal of Production Economics*, 231:107887.
- De Marchi, V., Pineda-Escobar, M. A., Howell, R., Verheij, M., y Knorringa, P. (2022). Frugal innovation and sustainability outcomes: findings from a systematic literature review. *European Journal of Innovation Management*, 25(6):984–1007.
- de Wit, C. C., Siciliano, B., y Bastin, G. (2012). *Theory of robot control*. Springer Science & Business Media.
- Jagtap, S. (2021). Frugal idem: An integrated methodology for designing frugal innovations in low-resource settings. En *Design for Tomorrow Volume 2: Proceedings of ICoRD 2021*, pp. 41–51. Springer.
- Janschek, K. (2011). *Mechatronic systems design: methods, models, concepts*. Springer Science & Business Media.
- Kaneps, Janis and Gerina-Ancane, Anita and others (2016). Perfection of learning methods for mechatronics basic in mechanical engineering and industrial design studies. *Engineering for Rural Development*, 1:597–605.
- Lim, C. y Fujimoto, T. (2019). Frugal innovation and design changes expanding the cost-performance frontier: A schumpeterian approach. *Research Policy*, 48(4):1016–1029.
- Mcharek, M., Hammadi, M., Azib, T., Larouci, C., y Choley, J.-Y. (2019). Collaborative design process and product knowledge methodology for mechatronic systems. *Computers in Industry*, 105:213–228.
- Morales-Cruz, C., Ceccarelli, M., y Portilla-Flores, E. A. (2021). An innovative optimization design procedure for mechatronic systems with a multi-criteria formulation. *Applied Sciences*, 11(19):8900. Presenta un enfoque de diseño concurrente y multi-criterio para sistemas mecatrónicos.
- Moreno Nieto, D., Alonso-García, M., Pardo-Vicente, M.-A., y Rodríguez-Parada, L. (2021). Product design by additive manufacturing for water environments: study of degradation and absorption behavior of pla and petg. *Polymers*, 13(7):1036.
- Prajapati, S., Sharma, J. K., Kumar, S., Pandey, S., y Pandey, M. K. (2024). A review on comparison of physical and mechanical properties of pla, abs, tpu, and petg manufactured engineering components by using fused deposition modelling. *Materials Today Proceedings*.
- Rao, B. C. (2017). Advances in science and technology through frugality. *IEEE Engineering Management Review*, 45(1):32–38.
- Sanchez-Garcia, Bruno and Bugarin, Eusebio and Aguilar-Bustos, Ana Yave-ni and others (2023). Mejoramiento de un servomotor inteligente de bajo costo. *Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(Especial2):127–133.
- Santiago, L. M. L. y Pinto, V. D. C. (2024). Creando más con menos, la innovación frugal como nuevo paradigma de diseño para la sostenibilidad: Creating more with less, frugal innovation as a new design paradigm for sustainability. *Revista de Estudios Interdisciplinarios del Arte, Diseño y la Cultura*, (Especial: Intersecciones entre Sustentabilidad, Artes y Diseño, 38–55):https://masam.
- Sciavicco, L. y Siciliano, B. (2012). *Modelling and control of robot manipulators*. Springer Science & Business Media.
- Singh, R., Seniaray, S., y Saxena, P. (2020). A framework for the improvement of frugal design practices. *Designs*, 4(3):37.
- Terrile, S. (2022). *Soft robotics: applications, design and control*. Tesis doctoral, Industriales.
- Van Brussel, H., Leurs, B., De Schutter, B., y Van Nuffel, H. (2001). Design for control – a concurrent engineering approach for mechatronic systems design. *Mechatronics*, 11(4):417–433. Propone un enfoque de ingeniería concurrente para el diseño de sistemas mecatrónicos.
- Wang, Y., Yu, Y., Xie, C., Zhang, X., y Jiang, W. (2013). A proposed approach to mechatronics design education: Integrating design methodology, simulation with projects. *Mechatronics*, 23(8):942–948.
- Yan, X.-T. y Zante, R. (2010). *A Mechatronic Design Process and Its Application*, pp. 55–70. Springer London, London.