

Órtesis para rehabilitación de personas con movilidad articular reducida en la mano mediante el registro electromiográfico (EMG). Orthosis for rehabilitation of people with reduced hand joint mobility by electromyography (EMG) recording.

Axel Cid-Trejo ^a, Angel D. Hernández-Lecourtois ^a, Valentina Islas-González ^a, Gonzalo Solano-Ruíz ^a, Noemi Hernández-Oliva ^{a,*}, Marisol Alejandre-Flores ^a

^a Máquinas con Sistemas Automatizados, CECyT 2 Miguel Bernard, Instituto Politécnico Nacional, Av. Nueva Casa de la Moneda 133, Colonia Lomas de Sotelo, CP 11200, Alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México, México.

Resumen

Este trabajo presenta una propuesta de construcción e implementación, de un prototipo de órtesis de mano para personas con una movilidad articular reducida. Se registra el progreso del paciente a través de señales electromiográficas (EMG) mediante tres electrodos, lo que permite al especialista monitorear la terapia. Órtesis, fabricada mediante la manufactura aditiva de material PETG, es de fácil mantenimiento, reconfigurable y sostenible. Se dispone de un guante con sensores flex que asisten en la rehabilitación por imitación. Para validar su funcionamiento, se probó el prototipo en un hombre y una mujer, con lo cual se comprobó que la terapia puede ser monitoreada constantemente y registrar su progreso, dando la posibilidad de ser interpretada por un especialista. Las pruebas demostraron que la implementación del prototipo es viable en pacientes que requieren un proceso continuo de rehabilitación mediante la terapia de imitación.

Palabras Clave: Órtesis, rehabilitación, movilidad reducida, señales EMG.

Abstract

This paper presents a proposal for the construction and implementation of a hand orthosis prototype for people with reduced joint mobility. The patient's progress is recorded through electromyographic (EMG) signals using three electrodes, allowing the specialist to monitor the therapy. The orthosis, manufactured through additive manufacturing with PETG material, is easy to maintain, reconfigurable, and sustainable. A glove equipped with flex sensors assists in imitation-based rehabilitation. To validate its functionality, the prototype was tested on a man and a woman, demonstrating that the therapy can be continuously monitored, and the progress recorded, allowing for interpretation by a specialist. The tests showed that the implementation of the prototype is viable for patients who require a continuous rehabilitation process through imitation therapy.

Keywords: Orthosis, rehabilitation, reduced mobility, EMG signals.

1. Introducción

En tiempos recientes, el desarrollo de prótesis, exoesqueletos y órtesis ha sido utilizado como asistencia en terapias de rehabilitación de pacientes en condiciones particulares, relacionadas con lesiones o falta de miembro, lo que ha generado la necesidad de dispositivos que mejoren la condición de salud y vida del paciente. En consecuencia,

estudios como el de (Rzyman *et al.*, 2020) exhiben un análisis detallado de órtesis biónicas desarrolladas en tiempos recientes para miembros superiores, mientras que (Ansadi *et al.*, 2023) llevan a cabo una revisión de órtesis activas de la mano, enfocándose en el diseño, funcionalidad y aplicaciones clínicas. Por otro lado, en (Andrade *et al.*, 2019) se presenta el desarrollo de una órtesis activa de muñeca cuyo objetivo es aumentar el rango de movimiento de flexión y extensión de la

*Autor para la correspondencia: nhernandez@ipn.mx

Correo electrónico: acidt2100@alumno.ipn.mx (Axel Cid-Trejo), ahernandez2105@alumno.ipn.mx (Ángel David Hernández-Lecourtois), vislasg2100@alumno.ipn.mx (Valentina Islas-González), gsolanor2100@alumno.ipn.mx (Gonzalo Ruíz-Solano), nhernandez@ipn.mx (Noemi Hernández-Oliva), malejandref@ipn.mx (Marisol Alejandre-Flores).

articulación en pacientes con Parkinson. No obstante, además del diseño y funcionalidad, resulta crucial el análisis de las señales musculares, con las cuales el fisioterapeuta pueda monitorear el progreso del paciente en caso de utilizar este tipo de dispositivos. En este sentido, trabajos como los de (Vaca *et al.*, 2013) presentan el diseño y construcción de un dispositivo para rehabilitación mediante la utilización de señales de electromiografía (EMG), medidas a partir de sensores colocados en la órtesis. En (Cantú *et al.*, 2021) se presenta un prototipo de órtesis inteligente con una matriz de múltiples electrodos completamente integrada para electromiografía (EMG), con el objetivo de mejorar el registro personalizado no invasivo durante la rehabilitación. El estudio del diseño de un sistema de estimulación eléctrica funcional (FES) para el miembro superior, incluyendo la construcción y evaluación de un dispositivo integral de rehabilitación mediante una impresora tridimensional se presentó en (Medina *et al.*, 2021). En (Strazza *et al.*, 2018) se presenta un análisis de las señales EMG obtenidas durante el proceso de la caminata. Para (Abass *et al.*, 2019) presentan las pruebas de electrodos EMG impresos en 3D. En este contexto, en (Jiang *et al.*, 2023) se presenta un estudio de la última década en cuanto a la perspectiva del uso de la biorrobótica y diversas técnicas de control para métodos invasivos y no invasivos. Respecto a las órtesis, los siguientes trabajos son de particular relevancia para la propuesta diseñada. En (Geethanjali *et al.*, 2016) se presenta una órtesis que cumple con dos funciones, la de dispositivo de asistencia y de rehabilitación, mientras que en (Fischer *et al.*, 2016) se presenta un guante portátil de asistencia para pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares o tienen discapacidades severas en las manos, usándolo como parte de las terapias de rehabilitación. Finalmente, en (Yurkewich *et al.*, 2020) se diseña un guante de agarre (Hand Extension Orthosis, HERO) en respuesta a las necesidades de terapeutas y personas con graves deficiencias en las manos debido a accidentes.

Este trabajo se centra en el diseño y construcción de una órtesis para rehabilitación de personas con movilidad articular reducida en la mano mediante el registro de las señales electromiográficas (EMG) leídas por medio de sensores no invasivos. La organización del documento es la siguiente: en la Sección 2 se describe el diseño del prototipo de órtesis, en la Sección 3 se desarrollaron pruebas en dos pacientes para evaluar el desempeño del prototipo; en la Sección 4 se muestra el análisis de los resultados obtenidos con ambos pacientes y las señales EMG leídas por los sensores; finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones y trabajos a futuro.

2. Diseño del prototipo

Actualmente en México, el porcentaje de accidentes se ha incrementado, para el caso de las manos corresponde con el 26% del total (Lodus, 2022), esto implica que estas personas se vean limitadas en todos los aspectos de su vida, además de que requieren de un tiempo para sanar completamente. Por este motivo, el desarrollo del prototipo fue obtenido a partir de la identificación de esta necesidad que existe en procesos de rehabilitación de pacientes que han sufrido algún accidente. Por lo que decidió trabajar en pacientes que sufrieron algún daño en la mano y que requieren de un proceso de rehabilitación que le ayude a mejorar su calidad de vida, para

ello se realizaron las etapas mostradas en el diagrama de la Figura 1.

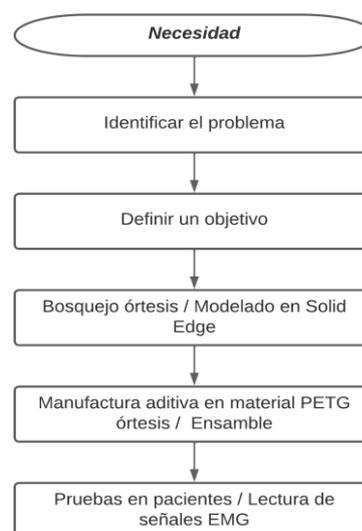


Figura 1: Diagrama de la metodología empleada en el diseño del prototipo. Fuente: Autoría propia.

A partir de este diagrama es como se obtuvo el diseño final de la órtesis, el cual está integrado por varios sistemas que complementan al prototipo, estos son integrados porque la terapia de rehabilitación que se seleccionó es la de imitación, esta consiste en que la mano lesionada imite los movimientos de la mano sana y pueda replicarse de forma gradual, es por ello que un especialista en rehabilitación debe encargarse del monitoreo del progreso del paciente. En la Figura 2 se presenta un diagrama de la arquitectura del sistema, en el cual se identifica que se debe crear una red Wi-Fi, la cual se utiliza para la comunicación entre dos tarjetas electrónicas, la primera se encarga de recibir las señales provenientes de los movimientos de la mano sana, los cuales se envían inalámbricamente a la segunda tarjeta, en esta se procesan los datos y se envían las señales a la órtesis las cuales son procesadas y visualizadas en una pequeña pantalla

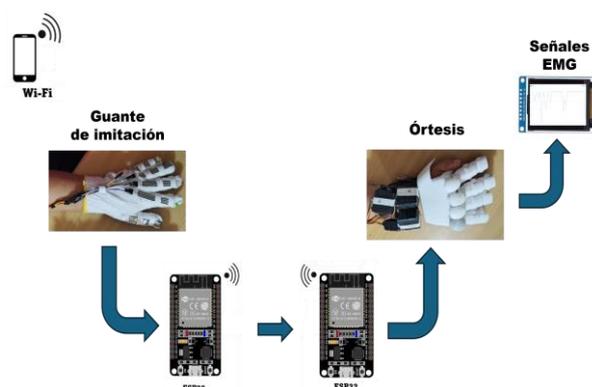


Figura 2: Diagrama de la arquitectura del sistema propuesto. Fuente: Autoría propia.

2.1 Sistema mecánico

El sistema mecánico del prototipo es la estructura de la órtesis, la cual está diseñada para proporcionar soporte y un movimiento controlado a la extremidad superior del paciente.

Se procedió con la manufactura aditiva mediante la utilización de PETG, un material seleccionado por su ligereza, resistencia y durabilidad, además de ser relativamente flexible, lo que contribuye a su comodidad.

Es por ello por lo que se examinaron con atención las propiedades del PETG, que es menos propenso a agrietarse bajo tensión y tiene una superficie suave que minimiza el riesgo de irritación. Otros materiales que se podrían utilizar para mejorar la comodidad en las áreas de contacto directo incluyen el TPU (poliuretano termoplástico) y el TPE (elastómero termoplástico), conocidos por su elasticidad y suavidad al tacto, aunque se utilizarían solo en partes específicas de la órtesis para no comprometer la rigidez necesaria en la estructura principal. El empleo de esta herramienta no solo posibilita la elaboración personalizada, sino que minimiza el desperdicio de material a través de la manufactura aditiva, el prototipo es sostenible debido a la naturaleza reciclable del PETG empleado. Este material puede ser reprocesado y reutilizado en la producción de nuevas órtesis y reducir así el impacto ambiental. El diseño modular también permite reemplazar únicamente las partes dañadas o desgastadas en lugar de desechar todo el dispositivo, lo que prolonga su vida útil y reduce la generación de residuos. La producción local y bajo demanda también contribuye a la sostenibilidad al disminuir las emisiones relacionadas con el transporte y el almacenamiento en masa.

Se emplearon servomotores MG996R, conocidos por su alto torque y precisión, los cuales son responsables de proporcionar el movimiento controlado de la órtesis. Estos permiten una respuesta rápida a las señales emitidas por los sensores flex, imitando con precisión los movimientos de la mano sana, es decir, la terapia de rehabilitación empleada fue la denominada "imitación", la cual se emplea en el tratamiento del dolor regional complejo y en la rehabilitación de personas con una disminución de la fuerza motora o parálisis parcial de algún miembro. Esta consiste en que el paciente imita los movimientos articulares de una mano sana a otra con problemas de movilidad reducida utilizando el sistema de la órtesis propuesta. En la Figura 3 se observa la configuración del sistema mecánico del prototipo de órtesis.

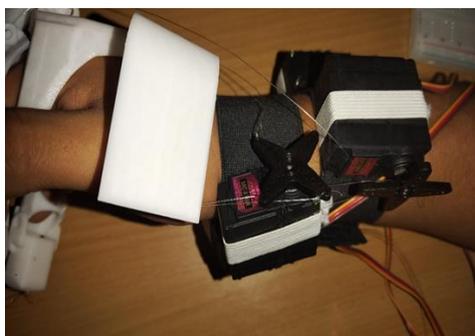


Figura 3: Sistema mecánico.

2.2 Sistema electrónico

Por otro lado, el sistema electrónico incluye el guante de imitación y el sensor EMG con el que se obtienen las señales electromiográficas. El guante de imitación está equipado con cuatro sensores flex estratégicamente ubicados para detectar la flexión de los dedos de la extremidad con buena movilidad.

Estos sensores son fundamentales para el funcionamiento del prototipo, ya que detectan los movimientos de la mano sana y envían los datos a la primera tarjeta ESP32. Esta tarjeta procesa los datos de los sensores flex y los envía mediante Wi-Fi a la segunda tarjeta ESP32. La segunda tarjeta ESP32 recibe las señales y las manda a los servomotores, que realizan los movimientos necesarios para proporcionar el movimiento de la órtesis.

Adicionalmente se incorpora un sensor electromiográfico (EMG) que se utiliza para monitorear la actividad muscular del paciente. Este sensor se conecta a tres electrodos el primero de estos se coloca en el punto cubital anterior, el segundo en el punto palmar anterior y el tercero puede colocarse en cualquier parte del cuerpo, pero en este caso se coloca en el codo del paciente. Estos electrodos registran señales que permiten al especialista dar un seguimiento al progreso de la rehabilitación del paciente, en la Figura 4 se muestra la distribución de los sensores flex en el guante de imitación del lado derecho, y del izquierdo la colocación adecuada de los electrodos que se conectan al sensor EMG.

Mientras que en la Figura 5 se puede observar el ensamble del prototipo de órtesis y el guante de imitación.

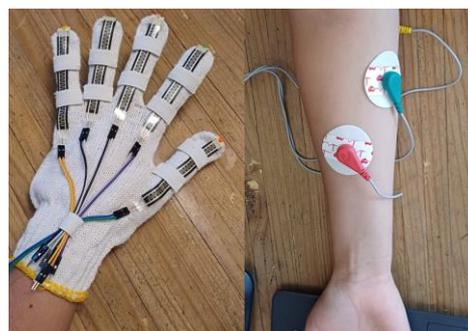


Figura 4: Sistema electrónico.

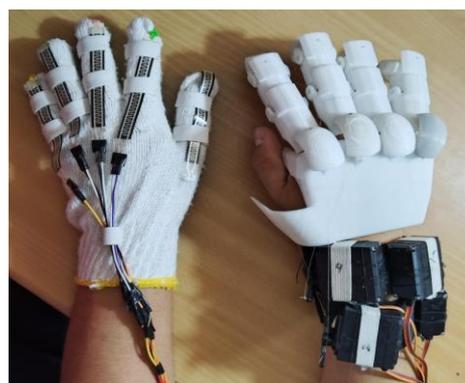


Figura 5: Ensamble final del prototipo.

3. Pruebas para rehabilitación con el prototipo

A Para asegurar que la órtesis diseñada cumpliera con su funcionalidad, se ejecutaron dos pruebas en sujetos de diferentes edades y géneros. Se elaboraron estas pruebas para evaluar la comodidad, el ajuste y la precisión de las señales electromiográficas (EMG) recopiladas durante el uso de la órtesis. Las personas que participaron en las pruebas iniciales no presentaban ningún tipo de lesión; por lo que se llevaron a

cabo pruebas con individuos saludables para evaluar la funcionalidad del dispositivo. El prototipo está diseñado para ser utilizado solo con la autorización previa de un médico y dependiendo del diagnóstico que este proporcione. Es factible que se adapte a diversos tipos de rehabilitación, sin embargo, es frecuente que sea evaluada y recomendada por un experto para asegurar que sea adecuada y segura para el paciente. Los objetivos fundamentales de las pruebas eran verificar que la órtesis se ajustara adecuadamente a la mano del sujeto, proporcionando el soporte necesario sin causar incomodidad. Además, se buscaba verificar que el sensor EMG detectará y registrará de manera precisa la actividad muscular ocurrida durante los movimientos de flexión y extensión de la mano y cada uno de los dedos. Igualmente, se llevaron a cabo preguntas detalladas acerca de la comodidad del dispositivo con el propósito de detectar posibles áreas de mejora.

Simultáneamente, se le colocaron los electrodos en los puntos motores del antebrazo del sujeto para registrar las señales EMG; estos se pueden observar con mayor detalle en la Figura 6.

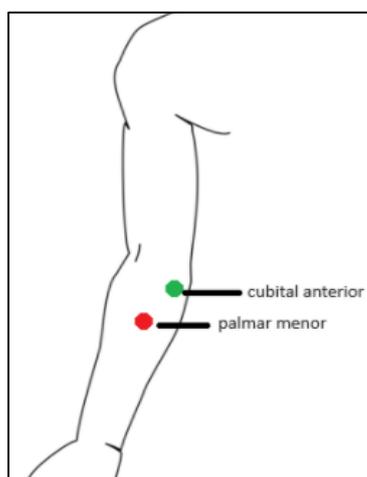


Figura 6: Puntos motores utilizados.
Fuente: Autoría propia.

Se supervisó la actividad muscular durante toda la prueba, con el objetivo de asegurar que los datos recopilados fueran precisos y claros para que un especialista pueda interpretarlos adecuadamente. En las secciones siguientes se presentan las pruebas llevadas a cabo.

3.1. Primera prueba

El objetivo de la prueba consiste en evaluar la adaptación de la órtesis a la mano de un hombre de 49 años y comprobar la precisión de las señales EMG. Para ello, el procedimiento consistió en colocar el guante de imitación en la mano izquierda del sujeto, debido a que es la que tiene la movilidad adecuada. Posteriormente, se le colocó la órtesis en la mano derecha y en ese mismo brazo se le colocaron los 3 electrodos, los cuales son necesarios para el funcionamiento del sensor electromiográfico. Una vez que todo fue colocado y ajustado, se formularon preguntas referentes con la comodidad del prototipo. También se le solicitó flexionar cada dedo de la mano, uno por uno, comenzando por el índice hasta el anular. En la Figura 7 se muestra cómo es la colocación de la órtesis y los electrodos en el sujeto uno.



Figura 7: Sujeto 1 con el prototipo.

3.2. Segunda prueba

El objetivo de la prueba consiste en evaluar la adaptación de la órtesis a la mano de una mujer de 47 años y comprobar la precisión de las señales EMG. El procedimiento para la realización de la prueba con el sujeto número dos, se replicó el procedimiento previamente descrito para el sujeto número uno. Asimismo, se evaluó la comodidad mediante cuestionamientos y se solicitó la realización de movimientos funcionales, como la apertura y cierre de la mano, y la movilidad independiente de cada dedo. En la Figura 8 se muestra como es la colocación de la órtesis y los electrodos en el sujeto dos.

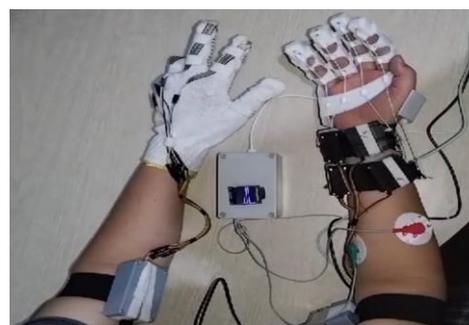


Figura 8: Sujeto 2 con el prototipo.

4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos durante las pruebas de rehabilitación proporcionaron datos significativos acerca de la funcionalidad y precisión del prototipo de órtesis. Se llevaron a cabo pruebas en dos individuos con distintas características demográficas con el propósito de analizar la seguridad, el ajuste y la precisión de las señales electromiográficas (EMG) recolectadas durante el uso del prototipo. A continuación, se presentan de forma detallada los resultados obtenidos de las pruebas llevadas a cabo y se realiza una comparación entre ellos.

4.1 Primera prueba: Hombre de 49 años

Ajuste y comodidad: Tras finalizar la prueba se observó que el ajuste de la órtesis fue firme pero cómodo, sin causar molestias considerables al sujeto. Durante la evaluación, el individuo manifestó una sensación de soporte, lo cual indica que el diseño se ajusta a individuos que comparten las mismas

características, es decir, a aquellos adultos que poseen manos de un tamaño promedio. Además, comentó que podría usarse durante sesiones prolongadas de rehabilitación sin causar una gran fatiga o irritación en la piel.

Precisión de las señales electromiográficas (EMG): Las señales EMG recopiladas durante esta prueba fueron precisas para la detección de la actividad muscular. Los movimientos individuales de cada dedo, así como la flexión y extensión de la mano, se registraron con precisión. Las amplitudes de las señales EMG aumentaron mientras el sujeto realizaba alguno de los movimientos indicados, lo que muestra la precisión del sensor EMG para capturar la actividad muscular.

Los incrementos de amplitud observados durante los movimientos y la línea estable durante los períodos de descanso indicaron un bajo nivel de ruido en las señales, lo cual sugiere una posición adecuada de los electrodos. La correlación entre los picos de amplitud y los movimientos de la mano indica una respuesta inmediata de las señales electromiográficas (EMG). En la Figura 9 se presenta una gráfica de las señales medidas durante la realización de las pruebas.

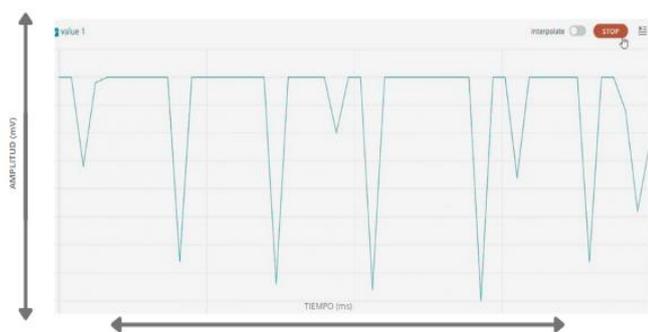


Figura 9: Señales EMG obtenidas del sujeto 1.

4.2 Segunda prueba: Mujer de 47 años

Ajuste y comodidad: Tras finalizar la prueba, se observó que el ajuste de la órtesis en la mano de la mujer era bueno, aunque le quedaba ligeramente grande. Comentó que, aunque sentía el soporte de la órtesis, había un espacio entre esta y sus dedos, y que un mejor ajuste le proporciona mayor comodidad. No obstante, afirmó que el dispositivo le brindó una excelente movilidad, sin limitar los movimientos naturales, lo que permitiría realizar sesiones prolongadas de rehabilitación sin causar una molestia significativa.

Precisión de las señales electromiográficas (EMG): Las señales EMG obtenidas durante esta prueba de igual manera fueron precisas, aunque mostraron una ligera diferencia en comparación a las obtenidas en la primera prueba. Se solicita al individuo la realización de movimientos simples, tales como la flexión y extensión de la mano y la flexión de cada dedo individualmente. Las amplitudes de las señales coincidieron con el momento en el que se realizaban los movimientos, demostrando de nuevo la capacidad de registrar la actividad muscular del sensor EMG.

La variación observada en la amplitud de las señales EMG puede deberse a diferencias en las características físicas, tales como la masa muscular y la estructura de la mano, así como a factores demográficos como la edad y el género de los participantes en la prueba. A pesar de que las discrepancias

observadas son mínimas, la paciente femenina indicó que el dispositivo no se ajustaba del todo bien. Esto resalta la relevancia de adaptar el dispositivo a cada usuario con el fin de asegurar su exactitud y comodidad. En la Figura 10 se presenta una gráfica de las señales medidas durante la realización de las pruebas.

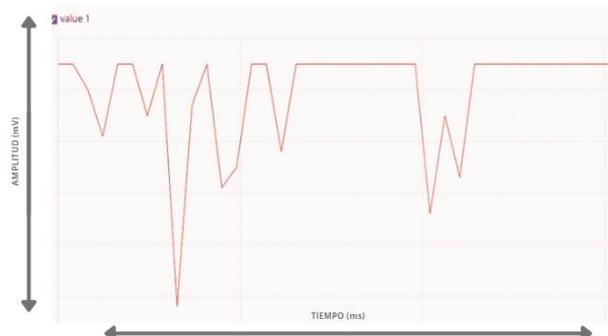


Figura 10: Señales EMG obtenidas del sujeto 2.

4.3 Comparación de pruebas

Al comparar los resultados obtenidos de ambas pruebas, se constató que el prototipo de órtesis detecta con precisión las señales EMG en individuos de distintas edades y géneros. En esta etapa del proyecto se enfocó en probar el sistema en dos pacientes sanos, por lo que el registro de las señales es fundamental para verificar que el sistema está trabajando adecuadamente, la siguiente parte es validar con el especialista el avance de los registros obtenidos con una interpretación adecuada en pacientes con movilidad reducida por alguna lesión. Por lo que, en esta etapa se tienen los registros y cambios de las señales, pero aún no se tiene la interpretación del especialista.

En la Figura 11, se exhibe un comparativo de las señales medidas en ambos individuos, en el cual se pueden apreciar con precisión las discrepancias entre cada uno de ellos, las cuales dependen de las características físicas y demográficas de cada uno. En consecuencia, la discrepancia de amplitud y longitud en las señales, así como los picos en ellas, depende del movimiento de la mano sana que es imitada por la otra mano. En el caso de la mujer, se realizó un doble ajuste debido al tamaño de la mano que tiene.



Figura 11: Comparación de las señales EMG obtenidas de ambos pacientes.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño y puesta en marcha de un prototipo de órtesis, el cual se centra en el proceso de rehabilitación de pacientes con movilidad reducida que han sufrido algún accidente. Se estableció que el diseño del prototipo sea confortable y funcional, por lo que se optó por una estructura modular manufacturada aditivamente con PETG, ya que es un material suave, que no se requiere gran cantidad para su fabricación, lo que contribuye a la sostenibilidad del dispositivo final. Otra ventaja del prototipo se encuentra en la inclusión del guante de imitación con sensores flex que miden las señales de la mano sana que se replicarán con la órtesis en la mano lesionada. Mientras que en la órtesis se incluyó un sensor EMG con el que el fisioterapeuta puede monitorear las señales del músculo y, en consecuencia, el progreso del proceso de rehabilitación del paciente.

En esta etapa se consideraron dos sujetos de prueba con diferencias antropométricas. A fin de comprobar el funcionamiento adecuado del prototipo, se llevaron a cabo pruebas que se centraron en las características de comodidad, ajuste y lectura de las señales EMG. Para el sujeto masculino, el ajuste fue adecuado; sin embargo, en el sujeto femenino esto no se cumplió inicialmente, pero dado que el prototipo es modular, posteriormente se ajustó al tamaño de la mano mediante un reajuste en las piezas de la órtesis. Una vez colocada la órtesis y el guante de imitación, se validó la lectura de las señales EMG en una pantalla TFT. Para esta prueba, ambos individuos llevaban a cabo movimientos con el guante de imitación y estos son imitados con la órtesis, con el objetivo de obtener las señales EMG. En ambos casos, se graficaron estas señales leídas, las cuales son variables debido a que corresponden con las características de cada individuo.

Finalmente, con estos resultados se puede mejorar el diseño de la órtesis, incrementar la comodidad y precisión de todo el dispositivo, ya que es posible realizar la manufactura en otro tipo de material. Asimismo, se puede implementar una técnica de control para el movimiento de cada servomotor asociado con cada dedo de la órtesis, con el fin de que los desplazamientos se realicen de manera más precisa y proponiendo un esquema de control de lazo cerrado con mejores prestaciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaria de Investigación y Posgrado el apoyo otorgado por medio de los proyectos SIP20242197 y SIP20242569. El primer, tercer y cuarto autor agradecen por la beca BEIFI otorgada.

Referencias

- Abass, Z., Meng, W., Xie, S.Q., Zhang, Z. (2019) A robust, practical upper limb electromyography interface using dry 3D printed electrodes. In: 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, 08-12 Jul 2019, Hong Kong. IEEE, pp. 453-458. ISBN 9781728124933
- Andrade A.O., Bourget J., Costa S., Pereira A., Okereke M.I., Vieira M.F. (2019). Ergonomic Assessment of an Active Orthosis for the Rehabilitation of Flexion and Extension of Wrist. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018. IFMBE Proceedings, 68(2). Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-10-9038-7_104
- Asadi Dereshgi H.i, Demir D, Yilmaz S., Abderrahmane A, Abderrahmane B (2023). Advancements in Active Dynamic Orthoses: A Comprehensive Review of Hand Muscle Rehabilitation Strategies, *Join SSR*, 4(2), pp. 177–186. DOI: 10.58769/joinssr.1391623.
- Cantù E., Fapanni T., Giorgi G., Narduzzi C., Sardini E., Serpelloni M., Tonello S. (2021). Printed Multi-EMG Electrodes on the 3D Surface of an Orthosis for Rehabilitation: A Feasibility Study. *IEEE Sensors Journal*. 21(13), pág. 14407 - 14417 DOI: 10.1109/JSEN.2021.3059308
- Fischer, H. C., Triandafilou, K., Thielbar, K., Ochoa, J., & Lazzaro, E. (2016). Use of a portable assistive glove to facilitate rehabilitation in stroke survivors with severe hand impairment. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(3), 344-351.
- Jiang, C., Chen, J., He, J., Meng, L., Pan, S., Su, X., & Zhu, X. (2023). Biorobotics research for non-invasive myoelectric neural interfaces for upper-limb prosthetic control: A 10-year perspective review. *National Science Review*, 10(5), nwad048.
- Geethanjali, P. (2016). Myoelectric control of prosthetic hands: State-of-the-art review. *Med Devices (Auckl)*, 9, 247-255.
- Lodus (2022). Estadísticas de accidentes en manos en España y México. <https://www.lodusglobal.com/blog/accidentes-en-manos-espana-mexico#:~:text=La%20incidencia%20de%20los%20accidentes,afectan%20a%20mu%C3%B1ecas%20y%20manos>
- Medina F., Perez K., Cruz-Ortiz D., Ballesteros M., Chairez I. (2021). Control of a hybrid upper-limb orthosis device based on a data-driven artificial neural network classifier of electromyography signals. *Biomedical Signal Processing and Control*. 68, pág. 102624. DOI: 10.1016/j.bspc.2021.102624
- Obaid, N. (2013, 27 noviembre). Ortesis de mano [Diapositivas]. SlideShare. <https://es.slideshare.net/slideshow/ortesis-de-mano/28671366>
- Rzyman G, Szkopek J, Redlarski G, Palkowski A., (2020). Upper Limb Bionic Orthoses: General Overview and Forecasting Changes. *Applied Sciences*. 10(15), pág. 5323. DOI: 10.3390/app10155323
- Strazza, A., Verdini, F., Burattini, L., Fioretti, S., Di Nardo, F. (2018). Time-frequency analysis of surface EMG signals for maximum energy localization during walking. In: Eskola, H., Väisänen, O., Viik, J., Hyttinen, J. (eds) *EMBEC & NBC 2017*. EMBEC NBC 2017 2017. IFMBE Proceedings, vol 65. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5122-7_124
- Vaca Benitez L. M., Tabie M., Will N., Schmidt S., Jordan M. (2013) Exoskeleton Technology in Rehabilitation: Towards an EMG-Based Orthosis System for Upper Limb Neuromotor Rehabilitation. *Journal of Robotics*, 2013, pág. 13. DOI: 10.1155/2013/610589
- Yurkewich, A., Kozak, I., Hebert, D., Wang, R., & Mihailidis, A. (2020). Hand Extension Robot Orthosis (HERO) Grip Glove: Enabling independence amongst persons with severe hand impairments after stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 33.