

Aplicación de Guantes Hápticos en un Entorno Interactivo como Apoyo para la Intervención Funcional de la Mano

Andrea Caiña Dos Santos

Master en Bioinformática para las
ciencias de la salud (MUBICS)

Facultad de informática
Universidade da Coruña (UDC)
A Coruña, España
andrea.caina.dossantos@udc.es

Javier Pereira Loureiro
Departamento de Fisioterapia,
Medicina y Ciencias Biomédicas

Universidade da Coruña, CITIC
A Coruña, España
javier.pereira@udc.es

Manuel Lagos Rodríguez
Universidade da Coruña, CITIC
A Coruña, España
m.lagos@udc.es

Abstract— El presente trabajo de fin de máster explora la aplicación de los guantes hápticos Manus Quantum Metagloves como una herramienta para la rehabilitación de la mano. A través del análisis de datos, se evaluaron tres parámetros clave: rango articular, velocidad articular y movimientos de abducción-aducción. Los resultados muestran limitaciones articulares específicas, especialmente en las articulaciones interfalángicas y metacarpofalángicas, así como patrones funcionales coherentes con la anatomía y la práctica clínica. Además, se diseñó un entorno virtual con fines terapéuticos. Este estudio valida el potencial del uso de las tecnologías de captura de movimiento como complemento objetivo en la evaluación funcional de la mano, aportando valor tanto en entornos clínicos como en investigación.

Palabras clave — *Terapia ocupacional, Rehabilitación de la mano, Guantes hápticos, Manus Quantum Metagloves, Captura de movimiento, Evaluación funcional, Unity.*

I. INTRODUCCIÓN

La mano es una de las estructuras más complejas y funcionales del cuerpo. Permite explorar el entorno, comunicarnos, trabajar, crear, cuidar y participar activamente en las ocupaciones de la vida diaria. A través de la mano se expresan intenciones, emociones e independencia. Por eso, cuando esta se ve afectada por una lesión, enfermedad o limitación, su impacto va mucho más allá de lo físico: limita la autonomía, la autoestima y la participación en la vida diaria.

Por ende, la rehabilitación de la mano se convierte en un proceso fundamental. No solo persigue recuperar el movimiento o la fuerza, sino también devolver la funcionalidad y calidad de vida. Cada gesto recuperado representa una oportunidad para retomar actividades cotidianas, laborales o personales con mayor autonomía [1].

En los últimos años, el avance de la tecnología ha abierto nuevas posibilidades dentro del ámbito terapéutico. La integración de dispositivos hápticos, entornos interactivos y sistemas de captura de movimiento está transformando la forma en la que se aborda la rehabilitación. Estas herramientas permiten no solo diseñar intervenciones más

dinámicas y motivadoras, sino también registrar datos objetivos que enriquecen el análisis clínico, favoreciendo la personalización del tratamiento y permitiendo un seguimiento más individualizado del usuario [2].

Este proyecto surge precisamente en ese punto de intersección entre la clínica y la tecnología. Para ello, se plantea un sistema que combine un entorno interactivo con tecnología háptica, utilizando los guantes Manus Quantum Metagloves [3] como una posible herramienta terapéutica significativa en la rehabilitación de mano.

Por esta razón, este proyecto tiene como finalidad abordar cuatro objetivos principales. En primer lugar, se pretende explorar el uso de los guantes hápticos Manus Quantum Metagloves en un entorno interactivo diseñado para apoyar procesos de rehabilitación de la mano, integrando la tecnología y participación significativa como base para una intervención centrada en la persona, y permitiendo al mismo tiempo recoger datos objetivos que aporten valor clínico a la práctica.

En segundo lugar, se propone desarrollar un entorno de juego interactivo que motive al usuario y fomente su participación en actividades orientadas a la rehabilitación del uso funcional de la mano.

En tercer lugar, se plantea integrar los guantes Manus Quantum Metagloves como herramienta tecnológica dentro del proceso terapéutico, evaluando su aplicabilidad y viabilidad en un contexto clínico real.

Finalmente, se contempla analizar las métricas registradas por los guantes, como los rangos articulares, la velocidad y los patrones de movimiento, con el propósito de complementar el razonamiento clínico del profesional y apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la rehabilitación.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Estado actual de la rehabilitación funcional de mano

La rehabilitación funcional de la mano ha evolucionado en los últimos años, combinando enfoques tradicionales con nuevas tecnologías orientadas a la mejora de la función en usuarios con lesiones o patologías específicas. La terapia de mano ha sido centrada en la recuperación del movimiento funcional a través de técnicas manuales, ortesis, ejercicios específicos y abordajes personalizados en función de la afectación de la persona. En este sentido, la clínica actual destaca la importancia del razonamiento clínico como base para la intervención, integrando la valoración biomecánica, sensorial y funcional [4].

La rehabilitación funcional de la mano presenta desafíos debido a la complejidad anatómica y funcional de esta región. La precisión de los movimientos, la coordinación interarticular y la sensibilidad, son elementos clave que se ven comprometidos tras una lesión, cirugía o proceso patológico. La recuperación efectiva requiere un abordaje integral donde se llega a considerar la restauración de la movilidad como la reintegración funcional de los gestos cotidianos y las actividades significativas para el usuario [5].

Por otra parte, la incorporación de tecnologías en la rehabilitación funcional de la mano abre nuevas posibilidades terapéuticas. El uso de tecnologías hápticas, ortesis dinámicas inteligentes o realidad virtual inmersiva está redefiniendo los modelos tradicionales de intervención. Estas herramientas permiten trabajar la fuerza, el rango de movimiento y la coordinación funcional de la mano, al tiempo que favorecen la implicación del paciente mediante experiencias interactivas y motivadoras basadas en la gamificación. Además, contribuyen a reforzar la participación activa en el proceso terapéutico gracias a dinámicas diseñadas para mejorar la constancia y el compromiso durante la rehabilitación [6].

B. Anatomía y biomecánica de la muñeca y mano

La muñeca y la mano constituyen una estructura compleja e interdependiente cuya anatomía y biomecánica resultan esenciales para comprender el abordaje rehabilitador. La muñeca está compuesta por ocho huesos del carpo organizados en dos filas (escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, trapecio, trapezoide, grande y ganchoso) que se articulan con el radio y el cúbito por encima, y con los metacarpianos por debajo, como se observa en la Figura 1 [7].

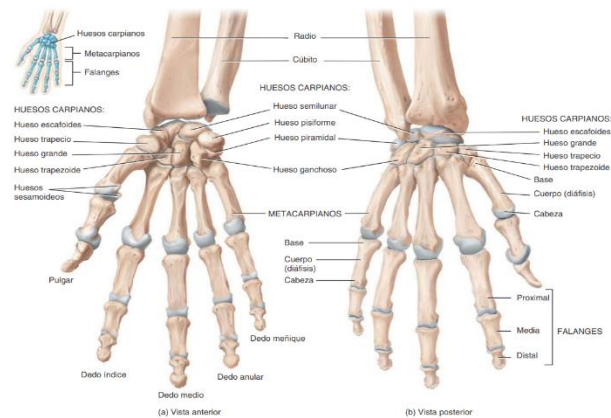


Figura 1. Vista anterior y posterior de los huesos de la muñeca y la mano. [7].

La mano, por otro lado, está formada por cinco metacarpianos y catorce falanges, articuladas en las articulaciones metacarpofalángicas (MCP), interfalángicas proximales (PIP) e interfalángicas distales (DIP).

C. Uso de la tecnología háptica en rehabilitación

La tecnología háptica es una herramienta prometedora en el ámbito de la rehabilitación motora, especialmente en el tratamiento de alteraciones en la mano. Esta tecnología permite simular el sentido del tacto mediante dispositivos que generan retroalimentación táctil, facilitando la interacción del usuario con entornos reales o virtuales a través de estímulos físicos controlados [8].

Los sistemas hápticos pueden clasificarse en dos grandes grupos: los dispositivos kinestésicos, que proporcionan información relacionada con la posición, y los dispositivos cutáneos, que actúan sobre la piel generando sensaciones como vibración [9]. En el ámbito rehabilitador, estas tecnologías se incorporan frecuentemente en entornos de realidad virtual con el objetivo de favorecer el aprendizaje motor, incrementar la motivación del usuario y permitir una intervención más personalizada [10].

En esta línea, diversos estudios y proyectos han explorado la integración de sistemas robóticos y tecnologías hápticas como elementos clave en la rehabilitación del miembro superior. El uso de entornos virtuales combinados con dispositivos hápticos permite no solo una interacción con objetos simulados, sino también la recogida de datos sobre el rendimiento del paciente. Estas plataformas interactivas fomentan la repetición de tareas funcionales y pueden adaptarse a las necesidades específicas de cada persona, ofreciendo una intervención personalizada que mejora la eficacia terapéutica y el compromiso del usuario en su proceso de recuperación [11].

D. Guantes hápticos actuales en el mercado

Los guantes hápticos emergen como una propuesta innovadora para complementar la terapia tradicional, al facilitar una experiencia interactiva que estimula la motivación del paciente y permite adaptar las intervenciones a sus necesidades. A continuación, se describen tres modelos representativos actualmente disponibles en el mercado:

1) SenseGlove Nova 2

El guante SenseGlove Nova 2 (Figura 2) se caracteriza por ofrecer retroalimentación kinestésica mediante un sistema de actuadores que generan resistencia en los dedos, simulando la interacción con objetos reales. Este dispositivo permite a los usuarios experimentar sensaciones de rigidez y forma dentro de entornos de realidad virtual, lo que lo convierte en una herramienta especialmente útil en la rehabilitación funcional y el reaprendizaje de actividades de la vida diaria [12].



Figura 2. SenseGlove Nova 2. [12]

2) Gloveone

Gloveone (Figura 3), desarrollado por la empresa española NeuroDigital Technologies, ofrece retroalimentación háptica a través de vibraciones localizadas en distintas zonas de la mano. Su diseño es ligero y su compatibilidad con sistemas de realidad virtual lo convierten en una opción viable para la estimulación sensorial, la rehabilitación cognitiva y la exploración de entornos digitales interactivos [13].



Figura 3. Gloveone. [13]

3) Neofect Smart Glove

El Neofect Smart Glove (Figura 4) está orientado principalmente a la rehabilitación domiciliaria. Este guante emplea sensores de movimiento para registrar los gestos del usuario y los combina con una plataforma gamificada que propone ejercicios terapéuticos adaptados a la persona [14].



Figura 4. Neofect Smart Glove. [14]

Revisión de estudios previos con guantes hápticos en rehabilitación de mano

En estos últimos años, se han desarrollado diversos proyectos y estudios que exploran el uso de los guantes hápticos como herramienta de apoyo en la rehabilitación motora, especialmente en el miembro superior. Esta línea de investigación ha crecido con el objetivo de facilitar intervenciones más precisas, personalizadas y motivadoras mediante la tecnología [2].

Una revisión sistemática reciente evaluó el impacto del uso combinado de guantes hápticos con realidad virtual semi-inmersiva en pacientes con ictus, encontrando mejoras significativas en la función motora del miembro superior y en la recuperación funcional de la mano [15]. Además, se observó que este tipo de dispositivos permite al usuario interactuar con entornos virtuales que simulan actividades de la vida diaria, potenciando el aprendizaje motor.

Por otro lado, se han desarrollado propuestas más centradas en el diseño y validación de prototipos. Tales como un sistema que emplea sensores de flexión para medir el rango de movimiento articular de los dedos, integrando una interfaz gráfica para el análisis objetivo de la movilidad [16]. De forma similar, se diseñaron guantes basados en mecanismos robóticos de tendones suaves, permitiendo una respuesta táctil realista y controlada, con potencial para ser aplicado tanto en rehabilitación como en interfaces hápticas avanzadas [17].

Asimismo, un estudio se centró en el diseño de un guante virtual orientado a la rehabilitación de jóvenes con paraplejia torácica, destacando su enfoque accesible y su integración en un entorno de ejercicios virtuales [18]. Por último, en un proyecto se propuso un guante háptico con retroalimentación, focalizado en los dedos índice y medio, y diseñado específicamente para tareas motoras finas, aportando una base técnica útil para futuros desarrollos funcionales [19].

Estos estudios reflejan el creciente interés en la utilización de guantes hápticos como parte de estrategias para una rehabilitación innovadora. Aunque en muchos casos los dispositivos aún se encuentran en fases de prototipo o validación inicial, sus resultados preliminares indican un gran potencial para ser integrados en programas terapéuticos individualizados y orientados a retomar actividades o tareas cotidianas.

III. MATERIAL Y MÉTODOS

Esta sección describe el desarrollo técnico y metodológico del proyecto, desde la creación del entorno interactivo en Unity hasta la integración con los guantes Manus Quantum Metagloves [3] mediante el software Manus Core [20]. Se detallan también las métricas seleccionadas, el proceso de recogida y análisis de datos, y los marcos terapéuticos y sociales que sustentan el enfoque de intervención.

A. MATERIALES

GUANTES MANUS QUANTUM METAGLOVE

Los guantes hápticos Manus Quantum Metagloves (Figura 5) representan una evolución en la captura de movimiento e interacción con entornos virtuales, siendo utilizados principalmente en áreas como la realidad virtual, la simulación industrial, los videojuegos y la investigación tecnológica. Están diseñados para ofrecer una lectura precisa y estable del movimiento de cada dedo mediante un sistema de sensores magnéticos, que permiten registrar tanto la posición absoluta como relativa de las falanges sin necesidad de cámaras externas ni sistemas adicionales [3].



Figura 5. Guantes Manus Quantum Metagloves [3]

Entre sus características más destacadas se encuentra una latencia baja, lo que proporciona una respuesta prácticamente en tiempo real durante la ejecución de tareas interactivas. Además, su arquitectura Plug & Play permite una integración sencilla con Unity [21] o Unreal Engine [22]. Esta adaptabilidad facilita su implementación en distintos entornos, incluso fuera del ámbito para el que fueron concebidos. Por ejemplo, aunque los Manus Quantum Metagloves están principalmente orientados a sectores como la robótica o la realidad virtual, su precisión en la captación del movimiento de los dedos ha permitido su aplicación en el ámbito clínico, especialmente en el análisis del rango articular y la rehabilitación motora fina

MANUS CORE

Para capturar los movimientos de la mano, se utilizó el software Manus Core (Figura 6), el cual permite la gestión de los guantes, incluyendo la calibración, la visualización en tiempo real, la configuración del entorno y la exportación de datos. Este software requiere la creación de un usuario y una licencia DEMO activa, habilitada mediante un dispositivo dongle USB [20]. En este proyecto se empleó la versión 2.5.1 de Manus Core [23]. Aunque en la actualidad ya se encuentra disponible la versión 3.0.1, se aplica la versión anterior debido a problemas de compatibilidad, ya que el dongle de activación no reconoció correctamente la versión más reciente.

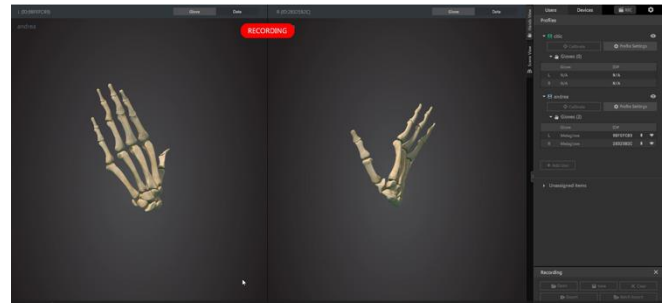


Figura 6. Manus Core. [20]

UNITY

Unity es una plataforma de desarrollo ampliamente utilizada para la creación de entornos interactivos, especialmente en los sectores de los videojuegos, la simulación y la realidad virtual [21]. En el presente proyecto, se empleó para diseñar un entorno tridimensional en el que se representan los movimientos de la mano capturados por los guantes Manus. La disponibilidad de un plugin específico de Manus Core para Unity [24], facilitó la integración de forma visual y funcional de los movimientos de la mano en dicho entorno. Se utilizó la versión 2021.3.32f1 LTS de Unity por su estabilidad y compatibilidad con la versión 2.5.1 del software Manus Core.

RSTUDIO

RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para el lenguaje de programación R, utilizado en este proyecto como herramienta para el tratamiento y organización de los datos obtenidos [25]. Su interfaz permite importar, visualizar y estructurar grandes volúmenes de información de forma eficiente, facilitando así el análisis posterior de las métricas registradas por los guantes Manus.

B. MÉTODOS

Diseño del sistema interactivo

El entorno interactivo se diseñó con un enfoque funcional y terapéutico, con el objetivo de evaluar patrones motores simples como el alcance y la coordinación óculo-manual mediante la interacción con estímulos visuales. La escena consiste en una mesa blanca con dos botones virtuales: uno rojo y otro azul (Figura 7). Al pulsar cualquiera de ellos con una de las manos, la mesa cambia al color correspondiente. Este comportamiento se implementó mediante un script propio, que modifica dinámicamente el material asignado al objeto "mesa" en función del botón activado.

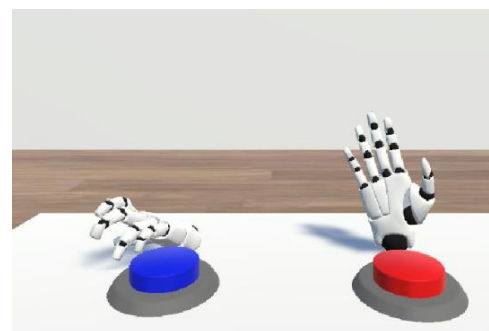


Figura 7. Vista general del entorno interactivo.

Para la integración del movimiento real de las manos dentro del entorno virtual, se emplearon prefabs y scripts incluidos en el plugin oficial de Manus Core (v2.5.1) [20], entre ellos *ManusHand_L*, *ManusHand_R*, *HandHaptics*, *ColliderGenerator*, *GrabbableObject*, y *InteractionHand*. Los botones se añadieron desde la carpeta de interacciones del mismo plugin, utilizando el prefab *PushButton*, que incluye los scripts *PushButton*, *CollisionArea* y un *BoxCollider*. Todos estos elementos permitieron una implementación rápida y eficaz de la interacción sin necesidad de programar la lógica de colisión desde cero.

Se diseñó además un menú inicial, controlado mediante otro script personalizado, que permite iniciar el juego. Aunque el sistema no se aplicó en población clínica, se realizaron validaciones funcionales con participantes voluntarios para verificar la correcta conexión entre el movimiento real y la respuesta en el entorno digital.

Integración con el sistema Manus Core

Para iniciar la conexión entre los guantes Manus Quantum Metagloves [3] y el sistema, se conectó el dongle USB [20], A continuación, y con el objetivo de comenzar con la captura de datos, se realizó la calibración individual de cada guante, siguiendo las indicaciones ofrecidas por el propio sistema.

Una vez completada la calibración del sistema, se habilitó la visualización de ambas manos virtuales, incluyendo la flexión de cada dedo en grados. Posteriormente, se inició la grabación del movimiento de las manos en tiempo real. Durante cada sesión, se registraron los datos articulares a una frecuencia de 60 fotogramas por segundo (FPS). Al finalizar la grabación, los datos se exportaron en formato .csv, seleccionando el “espacio” como carácter separador para evitar errores durante la importación.

Selección de métricas

Las métricas utilizadas en este proyecto fueron seleccionadas tras varias reuniones con una terapeuta ocupacional especializada en rehabilitación de la mano, con el objetivo de identificar qué parámetros son más relevantes en un contexto clínico real. Tras ello, se definieron tres métricas principales:

- 1) Rango articular de los dedos
- 2) Mayor velocidad articular
- 3) Mayor abducción y aducción de los dedos

Captura de datos

La recopilación de métricas se realizó a través del software Manus Core en dos partes. En una primera parte, llevada a cabo en el Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CITIC), participaron personas voluntarias que ya presentaban alguna limitación en las manos. Durante estas sesiones, se colocaron los guantes hápticos a cada participante, se calibró el sistema y se realizaron pruebas breves para comprobar la validez del registro de datos. Esta fase inicial tenía como objetivo principal verificar que los datos se registraban correctamente y que el sistema funcionaba de forma estable. Las sesiones

tuvieron una duración de entre 2 y 3 minutos, y consistieron en realizar gestos funcionales básicos como la flexión de cada dedo por separado, movimientos de abducción y aducción, y gestos globales como “mano en garra” o cierre del puño (Figura 8). Esto permitió para validar la velocidad de apertura y cierre de cada articulación de los dedos.



Figura 8. Movimiento de la mano. Moore et al. (2007) [26]

Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos se desarrolló íntegramente utilizando el entorno RStudio. Los archivos generados tras cada sesión fueron exportados desde Manus Core en formato .csv. En un primer momento se empleó el delimitador por comas, siguiendo la configuración recomendada por el manual del software [27]; no obstante, se detectaron errores de lectura debido al uso de la coma como separador decimal en el sistema operativo. Para solventarlo, se estableció el carácter “espacio” como delimitador alternativo. Aun así, se optó por convertir los archivos a formato Excel (.xlsx), ya que ofrecían una visualización más clara y facilitaban su manipulación durante el análisis en RStudio.

Durante esta fase, se seleccionaron las variables correspondientes a las tres métricas principales del estudio: flexión articular, velocidad angular y desplazamiento lateral. Las columnas que contenían el término *Flex* y el nombre de la articulación fueron empleadas para analizar los ángulos de flexión (en grados); las terminadas en *AngularVelocity* permitieron estudiar la velocidad angular (en grados por segundo); y aquellas que incluían el término *Spread* se utilizaron para cuantificar los movimientos de abducción y aducción (también en grados).

Para cada métrica, se extrajeron los valores máximos registrados por articulación, diferenciando entre manos y segmentando los resultados por participante. El tratamiento se realizó sobre los datos originales, sin modificaciones, con el fin de garantizar su integridad y trazabilidad. Las operaciones de lectura, filtrado y visualización se llevaron a cabo mediante funciones pertenecientes a librerías especializadas del entorno R: *readxl*, utilizada para importar hojas de cálculo; *dplyr*, aplicada en la organización, filtrado y transformación de los datos; y *ggplot2*, empleada para la generación de gráficos orientados al análisis comparativo.

1) Marco de la Terapia Ocupacional

Este proyecto se desarrolló desde el Modelo de Ocupación Humana (MOHO), un marco teórico utilizado en terapia ocupacional que propone que la participación en ocupaciones significativas es esencial para la salud y el bienestar del individuo. Este modelo considera que el desempeño ocupacional surge de la interacción dinámica entre tres componentes principales: la volición, la habituación y las capacidades de desempeño, todo ello en constante relación con el entorno físico y social [28].

Desde este contexto, la intervención propuesta basada en el uso de guantes hápticos en un entorno interactivo se alinea con los principios del MOHO, al facilitar la participación activa de la persona en una actividad significativa, adaptada a sus capacidades e intereses. Además, la integración de la tecnología se plantea como un recurso complementario para promover la motivación, potenciar el uso funcional de la mano y contribuir a la autonomía en el desempeño de actividades de la vida diaria.

2) Proyecto aprendizaje servicio

Este Trabajo de Fin de Máster se enmarca en un proyecto de Aprendizaje-Servicio (ApS) impulsado por la Universidade da Coruña. La metodología ApS permite combinar la formación académica con la participación en una experiencia real de servicio a la comunidad, estableciendo un vínculo directo entre el conocimiento adquirido y su aplicación en contextos sociales relevantes.

En este caso, el proyecto se llevó a cabo en colaboración con una Terapeuta Ocupacional y su clínica especializada en rehabilitación de mano, y contó con la participación voluntaria y gratuita de tres personas usuarias que se realizaron la actividad propuesta. Esta participación permite validar el sistema desde una perspectiva práctica, asegurando que el desarrollo tecnológico sea orientado a necesidades reales y contribuya de manera significativa al bienestar de las personas.

El enfoque ApS refuerza, además, el compromiso social de la universidad y del estudiantado, fomentando valores como la responsabilidad, la empatía y la implicación activa en la mejora de la calidad de vida de la población.

IV. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de los datos recogidos mediante los guantes hápticos Manus Quantum Metagloves. Se valoraron tres parámetros clave: la amplitud de movimiento de las articulaciones digitales, la velocidad articular durante los gestos de apertura y cierre de la mano, y los movimientos de abducción y aducción de los dedos (también denominados movimientos de separación o “spread”).

A. Resultados del Rango Articular

Para el análisis del rango articular (Figura 9), se establecieron previamente valores de referencia a partir de diversas fuentes bibliográficas de anatomía funcional. Estos rangos representan los grados articulares funcionales normales utilizados en actividades de la vida diaria. Se consideraron como referencia los siguientes márgenes de flexión articular (Tabla I).



Figura 9. Flexión articular del 2do dedo. Moore et al. (2007) [26]

TABLA I. Rangos funcionales normales de referencia

Rangos articulares		
Articulación	Min.	Max.
CMC	45	50
MCP	80	90
PIP	100	115
DIP	80	90

A partir de estos valores de referencia, se analizaron los datos recogidos mediante los guantes Manus Quantum Metagloves. En el presente trabajo, solo se presentan las articulaciones que mostraron valores por debajo del rango funcional normal, ya que se consideraron indicativas de una posible limitación articular. Cada uno de los tres participantes evaluados presenta, al menos en una de sus manos, limitaciones en una o varias articulaciones digitales. Cabe señalar que todos los sujetos colaboraron de forma voluntaria, y presentaban alguna condición previa que justificaba su inclusión en esta fase exploratoria del estudio (intervenciones quirúrgicas, limitaciones funcionales o antecedentes patológicos en la mano).

En el caso del participante 01, se observan limitaciones tanto en la mano izquierda como en la derecha. En la mano izquierda, las limitaciones afectan a la flexión de las articulaciones Interfalángica distal (DIP) del pulgar y del dedo medio, así como a las articulaciones Metacarpofalángicas (MCP) del dedo anular y meñique (Tabla II). En la mano derecha, se identificaron valores reducidos en la flexión de las articulaciones MCP del índice, medio y meñique, además de la DIP del pulgar (Tabla III).

TABLA II. Limitaciones de la mano Izq. Participante 01

Participante 01_Mano Izq		
Articulación	Rango articular (°)	Evaluación
Thumb_PIP_Flex	54.68	Limitación
Middle_DIP_Flex	69.99	Limitación
Ring_MCP_Flex	49.42	Limitación
Pinky_MCP_Flex	57.73	Limitación

TABLA III. Limitaciones de la mano Dcha. Participante 01

Participante 01_Mano Dcha		
Articulación	Rango articular (°)	Evaluación
Thumb_PIP_Flex	56.13	Limitación
Index_MCP_Flex	42.06	Limitación
Ring_MCP_Flex	47.44	Limitación

Pinky_MCP_Flex	65.07	Limitación
----------------	-------	------------

El participante 02 también presenta limitaciones en ambas manos. En la izquierda, se observaron restricciones en la flexión de las articulaciones DIP del pulgar, índice, anular y meñique, así como en la interfalángica proximal (PIP) del pulgar (Tabla IV). En la mano derecha, se observaron limitaciones articulares en la DIP del pulgar y del dedo anular, y en la PIP del pulgar (Tabla V).

TABLA IV. Limitaciones de la mano Izq. Participante 02

Participante 01_Mano Izq		
Articulación	Rango articular (°)	Evaluación
Thumb_PIP_Flex	46.35	Limitación
Thumb_DIP_Flex	59.40	Limitación
Index_DIP_Flex	69.99	Limitación
Ring_DIP_Flex	69.99	Limitación
Pinky_DIP_Flex	69.99	Limitación

TABLA V. Limitaciones de la mano Dcha. Participante 02

Participante 02_Mano Dcha		
Articulación	Rango articular (°)	Evaluación
Thumb_PIP_Flex	38.47	Limitación
Thumb_DIP_Flex	45.80	Limitación
Ring_DIP_Flex	69.99	Limitación

Por último, el participante 03 mostró limitaciones de flexión únicamente en la articulación PIP del pulgar izquierdo (Tabla VI), mientras que en la mano derecha se identificaron restricciones en las articulaciones DIP del pulgar, anular y meñique (Tabla VII).

TABLA VI. Limitaciones de la mano Izq. Participante 03

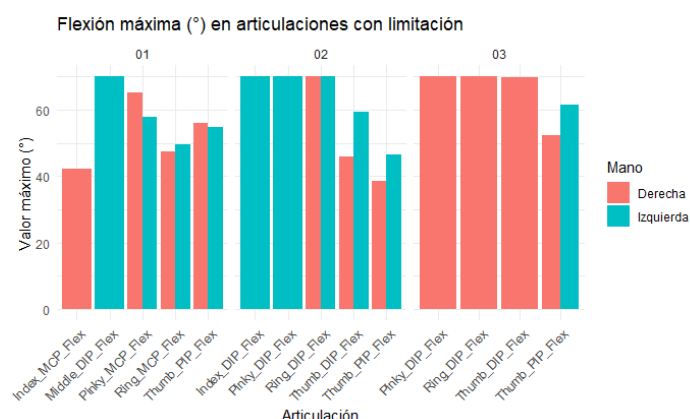
Participante 03_Mano Izq		
Articulación	Rango articular (°)	Evaluación
Thumb_PIP_Flex	61.40	Limitación

TABLA VII. Limitaciones de la mano Dcha. Participante 03

Participante 03_Mano Dcha		
Articulación	Rango articular (°)	Evaluación
Thumb_PIP_Flex	52.23	Limitación
Thumb_DIP_Flex	69.73	Limitación
Ring_DIP_Flex	69.99	Limitación
Pinky_DIP_Flex	69.99	Limitación

De forma complementaria, la representación gráfica permite comparar visualmente los valores máximos de flexión en las articulaciones limitadas de cada participante, diferenciando entre mano izquierda y derecha (Gráfica 1). En ella se puede observar que, en general, las articulaciones MCP y DIP fueron las más frecuentemente afectadas. Además, se aprecia una

tendencia a que la mano derecha presenta un mayor número de articulaciones limitadas.



Gráfica 1: Representación Gráfica de Limitaciones en el Rango Articular Máximo por Participante y Mano.

B. Resultados de la Velocidad Articular

Además del análisis del rango articular, se examinó la velocidad angular de las articulaciones durante las tareas de apertura y cierre de la mano. Para cada participante se identificó la articulación que alcanzó la mayor velocidad angular registrada (medida en grados por segundo), como indicador complementario de la fluidez y eficiencia del movimiento.

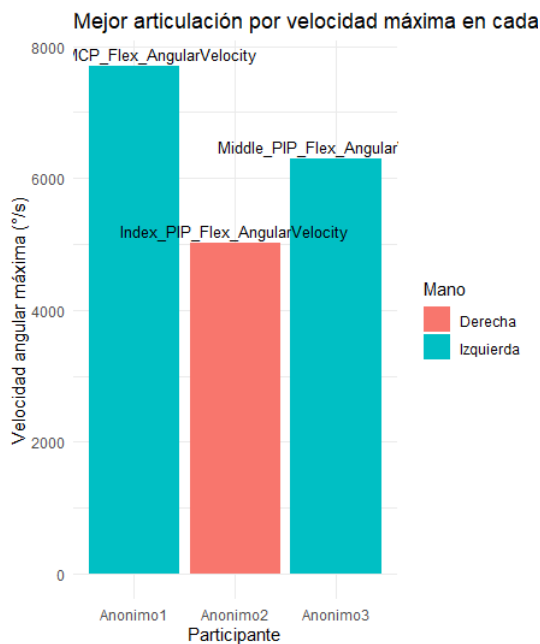
En la Tabla VIII se recogen estas articulaciones para cada caso, junto con el participante correspondiente y la mano implicada.

TABLA VIII. Velocidad articular

Velocidad articular		
Articulación	Part	Mano
Middle_MCP_AngularVelocit	01	Dcha
Index_PIP_AngularVelocity	02	Dcha
Pinky_MCP_AngularVelocity	03	Dcha
Middle_MCP_AngularVelocity	01	Izq
Thumb_CMC_AngularVelocity	02	Izq
Middle_PIP_AngularVelocity	03	Izq

En la mayoría de los casos, las velocidades más altas se produjeron en la mano izquierda, con excepción del participante 02, donde la mano derecha presentó el valor más elevado.

Aunque no se presentan los valores numéricos específicos por tratarse de picos instantáneos, en la Gráfica 2 se visualiza la distribución de estas articulaciones según la mano y el participante.



Grafica 2: Velocidad Angular Registrada por Articulación y Participante

C. Resultados de Abducción y Aducción

En cuanto al análisis de los movimientos de abducción y aducción (Figura 10), también denominados como "spread", se identificó, para cada participante, la articulación que presentó mayor amplitud de movimiento en esta categoría. En todos los casos, tanto en la mano izquierda como en la derecha, la articulación con mejor rendimiento fue la carpometacarpiana del pulgar (Thumb_CMC), lo cual resulta coherente con la anatomía funcional de la mano, ya que esta articulación permite una movilidad tridimensional esencial para la oposición y separación del primer dedo (Tabla IX).



Figura 10. Abducción y aducción del 1er dedo. Moore et al. (2007) [26]

TABLA IX. Mejor articulación en la abducción y aducción

Mejor movilidad de abducción y aducción de cada participante		
Part	Mano	Mejor_Articulación
01	Iqz	Thumb_CMC
01	Dcha	Thumb_CMC
02	Iqz	Thumb_CMC
02	Dcha	Thumb_CMC

03	Iqz	Thumb_CMC
03	Dcha	Thumb_CMC

V. DISCUSIÓN

El presente estudio permitió analizar el rango articular, la velocidad de movimiento y la abducción/aducción digital a través de guantes de captura hápticos de alta precisión. Desde el enfoque de la terapia ocupacional en rehabilitación de la mano, los resultados obtenidos no solo aportan datos cuantificables, sino que refuerzan observaciones clínicas habituales sobre los patrones de limitación funcional tras cirugías, lesiones o procesos degenerativos.

En cuanto al rango articular, las articulaciones más frecuentemente limitadas fueron las metacarpofalángicas (MCP) y las interfalángicas distales (DIP), especialmente en los dedos anular y meñique. Este hallazgo es coherente con la literatura clínica, que señala estas articulaciones como especialmente vulnerables a rigideces postquirúrgicas y sobreuso, dadas sus funciones estabilizadoras y compensatorias en tareas de agarre [29]. La recopilación de valores mediante los guantes Manus Quantum Metagloves permitió una evaluación más objetiva y detallada que la exploración visual o el uso de goniómetros, herramientas que, si bien comunes en entornos clínicos, pueden verse afectadas por errores de interpretación y subjetividad del paciente [30].

Respecto a la velocidad articular, el análisis mostró que la articulación que alcanzó mayor velocidad fue, en todos los casos, una interfalángica o metacarpofalángica de los dedos medio índice. Este dato igualmente es esperable desde una perspectiva funcional, ya que estos dedos son clave en la ejecución de movimientos rápidos y precisos, como pulsar botones, escribir o manipular objetos pequeños. A nivel terapéutico, conocer qué articulaciones conservan una mejor velocidad puede orientar intervenciones centradas en aprovechar compensaciones naturales o potenciar destrezas específicas según el dedo afectado.

El estudio de los movimientos de abducción y aducción reveló que la articulación carpometacarpiana (CMC) del pulgar fue, sin excepción, la más activa en todos los participantes. Esta observación coincide con el conocimiento anatómico sobre el pulgar como elemento central de la prensión funcional y la pinza tridimensional. Su capacidad de separación y oposición es fundamental para la mayoría de las tareas de la vida diaria, por lo que preservar su movilidad es un objetivo prioritario en programas de rehabilitación de mano [31].

La implementación de sistemas de captura de movimiento como Manus representa una evolución significativa en la evaluación de la mano. Permitiendo al rehabilitador obtener métricas en tiempo real, visualizar el rendimiento articular sin contacto físico y diseñar intervenciones más ajustadas a los déficits específicos. Como indican otros estudios centrados en tecnología aplicada a la rehabilitación, la integración de sensores hápticos y plataformas de medición abre nuevas vías para la personalización del tratamiento, el seguimiento

objetivo del progreso y la motivación del paciente mediante biofeedback [30].

En conjunto, estos resultados refuerzan la viabilidad del uso de tecnologías en el ámbito rehabilitador, y destaca el valor del análisis conjunto entre datos clínicos y herramientas tecnológicas para mejorar la evaluación y la toma de decisiones terapéuticas.

A. Limitaciones del proyecto

A pesar de los resultados obtenidos, el presente estudio presenta una serie de limitaciones que deben ser consideradas de cara a futuras investigaciones o implementaciones clínicas.

En primer lugar, se identificaron limitaciones físicas en el propio dispositivo de medición. Los guantes hápticos Manus Quantum Metagloves presentan dificultades importantes en su colocación, especialmente en personas con rigidez articular, deformidades digitales o atrofas musculares. Además, el tamaño estándar del guante está diseñado únicamente para población adulta, lo que impide su uso en población pediátrica o en adultos con manos pequeñas.

En segundo lugar, el principal obstáculo técnico fue el propio software de Manus Core. Debido a que se utilizó una versión demo, no se pudo acceder a funcionalidades avanzadas, como la integración directa con plugins específicos para visualización de goniómetros digitales. Esta limitación impidió una comparación directa entre los datos obtenidos por el guante y medidas clínicas tradicionales.

También se presentaron dificultades relevantes en la exportación de los datos. El manual técnico de Manus recomienda la exportación en formato .csv con delimitador por comas. Sin embargo, varios campos del archivo contenían comas decimales, lo que provocó una lectura errónea de las columnas y, en consecuencia, la pérdida de datos de algunos participantes. Tras diferentes pruebas, se optó por el delimitador por espacio como alternativa más estable y precisa, aunque esta situación representó una pérdida de información parcial.

Por otro lado, aunque se desarrolló un entorno interactivo (juego) con el objetivo de aplicar los guantes en una dinámica lúdica de evaluación, este no pudo ser utilizado en contexto clínico real por motivos logísticos. La implementación del juego requería tiempo adicional para su instalación y configuración, lo cual no era viable dentro de las sesiones pautadas con pacientes. Además, en entornos clínicos reales, las personas participantes mostraban mayor predisposición hacia la evaluación tradicional con los guantes, que, hacia el uso del juego, lo que redujo la aplicabilidad del entorno virtual desarrollado.

En conjunto, estas limitaciones, si bien no invalidan los resultados obtenidos, sí condicionan la generalización de los descubrimientos y subrayan la necesidad de mejorar la accesibilidad tecnológica, la compatibilidad de formatos y la validación en contextos clínicos reales en futuras investigaciones.

VI. CONCLUSIÓN

El presente estudio ha permitido explorar el potencial de los guantes hápticos Manus Quantum Metagloves como herramienta de evaluación digital del movimiento de la mano, centrándose en tres parámetros clave: rango articular, velocidad articular y movimientos de abducción-aducción.

A través del análisis de los datos recogidos con RStudio, se evidenció que el guante es capaz de detectar limitaciones funcionales específicas en distintas articulaciones interfalángicas distales, particularmente en personas con antecedentes patológicos. Por otra parte, las articulaciones que presentaron mayor restricción correspondieron, en su mayoría, a las más propensas a la rigidez en patologías musculoesqueléticas de la mano, como las articulaciones interfalángicas proximales (PIP) o las metacarpofalángicas (MCP), lo cual concuerda con el conocimiento clínico.

Asimismo, el estudio identificó variabilidad en la velocidad de ejecución de movimientos de apertura y cierre, siendo algunas articulaciones más eficientes que otras, y mostrando patrones interesantes que podrían emplearse en evaluaciones funcionales. En cuanto a los movimientos de abducción y aducción, el primer dedo (pulgar) fue el que mostró mayor amplitud en todos los casos, en coherencia con su mayor rango funcional anatómico.

Este proyecto refuerza la idea de que la tecnología de captura de movimiento aplicada a la mano puede ofrecer métricas objetivas, fiables y complementarias a la observación clínica tradicional. Aunque se identificaron ciertas limitaciones técnicas en el uso del software y la exportación de datos, los resultados apoyan el uso de este tipo de sistemas en investigación clínica y abren una vía de trabajo para la evaluación personalizada en rehabilitación de la mano.

En conclusión, la integración de herramientas tecnológicas como los guantes hápticos puede suponer un avance significativo en la evaluación funcional de la mano, siempre que se adapten a las necesidades clínicas y se validen sus datos frente a métodos tradicionales. Este estudio supone un primer paso hacia esa validación.

REFERENCIAS

1. Lerma E, Baixauli V, Selma F, García F. El papel de la rehabilitación tras las reparaciones de las inestabilidades de muñeca. *Rev Iberoam Cir Mano* [Internet]. 2016;44(02):131–42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ricma.2016.09.001>
2. Sabater JM, Azorín JM, Pérez C, García N, Menchón M. Ayuda robótica para la rehabilitación de miembros superiores. En: *II Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos – DRT4all 2007*. Madrid: Fundación ONCE para la Cooperación e Integración Social de las Personas con Discapacidad; 2008. p. 19–28.
3. Manus Technology Group, “Quantum Metagloves,” *Manus-Meta* website. [Online] Disponible: Manus-Meta.

4. R. Cantero Téllez, Ed., *Terapia de mano basada en el razonamiento y la práctica clínica*. Sevilla, España: Universidad Internacional de Andalucía, 2020.
5. L. Tremblais, T. Druel, A.-L. Garel, and P. Pernot, "Segmentary exclusion syndrome in hand traumatology – definition, rehabilitation and orthosis," *Hand Surgery and Rehabilitation*, vol. 43, no. 4, p. 101760, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.hansur.2024.101760
6. D. Jimbu, A.-E. Cristea, D.-M. Iliescu, D. Oprea, M. G. Iliescu, B.-M. Caraban, and P. Bordei, "The importance of advanced technologies in functional rehabilitation of the hand," *Balneo and PRM Research Journal*, vol. 15, no. 1, p. 664, Mar. 2024. doi: 10.12680/balneo.2024.664
7. G. J. Tortora and B. H. Derrickson, *Principios de anatomía y fisiología*, 13.^a ed. México: Editorial Médica Panamericana, 2011.
8. D. Cobia, M. W. Haut, K. P. Revill, S. L. Rellick, R. J. Nudo, M. Wischnewski, and C. M. Buetefisch, "Gray matter volume of functionally relevant primary motor cortex is causally related to learning a hand motor task," *Cerebral Cortex*, vol. 34, no. 5, p. bhac210, May 2024, doi: 10.1093/cercor/bhae210.
9. M. Ferre, I. Galiana, R. Wirz, and N. Tuttle, "Haptic device for capturing and simulating hand manipulation rehabilitation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 5, pp. 808–815, Oct. 2011, doi: 10.1109/TMECH.2011.2159807.
10. K. Pacheco-Barrios, J. Ortega-Márquez, and F. Fregni, "Haptic technology: Exploring its underexplored clinical applications—A systematic review," *Biomedicines*, vol. 12, no. 12, p. 2802, Dec. 2024, doi: 10.3390/biomedicines12122802.
11. E. Irigoyen, M. Larrea, and M. Graña, "A narrative review of haptic technologies and their value for training, rehabilitation, and the education of persons with special needs," *Sensors*, vol. 24, no. 21, p. 6946, Oct. 2024, doi: 10.3390/s24216946.
12. SenseGlove. "Nova – Wireless force-feedback gloves for VR training," 2025. [Online]. Disponible: <https://www.senseglove.com/>. [Acceso: 10-Jul-2025].
13. NeuroDigital Technologies. "Gloveone," 2025. [Online]. Disponible: <https://www.neurodigital.es/>. [Acceso: 10-Jul-2025].
14. Neofect. "Smart Glove for Stroke Rehabilitation," 2025[Online]. Disponible: <https://www.neofect.com/us/smart-glove>. [Acceso: 10-Jul-2025].
15. D. Fernández-Vázquez, R. Cano-de-la-Cuerda, and V. Navarro-López, "Haptic glove systems in combination with semi-immersive virtual reality for upper extremity motor rehabilitation after stroke: A systematic review and meta-analysis," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 16, p. 10378, Aug. 2022, doi: 10.3390/ijerph191610378.
16. R. Galán, Ó. F. Avilés, C. Zubieta, C. Segura, M. Mauledeaux, D. Correa, and A. Durán, "Sistema de medición automática de la movilidad articular de la mano por medio de un guante de datos," *Rev. Colomb. Cir. Plást. Estét. Reconstr.*, vol. 21, no. 2, pp. 12–19, Dec. 2015
17. S. Baik, S. Park, and J. Park, "Haptic glove using tendon-driven soft robotic mechanism," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, p. 541105, Oct. 2020, doi: 10.3389/fbioe.2020.541105.
18. G. Herrera-Pimber, M. Martínez-Arroyo, J. A. Montero-Valverde, and J. M. Hernández-Bravo, "Diseño de un guante háptico para rehabilitación virtual, en jóvenes con lesión de la médula espinal torácica T1–T12 (paraplejia)," *Foro Estud. Guerrero*, vol. 9, no. 1, pp. 368–378, 2021.
19. A. Caballero Moreno, "Desarrollo de un guante háptico para dos dedos (índice y medio) de la mano derecha con retroalimentación de fuerza," *Proyecto de grado, Univ. Autónoma de Bucaramanga, Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Bucaramanga*, 2023.
20. Manus, "Manus Core & integrations," Manus Meta, 2025. [Online]. Disponible: <https://www.manus-meta.com/software>. [Acceso: 10-Jul-2025].
21. Unity Technologies, "Game development software: Create 2D & 3D Games," Unity.com, 2025. [Online]. Available: <https://unity.com/es/games>. E. Epic Games, "Unreal Engine," *Unreal Engine*, 2025. [Online]. Disponible: <https://www.unrealengine.com/es-ES>. [Acceso: 10-Jul-2025].
22. Manus Meta, "MANUS Core 2.5.1," *MANUS Knowledge Center*, 2025. [Online]. Disponible: <https://docs.manus-meta.com/3.0.0/ReleaseNotes/history/Core251/>. [Acceso: 10-Jul-2025].
23. Manus Meta, "Unity Plugin," *MANUS Knowledge Center*, 2025. [Online]. Disponible: <https://docs.manus-meta.com/3.0.0/Plugins/Unity/>. [Acceso: 10-Jul-2025].
24. Posit PBC, "RStudio Desktop," *Posit*, 2025. [Online]. Disponible: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>. [Acceso: 10-Jul-2025].
25. Moore, K. L., Dalley, A. F., Agur, A. M. R., & Moore, M. E. (2007). *Clinically oriented anatomy* (1.^a ed., 1 205 pp.) [Libro electrónico]. Médica Panamericana.
26. Manus, "Exporting CSV files," *Manus Documentation v2.3.0*. [Online]. Disponible: <https://docs.manus-meta.com/2.3.0/Software/Rec/Exporting%20csv/>. [Acceso: 10-Jul-2025].
27. Kielhofner, G. (2008). *Model of Human Occupation: Theory and Application*. Lippincott Williams & Wilkins
28. Valente-Pineda YA, Martínez-Arroyo M, Gutiérrez-Mata FJ, Hernández-Reyna R. Diseño de un sistema de evaluación de rehabilitación motriz (manos), mediante videojuegos virtuales. *Foro Estud sobre Guerrero*. 2021;9(1):339–347.
29. Surangsriat D, Bualuangngam T, Sri-iesaranusorn P, Chaibaroj A, Buekban C, Thanawattano C, et al. Comparison of the wrist range of motion measurement between inertial measurement unit

- glove, smartphone device and standard goniometer.
doi:10.3390/app12073418
30. Cerón A, Domínguez-Ramírez O, Ugalde I. El uso de captura de movimiento corporal para el análisis de discapacidades en miembros superior o inferior: Caso de uso: hemiplejia. *Rev Int Tecnol Cienc Soc.* 2012;1(1). doi:10.37467/gka-revtechno.v1.1264