



Exoesqueleto rehabilitador del dedo índice

Rehabilitative exoskeleton of the index finger

Exoesqueleto reabilitador do dedo indicador

Eduardo Harry Medina-Quintero ^{II}
eduardo.medina@epoch.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0001-5336-4164>

Sócrates Miguel Aquino-Arroba ^{II}
socrates.aquino@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6393-9408>

Geovanny Guillermo Novillo-Andrade ^{III}
gnovillo@epoch.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0002-7761-5359>

Edwin Rodolfo Pozo-Safla ^{IV}
edwin.pozo@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Luis Santiago Choto-Chariguaman ^V
Luis.choto@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0655-2503>

Correspondencia: eduardo.medina@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Revisión

***Recibido:** 30 de enero de 2022 ***Aceptado:** 15 de febrero de 2022 * **Publicado:** 30 marzo de 2022

- I. Ingeniero Automotriz, Técnico de Investigación del IDI de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño, Producción y Automatización Industrial, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica - Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo, Ecuador.
- III. Master en Ciencias Mención Diseño Mecánico, Magister en Formulación Evaluación y Gestión de Proyectos Sociales y Productivos, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- IV. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño, Producción y Automatización Industrial Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo, Ecuador.
- V. Ingeniero Automotriz, Master en Manufactura y Diseño Asistidos por Computador, Investigador Particular, Universidad de las Fuerzas Armadas, Chimborazo, Ecuador.

Resumen

En la actualidad el Diseño Mecánico en conjunto con la robótica han surgido como herramientas con grandes aplicaciones, en diferentes técnicas en las que se utilizan como elementos de apoyo en procesos de rehabilitación de partes inferiores del cuerpo humano como las manos, según reportes encontrados en la historia de la rehabilitación. En el presente trabajo se propone diseñar, analizar y construir un prototipo de exoesqueleto como un elemento en la asistencia del proceso de rehabilitación del dedo índice del ser humano. La mano en muchos diagnósticos médicos se ve afectada por varias patologías o lesiones, lo que conlleva a una terapia física del paciente por falta de movilidad del dedo, por medio de la fisioterapia y rehabilitación con la utilización de equipos biomecánicos, el paciente puede recuperar la motricidad integral de los dedos de la mano.

En cumplimiento a las especificaciones planteadas y evaluaciones sobre la efectividad y compatibilidad del diseño en relación con la lesión, se diseñó y construyó una órtesis, que es un mecanismo de eslabones, como prototipo de rehabilitador que le permita al paciente realizar movimientos naturales de flexo extensión de los dedos.

Como resultado se desarrolló un mecanismo como elemento en el apoyo de rehabilitaciones de fisioterapia en el dedo índice de la mano, el dispositivo permitirá la flexión y extensión con un ángulo adecuado para cada falange. Además, este se puede adaptar a diferentes tamaños de las falanges de la mano humana con sus respectivas modificaciones dimensionales, debido a que el dedo meñique, anular, medio e índice se comportan de la misma manera.

Palabras Clave: Biomecánica; Diseño exoesqueleto; Mecanismos; Motricidad; Rehabilitador.

Abstract

At present, Mechanical Design in conjunction with robotics has emerged as a tool with great applications, in different techniques in which it is used as a support element in the rehabilitation of lower parts according to reports found in the history of rehabilitation. In the present work it is proposed to design, analyze and build a prototype of exoskeleton as an element in the assistance of the rehabilitation process of the human index finger. The hand in many medical diagnoses is affected by various pathologies or injuries.

Which leads to physical therapy of the patient due to lack of finger mobility, through physiotherapy and rehabilitation with the use of biomechanical equipment, the patient can recover the integral motor skills of the fingers of the hand.

Compliance with the proposed specifications and evaluations on the effectiveness and compatibility of the design in relation to the injury, a prototype of a rehabilitator was built, the orthosis mechanism allowing the natural flexion-extension movement of the fingers through the link mechanism.

The result of a work in which a mechanism was developed as an element in the support of physiotherapy rehabilitations in the index finger of the hand, the device will allow flexion and extension with an appropriate angle for each phalanx. In addition, it can be adapted to different sizes of the phalanges of the human hand with their respective dimensional modifications. Because the little, ring, middle and index fingers behave in the same way.

Keywords: Biomechanics; Exoskeleton design; Mechanisms; Motor skills; Rehabilitation.

Resumo

Atualmente, o Desenho Mecânico juntamente com a robótica têm surgido como ferramentas com grandes aplicações, em diferentes técnicas nas quais são utilizados como elementos de apoio em processos de reabilitação de partes inferiores do corpo humano como as mãos, conforme relatos encontrados na história da reabilitação. No presente trabalho propõe-se projetar, analisar e construir um protótipo de exoesqueleto como elemento no auxílio do processo de reabilitação do dedo indicador do ser humano. A mão em muitos diagnósticos médicos é acometida por diversas patologias ou lesões, o que leva a fisioterapia do paciente devido à falta de mobilidade do dedo, através da fisioterapia e reabilitação com uso de equipamentos biomecânicos, o paciente pode recuperar as habilidades motoras abrangentes dos dedos.

Atendendo às especificações propostas e às avaliações da eficácia e compatibilidade do desenho em relação à lesão, foi projetada e construída uma órtese, que é um mecanismo de ligação, como protótipo de um rehabilitador que permite ao paciente realizar movimentos naturais de flexoextensão dos dedos

Como resultado, foi desenvolvido um mecanismo como elemento de apoio nas reabilitações fisioterapêuticas no dedo indicador da mão, o aparelho permitirá flexão e extensão com angulação adequada para cada falange. Além disso, pode ser adaptado a diferentes tamanhos das falanges da mão humana com suas respectivas modificações dimensionais, pois o dedo mínimo, o dedo anelar, o dedo médio e o dedo indicador se comportam da mesma forma.

Palavras-chave: Biomecânica; Projeto de exoesqueleto; Mecanismos; Motricidade; Rehabilitador.

Introducción

Las lesiones más comunes de las personas se presentan en las articulaciones superiores, como es el caso de las manos, donde son los dedos los más afectados, por ser el primer apoyo cuando se sufre un tropiezo o resbalón, lo que conlleva a una terapia física del paciente por falta de movilidad del dedo, un tratamiento repetitivo consiste en generar movimientos leves en cada una de las falanges del dedo, un tratamiento por medio de un fisioterapeuta genera una alta demanda de tiempo para el paciente.

Temiendo en cuenta la problemática del tiempo que debe dar el paciente para ir a un terapeuta, este rehabilitador constituye una alternativa para que el paciente pueda realizar parte su rehabilitación sin acudir a un terapeuta.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un exoesqueleto para la recuperación pronta del dedo de la mano, que genere de acuerdo con la rutina de recuperación movimientos repetitivos, con bajo costo de fabricación y fácil de portar.

El artículo presenta en la sección II la información más importante sobre exoesqueleto para miembros superiores. En la sección III se presenta el diseño e implementación del prototipo, en la sección IV los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al mecanismo y finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

Materiales y Métodos

Marco Teórico

Estado del arte

Los dedos de la mano pueden verse afectados por enfermedades patológicas o lesiones en el sistema nervioso periférico. Rehabilitación y fisioterapia son fundamentales para recuperar la motricidad y sensibilidad integral del dedo de la mano, en correspondencia al tipo de afección en tratamiento [1]. La rehabilitación asistida por órtesis mecánicas permite recuperar la funcionalidad de un miembro lesionado y evita la degeneración del aparato motriz de la mano [2]. El objetivo de este trabajo es diseñar y construir una órtesis para rehabilitación del dedo índice de la mano.

El proyecto podría servir para que los centros de fisioterapia y rehabilitación física reduzcan costos operativos mediante el uso de dispositivos automatizados de bajo costo.

Biomecánica de la mano

En el diseño de un exoesqueleto aplicado en miembros superiores como es los de dedos de la mano es necesario tener bien en cuenta la anatomía y patrones funcionales de la mano, que permitan

extraer un modelo matemático [3]. El esqueleto de la mano se compone de 27 huesos divididos en tres grupos: el carpio, los metacarpianos y las falanges; este conjunto de huesos adoptan una forma de arco. La recuperación del arco de los dedos por motivo de fractura se prioriza como objetivo. [4]

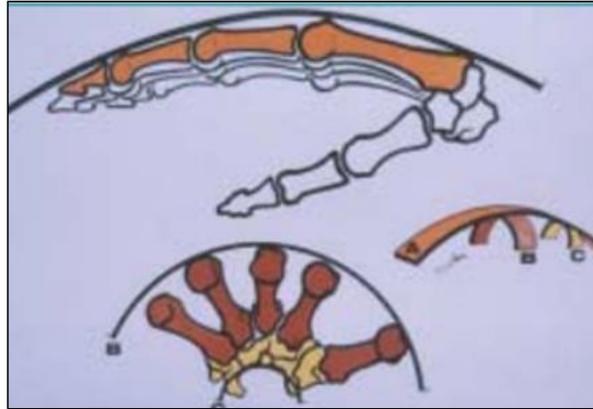


Figura 1. Arco de la mano

El movimiento del dedo índice se mide en términos de grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión, la hiperextensión esta medida con un ángulo negativo, entonces el rango total de movimiento de cada uno de los dedos se determina restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión. La abducción y la aducción se miden a partir de la línea axial de la mano, donde los dedos se separan en arcos de aproximadamente de 20° , mientras que la aducción se junta y se tocan entre sí [5].

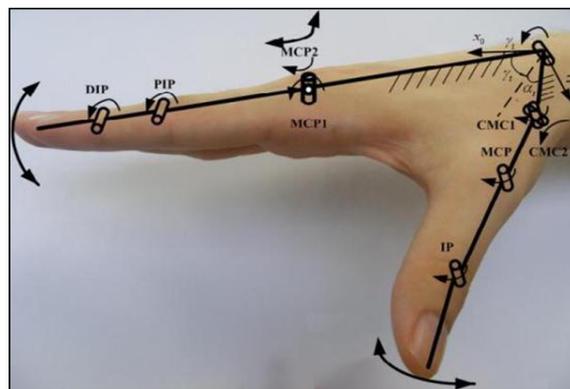


Figura 2. Grados de libertad y equivalencia mecánica

Para el estudio y diseño del prototipo de recuperación de dedo, se toma en cuenta los grados de libertad del dedo índice, donde se puede modelar con un mecanismo de un grado de libertad, permitiendo el movimiento de flexión y extensión.

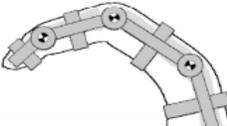
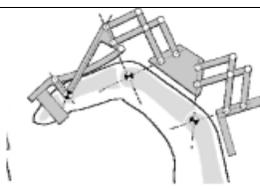
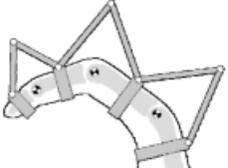
Rehabilitación del dedo índice

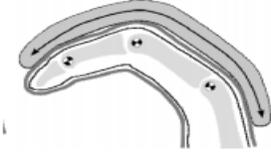
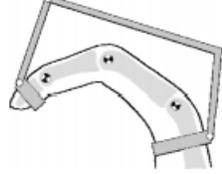
La fisioterapia es un conjunto de técnicas que permiten la pronta recuperación de las funciones normales del dedo índice, como pueden ser masajes, rutinas de flexión y extensión del dedo, donde se aplica a pacientes que pueden recibir un tratamiento físico. El exoesqueleto diseñado tiene como fin ayudar en la mejora de la terapia mediante agentes cinéticos o mecánicos, donde se emite y trasmite fuerza o energía mecánica [6]. La cinesiterapia pasiva es aquella técnica donde el paciente no moviliza de forma voluntaria el segmento afectado, mientras la cinesiterapia activa se refiere al movimiento voluntario del segmento afectado, donde esta serie de técnicas se lo realiza de manera gradual con fin curativo [7].

Mecanismos de rehabilitación de mano

Actualmente en el campo de rehabilitación de mano existen distintos dispositivos de rehabilitación. Este tipo de dispositivos presentan seis diferentes mecanismos base, los cuales se muestran en la Tabla 1.1. Los rehabilitadores de mano utilizan uno de los mecanismos base o la combinación de al menos dos de ellos. [8]

Tabla 1. Mecanismos base para transmitir movimiento en exoesqueletos de mano.

MECANISMOS	ESQUEMA
Emparejamiento de centros directos	
Conexión para el centro de rotación remoto	
Estructura de enlace redundante	

Mecanismo impulsado por tendones	
Actuador de flexión unido a la junta	
Enlace de serie unido al segmento distal	

Diseño

Para cubrir completamente el movimiento del dedo índice y evitar interferencia con los otros dedos, el exoesqueleto es montado en la parte de atrás de la mano. Existen sistemas que se deben tener en cuenta en el diseño del exoesqueleto, pues en realidad el dispositivo es un sistema mecatrónico: el primer subsistema es un mecanismo que se vincula con el dedo, el segundo es un circuito de control y comunicación, la arquitectura general del sistema propuesto se observa en la figura 3. El mecanismo propuesto tiene 3 grados de libertad que actúan de forma independiente, con un motor para proporcionar la flexión adecuada en cada falange.

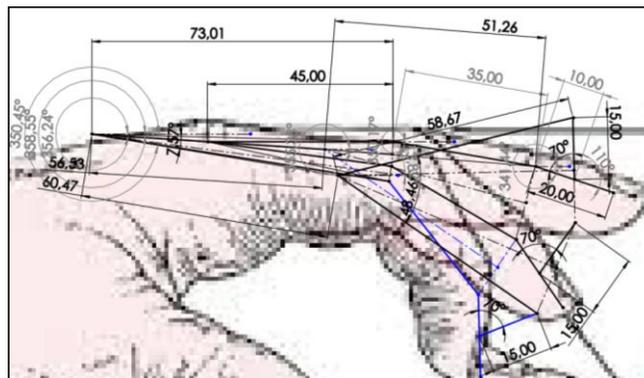


Figura 3. Análisis de tres posiciones

Mecanismo

Para la generación de los movimientos requeridos, sin exceder los límites naturales se plantean varias estrategias, entre ellas se estudian los sistemas de transmisión de movimiento por piñones, mecanismo de barras y por último transmisión por poleas; la figura presenta el mecanismo de barras propuesto, de la simulación de dicho mecanismo, el análisis da como resultado que este diseño no presenta fallas en el movimiento de las barras, al permitir la transmisión del movimiento ofrece una respuesta adecuada a la trayectoria deseada.

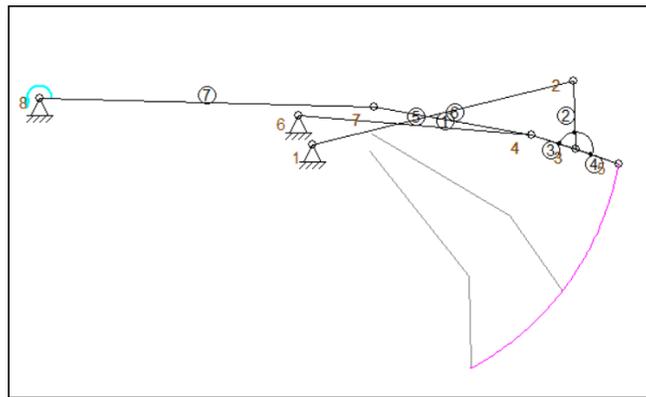


Figura 4. Análisis de la trayectoria del mecanismo

Se inicia el diseño detallado de un mecanismo con características similares a las del dedo humano, tomando como referencia el desarrollado en [1], el cual permite realizar el movimiento de flexión/extensión. El nuevo mecanismo es diseñado para el dedo índice, ya que, validando experimentalmente este diseño, igual funcionará para el resto de los dedos de la mano, pues solamente habrá variación en cuanto a las dimensiones de algunos componentes, excepto el pulgar el cual deberá hacer movimiento de oposición. Para garantizar que el dispositivo realizará el movimiento de flexión / extensión dentro de los límites físicos, se construye un prototipo usando software especializado, que este caso es SolidWorks, para evaluar experimentalmente mediante simulación su comportamiento como se muestra en la figura 5. De igual forma, al mecanismo propuesto se le realizó un análisis cinemático usando MatLab y SAM, introduciendo las coordenadas de las barras que conforman el mecanismo en un plano (x-z) para realizar el estudio de los posibles movimientos que este puede adoptar, en la Figura 5 se presenta la simulación del mecanismo asumiendo que cada eslabón es un elemento rígido.

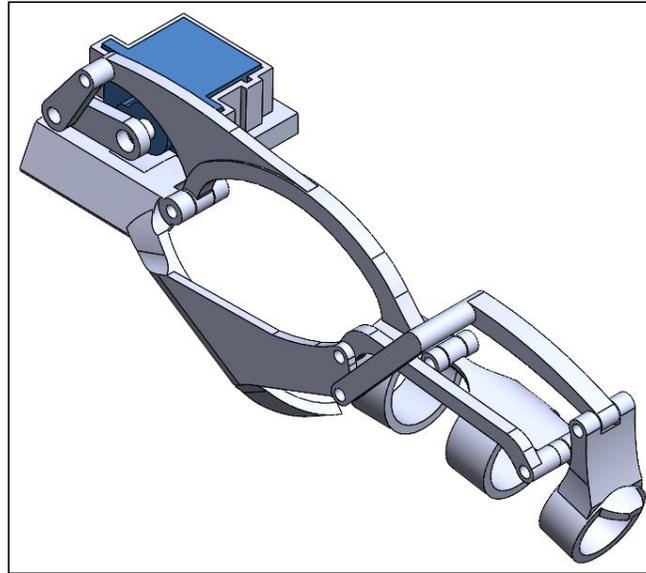


Figura 5. Diseño 3d del mecanismo

Los elementos de los cuales está constituido el exoesqueleto rehabilitador del dedo índice, cumplen con las condiciones de funcionabilidad del mecanismo.

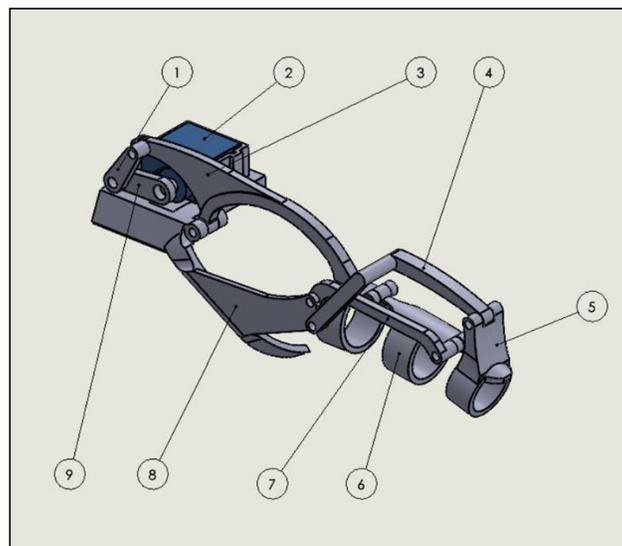


Figura 6 Partes del exoesqueleto.

1. Barra acopladora. Este elemento se encarga de transmitir el movimiento de la barra motriz a la barra de salida.
2. Caja del servomotor. En esta zona se fija el servomotor, el cual es un dispositivo que se puede controlar su posición y velocidad.
3. Barra salida. Este elemento del mecanismo se encarga de la movilidad de la falange proximal.
4. Barra de ajuste 1. Esta barra se fija en la placa base y se encarga de permitir el movimiento apropiado para la falange distal.
5. Soporte de la falange distal. Funciona como apoyo de la parte de la falange distal del dedo.
6. Soporte de la falange media. Funciona como apoyo de la parte de la falange media del dedo.
7. Barra de ajuste 2. Ayuda a que la falange media pueda generar su movimiento óptimo de trayectoria.
8. Placa base. La funcionabilidad de este elemento es permitir el apoyo a las demás barras.
9. Barra motriz. Transmite el movimiento del servomotor a los demás elementos.

Resultados y Discusión

En esta sección se presenta los resultados obtenidos del diseño y simulación del exoesqueleto para rehabilitación del dedo índice, se tomó como referencia trabajos realizados sobre el tema [1], para facilitar el análisis y la validación del mecanismo se emplea software de simulación y análisis de elementos finitos.

Propuesta de diseño del mecanismo

El diseño del prototipo de exoesqueleto planteado consta de dos sistemas de mecanismo, el primero que se vincula al dedo y el segundo es un mecanismo de control y comunicación, como se observa en la figura 7. El mecanismo planteado posee tres grados de libertad que actúan de forma independiente y un motor que controla los movimientos del mecanismo para realizar el trabajo de rehabilitación de los dedos.

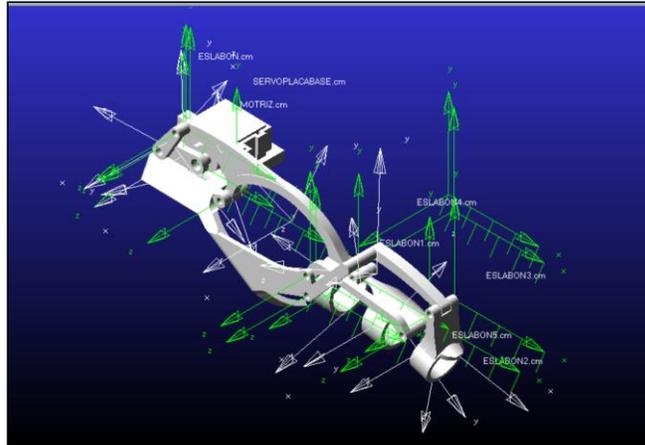


Figura 7. Colocación de los ejes en Adams para el análisis cinemático y validación del mecanismo en 3D.

Análisis cinemático y validación del mecanismo

Para realizar el análisis cinemático y la validación de los elementos que conforman el mecanismo cuando realiza el movimiento, se realiza el modelado con SolidWorks y posteriormente se determina el desplazamiento, la velocidad y la aceleración con el software SAM en 2 dimensiones y una verificación en 3 dimensiones con el Software ADAMS.

Análisis de la curva de desplazamiento en 2D.

Para determinar la trayectoria y el desplazamiento del mecanismo en 2D se utiliza el software SAM que presenta una curva de desplazamiento del mecanismo al realizar el movimiento de extensión/flexión y da como resultado la curva presentada en la figura 8 y con un valor inicial de 9.40563mm y un valor final de 5.8mm en un tiempo de 1.237s.

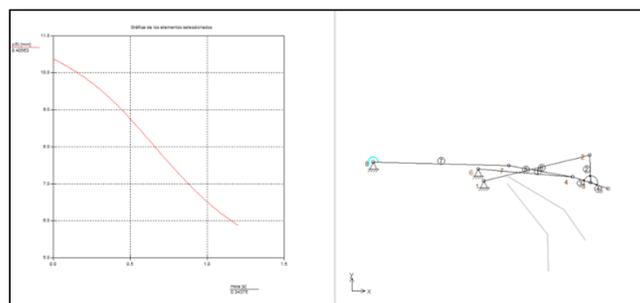


Figura .8 Curva de desplazamiento del actuador en 2D.

Análisis de la curva de desplazamiento en 3D.

Se realiza la verificación del análisis de desplazamiento y la trayectoria del mecanismo en 3D utilizando el software ADAMS y se observa que presenta la misma curva de desplazamiento descrita en la figura 8.

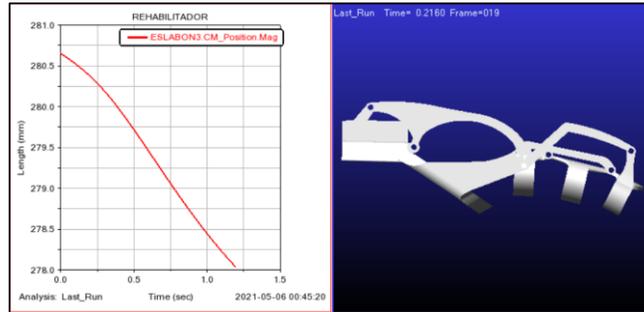


Figura 9. Curva de desplazamiento del actuador en 3D.

Análisis de la curva de velocidad en 2D.

Para determinar la curva de la velocidad del actuador en 2D se utiliza el software SAM que realiza la simulación y da como resultado la gráfica Velocidad vs Tiempo presenta un valor de pico máximo de 7.2mm/s como se detalla en la figura 10.

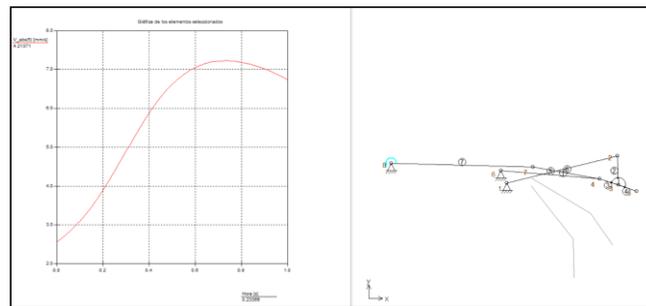


Figura 10. Curva de velocidad del actuador en 2D.

Análisis de la curva de velocidad en 3D.

Se realiza la verificación de la curva de velocidad con el mecanismo en 3D utilizando el software ADAMS se observa que presenta la misma curva presentada en la figura 10.

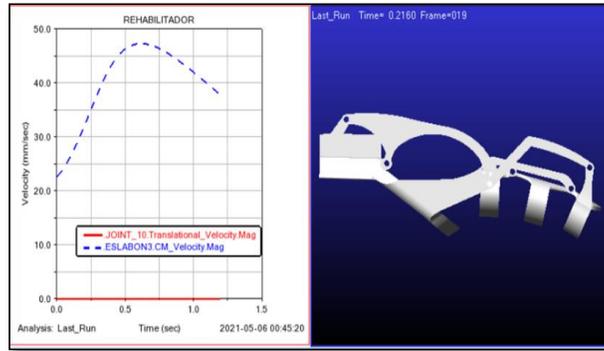


Figura 11. Curva de velocidad del actuador en 3D.

Análisis de la curva de aceleración en 2D.

Para determinar la curva de aceleración del actuador en 2D se utiliza el software SAM, al realizar la simulación se observa la curva de Aceleración vs Tiempo con un valor máximo de 7.8mm/s^2 como se describe en la figura 12.

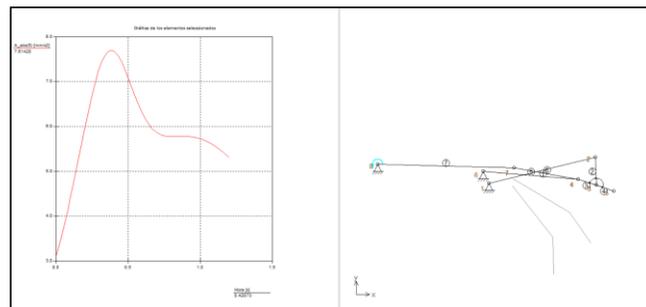


Figura 12. Curva de aceleración del actuador en 2D.

Análisis de la curva de aceleración en 3D.

Se realiza la verificación del análisis de la velocidad del mecanismo en 3D utilizando el software ADAMS se observa que presenta la misma trayectoria descrita en la figura en 2D.

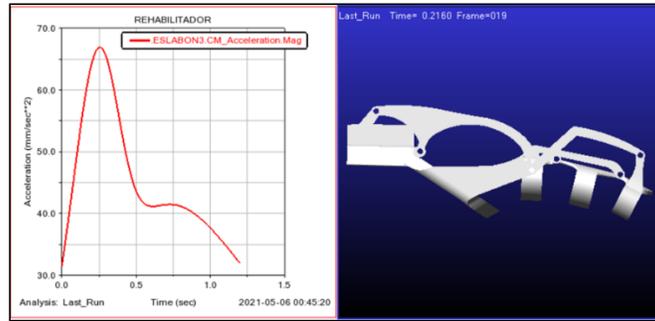


Figura 13. Curva de aceleración del actuador en 3D.

Fabricación y ensamble del prototipo

Los elementos que conforman el mecanismo fueron fabricados utilizando impresión 3D con una estructura de plástico PLA. Para realizar el control del movimiento se emplea un microservo DC y un controlador Arduino, como se observa en la Figura 14.

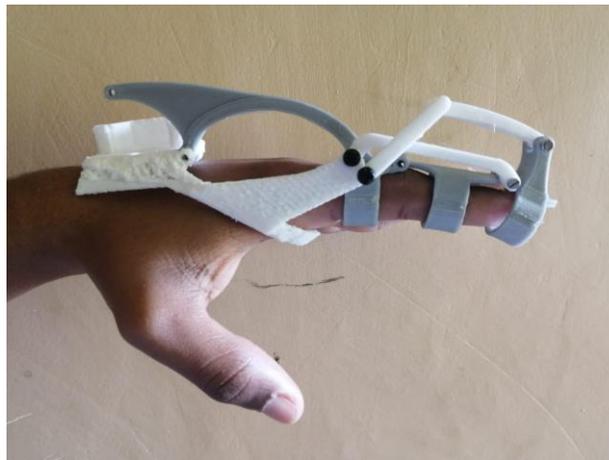


Figura 14. Impresión 3D del prototipo de exoesqueleto

Evaluación del prototipo

Para verificar que el exoesqueleto cumple con las especificaciones planteadas y evaluar la efectividad y compatibilidad del diseño en relación con la lesión, se construyó un prototipo de rehabilitador, el mecanismo órtesis fabricado permite al usuario realizar de manera natural los movimientos de flexo-extensión de los dedos mediante el mecanismo de eslabones. El mecanismo con eslabones fue diseñado con la posibilidad de cambiar su longitud para adaptarse a diferentes

tamaños de la mano. Esta característica permite usar la órtesis en mano derecha o en la mano izquierda.

Conclusiones

Como resultado de este trabajo hemos desarrollado un mecanismo como elemento de apoyo para la fisioterapia en el dedo índice de la mano, el dispositivo permite la flexión y extensión con un ángulo adecuado para cada falange. Además, este se puede adaptar a diferentes tamaños de las falanges de la mano humana con sus respectivas modificaciones dimensionales. Debido a que el dedo meñique, anular, medio e índice se comportan de la misma manera, lo que permite extender este prototipo hacia una implementación completa. Sin embargo, como se trata de un dispositivo para la rehabilitación, su uso debe estar bajo la supervisión de un experto en el tema, ya que su uso es para apoyar el trabajo del fisioterapeuta. Sin embargo, el dedo humano funciona como un conjunto debido a que al generar una leve flexión los demás tendones son accionados y por ende los músculos. Como trabajo futuro consiste en modificar el mecanismo de adaptación a la morfología del pulgar y el número de grados de libertad actual, a fin de desarrollar el exoesqueleto de toda la mano.

Referencias

- [1] V. A. S. Sargsyan, «Robotic Rehabilitation Devices of Human Extremities,» *Design Concepts and Functional Particularities,*” *Bienn. Conf. Eng. Syst. Des. Anal.*, 2012.
- [2] B. S. a. W. R. D. Reinkensmeyer, « “Assessment of Active and Passive Restraint During Guided Reaching After Chronic Brain Injury, 1999.,» *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 27, no. 6, pp. 805–814, 1999.
- [3] L. A. A. López, «Biomecánica y patrones funcionales de la mano,» *Universidad Nacional de Colombia*, 2012.
- [4] C. OLEARI, «ANATOMIA FUNCIONAL Y BIOMECÁNICA,» *UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES*, 2018.

- [5] A. Velázquez Sánchez, E. Merchán Cruz, L. Hernández Gómez y G. Urriolagoitia Calderón, «Rango de movilidad y función descriptiva del dedo índice,» *Instituto Politécnico Nacional Distrito Federal, México*, 2007.
- [6] M. d. R. H. Hernández, «Manejo rehabilitatorio temprano de mano traumática con amputaciones parciales de dedos,» *Medigraphic Artemisa* , 2008.
- [7] M. L. PAREJA, «Cinesiterapia: Movimiento para mejorar la salud,» *VITÓNICA* , 2014.
- [8] G. M. G. S. j. L. K. R. a. J. K. P. Heo, «Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering,» *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 5, pp. 807–824, 2012.