



Sistemas de rehabilitación de muñeca basados en guantes sensoriales y realidad virtual: Una revisión del estado del arte

Wrist rehabilitation systems based on sensor gloves and virtual reality: A state-of-the-art review

Edgar Manuel Cano Cruz ✉

Departamento de Ingeniería en Desarrollo de Software, Universidad del Istmo, Oaxaca, México

edgarcano@unistmo.edu.mx

ORCID: 0000-0002-3394-1902

Daniel Efrén Rojas Flores

Departamento de Ingeniería en Desarrollo de Software, Universidad del Istmo, Oaxaca, México

efren.20011002@gmail.com



<https://doi.org/10.36825/RITI.14.33.005>

Recibido: Diciembre 01, 2025

Aceptado: Marzo 23, 2026

Resumen: Este artículo presenta una revisión del estado del arte sobre sistemas de rehabilitación de muñeca basados en guantes sensoriales portátiles y enfoques de gamificación. Planteamiento: se analiza cómo estas tecnologías pueden apoyar la recuperación funcional de la muñeca y se identifica la necesidad de soluciones accesibles para contextos clínicos y domiciliarios. Métodos: se realizó una búsqueda sistemática en PubMed, IEEE Xplore y Scopus de estudios en inglés y español (2010–2025) sobre rehabilitación de muñeca mediante dispositivos portátiles, realidad virtual y/o gamificación, agrupando los trabajos según tecnologías empleadas, efectividad de la gamificación y resultados clínicos. Resultados: los guantes sensoriales comerciales muestran alta precisión, durabilidad y ecosistemas de desarrollo maduros, pero su alto costo y carácter propietario limitan su adopción; las alternativas de hardware abierto ofrecen menor costo y alta flexibilidad, aunque menor precisión. La gamificación y la realidad virtual mejoran la motivación, la adherencia y el desempeño funcional. Conclusiones: persisten brechas en accesibilidad económica, personalización y usabilidad, por lo que se propone el desarrollo de guantes sensoriales de bajo costo, gamificados y centrados en el usuario.

Palabras clave: *Rehabilitación de Muñeca, Guantes Sensoriales, Realidad Virtual, Gamificación, Dispositivos Portátiles.*

Abstract: This article presents a state-of-the-art review of wrist rehabilitation systems based on wearable sensory gloves and gamification approaches. It examines how these technologies can support functional recovery of the wrist and addresses the need for accessible solutions in clinical and home-based contexts. A systematic search was conducted in PubMed, IEEE Xplore, and Scopus for studies in English and Spanish (2010–2025) on wrist rehabilitation using wearable devices, virtual reality, and/or gamification, and the selected works were grouped by technologies employed, effectiveness of gamification, and clinical outcomes. The review shows that commercial sensory gloves offer high precision, durability, and mature development ecosystems but are limited by high cost and proprietary technologies, while open-hardware solutions provide lower-cost and flexible devices with reduced precision and durability. Evidence indicates that gamification and integration with virtual reality environments can

enhance patient motivation, treatment adherence, and functional performance. The review also identifies gaps in economic accessibility, therapy personalization, and system usability, and proposes as a future direction the development of low-cost, gamified, user-centered sensory gloves for wrist rehabilitation in both clinical and home settings.

Keywords: *Wrist Rehabilitation, Sensory Gloves, Virtual Reality, Gamification, Wearable Devices.*

1. Introducción

La rehabilitación de muñeca es un proceso fundamental para recuperar la movilidad y funcionalidad en pacientes con lesiones traumáticas o condiciones musculoesqueléticas crónicas, impactando de forma directa su independencia y calidad de vida [1], [2]. Los métodos tradicionales se basan en ejercicios repetitivos supervisados por terapeutas, lo que puede volverse monótono y afectar la adherencia al tratamiento [1], [2]. En paralelo, el desarrollo de dispositivos portátiles ha surgido como una herramienta relevante al permitir mediciones en tiempo real, biofeedback y otras funciones sensoriales, ampliando las fronteras en salud, deporte, interacción humano-computadora, robótica y realidad virtual [1], [3], [4], [5], [6]. La incorporación de entornos de realidad virtual y estrategias de gamificación ha demostrado aumentar la motivación y el compromiso del paciente, así como favorecer la realización de ejercicios funcionales [7], [8], [9], [10], [11], [12].

En este contexto, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión del estado del arte sobre los sistemas de rehabilitación de muñeca basados en guantes sensoriales, con énfasis en las tecnologías empleadas, su integración con enfoques de realidad virtual y gamificación, y la evidencia disponible sobre su impacto clínico y funcional. Para efectos de este estudio, se entiende por guante sensorial un dispositivo portátil tipo guante que integra sensores y, en algunos casos, actuadores o mecanismos de retroalimentación, con la finalidad de captar, registrar, asistir o entrenar movimientos funcionales de mano y/o muñeca en contextos de evaluación, seguimiento o rehabilitación [2].

De manera específica, el estudio busca: (i) identificar las principales tecnologías utilizadas en sistemas basados en guante con relevancia para la rehabilitación de muñeca; (ii) comparar las características, ventajas y limitaciones de soluciones comerciales y no comerciales; (iii) analizar el papel de la gamificación y los entornos inmersivos en la motivación, adherencia y experiencia del paciente; y (iv) reconocer vacíos de conocimiento y oportunidades de investigación para el desarrollo de soluciones más accesibles, personalizables y clínicamente pertinentes.

Dado que en la literatura reciente varios desarrollos tecnológicos se enfocan en mano y dedos, pero participan en procesos funcionales integrados del miembro distal superior, en esta revisión se incluyeron dispositivos orientados a mano y/o dedos únicamente cuando su arquitectura, propósito terapéutico, métricas funcionales o modalidad de interacción mostraron una relación explícita con la rehabilitación de muñeca, el entrenamiento motor asociado o la evaluación funcional complementaria. Por ello, el manuscrito distingue entre dispositivos con uso terapéutico directo en rehabilitación y sistemas con valor contextual o comparativo, cuya inclusión permite comprender mejor el ecosistema tecnológico del campo sin ampliar indebidamente el alcance clínico del estudio.

A partir de este enfoque, el artículo espera aportar una visión integradora del panorama actual de la rehabilitación de muñeca basada en tecnologías portátiles, articulando la evidencia académica con las soluciones tecnológicas disponibles. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: primero se describen los métodos de búsqueda y selección de estudios; posteriormente se presentan las tecnologías de guantes sensoriales y los enfoques de gamificación y realidad virtual; más adelante se discuten los principales hallazgos y, finalmente, se exponen las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

2. Metodología

La metodología de esta revisión se estructuró en dos niveles complementarios. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión de la literatura científica orientada a identificar estudios que analizaran la rehabilitación de muñeca mediada por tecnologías portátiles, tales como guantes sensoriales, sistemas de realidad virtual (VR) y enfoques gamificados. En segundo lugar, con el fin de contextualizar los hallazgos académicos frente a las soluciones tecnológicas actualmente disponibles, se realizó una búsqueda estructurada de guantes sensoriales comerciales en sitios web de fabricantes y distribuidores especializados.

La articulación de ambos niveles metodológicos permite, por un lado, caracterizar el estado actual de la evidencia científica sobre rehabilitación de muñeca mediada por tecnologías portátiles y, por otro, contrastar dicha evidencia con las características de los dispositivos comerciales disponibles en el mercado. De este modo, la revisión no solo describe qué se ha investigado, sino también qué soluciones tecnológicas existen y qué vacíos u oportunidades emergen en la intersección entre investigación y práctica.

2.1. Marco de trabajo para la búsqueda de literatura académica

La búsqueda de artículos relevantes se llevó a cabo de acuerdo con el marco de trabajo propuesto en la Figura 1, en el cual el procedimiento de revisión se organizó en seis etapas consecutivas: (1) búsqueda de artículos relevantes, (2) criterios de inclusión, (3) criterios de exclusión, (4) proceso de selección, (5) clasificación de artículos y (6) análisis de datos.

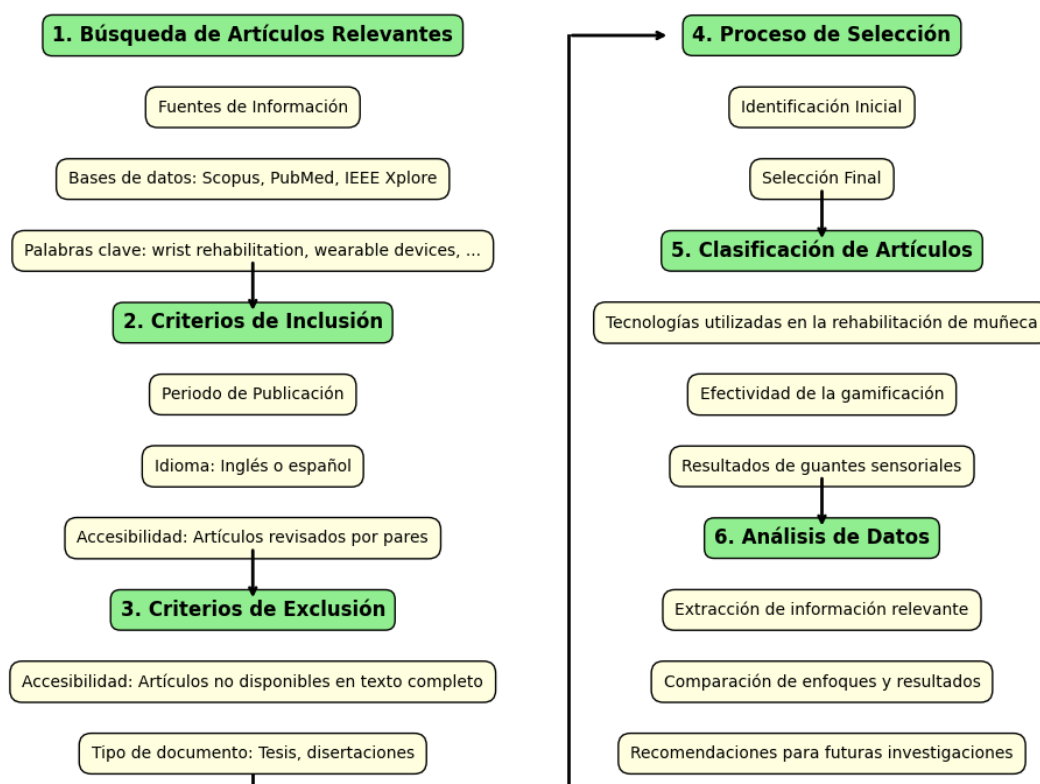


Figura 1. Marco de trabajo para la búsqueda de literatura.

En primer lugar, se definieron las fuentes de información y se seleccionaron tres bases de datos académicas clave: Scopus, PubMed e IEEE Xplore, por su relevancia en rehabilitación, tecnologías emergentes, ingeniería biomédica y dispositivos portátiles. La búsqueda se realizó considerando publicaciones en el periodo 2010–2025, en inglés y español, mediante combinaciones de términos relacionados con rehabilitación de muñeca, dispositivos portátiles, guantes sensoriales, realidad virtual y gamificación. El intervalo 2010–2025 se definió con el propósito de capturar una etapa de consolidación y aceleración en el desarrollo de tecnologías portátiles aplicadas a la rehabilitación, particularmente en lo relativo a guantes sensoriales, sensores flexibles, plataformas inalámbricas, entornos inmersivos y estrategias de gamificación. A partir de 2010 comenzó a observarse una integración más sostenida entre dispositivos portátiles, monitoreo funcional, interacción háptica y realidad virtual, lo que vuelve este periodo especialmente pertinente para examinar la evolución reciente del campo. Asimismo, la extensión hasta 2025 permite incorporar los desarrollos más actuales disponibles al momento de la revisión, incluyendo avances en personalización terapéutica, rehabilitación domiciliaria, sistemas de bajo costo e integración con enfoques de inteligencia artificial. De este modo, el rango seleccionado no busca ofrecer una reconstrucción histórica exhaustiva, sino una visión suficientemente amplia y actualizada para identificar tendencias tecnológicas, cambios metodológicos y oportunidades emergentes en la rehabilitación de muñeca mediada por guantes sensoriales.

Para mejorar la precisión y la cobertura de la revisión, se definieron cadenas de búsqueda específicas para cada base de datos, adaptadas a la sintaxis y a los campos de indexación de cada plataforma. En Scopus se empleó la siguiente cadena de búsqueda: *TITLE-ABS-KEY ("wrist rehabilitation" OR "hand rehabilitation") AND ("sensory glove" OR "smart glove" OR "wearable device" OR "wearable sensor") AND ("virtual reality" OR gamification OR rehabilitation)*). En PubMed se utilizó la siguiente cadena de búsqueda: *(("wrist rehabilitation"[Title/Abstract] OR "hand rehabilitation"[Title/Abstract]) AND ("sensory glove"[Title/Abstract] OR "smart glove"[Title/Abstract] OR "wearable device"[Title/Abstract] OR "wearable sensor"[Title/Abstract]) AND ("virtual reality"[Title/Abstract] OR gamification[Title/Abstract] OR rehabilitation[Title/Abstract]))*. En IEEE Xplore se empleó la siguiente cadena de búsqueda: *(("All Metadata": "wrist rehabilitation" OR "All Metadata": "hand rehabilitation") AND ("All Metadata": "sensory glove" OR "All Metadata": "smart glove" OR "All Metadata": "wearable device") AND ("All Metadata": "virtual reality" OR "All Metadata": "gamification" OR "All Metadata": "rehabilitation"))*.

A partir de estas búsquedas se recuperó inicialmente un total de 102 registros, distribuidos de la siguiente manera: Scopus (n=41), PubMed (n=27) e IEEE Xplore (n=34). Posteriormente, se realizó un proceso de depuración para eliminar registros duplicados, obteniéndose una reducción de 14 artículos duplicados, con lo cual el conjunto quedó conformado por 88 estudios únicos.

En la siguiente etapa se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión. Se incluyeron artículos: (i) publicados entre 2010 y 2025, (ii) en inglés o español, (iii) revisados por pares y (iv) relacionados directamente con la rehabilitación de muñeca mediante tecnologías portátiles, guantes sensoriales, realidad virtual y/o estrategias de gamificación. Por otra parte, se excluyeron tesis, disertaciones, capítulos de libro, resúmenes, documentos sin acceso a texto completo y estudios que, aun incorporando dispositivos portátiles, no abordaran de manera específica la rehabilitación funcional de muñeca o mano.

La revisión de título y resumen permitió excluir 43 registros por falta de pertinencia temática, enfoque excesivamente general, orientación exclusiva a otras partes del cuerpo o ausencia de relación directa con contextos terapéuticos. Como resultado, 45 artículos fueron considerados para evaluación a texto completo. En esta fase se excluyeron 15 estudios adicionales por razones tales como insuficiente detalle metodológico, ausencia de resultados aplicables a rehabilitación de muñeca, duplicidad conceptual con revisiones más completas o escasa relación con las categorías analíticas definidas en este estudio.

Finalmente, se obtuvo una selección final de 30 artículos para el análisis detallado. Esta muestra se consideró adecuada para representar las principales líneas temáticas identificadas en la literatura y se organizó en tres categorías analíticas: (a) tecnologías portátiles y sistemas sensorizados con relevancia para la rehabilitación funcional, (b) efectividad de la gamificación en la motivación y adherencia de los pacientes y (c) resultados de la aplicación de guantes sensoriales en la rehabilitación física. Esta clasificación permitió estructurar la presentación de los hallazgos y facilitar la comparación entre enfoques tecnológicos, clínicos y funcionales.

Finalmente, se realizó la extracción sistemática de información relevante de cada artículo, incluyendo población de estudio, tipo de tecnología empleada, sensores utilizados, variables evaluadas, contexto de aplicación y principales resultados. A partir de esta información se efectuó una comparación entre estudios para identificar patrones comunes, diferencias metodológicas, ventajas, limitaciones y oportunidades de desarrollo para futuros sistemas de rehabilitación de muñeca mediados por tecnologías portátiles.

Con el propósito de transparentar el procedimiento de revisión, se incorporó además un diagrama de flujo tipo PRISMA (ver Figura 2), en el que se resumen las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de estudios.

Adicionalmente, para efectos de selección y análisis, se adoptó un criterio funcional de inclusión. Se consideraron elegibles no solo los estudios que abordaban explícitamente la rehabilitación de muñeca, sino también aquellos centrados en mano y dedos cuando el dispositivo descrito contribuía al entrenamiento, evaluación o seguimiento de variables relevantes para la función de la muñeca y del miembro distal superior, tales como rango de movimiento, control motor fino, fuerza de agarre, coordinación, repetición guiada de movimientos o interacción terapéutica mediada por entornos virtuales. En contraste, se excluyeron estudios en los que el dispositivo, aun siendo un guante sensorial, no presentaba relación funcional con procesos terapéuticos, evaluativos o de entrenamiento motor pertinentes para el objeto de estudio.

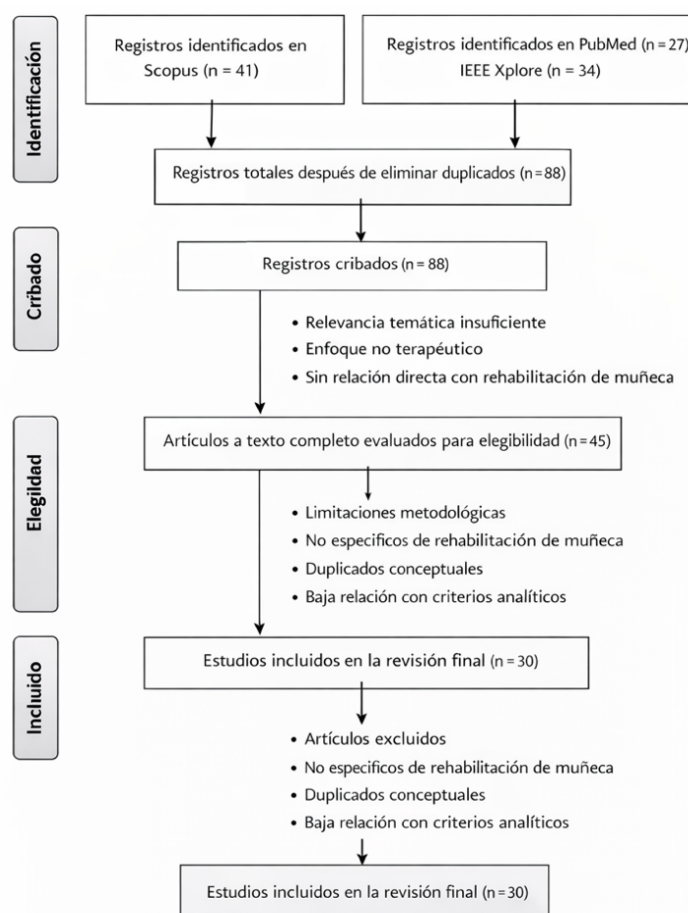


Figura 2. Diagrama de flujo tipo PRISMA del proceso de selección de estudios.

2.2. Marco de trabajo para la búsqueda de guantes sensoriales comerciales con relevancia terapéutica o funcional

Para complementar el análisis de la literatura científica, se diseñó un marco de trabajo específico para la búsqueda y análisis de guantes sensoriales comerciales con relevancia para la rehabilitación de muñeca (ver Figura 3). Este marco se estructuró en seis etapas: (1) definición del objetivo de búsqueda comercial, (2) identificación de fuentes de información en línea, (3) selección inicial de productos, (4) aplicación de criterios de inclusión y exclusión, (5) extracción y sistematización de características de los guantes y (6) análisis comparativo frente a la evidencia académica. Este procedimiento permitió mapear las soluciones tecnológicas disponibles en el mercado e identificar en qué medida convergen o divergen con los enfoques descritos en la literatura científica sobre rehabilitación mediada por dispositivos tipo guante.

En la primera etapa se definió como objetivo localizar guantes sensoriales comerciales con uso terapéutico directo o con potencial funcionalmente relevante para la rehabilitación de muñeca y mano. En este contexto, se distinguieron dos tipos de dispositivos: (i) dispositivos de uso terapéutico directo, es decir, aquellos diseñados para evaluación funcional, entrenamiento motor, rehabilitación o seguimiento clínico; y (ii) dispositivos de valor contextual o comparativo, es decir, sistemas orientados principalmente a interacción háptica, realidad virtual, captura de movimiento o interfaces digitales, cuya arquitectura tecnológica resulta pertinente para analizar tendencias de sensado, retroalimentación e interacción aplicables al campo rehabilitador. Esta diferenciación permitió conservar el valor comparativo del ecosistema tecnológico sin perder la delimitación clínica del estudio.

A partir de las fuentes definidas, se llevó a cabo una búsqueda exploratoria utilizando palabras clave relacionadas con guantes de rehabilitación, guantes hápticos y dispositivos portátiles para muñeca y mano. En esta etapa se elaboró un listado preliminar de productos candidatos, incluyendo aquellos que, por su descripción general, podían estar vinculados a rehabilitación física, entrenamiento motor o interacción terapéutica, aun cuando su foco principal no estuviera explícitamente formulado como rehabilitación.

En la cuarta etapa se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para refinar el conjunto de productos identificados. Se incluyeron guantes sensoriales o dispositivos portátiles que cubrieran mano y/o muñeca, incorporaran sensores de movimiento, fuerza, presión o *feedback* háptico, y presentaran al menos una de las siguientes condiciones: (a) uso explícito en rehabilitación, evaluación funcional o entrenamiento terapéutico; (b) capacidad para medir variables de interés clínico como rango de movimiento, fuerza, coordinación o desempeño motor; o (c) relevancia tecnológica como plataforma de interacción o captura de movimiento con potencial transferencia al ámbito rehabilitador. Se excluyeron prototipos no comercializados, dispositivos en fase exclusivamente investigativa y productos sin información técnica suficiente. Asimismo, los sistemas sin propósito clínico directo solo se conservaron cuando aportaban valor comparativo o contextual para analizar tendencias de sensado, retroalimentación, captura de movimiento o interacción con posible transferencia al ámbito rehabilitador.

En la quinta etapa se realizó la extracción sistemática de información para cada guante incluido. Se registraron características técnicas (tipos de sensores, grados de libertad, tipo de *feedback*, conectividad y plataformas compatibles), características funcionales (tipo de ejercicios o interacciones que permite, presencia de elementos de gamificación, modos de uso clínico o domiciliario) y características de uso (ergonomía, ajustes, requisitos de instalación). Cuando estuvo disponible, también se documentó información comercial relevante, como público objetivo, precio y disponibilidad.

Finalmente, en la sexta etapa se llevó a cabo un análisis comparativo entre las características de los guantes comerciales y los hallazgos derivados de la revisión de la literatura científica. Este análisis permitió identificar convergencias y divergencias en términos de tecnologías empleadas, nivel de gamificación e idoneidad para la rehabilitación de muñeca, así como vacíos y oportunidades para el desarrollo de sistemas de rehabilitación más accesibles, gamificados y centrados en las necesidades reales de los usuarios.

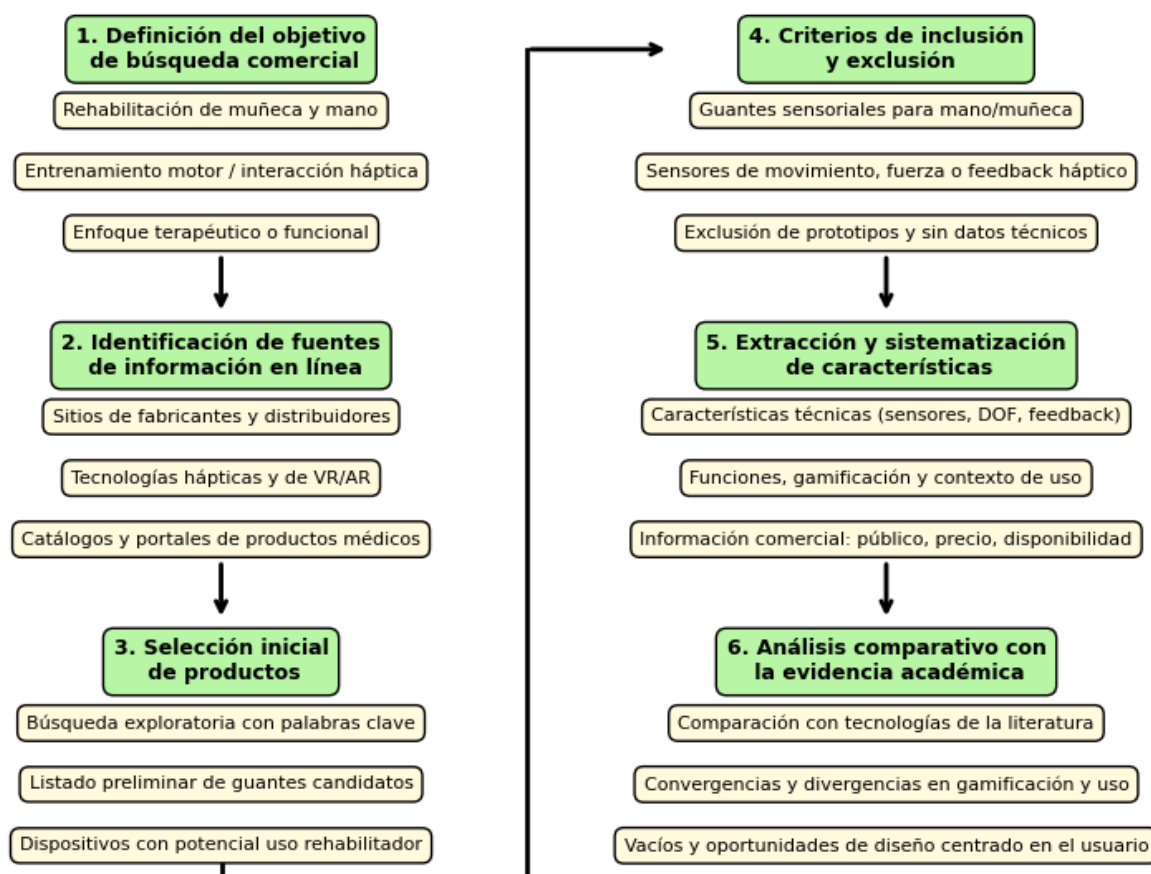


Figura 3. Marco de trabajo para la búsqueda de guantes sensoriales comerciales.

3. Resultados de la revisión

3.1. Literatura de guantes para la rehabilitación

En esta sección se presentan los resultados de la revisión a partir del marco metodológico descrito en la Figura 1 y del criterio funcional de inclusión definido en la metodología. Con base en este procedimiento, los artículos seleccionados se organizaron en tres categorías analíticas que estructuran la presentación de los hallazgos (ver Tabla 1): (1) tecnologías portátiles y sistemas sensorizados con relevancia para la rehabilitación funcional, (2) efectividad de la gamificación en la motivación y adherencia de los pacientes y (3) resultados de la aplicación de guantes sensoriales en la rehabilitación física. En la primera categoría se distinguen, además, trabajos de contexto tecnológico general, útiles para comprender tendencias habilitadoras en *wearables*, sensado e interacción, y estudios con aplicación más directa en evaluación, entrenamiento o rehabilitación funcional de mano y muñeca. Esta organización permite mantener la coherencia metodológica de la revisión sin perder de vista el ecosistema tecnológico más amplio en el que se desarrollan los guantes sensoriales. En conjunto, esta estructura analítica permite no solo transparentar el proceso de revisión, sino también caracterizar de manera comparativa el estado actual de la evidencia científica en torno a la rehabilitación funcional mediada por tecnologías portátiles y sistemas basados en guante.

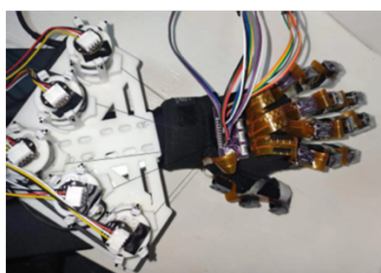
Tabla 1. Artículos académicos organizados por categorías analíticas de la revisión.

Categoría	Subcategoría	Tipo de sensor / enfoque	Aplicación principal	Ref.
1. Tecnologías portátiles y sistemas sensorizados con relevancia para la rehabilitación funcional	1A. Contexto tecnológico y tendencias habilitadoras	IoT, dispositivos portátiles	Tendencias tecnológicas en IoT aplicadas a salud y rehabilitación	[2]
		Dispositivos portátiles, IoT	Revisión general sobre tecnologías portátiles e interacción	[13]
		Sensores portátiles, aprendizaje automático	Intervenciones de rehabilitación de precisión basadas en sensado portátil	[14]
	1B. Sistemas sensorizados con aplicación funcional en mano/muñeca	Sensores multimodales, cinemática	Evaluación motora mediante guante sensorial	[15]
		IMU (unidad de medición inercial)	Medición de la cinemática de la mano con relevancia evaluativa para rehabilitación	[16]
2. Efectividad de la gamificación en la motivación y adherencia de los pacientes	—	Gamificación	Revisión de gamificación en fisioterapia y educación en rehabilitación	[8]
	—	Gamificación, rehabilitación	Uso de la gamificación en rehabilitación física de adultos	[9]
	—	Gamificación, contexto multisensorial	Revisión narrativa sobre experiencia subjetiva en rehabilitación gamificada	[12]
	—	Gamificación, plataforma modular	Plataforma modular para gamificación de rehabilitación	[11]
	—	Gamificación	Revisión sobre gamificación en rehabilitación neurológica pediátrica	[17]

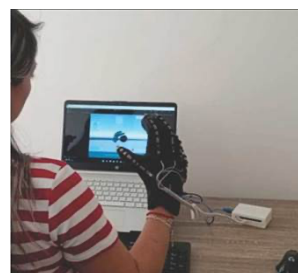
Categoría	Subcategoría	Tipo de sensor / enfoque	Aplicación principal	Ref.
3. Resultados de la aplicación de guantes sensoriales en la rehabilitación física	—	Guantes biosensores, retroalimentación háptica	Avances en guantes biosensores para rehabilitación, prótesis y VR	[18]
	—	Guantes comerciales, sensoriales	Revisión de guantes inteligentes comerciales y sus aplicaciones	[19]
	—	Sensores flexibles, Bluetooth	Guante sensorizado para rehabilitación domiciliaria	[20]
	—	Sensor de flexión	Entrenamiento personalizado y seguro en rehabilitación	[21]
	—	Sensores táctiles, vibrotáctiles	Avances, desafíos y ventajas de guantes inteligentes para rehabilitación	[22]
	—	IMU, retroalimentación de fuerza	Rehabilitación en VR con guante robótico y feedback háptico	[23]
	—	Sensores flexibles, Unity 3D	Rehabilitación de motricidad fina con juegos serios	[24]

Nota: La categoría 1 incluye tanto estudios de aplicación directa en rehabilitación funcional de mano y muñeca como trabajos de contexto tecnológico que permiten comprender tendencias habilitadoras en *wearables*, sensado, monitoreo funcional e interacción terapéutica.

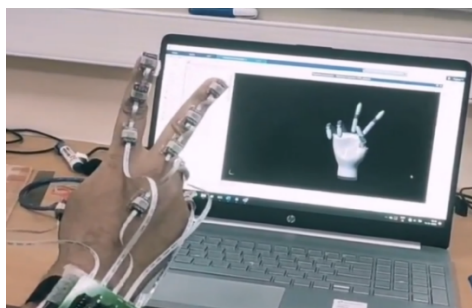
La Figura 4 presenta ejemplos representativos de guantes sensoriales académicos analizados en esta categoría, incluyendo soluciones orientadas a terapia en realidad virtual, motricidad fina, medición cinemática y rehabilitación domiciliaria.



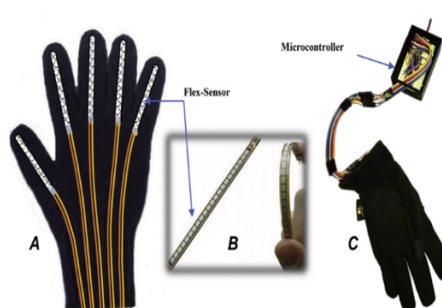
a) Guante robótico para terapia en VR [23].



b) Sistema de rehabilitación de motricidad fina de miembro superior [24].



(d) Sistema de medición cinemática completa de la mano (HKMS) [16].



(e) Guante sensorizado para rehabilitación domiciliaria [20].

Figura 4. Ejemplos de guantes sensoriales académicos.

Entre los trabajos de investigación relacionados con guantes sensoriales en los campos de la salud y la comunicación incluye el guante robótico para terapia con VR, desarrollado por un equipo de investigación de la *Shien-Ming Wu School of Intelligent Engineering de la Southern University of Technology* en China [23], está diseñado para pacientes con discapacidades motoras causadas por accidentes cerebrovasculares, artritis o lesiones en la médula espinal. Este guante combina IMU para rastrear los movimientos de los dedos con un sistema de retroalimentación de fuerza que simula interacciones táctiles en entornos virtuales. Una característica clave del guante es su integración con una interfaz de VR basada en Unity, donde los usuarios pueden realizar ejercicios de agarre y manipular objetos virtuales, como apretar una pelota suave. Esto no solo mejora la precisión del movimiento, sino que también proporciona una experiencia inmersiva que incrementa la motivación del paciente durante el tratamiento.

El sistema de rehabilitación desarrollado por un grupo de investigación del departamento de Automatización Industrial de la Universidad del Cauca (Colombia) se basa en un guante con sensores flexibles que detectan el movimiento de la mano y permiten replicarlo en un entorno virtual en Unity [25]. El guante combina hardware y software (Unity 3D), ofreciendo una solución que permite a los pacientes interactuar con un entorno virtual mediante movimientos reales de la mano, contribuyendo así a la rehabilitación de la motricidad fina.

En una de las innovaciones tecnológicas para la medición de la cinemática de la mano, el artículo *Design and Validation of an IMU-Based Full Hand Kinematic Measurement System*, publicado en [16], presenta el desarrollo de un sistema basado en unidades de medición inercial (IMU) para el análisis completo de las articulaciones de la mano. Este dispositivo, denominado Hand Kinematics Measurement System (HKMS), utiliza 16 IMU colocadas estratégicamente para captar en tiempo real la orientación de los segmentos de la mano, comunicándose vía Wi-Fi y permitiendo la transmisión continua de datos para aplicaciones de investigación clínica y biomecánica. El HKMS fue validado estática y dinámicamente mediante la comparación de sus mediciones con un sistema de rastreo electromagnético de alta precisión (EMTS). Los resultados mostraron errores mínimos, lo que confirma su efectividad para analizar patrones de sinergia de la mano y el rango de movimiento (ROM). Además, el artículo destaca su potencial para uso en entornos clínicos debido a su diseño ligero y no invasivo, que no limita la destreza natural de la mano. Este sistema representa una solución asequible y accesible para el monitoreo de la recuperación de pacientes con trastornos neuromotores.

Otro guante notable en el campo de la rehabilitación es el desarrollado por Janarthanan *et al.* en su artículo *Design and Development of a Sensored Glove for Home-Based Rehabilitation* [20], el cual propone un diseño sensorizado integrado con videojuegos como herramienta terapéutica. Este guante está equipado con sensores flexibles que detectan los movimientos de flexión y extensión de los dedos, transmitiendo los datos en tiempo real mediante un módulo Bluetooth a una aplicación computarizada. La aplicación combina ejercicios terapéuticos con elementos interactivos y de entretenimiento, fomentando la participación activa del paciente. El sistema está diseñado para personas con discapacidades motoras, facilitando la realización de ejercicios repetitivos en un entorno doméstico de manera independiente. A través de un videojuego personalizado, los pacientes controlan un avatar que ejecuta movimientos específicos de los dedos. Este enfoque incluye retroalimentación visual y registros detallados que miden parámetros clave como el rango de movimiento (ROM), la fuerza aplicada y el tiempo dedicado a las sesiones terapéuticas. Los ensayos experimentales validaron la efectividad del guante para involucrar a los usuarios en actividades interactivas, destacando características como su diseño ergonómico, portabilidad y facilidad de uso. Este desarrollo representa un avance significativo en la rehabilitación domiciliar al combinar los principios de la neuroplasticidad con tecnologías portátiles, mejorando así la recuperación funcional y la motivación del paciente.

En el ámbito de la salud, la gamificación ha demostrado ser eficaz para mejorar la adherencia al tratamiento, incrementar la motivación del paciente y facilitar el aprendizaje de nuevas habilidades motoras. En este sentido, la gamificación se define como: “la aplicación de elementos y principios del diseño de juegos en contextos no lúdicos, con el objetivo de motivar y aumentar la participación del usuario” [11].

Como se muestra en la Tabla 2, los elementos clave de la gamificación incluyen:

- Sistemas de puntuación y recompensas, que proporcionan retroalimentación inmediata;
- Progresión por niveles, que permite un avance gradual y medible;
- Desafíos y metas específicas, que mantienen el interés del usuario;
- Elementos narrativos, que dan contexto y sentido a las actividades; y
- Componentes sociales, que fomentan la competencia saludable y el apoyo mutuo.

Tabla 2. Elementos, mecanismos, aplicaciones, efectos y desafíos de la gamificación.

Elementos	Descripción
Elementos de Gamificación [25].	
Puntos	Unidades que cuantifican el logro de tareas específicas, incentivando la participación.
Insignias (Badges)	Representan logros concretos; brindan reconocimiento y sensación de progreso.
Niveles	Indican el avance del usuario a través de diferentes retos o etapas.
Tablas de Clasificación (Leaderboards)	Comparaciones de desempeño que fomentan la competencia o la colaboración.
Desafíos y Misiones	Tareas específicas asociadas a metas y recompensas.
Recompensas	Incentivos tangibles o intangibles otorgados al cumplir objetivos.
Mecanismos Motivacionales [27]	
Refuerzo Positivo	La entrega de recompensas motiva la repetición de comportamientos deseados.
Progresión	Los niveles y logros generan motivación para continuar participando.
Competencia y Colaboración	Las tablas de clasificación y los desafíos incrementan el compromiso.
Retroalimentación Inmediata	La respuesta en tiempo real mantiene el interés y la percepción de control.
Autonomía y Control	La capacidad de tomar decisiones dentro del sistema incrementa la motivación intrínseca.
Aplicaciones de la Gamificación [8]	
Educación	Mejora el aprendizaje y la retención mediante la participación activa.
Salud y Bienestar	Motiva la adopción de hábitos saludables y mejora la adherencia a tratamientos.
Marketing	Incrementa la fidelidad del cliente a través de programas de recompensas.
Productividad	Mejora la eficiencia y la motivación en entornos laborales.
Efectos de la Gamificación [27], [28]	
Aumento de la Motivación	Las recompensas y el progreso claro incrementan el interés del usuario.
Mejora de la Adherencia	Favorece la participación sostenida en programas rutinarios o tediosos.
Compromiso a Largo Plazo	Mantiene la participación mediante elementos dinámicos y de progresión.
Desarrollo de Habilidades	Facilita la práctica repetitiva y la adquisición de habilidades específicas.
Críticas y Desafíos [29]	
Superficialidad	Si se diseña de forma deficiente, la gamificación puede ser percibida como artificial y perder eficacia.
Dependencia de Recompensas	El uso excesivo de recompensas externas puede disminuir la motivación intrínseca.
Diferencias Individuales	No todos los usuarios responden de la misma manera a los estímulos gamificados.

3.2. Guantes sensoriales comerciales con relevancia terapéutica o evaluativa para rehabilitación funcional

Con el fin de complementar la evidencia académica revisada, se analizaron guantes sensoriales comerciales disponibles en el mercado a partir de información técnica publicada por fabricantes y distribuidores especializados.

A diferencia de la literatura científica, donde los dispositivos suelen describirse en función de protocolos terapéuticos específicos, el ecosistema comercial agrupa productos con finalidades diversas, que incluyen rehabilitación, evaluación funcional, entrenamiento motor, interacción háptica, captura de movimiento y realidad virtual. Por ello, en esta sección se distinguen dos tipos de dispositivos: (i) guantes con uso terapéutico o evaluativo directo, y (ii) guantes con valor tecnológico comparativo o contextual, cuya relevancia para este estudio radica en sus capacidades de sensado, retroalimentación e interacción, aunque su finalidad principal no sea clínica.

La Tabla 3 reúne tanto dispositivos con uso terapéutico o evaluativo directo como sistemas con valor comparativo o contextual, distinguiéndolos según su propósito principal y su grado de pertinencia para la rehabilitación funcional.

Esta clasificación (ver Figura 5 y Figura 6) permite evitar una interpretación excesivamente amplia del objeto de estudio y, al mismo tiempo, conservar una visión representativa del ecosistema tecnológico actual. En particular, se consideraron relevantes para esta revisión aquellos sistemas capaces de medir, asistir o retroalimentar variables funcionales como rango de movimiento, fuerza, agarre, seguimiento cinemático e interacción motora,

así como aquellos que, mediante realidad virtual o retroalimentación háptica, presentan potencial de transferencia a contextos terapéuticos o de entrenamiento funcional.

Tabla 3. Guantes sensoriales comerciales con relevancia terapéutica, evaluativa o comparativa para la rehabilitación funcional.

Producto	Fabricante	Tipo de sensor	Propósito principal	Relevancia para rehabilitación funcional	Clasificación
ANIKA Glove https://zarya-med.com	Zarya Med	Sensor de flexión de doble segmento por dedo	Rehabilitación y evaluación motora	Alta; orientado a seguimiento del progreso, evaluación posoperatoria y apoyo a personas con discapacidad motora	Uso terapéutico/evaluativo directo
Neofect Finger Splint https://www.neofect.com/us	Neofect USA	Sensor de flexión por dedo	Dispositivo médico para cuantificación de movimiento	Alta; útil para mejora de función motora y seguimiento en pacientes con accidente cerebrovascular o trastornos sensoriales	Uso terapéutico/evaluativo directo
Finger TPS II https://pressureprofile.com/body-pressure-mapping/finger-tps	Medical Tactile Inc.	Sensores capacitivos de presión en dedos	Medición de presión táctil y agarre	Alta; útil para evaluación funcional distal y análisis de desempeño manual	Uso terapéutico/evaluativo directo
TactileGlove https://pressureprofile.com/body-pressure-mapping/tactile-glove	Medical Tactile Inc.	Sensores capacitivos de presión en dedos y palma	Medición de presión táctil de la mano	Alta; útil para evaluación funcional, interacción manual y seguimiento de patrones de contacto	Uso terapéutico/evaluativo directo
ergoGLOVE / ergoPaK https://hogganscientific.com/product/ergopa-k-ergoglove-ergonomic-fsr-sensor-system	Hoggan Scientific	Sensores de fuerza resistiva (FSR)	Medición de fuerza en puntas de los dedos	Media-alta; útil para cuantificación de fuerza y análisis funcional en tareas de agarre	Uso terapéutico/evaluativo directo
Grip Systemv https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/grip-system	Tekscan	349 sensores resistivos de presión	Medición de fuerza de agarre y presión táctil	Alta; permite evaluación cuantitativa del desempeño manual y funcional	Uso terapéutico/evaluativo directo
SenseGlove https://www.senseglove.com	SenseGlove	Sensor de fuerza y retroalimentación háptica	Interacción háptica y simulación en VR	Alta transferencia potencial; útil para entrenamiento motor, feedback terapéutico e interacción inmersiva	Valor comparativo/transferencia potencial
Hi5 VR Glove https://www.noitom.com	Noitom	Unidad de medición inercial (IMU)	Captura de movimiento e interacción natural en VR	Media; útil como referencia tecnológica para seguimiento cinemático e interacción inmersiva	Valor comparativo/transferencia potencial
5DT Data Glove 5 Ultra http://www.5dt.com	5DT Technologies	Sensor de flexión en cada dedo	Captura de movimiento y control computacional	Media; útil para medición del movimiento de mano y dedos con potencial aplicación evaluativa	Valor comparativo/transferencia potencial

Producto	Fabricante	Tipo de sensor	Propósito principal	Relevancia para rehabilitación funcional	Clasificación
MoCap Pro https://stretchsense.com	StretchSense	Sensores de extensión segmentados	Captura de movimiento y seguimiento cinemático	Media; relevante para análisis cinemático y transferencia a sistemas terapéuticos basados en movimiento	Valor comparativo/transferencia potencial
Manus Prime 3 Haptic XR https://www.manus-meta.com	Manus VR	Sensor de flexión y retroalimentación háptica	Realidad virtual y simulaciones interactivas	Alta transferencia potencial; útil para tareas terapéuticas inmersivas y entrenamiento funcional	Valor comparativo/transferencia potencial
CaptoGlove https://www.captoglove.com	CaptoGlove	Sensor de flexión en cada dedo	Interacción inmersiva en VR con manipulación de objetos	Media; relevante para interacción motora y análisis de control manual en entornos virtuales	Valor comparativo/transferencia potencial
MiMu Gloves https://mimugloves.com	MiMu	Sensor de flexión en cada dedo	Creación musical e interacción expresiva	Baja; sin propósito clínico directo, pero útil como referencia contextual de interfaces gestuales portátiles	Referencia contextual no terapéutica
ProGlove https://proglove.com	ProGlove	Sensores para interacción operativa industrial	Escaneo y eficiencia operativa en almacenes y manufactura	Baja; sin propósito clínico directo, pero ilustrativo del desarrollo comercial de guantes sensoriales	Referencia contextual no terapéutica

Fuente: Elaboración propia.



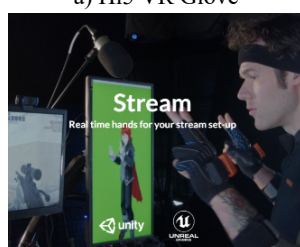
a) Hi5 VR Glove



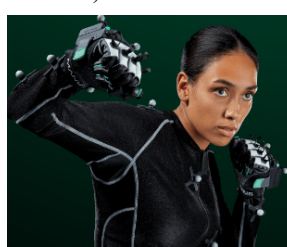
b) SenseGlove



c) 5DT Gloves



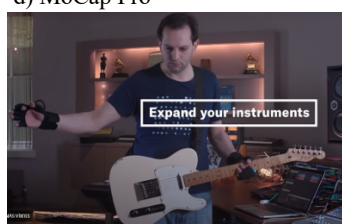
d) MoCap Pro



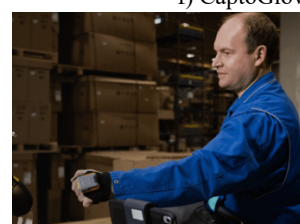
e) Manus Prime 3



f) CaptoGlove



i) MiMu Gloves



j) ProGlove

Figura 5. Guantes sensoriales comerciales con valor comparativo o contextual para la rehabilitación funcional.

Los productos comerciales como Hi5 VR Glove, SenseGlove, 5DT Data Glove 5 Ultra, MoCap Pro, Manus Prime 3 Haptic XR y CaptoGlove se sitúan principalmente en el ámbito de la interacción inmersiva, la captura de movimiento o la realidad virtual, aunque presentan características tecnológicas de interés para la rehabilitación, tales como sensores de flexión, IMU, retroalimentación háptica y compatibilidad con motores de desarrollo como Unity o Unreal Engine. Su inclusión en este análisis responde a su valor comparativo, ya que muestran tendencias actuales en sensado, ergonomía, interacción y retroalimentación que podrían transferirse a futuros sistemas terapéuticos.

En contraste, dentro del conjunto comercial identificado, algunos dispositivos se relacionan de forma más directa con objetivos de evaluación o rehabilitación (ver Figura 6). En esta categoría se ubican, por ejemplo, sistemas como ANIKA, Neofect Finger Splint, Finger TPS II, TactileGlove, ergoPaK/ergoGLOVE y Grip System, los cuales incorporan sensores de flexión, presión o fuerza y permiten capturar información funcional útil para seguimiento clínico, evaluación motora o entrenamiento terapéutico. En estos casos, la pertinencia para la rehabilitación de muñeca o de la función distal del miembro superior es más explícita, ya que los dispositivos se orientan a registrar desempeño motor, fuerza de agarre, presión táctil o evolución funcional del usuario.



a) ANIKA Glove



b) Neofect Finger



c) Finger TPS II



d) TactileGlove



e) ergoGLOVE



f) Grip System

Figura 6. Guantes sensoriales comerciales con uso terapéutico o evaluativo directo en rehabilitación de mano, muñeca y función distal del miembro superior.

4. Discusión de resultados

Los WSG comerciales se han consolidado como herramientas avanzadas, especialmente en aplicaciones industriales, médicas y de realidad virtual. Su precisión, facilidad de uso y robustez los hacen adecuados para entornos clínicos, industriales y de investigación especializada; sin embargo, su costo elevado limita su adopción en contextos con recursos restringidos y en proyectos de pequeña escala. En este sentido, la falta de productos

comerciales de bajo costo que integren aplicaciones en entornos de VR ha puesto de manifiesto una oportunidad importante para la investigación y el desarrollo en este campo. Los guantes sensoriales disponibles comercialmente han proporcionado una visión general de las características y tipos de sensores que se han implementado a nivel de producción para aproximarse a un sistema mínimo funcional. En este sentido, a pesar de que se han identificado algunas limitaciones en la precisión de los datos, la relación costo-beneficio de desarrollar dispositivos portátiles sobre plataformas de hardware abierto, orientadas a la tendencia “*hazlo tú mismo*” (DIY), se ha destacado como una solución alternativa viable.

Aunque los métodos de fabricación utilizados para construir dispositivos portátiles han diferido significativamente de las versiones comerciales, se ha demostrado que es posible construir guantes sensoriales con equipamientos mínimos para cumplir las tareas propuestas. En particular, los guantes sensoriales implementados en [30], [31], [32], han aprovechado su bajo consumo de energía y sus capacidades de conectividad inalámbrica, características que se han consolidado como fundamentales para la transmisión de datos en tiempo real durante períodos prolongados, sin comprometer la eficiencia global de la batería.

En la Tabla 4, se listan algunas diferencias entre los WSG comerciales y no comerciales, así como sus principales limitaciones. A partir de este análisis comparativo, se ha destacado que los WSG no comerciales han ofrecido una alternativa accesible y altamente flexible, especialmente adecuada para contextos de bajo costo y necesidades específicas. Su capacidad de personalización, junto con el uso de plataformas de hardware abierto, ha permitido que estudiantes, investigadores y desarrolladores independientes experimenten con prototipos funcionales sin requerir grandes inversiones. Por el contrario, los WSG comerciales se han consolidado como soluciones maduras orientadas a la industria, la rehabilitación médica y aplicaciones de realidad virtual, donde la precisión, durabilidad y soporte técnico profesional han sido esenciales. Aunque su costo elevado ha limitado su adopción en proyectos de pequeña escala, estos dispositivos han demostrado un desempeño superior gracias a sus sensores avanzados, ergonomía optimizada y compatibilidad con sistemas profesionales.

Tabla 4. Comparación entre WSG comerciales y no comerciales.

Criterio	WSG comerciales	WSG no comerciales
Cobertura anatómica	Mano completa, dedos y en algunos casos muñeca o antebrazo, según el diseño del fabricante.	Variable; pueden enfocarse en dedos, mano, muñeca o configuraciones híbridas según el objetivo del prototipo.
Articulaciones asistidas o monitoreadas	Predominan articulaciones de dedos y agarre; algunos integran seguimiento global de mano y postura funcional.	Alta flexibilidad para adaptar el diseño a articulaciones específicas de dedos, mano o muñeca.
Movimientos entrenados o medidos	Flexión-extensión, agarre, apertura-cierre de mano, presión y manipulación de objetos; en algunos casos interacción háptica inmersiva.	Flexión-extensión de dedos y muñeca, pronación-supinación, agarre, ejercicios repetitivos personalizados y seguimiento de trayectorias motoras.
Tipo de sensores	IMU, sensores de flexión, presión, fuerza, sensores capacitivos y sistemas hápticos integrados.	Sensores flexibles, IMU de bajo costo, FSR, flexómetros, sensores táctiles y combinaciones modulares.
Tipo de actuadores o retroalimentación	Retroalimentación háptica, de fuerza o vibratoria; en algunos casos resistencia mecánica o feedback inmersivo en VR.	Predomina retroalimentación visual; ocasionalmente vibratoria o háptica simple, dependiendo del prototipo.
Propósito terapéutico	Evaluación funcional, seguimiento clínico, entrenamiento motor, simulación, interacción terapéutica y uso en entornos especializados.	Rehabilitación domiciliar, prototipado terapéutico, investigación aplicada, entrenamiento personalizado y validación experimental.
Métricas reportadas con mayor frecuencia	Rango de movimiento, fuerza de agarre, presión, precisión de interacción, patrones cinemáticos y datos de desempeño.	ROM, tiempo de ejecución, número de repeticiones, precisión del movimiento, fuerza aplicada y métricas definidas ad hoc.
Tipo de interacción con el usuario	Entornos VR/AR, software propietario, simuladores, interfaces clínicas y plataformas con SDK.	Videojuegos terapéuticos, interfaces desarrolladas en Unity, Arduino, ESP32 o plataformas abiertas.
Nivel de personalización terapéutica	Limitado por ecosistemas cerrados y configuraciones predefinidas del fabricante.	Alto; permite adaptar ejercicios, sensores, interfaz, mecánicas de juego y objetivos terapéuticos.

Usabilidad e implementación	Alta; suelen ser sistemas listos para usar, ergonómicos y con soporte técnico.	Moderada; requieren ensamblaje, calibración, programación y validación adicional.
Validación clínica	Variable; algunos cuentan con aplicación clínica o documentación técnica más madura.	Frecuentemente limitada a pruebas piloto, validaciones preliminares o estudios con muestras pequeñas.
Contexto principal de uso	Clínico, industrial, simulación, VR, rehabilitación especializada y evaluación funcional avanzada.	Académico, experimental, rehabilitación domiciliaria y soluciones de bajo costo.
Ventajas principales	Robustez, precisión, estabilidad, integración profesional y soporte del fabricante.	Accesibilidad económica, flexibilidad, adaptabilidad y facilidad de experimentación.
Limitaciones principales	Alto costo, dependencia tecnológica, menor apertura y personalización limitada.	Menor robustez, precisión variable, validación clínica insuficiente y menor estandarización.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra que la comparación entre sistemas comerciales y no comerciales no puede reducirse únicamente a diferencias de costo o precisión, sino que involucra dimensiones anatómicas, funcionales, terapéuticas e interactivas. En particular, se observa que muchos dispositivos basados en guante se centran en mano y dedos, pero conservan relevancia para la rehabilitación de muñeca cuando participan en tareas de agarre, coordinación, seguimiento cinemático, entrenamiento repetitivo o interacción terapéutica en entornos inmersivos. Esta perspectiva permite interpretar los sistemas analizados desde una lógica funcional más amplia, sin perder de vista que su pertinencia clínica depende del grado en que contribuyan efectivamente a objetivos terapéuticos de evaluación, recuperación o entrenamiento motor.

4.1. Limitaciones del estudio

A pesar de que esta revisión ofrece una visión amplia y actualizada sobre los sistemas de rehabilitación de muñeca basados en guantes sensoriales y tecnologías inmersivas, sus resultados deben interpretarse considerando varias limitaciones. En primer lugar, la búsqueda bibliográfica se restringió a publicaciones indexadas en Scopus, PubMed e IEEE Xplore, así como a trabajos publicados entre 2010 y 2025 en inglés y español. Esta delimitación, aunque útil para mantener coherencia temática y calidad editorial, pudo haber dejado fuera estudios relevantes presentes en otras bases de datos o trabajos publicados en otros idiomas.

En segundo lugar, los estudios incluidos presentan una marcada heterogeneidad en cuanto a poblaciones evaluadas, tipos de sensores, protocolos terapéuticos, métricas de desempeño y objetivos clínicos. Esta variabilidad dificulta la comparación directa entre sistemas, limita la posibilidad de realizar una síntesis cuantitativa robusta y obliga a interpretar los hallazgos desde una perspectiva predominantemente comparativa y cualitativa.

En tercer lugar, una parte de la información sobre guantes sensoriales comerciales proviene de fichas técnicas y documentación proporcionada por fabricantes y distribuidores. Aunque estas fuentes resultan útiles para caracterizar el estado actual del mercado, también pueden introducir sesgos relacionados con la selección de atributos reportados, la ausencia de validación independiente y la limitada transparencia sobre el desempeño real de los dispositivos en contextos clínicos.

Asimismo, se identificó que una proporción importante de los desarrollos académicos corresponde a prototipos o estudios piloto con muestras pequeñas, condiciones controladas y validación limitada en pacientes reales. En particular, siguen siendo escasos los estudios clínicos longitudinales que permitan evaluar la eficacia sostenida de estos sistemas, su impacto funcional a largo plazo y su transferencia efectiva a escenarios de rehabilitación cotidiana, tanto en el entorno clínico como en el domiciliario.

Finalmente, aunque la gamificación y la realidad virtual muestran resultados prometedores en motivación, adherencia y experiencia de uso, la evidencia todavía es insuficiente para generalizar sus beneficios en todos los perfiles de pacientes y contextos terapéuticos. Por ello, los hallazgos del presente trabajo deben entenderse como una síntesis crítica del estado actual del campo, más que como una validación concluyente de una única solución tecnológica.

5. Conclusiones

La presente revisión permitió identificar avances relevantes en el desarrollo de sistemas basados en guantes sensoriales con aplicación en rehabilitación de muñeca, así como en tecnologías afines de sensado, interacción háptica, realidad virtual y gamificación. En conjunto, la evidencia revisada muestra que estos sistemas constituyen una vía prometedora para enriquecer la evaluación funcional, aumentar la motivación del paciente y favorecer intervenciones terapéuticas más interactivas, personalizadas y potencialmente transferibles a contextos clínicos y domiciliarios.

Uno de los hallazgos principales del análisis es que el campo no se organiza exclusivamente alrededor de dispositivos diseñados de forma explícita para la muñeca, sino también a partir de sistemas orientados a mano y dedos que participan en procesos funcionales integrados del miembro distal superior. Esta observación permitió distinguir entre tecnologías con uso terapéutico directo y tecnologías con valor contextual o comparativo, lo cual constituye un aporte relevante del presente trabajo para delimitar con mayor precisión el ecosistema actual de guantes sensoriales aplicables a rehabilitación.

El análisis comparativo mostró dos tendencias complementarias. Por un lado, los guantes sensoriales comerciales ofrecen mayor robustez, precisión, soporte técnico e integración con ecosistemas de software consolidados, lo que los vuelve especialmente atractivos para entornos clínicos, industriales y de simulación avanzada. Sin embargo, su costo elevado, su dependencia de tecnologías propietarias y su limitada apertura para adaptación reducen su accesibilidad en contextos con recursos restringidos. Por otro lado, los desarrollos no comerciales basados en hardware abierto representan alternativas más económicas, flexibles y personalizables, con especial potencial para investigación aplicada, prototipado rápido y rehabilitación domiciliaria, aunque todavía enfrentan limitaciones en precisión, durabilidad, estandarización y validación clínica.

Asimismo, la revisión confirma que la integración de elementos de gamificación y entornos inmersivos de realidad virtual puede contribuir de manera importante a mejorar la adherencia terapéutica, disminuir la monotonía de los ejercicios repetitivos y promover una participación más activa del paciente. No obstante, también se identificaron limitaciones persistentes en el campo, entre ellas la heterogeneidad metodológica de los estudios, la escasez de protocolos comparables, la limitada validación en pacientes reales y la insuficiencia de estudios longitudinales que permitan determinar el impacto funcional sostenido de estas tecnologías.

Entre las oportunidades detectadas destacan el diseño de guantes sensoriales de bajo costo centrados en el usuario, la mejora de la interoperabilidad entre hardware y software, la incorporación de métricas funcionales más estandarizadas y la integración de inteligencia artificial para análisis automático de movimiento, personalización terapéutica y monitoreo remoto. En este sentido, uno de los aportes centrales del presente trabajo es mostrar que el desarrollo futuro de sistemas de rehabilitación de muñeca no depende únicamente de dispositivos más sofisticados, sino de soluciones tecnológicamente integradas, clínicamente pertinentes, accesibles y mejor delimitadas en términos de su propósito terapéutico.

Como líneas futuras de investigación, se recomienda profundizar en la integración de inteligencia artificial para el análisis automático de movimiento, la detección de patrones de recuperación y la generación de retroalimentación adaptativa en tiempo real. Del mismo modo, el empleo de técnicas de aprendizaje automático puede favorecer la personalización de terapias según el perfil funcional del paciente, su progreso y su respuesta al tratamiento. Finalmente, resulta prioritario avanzar en el diseño de guantes sensoriales de bajo costo, robustos y centrados en el usuario, especialmente pensados para contextos de recursos limitados y para estrategias de rehabilitación híbrida entre el hogar y el entorno clínico.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad del Istmo, campus ciudad de Ixtpec, por la financiación y el apoyo brindado a este proyecto interno, registrado bajo el número PIF-02 IECA_UNISTMO_2024.

6.1. Declaración de financiación

Esta investigación ha sido financiada y apoyada por la Universidad del Istmo, Ixtpec, México, bajo el proyecto interno número PIF-02 IECA_UNISTMO_2024. El Instituto de Estudios Constitucionales y Administrativos (IECA) participó como coordinador y supervisor del proyecto.

6.2. Conflicto de intereses

Los autores declaran que han recibido financiamiento de la Universidad del Istmo para la realización de este proyecto (PIF-02 IECA_UNISTMO_2024). Fuera de ello, no existen otros conflictos de intereses relacionados con este manuscrito.

7. Referencias

- [1] Sadeghnejad, S., Abadi, V. S. E., Jafari, B. (2023). Rehabilitation robotics: History, applications, and recent advances. En O. Boubaker (Ed.), *Medical and healthcare robotics: New paradigms and recent advances* (pp. 63–85). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18460-4.00008-1>
- [2] Aghdam, Z. N., Rahmani, A. M., Hosseinzadeh, M. (2021). The role of the Internet of Things in healthcare: Future trends and challenges. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105903>
- [3] Ometov, A., Shubina, V., Klus, L., Skibińska, J., Saafi, S., Pascacio, P., Flueratoru, L., Quezada Gaibor, D., Chukhno, N., Chukhno, O., Ali, A., Channa, A., Svertoka, E., Bin Qaim, W., Casanova-Marqués, R., Holcer, S., Torres-Sospedra, J., Casteleyn, S., Ruggeri, G., Araniti, G., Burget, R., Hosek, J., Lohan, E. S. (2021). A survey on wearable technology: History, state-of-the-art and current challenges. *Computer Networks*, 193, 1-37. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108074>
- [4] de Beukelaar, T. T., Mantini, D. (2023). Monitoring resistance training in real time with wearable technology: Current applications and future directions. *Bioengineering*, 10 (9), 1-20. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10091085>
- [5] Khan, S., Alam, M. (2021). Wearable Internet of Things for personalized healthcare: Study of trends and latent research. En R. Patgiri, A. Biswas, P. Roy (Eds.), *Health informatics: A computational perspective in healthcare* (pp. 43–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9735-0_3
- [6] Ma, B., Nie, S., Ji, M., Song, J. (2020). Research and analysis of sports training real-time monitoring system based on mobile artificial intelligence terminal. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/8879616>
- [7] Meijer, H. A. W., Obdeijn, M. C., van Loon, J., van den Heuvel, S. B. M., van den Brink, L. C., Schijven, M. P., Goslings, J. C., Schepers, T. (2023). Rehabilitation after distal radius fractures: Opportunities for improvement. *Journal of Wrist Surgery*, 12 (5), 460–473. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1769925>
- [8] Dereli, M., Kahraman, T. (2024). Gamification in physiotherapy and rehabilitation education: A narrative review. *Bulletin of Faculty of Physical Therapy*, 29, (4), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s43161-023-00168-1>
- [9] Zlotnik, S., Weiss, P. L., Raban, D. R., Houldin-Sade, A. (2023). Use of gamification for adult physical rehabilitation in occupational therapy; A novel concept? *Hong Kong Journal of Occupational Therapy*, 36 (2), 51-56. <https://doi.org/10.1177/15691861231179037>
- [10] Ismail, M. A. S., Adib, M. A. H. M. (2024). Rehabilitation and gamification technology device for lower extremities patient: A review. En M. H. A. Hassan, M. N. Omar, N. H. Johari, Y. Zhong (Eds.), *Proceedings of the 2nd Human Engineering Symposium* (pp. 351–361). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6890-9_28
- [11] Kennard, M., Hassan, M., Shimizu, Y., Suzuki, K. (2024). Max Well-Being: A modular platform for the gamification of rehabilitation. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1-12. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1382157>
- [12] Sgubin, G., Deodato, M., Murena, L. (2023). Gamification in rehabilitation: The role of subjective experience in a multisensory learning context—A narrative review. *Gestalt Theory*, 45 (1–2), 121–137. <https://doi.org/10.2478/gth-2023-0012>
- [13] Ferreira, J. J., Fernandes, C. I., Rammal, H. G., Veiga, P. M. (2021). Wearable technology and consumer interaction: A systematic review and research agenda. *Computers in Human Behavior*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106710>
- [14] Adans-Dester, C., Hankov, N., O'Brien, A., Vergara-Diaz, G., Black-Schaffer, R., Zafonte, R., Dy, J., Lee, S. I., Bonato, P. (2020). Enabling precision rehabilitation interventions using wearable sensors and machine learning to track motor recovery. *npj Digital Medicine*, 3 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-00328-w>

- [15] Li, Y., Yin, J., Liu, S., Xue, B., Shokoohi, C., Ge, G., Hu, M., Li, T., Xue, T., Rao, Z., Meng, F., Shi, H., Ji, X., Servati, P., Xiao, X., Chen, J. (2023). Learning hand kinematics for Parkinson's disease assessment using a multimodal sensor glove. *Advanced Science*, 10 (20), 1-10. <https://doi.org/10.1002/adv.202206982>
- [16] Shenoy, P., Gupta, A., Varadhan, S. K. M. (2022). Design and validation of an IMU based full hand kinematic measurement system. *IEEE Access*, 10, 93812–93830. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3203186>
- [17] Pimentel-Ponce, M., Romero-Galisteo, R. P., Palomo-Carrión, R., Pinero-Pinto, E., Merchán-Baeza, J. A., Ruiz-Muñoz, M., Oliver-Peche, J., González-Sánchez, M. (2024). Gamification and neurological motor rehabilitation in children and adolescents: A systematic review. *Neurología*, 39 (1), 63–83. <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2021.02.011>
- [18] Demolder, C., Molina, A., Hammond, F. L., Yeo, W. H. (2021). Recent advances in wearable biosensing gloves and sensory feedback biosystems for enhancing rehabilitation, prostheses, healthcare, and virtual reality. *Biosensors and Bioelectronics*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113443>
- [19] Caeiro-Rodríguez, M., Otero-González, I., Mikic-Fonte, F. A., Llamas-Nistal, M. (2021). A systematic review of commercial smart gloves: Current status and applications. *Sensors*, 21 (8), 1-33. <https://doi.org/10.3390/s21082667>
- [20] Janarthanan, V., Assad-Uz-Zaman, M., Rahman, M. H., McGonigle, E., Wang, I. (2020). Design and development of a sensed glove for home-based rehabilitation. *Journal of Hand Therapy*, 33 (2), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2020.03.023>
- [21] Meng, F., Liu, C., Li, Y., Hao, H., Li, Q., Lyu, C., Wang, Z., Ge, G., Yin, J., Ji, X., Xiao, X. (2023). Personalized and safe soft glove for rehabilitation training. *Electronics*, 12 (11), 1-15. <https://doi.org/10.3390/electronics12112531>
- [22] Ozioko, O., Dahiya, R. (2022). Smart tactile gloves for haptic interaction, communication, and rehabilitation. *Advanced Intelligent Systems*, 4 (2), 1-22. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100091>
- [23] Li, F., Chen, J., Ye, G., Dong, S., Gao, Z., Zhou, Y. (2023). Soft robotic glove with sensing and force feedback for rehabilitation in virtual reality. *Biomimetics*, 8 (1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010083>
- [24] Guerrero Hernández, A. L., Vivas Albán, O. A., Sabater Navarro, J. M. (2023). Sistema de rehabilitación de motricidad fina de miembro superior utilizando juegos serios. *Ingeniería y Desarrollo*, 41 (1), 28–49. <https://doi.org/10.14482/inde.41.01.615.985>
- [25] Evans, J., Salisbury, J., Schulz, S., Bacak, C., Sandler, A., Parnes, N., Scanaliato, J., Childs, B. (2023). Gamification has the potential to improve patient engagement and adherence in physical therapy. *Journal of Orthopaedic Business*, 3 (4), 41–45. <https://www.jorthobusiness.org/index.php/jorthobusiness/article/view/41>
- [26] Then, J. W., Shivdas, S., Tunku Ahmad Yahaya, T. S., Ab Razak, N. I., Choo, P. T. (2020). Gamification in rehabilitation of metacarpal fracture using cost-effective end-user device: A randomized controlled trial. *Journal of Hand Therapy*, 33 (2), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2020.03.029>
- [27] Brigham, T. J. (2015). An introduction to gamification: Adding game elements for engagement. *Medical Reference Services Quarterly*, 34 (4), 471–480. <https://doi.org/10.1080/02763869.2015.1082385>
- [28] Toda, A. M., Valle, P. H. D., Isotani, S. (2018). The dark side of gamification: An overview of negative effects of gamification in education. En A. I. Cristea, I. I. Bittencourt, F. Lima (Eds.), *Higher education for all: From challenges to novel technology-enhanced solutions* (pp. 143–156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97934-2_9
- [29] Subhan, F., Mirza, A., Su'ud, M. B. M., Alam, M. M., Nisar, S., Habib, U., Iqbal, M. Z. (2023). AI-enabled wearable medical Internet of Things in healthcare system: A survey. *Applied Sciences*, 13 (3), 1-18. <https://doi.org/10.3390/app13031394>
- [30] Hercog, D., Lerher, T., Truntiĉ, M., Težak, O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*, 23 (15), 1-20. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
- [31] Paramita, S., Das Bebartta, H. N., Pattanayak, P. (2021). IoT based healthcare monitoring system using 5G communication and machine learning models. En R. Patgiri, A. Biswas, P. Roy (Eds.), *Health informatics: A computational perspective in healthcare* (pp. 159–182). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9735-0_9