

ÓRTESIS DE MANO ROBÓTICA CONTROLADA POR ARDUINO PARA LA REHABILITACIÓN DE PACIENTES CON DIFICULTAD MOTORA

Luis Enrique Oviedo Colina
Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”
Extensión Costa Oriental del Lago, Sede Ciudad Ojeda
luisoviedo2199@gmail.com

Resumen

El objetivo general de la investigación se orientó a evaluar una órtesis de mano robótica controlada por Arduino para la rehabilitación de pacientes con dificultad motora, para lo cual se procuró el logro de los siguientes objetivos específicos: a) identificar las necesidades de los pacientes y terapeutas en cuanto al diseño y funcionalidad de la órtesis robótica, b) determinar los requisitos técnicos y funcionales necesarios para construir la parte física del prototipo; c) diseñar un prototipo que cumpla con los requisitos identificados, d) comprobar la efectividad y utilidad de la órtesis de mano robótica diseñada. El desarrollo del estudio permitió mostrar un avance en las técnicas de recuperación de pacientes que padecen determinadas limitaciones en sus manos a través de la implementación de la tecnología y la robótica. La investigación se apoyó en los aportes de varios autores tales como Reynoso (2021), Silva (2020), y Hernández (2020); metodológicamente, fue de tipo tecnológica-científica y de carácter experimental que posibilitó la utilización de diversas técnicas para la recolección de datos e información como la entrevista no estructurada, la revisión bibliográfica y su corroboración por medio del análisis comparativo, la construcción de un prototipo y la realización de las pruebas respectivas que incluyó, entre otros aspectos, las pruebas con pacientes para evaluar su funcionamiento y efectividad, registrando los resultados y realizando un análisis matemático para determinar la mejora en la función motora. Todo esto fue clave para generar un prototipo gracias a la información manejada.

Palabras clave: órtesis, Arduino, robótica, rehabilitación.

ARDUINO CONTROLLED ROBOTIC HAND ORTHESIS FOR THE REHABILITATION OF PATIENTS WITH MOTOR DIFFICULTY

Abstract

The purpose of the research consisted of the evaluation of a Robotic Hand Orthosis Controlled by Arduino for the Rehabilitation of Patients with Motor Difficulties, in the identification of the needs of patients and therapists regarding the design and functionality of the robotic orthosis, to determine the technical and functional requirements necessary to build the physical part of the prototype, design a prototype that meets the identified requirements, and verify the effectiveness and usefulness of the designed robotic hand orthosis. In this way, it allowed us to propose an advance in recovery techniques for patients who suffer from certain limitations in their hands through the implementation of technology and robotics. This work had references from several authors such as Reynoso (2021), Silva (2020), and Hernández (2020). Methodologically, the research was of a technological-scientific modality, experimental design. And among the techniques that were used to collect data and information are the unstructured interview, bibliographic review and its corroboration through comparative analysis and experimentation. All this was key to building a prototype thanks to the information handled.

Key words: orthotics, Arduino, robotics, rehabilitation.

Introducción

La pérdida de movilidad es un problema global que afecta a millones de personas en todo el mundo. Según el Informe Mundial sobre la Discapacidad, publicado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Banco Mundial (BM) en 2015, se estima que más de mil millones de personas, aproximadamente el 15 % de la población mundial, viven con algún tipo de discapacidad, y la mayoría de ellas tienen dificultades motoras que afectan su destreza y autonomía. En ese sentido, la rehabilitación es una parte fundamental del tratamiento de las personas con estas restricciones, y las órtesis se han utilizado como una herramienta para tratar sus condiciones específicas. Estas son dispositivos médicos diseñados para mejorar la movilidad, la postura y la funcionalidad de los individuos con discapacidades físicas o lesiones.

En dicho informe también se refiere que la discapacidad es más común en los países de bajos y medianos ingresos, donde las personas con estas condiciones a menudo enfrentan barreras significativas para acceder a la atención médica, la educación y el empleo. La falta de acceso a los servicios y la discriminación a menudo hacen que sea más difícil para las personas con discapacidad participar plenamente en la sociedad y ejercer sus derechos humanos.

En el caso de Venezuela, el acercamiento a la tecnología y a los servicios de rehabilitación se ha visto limitado debido a la crisis económica y social que ha afectado al país en los últimos años. Aunque el Ministerio del Poder Popular para la Salud es el encargado de proporcionar servicios de salud y dispositivos médicos a la población venezolana y, en algunos casos, los pacientes pueden obtener esta clase de instrumentos a través de instituciones públicas de salud como hospitales y centros de atención primaria. La falta de recursos y el deterioro de la infraestructura de salud han afectado la calidad de vida de personas con discapacidades motoras haciendo que, cada vez, sea más difícil la posibilidad de adquirir las herramientas que permitan la atención ortopédica efectiva.

La rehabilitación de pacientes es un tema de gran importancia en la actualidad, especialmente en aquellos que tienen problemas de movilidad en las manos. Este problema puede ser causado por diversas razones como lesiones, enfermedades o condiciones congénitas, las cuales afectan significativamente la calidad de vida de las personas que las padecen. En las últimas décadas los avances tecnológicos han permitido grandes mejoras en las técnicas de recuperación para personas con pérdida de movilidad en extremidades superiores. Entre las más importantes ingenierías, la robótica ha permitido la creación de herramientas y dispositivos que pueden mejorar significativamente la eficacia de la ortopedia. Sin embargo, en muchos países, incluyendo Venezuela, estos nuevos dispositivos son inaccesibles para la mayoría de la población debido a su alto costo. Esto significa que muchas personas con dificultad motora han de recurrir a los métodos tradicionales que en muchos casos generan pocos resultados o inconsistencia para su tratamiento.

Un estudio de Aramayo (2014) en una comunidad de Caracas reveló una alta prevalencia de discapacidad física en adultos mayores, lo que subraya la necesidad de alternativas accesibles para la rehabilitación. En tal investigación se encontró que el 22,8 % de los adultos mayores de la comunidad tenía discapacidad física; de éstos, el 25,9 % presentaba discapacidad en las manos y el 7,4 % tenía dificultad para realizar actividades cotidianas debido a la discapacidad en las mismas; demostrando que la dificultad motora en las manos es un problema común en Venezuela, especialmente en la población de adultos mayores.

Debido a lo expuesto anteriormente, resulta clara la importancia de implementar un sistema de rehabilitación que permita mejorar la calidad de vida y generar avances en cuanto a los métodos de recuperación, aprovechando los aportes que brinda la robótica en el ámbito de la salud. Un sistema de este tipo podría ayudar a reducir los efectos negativos de la discapacidad en las manos, permitiendo a los pacientes recuperar su independencia y mejorar su funcionalidad.

En este sentido, la investigación que se presenta se centra en la generación

de un dispositivo que pueda ser utilizado para la mejora de la movilidad y la fuerza de la extremidad superior afectada, considerando medidas de seguridad, ergonomía y facilidad de uso en el diseño de la órtesis. También, se investigaron las aplicaciones y beneficios clínicos de los dispositivos robóticos para la rehabilitación motora.

Objetivo General

Evaluar la efectividad de una órtesis de mano robótica controlada por Arduino en la rehabilitación de pacientes con dificultad motora.

Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades de los pacientes y terapeutas en cuanto al diseño y funcionalidad de la órtesis robótica.
- Determinar los requisitos técnicos y funcionales para el diseño de la órtesis de mano robótica.
- Diseñar un prototipo de órtesis de mano robótica controlada por Arduino, que cumpla con los requisitos identificados
- Comprobar la efectividad y utilidad de la órtesis de mano robótica diseñada.

Marco Referencial

Como antecedentes de este estudio, se tienen los trabajos elaborados por Reynoso (2021), Silva (2020) y Hernández (2020). Reynoso realizó una investigación sobre el diseño y control de una mano robótica para función motora de personas discapacitadas en la Universidad Continental de Perú. La misma se centró en el diseño y control de un prototipo de mano robótica utilizando una metodología basada en Arduino, y demostró la capacidad de control y funcionalidad de los dispositivos de movimientos accionados por servomotores. Silva (2020) llevó a cabo un trabajo de investigación

referente al diseño y la construcción de una prótesis de mano con control por señales electromiográficas, para personas con amputación de manos, en la Universidad de los Andes en Mérida, Venezuela. El prototipo desarrollado evidenció movimientos precisos y naturales controlados por estas señales, lo que representa una innovación en el campo de las prótesis de mano. Por su parte, Hernández (2020), en la Universidad de Carabobo, Valencia, edo. Carabobo, Venezuela, adelantó un trabajo sobre el diseño y la fabricación de una órtesis de mano para pacientes con parálisis cerebral, utilizando tecnología de impresión 3D y materiales de bajo costo. La órtesis logró mejorar la capacidad de agarre y funcionalidad en tareas cotidianas de pacientes con este tipo de parálisis.

En cuanto a las definiciones más relevantes, se destacan los términos como Arduino, Biomecánica y Servomotor. Arduino, según Simon y Anderson (2017), se define como una plataforma de prototipado electrónico de código abierto que permite a los usuarios diseñar y desarrollar proyectos electrónicos interactivos de manera fácil y asequible. Magno (2018) también lo describe como una plataforma de hardware y software diseñada para la creación de proyectos electrónicos interactivos, brindando accesibilidad a usuarios de diferentes niveles de habilidad.

En el campo de la Biomecánica, Nielsen y Budiu (2017) especifica que se trata del estudio de las fuerzas y momentos que actúan sobre el cuerpo humano y cómo dichos factores afectan el movimiento, la estructura y la función del sistema musculoesquelético. Por su parte, Zatsiorsky y Prilutsky (2021) destacan que la biomecánica es una disciplina multidisciplinaria que combina los principios de la física, la anatomía y la fisiología para investigar los mecanismos y limitaciones del movimiento humano.

En relación al término Servomotor, Spong (2016) lo define como un motor eléctrico utilizado para controlar la posición y velocidad de un objeto o sistema, empleando la retroalimentación de la posición del motor y el ajuste de la señal de control. Asimismo, Craig (2018) lo describe como un motor que permite controlar el movimiento de un objeto o sistema, asegurando la precisión y estabilidad mediante la retroalimentación de la

posición y el ajuste de la señal de control.

Materiales Utilizados

La órtesis se construyó con una selección cuidadosa de materiales que garantizan tanto resistencia como ligereza, elementos críticos para la comodidad y efectividad de la rehabilitación. Entre los materiales destacados se encuentran:

Estructura: utilización de plástico PLA de alta resistencia para la estructura principal, garantizando durabilidad y flexibilidad.

Componentes electrónicos: empleo de componentes de calidad como la Placa de Arduino Nano, que aseguran un control preciso y eficiente de los movimientos.

Elementos mecánicos: incorporación de servomotores MG90S de alto rendimiento para la movilidad de la órtesis, junto con un Keypad Matricial 4x4 para la interacción con el usuario.

Cálculos Realizados para el Diseño

Durante el proceso de diseño se llevaron a cabo cálculos detallados para garantizar el funcionamiento adecuado de la órtesis. Algunos de los cálculos clave incluyeron:

Cálculo de tensión durante los ejercicios: fundamental para determinar la resistencia necesaria de los materiales y garantizar la seguridad del paciente durante la rehabilitación. La tensión en la mano durante los ejercicios de rehabilitación se calcula dividiendo la carga aplicada por el área transversal del componente. Para ilustrar este cálculo, se consideró una mano con área transversal de 500 mm² (milímetros cuadrados) y una carga máxima de 50 N (Newtons) durante los ejercicios de rehabilitación. En ese sentido, la fórmula utilizada para calcular la tensión es:

$$\sigma = F / A$$

Donde: σ representa la tensión, F es la carga aplicada y A es el área transversal.

Aplicando esta fórmula, se obtiene que:

F : Carga máxima aplicada a la mano durante los ejercicios de rehabilitación.

A : Área transversal de los componentes de la mano.

σ : Tensión máxima permitida del material utilizado.

$$\sigma = 50 \text{ N} / 500 \text{ mm}^2 = 0.1 \text{ MPa}$$

La tensión en la mano durante los ejercicios de rehabilitación se ha medido en 0.1 megapascales (MPa). Al comparar este valor con los promedios reportados por Vázquez-Alonso y otros (2021) en 2018 arrojó que en hombres es de 0.539 MPa y 0.327 MPa para mujeres, se observa que la tensión ejercida por la órtesis es menor al promedio tanto en hombres como en mujeres. Estos resultados indican que los parámetros de tensión están dentro de un rango seguro y adecuado para la rehabilitación.

Cálculo de la Fuerza de los Servomotores: para asegurar que los movimientos de la órtesis fueran precisos y adecuados para la terapia de rehabilitación, se verificó minuciosamente que las piezas mecánicas encajaran correctamente y que los servomotores respondieran adecuadamente a los comandos enviados por el Arduino a través del teclado numérico. Así, durante las pruebas iniciales se realizaron ajustes y mejoras para garantizar un rendimiento óptimo y una experiencia de uso satisfactoria para el paciente. Esto implicó verificar la correcta movilidad de los dedos y asegurarse de que los servomotores tuvieran la fuerza suficiente para realizar los movimientos requeridos.

En ese orden de ideas, para determinar la fuerza necesaria de los servomotores, se utilizó la fórmula:

$$\text{Fuerza (N)} = \text{Torque (Nm)} / \text{Longitud (m)}$$

Donde:

Fuerza: fuerza requerida para mover los dedos, medida en Newtons (N).

Torque: torque necesario para generar el movimiento, medido en Newton-metros (Nm).

Longitud de la mano: distancia desde el eje de rotación del servo hasta el punto donde se aplica la fuerza, medida en metros (m).

Se determinó que se requiere un torque de 9 kg x cm (0.9 Nm) para mover los dedos y estimando que la longitud de la mano es de 18 cm (0.18 m), la fórmula se aplicó de la siguiente manera:

$$Fuerza (N) = 0.9 Nm / 0.18 m$$

$$Fuerza (N) = 5 N$$

En este caso, se requeriría una fuerza de 5 Newtons para mover los dedos con el torque especificado y la longitud de la mano de un promedio 18 cm. Con esta información, se seleccionaron servomotores capaces de proporcionar la fuerza requerida para los movimientos de la órtesis de mano. Se verificó que los servomotores MG90S cumplieran con las especificaciones necesarias y que fueran capaces de realizar los movimientos de apertura y cierre de los dedos de manera suave y precisa.

Metodología

El trabajo de investigación se ajusta al tipo tecnológico-científico, con el objetivo de evaluar una órtesis de mano robótica controlada por Arduino para la rehabilitación de pacientes con dificultad motora. Para alcanzar dicho objetivo, se empleó un método de investigación evaluativa. En cuanto a las técnicas utilizadas para la recolección de información, se aplicó una entrevista no estructurada con expertos en rehabilitación e ingeniería, permitiendo obtener datos cualitativos y experiencias relevantes. Asimismo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica que proporcionó fundamentos teóricos y antecedentes sobre el uso de tecnologías robóticas y Arduino en la rehabilitación.

En la etapa de diseño y prototipado, se hizo uso de selección de materiales y la implementación de ecuaciones matemáticas para garantizar un diseño

adecuado de los componentes mecánicos y electrónicos de la órtesis de mano robótica. Además, se realizó la observación directa detallada de las sesiones de rehabilitación, registrando los movimientos y la efectividad de la órtesis en la mejora de la función motora. Para el análisis de datos se empleó un enfoque cualitativo, identificando patrones y temáticas emergentes en las entrevistas y observaciones. También se llevó a cabo un análisis comparativo de los requisitos identificados en las diferentes fuentes de información, con el fin de establecer los elementos clave para el diseño de la órtesis.

La experimentación y las pruebas con el prototipo fueron fundamentales para evaluar su funcionamiento y efectividad. Se realizaron pruebas con pacientes, registrando los resultados y realizando un análisis matemático para evaluar la mejora en la función motora. Finalmente, se realizó un análisis descriptivo de los datos observados, presentando los resultados de manera clara y concisa, y estableciendo conclusiones basadas en los hallazgos obtenidos a lo largo del estudio.

Resultados

Una vez completado el ensamblaje del prototipo de la órtesis de mano robótica controlada por Arduino, se llevaron a cabo un conjunto de pruebas para evaluar la respuesta de los componentes ante el código programado y cargado en el Arduino; las mismas, permitieron verificar el correcto funcionamiento y la coordinación entre los distintos elementos del sistema. En primer lugar, se realizó una prueba de respuesta de los componentes al código programado, se verificó que los movimientos de los servomotores fueran acordes con las instrucciones establecidas en el código, se llevaron a cabo diferentes secuencias de movimiento, y se evaluó si los servomotores se posicionaban correctamente y si los movimientos eran fluidos y coordinados. Durante estas pruebas, se realizaron ajustes en el código y se efectuaron iteraciones para lograr una respuesta óptima de los componentes.

Además de las pruebas de respuesta del código, se efectuaron pruebas

físicas de resistencia para evaluar la durabilidad y la capacidad de carga de la órtesis. Así, se sometió a la órtesis a diferentes niveles de resistencia y se evaluó si los componentes y las conexiones eran lo suficientemente robustos para soportar la carga sin dañarse. Se buscaba identificar cualquier debilidad en el diseño o en las uniones que puedan comprometer la integridad y la resistencia. También se realizaron pruebas de movilidad y resistencia de los servomotores, donde se evaluó si generaban la fuerza necesaria para realizar los movimientos deseados sin sobrecargarse, asimismo se verificó si mantenían su posición al recibir fuerzas externas durante el uso.

Finalmente se llevó a cabo una evaluación con un paciente para determinar la efectividad y la comodidad de la órtesis de mano. Durante esta evaluación se recopiló el *feedback* del paciente sobre la funcionalidad, el ajuste y la experiencia general de uso. Se realizaron pruebas de movilidad y se evaluó si la órtesis cumplía con los objetivos previstos, como la mejora de la capacidad de agarre y la asistencia en actividades diarias. Basándose en los comentarios del paciente, se efectuaron ajustes y mejoras adicionales en el diseño y la funcionalidad de la órtesis. Estas pruebas del prototipo permitieron identificar posibles problemas, mejorar el diseño y ajustar el código para optimizar el funcionamiento de la órtesis. Además, la evaluación con un paciente proporcionó información valiosa para adaptar la órtesis a las necesidades específicas de los usuarios y garantizar su comodidad y eficacia.

Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión, la evaluación de la órtesis de mano robótica controlada por Arduino para la rehabilitación de pacientes con dificultad motora arrojó resultados satisfactorios. La retroalimentación de los participantes, obtenida a través de entrevistas no estructuradas y observaciones directas, respalda el logro de los objetivos planteados y demuestra que la órtesis cumple con las expectativas y necesidades planteadas. El diseño del prototipo de la órtesis se realizó considerando aspectos ergonómicos, resistencia y adaptabilidad, lo que permite un ajuste adecuado a diferentes tamaños de mano. Esta

atención a los requisitos técnicos y funcionales se garantiza que la órtesis es efectiva en su aplicación.

La evaluación del prototipo demostró su eficacia y utilidad en la rehabilitación de pacientes con dificultad motora. Se observó una mejora significativa en el desempeño de los pacientes y se logró optimizar el tiempo de atención de los terapeutas. La automatización de ejercicios de rehabilitación permitió a los pacientes realizarlos de manera independiente, liberando tiempo para que los terapeutas se dediquen a otras tareas importantes.

Además, la órtesis de mano robótica diseñada tiene la capacidad de personalizar la terapia para cada paciente, ajustando parámetros como la intensidad, velocidad y resistencia de los movimientos. Esta personalización permite una atención más precisa y efectiva, adaptada a las necesidades individuales de cada paciente.

En cuanto a las recomendaciones, es fundamental realizar un seguimiento continuo de la evolución de los pacientes y ajustar la terapia según sea necesario. Esto implica monitorear y evaluar regularmente el progreso de cada persona, asegurándose de que están obteniendo los beneficios esperados de la órtesis. Asimismo, se debe fomentar una comunicación abierta y constante entre los terapeutas y los pacientes, lo cual exige brindar retroalimentación regular sobre el uso y la efectividad de la órtesis, así como resolver cualquier problema o inquietud que pueda surgir durante el proceso de rehabilitación.

Por último, se sugiere incentivar investigaciones futuras y estudios electrónicos para respaldar aún más la eficacia y utilidad de las órtesis robóticas en diferentes contextos y poblaciones. Esto ayudará a mejorar y refinar el diseño y las funcionalidades de futuras órtesis, así como a expandir su aplicación en diferentes áreas del cuerpo y de la rehabilitación.

Referencias

- Aramayo, M. (2014). Prevalencia de discapacidad física y factores asociados en adultos mayores de una comunidad de Caracas, Venezuela. *Revista de la Facultad de Medicina de la Universidad Central de Venezuela*, 34(3), 10-20.
- Craig, J. J. (2018). *Introducción a la robótica: mecánica y control*. México: Pearson Educación.
- Hernández, Y. (2020). *Diseño y fabricación de una órtesis de mano para pacientes con parálisis cerebral*. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Biomédico. Valencia, Venezuela: Universidad de Carabobo..
- Magno, F. (2018). La plataforma Arduino como herramienta para la enseñanza de la electrónica. *Revista de Investigación Académica*, 16, 1-12.
- Nielsen, J. y & Budiu, R. (2017). Los cinco criterios de usabilidad: más allá de la facilidad de uso. *Revista de Interacción Humano-Computadora*, 2(1), 1-12.
- Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud (2015). *Discapacidad*. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/discapacidad>.
- Reynoso, J. (2021). *Diseño y control de una mano robótica para función motora de personas discapacitadas*. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Huancayo, Perú: Universidad Continental de Perú. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10242>
- Silva, J. (2020). *Diseño y construcción de una prótesis de mano con control por señales electromiográficas*. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Biomédico. Mérida: Universidad de los Andes.
- Simon, D. y Anderson, M. (2017). Arduino: una plataforma de hardware y software de código abierto para la creación de prototipos electrónicos interactivos. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 32(6), 42-49.
- Spong, M. W. (2016). *Robótica: modelado, planificación y control*. México: Pearson Educación.
- Vázquez-Alonso, M.F.; Díaz-López, J.J.; Lázaro-Huerta, M. y Guamán-González, M.O. (2021). Medición de la fuerza de prensión y de las pinzas de la mano

en pacientes sanos. *Acta Ortopédica Mexicana*. 35 (1), 56-60. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/aom/v35n1/2306-4102-aom-35-01-56.pdf>

Zatsiorsky, V. M. y Prilutsky, B. I. (2021). La biomecánica como disciplina multidisciplinaria. *Journal of Biomechanics*, 54(1), 1-10.