



Diseño y fabricación de prótesis electrónica funcional para dedo índice

Melanie Sofía Sánchez Barbosa¹, Manuel Exiquio Barrera Suárez², Fatima Montserrat Castro Nuñez³, Seini Armando Ramos Durán⁴ and Emiliano Covarrubias Saldaña⁵

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Nuevo León, México

Abstract— The proposal is to make an electronic index finger prosthesis, which is not only considered an aesthetic prosthesis, but also has the quality of being a fully functional prosthesis, where the knowledge of the entire team regarding engineering is applied. The goal is to provide a real solution to amputations of the index finger. Different materials are used to carry out the project, starting with the structure where 3D printing with resin is used to give a better finish to the pieces and in order to improve the final aesthetics; To comply with the movement of the finger, servomotors are used, which are controlled by a Raspberry Pi pico development card, programmed with the Python programming language. The expected contribution of our project is the improvement in the design of finger prostheses, trying to improve its aesthetics and make it look more natural and less artificial, thus giving the user greater comfort and safety.

Resumen— La propuesta es realizar una prótesis electrónica de dedo índice, la cual no solo se considera una prótesis estética, sino que también tiene la cualidad de ser una prótesis completamente funcional, en donde se aplican los conocimientos de todo el equipo respecto a ingeniería. El objetivo es dar una solución real ante las amputaciones del dedo índice. Se usan diferentes materiales para realizar el proyecto, empezando con la estructura en donde se utiliza impresión 3D con resina para dar un mejor acabado a las piezas y con el fin de mejorar la estética final; para cumplir con el movimiento del dedo se utilizan servomotores, los cuales están controlados por una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi pico, programada con el lenguaje de programación Python. El aporte esperado de nuestro proyecto es la mejora en el diseño de las prótesis de dedo, tratando de mejorar la estética del mismo y que tenga un aspecto más natural y menos artificial, dándole así mayor comodidad y seguridad al usuario.

Keywords—Finger, prosthesis, servomotor, Raspberry Pi pico, Python, 3D printing.

I. INTRODUCCIÓN

La biomecánica es un área de estudio multidisciplinaria que involucra conocimientos tanto de mecánica como de biología. Dicho campo se encarga de analizar el comportamiento mecánico de los seres vivos, por ejemplo, la mecánica detrás de la estructura del brazo humano. Así como involucra varios ámbitos de la ciencia y la tecnología, también tiene muchas áreas de aplicación, como lo puede ser el estudio de estructuras para posteriormente imitarlas en las invenciones del ser humanos, así como sucede con las alas de los aviones; procesos de rehabilitación motriz, tanto en personas como animales; el desarrollo de prótesis, entre otros. Para esta investigación será de especial importancia la implementación de la biomecánica en el desarrollo de prótesis, desde su diseño conceptual, diseño a detalle, y finalmente su manufactura.

Existen prótesis de muchos tipos, las cuales se pueden clasificar en base a su función, método de manufactura, o el principio físico con el que funcionan. Ya sea que se hable de prótesis estéticas o mecánicamente funcionales, hechas con

molde o manufactura aditiva, mecánicas o electrónicas, alguna mezcla de estas características o una diferente no mencionada; todas tienen un objetivo común, brindar algún tipo de apoyo al paciente. El uso de prótesis puede ir desde fines meramente estéticos, recuperar la movilidad para funciones básicas, o apoyar en la ejecución de tareas complejas y muy demandantes para las cuales no cualquier tipo de prótesis será útil; dichos aspectos deben ser tomados en cuenta cuando se esté diseñando la prótesis.

A pesar de que un gran número de personas cuenta con alguna amputación y requiere de usar una prótesis, éstas no son tan accesibles como se quisiese, ya sea debido a la complejidad de su fabricación, o lo costoso que sean los materiales con que se fabrican. Por lo que una de las principales áreas de oportunidad en el diseño y manufactura de prótesis es reducir costos para hacerlas más accesibles para la población.

El objetivo de esta investigación es desarrollar una prótesis electrónica funcional para dedo índice, desde su diseño conceptual, hasta su diseño a detalle, y posteriormente la manufactura; así mismo, se busca que el diseño encuentre un equilibrio entre costos, funcionalidad, y el aspecto estético, de tal forma que se brinde una alternativa de solución para los tan costosas prótesis que se pueden encontrar en el mercado, sin olvidar el objetivo principal, que es facilitarle la vida al usuario.

A lo largo de este documento se presentarán diferentes secciones, un marco teórico a modo de contexto sobre el área en que se trabajará, el desarrollo de la propuesta de diseño, incluyendo la parte mecánica y la parte electrónica donde se planea usar la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi pico junto con programación con Python, así como el control que estas conllevan para su adecuado funcionamiento, para finalmente llegar a su manufactura, en donde se planea usar manufactura aditiva con resina, y probar de funcionamiento.

II. HIPÓTESIS

Aplicando los conocimientos de ingeniería electrónica, diseño, mecánica, y biología, empleando herramientas como impresión 3D en resina, programación en Python, y la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi pico, se podrá desarrollar una prótesis de dedo índice, equilibrada entre apariencia y funcionalidad, que resuelva problemas de amputaciones, beneficiando en apariencia y movilidad al usuario.

III. PROPUESTA

Con la realización de este proyecto se pretenden diversos objetivos, uno de ellos es el de poder aplicar los diversos conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra formación como ingenieros; el otro punto que se plantea es el de poder elaborar una prótesis de dedo. Por lo que se pretende realizar una prótesis de dedo como producto final, esto nos servirá para poder contribuir a la vida de una personas que ha perdido la extremidad ya mencionada, que si bien, podría parecer que es sin tanta relevancia, es importante recalcar el cómo es que al perder alguna parte del cuerpo, los procesos tanto físicos como mentales son fuertes y un tanto difícil de superar, por lo que esperamos que la prótesis le ayude a alguien para poder seguir teniendo una vida normal y poder seguir con sus diversas acciones diarias. Pretendemos que la prótesis sea con un movimiento principalmente electrónico, que el circuito utilice un microcontrolador Raspberry Pi Pico, siendo programado en Python y que está sea realizada empleando impresión 3D con resina y no con filamentos.

IV. OBJETIVOS

a. *Objetivo general*

Se busca realizar una prótesis de dedo índice la cual pueda cumplir con los movimientos de un dedo real y así sustituir artificialmente este dedo debido a la falta de este. Se propone utilizar un sistema electrónico para tener una buena precisión y se quiere lograr que la prótesis sea lo más estética posible, por lo que la realizaremos con impresión en resina, así tendremos un acabado más realista. El objetivo es hacer una prótesis sencilla, la cual sea fácil de llegar y no requiera de mucho esfuerzo para su uso, además también se busca que sea un proyecto económico, debido al presupuesto que se tiene. El tiempo que empleará para realizar esta prótesis es de dos meses, es decir, todo el mes de octubre y el mes de noviembre.

b. *Objetivos específicos*

- Estudiar y analizar la información sobre los movimientos de un dedo índice
- Seleccionar el tipo de prótesis que se realizará, así como el método de manufactura y el mecanismo a utilizar.
- Medir la longitud de cada articulación del dedo, así como también los ángulos permitidos en su movimiento.
- Proponer un diseño mecánico de la prótesis y optimizarlo.
- Diseñar un circuito electrónico y realizar la programación que permitan el manejo de la prótesis.
- Economizar el diseño.
- Simular y después implementar el proyecto en físico.
- Hacer pruebas y corregir errores.
- Adaptar la prótesis a una mano real.
- Mejorar la estética de la prótesis y mejorar su uso.

V. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

A lo largo de los siglos, los conceptos de la biomecánica se han entendido como la ciencia del estudio de las fuerzas y de los efectos de su aplicación sobre el cuerpo humano, mismos que han evolucionado. En gran parte, este evolución se ha producido gracias a la mejora de nuestros conocimientos sobre el cuerpo humano, en relación con el cual se ha establecido un sistema de referencia anatómico donde se dibujan planos y ejes: ello ha hecho posible la descripción estandarizada de los movimientos de las articulaciones del cuerpo [1].

Ficat (1987) afirma: una concepción abstracta y exclusivamente matemática de la biomecánica solo puede alcanzar un valor aproximado y orientativo, porque está muy alejada de la realidad biológica. La biomecánica agrupa diversos aspectos, como lo es la mecánica de los huesos y de los músculos, pero también la mecánica de los líquidos (sangre, linfa, líquido cefalorraquídeo, etc.) y de los gases (mecánica ventilatoria).

La biomecánica comprende varias disciplinas, cada una de ellas con sus áreas de estudio. Definir estas áreas con claridad permite diferenciar los campos para los métodos de análisis específicos, en las referencias espaciotemporales que conviene precisar y según las hipótesis formuladas. Una de estas disciplinas es la estática, que es el estudio de un cuerpo en estado de reposo y en equilibrio estático, según la primera ley de Newton; se centra en el estudio de fuerzas de momentos que permiten mantener un sistema en estado de equilibrio estático. Otra de las disciplinas que abarca es la dinámica, la cual se centra en la relación entre las fuerzas y el movimiento que producen, referido a la segunda ley de Newton [2].

Entre la importancia de la biomecánica, se tiene como objetivo la caracterización y mejora de técnicas de movimientos, a partir de conocimientos científicos, además de la obtención de una amplia base de datos con información acerca del movimiento humano. También es necesario aumentar los grupos de estudio y así ampliar nuestra base de referencia, simultáneamente al desarrollo de técnicas y procedimientos y los avances tecnológicos y de instrumentación presentes en la biomecánica. La capacidad de mejorar las interpretaciones estadísticas de los modelos biomecánicos depende, en primer lugar, de la obtención de los parámetros y variables del movimiento de esta amplia base de datos, que se debe re-



copilar a través de estudios experimentales y demás registros a partir de las pruebas en biomecánica. A pesar de ser una disciplina relativamente nueva, la biomecánica, por la importancia que tiene, por su utilidad práctica (no solo para el deporte de rendimiento, apoyo en personas con alguna discapacidad o que carecen de alguna extremidad, problemas con la espina dorsal y la vida cotidiana de los practicantes de actividades físicas, solo por mencionar algunos ejemplos) y por su evolución, necesita de algunos ajustes y de un mejor abordaje sobre su contenido para que esta visión (que en muchos casos no es la correcta) sea modificada su importancia reconocida. "Nuevos caminos en la búsqueda de soluciones tecnológicas que concilien la seguridad y la optimización del desempeño se hacen necesarios y deben hacerse en un futuro cercano" [3].

El uso de las primeras prótesis de miembro superior nos conduce a la antigua cultura egipcia, en el año 2000 a.C., donde arqueólogos encontraron una momia egipcia, con una prótesis de mano que estaba sujeta al antebrazo. Durante la segunda guerra Púnica (218-202 a. C.) se fabricó una prótesis de mano para el general romano Marcus Sergius, esta prótesis estaba fabricada de hierro, la misma que tenía como finalidad portar objetos pesados. Ya para el siglo XIX, se comienza a utilizar una variedad de materiales como el cuero, polímeros naturales, hierro, resortes y la madera, en la fabricación de prótesis de mano estéticas, así como también el desarrollo de nuevos mecanismos que faciliten los movimientos de los dedos en relación con nuevos elementos de transmisión, que permitirían la sujeción [4].

Existen diferentes tipos de prótesis para dedo y/o mano, donde dependiendo de las preferencias del paciente, lo que requiera, y lo recomendado por los especialistas, las características de dichas prótesis pueden cambiar. De acuerdo con [5] existen 5 opciones de prótesis parciales para mano, éstas son: prótesis pasivas, prótesis impulsadas por el cuerpo, prótesis eléctricas, prótesis de actividad específica, y prótesis híbridas. A continuación, en base al mismo autor, se detallará más sobre cada una de éstas.

Las prótesis pasivas ayudan a mejorar la funcionalidad en la vida cotidiana pero no cuentan con la habilidad activa de sujetar y liberar. Las opciones pasivas abarcan réplicas estéticas de dedos, articulaciones de dedo multifuncionales, e incluso dedos de titanio con flexión en ambas articulaciones, con el tope "natural" para brindar una mejora funcional. Para amputaciones de pulgar, existen pulgares de uso rudo y de uso medio, que pueden ser asegurados en cierta posición para un agarre seguro. Dependiendo de la preferencia personal, una prótesis pasiva parcial de mano puede ser terminada en una amplia variedad de formas, desde diseños coloridos y contemporáneos, hasta piel de silicona con apariencia similar a la real y buscando empatar el color de piel del paciente.

Existen 3 tipos de prótesis impulsadas por el cuerpo, para amputaciones parciales de mano: conducidas por articulaciones, controlada por cables, y conducidas por muñeca. Este tipo de prótesis puede ser muy duraderas y generalmente tienen una apariencia de ser de tecnología de punta. Uno de sus grandes beneficios de funcionalidad es que la fuerza ejercida por la prótesis es directamente controlada usando la muñeca del paciente, o la porción restante de su mano, lo cual hace el movimiento y control sentirse mucho más natural.

Las prótesis eléctricas contienen pequeños motores den-

tro de cada uno de los dedos para generar el movimiento. Son controladas usando electrodos o resistores que detectan el movimiento de los músculos en la porción restante de la mano o muñeca. La cantidad de fuerza que los dedos eléctricos ejercen es variable y controlada por el usuario para así asegurar que la fuerza de sujeción aplicada es la adecuada para cada situación. Así como con las prótesis pasivas, guantes estéticos están disponibles en muchas presentaciones que de igual forma pueden ser fabricados para empatar el color de piel del paciente.

Las prótesis de actividad específica son diseñadas para trabajo, deportes y hobbies donde una prótesis pasiva o de propósito general podría ser dañada o no trabajaría como se requiera. Mientras que las prótesis de actividad específica están diseñadas para brindar la mejor funcionalidad en actividades pesadas, como lo pueden ser halterofilia, ciclismo de montaña, incluso carpintería.

Las prótesis híbridas combinan elementos de dos o más de las opciones de prótesis vistas, con el objetivo de mejorar las habilidades funcionales del paciente. Dado que cada paciente es un caso diferente, busca y necesita algo único, una solución híbrida puede considerarse que asegura que el paciente tendrá las herramientas necesarias para recuperar su funcionalidad.

VI. METODOLOGÍA

Primero se necesita obtener información sobre los movimientos de un dedo, al igual que realizar investigaciones sobre tipos de mecanismos, tipos de prótesis y tipos de manufactura para las prótesis de mano, después se debe de seleccionar el tipo de prótesis que se realizará, al igual que el mecanismo y la manufactura que se implementarán para nuestro proyecto, tomando en cuenta el alcance y el tiempo disponible. Se debe de proponer un diseño mecánico para la prótesis y para esto es necesario hacer mediciones reales de un dedo índice, realizar una simulación de su funcionamiento y después realizar la optimización topológica necesaria; teniendo listo el diseño, podemos imprimir la pieza en impresión de resina. Cuando lleguemos a este punto podemos comenzar a implementar el mecanismo físico que usaremos y a preparar el sistema electrónico que controlara a la prótesis. Se hace la programación necesaria para hacer el control correcto de la prótesis y que esta cumpla con los movimientos necesarios para el dedo. Se hacen pruebas y se corrigen errores y se prepara la versión final del proyecto, cuidando los detalles físicos de la estética del dedo.

VII. EQUIPOS E INFRAESTRUCTURA

Para la elaboración de este proyecto se usará como controlador un Raspberry pi pico. La Raspberry Pi Pico es una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador RP2040. Esta tarjeta ha sido diseñada para ser una plataforma de desarrollo muy flexible y de bajo costo. El RP2040 es un chip diseñado por Raspberry Pi que cuenta con dos núcleos ARM CortexM0+ que trabajan a 133 MHz, memoria Flash de 2 MB y con memoria RAM de 264 KB. También se necesitará hacer uso de servomotores los cuales serán los ángulos de libertad de este proyecto. Un servomotor es un actuador rotativo o motor que permite un control preciso en términos de

posición angular, aceleración y velocidad, capacidades que un motor normal no tiene. En definitiva, utiliza un motor normal y lo combina con un sensor para la retroalimentación de posición. Pero, los servomotores no son en realidad una clase específica de motor, sino una combinación de piezas específicas, que incluyen un motor de corriente continua o alterna, y son adecuados para su uso en un sistema de control de bucle cerrado. Por lo que una definición más exacta de un servomotor sería la de un servomecanismo de bucle cerrado que utiliza la retroalimentación de posición para controlar su velocidad de rotación y posición. La señal de control es la entrada, ya sea analógica o digital, que representa el comando de posición final para el eje. Por último, se requiere el uso de impresión 3D para fabricar las partes de nuestra prótesis de dedo, diseñadas por nosotros con el fin de generar un movimiento realista y dinámico a la hora de ejecutar o encender nuestro dispositivo. En cuanto a software, se hará uso del lenguaje Python, ya sea con el IDE de Visual Studio Code o de Spyder.

VIII. PROGRAMACIÓN

Para el control del movimiento de la prótesis se tomó la decisión de emplear servomotores, cuya posición fuera controlada por potenciómetros. Como tarjeta de desarrollo se eligió el *Raspberry Pi Pico*, y como lenguaje de programación se utilizó *Micropython* el cual es una versión del lenguaje de programación *Python* pero enfocado a microcontroladores. A continuación, se anexa el código utilizado.

```
from machine import Pin, PWM, ADC
import utime

pot1 = ADC(Pin(28))
pot2 = ADC(Pin(27))

servo1 = PWM(Pin(0))
servo2 = PWM(Pin(1))

servo1.freq(50)
servo2.freq(50)

while True:
    value1=int(1350+(pot1.read_u16()/9.57))
    servo1.duty_u16(value1)
    utime.sleep(0.02)

    value2=int(1350+(pot2.read_u16()/9.57))
    servo2.duty_u16(value2)
    utime.sleep(0.02)
```

IX. CAD

El enfoque de diseño del equipo para la elaboración de la prótesis fue que ésta asemejara la geometría del dedo humano, así como en algunos casos los diseños buscan optimizar topológicamente la estructura de tal forma que se aproveche de mejor manera el material que se va a emplear, en este caso el diseño buscaba que fuera similar a la apariencia de un dedo humano.

Como referencia de partida se utilizó de muestra el dedo

de uno de los integrantes del equipo, a partir de ello se realizaron mediciones, para pasar a un diseño conceptual, y posteriormente a un diseño a detalle. Para el diseño a detalle se utilizó el software *Solidworks*. En la fig. 1 se muestran las piezas diseñadas en el software CAD, así mismo, en la

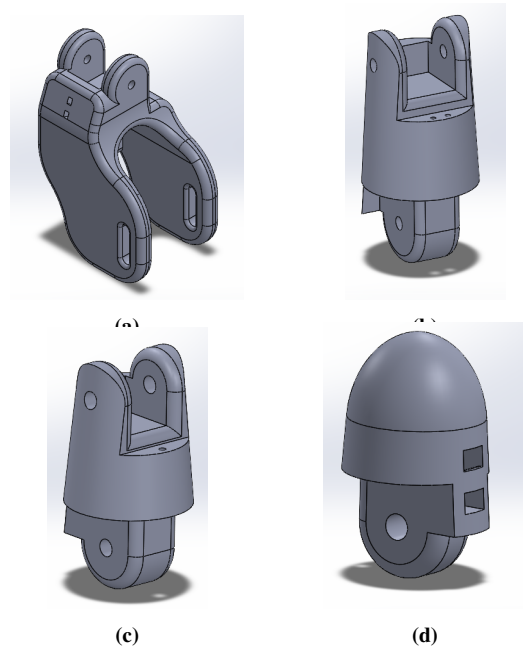


Fig. 1: Piezas diseñadas en Solidworks.

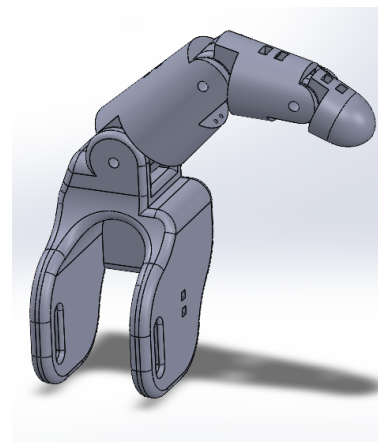


Fig. 2: Ensamble propuesto.

X. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación de la prótesis cada una de las piezas se mandó a manufacturar haciendo uso de la manufactura aditiva, seleccionando como material de impresión de resina en lugar de filamento, esto debido a su mayor resistencia, y mejor acabado estético. Para la unión de cada uno de los eslabones se empleó un alambre de 3 mm de diámetro, sedal para simular los ligamentos que generan el movimiento, y un elástico entre las articulaciones, para que estas puedan regresar a su máxima extensión una vez que el servomotor ya no esté ejerciendo ninguna tensión sobre el sedal.

Cabe señalar que algunos elementos del diseño, debido a las dimensiones, estaban fuera de la resolución de la impresora 3D, por lo que fue necesario realizar algunos detalles empleando herramientas manuales. En la fig. 3 se muestra el

resultado de la implementación.

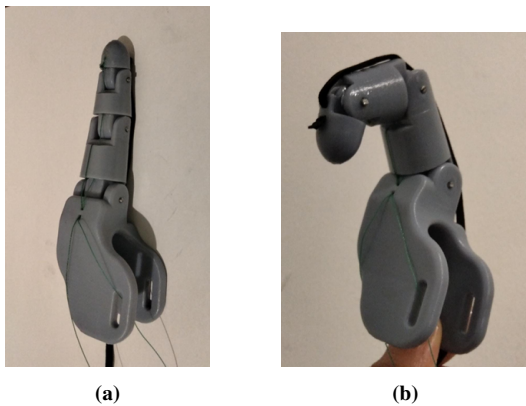


Fig. 3: Prótesis implementada.

XI. CONCLUSIONES

Se cumplió la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, ya que se logró desarrollar la prótesis con una apariencia similar al dedo humano, más económica que las prótesis generales, y de una buena resistencia mecánica gracias a los materiales utilizados. Fue de gran aprendizaje y muy interesante trabajar en el desarrollo de una prótesis de dedo, desde la investigación de antecedentes sobre la fabricación de prótesis, estudiar la anatomía del dedo humano, generar propuestas, hasta involucrar conocimientos de electrónica y de programación. Aprender sobre la metodología de diseño, buscar soluciones a los inconvenientes generados en el proceso. Además, fue una excelente aplicación de la biomecánica, pues se estudió tanto la parte de biología al investigar sobre la anatomía del dedo, así como la parte mecánica al aplicar competencias de diseño asistido por computadora, así como en procesos de manufactura, el análisis de propiedades de materiales, y el uso de herramientas para acabados más detallados.

REFERENCES

- [1] F. D. P.Balthazard, D. Currat, "Emc - kinesiterapia," *Medicina Física*, vol. 36, Noviembre 2015, accesado 18.08.2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1293296515741423>
- [2] M. Dufour and M. Pillu, "Biomecánica funcional. miembros, cabeza, tronco," *Elsevier*, 2018, accesado 18.08.2022. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=C9zQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=biomecanica&ots=Wl2kGV7FkU&sig=US5oqD407OwT4OsrVT1sLenFkec#v=onepage&q&f=false>
- [3] M. C. Amadio, Alberto C.; Duarte, "Fundamentos biomecánicos para análisis de movimiento," *Laboratório de Biomecânica da USP*, 1996, accesado.
- [4] M. Q. . J. C. J. Brito, "Diseño, construcción e implementación de una prótesis biomecánica de mano derecha," *Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*, 2013, accesado 29.08.2022. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13709/1/UPS-CT002743.pdf>
- [5] ArmDynamics, "Finger and partial hand prosthetic options," *ArmDynamics*, 2022, accesado 29.08.2022. [Online]. Available: <https://www.armdynamics.com/our-care/finger-and-partial-hand-prosthetic-options>