

Mano robótica

Garduño Nadia, Loria Samantha, Cazarez Marco, Góngora Sergio, Rajón Leonardo
Universidad Modelo

Resumen— El proyecto busca desarrollar una mano robótica funcional y de bajo costo, que pueda realizar tareas de precisión, como micropipetear y manipular objetos ligeros de hasta 200 gramos. Impulsado por la creciente demanda de prótesis robóticas y avances tecnológicos, el diseño está basado en la impresión 3D y la integración de aparatos electrónicos para controlar los movimientos de manera eficiente y precisa. Se llevará a cabo en varias etapas, desde el análisis inicial hasta la exposición del prototipo final. Se enfrentan desafíos relacionados con la limitación de materiales y la capacidad de carga, pero se busca optimizar los recursos y lograr un diseño eficiente que cumpla los objetivos establecidos.

Índice de Términos—Impresión 3D, servomotores, mano robótica, micropipeteo.

I. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enfoca en el diseño y desarrollo de una mano robótica capaz de realizar tareas como el pipeteo y la manipulación de objetos ligeros. Utilizando servomotores para lograr movimientos precisos y un código de interruptores para el control, se busca crear un dispositivo que imite la funcionalidad de la mano humana y sea accesible en términos de costos y construcción.

El desarrollo de manos robóticas ha avanzado rápidamente, con un mercado en crecimiento y tecnologías más sofisticadas, como sensores hapticos y actuadores que imitan el movimiento muscular humano. Estas manos no solo mejoran la calidad de vida de personas con limitaciones físicas, sino que también se utilizan en la industria para realizar tareas repetitivas con alta precisión y eficiencia.

II. FASE I: PREPARACIÓN Y PLANEACIÓN

A. Antecedentes

Una mano robótica es una herramienta programada con tecnología, capaz de realizar tareas de manera automática. Se compone por una estructura flexible y adaptable, que le permite imitar ciertas capacidades humanas. También conocidos como brazos robóticos, estas máquinas son impulsadas por un motor que les permite ejecutar ciclos repetitivos de las labores para las que han sido programados durante un largo período de tiempo (Gavilán, 2022b).

La función de una mano robótica es articular, es decir, mover las articulaciones. Para ello, se vale de un sistema antagonístico impulsado por músculos, que utiliza la diferencia de presión en cada actuador para realizar el movimiento.

Las manos robóticas pueden tener diferentes funciones, como:

- Extender la mano puede funcionar como una extensión de la mano de una persona, proporcionando fuerza y agarre para manejar objetos de manera segura. Esto puede mejorar la calidad de vida y la autonomía de personas con limitaciones físicas (Gavilán, 2022b).

- Interactuar con humanos Permite controlar los movimientos con precisión debido a los microcontroladores integrados. Los 5 dedos actúan con movimientos independientes. Es ergonómica y permite integrar material estético con apariencia, flexibilidad y textura similar al de la piel (Gavilán, 2022b).

Además de las articulaciones flexibles y adaptativas, los brazos robóticos suelen incluir sensores, sistemas de visión, software y controladores de movimiento, lo que les da un mayor rango de movimiento y autonomía. Ya se están desarrollando algunas piezas con capacidades táctiles, como la “mano robótica” RoCycle, del MIT (destinado al sector del reciclaje).

Principalmente, los brazos robóticos en la industria se

utilizan para imitar y mejorar las capacidades del ser humano durante procedimientos de producción, ya que están diseñados para actuar de forma automática, y ejecutar grandes volúmenes de tareas repetitivas y mecánicas de gran precisión y de manera constante. Además, la capacidad de trabajar de forma independiente, o colaborativa con el equipo humano de la empresa o con otros robots.

Así, tres tipos de sensores utilizados en manos robóticas:

- Sensores multicontacto ('multitouch sensors '): es en el fondo, el caso de los sensores de presión que veíamos antes, sensores que detectan una fuerza a lo largo de un eje, típicamente perpendicular a la superficie de contacto.
- Sensores de tres ejes ('three-axis sensors '): detectan fuerzas tanto de presión como tangentes, pero de un solo contacto.
- Sensores de tres ejes multicontacto; que detectan fuerzas de presión y tangentes, pero multi-contacto. De este último tipo, el libro nos menciona la existencia de tres realizaciones: uSkin (mide la deformación de la superficie de silicona monitorizando cambios en los campos magnéticos de imanes ligados a esa silicona), Finger Vision (que usa una cámara para medir deformaciones en marcadores fijados a la superficie y que también actúa como sensor de proximidad puesto que usa silicona transparente) y GelSight

El proyecto toma como base el crecimiento del mercado global de prótesis robóticas, valorado en 1.2 mil millones de dólares en 2023, con un crecimiento anual del 9.2%. Estudios indican que el 70% de las prótesis robóticas incluyen sensores hápticos y que el 85% utilizan actuadores que imitan los movimientos musculares humanos. Este desarrollo busca contribuir al área mediante la creación de una mano robótica funcional y rentable, enfocada en tareas específicas como micropipeteo y manipular objetos ligeros.

B. Objetivos

Objetivo general: Diseñar y desarrollar una mano robótica rentable capaz de realizar tareas de micropipeteo y manipular objetos de hasta 200 gramos.

Objetivos específicos:

- Crear un diseño en Autodesk Fusion y fabricarlo mediante impresión 3D.
- Construir e implementar circuitos programables

para el control de los movimientos.

C. Idea del proyecto

El proyecto consiste en el diseño y desarrollo de una mano robótica de bajo costo, limitada al uso de materiales como PLA para impresión 3D y con capacidad de carga de 200 gramos. Está orientado a tareas básicas como micropipeteo y manipular objetos ligeros, descartando aplicaciones de alta complejidad o precisión extrema.

III. FASE II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

A. Diseño

El proceso de diseño abarca la creación de un modelo CAD mediante Autodesk Fusion y la fabricación del prototipo con impresión 3D. Además, se integraron servomotores para garantizar movimientos precisos.

Para el diseño de la mano robótica se estudió detenidamente la anatomía ósea, ligamentos y articulaciones de la mano humana. Este análisis fue clave para asegurar que la estructura robótica pudiera replicar el movimiento realista de los dedos considerando elementos como las falanges, los metacarplos y carpos.

Otro aspecto importante fue que se tomó como referencia las férulas de yeso 3D que gracias a su diseño se permitió la incorporación de los agujeros y vacíos en las piezas, especialmente en los carpianos superiores y carpos. Esta incorporación no solo ayudó a reducir el peso total de la mano robótica, sino que mejoró la flexibilidad y resistencia de la estructura facilitando un movimiento más natural y eficiente con los servomotores.

Para generar movimiento en la mano, se diseñaron redes de perforaciones que atraviesan los huesos de los dedos y los huesos carpianos superiores. Estas redes están conectadas por un cordel que, a su vez, se encuentra sujeto a servomotores, los cuales controlan el movimiento de la mano.

Para el dedo índice (ilustración 1-2) se tienen las medidas:

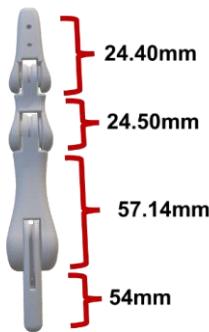


Ilustración 1 Dedo índice

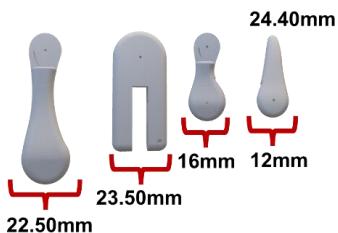


Ilustración 2 Partes del dedo

La palma de la mano robótica incorpora orificios que facilitan la unión de los demás dedos (Ilustración 3)

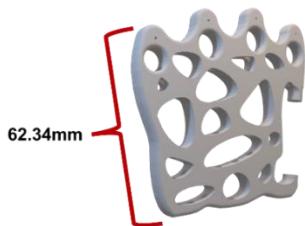


Ilustración 3 Palma de la mano

Por otro lado, se añadió una base rectangular con un orificio rectangular, que se incorporó para servir de soporte a la mano. El agujero tiene como función alojar los componentes electrónicos, en este caso, los servomotores (ilustración 4).

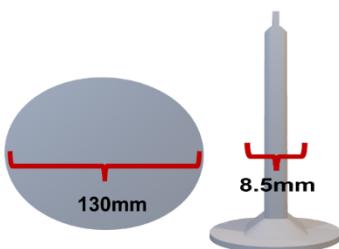


Ilustración 4 Base de la mano

El prototipo utiliza materiales como filamento PLA para impresión 3D, seleccionado por su facilidad de uso y bajo costo, lo que permitió economizar en la creación inicial. El filamento es el componente principal de la impresión 3D, proporcionando la estructura del diseño.

Para el control general de la mano, se integra un Arduino, mientras que los servomotores se encargan de mover los dedos con precisión, permitiendo su apertura y cierre. Además, se incluyen sensores que detectan la posición y la presión, facilitando la interacción eficiente de la mano con su entorno. La fuente de alimentación suministra la energía necesaria para todos los componentes, con baterías como fuente principal. Por último, los cables y conectores, como los jumpers, garantizan la unión y comunicación efectiva entre los elementos eléctricos.

El prototipo de la mano con las medidas finales de (ilustración 5):

- Largo mano: 10cm
- Ancho mano: 8.3cm
- Ancho mano con base de dedo: 10cm
- Base circular mano largo y ancho: 5.2cm



Ilustración 5 Diseño final

Para el desarrollo del código de programación para la mano robótica se siguió un enfoque iterativo, centrado en pruebas constantes y ajustes para garantizar la funcionalidad del código, puesto que permitió que los dedos de la mano robótica sean funcionales. Cada etapa se diseñó con el objetivo de optimizar el control de los servos.

La investigación preliminar tuvo un papel fundamental en esta etapa, como la revisión de recursos en línea, documentación oficial de Arduino, para comprender cómo implementar la librería Servo.h y configurar los pines analógicos y digitales.

Como primer paso, fueron declararon cinco objetos Servo, cada uno representando una articulación(dedo) de la mano robótica. También se definieron los pines del potenciómetro y del botón, junto con variables que permiten manejar la posición del servo, el estado del botón y la selección del servo que se va a controlar.

En la configuración inicial, se utiliza la función attach para conectar cada servo a un pin digital específico del Arduino. Además, el pin asignado al botón se configura como entrada con pinMode, lo que permite detectar si el botón está presionado o no.

En el bucle principal, el programa se inicia leyendo el valor del potenciómetro mediante analogRead, que genera un valor entre 0 y 1023. Este valor se mapea al rango de movimiento de los servos (0 a 180 grados), estableciendo así el ángulo deseado para el servo. Posteriormente, el estado del botón se lee con digitalRead. Si el botón está presionado, se incrementa la variable que selecciona cuál servo se controlará.

Cuando esta variable supera el número total de servos, se reinicia al primer servo, permitiendo un ciclo continuo de control.

El control de cada servo es gestionado con un bloque switch. Según el valor de la variable de selección, el programa mueve el servo correspondiente al ángulo definido por el potenciómetro utilizando el método write.

Esto permite ajustar el movimiento de cada servo de forma independiente. Para asegurar que los movimientos sean suaves y evitar sobrecargar el microcontrolador, se incluye un retardo de 15 milisegundos con la función delay.

El potenciómetro controla el ángulo de los servos, mientras que el botón cambia cuál servo está activo, lo cual asegura un control preciso y sencillo de la mano robótica, haciendo que cada movimiento sea fluido y controlado.

Una vez terminado el código de programación, se colocaron los componentes en un protoboard mediante cables jumper, favoreciendo un montaje rápido y adaptable durante las pruebas, en el que se utilizó una fuente de alimentación de 9 voltios para que logre alimentar adecuadamente cada uno de los componentes utilizados.

Para este instante, se consideró la posibilidad de integrar una pantalla táctil TLCD al proyecto, con el objetivo de ofrecer una interfaz más intuitiva que permitiera seleccionar diferentes casos a través de un sistema de switches y facilitar el control independiente de cada dedo.

Esta solución prometía mejorar la funcionalidad y la experiencia del usuario. Sin embargo, la complejidad técnica asociada a la implementación, que incluía el manejo de múltiples librerías específicas para su programación, junto con el tiempo limitado y el poco conocimiento en este ámbito, llevaron a descartar esta opción para centrarse en alternativas más viables dentro del plazo de tiempo establecido.

B. Protocolo de pruebas

Se llevaron a cabo pruebas de carga para verificar la capacidad de manipular objetos de hasta 200 gramos. También se evaluó la precisión en tareas de micropipeteo, así como la durabilidad de los materiales utilizados.

El prototipo (ilustración 6) muestra los componentes electrónicos utilizados para su elaboración.



Ilustración 6 Prototipo final

Se buscó optimizar la conectividad y el control de los componentes mediante la implementación de una placa de circuito impreso (PCB). Este proceso se realizó de forma casera, utilizando herramientas y software accesibles para crear un diseño personalizado. La PCB se diseñó en KiCad, un programa de diseño de circuitos de código abierto que permitió crear un esquema detallado y un trazado de circuitos preciso.

Para esto, se inició con la selección y prueba de los elementos electrónicos, como los servos, el

potenciómetro y el botón, asegurando su correcta integración y funcionamiento antes de la transición al circuito impreso definitivo. Uno de los retos fue garantizar una distribución eficiente de las conexiones y el manejo de la carga eléctrica, vital para mantener la precisión y la estabilidad del sistema durante su funcionamiento.

El montaje en protoboard, realizado previamente, sirvió como una herramienta esencial para probar la respuesta de los componentes al código de control y verificar que los movimientos de la mano robótica fueran suaves y precisos, lo que resultó fundamental para su uso en tareas de manipulación delicada.

El proceso incluyó la creación de un esquema de circuito que reflejaba la disposición y las conexiones necesarias, y se realizaron simulaciones para identificar posibles fallas o interferencias (ilustración 7).

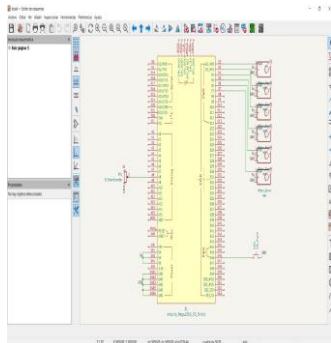


Ilustración 7 Diseño a una cara de la PCB

Estas simulaciones ayudaron a ajustar el diseño de la PCB permitiendo un trazado de circuitos optimizado que maximizaba la eficiencia y minimizaba el riesgo de errores durante la fabricación (ilustración 8).

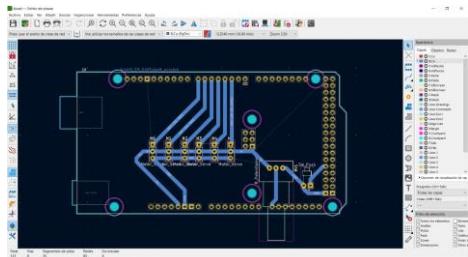


Ilustración 8 Diseño de la primera capa

Durante la transición a la PCB, se tuvieron en cuenta aspectos como el espacio de montaje, la disposición de los pines de conexión y la alineación de los servos con la estructura mecánica de la mano (ilustración 9).

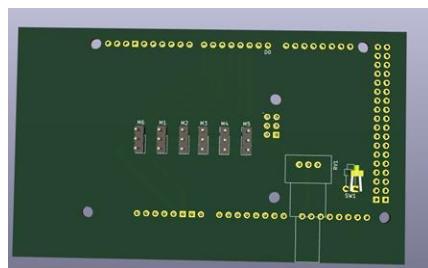


Ilustración 9 simulación 3D con los componentes

También se evaluaron los requisitos de potencia para asegurarse de que la fuente de alimentación pudiera soportar la carga de los componentes de forma continua y sin interrupciones.

Por último, al pasar de la prueba en protoboard a la implementación final en la PCB, se llevaron a cabo pruebas finales de funcionalidad y pruebas de resistencia para garantizar que la mano robótica cumpliera con las expectativas de rendimiento y durabilidad, haciendo que cada articulación respondiera con precisión y fluidez ante los comandos del sistema de control.

Ya para este punto se realizó el concurso previo al levantamiento de pesos y pruebas de micropipeteo. Se llevaron a cabo pruebas de peso en las que la mano debía sostener una caja en la que se iban agregando bolsitas de 50 g cada una. En un principio, la mano no logró mantener la caja, ya que los dedos no tenían un agarre lo suficientemente firme y no conseguían el cierre necesario. Además, al inclinar la mano, se produjeron desconexiones en los cables, lo que dificultó aún más el manejo de la mano robótica y puso de manifiesto la necesidad de mejorar la estabilidad y la conexión de los componentes.

Posteriormente, se procedió a la prueba de micropipeteo. En esta prueba, la mano demostró nuevamente deficiencias en la capacidad de agarre y la fuerza suficiente, especialmente en el pulgar, que es la parte que debe ejercer la mayor presión al manipular la micropipeta.

C. Análisis de resultados

Después del ensamblaje de las piezas del diseño 3D y conectar la programación al circuito, se analizaron los movimientos que la mano robótica realizaba al momento de ejecutar el código, se encontraron varios problemas técnicos y de diseño. Puesto que se concluyó que los servos mg90 no contaban con la fuerza necesaria para

realizar el movimiento, optando por usar unos de servos de 15kg.

Otro de los principales obstáculos fue el comportamiento anormal de los dedos al no simular de manera precisa un movimiento natural, esto se debía al uso de un solo potenciómetro para controlar todos los servos, lo que complicaba el ajuste independiente necesario para tareas precisas como el micropipeteo, esto se puede deber a que el sistema estaba controlado por un solo botón, puesto que no se utilizaban suficientes potenciómetros para regular cada dedo de manera independiente.

El uso de un solo potenciómetro, combinado con el botón, permitía cambiar de dedo al presionar el botón, pero nos percatamos de que complicaba el control preciso necesario para que la mano cumpliera con su objetivo principal: realizar tareas de micropipeteo.

Estos problemas requirieron una revisión y adaptación constante del proceso, incluyendo pruebas, ajustes en el código y la colaboración en equipo. Las soluciones adoptadas mejoraron la estabilidad y la precisión del sistema, permitiendo un control más controlado y efectivo de la mano robótica.

Además, el uso de varios jumpers generaba interferencias y ruido en el circuito, lo que se supuso que podría ser una de las razones por las que algunos de los dedos se movían de manera exagerada o incluso invertida.

También observamos que al conectar todos los componentes electrónicos a una sola fuente de energía de 5V (en este caso, el Arduino), no se generaba suficiente energía para que todos los componentes funcionaran de manera adecuada. Esto provocaba un desempeño inconsistente entre los diferentes componentes. Para solucionar este problema, se añadió una batería externa, lo que mejoró el suministro de energía y redujo este error.

Por otro lado, debido a las limitaciones de tiempo, la implementación de la PCB no se pudo completar antes de realizar el concurso de pruebas.

En las pruebas de peso, la mano robótica no pudo mantener adecuadamente la carga, ya que los dedos no lograban un agarre suficientemente firme. Esto subrayó la necesidad de optimizar los mecanismos de cierre y

estabilidad de los dedos para manejar mejor las cargas. Además, la inclinación de la mano resultó en desconexiones de los cables, resaltó la importancia de asegurar una conexión más robusta y confiable.

En la prueba de micropipeteo, se evidencia la necesidad de ajustar y reforzar la capacidad de presión y agarre de los dedos para lograr un control más preciso en tareas de manipulación delicada, buscando obtener un mejor control con el potenciómetro.

Aunque la prueba en protoboard ayudó a validar el funcionamiento inicial, la falta de tiempo para implementar la PCB impidió una optimización final de la mano robótica, dejando espacio para mejoras en el diseño de agarre y la estabilidad de las conexiones eléctricas.

IV. CONCLUSIONES.

El diseño en Autodesk Fusion y la fabricación mediante impresión 3D permitieron crear una estructura precisa y adaptada a los requerimientos de movimiento y carga. La integración de servomotores y control programable con Arduino garantizó una respuesta ágil de los dedos, y el uso de PLA ayudó a optimizar el balance entre flexibilidad y resistencia. Sin embargo, se enfrentaron limitaciones en materiales y carga, y se implementaron soluciones que mejoraron el rendimiento general.

El uso de un solo potenciómetro para controlar todos los servos dificultó el ajuste independiente necesario para tareas precisas como el micropipeteo. La falta de potenciómetros individuales y el control con un solo botón complicaron el manejo preciso, afectando el cumplimiento del objetivo de la mano. Las pruebas y ajustes constantes ayudaron a mejorar la estabilidad y precisión del sistema.

Se encontraron problemas como interferencias y ruido en el circuito debido al uso de múltiples jumpers, y la energía insuficiente de la fuente de 5V provocó un rendimiento inconsistente. La adición de una batería externa mejoró esto, pero la implementación de la PCB no se completó antes del concurso debido a limitaciones de tiempo. Las pruebas de peso revelaron que los dedos no mantenían un agarre firme, resaltando la necesidad de optimizar los mecanismos de cierre y la estabilidad de las conexiones.

La prueba de micropipeteo evidenció la necesidad de ajustar la presión y el agarre de los dedos para un control más preciso. Aunque la prueba en protoboard validó el funcionamiento inicial, la falta de tiempo para implementar la PCB dejó margen para mejorar el diseño y la estabilidad de la mano, lo que resultó en el incumplimiento de los objetivos planteados.

REFERENCIAS

- Castellini, C., et al. (2014). Advances in robotic prostheses. *Journal of Robotics Research*, 33(5), 456-470.
- Gavilán, I. G. (2022b). Manos robóticas: Machine learning y el sentido del tacto en los robots. Recuperado el 26 de septiembre de 2022, de <https://ignaciogavilan.com>.
- MarketsandMarkets. (2023). Global Robotic Prosthetics Market Report. Consultado en noviembre de 2023, de <https://www.marketsandmarkets.com>