

# Diseño y desarrollo preliminar de un exoesqueleto biomecánico para rehabilitación del brazo y la mano

## Preliminary design and development of a low-cost biomechanical exoskeleton for elbow flexion–extension assistance and basic hand grasping

J. R. Gómez-Armenta<sup>1</sup> \* , A. Mares-Castro<sup>1</sup> , M. G. Moreno-Salcido<sup>1</sup>   
(\*ramon.ga@purisima.tecnm.mx)

Recibido: 25 de octubre de 2025    Aceptado: 5 de febrero de 2026

### RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño y desarrollo de un prototipo biomecánico de bajo costo, correspondiente a la Fase I de un proyecto de investigación, orientado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo en el plano sagital, con un rango angular aproximado de  $\pm 45^\circ$ , así como a la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre. La propuesta surge ante la necesidad de explorar alternativas tecnológicas accesibles que contribuyan a reducir las barreras económicas asociadas a los dispositivos de rehabilitación robótica para extremidades superiores, particularmente en contextos con recursos limitados. El prototipo integra principios de biomecánica y criterios básicos de ajuste anatómico, empleando tecnologías emergentes y de código abierto, tales como la plataforma ESP32, manufactura aditiva mediante impresión 3D y actuadores eléctricos comerciales de bajo costo. La metodología se estructura como una validación funcional preliminar de carácter exploratorio e incluye análisis antropométrico básico, cálculos biomecánicos de torque para la articulación del codo, modelado CAD, simulaciones estructurales por elementos finitos y pruebas experimentales orientadas a verificar la factibilidad mecánica y de control del sistema, sin constituir una evaluación clínica ni ergonómica concluyente. Los resultados indican la factibilidad técnica preliminar del prototipo, alcanzando una precisión angular promedio de  $\pm 5^\circ$  en el movimiento asistido del codo, un tiempo de respuesta de 0.4 s y un comportamiento energético estable durante las pruebas funcionales. Asimismo, se desarrolló una comparativa técnica y económica con dispositivos

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Blvd. Del Valle #2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, GTO.



reportados en la literatura y modelos comerciales de referencia, evidenciando una reducción aproximada del 49 % en el costo de fabricación, sustentada mediante una expresión matemática explícita. En conjunto, este estudio establece una base técnica

para fases posteriores del proyecto y desarrollos tecnológicos futuros.

**Palabras clave:** *Exoesqueleto, Rehabilitación, Biomecánica, Control mecatrónico, ESP32*

## ABSTRACT

This work describes the design and development of a low-cost biomechanical prototype corresponding to Phase I of a research project, aimed at assisting elbow flexion–extension in the sagittal plane within an approximate angular range of  $\pm 45^\circ$ , as well as applying force for hand closure through a basic grasping mechanism. The proposal arises from the need to explore accessible technological alternatives that help reduce the economic barriers associated with robotic rehabilitation devices for upper limbs, particularly in resource-limited contexts. The prototype integrates biomechanical principles and basic anatomical fitting criteria, employing emerging and open-source technologies such as the ESP32 platform, additive manufacturing through 3D printing, and low-cost commercial electric actuators. The methodology is structured as a preliminary exploratory functional validation and includes basic anthropometric analysis, biomechanical torque calculations for the elbow

joint, CAD modeling, finite element structural simulations, and experimental tests aimed at verifying the mechanical and control feasibility of the system, without constituting a clinical or conclusive ergonomic evaluation. The results indicate the preliminary technical feasibility of the prototype, achieving an average angular accuracy of  $\pm 5^\circ$  in assisted elbow motion, a response time of 0.4 s, and stable energy behavior during functional tests. In addition, a technical and economic comparison was conducted with devices reported in the literature and commercial reference models, showing an approximate 49 % reduction in manufacturing cost, supported by an explicit mathematical expression. Overall, this study establishes a technical basis for subsequent phases of the project and future technological developments.

**Keywords:** *Exoskeleton, Rehabilitation, Biomechanics, Mechatronic control, ESP32*

## INTRODUCCIÓN

El uso de exoesqueletos se ha consolidado en los últimos años como una alternativa tecnológica para la rehabilitación de personas con alteraciones en la movilidad, particularmente en las extremidades superiores. Estos dispositivos electromecánicos permiten asistir el movimiento humano mediante actuadores, sensores y sistemas de control, facilitando la ejecución de ejercicios repetitivos y

controlados que favorecen la readaptación motriz. A nivel internacional, países como Japón, Alemania y Estados Unidos han desarrollado sistemas avanzados con arquitecturas complejas y estrategias de control sofisticadas; sin embargo, su alto costo de adquisición, operación y mantenimiento limita su accesibilidad, especialmente en contextos con recursos restringidos. En México y otros países en desarrollo, el acceso a tecnologías de rehabilitación robótica sigue siendo limitado, lo que ha motivado esfuerzos principalmente académicos orientados al desarrollo de prototipos funcionales de bajo costo. No obstante, muchos de estos desarrollos se encuentran en etapas preliminares, con alcances específicos y validaciones experimentales acotadas, lo que evidencia la necesidad de enfoques graduales y modulares que permitan evaluar su factibilidad técnica antes de avanzar hacia soluciones más complejas.

Bajo esta perspectiva, el presente trabajo describe el diseño y desarrollo de un prototipo biomecánico de bajo costo correspondiente a la Fase I de un proyecto de investigación, enfocado en la asistencia de la flexión y extensión del codo en el plano sagital, con un rango angular aproximado de  $\pm 45^\circ$ , así como en la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre. El estudio tiene un carácter exploratorio y preliminar, orientado a verificar la factibilidad mecánica y de control del sistema, sin constituir una validación clínica o ergonómica concluyente. El prototipo integra tecnologías accesibles, como la plataforma ESP32 y la manufactura aditiva mediante impresión 3D, y se concibe como una arquitectura modular susceptible de ampliación en fases posteriores.

### *Estado del arte*

El desarrollo de exoesqueletos para la rehabilitación del miembro superior ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, impulsado por el incremento de alteraciones motoras asociadas a lesiones neuromusculares, eventos cerebrovasculares y enfermedades degenerativas. En este contexto, los sistemas de asistencia robótica se han posicionado como una alternativa complementaria a las terapias convencionales, particularmente en procesos que requieren la ejecución de movimientos repetitivos, controlados y seguros. Diversos estudios reportan que el uso de exoesqueletos puede contribuir a mejorar la calidad del proceso de rehabilitación al permitir movimientos guiados, asistencia mecánica parcial y el registro objetivo de parámetros biomecánicos relevantes [1].

Desde la perspectiva de la ingeniería biomédica, se reconoce que los exoesqueletos destinados al miembro superior deben cumplir criterios biomecánicos fundamentales, tales como la alineación adecuada de los ejes articulares, el respeto de los planos fisiológicos de movimiento y la reducción de fuerzas parásitas que puedan generar incomodidad o riesgo para el usuario [2]. En este sentido, múltiples investigaciones destacan la importancia de integrar información antropométrica durante la etapa de diseño, especialmente cuando se busca adaptar los dispositivos a poblaciones específicas. Miranda-Bañuelos et al. subrayan la necesidad de desarrollar soluciones centradas en el usuario,

considerando las características antropométricas de la población mexicana para mejorar la ergonomía y la efectividad funcional de los dispositivos de rehabilitación [3]. En cuanto al diseño estructural, la manufactura aditiva ha representado un avance relevante en el desarrollo de dispositivos de rehabilitación robótica. Tecnologías como la impresión 3D permiten la fabricación de estructuras ligeras, modulares y personalizables, lo que facilita la adaptación anatómica del dispositivo, la reducción del peso total y la disminución de los costos de producción. Diversos trabajos reportan el uso de impresión 3D en exoesqueletos de bajo costo orientados tanto a aplicaciones clínicas exploratorias como a entornos académicos y de investigación [4–6]. En contraste, desarrollos industriales de alto desempeño, como ExoHand de Festo, integran sensores avanzados y sistemas complejos de control, constituyendo referencias tecnológicas relevantes, aunque con costos que limitan su implementación en instituciones públicas y educativas [7].

El avance en los sistemas de actuación también ha sido determinante en la evolución de los exoesqueletos de rehabilitación. El uso de servomotores digitales de alto torque ha permitido asistir movimientos específicos, como la flexión–extensión del codo y la apertura–cierre de la mano, con niveles aceptables de estabilidad y repetibilidad. Catálogos técnicos recientes reportan mejoras en densidad de potencia y confiabilidad de estos actuadores, lo que posibilita configuraciones compactas y eficientes [8,9]. No obstante, en prototipos académicos y de investigación temprana sigue siendo común el uso de servomotores comerciales de bajo costo debido a su accesibilidad y facilidad de integración, aun cuando presentan limitaciones en precisión y durabilidad frente a soluciones industriales [10].

Respecto a los sistemas de control y adquisición de datos, la incorporación de plataformas IoT y tecnologías de conectividad ha ampliado las capacidades de monitoreo y análisis en dispositivos de rehabilitación robótica. Herramientas como Arduino Cloud permiten el registro remoto de variables como ángulos articulares, torque aplicado y número de ciclos de movimiento, facilitando el seguimiento experimental y el análisis funcional sin requerir presencia constante del operador [11–14]. Estas tecnologías resultan especialmente pertinentes en etapas preliminares de desarrollo, donde se busca evaluar la factibilidad técnica del sistema. En el contexto latinoamericano y particularmente en México, diversos estudios reportan avances en el desarrollo de ortesis activas y exoesqueletos impresos en 3D orientados a la rehabilitación neuromuscular. Sin embargo, se identifica de manera recurrente la necesidad de reducir costos, simplificar los sistemas electrónicos y mejorar la adaptación antropométrica, dado que muchas soluciones comerciales resultan económicamente inaccesibles para hospitales públicos, centros de rehabilitación y programas educativos [6, 15–17]. Asimismo, se observa una limitada disponibilidad de dispositivos diseñados específicamente considerando las características antropométricas de la población mexicana. A pesar de la diversidad de exoesqueletos comerciales y prototipos académicos reportados, pocos sistemas integran de manera conjunta manufactura aditiva personalizada, actuadores

de alto torque de bajo costo, plataformas de control abiertas y un enfoque explícito en accesibilidad económica [14, 18–20]. En este contexto, el presente trabajo se posiciona como una contribución de Fase I, orientada al diseño y validación funcional preliminar de un prototipo biomecánico de bajo costo, enfocado en la asistencia de la flexión–extensión del codo y la aplicación de fuerza para el cierre de la mano, estableciendo una base técnica para desarrollos posteriores.

Con el fin de contextualizar la propuesta desarrollada, se presenta una comparación sistemática entre soluciones representativas reportadas en la literatura y el prototipo propuesto, considerando parámetros técnicos y funcionales comúnmente aceptados, tales como rango de movimiento, tipo de actuadores, grado de asistencia, peso, principios de control y costos de implementación. Esta comparación, presentada en la Tabla 1, evidencia una reducción aproximada del 49 % en el costo respecto a dispositivos comerciales de referencia, sustentada mediante una expresión matemática explícita, en concordancia con prácticas habituales en estudios de rehabilitación robótica.

**Tabla 1.** *Comparativa técnica y económica de exoesqueletos para miembros superiores (2020–2025). Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica y modelos comerciales.*

| Modelo / Referencia    | DOF | Rango de movimiento                                          | Actuadores                      | Principio de control     | Materiales principales  | Torque máx. | Peso total | Plataforma de control  | Costo USD      | Costo MXN | % diferencia    | Observaciones                               |
|------------------------|-----|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------|------------------------|----------------|-----------|-----------------|---------------------------------------------|
| Lee et al. (2021)      | 2   | Flexión–extensión de codo (0–120°)                           | Servos MG996R                   | Control por posición PWM | Impresión 3D + aluminio | 3–4 N·m     | 1.8 kg     | Arduino + Bluetooth    | \$350          | \$7,000   | 49 %            | Bajo costo, limitada fuerza                 |
| Sanguansat (2020)      | 1   | Flexión–extensión de dedo (0–90°)                            | Servos estándar                 | Control por ángulo       | PLA impreso en 3D       | 2 N·m       | 1.2 kg     | Arduino Cloud          | \$250          | \$5,000   | 28 %            | Impreso en 3D, baja resistencia             |
| Chen et al. (2022)     | 3   | Flexión y abducción de hombro (0–160°)                       | Motores DC + reductores         | Control híbrido PID      | Aluminio estructural    | 8–10 N·m    | 4 kg       | Control híbrido        | \$2,400        | \$48,000  | 1230 %          | Alta precisión                              |
| MyoPro (Comercial)     | 3   | Flexión–extensión de codo y mano (0–135°)                    | Actuadores eléctricos           | Control mioeléctrico     | Polímeros biomédicos    | 15–20 N·m   | 6 kg       | Sistema propietario    | \$8,000–12,000 | \$240,000 | 6560 %          | Eficacia clínica validada                   |
| HAL UL (Comercial)     | 3   | Flexión–extensión hombro y codo (0–140°)                     | Motores EMG asistidos           | Control EMG adaptativo   | Aleaciones ligeras      | 12–18 N·m   | 5 kg       | EMG control adaptativo | \$10,000       | \$200,000 | 5450 %          | Alta asistencia muscular                    |
| ERGOMOTION (Propuesto) | 2   | Flexión–extensión de codo y apertura–cierre de mano (0–120°) | Servo 150 kg·cm DS51150 + MG995 | Control PWM + IoT        | PLA/PETG + aluminio     | 6.1 N·m     | 1.4 kg     | ESP32 Arduino Cloud    | \$150–180      | \$3,600   | Referencia base | Mayor accesibilidad económica y control IoT |

Fórmula para la determinación de la diferencia porcentual de costos, expresada en dólares estadounidenses y pesos mexicanos. La diferencia porcentual de costo se calculó mediante la siguiente expresión Ec. (1):

$$\Delta C (\%) = \frac{C_c - C_e}{C_c} \times 100 \quad (1)$$

donde  $C_c$  corresponde al costo del dispositivo de referencia comercial y  $C_e$  corresponde al costo del exoesqueleto propuesto.

**Nota:** Los costos presentados corresponden a estimaciones comparativas y están sujetos a variaciones derivadas de factores macroeconómicos y del mercado, tales como inflación, fluctuaciones cambiarias y disponibilidad de componentes. El modelo propuesto se identifica en negritas con el fin de facilitar su reconocimiento y destacar la diferencia de costos en relación con las soluciones previamente reportadas en la literatura especializada.

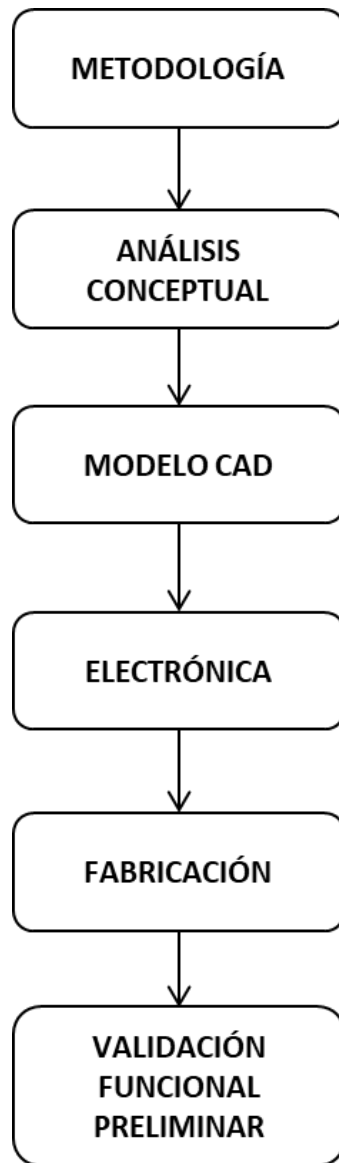
A diferencia de los trabajos reportados, que se enfocan en arquitecturas de alta complejidad, validaciones clínicas o dispositivos de alto costo, este estudio se centra en el diseño y validación funcional preliminar de un exoesqueleto biomecánico de bajo costo, correspondiente a la Fase I del proyecto, orientado a la asistencia del movimiento de flexión–extensión del codo y al cierre básico de la mano, mediante el uso de manufactura aditiva y plataformas de control de código abierto, sin pretender una evaluación clínica concluyente.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del prototipo biomecánico se estructuró bajo un enfoque sistemático de validación funcional preliminar, correspondiente a la Fase I del proyecto, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica, mecánica y de control de un exoesqueleto de bajo costo destinado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo en el plano sagital y a la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre. En ningún caso se pretende una validación clínica ni ergonómica concluyente. Las etapas descritas a continuación corresponden al flujo metodológico general del proyecto y siguen el orden presentado en la Figura 1.

### *Fase de diseño conceptual*

En la primera etapa del proyecto se llevó a cabo un análisis conceptual orientado a definir los requerimientos biomecánicos, dimensionales y funcionales del exoesqueleto, en concordancia con el alcance establecido para la Fase I del estudio. Esta fase se centró exclusivamente en la asistencia del movimiento de flexión–extensión del codo en el plano sagital, con un rango angular aproximado de  $\pm 45^\circ$ , así como en la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre, sin considerar movimientos de muñeca ni falanges individuales. Para el desarrollo del diseño se emplearon referencias antropométricas reportadas en la literatura, complementadas con mediciones preliminares de carácter exploratorio y no clínico, obtenidas a partir de pruebas realizadas con estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón y usuarios del sistema DIF del municipio de San Francisco del Rincón, Guanajuato. Estas pruebas tuvieron como objetivo recopilar información dimensional básica y observar el comportamiento general de los movimientos asistidos, sin constituir



**FIGURA 1.** *Diagrama de flujo metodológico del desarrollo del exoesqueleto biomecánico. Fuente: Elaboración propia.*

una evaluación médica o ergonómica concluyente. Los experimentos se realizaron con consentimiento informado y sin intervención terapéutica a personas que tenían dificultad en sus extremidades superiores. Como referencia general, se consideraron dimensiones antropométricas promedio de adultos mexicanos, estableciendo longitudes aproximadas de 40–50 cm para el brazo, 20–25 cm para el antebrazo y 15–20 cm para la mano. Esta información permitió definir los límites funcionales del movimiento del codo y los criterios de ajuste del módulo de mano, asegurando que el diseño respetara los planos fisiológicos del movimiento humano. A partir de este análisis se definió una arquitectura modular compuesta por tres segmentos principales: brazo, antebrazo y mano, interconectados mediante uniones articuladas que facilitan un movimiento controlado y reproducible.

La información obtenida en esta fase permitió establecer los criterios de diseño mecánico, selección de actuadores y definición del sistema de control, sentando las bases para las etapas posteriores de modelado CAD, análisis estructural y validación funcional preliminar. Asimismo, los parámetros antropométricos considerados se resumen en la Figura 2, la cual sirve como referencia para futuras fases del proyecto orientadas a la incorporación de nuevos grados de libertad y evaluaciones experimentales ampliadas.

| Medidas Antropométricas a Alumnos de Verano (en cm)                                 |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Código                                                                              | 80                                                                                  | 32                                                                                  | 420                                                                                 | SMB                                                                                 | 656                                                                                 | 411                                                                                 | 752                                                                                 | LM                                                                                  | AM-p                                                                                | AM-m                                                                                 | FAL-L                                                                                 | FAL-AP                                                                                | FAL-AD                                                                                | MAN-C                                                                                 | 381                                                                                   | MUN-C                                                                                 |
| Muestra de alumnos                                                                  | Largo de brazo desde la vertical                                                    | Largo de brazo                                                                      | Largo de mano                                                                       | Circunferencia del brazo                                                            | Largura de palma de mano (sin dedos)                                                | Anchura de palma de mano                                                            | Largura de puño                                                                     | Longitud de mano                                                                    | Ancho de palma                                                                      | Ancho de mano                                                                        | Longitud de falanges                                                                  | Ancho proximal de falanges                                                            | Ancho distal de falanges                                                              | Circunferencia de la mano                                                             | Longitud del codo al dedo medio                                                       | Circunferencia de la muñeca                                                           |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1                                                                                   | 72                                                                                  | 68                                                                                  | 16                                                                                  | 25                                                                                  | 20                                                                                  | 7                                                                                   | 13                                                                                  | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 9                                                                                    | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 18                                                                                    | 49                                                                                    | 15                                                                                    |
| 2                                                                                   | 73                                                                                  | 69                                                                                  | 17                                                                                  | 25.5                                                                                | 20                                                                                  | 7                                                                                   | 9                                                                                   | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 10                                                                                   | 3                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 50                                                                                    | 14                                                                                    |
| 3                                                                                   | 74                                                                                  | 70                                                                                  | 17                                                                                  | 27                                                                                  | 20                                                                                  | 7                                                                                   | 7                                                                                   | 18                                                                                  | 21                                                                                  | 11                                                                                   | 3                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 21                                                                                    | 49                                                                                    | 17                                                                                    |
| 4                                                                                   | 76                                                                                  | 71                                                                                  | 17                                                                                  | 27                                                                                  | 22                                                                                  | 7                                                                                   | 13                                                                                  | 17                                                                                  | 22                                                                                  | 10                                                                                   | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 47                                                                                    | 14                                                                                    |
| 5                                                                                   | 77                                                                                  | 71                                                                                  | 17                                                                                  | 27                                                                                  | 22                                                                                  | 7                                                                                   | 11                                                                                  | 17                                                                                  | 20                                                                                  | 11                                                                                   | 4                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 26                                                                                    | 46                                                                                    | 14                                                                                    |
| 6                                                                                   | 77                                                                                  | 71                                                                                  | 17                                                                                  | 27                                                                                  | 22                                                                                  | 7                                                                                   | 7                                                                                   | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 11                                                                                   | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 18                                                                                    | 50                                                                                    | 18                                                                                    |
| 7                                                                                   | 78                                                                                  | 72                                                                                  | 17                                                                                  | 28                                                                                  | 22.5                                                                                | 7                                                                                   | 11                                                                                  | 20                                                                                  | 20                                                                                  | 11                                                                                   | 2                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 23                                                                                    | 48                                                                                    | 16                                                                                    |
| 8                                                                                   | 78                                                                                  | 72                                                                                  | 17                                                                                  | 28.5                                                                                | 22.5                                                                                | 7                                                                                   | 11                                                                                  | 20                                                                                  | 20                                                                                  | 11                                                                                   | 3                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 24                                                                                    | 49                                                                                    | 18                                                                                    |
| 9                                                                                   | 79                                                                                  | 72                                                                                  | 17                                                                                  | 28.5                                                                                | 22.5                                                                                | 7                                                                                   | 9                                                                                   | 19                                                                                  | 22                                                                                  | 10                                                                                   | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 17                                                                                    | 47                                                                                    | 18                                                                                    |
| 10                                                                                  | 79                                                                                  | 72                                                                                  | 18                                                                                  | 28.5                                                                                | 22.5                                                                                | 7                                                                                   | 8                                                                                   | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 9                                                                                    | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 27                                                                                    | 47                                                                                    | 15                                                                                    |
| 40                                                                                  | 88                                                                                  | 79                                                                                  | 19                                                                                  | 33.5                                                                                | 28                                                                                  | 8                                                                                   | 10                                                                                  | 17                                                                                  | 20                                                                                  | 10                                                                                   | 4                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 20                                                                                    | 49                                                                                    | 18                                                                                    |
| 41                                                                                  | 89                                                                                  | 80                                                                                  | 19                                                                                  | 34                                                                                  | 28                                                                                  | 8                                                                                   | 8                                                                                   | 20                                                                                  | 20                                                                                  | 9                                                                                    | 3                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 26                                                                                    | 46                                                                                    | 17                                                                                    |
| 42                                                                                  | 89                                                                                  | 81                                                                                  | 20                                                                                  | 34                                                                                  | 28                                                                                  | 8                                                                                   | 13                                                                                  | 19                                                                                  | 20                                                                                  | 10                                                                                   | 3                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 24                                                                                    | 47                                                                                    | 16                                                                                    |
| 43                                                                                  | 89                                                                                  | 81                                                                                  | 20                                                                                  | 34                                                                                  | 28                                                                                  | 8                                                                                   | 11                                                                                  | 19                                                                                  | 21                                                                                  | 11                                                                                   | 2                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 24                                                                                    | 47                                                                                    | 14                                                                                    |
| 44                                                                                  | 89                                                                                  | 82                                                                                  | 20                                                                                  | 34                                                                                  | 28                                                                                  | 8                                                                                   | 12                                                                                  | 17                                                                                  | 22                                                                                  | 9                                                                                    | 4                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 50                                                                                    | 14                                                                                    |
| 45                                                                                  | 90                                                                                  | 82                                                                                  | 20                                                                                  | 34                                                                                  | 28                                                                                  | 8                                                                                   | 9                                                                                   | 20                                                                                  | 21                                                                                  | 9                                                                                    | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 48                                                                                    | 15                                                                                    |
| 46                                                                                  | 90                                                                                  | 82                                                                                  | 20                                                                                  | 34                                                                                  | 29                                                                                  | 8                                                                                   | 9                                                                                   | 19                                                                                  | 20                                                                                  | 10                                                                                   | 2                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 27                                                                                    | 46                                                                                    | 18                                                                                    |
| 47                                                                                  | 90                                                                                  | 82                                                                                  | 21                                                                                  | 34                                                                                  | 29                                                                                  | 8                                                                                   | 12                                                                                  | 19                                                                                  | 21                                                                                  | 9                                                                                    | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 24                                                                                    | 47                                                                                    | 16                                                                                    |
| 48                                                                                  | 91                                                                                  | 83                                                                                  | 19                                                                                  | 34                                                                                  | 29                                                                                  | 8                                                                                   | 13                                                                                  | 17                                                                                  | 21                                                                                  | 10                                                                                   | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 24                                                                                    | 48                                                                                    | 15                                                                                    |
| 49                                                                                  | 92                                                                                  | 83                                                                                  | 21                                                                                  | 34                                                                                  | 30                                                                                  | 8.1                                                                                 | 10                                                                                  | 20                                                                                  | 21                                                                                  | 9                                                                                    | 2                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 21                                                                                    | 50                                                                                    | 14                                                                                    |
| 50                                                                                  | 92                                                                                  | 83                                                                                  | 21                                                                                  | 35                                                                                  | 30                                                                                  | 8.1                                                                                 | 8                                                                                   | 19                                                                                  | 22                                                                                  | 10                                                                                   | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 48                                                                                    | 15                                                                                    |
| 51                                                                                  | 94                                                                                  | 85                                                                                  | 21                                                                                  | 35                                                                                  | 30                                                                                  | 8.1                                                                                 | 7                                                                                   | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 9                                                                                    | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 23                                                                                    | 45                                                                                    | 16                                                                                    |
| 52                                                                                  | 96                                                                                  | 86                                                                                  | 21                                                                                  | 35                                                                                  | 30                                                                                  | 8.1                                                                                 | 8                                                                                   | 17                                                                                  | 22                                                                                  | 11                                                                                   | 3                                                                                     | 1                                                                                     | 1                                                                                     | 27                                                                                    | 50                                                                                    | 14                                                                                    |
| Percentil 95%                                                                       | 92.7                                                                                | 83.7                                                                                | 21                                                                                  | 35                                                                                  | 30                                                                                  | 8.1                                                                                 | 13                                                                                  | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 11                                                                                   | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 50                                                                                    | 18                                                                                    |
| Percentil 95% (red)                                                                 | 92.8                                                                                | 83.8                                                                                | 21                                                                                  | 35                                                                                  | 30                                                                                  | 8.1                                                                                 | 13                                                                                  | 20                                                                                  | 22                                                                                  | 11                                                                                   | 4                                                                                     | 2                                                                                     | 1                                                                                     | 28                                                                                    | 50                                                                                    | 18                                                                                    |

**FIGURA 2.** Parámetros antropométricos preliminares empleados para el diseño del exoesqueleto.

*Fuente:* Elaboración propia, con base en mediciones experimentales y literatura biomecánica estándar.

Mediante la aplicación de un enfoque de diseño centrado en el usuario, se desarrollaron inicialmente bocetos conceptuales, diagramas funcionales y una descripción jerárquica de los subsistemas mecánico, electrónico y de control que conforman el exoesqueleto. En esta etapa se establecieron los criterios de diseño fundamentales, orientados a garantizar ergonomía básica, facilidad de ensamblaje, bajo peso estructural, reducción de costos y compatibilidad con componentes electrónicos comerciales de amplia disponibilidad. Con base en dichos criterios, se definieron los materiales y componentes necesarios

para la construcción del prototipo. Durante las etapas iniciales de validación del diseño, las pruebas funcionales preliminares se realizaron empleando tres servomotores MG995, con un torque nominal de 15 kg·cm, de los cuales dos fueron destinados al accionamiento del módulo de brazo y uno al módulo de la mano. Estos actuadores permitieron verificar la arquitectura mecánica básica del sistema, la correcta alineación articular y la viabilidad de la estrategia de control implementada. Su selección respondió a criterios de disponibilidad comercial, bajo costo y facilidad de integración, adecuados para una fase exploratoria del desarrollo.

No obstante, durante las pruebas de operación continua se identificaron limitaciones en la capacidad de torque y en la estabilidad del movimiento, particularmente al asistir los movimientos de flexión y extensión del codo bajo carga. A partir de estas observaciones, el sistema de actuación fue optimizado mediante la incorporación de un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm), equipado con engranajes metálicos y capacidad de operación a 12 V. Esta modificación permitió mejorar significativamente la suavidad del movimiento, reducir vibraciones y garantizar una asistencia más estable y confiable. La integración del servomotor de alto torque permitió superar ampliamente el torque biomecánico requerido, optimizando la respuesta dinámica del sistema y favoreciendo una ejecución más controlada de los movimientos asistidos. Esta mejora resulta especialmente relevante para aplicaciones terapéuticas, al contribuir a una interacción más confortable con el usuario y a una mayor confiabilidad durante sesiones prolongadas de operación. Los materiales y herramientas empleados para la elaboración de los componentes del prototipo se presentan en la Figura 3.

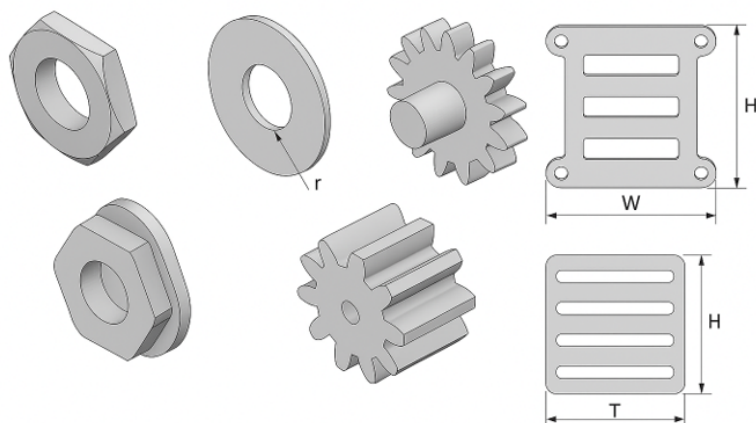
#### *Fase de modelado CAD y análisis estructural*

Una vez establecidas las dimensiones y los requerimientos funcionales del exoesqueleto, se procedió al desarrollo del modelo tridimensional mediante el software Autodesk Inventor. El diseño consideró geometrías ligeras y estructuralmente resistentes, incorporando configuraciones tipo retícula con el propósito de reducir masa sin comprometer la integridad mecánica del sistema. Para todas las piezas estructurales se definieron espesores mínimos de 2.5 mm, valor seleccionado para garantizar un comportamiento adecuado frente a esfuerzos de flexión y torsión durante la operación normal del dispositivo. El modelo tridimensional de los componentes principales y los resultados del análisis estructural se presentan en la Figura 4.

Estos resultados permitieron confirmar que el diseño propuesto cumple con los criterios de resistencia mecánica y rigidez necesarios para las pruebas experimentales posteriores, estableciendo una base confiable para las fases de fabricación y validación funcional.

| Nombre                           | Imagen                                                                              | Nombre                        | Imagen                                                                              | Nombre                  | Imagen                                                                               | Nombre                                        | Imagen                                                                                |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ESP32 de 38 pines                |    | Pijas                         |    | Filamento PLA           |    | Broca de carburo de tungsteno de 1.2 mm       |    |
| Servomotores MG995 de 15KG       |    | Pilas de litio                |    | Impresora 3D            |    | Cloruro ferrico                               |    |
| Eliminador de 12 Voltios         |    | Cables JST                    |    | Software de inventor    |    | Placas fenolicas                              |    |
| Kit de cable dupont hembra-macho |    | Terminales JST                |    | Regla                   |    | Pintura en aerosol de aceite color negro mate |    |
| Kit de arduino con librerias     |    | Cable USB mini                |    | Flexometro              |    | Marcador de aceite negro                      |    |
| Velcro hembra-macho              |    | Placa de cobre para protobard |    | Hilo y agujas           |    | Pijas                                         |    |
| Tarrajás                         |   | Cautin                        |   | Lapto                   |   | Servomotores DS511150                         |   |
| Modulo regulador MP1584          |  | Estaño                        |  | Multimetro astro CM2KOR |  | Grasa para estaño                             |  |

**FIGURA 3.** *Materiales y herramientas empleadas para la elaboración del prototipo del exoesqueleto.*  
Fuente: Elaboración propia.

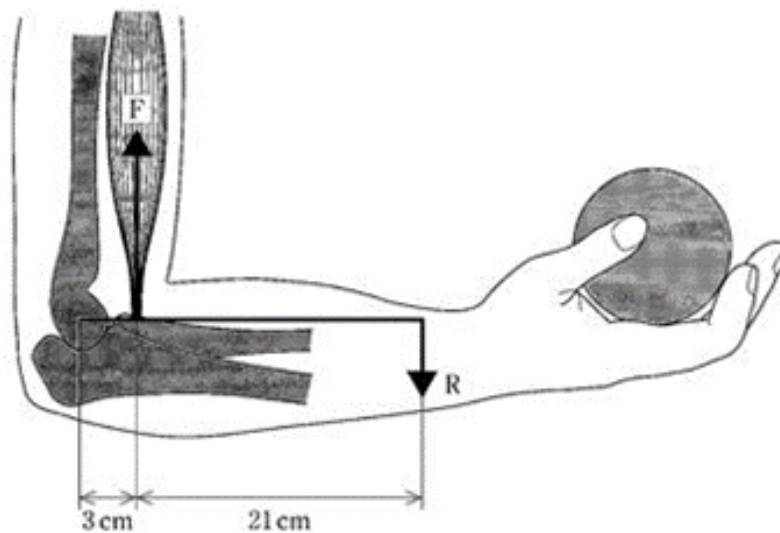


**FIGURA 4.** *Modelado de componentes principales del exoesqueleto en Autodesk Inventor.* Fuente: Elaboración propia.

### *Fase de cálculo de torque y potencia*

Con base en los datos antropométricos y la masa promedio del brazo humano (2.5 kg), se calcularon los torques requeridos en las articulaciones principales. El torque teórico se estimó considerando el modelo biomecánico clásico del brazo humano Ec. (2), como se ilustra en la Figura 5.

$$T = F \cdot r = (m \cdot g) \cdot r \quad (2)$$



**FIGURA 5.** Diagrama biomecánico del brazo humano durante la flexión del codo, mostrando la relación entre la fuerza muscular ( $F$ ) y la resistencia aplicada ( $R$ ). Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos biomecánicos realizados permitieron estimar un torque promedio de 6.1 N·m para la asistencia del movimiento de flexión del codo, valor que se considera como el requerimiento biomecánico mínimo para esta aplicación. Durante la fase exploratoria del diseño, se emplearon servomotores MG995 con un torque nominal de 15 kg·cm, los cuales resultaron adecuados para validar la arquitectura mecánica del sistema y la estrategia de control implementada en condiciones de prueba inicial. Sin embargo, durante las pruebas bajo carga se identificaron limitaciones en la estabilidad y suavidad del movimiento, atribuibles a la capacidad de torque de dichos actuadores. En respuesta a estas observaciones, y con el objetivo de garantizar un margen de seguridad adecuado, así como una operación más estable y confiable, el prototipo final incorporó un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm, modelo DS51150) en la articulación del codo. Esta selección permitió superar ampliamente el torque biomecánico requerido, mejorando la respuesta dinámica del sistema y asegurando un desempeño más consistente durante la validación funcional preliminar.

### *Fase de integración electrónica y control*

El sistema de control del exoesqueleto se implementó utilizando un microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento de doble núcleo, conectividad inalámbrica integrada (Wi-Fi y Bluetooth) y compatibilidad con una amplia variedad de sensores analógicos y digitales. Estas características permiten una implementación flexible del sistema de control y facilitan su integración con interfaces externas durante la fase de validación funcional preliminar.

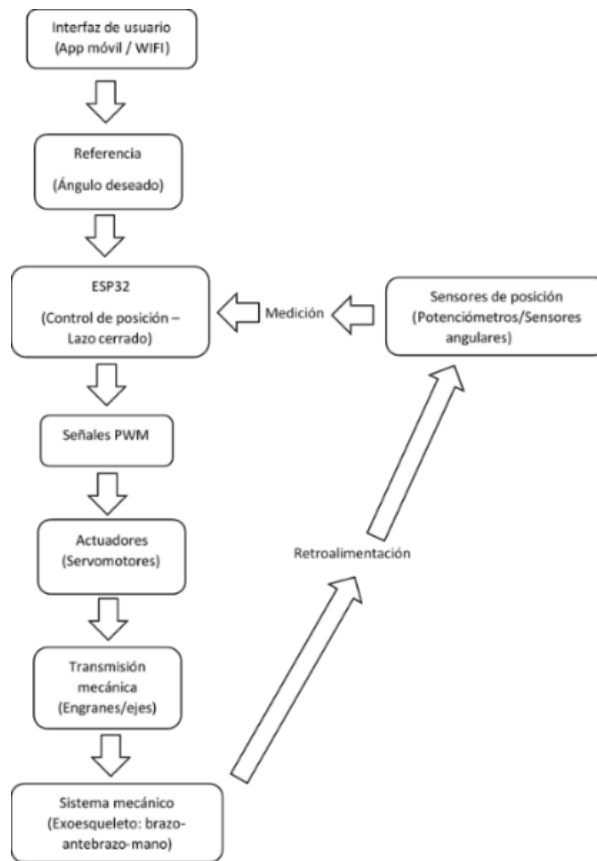
La arquitectura electrónica del prototipo está compuesta por los siguientes elementos principales:

- Sensores de posición basados en potenciómetros lineales para la medición de los ángulos articulares.
- Módulo de comunicación Bluetooth para la interacción con una aplicación móvil.
- Servomotores digitales de posicionamiento angular para la generación del movimiento asistido.
- Fuente de alimentación con un rango de operación de 10–12.6 V, equipada con protección térmica para garantizar una operación segura.

El firmware del sistema fue desarrollado en el entorno Arduino IDE, implementando rutinas básicas de adquisición de señales, calibración de límites de movimiento y generación de señales PWM para el control de los servomotores. El sistema permite la configuración del ángulo objetivo y la velocidad de ejecución a través de una interfaz móvil de carácter sencillo, lo que facilita el ajuste del dispositivo de acuerdo con las características físicas del usuario y los requerimientos de la sesión de prueba. El diagrama a bloques del sistema de control se presenta en la Figura 6.

### *Fase de fabricación*

Las piezas del exoesqueleto fueron fabricadas mediante impresión 3D por deposición de material fundido (FDM), utilizando PLA como material base, con un relleno del 40 % y una resolución de capa de 0.2 mm. Estos parámetros se seleccionaron para lograr un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, peso reducido y facilidad de manufactura. Con el propósito de facilitar el mantenimiento, la sustitución de componentes y futuras modificaciones del diseño, se emplearon uniones mecánicas desmontables mediante tornillería M4. Cada uno de los módulos del exoesqueleto (brazo, antebrazo y mano) fue ensamblado de manera independiente, verificando previamente la movilidad libre de las articulaciones, así como la alineación adecuada entre los ejes articulares correspondientes. Este procedimiento permitió asegurar una integración correcta entre los segmentos estructurales y evitar interferencias mecánicas durante la operación del dispositivo.



**FIGURA 6.** Diagrama a bloques del sistema de control del exoesqueleto biomecánico basado en ESP32. Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de fabricación y ensamblaje, se prestó especial atención a la integración entre los elementos estructurales y el sistema de actuación, con el fin de garantizar una transmisión eficiente del movimiento y una ejecución controlada de los movimientos asistidos. Las Figuras 7 y 8 muestran el conjunto actuador–engranaje y el componente estructural del módulo de brazo, responsables de la generación y transmisión del movimiento de flexión–extensión hacia el antebrazo.



**FIGURA 7.** *Actuador con sistema de engranajes acoplado a servomotor para la generación del movimiento de flexión–extensión del brazo. Fuente: Elaboración propia.*

Por su parte, las Figuras 9 y 10 ilustran las etapas de fabricación aditiva y el conjunto de piezas correspondientes al módulo de antebrazo, evidenciando la arquitectura modular del diseño y la facilidad de ensamblaje alcanzada mediante manufactura aditiva. Esta configuración favorece la adaptación dimensional del dispositivo y simplifica tanto las tareas de mantenimiento como la sustitución individual



**FIGURA 8.** *Componente estructural del módulo de brazo que conecta el actuador con el antebrazo, permitiendo el movimiento articular controlado. Fuente: Elaboración propia.*

de componentes.



**FIGURA 9.** *Impresión 3D del componente estructural del módulo de antebrazo del exoesqueleto durante la etapa de fabricación. Fuente: Elaboración propia.*

Servomotor utilizado después de la fase experimental. Una vez concluidas las pruebas experimentales preliminares del prototipo, el sistema de actuación fue optimizado mediante la incorporación de un servomotor digital de alto torque (150 kg-cm), modelo DS51150. La selección de este actuador respondió a la necesidad de garantizar un margen de seguridad adecuado respecto al torque biomecánico estimado, así como de mejorar la estabilidad y continuidad del movimiento durante la operación del exoesqueleto bajo condiciones de carga. El servomotor opera en un rango de alimentación de 10–12.6 V y cuenta con una estructura compacta, lo que facilitó su integración dentro del diseño mecánico sin requerir modificaciones significativas en la arquitectura del sistema. La incorporación de este actuador permitió una transmisión de movimiento más controlada y consistente, reduciendo vibraciones y mejorando la suavidad del desplazamiento durante la ejecución de los movimientos asistidos. Esta mejora resultó especialmente relevante para la validación funcional preliminar del dispositivo, al contribuir a una interacción más confiable entre el sistema mecánico y el usuario durante ciclos prolongados de operación. El servomotor digital de alto torque empleado en esta etapa se muestra en la Figura 11.

#### *Fase de validación funcional preliminar*

La etapa final del desarrollo consistió en la validación funcional preliminar del prototipo, realizada bajo condiciones simuladas de uso y con un enfoque exploratorio. En esta fase se efectuaron pruebas de repetitividad del movimiento, mediciones angulares mediante goniómetro digital y una evaluación



**FIGURA 10.** Conjunto de componentes del módulo de antebrazo del exoesqueleto fabricados por manufactura aditiva (impresión 3D). Fuente: Elaboración propia.

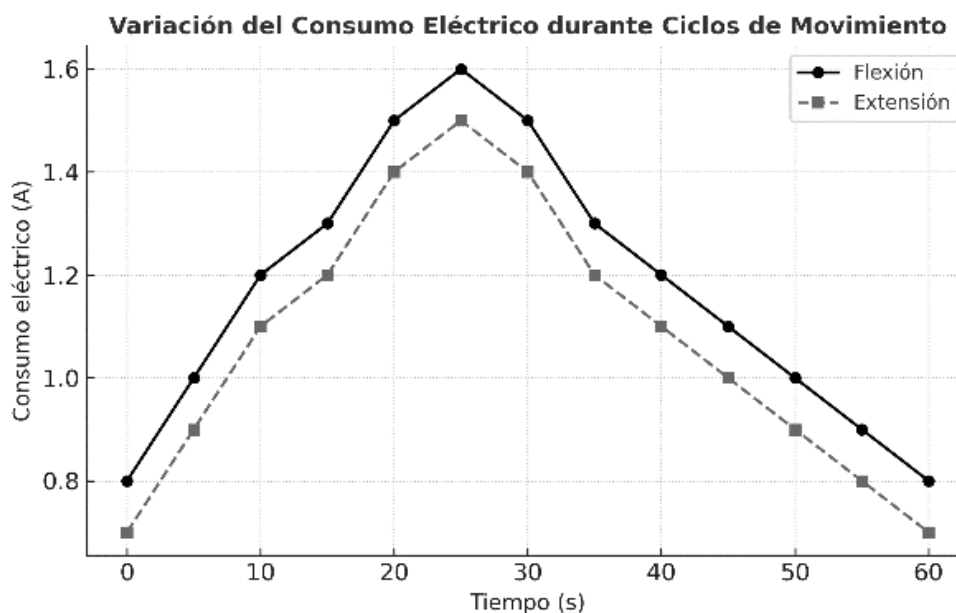


**FIGURA 11.** Servomotor digital de alto torque (150 kg·cm, modelo DS51150), empleado en la etapa final del prototipo para mejorar la estabilidad y suavidad del movimiento asistido. Fuente: (DSServo, 2023).

preliminar del consumo de corriente bajo carga controlada.

El exoesqueleto reprodujo de forma consistente los movimientos de flexión y extensión del codo en un rango de  $0^\circ$  a  $45^\circ$ , con una precisión angular promedio de  $\pm 5^\circ$  y un tiempo de respuesta medio de 0.4 s, lo que indica un comportamiento estable y adecuado para esta fase inicial del proyecto. Los resultados del comportamiento dinámico y del consumo eléctrico del sistema se presentan en la Figura 12.

Cabe señalar que estas pruebas no constituyen una evaluación clínica ni ergonómica concluyente, sino que tuvieron como objetivo verificar la factibilidad técnica y funcional del prototipo e identificar áreas de mejora para fases posteriores. Los resultados obtenidos sirvieron como base para la documentación del desempeño del sistema y la planificación de futuras etapas con validaciones experimentales ampliadas.



**FIGURA 12.** Variación del consumo eléctrico durante ciclos de flexión y extensión del exoesqueleto.  
 Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de desempeño obtenidos fueron contrastados con reportes previos de dispositivos de rehabilitación similares, lo que permitió identificar una reducción aproximada del 49 % en el costo total de producción del prototipo desarrollado, en comparación con modelos comerciales de referencia. Asimismo, el diseño modular y ajustable del exoesqueleto mostró una adecuada adaptabilidad a diferentes morfologías del usuario, de acuerdo con las pruebas funcionales preliminares realizadas.

Finalmente, se documentaron de manera sistemática los parámetros básicos de calibración, así como las recomendaciones de mantenimiento y operación segura del dispositivo, con el objetivo de consolidar

un procedimiento replicable que sirva como base para futuras iteraciones del diseño y para evaluaciones experimentales ampliadas en fases posteriores del proyecto.

## RESULTADOS

El desarrollo del exoesqueleto biomecánico permitió obtener un prototipo funcional de bajo costo, correspondiente a la Fase I del proyecto, orientado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo y al cierre básico de la mano mediante un mecanismo de agarre. Los resultados presentados derivan de una validación funcional preliminar de carácter exploratorio, coherente con los objetivos de diseño, control y funcionamiento definidos en la etapa conceptual. A continuación, se describen los principales hallazgos desde los enfoques estructural, electrónico, biomecánico y funcional, sin constituir una evaluación clínica concluyente.

### *Características físicas y estructurales del exoesqueleto*

El prototipo final fue fabricado mediante impresión 3D FDM utilizando material PLA, seleccionado por su bajo peso, resistencia mecánica y facilidad de manufactura. Las piezas se produjeron con un relleno del 40 % y una resolución de capa de 0.2 mm, logrando un equilibrio adecuado entre rigidez estructural y ligereza. El sistema se compone de tres módulos principales (brazo, antebrazo y mano), interconectados mediante uniones articuladas que permiten movimientos controlados y alineados con los planos fisiológicos, como se muestra en la Figura 13.

El dispositivo presentó un peso total de 1.4 kg, incluyendo actuadores y componentes electrónicos, lo que permitió un manejo adecuado durante las pruebas funcionales preliminares sin generar incomodidad significativa. Su diseño modular facilitó el mantenimiento, la sustitución de componentes y la adaptación a distintos usuarios, ajustándose mediante correas y soportes acolchados a estaturas entre 1.55 m y 1.85 m, con adecuada alineación anatómica. En pruebas de resistencia mecánica, el sistema soportó una carga estática de 25 N aplicada en el extremo distal del antebrazo sin deformaciones permanentes, en concordancia con los resultados obtenidos en las simulaciones por elementos finitos (FEA), lo que confirma su estabilidad estructural bajo condiciones simuladas de uso repetitivo.

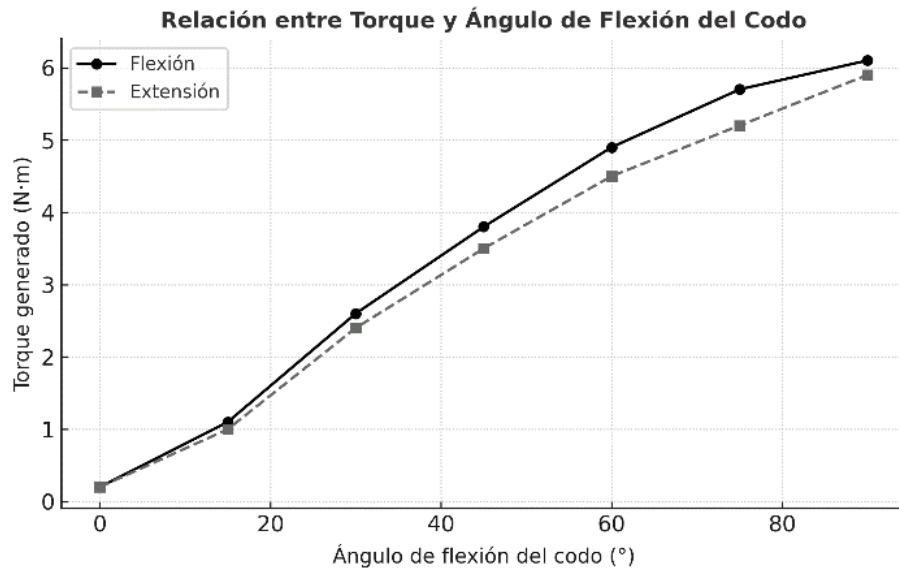
En las pruebas dinámicas, el exoesqueleto reprodujo de forma estable el movimiento de flexión–extensión del codo en un rango de 0° a 45°, acorde con el alcance definido para esta fase del proyecto. El módulo de la mano permitió movimientos básicos de apertura y cierre, sin evaluación funcional detallada de muñeca o falanges. Las mediciones angulares realizadas con goniómetro digital mostraron una precisión promedio de  $\pm 5^\circ$ , comparable con otros prototipos académicos de carácter exploratorio. El tiempo medio de respuesta para un ciclo completo de flexión–extensión fue de 0.4 s, con una variación inferior al 2 % entre ciclos consecutivos, evidenciando un comportamiento repetible y controlado.

El torque efectivo en la articulación del codo alcanzó 6.1 N·m, suficiente para movilizar el antebrazo



**FIGURA 13.** *Vista general del diseño estructurado del exoesqueleto biomecánico para brazo y mano.*  
*Fuente: Elaboración propia.*

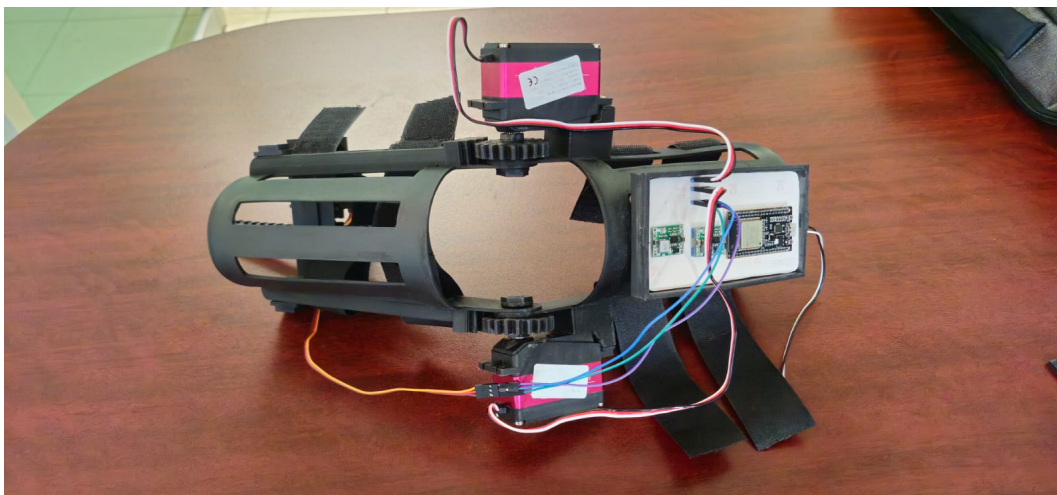
bajo condiciones simuladas de uso. El diseño mecánico de las palancas permitió una transmisión eficiente del esfuerzo generado por los actuadores, logrando una operación fluida y estable, como se muestra en la Figura 14.



**FIGURA 14.** Relación entre el torque generado y el ángulo de flexión del codo durante las pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia.

El control del exoesqueleto se implementó mediante un microcontrolador ESP32, responsable de la adquisición de señales de posición y del accionamiento de los actuadores mediante señales PWM. El sistema mantuvo una relación lineal entre el ángulo de referencia definido por el usuario y el desplazamiento del mecanismo, lo que permitió una ejecución controlada y repetible de los movimientos asistidos. Durante las pruebas funcionales preliminares se evaluó la estabilidad del control bajo distintas condiciones de carga y ángulo, operando a una frecuencia de actualización de 100 Hz, lo que garantizó una respuesta en tiempo real sin retardos apreciables. El consumo promedio de corriente fue de 0.8 A, con picos de hasta 1.2 A bajo carga, manteniendo la temperatura de los servomotores por debajo de 40°C, condición adecuada para una operación segura en sesiones continuas de prueba.

La comunicación inalámbrica mediante Bluetooth permitió la interacción con una aplicación móvil desarrollada en el entorno Arduino, utilizada para la visualización de ángulos, la activación de rutinas básicas y el ajuste de parámetros como velocidad y rango de operación. Adicionalmente, se incorporó una rutina de calibración inicial para ajustar los límites de movimiento de acuerdo con las dimensiones del usuario, con el fin de evitar sobreextensiones articulares durante las pruebas exploratorias, como se muestra en la Figura 15.



**FIGURA 15.** *Prototipo del exoesqueleto biomecánico durante las pruebas funcionales, mostrando la integración del sistema de control basado en ESP32. Fuente: Elaboración propia.*

Con el objetivo de obtener retroalimentación inicial sobre el ajuste físico y la interacción básica con el dispositivo, se realizaron pruebas exploratorias de uso con tres participantes adultos de diferentes tallas. Estas pruebas tuvieron un carácter no clínico y se orientaron exclusivamente a analizar aspectos relacionados con el ajuste anatómico, movilidad, peso percibido, estabilidad y facilidad de uso del prototipo durante sesiones controladas de corta duración.

La evaluación se llevó a cabo mediante un instrumento de percepción preliminar, diseñado específicamente para esta fase del proyecto, el cual permitió identificar tendencias generales y áreas de mejora del diseño, sin pretender establecer conclusiones generalizables.

Los participantes reportaron que el exoesqueleto presentó un ajuste adecuado al brazo y permitió su uso continuo durante aproximadamente 20 minutos sin generar incomodidad significativa. Asimismo, se destacó la facilidad para colocar y retirar el dispositivo, así como la sensación de movimientos asistidos suaves y controlados, tal como se resume en la Tabla 2. Debido al alcance exploratorio del estudio y al tamaño reducido de la muestra, se empleó una escala de percepción tipo Likert (1–5) únicamente con fines descriptivos (no médicos), destinada a apoyar la toma de decisiones de diseño en versiones futuras del prototipo, y no como un instrumento de validación ergonómica o clínica.

Durante esta fase preliminar, las pruebas de uso no constituyeron una evaluación clínica ni un estudio formal de usabilidad, sino que se emplearon como mecanismo de retroalimentación técnica para identificar áreas de mejora y orientar decisiones de diseño en etapas posteriores. Al comparar los resultados obtenidos con estudios previos de exoesqueletos de miembro superior reportados en la literatura, el prototipo alcanzó niveles de precisión angular y tiempo de respuesta comparables a sistemas

**Tabla 2.** Resultados de la percepción preliminar de uso del prototipo. Fuente: Elaboración propia.

| Criterio de evaluación                  | Valor promedio observado (1–5) |
|-----------------------------------------|--------------------------------|
| Ajuste anatómico                        | 4.6                            |
| Comodidad durante el uso                | 4.4                            |
| Facilidad de colocación                 | 4.2                            |
| Libertad de movimiento                  | 4.5                            |
| Peso percibido del dispositivo          | 4.0                            |
| Nivel de seguridad percibido            | 4.7                            |
| Percepción global del uso del prototipo | 4.5                            |

comerciales de referencia, dentro del contexto de una validación funcional preliminar. No obstante, el costo estimado de manufactura fue 49 % menor, lo que evidencia el potencial del uso de materiales accesibles, manufactura aditiva y plataformas de control de código abierto para el desarrollo de soluciones tecnológicas de bajo costo. Estos resultados respaldan el enfoque académico y experimental del estudio, demostrando la factibilidad técnica de implementar un exoesqueleto funcional con recursos limitados, sin pretender sustituir dispositivos clínicos certificados. En este sentido, el prototipo se perfila como plataforma viable para entornos educativos, de investigación e innovación tecnológica, así como base para futuras fases del proyecto que contemplen evaluaciones experimentales ampliadas y análisis clínicos formales. Finalmente, se presenta una síntesis de los resultados en las Tablas 3 y 4, con el propósito de facilitar la comparación del desempeño del prototipo frente a modelos de referencia.

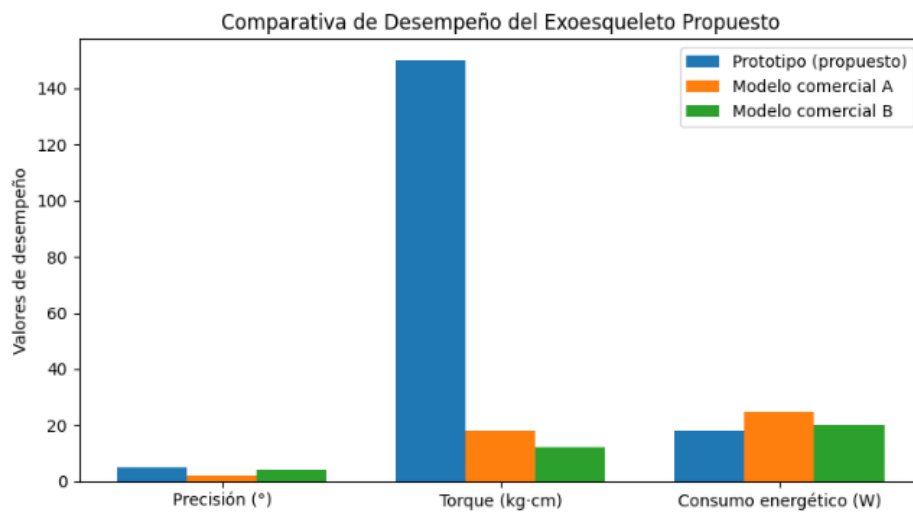
**Tabla 3.** Resumen de resultados comparativos de desempeño del exoesqueleto frente a modelos de referencia. Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro                    | Valor obtenido                     |
|------------------------------|------------------------------------|
| Rango de movimiento          | 0°–45° (codo)                      |
| Precisión angular            | $\pm 5^\circ$                      |
| Tiempo de respuesta          | 0.4 s                              |
| Consumo promedio             | 0.8 A                              |
| Peso total                   | 1.4 kg                             |
| Costo de fabricación         | 49 % menor que modelos comerciales |
| Percepción preliminar de uso | Favorable en la muestra evaluada   |

**Nota:** La precisión angular del prototipo se mantuvo en un error promedio de  $\pm 5^\circ$  tras la optimización del sistema de control, mejorando la estabilidad y repetibilidad del movimiento, como se muestra en la Figura 16. Los valores presentados en esta tabla corresponden a la versión base utilizada para la comparación con modelos comerciales.

**Tabla 4.** Comparación del exoesqueleto propuesto con modelos comerciales de referencia. Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro               | Prototipo (Propuesto) | Modelo comercial A | Modelo comercial B |
|-------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Precisión angular (°)   | $\pm 5$               | $\pm 2$            | $\pm 4$            |
| Tiempo de respuesta (s) | 0.4                   | 0.3                | 0.5                |
| Torque máximo (kg·cm)   | 150                   | 18                 | 12                 |
| Consumo energético (W)  | 18                    | 25                 | 20                 |
| Peso total (kg)         | 1.4                   | 1.2                | 1.8                |



**FIGURA 16.** Comparativa de desempeño del exoesqueleto propuesto frente a modelos de referencia comerciales. Fuente: Elaboración propia.

Durante la fase de validación funcional preliminar, el exoesqueleto fue sometido a pruebas exploratorias con usuarios voluntarios para observar su comportamiento dinámico, el ajuste físico general y su capacidad básica de asistencia en los movimientos de flexión y extensión del codo, conforme al alcance definido para esta etapa del proyecto. La Figura 17 presenta el prototipo final instalado en la extremidad superior de un usuario, destacando la disposición de los servomotores en la articulación del codo, el sistema de transmisión por engranajes y la estructura modular del antebrazo y la mano. La integración de estos elementos evidencia una adecuada articulación entre los componentes mecánicos y electrónicos, así como un diseño orientado a la estabilidad y al ajuste anatómico, apropiado para sesiones controladas de prueba sin interferir con los movimientos naturales del brazo.



**FIGURA 17.** *Prototipo final del exoesqueleto biomecánico instalado en la extremidad superior de un usuario. Fuente: Elaboración propia.*

## CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El presente trabajo permitió demostrar la viabilidad técnica de un prototipo biomecánico de bajo costo, correspondiente a la Fase I del proyecto, orientado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo y al cierre básico de la mano mediante un mecanismo de agarre. Los resultados obtenidos se derivan de una validación funcional preliminar de carácter exploratorio, coherente con los objetivos planteados y sin pretender constituir una evaluación clínica o ergonómica concluyente. Desde el punto de vista funcional, el prototipo fue capaz de reproducir el movimiento del codo con una precisión angular promedio de  $\pm 5^\circ$ , un tiempo de respuesta de 0.4 s y un consumo energético moderado, valores comparables con los reportados en otros prototipos académicos de rehabilitación robótica. Estos resultados confirman que la arquitectura mecánica y el sistema de control implementados son adecuados para pruebas exploratorias de asistencia al movimiento. Durante el desarrollo del proyecto se realizaron ajustes progresivos en los componentes mecánicos y de actuación, destacando la sustitución

de servomotores de bajo torque utilizados en la fase exploratoria inicial por un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm) en la articulación del codo. Esta decisión, fundamentada en los cálculos biomecánicos y las pruebas funcionales, permitió mejorar la estabilidad y la suavidad del movimiento asistido, manteniendo el enfoque de seguridad y control del sistema. Para el módulo de la mano se conservó un actuador de menor torque, acorde con los requerimientos funcionales de esta sección.

La estructura modular fabricada mediante impresión 3D facilitó la adaptación dimensional del dispositivo, el mantenimiento y la replicabilidad del diseño, reforzando su valor en entornos educativos y de investigación. Asimismo, el sistema de control basado en ESP32 mostró un comportamiento estable y predecible, permitiendo el ajuste básico de parámetros sin retardos apreciables durante la operación. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el enfoque académico y social del proyecto, evidenciando que el uso de tecnologías emergentes y de código abierto permite desarrollar prototipos funcionales de rehabilitación a bajo costo, con potencial de impacto en contextos con recursos limitados. No obstante, se reconoce que fases posteriores del proyecto deberán incorporar evaluaciones experimentales ampliadas, estudios clínicos controlados y la integración de nuevos grados de libertad, con el fin de avanzar hacia aplicaciones terapéuticas formales.

#### DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

**J. R. Gómez-Armenta:** Investigación, Supervisión, Administración del proyecto, Conceptualización, Escritura – revisión y edición. **A. Mares-Castro:** Supervisión, Validación, Metodología. **M. G. Moreno-Salcido:** Validación, Metodología, Investigación, Escritura – borrador original.

#### REFERENCIAS

- [1] I. Hussain, G. Salvietti, and D. Prattichizzo, “Review on upper-limb rehabilitation exoskeletons: Trends and challenges,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 145, p. 103856, 2021.
- [2] I. Díaz, J. J. Gil, and E. Sánchez, “Upper limb exoskeleton rehabilitation systems: Biomechanical alignment and interaction,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 62, p. 102112, 2020.
- [3] M. Miranda-Bañuelos *et al.*, “Desarrollo de dispositivos de rehabilitación centrados en el usuario,” *Acta Universitaria*, vol. 33, pp. 1–28, 2023.
- [4] A. Cardona, “Exoesqueletos de miembro superior basados en impresión 3D,” *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 42, no. 3, pp. 145–159, 2021.
- [5] F. Grandi, A. P. Karthikeyan, and E. Vaz, “Low-cost 3D-printed exoskeleton for post-stroke hand rehabilitation,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 19, no. 6, pp. 1207–1215, 2022. DOI: [10.14733/cadaps.2022.1207-1215](https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.1207-1215)

- [6] C. Răduică, “Low-cost robotic rehabilitation devices using open-source electronics,” *Machines*, vol. 12, no. 12, p. 889, 2024. DOI: [10.3390/machines12120889](https://doi.org/10.3390/machines12120889)
- [7] Festo, “ExoHand: Bionic Learning Network,” <https://www.festo.com>, 2022.
- [8] Leadshine, *Servo Motor Technical Catalog*, Leadshine Technology Co., Ltd., 2024.
- [9] Teknic, *Servo Motor Comparison Guide*, Teknic Inc., 2024.
- [10] DIYMall, *DS51150 150 kg·cm Servo Motor Specifications*, DIYMall, 2023.
- [11] Arduino, “Arduino Cloud Quick Guide V2,” <https://cloud.arduino.cc>, 2024.
- [12] S. Zaidi and M. Harris-Love, “A data-driven approach for biomechanical analysis in robotic rehabilitation,” *PeerJ*, vol. 11, no. 5, p. e16374, 2023. DOI: [10.7717/peerj.16374](https://doi.org/10.7717/peerj.16374)
- [13] M. Bonanno, G. Porciello, and A. Sorrentino, “Robot-aided motion analysis in neurorehabilitation: Objective motor assessment, biomechanics, and rehabilitation robotics,” *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e16202, 2023. DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e16202](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16202)
- [14] I. Aprile, A. Berardi, and A. Cruciani, “Rehabilitation robotics and allied digital technologies: Challenges and prospects,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 12, p. 1531067, 2025.
- [15] J. L. Hernández Arellano *et al.*, “Desarrollo de ortesis activas para rehabilitación del brazo,” *RMIB*, vol. 44, no. 1, 2022.
- [16] R. Villafuerte *et al.*, “Desarrollo de ortesis robóticas para movilidad reducida,” Dialnet, 10097435, 2023.
- [17] L. Hernández and M. Gutiérrez, “Anthropometric customization in robotic exoskeleton design,” *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 45–58, 2023. DOI: [10.1177/20556683231104558](https://doi.org/10.1177/20556683231104558)
- [18] T. Banyai, C. Brişan, and A. Tóth, “Standardization and safety in robotic-assisted physical therapy: A systematic review,” *Healthcare*, vol. 12, no. 17, p. 1720, 2024. DOI: [10.3390/healthcare12171720](https://doi.org/10.3390/healthcare12171720)
- [19] J. L. Díaz, R. Mendoza, and P. Ortega, “Application of technology readiness levels (TRL) to upper-limb rehabilitation robots,” *Machines*, vol. 14, no. 3, p. 48, 2025. DOI: [10.3390/machines14030048](https://doi.org/10.3390/machines14030048)
- [20] M. Mashud, M. Hasan, and M. Alam, “Adaptive control of rehabilitation exoskeletons: An overview,” *Actuators*, vol. 14, no. 3, p. 108, 2025. DOI: [10.3390/act14030108](https://doi.org/10.3390/act14030108)