



---

**Universidad de Valladolid**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS  
TELECOMUNICACIONES**

TESIS DOCTORAL:

**SISTEMA HARDWARE-SOFTWARE PARA CAPTURA DE  
MOVIMIENTOS CON DISPOSITIVOS INERCIALES  
VESTIBLES: APLICACIÓN EN LA VALORACIÓN  
ERGONÓMICA EN ENTORNO INDUSTRIAL E  
INCORPORACIÓN DE ADQUISICIÓN MULTIMODAL  
MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**

PRESENTADA POR **JAVIER GONZÁLEZ ALONSO**

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

POR LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DIRIGIDA POR:

**DR. MARIO MARTÍNEZ ZARZUELA**

2025



*A mi familia, amigos y compañeros*



# Agradecimientos

Llegar hasta aquí no ha sido un camino fácil, nada fácil, pero sin duda ha sido una aventura con sus buenos y malos momentos, sus retos en principio inalcanzables y, sobre todo, el apoyo incondicional de muchas personas gracias a las cuales puedo decir que sigo en esto.

En primer lugar, quiero agradecer a todos los que forman parte del Grupo de Telemática e Imagen. Aunque el laboratorio haya pasado también por distintas etapas, todas las personas que han pasado por él han llenado de entusiasmo, ilusión e ideas sus paredes. A todos ellos, gracias por estar siempre ahí, por el apoyo incondicional y por hacer que los días difíciles fueran más llevaderos. A los que ya no están, como Héctor, Raúl y David, su recuerdo, sus ánimos y las risas siguen siendo parte esencial de este camino. Y a las nuevas incorporaciones, gracias por traer aire fresco y seguir manteniendo el espíritu del grupo tal como es, lleno de creatividad, talento y trabajo duro.

Debo un agradecimiento muy especial a Mario, mi tutor de tesis. Siempre es capaz de buscar la manera de que todo funcione, incluso cuando parecía imposible. Gracias por tu paciencia conmigo, por tu orientación y por demostrarme que se puede conseguir.

No puedo olvidar a mis amigos, sobre todo en los momentos de mayor presión. Especialmente a David y Gabriel, por estar ahí, por las conversaciones que ayudaban a despejar la mente y por los momentos de sacarnos del bache mutuamente. Y por supuesto a Carla, por soportar todo lo que implica un proceso como este. Por los ánimos y por el espíritu de lucha, que con sólo una pequeña parte de la tuya ya me vale para aguantarlo todo.

Por último, pero sin duda no menos importante, a mi familia. Sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible. Gracias por estar siempre ahí.

A todos, de corazón, gracias.



# Resumen

La prevalencia de los trastornos musculoesqueléticos (MSDs) representa un desafío crítico para la salud laboral, afectando directamente la calidad de vida de los trabajadores y la eficiencia de los entornos industriales. La identificación temprana de estos trastornos y la implementación de estrategias preventivas han cobrado especial relevancia en un contexto donde los métodos tradicionales de evaluación ergonómica y análisis del movimiento siguen dependiendo de observaciones manuales y tecnologías costosas.

La integración efectiva de los sistemas de captura de movimiento en entornos reales aún enfrenta barreras tecnológicas y metodológicas, lo que limita su adopción más allá del ámbito académico y de entornos controlados. Esta investigación aborda la necesidad de sistemas accesibles y escalables que permitan evaluar el movimiento sin interferir en la actividad del usuario ni requerir infraestructuras costosas. En este contexto, esta tesis doctoral propone el diseño y desarrollo de un sistema hardware-software para la captura de movimientos mediante dispositivos inerciales vestibles, que además soporta la adquisición basada en cámaras y visión artificial, con aplicación en la realización de valoraciones ergonómicas de puestos de trabajo. A través de un enfoque integral, el trabajo contribuye con los siguientes avances: (i) el desarrollo de un sistema de sensores inerciales vestibles con capacidad de capturar datos cinemáticos en tiempo real, garantizando confiabilidad frente a interferencias electromagnéticas y condiciones variables de operación; (ii) una herramienta multimodal que soporta tanto sensores inerciales como implementaciones monoculares con técnicas de visión artificial, para la evaluación ergonómica semi-automatizada basada en metodologías estandarizadas como RULA; y (iii) la validación experimental del sistema en entornos de laboratorio e industriales.

Estos hallazgos han dado lugar a tres publicaciones científicas en revistas indexadas en el *Journal Citation Reports (JCR)* y a un *modelo de utilidad* en explotación. Los sistemas desarrollados en esta investigación han sido validados en escenarios reales, en el marco de dos proyectos de investigación competitivos y

cuatro contratos de transferencia con empresa. Además, la novedad y conveniencia de las propuestas han sido reconocidas con tres premios de transferencia.

Con todo ello, los resultados obtenidos en esta investigación demuestran la viabilidad y efectividad del sistema hardware-software desarrollado para la captura de movimientos mediante dispositivos inerciales vestibles, así como la incorporación de adquisición multimodal basada en visión artificial. La validación en escenarios reales respalda su aplicabilidad en la valoración ergonómica en entornos industriales, consolidándolo como una alternativa accesible y escalable frente a las metodologías tradicionales de captura de movimiento.

# Abstract

The prevalence of musculoskeletal disorders (MSDs) represents a critical challenge for occupational health, directly affecting the quality of life of workers and the efficiency of industrial environments. The early identification of these disorders and the implementation of preventive strategies have become particularly relevant in a context where traditional methods of ergonomic assessment and motion analysis rely on manual observations and expensive technologies.

Effective integration of motion capture systems in real environments still faces technological and methodological barriers, limiting their adoption beyond academia and controlled environments. This research addresses the need for accessible and scalable systems that enable motion assessment without interfering with user activity or requiring expensive infrastructure. In this context, this doctoral thesis proposes the design and development of a hardware-software system for motion capture using wearable inertial devices, which also supports camera-based acquisition and computer vision, with application in the performance of ergonomic assessments of workstations. Through a comprehensive approach, the work contributes with the following advances: (i) the development of a wearable inertial sensor system capable of capturing kinematic data in real time, ensuring reliability against electromagnetic interference and variable operating conditions; (ii) a multimodal tool that supports both inertial sensors and monocular implementations with computer vision techniques for semi-automated ergonomic assessment based on standardized methodologies such as RULA; and (iii) the experimental validation of the system in laboratory and industrial environments.

These findings have resulted in three scientific publications in journals indexed in the *Journal Citation Report* (JCR) indexed journals and a utility model under exploitation. The systems developed in this research have been validated in real scenarios, in two competitive research projects and three transfer contracts with companies. Nevertheless, three transfer awards attest to the novelty and appropriateness of the proposals made.

The results obtained in this research demonstrate the feasibility and effectiveness of the hardware-software system developed for motion capture through wearable

inertial devices, as well as the incorporation of multimodal acquisition based on artificial vision. The validation in real scenarios supports its applicability in ergonomic assessment in industrial environments, consolidating it as an accessible and scalable alternative to traditional motion capture methodologies.

---

# Índice general

Resumen .....	I
Abstract .....	III
Índice general .....	V
Figuras .....	IX
Abreviaturas .....	XI
Capítulo 1 .....	
Introducción.....	1
1.1 Contexto y motivación .....	1
1.2 Hipótesis y objetivos .....	4
1.2.1 Hipótesis .....	4
1.2.2 Objetivos .....	6
1.3 Metodología.....	10
1.3.1 Fase informativa: Revisión del estado del arte y recopilación de requisitos .....	11
1.3.2 Fase propositiva: Diseño del sistema y selección de tecnologías .....	12
1.3.3 Fase analítica: Implementación y pruebas de concepto .....	13
1.3.4 Fase evaluativa: Validación experimental y comparación con sistemas comerciales.....	13
1.4 Contribuciones.....	15
1.5 Consistencia temática .....	21
1.6 Estructura del documento .....	23
Capítulo 2 .....	
Estado del Arte .....	27
2.1 Tecnologías de captura de movimiento .....	27

---

2.1.1	Sistemas ópticos .....	28
2.1.2	Visión artificial y estimación de pose .....	30
2.1.3	Sistemas de sensores inerciales vestibles (IMUs) .....	31
2.1.4	Sistemas multimodales .....	33
2.2	Revisión sistemática de la tecnología basada en IMUs.....	34
2.2.1	Análisis de la aplicación de IMUs en estudios previos .....	35
2.2.2	Otras revisiones de la tecnología IMU en movimiento humano .....	37
2.2.3	Limitaciones y desafíos pendientes.....	38
2.3	Análisis del movimiento humano.....	39
2.3.1	Introducción al análisis cinemático .....	39
2.3.2	OpenSim: plataforma de análisis cinemático y simulación biomecánica . .....	40
2.3.3	Soluciones comerciales integradas de simulación .....	42
2.4	Evaluación ergonómica .....	43
2.4.1	Método RULA: evaluación ergonómica de miembros superiores .....	44
2.4.2	Evolución de las herramientas tecnológicas en ergonomía.....	45
2.4.3	Aplicaciones en el ámbito laboral .....	46
2.5	Valoración funcional de sujetos con MSDs.....	47
2.5.1	Limitaciones de los métodos tradicionales.....	48
2.5.2	Implementación de sensores inerciales en el ámbito clínico.....	49
2.5.3	Integración de las IMUs con otras tecnologías .....	51
3	Aportaciones.....	53
3.1	Artículo: “Sistema de desarrollo propio para Seguimiento de la Orientación de Partes del Cuerpo Humano y Visualización 3D en un Avatar” .....	53
3.2	Modelo de utilidad en Explotación .....	56
3.3	Artículo: “Desarrollo de un Pipeline Integrado para la Evaluación Ergonómica en la Industria Automotriz” .....	59

---

3.4 Artículo: “ME-WARD: Implementación Multimodal para la Evaluación Ergonómica en Entornos Industriales con herramientas digitales” .....	62
4 Conclusiones y futuros trabajos .....	65
4.1 Conclusiones .....	65
4.2 Resultados .....	71
4.3 Trabajos futuros.....	76
Bibliografía.....	81



---

# Figuras

Figura 1.1. Esquema del contexto, pregunta de investigación, objetivos, aportaciones y evaluación de la tesis .....	9
Figura 1.2. Diagrama de la metodología seguida en la tesis .....	10
Figura 1.3. Pruebas en entornos de laboratorio del sistema vestibular desarrollado.....	16
Figura 1.4. Pruebas en entorno clínico bajo supervisión médica, para verificar el funcionamiento del sistema en condiciones reales. Publicado en CASEIB2020 (González-Alonso et al., 2020).....	16
Figura 1.5. Pruebas en entornos industriales del sistema vestibular desarrollado.....	17
Figura 1.6. Descripción del prototipo de sistema vestibular. ....	18
Figura 1.7. Modelo de utilidad: configuración de nodos emisores con sensores inerciales del sistema.....	18
Figura 1.8. Modelo de utilidad: pantalla de calibración del sistema.....	19
Figura 1.9. Modelo de utilidad: pantalla principal del sistema. ....	19
Figura 1.10. Infraestructura Software integrada para captura, análisis y validación ergonómica. ....	20
Figura 2.1. Resultados de la búsqueda en la literatura de la revisión sistemática.....	35
Figura 2.2. OpenSim v4.5: interfaz principal cargada con el modelo Rajagopal2015 modificado para incluir sensores inerciales en las extremidades superiores.....	41
Figura 4.1. Diagrama de relación de los elementos de la tesis doctoral.....	66



---

# Abreviaturas

<b>3D</b>	Tridimensional o en tres dimensiones
<b>BDD</b>	Base de datos
<b>AKF</b>	Filtro de Kalman adaptativo
<b>EMG</b>	Electromiografía
<b>HMC</b>	Captura de movimiento humano
<b>IK</b>	Cinemática inversa
<b>IMU</b>	Unidad de medición inercial
<b>IoT</b>	Internet de las cosas
<b>NIOSH</b>	Método del National Institute for Occupational Safety and Health
<b>OMC</b>	Sistemas ópticos de captura de movimiento
<b>OWAS</b>	Ovako Working Analysis System
<b>REBA</b>	Rapid Entire Body Assessment
<b>RGB-D</b>	Red, Green, Blue - Depth.
<b>RMSE</b>	Error cuadrático medio
<b>ROM</b>	Rango de movimiento
<b>RULA</b>	Rapid Upper Limb Assessment
<b>SDK</b>	Kit de desarrollo de software
<b>MSDs</b>	Trastornos musculoesqueléticos
<b>WMSDs</b>	Trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo



# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se describe la **motivación** que da lugar a esta investigación, se formulan los **objetivos**, se expone la **metodología** empleada y las principales **contribuciones** de este trabajo de tesis doctoral, además de la **consistencia temática de las publicaciones**. Finalmente, se presenta la **organización** de esta memoria.

### 1.1 Contexto y motivación

Los trastornos musculoesqueléticos (MSDs), que son todas aquellas afecciones que afectan los músculos, tendones, ligamentos, nervios y estructuras de soporte, representan un problema crítico de salud laboral a nivel mundial, afectando tanto la productividad como la calidad de vida de los trabajadores y pacientes con lesiones en proceso de recuperación (EU-OSHA, 2019). Su detección temprana y la corrección de hábitos posturales son esenciales para reducir el impacto de estas afecciones (NIOSH, 2024), principalmente lumbalgias, tendinitis o síndrome del túnel carpiano. No obstante, las metodologías convencionales de evaluación ergonómica y análisis del movimiento dependen de observaciones manuales y de tecnologías costosas, lo que dificulta su aplicación en entornos laborales y clínicos con recursos limitados (Abobakr et al., 2019; Ranavolo et al., 2018).

La captura y el análisis del movimiento humano (HMC, Human Motion Capture) constituye una línea de investigación clave en los contextos de la biomecánica y la ergonomía, ya que permite digitalizar la información postural de manera objetiva. Su implementación en sistemas avanzados de medición ha demostrado ser fundamental en el ámbito industrial y clínico, al posibilitar

---

evaluaciones continuas y precisas de múltiples segmentos corporales, superando así las limitaciones de las técnicas de observación tradicionales (Lind et al., 2023).

Los sistemas ópticos multicámara con marcadores, como Vicon (Oxford metrics, 1984), se consideran el estándar de referencia en la captura de movimiento debido a su alta precisión en la cuantificación de posiciones y trayectorias en entornos controlados. Estos sistemas ofrecen márgenes de error mínimos y una alta fiabilidad en la medición de movimientos, lo que los convierte en la tecnología de referencia para validar nuevas herramientas de HMC (Merriault et al., 2017; Windolf et al., 2008). Sin embargo, estas soluciones requieren infraestructuras complejas e intrusivas, condiciones de iluminación controladas y una inversión extremadamente elevada, lo que limita su aplicabilidad en entornos no controlados (Stanzani et al., 2020). Como resultado, los sistemas ópticos como Vicon no han logrado una adopción generalizada en la industria, donde la integración con los flujos de trabajo requiere superar barreras metodológicas y técnicas (Raptis, Passarella y Conti, 2019). Además, la ausencia de protocolos de calibración estandarizados dificulta su aplicación en la supervisión ergonómica y el análisis en tiempo real, restringiendo su uso principalmente a estudios científicos.

De forma paralela, las técnicas basadas en visión artificial han permitido el desarrollo de soluciones no intrusivas para la captura de movimiento sin necesidad de marcadores. Dispositivos como Kinect v2 (Microsoft Corporation, 2013) utilizan cámaras infrarrojas y proyectores de luz estructurada para generar imágenes RGB-D, obteniendo información de profundidad y posiciones 3D de las articulaciones en tiempo real, lo que ha popularizado su uso en el análisis del movimiento humano (Schlagenhauf, 2018; Zhang, Z., 2012). Más recientemente, sistemas como NVIDIA Maxine BodyTrack (NVIDIA, 2021) han incorporado algoritmos de aprendizaje profundo para mejorar la estimación de pose a partir de imágenes monoculares, ampliando las posibilidades en aplicaciones ergonómicas y biomédicas. Aunque más accesibles que los sistemas ópticos tradicionales, estas soluciones siguen siendo sensibles a la iluminación y a las oclusiones, lo que puede afectar la precisión de la estimación. A esto hay que añadir que su fiabilidad se vea comprometida en configuraciones donde el usuario no está correctamente posicionado respecto al sensor (Ismail y Basah, 2015; Iyer et al., 2015; Khoshelham, et al., 2012; O'Reilly et al., 2018).

En tercer lugar, los sistemas vestibles basados en sensores inerciales (IMUs, Inertial Measurement Units) han ganado relevancia en la captura del movimiento humano debido a su equilibrio entre precisión, portabilidad y accesibilidad económica. Se han convertido en una alternativa viable a los sistemas ópticos superando limitaciones como la necesidad de infraestructuras costosas y la dependencia de condiciones ambientales controladas. Así, permiten la evaluación del movimiento en aplicaciones ergonómicas y biomédicas sin necesidad de cámaras externas ni infraestructura compleja (Huang et al., 2020; Lind et al., 2023).

A pesar de los avances en captura y análisis del movimiento humano, su implementación en entornos reales sigue estando limitada por su alto coste, la necesidad de personal altamente especializado, interferencias electromagnéticas, variabilidad en la iluminación y falta de interoperabilidad entre dispositivos. Estos desafíos resaltan la necesidad de enfoques innovadores para el desarrollo de sistemas de supervisión digitalizados (European Commission, 2016). La limitada adopción de estas tecnologías sigue siendo una barrera para la transformación digital tanto en el sector productivo como en el ámbito clínico (Vogelsang et al., 2019).

Adicionalmente, la pandemia de COVID-19 resaltó la necesidad de contar con sistemas de monitorización y evaluación automatizada en tiempo real (Omboni et al., 2022), ya que el distanciamiento interpersonal y la reducción de desplazamientos hicieron imprescindible el uso de sistemas simples para supervisión remota. Estos sistemas deben permitir su integración tanto en entornos laborales como clínicos y facilitar ajustes inmediatos ante cambios en los puestos de trabajo, garantizando la monitorización continua sin comprometer la seguridad ni la eficiencia de los procesos. Su implementación en entornos reales exige un diseño que minimice el impacto de interferencias electromagnéticas y de la saturación del espectro de radiofrecuencia y que garantice un rendimiento estable en condiciones no controladas (Stanzani et al., 2020). La adaptabilidad, accesibilidad y usabilidad de los sistemas bajo estas condiciones es clave para su viabilidad operativa. Sin embargo, soluciones del estado del arte restringen su aplicabilidad a entornos controlados y esto dificulta su implementación en escenarios dinámicos.

En base a las necesidades detectadas en este contexto y las limitaciones de los sistemas estándar de referencia tradicionales (como Vicon, OptiTrack, PhaseSpace o Qualisys) basados en la utilización de múltiples cámaras de infrarrojo, se detectó una oportunidad de investigación en la búsqueda de soluciones más flexibles y accesibles. Para ello, esta tesis doctoral propone el diseño y desarrollo de un sistema multimodal configurable, capaz de soportar múltiples fuentes de datos y ofrecer distintas alternativas de análisis de movimiento adaptadas a cada contexto específico. Esta investigación incluye el desarrollo de un sistema vestible basado en sensores inerciales y herramientas de software de código abierto, y una implementación de visión artificial monocular. De este modo, la plataforma resultante proporciona una herramienta para la captura y monitorización de movimientos corporales, su análisis cinemático y su evaluación ergonómica, sin necesidad de dispositivos invasivos ni de modificar la actividad del usuario.

En conjunto, este trabajo busca facilitar la detección temprana de riesgos posturales y sentar las bases para mejorar, en el futuro, los procesos de rehabilitación. Asimismo, proporciona a profesionales de la salud y de la ergonomía herramientas avanzadas para la monitorización y el análisis cinemático y biomecánico, contribuyendo así a la prevención y tratamiento de los MSDs.

## **1.2 Hipótesis y objetivos**

### **1.2.1 Hipótesis**

Basándonos en los motivos expuestos en los apartados anteriores, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

***¿Es posible crear un sistema asequible y herramientas abiertas que constituyan una alternativa viable y eficaz a las soluciones tradicionales de HMC para la monitorización, el análisis cinemático y la evaluación ergonómica en entornos reales?***

A partir de esta premisa, se formulan las siguientes hipótesis, que sustentan tanto la viabilidad técnica como la aplicabilidad práctica del sistema propuesto:

- **Hipótesis 1: Fiabilidad y aplicabilidad de sensores inerciales en la captura del movimiento.**

Se plantea que un sistema de desarrollo propio basado en sensores inerciales vestibles puede proporcionar datos cinemáticos con una precisión suficiente para su aplicación en entornos reales, incluso en condiciones no ideales. Esto permitiría mitigar las limitaciones de los sistemas ópticos multicámara con marcadores, tales como su elevado coste, carácter intrusivo y dependencia de entornos controlados. No obstante, no se excluye la incorporación complementaria de captura basada en visión artificial en ciertos contextos.

- **Hipótesis 2: Operatividad en entornos reales diversos.**

Se espera que el sistema propuesto sea capaz de operar de manera estable en entornos industriales, respondiendo adecuadamente ante interferencias electromagnéticas y espacios saturados de señales inalámbricas. Su arquitectura modular y la capacidad de integrar múltiples modalidades de captura facilitarán su adaptación a distintos contextos reales, permitiendo la monitorización en tiempo real en entornos industriales para evaluación ergonómica y para supervisión de trabajadores con MSDs.

- **Hipótesis 3: Automatización de la evaluación ergonómica.**

Se postula que los datos obtenidos por el sistema podrán ser procesados de forma semiautomática para generar informes de evaluación ergonómica. Superando así la dependencia de grabaciones en vídeo o supervisión directa que caracteriza la aplicación manual de escalas estandarizadas como RULA (David, 2005). Esta automatización facilitará la prevención de lesiones mediante la optimización del diseño de puestos de trabajo con ayuda de informes precisos y personalizados.

- **Hipótesis 4: Análisis cinemático y utilidad para valoración funcional.**

Se plantea que el sistema, además de facilitar la evaluación ergonómica, tendrá aplicaciones para el análisis cinemático y la monitorización de las lesiones de trabajadores. Así, la integración de los datos de movimiento capturados en modelos biomecánicos contribuirá a la valoración funcional y seguimiento de trabajadores con lesiones derivadas de MSDs.

- **Hipótesis 5: Integración multimodal y modularidad.**

Se espera que el sistema posea una arquitectura modular capaz de soportar múltiples tecnologías de captura de movimiento, incluyendo la captura basada en vídeo, optimizando así su adaptabilidad a distintos entornos y aplicaciones. Además, la construcción de una base de datos multimodal permitirá su empleo en investigaciones que utilicen modelos de inteligencia artificial para la clasificación y predicción de movimientos.

## 1.2.2 Objetivos

El análisis y captura del movimiento humano (HMC) ha cobrado especial relevancia en entornos laborales, particularmente en la evaluación ergonómica de puestos de trabajo y la monitorización de lesiones musculoesqueléticas derivadas. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos, como la inversión en recursos económicos o técnicos y la resistencia a cambios metodológicos. Esta investigación propone alcanzar un equilibrio entre precisión y accesibilidad tecnológica, integrando un enfoque que combine el ámbito académico y la industria. Con esta visión, y a partir de las hipótesis anteriores, se establece el objetivo fundamental de esta tesis doctoral:

*Diseñar, desarrollar y validar un sistema hardware-software para la captura de movimientos mediante dispositivos inerciales vestibulares de desarrollo propio, con aplicación en la valoración ergonómica en entornos industriales, que permita incorporar de forma complementaria la adquisición multimodal mediante visión artificial. Este sistema deberá proporcionar una solución accesible, precisa y no intrusiva, que facilite la prevención de trastornos musculoesqueléticos, el análisis del movimiento humano y la monitorización postural en escenarios reales. Además, su diseño modular habilitará distintas opciones de entrada, favoreciendo su potencial popularización y adaptación a diversas condiciones de uso.*

Para alcanzar este objetivo global, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo1: Realizar un estudio de la literatura en las líneas de trabajo de esta investigación.**

Resulta imprescindible llevar cabo una revisión exhaustiva de la literatura para identificar las metodologías más adecuadas para la captura del movimiento

humano en diversos entornos. Esta revisión permitirá analizar las tecnologías de HMC disponibles, comparando sistemas ópticos multicámara, visión artificial monocular y sensores inerciales. Además, se examinarán las limitaciones técnicas y metodológicas de los métodos tradicionales de supervisión y evaluación del movimiento, así como las soluciones tecnológicas emergentes para su digitalización. A partir de estos análisis, se establecerán los requisitos técnicos y funcionales de una solución integrada de hardware y software para la valoración ergonómica de puestos de trabajo y monitorización funcional de trabajadores. Asimismo, se identificarán los principales desafíos en la integración de estos sistemas en entornos reales, para así proponer un enfoque flexible y accesible que favorezca su adopción final.

- **Objetivo 2: Diseñar, desarrollar y validar un sistema de sensores inerciales vestibles para el seguimiento 3D de articulaciones corporales.**

El sistema debe ser capaz de llevar a cabo el seguimiento en tiempo real de la orientación 3D de las articulaciones del cuerpo humano mediante dispositivos vestibles colocados estratégicamente en los segmentos corporales. Estos dispositivos, basados en IMUs, deberán incorporar mecanismos de fusión de datos que garanticen su funcionamiento en entornos con interferencias electromagnéticas y de comunicación (saturación del espectro de radiofrecuencia), asegurando una captura precisa y fiable de los movimientos corporales.

- **Objetivo 3: Desarrollar una herramienta que integre la captura, el análisis de movimiento y la valoración ergonómica.**

Para lograr este objetivo, es necesario incorporar al sistema anterior un módulo de análisis cinemático, capaz de representar los movimientos mediante un avatar humanoide y calcular los ángulos articulares en tiempo real. Esto facilitará la interpretación de los datos y la consiguiente valoración funcional, además de permitir su integración con herramientas de modelado biomecánico como OpenSim. Asimismo, se deberá añadir un sistema semiautomatizado de evaluación ergonómica basado en escalas estandarizadas como RULA, que permita la clasificación de posturas, la evaluación del riesgo de lesiones y la generación de informes personalizables. Esta herramienta se ha de desarrollar

bajo un enfoque modular, asegurando su compatibilidad con distintos métodos de captura y formatos de datos, garantizando a su vez su interoperabilidad con otras herramientas de análisis biomecánico y ergonómico presentes en la literatura. De este modo, este sistema ayudará a optimizar la interpretación y valoración funcional y ergonómica en función de los datos capturados.

- **Objetivo 4: Construir y difundir una base de datos multimodal de movimientos humanos que utilice como sistema de captura el desarrollado en este trabajo de tesis.**

Esta base de datos debe contener un conjunto de movimientos relevantes para la monitorización y la valoración funcional de sujetos, definidos en colaboración con expertos del ámbito de la salud. Inicialmente, la base de datos se construirá con registros obtenidos de sujetos sanos, previendo su futura ampliación a trabajadores con MSDs, garantizando así su aplicabilidad en distintos escenarios. Capturar la información tanto con sensores inerciales como con visión artificial respaldará la multimodalidad del sistema de captura, permitiendo optimizar el análisis al aprovechar la salida de múltiples fuentes de datos. Una vez capturada la base de datos con el sistema desarrollado, se debe estructurar de manera accesible y estandarizada, facilitando su uso como recurso para la comunidad científica en futuras investigaciones sobre biomecánica y ergonomía. Su difusión a través de congresos, revistas científicas y colaboraciones con la industria permitirá promover la adopción del sistema.

- **Objetivo 5: Validar la precisión y fiabilidad del sistema frente a otras soluciones y evaluar su aplicabilidad en entornos reales.**

Se deben llevar a cabo pruebas experimentales en diversos escenarios, incluyendo entornos industriales y clínicos, para evaluar la precisión del sistema y su utilidad práctica. En estas pruebas se contará con la participación de traumatólogos y fisioterapeutas, quienes analizarán la usabilidad del sistema y su integración en procesos de prevención de MSDs, proporcionando mediciones de referencia con instrumental técnico como el goniómetro de mano. Asimismo, se buscará comparar el desempeño del sistema con herramientas de referencia utilizadas en el análisis del movimiento, tanto en condiciones controladas de laboratorio como en entornos reales. Esta

comparación permitirá cuantificar la precisión del análisis cinemático y su fiabilidad para la evaluación ergonómica, asegurando que el sistema desarrollado sea adecuado para la práctica profesional.

El cumplimiento de estos objetivos contribuirá al desarrollo de un enfoque integral que permita superar las limitaciones actuales en la cuantificación del movimiento humano y la evaluación ergonómica, proporcionando una solución adaptable, accesible, precisa y no intrusiva. A través de esta investigación, se espera optimizar los procesos de monitorización, mejorar la prevención de lesiones musculoesqueléticas y facilitar el rediseño de puestos de trabajo mediante herramientas tecnológicas accesibles, reduciendo así la brecha entre los avances en captura de movimiento y su implementación efectiva en la práctica profesional. La Figura 1.1 presenta estos objetivos y la relación existente entre ellos, junto con los distintos aspectos desarrollados en esta tesis doctoral.

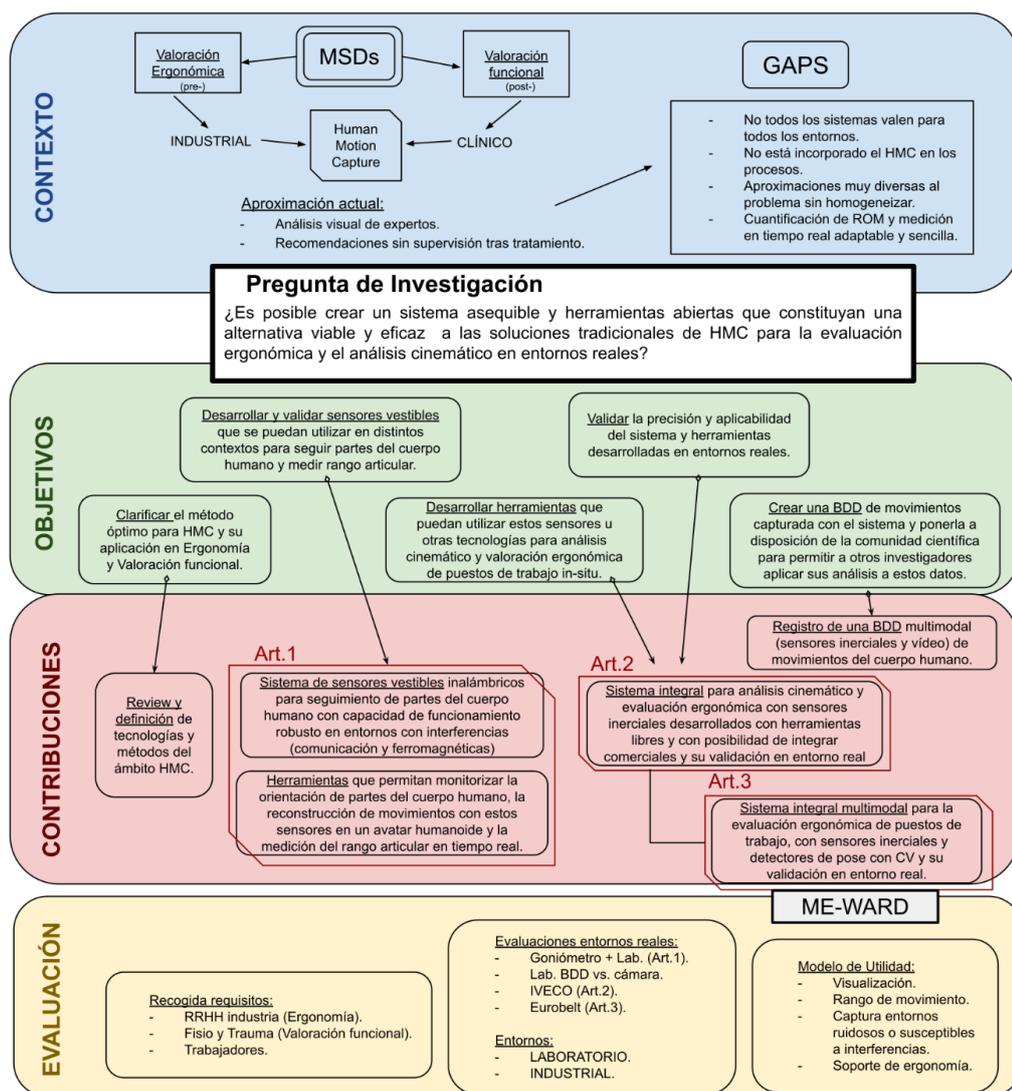


Figura 1.1. Esquema del contexto, pregunta de investigación, objetivos, aportaciones y evaluación de la tesis.

## 1.3 Metodología

Para abordar los objetivos planteados, esta investigación sigue un método de ingeniería iterativo, basado en el enfoque evolutivo descrito por Adrion (1993) y la estructura metodológica propuesta por Glass (1995). Este paradigma permite validaciones progresivas del sistema a través de distintas fases de observación, diseño, implementación y evaluación, facilitando mejoras continuas durante todo el proceso de desarrollo (como describe la Figura 1.2).

Además del enfoque evolutivo, esta investigación incorporó elementos del enfoque de investigación-acción (Eikeland, 2006; Stringer, 2007), que promueve la participación activa de actores clave—expertos ergónomos, traumatólogos y trabajadores—en el desarrollo y validación del sistema. La integración de este enfoque facilitó la mejora continua del sistema y aseguró una transferencia efectiva de conocimiento (Redström, 2017; Swann, 2002). Como resultado, el proceso metodológico se diseñó en torno a una estructura de trabajo iterativa que permitiera la incorporación progresiva de mejoras en función de la retroalimentación obtenida.

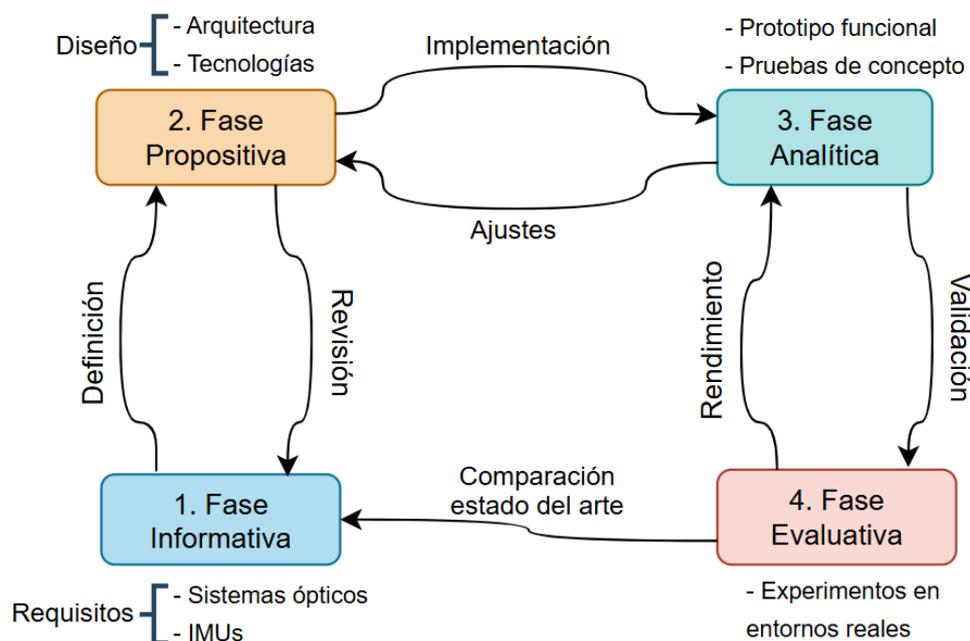


Figura 1.2. Diagrama de la metodología seguida en la tesis.

Siguiendo esta lógica, la metodología de esta investigación se estructura en cuatro fases interrelacionadas que garantizan un desarrollo escalonado del sistema. En la primera fase, se realiza una revisión del estado del arte y se definen los

requisitos del sistema. En la segunda, se diseña la arquitectura y se seleccionan las tecnologías más adecuadas para su implementación. La tercera fase abarca el desarrollo e implementación del sistema, junto con pruebas de concepto. Finalmente, en la cuarta fase, se evalúa el sistema experimentalmente y se compara su rendimiento frente a herramientas comerciales de referencia.

### **1.3.1 Fase informativa: Revisión del estado del arte y recopilación de requisitos**

En esta fase, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura, siguiendo los enfoques propuestos por Mulrow (1994) y Kitchenham (2004), quienes establecieron principios metodológicos para garantizar la exhaustividad y reproducibilidad en la recopilación de evidencia científica. Mulrow (1994) enfatiza la importancia de criterios estructurados en la selección de estudios, mientras que Kitchenham (2004) propone una metodología específica para revisiones en el ámbito de la ingeniería del software, con un protocolo riguroso de búsqueda, selección y extracción de datos.

En este análisis, se compararon diferentes enfoques de captura de movimiento descritos en la literatura, centrándose en su precisión, fiabilidad y aplicabilidad en la monitorización de movimientos corporales y ergonomía. Dentro de los sistemas ópticos, se evaluaron los sistemas multicámara con marcadores, los dispositivos RGB-D sin marcadores y los enfoques monoculares con visión artificial. Por otro lado, se analizaron los sensores inerciales, diferenciando entre soluciones comerciales y configuraciones de desarrollo propio (*custom*). Además, se revisaron las metodologías tradicionales de valoración ergonómica basadas en la observación de expertos, permitiendo contextualizar las ventajas y limitaciones de los métodos automatizados en comparación con la evaluación manual.

Para la recopilación de requisitos se mantuvieron reuniones preliminares con especialistas en ergonomía de los departamentos de Prevención de Riesgos Laborales y Recursos Humanos de las empresas IVECO Valladolid y Afer Eurobelt. La valoración experimental del sistema se llevó a cabo bajo la supervisión de un cirujano traumatólogo del Hospital Clínico Universitario de Valladolid y de una fisioterapeuta de la University of Applied Sciences and Arts Western

Switzerland (HES-SO) Valais-Wallis. Estas reuniones y valoraciones ayudaron a orientar la revisión del estado del arte hacia las necesidades prácticas de los usuarios, asegurando que los requisitos técnicos y funcionales definidos respondieran a los desafíos específicos identificados inicialmente. Los conocimientos extraídos permitieron identificar las limitaciones existentes y definir los requisitos técnicos y funcionales.

### **1.3.2 Fase propositiva: Diseño del sistema y selección de tecnologías**

Siguiendo el enfoque de investigación-acción, el diseño del sistema se desarrolló en colaboración directa con los actores clave como hemos comentado. Así, se identificaron los escenarios industriales más relevantes para la evaluación ergonómica junto a los expertos de las empresas de manufactura y se definieron — durante sesiones de co-creación con fisioterapeutas y expertos en prevención de riesgos laborales— los ejercicios y actividades que más adelante formarían parte de la base de datos multimodal. Estas contribuciones garantizaron que el diseño final del hardware y software respondiera tanto a criterios técnicos como a los requerimientos específicos de cada contexto de aplicación.

A partir de los hallazgos de la revisión sistemática, se definió la arquitectura del sistema vestibular y se escogieron las tecnologías más adecuadas para su implementación. Se seleccionaron sensores inerciales vestibulares optimizados para su aplicación en entornos industriales y clínicos, siguiendo las recomendaciones de Chen et al. (2020) y Stanzani et al. (2020). En cuanto al software, se optó por desarrollar parte de la plataforma de captura y visualización en Unity3D, debido a la experiencia del grupo de investigación en la creación de interfaces de usuario intuitivas (Pedraza-Hueso, 2015). Se eligió además Python por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real, gracias a su versatilidad y su amplio ecosistema de bibliotecas especializadas (Van Rossum, 2009). Para el análisis cinemático, se integró en el sistema el uso de herramientas de código abierto como OpenSim (Delp et al., 2007) y el *workflow* OpenSense (Al Borno et al., 2022), utilizando modelos biomecánicos validados, como el propuesto por Rajagopal et al. (2016). Finalmente, se diseñó un *pipeline* o arquitectura de

procesamiento de datos que garantizara la interoperabilidad con distintos sistemas de captura de movimiento (HMC) del estado del arte.

### **1.3.3 Fase analítica: Implementación y pruebas de concepto**

Durante esta fase, se desarrolló un prototipo funcional del sistema y se llevaron a cabo pruebas de concepto para evaluar su rendimiento. Se abordaron aspectos técnicos esenciales, como la correcta colocación y alineamiento de los sensores con los segmentos corporales, siguiendo las recomendaciones de Bouvier et al. (2015).

Se implementaron estrategias de calibración y procesamiento de datos para garantizar la estimación precisa de ángulos articulares, integrando modelos biomecánicos con restricciones cinemáticas (Fang et al., 2023). Se perfeccionó el sistema de visualización en tiempo real basado en un avatar humanoide (Unity 3D) para facilitar la interpretación de los movimientos capturados. Además, se incorporó un módulo de cinemática inversa (IK), por medio de OpenSim, para mejorar la precisión del análisis biomecánico. Este permitió alinear los movimientos registrados con modelos validados, minimizando errores en la estimación de posiciones articulares. Finalmente, el sistema fue ajustado para mejorar su usabilidad en colaboración con trabajadores industriales y sujetos de prueba. En este punto se definió el encapsulado final del hardware, los mecanismos de sujeción y otros elementos que aseguraron la adaptabilidad del sistema a distintas condiciones de captura.

### **1.3.4 Fase evaluativa: Validación experimental y comparación con sistemas comerciales**

La validación experimental del sistema se realizó en entornos reales mediante distintas estrategias de comparación y análisis de resultados. En primer lugar, se empleó un análisis goniométrico para evaluar la precisión del sistema en condiciones estáticas y dinámicas (González-Alonso et al., 2020). También tuvieron lugar sesiones de evaluación con la participación de médicos especialistas

(colaboradores de la UVa y HES-SO). Durante estas pruebas, los médicos pudieron observar directamente el uso del sistema en entornos operativos. Esta participación permitió validar la exactitud de los cálculos angulares de nuestro sistema en condiciones reales, confirmando que las mediciones coinciden con las obtenidas por métodos tradicionales. Posteriormente, se contrastaron los datos obtenidos con un sistema comercial de referencia, surgido durante la elaboración de la tesis, como es Movella Awinda (Paulich et al., 2018), y con sistemas de captura de movimientos basados en visión artificial, incluyendo modelos monoculares como los de Nvidia (2021).

Siguiendo los principios de la investigación-acción, se llevaron a cabo distintas sesiones de evaluación en colaboración con expertos de la industria de IVECO (González-Alonso et al., 2022; González-Alonso et al., 2024) y Afher Eurobelt (González-Alonso et al., 2025). La aplicación de este sistema en la industria manufacturera permitió analizar distintos puestos de trabajo y ciclos de actividad, proporcionando datos clave para la comparación ergonómica entre distintas estaciones de trabajo. Gracias a la generación de datos cuantificables sobre carga postural y a la valoración funcional de movimientos, los especialistas pudieron fundamentar mejor sus intervenciones y recomendaciones. Por ejemplo, el sistema descrito en el modelo de utilidad fue utilizado en Afher Eurobelt para evaluación ergonómica antes y después de la introducción de cambios en el puesto de trabajo.

Esta metodología permitió validar no solo la precisión técnica del sistema, sino también su aplicabilidad práctica y su aceptación por parte de los usuarios finales. Como parte de los objetivos de esta investigación, se llevó a cabo la adquisición de una base de datos de movimientos del día a día con el sistema desarrollado. Este esfuerzo culminó en una publicación derivada de esta tesis, donde se realizó un análisis cuantitativo de los rangos articulares obtenidos mediante distintos métodos, reforzando la validez de la herramienta propuesta (Martínez-Zarzuela et al., 2023a).

Siguiendo este enfoque iterativo y evolutivo, la metodología adoptada no solo permitió identificar y superar las limitaciones de los sistemas del estado del arte de HMC, sino que también facilitó la integración de tecnologías emergentes en una solución práctica y adaptable. Además, esta metodología fue adecuada, permitiendo la transferencia del conocimiento académico hacia aplicaciones en la industria y el ámbito clínico.

---

## 1.4 Contribuciones

Esta Tesis Doctoral presenta contribuciones clave en el ámbito de la captura y análisis del movimiento humano, con aplicaciones en evaluación ergonómica y monitorización postural de sujetos. Estos avances abarcan desde el desarrollo de nuevas herramientas tecnológicas hasta su validación en entornos reales, contribuyendo al conocimiento en este campo. Las principales contribuciones se pueden clasificar en tres ámbitos principales: **(i) revisión y evaluación de tecnologías existentes; (ii) diseño, implementación y validación de un sistema propio; y (iii) transferencia del conocimiento mediante publicaciones y modelos de utilidad.**

En primer lugar, se realizó una **revisión exhaustiva de la literatura técnica y científica sobre tecnologías de HMC, análisis cinemático y evaluación ergonómica (Contribución 1)**, abarcando sistemas ópticos multicámara, sensores inerciales, visión artificial con sensores monoculares y enfoques tradicionales basadas en observación supervisada. Esta revisión permitió identificar las principales limitaciones de los métodos actuales y definir los requisitos técnicos y funcionales para una solución accesible, precisa y no intrusiva, aplicable en diversos entornos. Como resultado, se establecieron criterios específicos para el diseño de un sistema multimodal que soporta diversas tecnologías de captura de movimiento, incluyendo el **desarrollo de un sistema vestibular basado en sensores inerciales, adaptable a distintos contextos (Contribución 2)**. Así, la propuesta de esta investigación presenta una herramienta multimodal que permite utilizar tanto sensores inerciales vestibulares como cámaras monoculares y técnicas de visión artificial para la captura de datos. Además, incorpora análisis cinemático basado en modelos biomecánicos con herramientas abiertas y automatiza la valoración ergonómica mediante una escala estandarizada.

Para validar el sistema desarrollado en entornos reales, se realizaron pruebas experimentales en laboratorios (Figura 1.3), entornos hospitalarios (Figura 1.4) e industriales (Figura 1.5). Además, se compararon los datos obtenidos con métodos de referencia, incluyendo mediciones goniométricas y sistemas ópticos monoculares de captura de movimientos basados en visión artificial, analizando la precisión de las estimaciones mediante métricas cuantitativas.

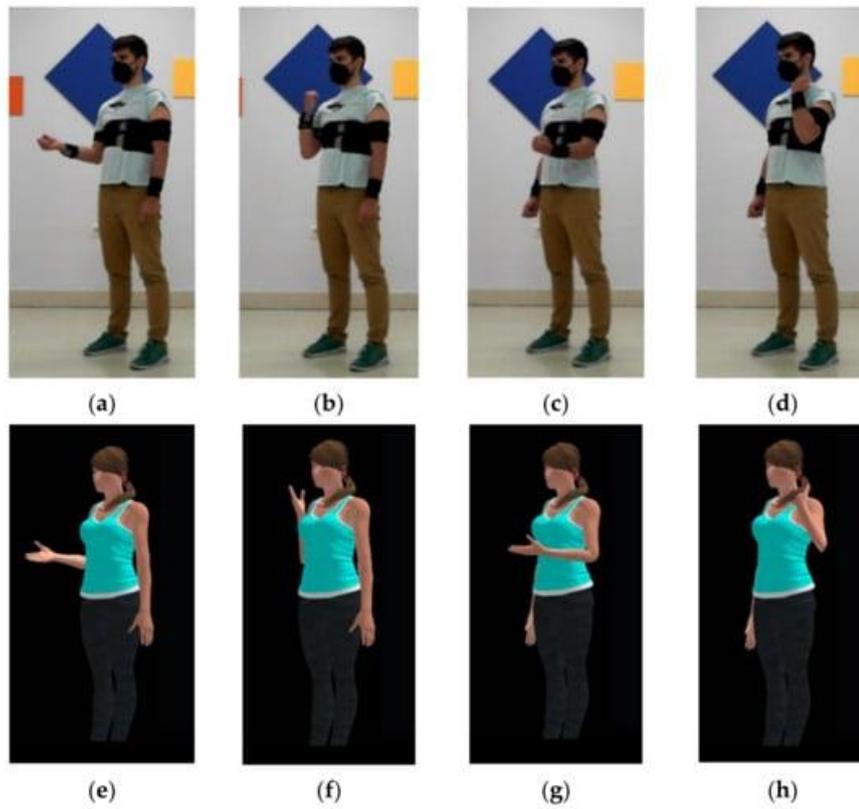


Figura 1.3. Pruebas en entornos de laboratorio del sistema vestibular desarrollado.



Figura 1.4. Pruebas en entorno clínico bajo supervisión médica, para verificar el funcionamiento del sistema en condiciones reales. Publicado en CASEIB2020 (González-Alonso et al., 2020).

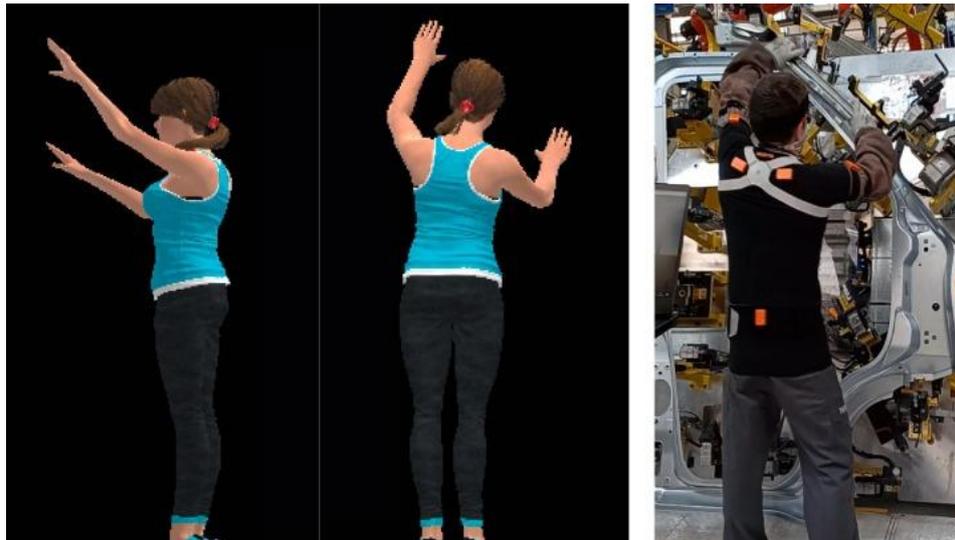


Figura 1.5. Pruebas en entornos industriales del sistema vestible desarrollado.

Un aporte fundamental de esta tesis es la producción durante esta investigación de un **modelo de utilidad que describe el sistema de monitorización de movimientos** (Figura 1.6), detallado en el apartado 3.2 *Modelo de utilidad en explotación*. La infraestructura desarrollada se basa en nodos emisores con sensores inerciales de alta precisión, los cuales emplean algoritmos avanzados de fusión para estimar la orientación y posición de segmentos corporales en tiempo real (Figura 1.7). Estos datos se sincronizan y transmiten de manera inalámbrica para su integración en un modelo biomecánico, representado visualmente mediante un avatar humanoide (Figura 1.8 y Figura 1.9). Este sistema ha sido patentado bajo la referencia U202330073 y ha sido diseñado para operar en entornos no controlados, eliminando la necesidad de equipos costosos o laboratorios especializados. Su arquitectura prioriza mitigar las interferencias electromagnéticas y las derivadas de la saturación del espectro de radiofrecuencia, así como hacer frente a variaciones ambientales, garantizando estabilidad en condiciones como fábricas con maquinaria de materiales ferromagnéticos y un alto número de dispositivos del *Internet de las Cosas* (IoT), cuya presencia es habitual en escenarios de Industria 4.0.

Asimismo, utilizando el sistema anteriormente descrito, **se ha construido una base de datos multimodal de movimientos humanos que combina registros de sensores inerciales y vídeo (Contribución 3)**. Esta base de datos será un recurso valioso para el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial enfocados en la clasificación y predicción de patrones de movimiento, contribuyendo a futuros estudios en biomecánica, ergonomía y valoración funcional de sujetos.

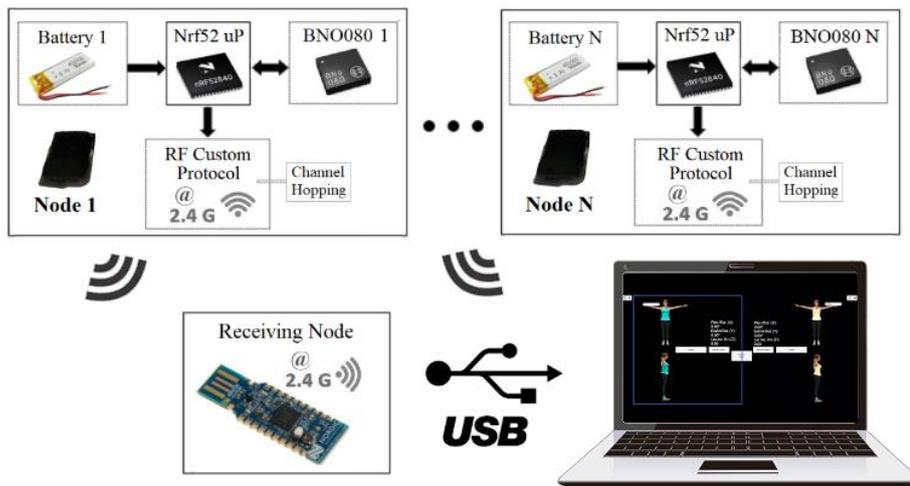


Figura 1.6. Descripción del prototipo de sistema vestible.

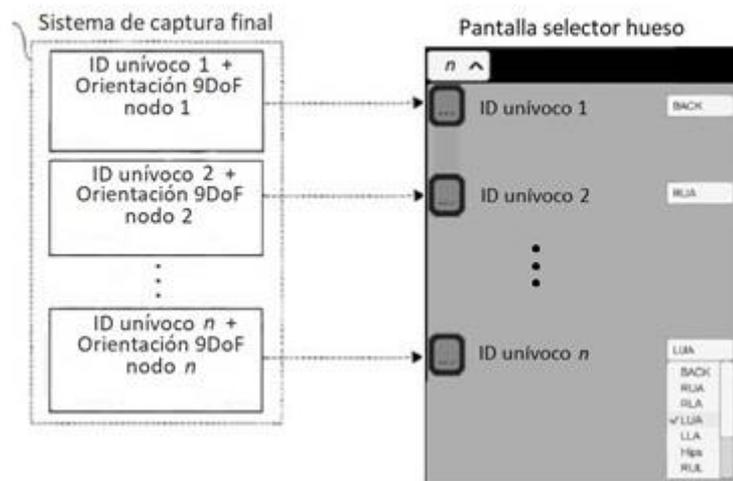


Figura 1.7. Modelo de utilidad: configuración de nodos emisores con sensores inerciales del sistema.

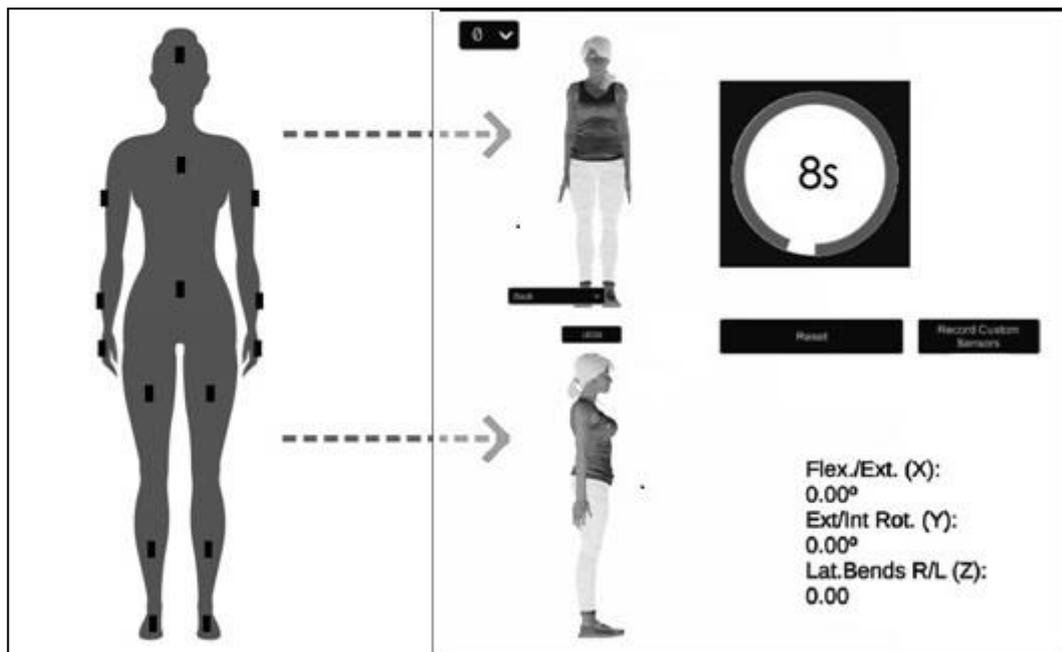


Figura 1.8. Modelo de utilidad: pantalla de calibración del sistema.



Figura 1.9. Modelo de utilidad: pantalla principal del sistema.

Como parte del sistema desarrollado, **se incorporó una arquitectura modular y multimodal (Contribución 4)**, que permite la integración flexible de diferentes tecnologías de captura y optimiza la comunicación entre las distintas capas, desde la adquisición y visualización de los datos hasta su análisis y evaluación ergonómica. La modularidad del sistema, representada en la Figura 1.10, mejora la interoperabilidad entre flujos de datos, modelos biomecánicos y procesos analíticos, creando una infraestructura adaptable para el desarrollo de sistemas abiertos de

captura de movimiento y facilitando su adopción en entornos industriales, clínicos y de investigación.

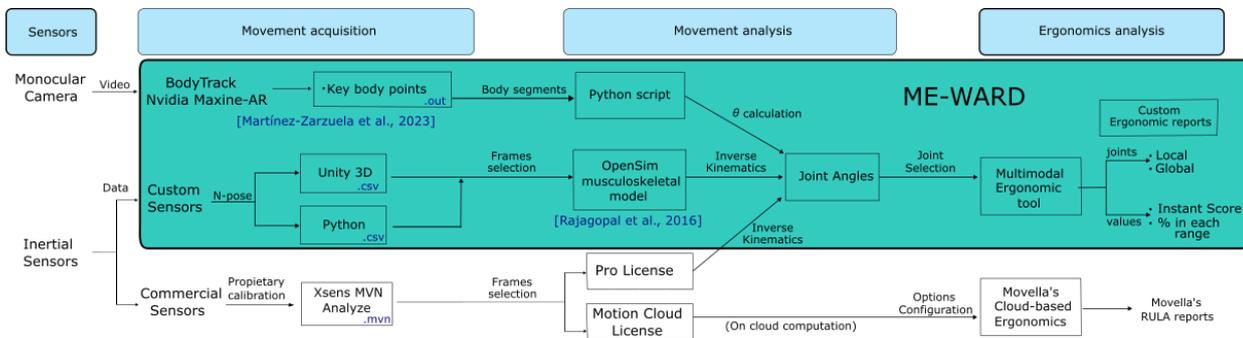


Figura 1.10. Infraestructura Software integrada para captura, análisis y validación ergonómica.

En concreto, la metodología representada en la Figura 1.10 aporta avances significativos en el ámbito de la captura y análisis del movimiento humano. En primer lugar, soporta tanto sistemas de sensores inerciales vestibles de desarrollo propio —como el detallado en el modelo de utilidad— como sistemas comerciales basados en IMUs. Además, incluye el diseño de herramientas especializadas para monitorizar la orientación de distintos segmentos corporales, facilitando la reconstrucción de movimientos mediante un avatar humanoide y la medición del rango articular en tiempo real. Otra parte clave de esta contribución es la integración de un flujo operativo unificado que soporta el uso tanto de sensores inerciales como de sistemas basados en visión artificial, mejorando la accesibilidad y flexibilidad en la evaluación ergonómica.

Finalmente, la difusión de estos resultados en congresos y publicaciones científicas, así como su transferencia a la industria estableciendo colaboraciones estratégicas para facilitar la implementación práctica y la **validación de su aplicabilidad en entornos reales (Contribución 5)**, refuerza el impacto práctico de la investigación y favorece la adopción de sistemas sensorizados de evaluación ergonómica y monitorización del movimiento.

## 1.5 Consistencia temática

Más allá de los aportes específicos presentados en la sección anterior, es fundamental analizar la coherencia temática de esta investigación. La relación entre la problemática inicial, la metodología adoptada y los resultados obtenidos permite trazar una línea argumentativa clara y bien estructurada. En este sentido, la investigación ha seguido una progresión lógica que se refleja en la evolución de sus desarrollos tecnológicos y sus validaciones experimentales. Esta coherencia se pone de manifiesto en la relación entre los tres artículos científicos publicados y la concesión del modelo de utilidad en explotación asociado.

El primer paso fue el desarrollo de un sistema vestible de desarrollo propio basado en IMUs para el seguimiento en 3D de la orientación de las partes del cuerpo y su visualización en un avatar humanoide (González-Alonso et al., 2021). Esta propuesta atiende a la necesidad de contar con sistemas accesibles para la captura y análisis de movimientos. En este trabajo, se implementaron estrategias que minimizan el impacto de las interferencias electromagnéticas y garantizan una comunicación robusta en la banda de 2.4 GHz, garantizando estabilidad en los datos adquiridos. Así, se sientan las bases de la investigación, demostrando que es posible desarrollar soluciones de desarrollo propio, de fiabilidad y precisión suficientes, capaces de sustituir sistemas comerciales más complejos. Con ello, la propuesta se alinea con el objetivo de la tesis de proporcionar herramientas personalizadas, precisas y no intrusivas.

Sobre esta primera contribución, se estructuró el modelo de utilidad en Explotación, titulado "*Dispositivo de monitorización de movimientos corporales*" (Número de solicitud: U202330073). Este modelo de utilidad refuerza la propuesta de un sistema vestible con una arquitectura modular capaz de integrar datos de múltiples nodos emisores y receptores. Su diseño garantiza la captura en tiempo real del movimiento humano con altos estándares de precisión y fiabilidad. Esta implementación demuestra la viabilidad de una solución tecnológica efectiva para la evaluación ergonómica y la prevención de trastornos musculoesqueléticos (MSDs), consolidando su potencial para aplicaciones prácticas.

Como siguiente paso, el sistema fue validado en entornos industriales reales, enfocándose en su aplicación para la evaluación ergonómica. En González-Alonso

et al. (2024), se presenta una infraestructura integral de hardware y software que combina sensores IMU con herramientas de software libre para realizar análisis de cinemática inversa y generar informes ergonómicos siguiendo el método RULA. Este estudio demuestra la viabilidad del sistema en un entorno productivo real, destacando su precisión y su potencial para democratizar la adopción de herramientas tecnológicas en la prevención de MSDs en el ámbito laboral. Además, la validación experimental en un entorno industrial confirma la escalabilidad del sistema y su capacidad de adaptación a distintos sectores.

En la etapa final de esta investigación, la herramienta desarrollada se convirtió en un sistema multimodal, soportando múltiples tecnologías de captura, y ampliando sus capacidades y adaptabilidad a diversos entornos. En González-Alonso et al. (2025) se presenta ME-WARD: una herramienta digital configurable para la evaluación ergonómica que combina sensores inerciales con detección de pose basada en visión artificial. A diferencia de los trabajos anteriores, este estudio introduce una perspectiva multimodal que refuerza la flexibilidad del sistema, demostrando cómo la combinación de diferentes tecnologías puede aumentar la adaptabilidad de los sistemas de digitalización de la valoración funcional y ergonómica a distintos escenarios.

En conjunto, los tres artículos científicos y el modelo de utilidad reflejan una evolución progresiva dentro de la línea de investigación. Se ha avanzado desde un sistema inicial basado en sensores vestibles hasta una herramienta multimodal integrada para la captura, análisis del movimiento humano y evaluación ergonómica. Cada una de las contribuciones responde a la necesidad de accesibilidad y precisión en el ámbito de la prevención y validación funcional de los MSDs en entornos industriales que posteriormente pueda ser ampliable a otros entornos. La integración de estos resultados, presentados en el Capítulo 3, refuerza la coherencia temática de la tesis al conectar la revisión del estado del arte, el desarrollo metodológico y la validación experimental con la transferencia de conocimiento a la práctica.

---

## 1.6 Estructura del documento

Esta tesis doctoral se ha estructurado de manera lógica y progresiva para abordar los objetivos de investigación y validar las hipótesis expuestas en el Capítulo 1.2 Hipótesis y objetivos. El documento se presenta de la siguiente manera, organizado en cuatro capítulos principales:

- **Capítulo 1: Introducción.**

Este capítulo presenta los MSDs como un problema de gran impacto en la salud general de la población y más concretamente en el ámbito laboral, resaltando la necesidad de herramientas tecnológicas accesibles para su prevención y monitorización. También se exponen las hipótesis y objetivos de la investigación, junto con la metodología empleada para alcanzarlos. Finalmente, se describen las principales contribuciones de la tesis, enfatizando su coherencia y alineación con la problemática abordada.

- **Capítulo 2: Estado del arte.**

Este capítulo proporciona el marco teórico del sistema propuesto. Se realiza una revisión exhaustiva de la literatura, abarcando las tecnologías de captura de movimiento, así como las metodologías de análisis de los trastornos musculoesqueléticos y su prevención a través de la evaluación ergonómica. Se comparan los sistemas ópticos y vestibulares basados en IMUs, evaluando su precisión, limitaciones y aplicaciones. Finalmente, se analiza la integración de escalas de evaluación ergonómica, como RULA, mediante sistemas tecnológicos.

- **Capítulo 3: Aportaciones.**

Este capítulo recoge las principales aportaciones científicas derivadas de la investigación, organizados en tres publicaciones indexadas en el *Journal Citation Report (JCR)* y una invención en explotación registrada como modelo de utilidad:

- **Apartado 3.1:** Primer trabajo de investigación publicado, donde se establecen las bases del sistema desarrollado. Se describe la arquitectura hardware-software de sensores inerciales vestibulares para captura de movimiento y su visualización en un avatar humanoide. Su precisión se

evalúa en pruebas estáticas y dinámicas realizadas por personal sanitario cualificado mediante herramientas de goniometría. Además, se valida su uso en entornos con interferencias electromagnéticas y de comunicación.

- **Apartado 3.2:** Modelo de utilidad en explotación. Se presenta la invención desarrollada en esta investigación, exponiendo en lenguaje científico-técnico sus características técnicas y su impacto en la industria. Esta invención aúna los principales elementos registrables de la herramienta desarrollada, en forma de un modo de realización que aporta una mejora práctica y funcional al método de captura de movimientos mediante sensores inerciales. Su modularidad permite una captura y análisis del movimiento humano de manera precisa, facilitando posteriores aplicaciones como la evaluación ergonómica y la valoración funcional de trabajadores con MSDs.
- **Apartado 3.3:** Segundo trabajo de investigación publicado, que amplía el sistema inicial mediante la definición y el desarrollo de un *pipeline* de adquisición y análisis de movimiento con sensores inerciales y herramientas de código abierto. En este estudio, se detalla una arquitectura capaz de soportar dispositivos vestibles basados en sensores inerciales para la captura de movimientos y su análisis cinemático. Además, se demuestra su utilidad en la evaluación ergonómica en entornos industriales, particularmente en la industria automotriz, comparando su desempeño con sistemas comerciales considerados como sistemas estándar de referencia.
- **Apartado 3.4:** Tercer trabajo de investigación publicado, en el que el sistema evoluciona hacia un enfoque multimodal mediante la incorporación de datos de captura obtenidos con un sistema monocular basado en visión artificial. Esta ampliación del sistema permite soportar en la misma herramienta tanto fuentes de datos de sensores inerciales como de sensores ópticos. Asimismo, se evalúa su rendimiento en la ergonomía laboral, específicamente en la industria manufacturera, donde se demuestra de nuevo su versatilidad y aplicabilidad en escenarios reales.

- **Capítulo 4: Conclusiones y futuros trabajos.**

Este capítulo sintetiza los principales hallazgos y contribuciones de la investigación, destacando el impacto del sistema desarrollado en distintos ámbitos de aplicación. Además, se proponen líneas de trabajo futuras, como la optimización de la precisión del sistema, la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático y su aplicación en monitorización a distancia y tele-rehabilitación.



# Capítulo 2

## Estado del Arte

Este capítulo ofrece un análisis detallado del estado del arte relacionado con la captura y análisis del movimiento humano, abarcando los fundamentos tecnológicos y metodológicos que sustentan esta investigación. En primer lugar, se introducen las principales **tecnologías de captura de movimiento**, desde los sistemas ópticos multicámara hasta los sensores vestibulares y enfoques multimodales, justificando la selección de los sensores inerciales (IMU) como eje central de la tesis (Sección 2.1). A continuación, se presenta el **estado actual de la tecnología de sensores inerciales vestibulares**, analizando su fiabilidad y su capacidad para reemplazar las técnicas tradicionales de evaluación del movimiento (Sección 2.2). Seguidamente, se abordan los **métodos biomecánicos para la reconstrucción y evaluación del movimiento corporal**, destacando su aplicación en estudios de ergonomía y monitorización (Sección 2.3). Posteriormente, se revisan las **metodologías de evaluación ergonómica**, con énfasis en la automatización del análisis mediante tecnologías digitales y la integración del método RULA en el sistema desarrollado (Sección 2.4). Finalmente, se examinan las **aplicaciones de estas tecnologías en la valoración funcional y el ámbito clínico**, subrayando el papel de los sistemas de captura de movimiento en la monitorización de sujetos (Sección 2.5). A través de esta revisión, se establecen los principios y limitaciones de las metodologías existentes, sentando las bases para el desarrollo del sistema propuesto en esta tesis.

### 2.1 Tecnologías de captura de movimiento

La captura y análisis del movimiento humano ha cobrado una creciente relevancia en campos como la biomecánica, la ergonomía y la rehabilitación, impulsada por la

necesidad de comprender y optimizar los patrones posturales y cinemáticos en diversos entornos. En este contexto, los sistemas de captura de movimiento han evolucionado significativamente, ofreciendo herramientas cada vez más precisas y accesibles para la medición del desplazamiento de segmentos corporales.

Existen tres enfoques tecnológicos principales para la captura del movimiento: **sistemas ópticos**, que en el caso de utilizar configuraciones multicámara son considerados el estándar de referencia por su alta precisión; **sistemas vestibles basados en sensores inerciales (IMU)**, que destacan por su portabilidad y aplicabilidad en entornos reales sin requerir infraestructuras complejas; y **sistemas multimodales**, que combinan ambas tecnologías para maximizar la precisión y la adaptabilidad.

A continuación, se revisan las principales tecnologías disponibles, analizando sus ventajas y limitaciones, y justificando la elección de los sensores inerciales como el enfoque central de esta tesis, debido a su equilibrio entre precisión, accesibilidad y aplicabilidad en diversos entornos.

### 2.1.1 Sistemas ópticos

Los **sistemas ópticos de captura de movimiento** (Optical Motion Capture, OMC) representan la tecnología de referencia en biomecánica y análisis del movimiento humano debido a su precisión submilimétrica y fiabilidad. Estos sistemas emplean cámaras para registrar la posición de marcadores colocados sobre el cuerpo o, en algunos casos, utilizan algoritmos avanzados de visión artificial para la detección sin necesidad de marcadores (Elhayek et al., 2015).

En general, se distinguen dos tipos principales de sistemas ópticos:

- **Sistemas ópticos con marcadores:** En esta modalidad, la captura de movimiento basada en marcadores se ha consolidado como el sistema de referencia por excelencia en entornos controlados, como laboratorios de biomecánica y estudios de animación. Existen dos tipos de marcadores: **activos**, que emiten luz propia para facilitar su detección, mejorando la visibilidad y reduciendo errores (Maletsky, Sun y Morton, 2007), y **pasivos**, como los retroreflectores, que dependen de una fuente de iluminación

---

externa para su detección y han sido ampliamente utilizados en estudios biomecánicos (Baroni, Ferrigno y Pedotti, 1998). Entre las soluciones comerciales más destacadas con marcadores se encuentran Vicon, OptiTrack, PhaseSpace y Qualisys, ampliamente empleadas en investigación y aplicaciones que requieren alta precisión (Ploderer et al., 2016). A pesar de su extraordinaria precisión (errores <1 mm), estos sistemas presentan importantes desafíos que limitan su aplicabilidad en entornos reales. En particular:

- **Dependencia de condiciones controladas:** Su funcionamiento óptimo requiere de entornos de laboratorio especializados. Factores como la iluminación, oclusión de marcadores, interferencias externas y la disposición geométrica de las cámaras pueden afectar sustancialmente la calidad de los datos recopilados.
- **Coste elevado y complejidad operativa:** La infraestructura necesaria para la instalación, calibración y procesamiento de datos implica una inversión considerable, restringiendo su uso principalmente a instituciones académicas y centros de investigación especializados.
- **Sistemas ópticos sin marcadores:** Con el avance de la visión artificial, han surgido soluciones capaces de capturar el movimiento sin necesidad de marcadores sobre el sujeto. Dispositivos como Microsoft Kinect v2 (Microsoft Corporation, 2013), u otras soluciones RGB-D, han permitido una mayor accesibilidad en aplicaciones de valoración funcional de pacientes (Da Gama, 2015), y han demostrado su utilidad en la evaluación ergonómica (Manghisi et al., 2017; Plantard et al., 2017).

Incluso en los sistemas ópticos sin marcadores, aunque eliminan la necesidad de preparar al sujeto con dispositivos, la precisión es inferior a la de los sistemas basados en marcadores (Mousavi Hondori & Khademi, 2014) y la posición de la cámara respecto al sujeto influye considerablemente en la exactitud de la estimación postural (Diego-Mas & Alcaide-Marzal, 2014). Estos sistemas, además, enfrentan desafíos técnicos en la captura de ciertos movimientos complejos (por ejemplo, desplazamientos laterales o rotaciones), donde su exactitud disminuye.

## 2.1.2 Visión artificial y estimación de pose

En los últimos años han ganado relevancia los sistemas de HMC basados en **visión artificial**, como alternativa más flexible y menos intrusiva a los métodos tradicionales. Dichas tecnologías incluyen técnicas de **estimación de pose 2D/3D** mediante algoritmos de aprendizaje profundo, que identifican automáticamente puntos clave del cuerpo a partir de video. Esto permite realizar evaluaciones ergonómicas en diversos entornos sin necesidad de incorporar sensores físicos al sujeto. Entre las innovaciones más recientes destaca el uso de modelos de estimación de pose de **aprendizaje profundo** como *NVIDIA Maxine AR BodyTrack*, capaz de rastrear en tiempo real puntos anatómicos clave con una sola cámara (NVIDIA, 2021). Del mismo modo, enfoques basados en cámaras monoculares de profundidad, como por ejemplo el de Abobakr et al. (2019), ofrecen una base prometedora para el análisis de posturas corporales y la detección de riesgos musculoesqueléticos.

Una ventaja importante de los sistemas basados en visión artificial es que eliminan la necesidad de equipar al sujeto con marcadores o sensores, lo que los hace ideales en aplicaciones donde portar dispositivos puede resultar incómodo o disruptivo. Este enfoque simplifica el proceso de captura de movimientos y mejora la aceptación por parte de los usuarios. Además, suelen ser soluciones más accesibles que los sistemas ópticos tradicionales o que soluciones RGB-D, que, aunque eviten la necesidad de marcadores, son más costosas.

A pesar de sus ventajas, la estimación de pose puramente por visión sigue enfrentando retos técnicos. La precisión puede degradarse en movimientos complejos o fuera del plano de la cámara. La oclusión parcial del cuerpo en la imagen y las variaciones de iluminación o fondo también pueden afectar el resultado. Por este motivo, investigaciones recientes han explorado combinar modelos digitales humanos con algoritmos avanzados de visión artificial para mejorar la evaluación biomecánica y compensar algunas de estas limitaciones (Panariello et al., 2022).

En general, lograr la misma exactitud de un sistema óptico multicámara sigue siendo difícil únicamente con video monocular, especialmente en ausencia de un entorno que permita detectar profundidades de forma precisa.

### 2.1.3 Sistemas de sensores inerciales vestibles (IMUs)

Los sensores inerciales, conocidos como **unidades de medición inercial** (IMUs), han emergido como una alternativa flexible y accesible para la captura del movimiento humano en entornos diversos. Estos dispositivos integran típicamente acelerómetros, giroscopios y a veces magnetómetros, midiendo la aceleración lineal, la velocidad angular y la orientación espacial de los segmentos corporales en tiempo real.

Desde sus primeras aplicaciones en los años setenta (Morris, 1973), la tecnología de sensores inerciales ha evolucionado significativamente. En las últimas dos décadas, estos dispositivos vestibles han ganado protagonismo en ergonomía, biomecánica y monitorización física, gracias a que proporcionan información detallada del movimiento sin necesidad de infraestructuras complejas (Vijayakumar et al., 2022).

Actualmente, existen soluciones comerciales consolidadas como **Movella Awinda** (antes Xsens Awinda), consideradas estándar de referencia en la captura de movimientos mediante vestibles, que han demostrado alta efectividad en el registro de posturas y trayectorias de segmentos corporales (Paulich et al., 2018). Numerosos estudios han validado la precisión de las IMUs en comparación con sistemas ópticos de captura de movimiento. Si bien en condiciones estrictamente controladas los sistemas ópticos suelen ser más precisos, las IMU han demostrado una alta correlación con estos métodos. En particular, se ha observado concordancia al medir la cinemática de miembros superiores y analizar posturas en entornos dinámicos (Robert-Lachaine et al., 2017; Schall et al., 2016). Estudios comparativos evidencian que dispositivos comerciales como Awinda pueden seguir movimientos tridimensionales complejos con gran fiabilidad, incluso en entornos donde los sistemas ópticos enfrentan dificultades por oclusiones o variabilidad en la iluminación. Además, protocolos ambulatorios han validado estas tecnologías para medición de cinemática de miembros superiores e inferiores, encontrando errores mínimos respecto a sistemas ópticos (Manzur & Hachiya, 2019; Roldán Jiménez, 2017; Vivas Albán et al., 2020).

Los sistemas basados en IMUs presentan varias ventajas clave que los hacen muy atractivos para la captura de movimiento en entornos reales. A diferencia de

---

los sistemas ópticos, que exigen configuraciones específicas y un espacio de captura controlado, los sensores inerciales pueden utilizarse en cualquier entorno sin necesidad de infraestructura fija, destacándose por su portabilidad y facilidad de uso (Carnevale et al., 2019; Lopez-Nava y Muñoz-Meléndez, 2016). Han mostrado ser efectivos a su vez en la monitorización continua del movimiento en fábricas, laboratorios biomecánicos y clínicas de rehabilitación, donde las condiciones pueden variar considerablemente (Menolotto et al., 2020; Salisu et al., 2023). Asimismo, ofrecen modularidad y adaptabilidad, permitiendo ajustar la cantidad y disposición de sensores según la aplicación, por ejemplo, como describen Caputo et al. (2019), usando menos sensores para evaluar solo extremidades superiores o un mayor número para un análisis corporal completo. Esta flexibilidad ha favorecido el desarrollo de soluciones alternativas de bajo coste que logran resultados comparables a sistemas inerciales comerciales de alta gama (González-Alonso et al., 2021; Huang et al., 2020).

A pesar de sus virtudes, los sistemas basados en IMU enfrentan desafíos técnicos que deben considerarse al implementarlos. Un problema conocido es la deriva acumulativa en la orientación calculada a partir del giroscopio, que puede afectar a la precisión en mediciones prolongadas. Para mitigar este problema, se han desarrollado algoritmos avanzados de fusión de datos, como filtros de Kalman adaptativos (AKF) (Li & Wang, 2022), filtros complementarios (Chen, Schall, & Fethke, 2020), así como estrategias que incorporan la lectura del magnetómetro para corregir deriva (Wittmann et al., 2019; Zhou y Hu, 2010). Muchos sistemas comerciales implementan sus propios algoritmos de fusión para este fin, como es el caso de Movella Awinda (Xsens Technologies, 2016) o Bosch BNO08X (Hillcrest Laboratories, 2021). Otros factores, como interferencias electromagnéticas o la presencia de estructuras metálicas cercanas, pueden comprometer la fiabilidad de los datos capturados. No obstante, evaluaciones recientes muestran que mediante calibraciones avanzadas es posible minimizar estos efectos y garantizar mediciones precisas incluso en entornos industriales desafiantes (Stanzani et al., 2020). Adicionalmente, en contextos reales con numerosos dispositivos inalámbricos (Industria 4.0, IoT), las soluciones basadas en IMU deben contar con estrategias de comunicación robustas para evitar interferencias en bandas de comunicación saturadas (González-Alonso et al., 2021).

En síntesis, los sistemas basados en IMUs ofrecen un equilibrio entre precisión y practicidad: no alcanzan la exactitud submilimétrica de un óptico multicámara, pero logran una precisión suficiente para muchas métricas biomecánicas, con la enorme ventaja de poder usarse en cualquier lugar y a bajo coste. Por estas razones, los sensores inerciales han sido elegidos como la solución tecnológica central en esta investigación.

### 2.1.4 Sistemas multimodales

Para maximizar el potencial de las tecnologías de captura de movimiento, es esencial desarrollar herramientas **multimodales** que permitan la interoperabilidad entre distintos sistemas. En este sentido, las soluciones que permiten soportar tanto sensores ópticos como inerciales –e incluso otras tecnologías complementarias, como electromiografía (EMG)– representan una alternativa muy prometedora para superar las limitaciones individuales de cada enfoque.

La combinación de datos de cámaras con datos de IMUs permite aprovechar las fortalezas de ambos: las cámaras proporcionan información contextual y geométrica global, mientras que las IMU aportan mediciones directas de la dinámica de segmentos específicos. De hecho, la combinación de sensores IMU con algoritmos avanzados de visión y aprendizaje automático ya ha mostrado mejoras en precisión y aplicabilidad en evaluación ergonómica. Por ejemplo, Huang et al. (2020) –mencionado anteriormente– desarrollaron un sistema de automatización de los procesos de detección de posturas de riesgo, reduciendo la dependencia de la observación humana y posibilitando un seguimiento continuo. Su enfoque multimodal combinó el uso de visión artificial con datos de IMUs, lo que permitió mejorar la identificación de riesgos ergonómicos al aprovechar las fortalezas de ambos sistemas: la visión artificial proporciona información global del movimiento y contexto, mientras que los sensores vestibulares ofrecen mediciones precisas de orientación y aceleración. Esta complementariedad facilita el seguimiento continuo de los trabajadores sin interferir en sus tareas habituales.

Asimismo, estudios como el de Vignais et al. (2017) han explorado el potencial de estas implementaciones en la ergonomía industrial: integraron redes de sensores corporales con grabaciones de vídeo para identificar factores de riesgo físico,

resaltando la utilidad de incluir múltiples fuentes de información para una evaluación más precisa y contextualizada del movimiento humano. Estos enfoques han demostrado que la complementación de sensores inerciales con visión artificial no solo mejora la precisión del análisis postural, sino que también reduce la dependencia de evaluaciones manuales, facilitando la integración de estos sistemas en procesos automatizados de prevención ergonómica.

No obstante, los sistemas multimodales también conllevan desafíos adicionales, como una mayor complejidad en la configuración y procesamiento de datos. Esto puede traducirse en un incremento de los costes de implementación y en la necesidad de desarrollar protocolos eficientes para su calibración y uso en entornos reales. Aun así, su potencial beneficio supera con creces estas dificultades cuando se requiere alta precisión y versatilidad.

En esta tesis se adopta precisamente un enfoque multimodal. El sistema desarrollado ha sido diseñado para operar tanto con IMUs como con sistemas de captura basados en cámaras, permitiendo su aplicación en una amplia variedad de contextos. Esta flexibilidad favorece su uso no solo en entornos controlados (laboratorio), sino también en entornos industriales y clínicos donde las condiciones pueden variar considerablemente. Dicho de otro modo, la solución propuesta combina las ventajas de ambas soluciones tecnológicas –inercial y visual– para lograr un sistema de captura de movimiento accesible, preciso y no intrusivo, alineado con los objetivos de esta investigación.

## **2.2 Revisión sistemática de la tecnología basada en IMUs**

Para profundizar en el estado de la técnica de los sensores inerciales vestibulares y contextualizar su aplicación en ergonomía y rehabilitación, al comienzo de este trabajo doctoral se llevó a cabo una **revisión sistemática de la literatura**. El objetivo fue determinar la fiabilidad de los sistemas IMU y su capacidad para reemplazar las técnicas tradicionales de evaluación del movimiento humano.

Siguiendo directrices metodológicas establecidas en la literatura (Kitchenham, 2004; Mulrow, 1994), se seleccionaron estudios que evaluaran sistemas portátiles

basados en IMU para la medición de rangos de movimiento (*Range of Motion*, ROM) en casos reales o ensayos con pacientes. Se dio prioridad a aquellos trabajos que utilizaran estándares de referencia (sistemas ópticos de captura de movimiento, goniómetros, etc.) para validar la precisión de los datos obtenidos.

En total, se analizaron 22 estudios abarcando diversas aplicaciones de las IMU en ergonomía y monitorización de sujetos, enfocándose en la precisión de las mediciones, la colocación de los sensores y su integración con otras tecnologías. El proceso de búsqueda y selección de los estudios puede observarse en más detalle en la Figura 2.1.

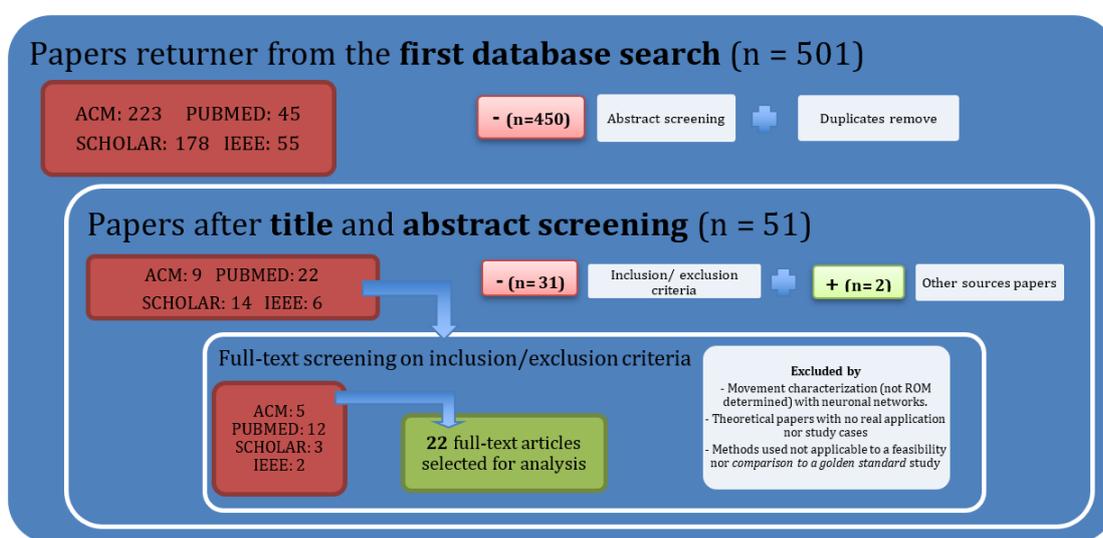


Figura 2.1. Resultados de la búsqueda en la literatura de la revisión sistemática.

### 2.2.1 Análisis de la aplicación de IMUs en estudios previos

Respecto a la **colocación de las IMU**, el análisis de la literatura mostró que esta varía según la aplicación específica. En 9 de los estudios analizados, los sensores fueron ubicados en el tronco; en 13 estudios se utilizaron en las extremidades superiores; y en 6 estudios, en las extremidades inferiores (como podemos observar en la Tabla 2.1).

Body part	Joint	Number of papers *
Trunk	Thorax	5
	Lumbar	6
	Dorsal	1
	Waist	1
	Hip	5
Upper limb	Arm	5
	Forearm	1
	Shoulder	11
	Elbow	9
Hand	Wrist	6
	Palm	1
	Fingers	1
	Thumb	2
Lower limb	Knee	5
	Foots	1
	Ankle	4

\* Nota: Los sistemas de cuerpo completo como Xsens suman "+1" en la categoría de número de artículos para cada articulación.

Tabla 2.1. Localización de los dispositivos

La mayoría de los trabajos empleó un único sensor por segmento corporal para medir articulaciones específicas, como la lumbar (Banos et al., 2015; King et al., 2017; Whelan et al., 2015), el hombro (Aslani et al., 2018; Oarde et al., 2014; Picerno et al., 2015) o la cintura (Kleiner et al., 2018).

Sin embargo, algunas aplicaciones requirieron medir ángulos articulares relativos entre dos o más segmentos, lo que demandó el uso de al menos dos IMUs para calcular dichos ángulos. En esos casos, la correcta colocación de los dispositivos resultó crucial para evitar la acumulación de errores, requiriendo a veces aplicar correcciones manuales durante el procesamiento.

En cuanto a los **dispositivos empleados**, Xsens Awinda (traje de sensores inerciales de cuerpo completo) fue la tecnología más utilizada para la captura multiarticular sin necesidad de calibraciones externas, dada su facilidad de uso. Otros estudios exploraron sistemas *ad hoc* (como *Armsleeve* para evaluar el movimiento del brazo, o *Perform* para el análisis de cuerpo completo), dispositivos experimentales que podrían convertirse en herramientas comerciales en el futuro.

Por otra parte, respecto a la **validación y comparación con estándares de referencia**, la revisión sistemática evidenció que, en la mayoría de los estudios, la

precisión de los sistemas IMU fue validada, y en estos casos se emplearon métodos tradicionales u ópticos. Siete estudios –incluidos los de Bhosale et al. y Hellmers et al.– contrastaron los datos de IMUs directamente con sistemas ópticos de HMC (OMC), mientras que otros utilizaron goniómetros (Oarde et al., 2014) o dinamómetros isocinéticos (Picerno et al., 2015) como referencia para validación. Algunos trabajos, como Lin et al. (2018), emplearon mediciones pre y post-tratamiento para evaluar la efectividad de los sensores en la monitorización de la recuperación de extremidades superiores.

En general, los resultados mostraron que las IMU pueden proporcionar mediciones comparables a los métodos tradicionales (ópticos o instrumentales), si bien la variabilidad en la precisión depende del tipo de sensor, su calibración y los algoritmos de procesamiento de datos empleados en cada caso.

### **2.2.2 Otras revisiones de la tecnología IMU en movimiento humano**

Durante la fase inicial de esta investigación, no se identificaron revisiones sistemáticas previas enfocadas específicamente en el uso de IMUs en ergonomía y rehabilitación. Sin embargo, el creciente interés en estos dispositivos ha impulsado la aparición de varios **trabajos de revisión** en años recientes como los de Carnevale et al. (2019), Poitras et al. (2019), Menolotto et al. (2020) y Salisu et al. (2023), que han analizado distintas aplicaciones de los sensores inerciales en estos campos.

Carnevale et al. (2019) exploraron la aplicación de IMUs en la rehabilitación física, evaluando su capacidad para medir parámetros de movimiento relevantes en el seguimiento de pacientes con trastornos musculoesqueléticos. Por su parte, Poitras et al. (2019) se centraron en la monitorización del movimiento durante actividades funcionales, abordando su utilidad en fisioterapia y prevención de lesiones, y destacando tanto la precisión de los datos proporcionados por estos sensores como las limitaciones asociadas al ruido y la necesidad de algoritmos avanzados para interpretar correctamente la información.

En el ámbito de la ergonomía laboral, Menolotto et al. (2020) analizaron el uso de IMUs en la evaluación de posturas y movimientos en el entorno laboral,

resaltando su papel en la identificación de factores de riesgo asociados con los MSDs (trastornos musculoesqueléticos) y la importancia de validar estos sistemas frente a métodos de referencia ópticos. Más recientemente, Salisu et al. (2023) llevaron a cabo una revisión amplia integrando el uso de IMUs en ergonomía y rehabilitación, centrándose en el análisis de algoritmos de procesamiento de datos y en la interoperabilidad de estos dispositivos con otras tecnologías (como aplicaciones móviles e inteligencia artificial).

Estos trabajos han sido fundamentales para contextualizar los avances realizados en esta tesis y han ayudado a identificar oportunidades en la implementación de IMUs en los campos de la ergonomía y la monitorización de sujetos. La evolución de estos dispositivos, desde ser meramente experimentales hasta convertirse en soluciones accesibles para distintos usuarios, ha impulsado su adopción en el análisis ergonómico y en la práctica clínica en entornos reales.

### **2.2.3 Limitaciones y desafíos pendientes**

A pesar de los avances demostrados, los sistemas IMU presentan desafíos que requieren atención para mejorar su aplicabilidad en entornos clínicos e industriales. Un aspecto común fue que la mayoría de los estudios revisados contó con muestras reducidas de participantes, lo que limita la generalización de los resultados obtenidos. Además, el procesamiento de datos suele requerir recursos computacionales elevados y una colocación precisa de los sensores, lo que puede dificultar su implementación en escenarios no controlados o de uso cotidiano.

Otra consideración es la variabilidad en los métodos de validación empleados entre estudios. Algunos trabajos carecían de participación de personal clínico en la evaluación o utilizaron métodos comparativos no convencionales (p. ej., actuadores servomotores), lo que puede restar relevancia práctica a sus hallazgos. Asimismo, la ausencia de magnetómetro en ciertos dispositivos redujo la calidad de las mediciones de orientación, y algunos sistemas IMU analizados aún no habían alcanzado la madurez tecnológica necesaria para su adopción masiva.

En conjunto, el análisis sistemático de la literatura demuestra que los sensores inerciales presentan un gran potencial para la evaluación del movimiento humano,

---

ofreciendo una alternativa viable a los métodos tradicionales. Sin embargo, su adopción generalizada aún enfrenta desafíos, como la necesidad de validar los datos obtenidos, la optimización del procesamiento de datos y la necesidad de calibraciones precisas que minimicen errores en entornos reales.

El creciente interés por los sistemas vestibles basados en IMU ha motivado el desarrollo de soluciones cada vez más avanzadas, con aplicaciones que van desde la prevención de MSDs en el ámbito laboral hasta la rehabilitación física. Para que estas tecnologías alcancen su máximo potencial, es fundamental continuar investigando su integración con otros sistemas (por ejemplo, combinación con visión artificial, realidad aumentada, etc.) y mejorar su accesibilidad mediante dispositivos de bajo coste y software de código abierto

Este análisis subraya la importancia de abordar las limitaciones actuales para desarrollar un sistema más robusto, accesible y escalable, promoviendo su uso en una variedad de contextos y facilitando su adopción en la práctica diaria. Dichos principios guían el diseño del sistema propuesto en esta tesis, que busca aprovechar las oportunidades identificadas al tiempo que supera los desafíos pendientes.

## **2.3 Análisis del movimiento humano**

### **2.3.1 Introducción al análisis cinemático**

El estudio cuantitativo del movimiento humano requiere no solo de la captura de datos cinemáticos, sino también de métodos robustos para interpretarlos biomecánicamente. El análisis cinemático se refiere al estudio del movimiento considerando variables geométricas (posición, velocidad, aceleración) sin atender a las fuerzas que lo generan. En biomecánica, este análisis permite cuantificar y describir el desplazamiento de los segmentos corporales, proporcionando información clave para evaluar la postura, la marcha y el rendimiento motor en distintos contextos.

Su aplicación es fundamental en diversas áreas –desde la ergonomía hasta la rehabilitación, pasando por la monitorización de movimientos– ya que facilita la detección de patrones anómalos en la movilidad humana. Por ejemplo, en entornos industriales el análisis cinemático es crucial para optimizar el diseño de puestos de

trabajo y prevenir trastornos musculoesqueléticos; mientras que en el ámbito clínico contribuye a monitorizar el progreso de los pacientes para personalizar terapias de rehabilitación.

Capturar el movimiento humano con sensores es solo el primer paso; para que esos datos brutos sean útiles en el análisis biomecánico, deben integrarse con modelos anatómicos y herramientas de simulación que permitan reconstruir la cinemática del cuerpo de manera precisa. En entornos reales, a diferencia de un laboratorio, las condiciones son menos controladas y los movimientos pueden ser más complejos, por lo que se requiere combinar los datos de sensores con modelos biomecánicos detallados y técnicas computacionales avanzadas de reconstrucción del movimiento. Esto habilita el cálculo de mediciones como los ángulos articulares, las trayectorias y otros parámetros que van más allá de la información capturada directamente por el sensor.

Por ello, en los últimos años se han desarrollado plataformas abiertas de modelado musculoesquelético que permiten realizar análisis cinemáticos y dinámicos del movimiento a partir de datos experimentales.

### **2.3.2 OpenSim: plataforma de análisis cinemático y simulación biomecánica**

OpenSim es una de las herramientas de código abierto más utilizadas en el análisis biomecánico, reconocida por su flexibilidad y capacidad para realizar simulaciones avanzadas (Delp et al., 2007; Vargas-Valencia et al., 2016). Esta plataforma permite la integración de modelos musculoesqueléticos detallados y la reconstrucción del movimiento humano mediante técnicas de cinemática inversa.

Por ejemplo, OpenSim incluye modelos de cuerpo humano, como el modelo *Rajagopal 2015* (que podemos observar en la Figura 2.2), que ha sido empleado en estudios de marcha y análisis ergonómico industrial donde se requiere estimar con precisión distintos parámetros del movimiento en condiciones específicas. El uso de OpenSim en combinación con datos de sensores (sean ópticos o inerciales) permite ajustar los movimientos registrados a un modelo biomecánico consistente,

proporcionando información detallada sobre variables como ángulos articulares, desplazamientos y posturas (Al Borno et al., 2022; Rajagopal et al., 2016).

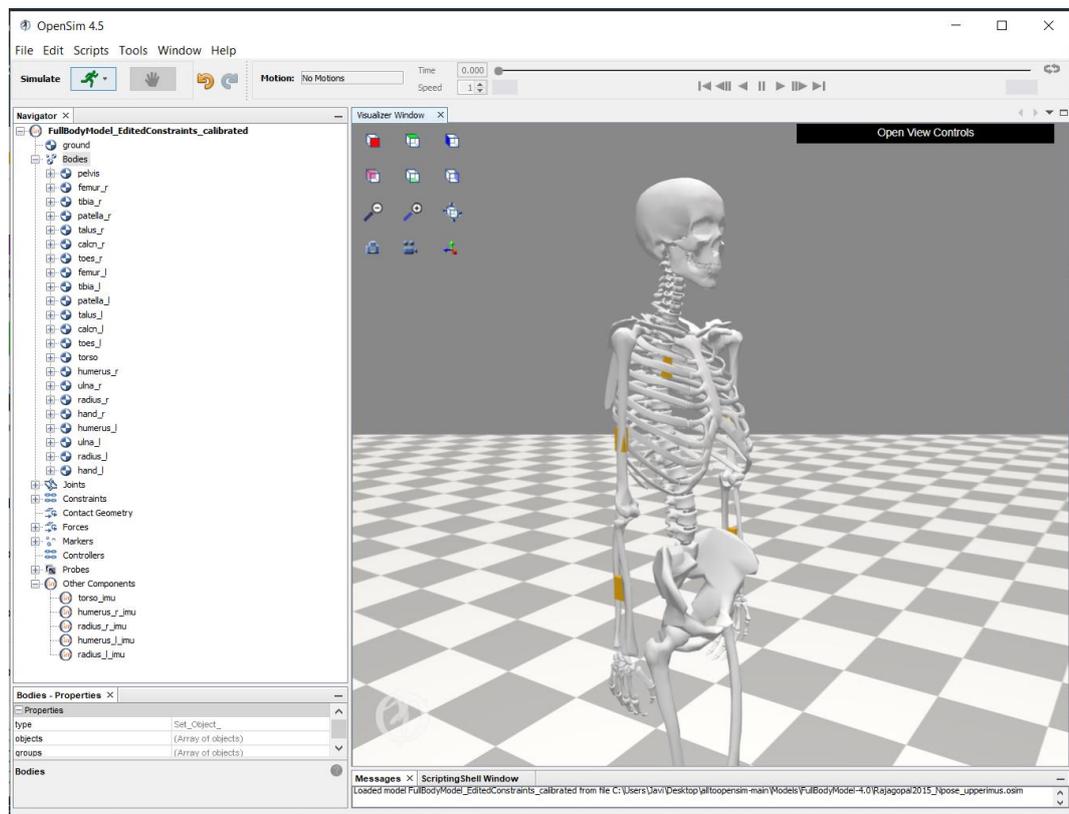


Figura 2.2. OpenSim v4.5: interfaz principal cargada con el modelo Rajagopal2015 modificado para incluir sensores inerciales en las extremidades superiores.

OpenSim destaca por varios motivos. En primer lugar, ofrece múltiples beneficios para el análisis cinemático en contextos industriales y clínicos: permite modelar fuerzas musculares, tensiones en tejidos y desempeño articular, aportando información valiosa para la prevención de lesiones y la valoración funcional (Mahadas et al., 2019; Panariello et al., 2022). Su capacidad para analizar cargas biomecánicas identificando puntos de estrés ayuda a optimizar diseños ergonómicos y detectar riesgos musculoesqueléticos en puestos de trabajo (Greco et al., 2020). Esto habilita, además del análisis cinemático, la posibilidad de calcular indirectamente fuerzas internas, momentos articulares o activaciones musculares a través de simulaciones dinámicas. En segundo lugar, al ser una plataforma *open-source*, OpenSim democratiza el acceso a herramientas avanzadas de análisis biomecánico, posibilitando que instituciones con recursos limitados logren resultados de alta calidad sin recurrir a soluciones comerciales costosas (Delp et al., 2007; Vargas-Valencia et al., 2016).

Una extensión o *workflow* importante es **OpenSense**, un módulo dentro de OpenSim orientado a procesar datos provenientes de IMUs y convertirlos en representaciones biomecánicas precisas (Al Borno et al., 2022). Estudios recientes han demostrado que, con un adecuado proceso de calibración, los datos obtenidos con sensores inerciales pueden alcanzar niveles de precisión comparables a los de sistemas ópticos al ser analizados con OpenSim (Ranavolo et al., 2018; Slade et al., 2022). Por ejemplo, Huang et al. (2020) validaron un enfoque que integra sensores inerciales con OpenSim para la evaluación de la marcha en entornos clínicos, mientras que Salisu et al. (2023) destacaron la aplicabilidad de esta integración en líneas de ensamblaje industriales.

### **2.3.3 Soluciones comerciales integradas de simulación**

A diferencia de OpenSim, que requiere un proceso de ajuste manual del modelo al sujeto y la integración de datos de sensores externos, existen sistemas comerciales –como Xsens MVN (Xsens Technologies, 2016)– que ofrecen una solución integrada de hardware y software propietario para la reconstrucción del movimiento en tiempo real. Su sistema hardware propietario utiliza sus IMUs junto con algoritmos de fusión para proporcionar al instante los ángulos articulares estimados de un sujeto, facilitando una captura rápida y precisa. Xsens MVN ofrece una gama de soluciones de software diseñadas para satisfacer diversas necesidades en la captura de movimiento que exigen, sin embargo, la adquisición previa de su sistema comercial de sensores vestibles. Cada licencia adquirida permite un tipo de uso del sistema de captura, por ejemplo, MVN Animate Live permite la integración en tiempo real con paquetes 3D como Unity 3D, pero tiene limitaciones como un único sujeto salvo en la versión más costosa y profesional. Adicionalmente, la plataforma MotionCloud proporciona procesamiento en la nube y generación de informes, como el de análisis de la marcha o el de evaluación de movimientos repetitivos, entre otros.

Tanto por la dependencia de la adquisición de licencias de uso, en su mayoría mensuales; como por la capacidad de personalización de la herramienta, la solución de Xsens es más limitada y cerrada que una basada en OpenSim. Este último permite ajustar parámetros específicos del modelo musculoesquelético e incluso

analizar fuerzas internas, algo fuera del alcance de sistemas comerciales cerrados. En ese sentido, OpenSim resulta más adecuado para estudios biomecánicos detallados, mientras que soluciones como Xsens son preferidas en aplicaciones concretas donde la rapidez y facilidad de uso sean prioritarias.

En este trabajo, OpenSim ha sido seleccionado como la herramienta principal para el análisis biomecánico debido a su capacidad de convertir datos de movimiento en representaciones detalladas del cuerpo humano. La posibilidad de incorporar datos tanto de sensores inerciales como de sistemas ópticos amplía sus aplicaciones en estudios clínicos e industriales. Además, su compatibilidad con simulaciones de fuerzas y desempeño muscular la convierte en una plataforma idónea para identificar riesgos ergonómicos y monitorizar sujetos, pudiendo ampliar el sistema en el futuro a soluciones de rehabilitación personalizadas.

## 2.4 Evaluación ergonómica

Los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (Work-Related Musculoskeletal Disorders, WMSDs) representan uno de los principales problemas de salud ocupacional a nivel global. En Europa, aproximadamente el 60% de los trabajadores reportan síntomas de WMSDs, siendo el dolor lumbar (43%) y las molestias en cuello y extremidades superiores (41%) las afecciones más frecuentes (Eurofound, 2017). Estos trastornos no solo deterioran la calidad de vida de los trabajadores, sino que también generan elevados costes económicos por bajas laborales y reducción de productividad (EU-OSHA, 2019; Health and Safety Executive, 2021; Rosado et al., 2023).

La prevención de los WMSDs se centra en identificar y mitigar los factores de riesgo biomecánicos asociados a posturas forzadas, movimientos repetitivos, cargas excesivas o esfuerzos mal distribuidos. En este sentido, el desarrollo de tecnologías avanzadas –como los sistemas de captura de movimiento basados en IMU– ha permitido evaluar con mayor precisión la postura y los gestos de los trabajadores en distintos entornos, tanto industriales como clínicos.

Sin embargo, para traducir esos datos en medidas preventivas efectivas es necesario apoyarse en metodologías o escalas de evaluación ergonómica

estructuradas. La combinación de estas metodologías tradicionales con tecnologías vestibles y sistemas de visión artificial ha potenciado la automatización de la evaluación ergonómica (Alberto et al., 2018; Generosi et al., 2022).

### **2.4.1 Método RULA: evaluación ergonómica de miembros superiores**

Una de las metodologías tradicionales más difundidas para identificar riesgos musculoesqueléticos derivados de posturas inadecuadas y movimientos repetitivos en el entorno laboral es RULA (Rapid Upper Limb Assessment), desarrollado por McAtamney y Corlett (1993). RULA se ha consolidado como una herramienta clave para evaluar la carga biomecánica, pues proporciona un procedimiento sistemático para puntuar el nivel de riesgo postural en las extremidades superiores y tronco durante la realización de una tarea, facilitando la identificación de posturas de riesgo y el diseño de soluciones que reduzcan la carga biomecánica.

Una de sus ventajas fundamentales es su enfoque específico en los miembros superiores, que son particularmente vulnerables a lesiones por movimientos repetitivos y fuerzas inapropiadas, ayudando a priorizar intervenciones en entornos laborales donde la ergonomía es crítica. (Menolotto et al., 2020; Vignais et al., 2013). RULA no requiere equipamiento complejo para su aplicación manual, lo que lo hace accesible en estudios de campo o *in situ* (Maldonado et al., 2015). Su carácter estandarizado permite comparar evaluaciones antes y después de mejoras ergonómicas, sirviendo como guía para intervenciones de rediseño. Además, su flexibilidad de implementación ha permitido su aplicación en distintas industrias, como la automotriz y manufacturera, donde las posturas incómodas y los movimientos repetitivos son prevalentes (Caputo et al., 2019; Maurice et al., 2019).

A pesar de sus bondades, RULA presenta limitaciones, principalmente derivadas de su aplicación tradicional basada en observación manual. La necesidad de un evaluador humano entrenado implica que pueden arrojar distintos resultados dependiendo de la pericia del evaluador o de las condiciones de la observación. Esto puede afectar especialmente en entornos dinámicos donde la postura del trabajador varía rápidamente. Otra limitación es que, aplicado de forma

aislada, RULA no provee información cinemática cuantitativa (ángulos exactos, velocidades) más allá de la puntuación de riesgo. Asimismo, RULA fue concebido para evaluaciones estáticas o de corta duración, por lo que su uso en tareas prolongadas o muy dinámicas puede no captar fluctuaciones posturales importantes.

Para mitigar estas limitaciones, en los últimos años se han desarrollado enfoques que integran RULA con tecnologías de captura de movimiento. Combinando la estructura de RULA con datos objetivos de sensores, se logra una evaluación más objetiva y reproducible de los factores de riesgo ergonómico (Robert-Lachaine et al., 2017; Vignais et al., 2017).

## **2.4.2 Evolución de las herramientas tecnológicas en ergonomía**

Como se ha mencionado anteriormente, tradicionalmente la evaluación ergonómica se realizaba mediante observación directa en el puesto de trabajo y cuestionarios, implicando una alta dependencia de la interpretación subjetiva del evaluador (Carvajal et al., 2019). Con la integración de sistemas digitales de captura de movimiento, se ha logrado mejorar la precisión y reproducibilidad de los análisis posturales en diversos entornos laborales. Por ejemplo, Robert-Lachaine et al. (2017) compararon un sistema de IMUs con un sistema óptico de HMC (sistema estándar de referencia en análisis biomecánico) y encontraron una alta correlación en la evaluación de movimientos corporales completos, evidenciando que los sistemas vestibles pueden ser una alternativa viable a los costosos laboratorios ópticos. Este tipo de hallazgos ha abierto la puerta a utilizar sensores portátiles para evaluaciones ergonómicas *in situ*.

En paralelo, se ha explorado la digitalización de las metodologías clásicas de valoración ergonómica. A este respecto, Maldonado et al. (2015) aplicaron el método RULA de forma informatizada, destacando la necesidad de combinar evaluaciones objetivas (instrumentales) con la experiencia subjetiva del evaluador para mejorar la detección de riesgos. Por su parte, Colim et al. (2021) propusieron una integración de estaciones de trabajo robotizadas con herramientas ergonómicas

digitalizadas; Menolotto et al. (2020) revisaron el impacto de sistemas de HMC en la evaluación de intervenciones ergonómicas a largo plazo; Panariello et al. (2022) combinaron sistemas de HMC con modelos digitales para tal fin, identificando factores de riesgo ergonómico con gran detalle; y Ranavolo et al. (2018) enfatizaron los desafíos y oportunidades que ofrecen los dispositivos de monitoreo portátil para evaluar riesgos biomecánicos en entornos laborales. Estos avances han permitido extender el uso de herramientas como RULA a escenarios donde antes no era viable implementar la digitalización del análisis mediante sistemas ópticos por restricciones de coste o espacio.

En resumen, la ergonomía laboral ha pasado de métodos manuales y estáticos a enfoques cada vez más automatizados y basados en datos. Esto ha permitido sentar las bases para evaluaciones más objetivas de los riesgos posturales en el trabajo.

### **2.4.3 Aplicaciones en el ámbito laboral**

La evaluación de los riesgos ergonómicos en el entorno laboral ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas, pasando de enfoques tradicionales basados en observación manual y cuestionarios subjetivos hacia metodologías más avanzadas que integran tecnologías de captura de movimiento y análisis biomecánico. Históricamente, métodos como RULA (McAtamney & Corlett, 1993) y otros análisis posturales fueron ampliamente utilizados para identificar posturas de riesgo, aunque a menudo su aplicación ocurría tras la manifestación de lesiones musculoesqueléticas en los trabajadores. Esta naturaleza reactiva de la ergonomía clásica ha impulsado la investigación hacia herramientas automatizadas y objetivas que permitan la detección temprana de los riesgos posturales.

La integración de tecnologías emergentes ha abierto nuevas posibilidades para mejorar la precisión y eficacia de la evaluación ergonómica en el trabajo. Estos ejemplos ilustran cómo la tecnología puede incorporarse directamente en la rutina laboral para monitorizar la postura del trabajador casi en tiempo real y así activar recomendaciones preventivas que puedan ser implementadas de forma inmediata en el puesto de trabajo. Una de las aproximaciones más prometedoras es la integración de RULA con sistemas de HMC y software de código abierto, como OpenSim (Delp et al., 2007). Esta integración ofrece múltiples beneficios: mayor

precisión y rapidez en la evaluación, minimización de la subjetividad al capturar datos posturales de forma continua, y aplicabilidad en entornos reales donde las evaluaciones manuales tradicionales podrían no ser prácticas por limitaciones de espacio o tiempo. Además, reduce costes y mejora la accesibilidad, permitiendo implementar evaluaciones ergonómicas en pequeñas y medianas empresas sin necesidad de sistemas ópticos de alto coste (Huang et al., 2020; Slade et al., 2022). Ejemplos concretos de esta tendencia incluyen a Lopez-Nava y Muñoz-Meléndez (2016), quienes integraron RULA con un sistema de sensores y OpenSim para estimar cargas articulares de forma automatizada; o Huang et al. (2020), que combinaron IMUs con algoritmos de aprendizaje automático para detectar posturas incómodas y movimientos repetitivos de manera continua en trabajadores, mostrando cómo la tecnología puede potenciar el uso de RULA en la identificación temprana de riesgos.

En la presente tesis doctoral, el método RULA ha sido seleccionado como base para el análisis ergonómico no solo por su simplicidad y eficacia demostrada, sino también por su potencial para integrarse con tecnologías emergentes que permitan su automatización y aplicación en escenarios reales de la industria. La combinación de RULA con sensores inerciales y plataformas abiertas constituye un paso clave hacia la democratización de las evaluaciones ergonómicas, facilitando su adopción en entornos con acceso limitado a recursos avanzados (Ranavolo et al., 2018; Salisu et al., 2023). Esta integración no solo refuerza la capacidad de identificar y mitigar riesgos musculoesqueléticos en el entorno laboral, sino que también contribuye al desarrollo de entornos de trabajo más seguros y sostenibles. Asimismo, allana el camino para su integración en programas de monitorización de sujetos y salud ocupacional, ya que ofrecen mediciones objetivas que antes no eran posibles fuera del laboratorio.

## **2.5 Valoración funcional de sujetos con MSDs**

Cuando las medidas de prevención no son suficientes o los trastornos musculoesqueléticos ya se han manifestado, la valoración funcional de los trabajadores se convierte en un pilar fundamental para la posterior rehabilitación de la función motora y para mejorar su calidad de vida. En este contexto, los sistemas

de captura de movimiento basados en sensores inerciales (IMU) han demostrado ser herramientas valiosas para monitorizar el progreso del paciente y personalizar las intervenciones terapéuticas.

Estos sistemas permiten medir parámetros clave como rangos de movimiento, velocidades angulares y aceleraciones, facilitando el diseño de programas de valoración funcional de pacientes adaptados a las necesidades individuales.

### **2.5.1 Limitaciones de los métodos tradicionales**

Históricamente, los mecanismos de valoración funcional de pacientes se han basado en instrumentos convencionales de medición, como goniómetros manuales, inclinómetros digitales y dinamómetros isocinéticos (Clapper & Wolf, 1988; Lexell & Downham, 2005). Si bien estas herramientas han sido la base de la evaluación clínica, presentan limitaciones significativas. Su uso suele restringirse a entornos controlados (consultorio o gimnasio de fisioterapia), existe a menudo incompatibilidad de datos entre diferentes instrumentos, y carecen de la precisión necesaria para evaluaciones funcionales en tiempo real. Esto dificulta la personalización óptima de los tratamientos, ya que no se captura completamente el rendimiento del paciente en su vida diaria (Jette & Haley, 2005).

Además, la utilización de métodos manuales genera una carga administrativa considerable, contribuyendo a la saturación de clínicas de rehabilitación y a largas listas de espera (Health Consumer Powerhouse, 2017; Schenk et al., 2013). Esta situación ha impulsado la necesidad de dispositivos innovadores que optimicen recursos, aumenten la frecuencia de valoración de los pacientes y reduzcan la dependencia de personal especializado (Chartered Society of Physiotherapy, 2011). Sin embargo, a pesar de estos avances, la incorporación de nuevas tecnologías en entornos clínicos aún no se ha generalizado (Liu et al., 2015), debido en parte a barreras logísticas, económicas y culturales en el sistema de salud.

Asimismo, a nivel global la aplicación de ejercicios terapéuticos está reconocida como una de las estrategias más seguras y efectivas para mejorar la función física y promover el envejecimiento activo (Greenwood & Koufaki, 2017). Es esencial en el tratamiento de enfermedades crónicas (por ejemplo, Parkinson,

---

Derman 2007) y en la recuperación de pacientes con lesiones musculoesqueléticas, accidentes cerebrovasculares o dolor lumbar crónico (Ahmed et al., 2016; El-Helow et al., 2015). La utilización de estas nuevas tecnologías de sensorización, habilitan la posibilidad de implementar las terapias posteriores fuera del entorno clínico (por ejemplo, en el hogar del paciente). Con ello es posible impulsar la adopción de soluciones tecnológicas para favorecer la adherencia al tratamiento mediante retroalimentación en tiempo real e incluso la gamificación de los ejercicios terapéuticos de rehabilitación (Pedraza-Hueso et al., 2015).

## 2.5.2 Implementación de sensores inerciales en el ámbito clínico

Dada la necesidad antes descrita, los avances tecnológicos han permitido la adopción de sensores inerciales vestibles como una alternativa eficiente y precisa a los métodos tradicionales. Numerosos estudios han validado las IMU en este ámbito frente a herramientas estándar, demostrando alta fiabilidad en la medición de movimientos articulares y patrones de marcha (Horak, King & Mancini, 2015; Pau et al., 2016).

Las IMU son dispositivos pequeños, ligeros y generalmente inalámbricos, lo que permite realizar evaluaciones en cualquier entorno, incluyendo hospitales, clínicas e incluso el domicilio de los sujetos. Esto habilita la **monitorización ambulatoria** y el seguimiento en el hogar, algo difícil de conseguir con equipamiento tradicional de laboratorio. La posibilidad de registrar la movilidad en ejercicios de la vida cotidiana proporciona una imagen más completa del estado funcional del paciente. Además, a diferencia de mediciones puntuales con goniómetro, un sistema de IMUs puede ofrecer datos continuamente durante la ejecución de un ejercicio o actividad diaria. Esto facilita un seguimiento personalizado y permite adaptar los programas terapéuticos según la evolución del sujeto, incluso sesión a sesión. Además, puede recibir retroalimentación inmediata (por ejemplo, correcciones de postura durante un ejercicio) a través de aplicaciones conectadas a las IMUs, incrementando su eficacia.

---

Estudios recientes confirman la fiabilidad de las IMU en mediciones clínicas específicas en la evaluación de movimientos complejos de **hombro, codo y muñeca**. Álvarez et al. (2015), por ejemplo, emplearon IMUs para medir ángulos articulares en contextos de salud ocupacional, facilitando la detección de anomalías musculoesqueléticas en miembros superiores. Crabolu et al. (2017) utilizaron IMU para estimar el centro de rotación del hombro, validando su precisión contra imágenes de resonancia magnética. Abhayasinghe et al. (2019) demostraron que las IMU pueden estimar ángulos de la cadera con precisión comparable a sistemas ópticos, mientras que Chiang et al. (2017) emplearon IMUs para evaluar la recuperación de movilidad tras una artroplastia de rodilla, encontrando alta concordancia con métodos tradicionales.

Estas aplicaciones muestran que las IMUs pueden capturar con detalle la cinemática de las extremidades superiores, algo tradicionalmente difícil fuera de un laboratorio. En terapia de brazo y mano, se han utilizado IMUs para registrar la ejecución de ejercicios de alcance, agarre y actividades de la vida diaria, permitiendo cuantificar mejoras en la amplitud de movimiento y fluidez del movimiento a lo largo del programa de rehabilitación. También han sido útiles para detectar compensaciones (movimientos incorrectos que el paciente realiza para suplir limitaciones), brindando al terapeuta información para corregir la técnica del paciente.

En el **análisis de la marcha** y el equilibrio, los sensores inerciales han sido fundamentales para evaluar la recuperación funcional en diversas patologías. Sánchez Manchola et al. (2019) y Aqueveque et al. (2020) diseñaron sistemas portátiles basados en IMU para medir parámetros espaciotemporales de la marcha (velocidad, cadencia, longitud de paso), validándolos frente a sistemas ópticos de referencia. O'Reilly et al. (2018) mostraron la eficacia de IMUs en la detección y evaluación de ejercicios terapéuticos de extremidades inferiores en entornos clínicos y deportivos.

Estas aplicaciones son valiosas, por ejemplo, en pacientes con prótesis de rodilla o cadera, donde es importante monitorizar objetivamente las mejoras en la marcha, o en pacientes neurológicos (ictus, lesión medular) para cuantificar la recuperación del patrón de marcha y equilibrio. Las IMU pueden detectar sutilezas como

---

asimetrías entre piernas, inestabilidades o desviaciones de la trayectoria al caminar, proporcionando métricas que ayudan al fisioterapeuta a ajustar el tratamiento.

### 2.5.3 Integración de las IMUs con otras tecnologías

La versatilidad de los sensores inerciales aumenta cuando se integran con otras tecnologías emergentes. En este caso, la combinación de IMUs con algoritmos de aprendizaje automático y modelos biomecánicos está impulsando aplicaciones innovadoras en el ámbito clínico. Por ejemplo, se han utilizado redes neuronales para clasificar actividades y evaluar automáticamente la calidad de ejecución de ejercicios terapéuticos a partir de datos de IMUs. Panwar et al. (2019) entrenaron modelos de aprendizaje profundo que, usando IMUs, pueden identificar patrones de movimiento de pacientes con ictus y estimar su nivel de recuperación motora, optimizando la terapia en base a los resultados. Asimismo, como se ha mencionado, integrar IMUs con plataformas como OpenSim permite simular el rango de movimiento articular y el esfuerzo muscular en pacientes con lesiones ortopédicas (Chiang et al., 2017), ayudando a personalizar ejercicios según las limitaciones anatómicas y funcionales del individuo.

Uno de los principales beneficios de las IMU es su capacidad para operar en entornos no controlados, lo que habilita la **supervisión remota** del terapeuta. En un escenario de telerehabilitación, el paciente realiza sus ejercicios en casa equipado con sensores inerciales, mientras los datos son transmitidos a la clínica o almacenados para su revisión. Esto ha cobrado especial relevancia para mantener la continuidad terapéutica en situaciones donde el desplazamiento a la clínica es difícil (por ejemplo, pacientes en zonas remotas o durante confinamientos por pandemia). Algunos sistemas incluyen aplicaciones móviles que guían al paciente en los ejercicios diarios y utilizan los datos de IMU para corregir la postura o el ritmo en el momento. Las IMU pueden detectar en tiempo real si el paciente realiza correctamente los movimientos prescritos y enviar alertas o *feedback*. La supervisión remota mediante IMUs ha demostrado mejorar la adherencia al tratamiento y los resultados funcionales, al incrementar la frecuencia y calidad de los ejercicios realizados fuera de la clínica. A este respecto, Pereira et al. (2020) desarrollaron una solución portátil para la supervisión remota de ejercicios en

extremidades inferiores, mejorando la adherencia al tratamiento. Yang et al. (2019), por su parte, combinaron sensores inerciales con avatares tridimensionales y visión artificial, facilitando el seguimiento interactivo de los movimientos del paciente.

Gracias a estas tecnologías, hoy es posible monitorizar de forma objetiva la evolución de un paciente más allá de las paredes del hospital, introducir ajustes en tiempo real, e incluso prevenir caídas detectando tempranamente patrones de movimiento incorrectos. La convergencia de IMUs con inteligencia artificial, modelos biomecánicos y plataformas de telemedicina augura una nueva era de la monitorización y la valoración funcional. Así, un trabajo futuro a continuar después de esta tesis doctoral será aprovechar la investigación y tecnologías desarrolladas para su aplicación al ámbito de la rehabilitación, contribuyendo a la mejora de la atención personalizada a pacientes con afecciones musculoesqueléticas.

## 3 Aportaciones

### 3.1 Artículo: *“Sistema de desarrollo propio para Seguimiento de la Orientación de Partes del Cuerpo Humano y Visualización 3D en un Avatar”*

En esta sección se presenta el trabajo que aborda el diseño y validación de un sistema inalámbrico basado en sensores IMU de desarrollo propio para el seguimiento de orientación 3D de las partes del cuerpo humano y su visualización en un avatar.

A continuación, se expone la información relacionada con la publicación:

**González-Alonso et al. (2021): Custom IMU-Based Wearable System for Robust 2.4 GHz Wireless Human Body Parts Orientation Tracking and 3D Movement Visualization on an Avatar.**

J. González-Alonso, D. Oviedo-Pastor, H. J. Aguado, F. J. Díaz-Pernas, D. González-Ortega, and M. Martínez-Zarzuela, "Custom IMU-Based Wearable System for Robust 2.4 GHz Wireless Human Body Parts Orientation Tracking and 3D Movement Visualization on an Avatar," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6642, 2021.

- DOI: <https://doi.org/10.3390/s21196642>
- Factor de impacto (JCR 2021): 3.847
- Field Citation Ratio (a enero de 2025): 3.91

Área de conocimiento	Posición	Cuartil
Engineering, Electrical & Electronic Instrumentation	95/276	Q2
	19/64	Q2

**Resumen:** Estudios recientes confirman la aplicabilidad de los sistemas basados en Unidades de Medición Inercial (IMU) para el análisis del movimiento humano. No obstante, las soluciones comerciales de alta gama basadas en IMU siguen siendo demasiado costosas y complejas para democratizar su uso entre un amplio rango de posibles usuarios. Están apareciendo en el mercado soluciones comerciales de nivel básico con menos prestaciones para intentar cubrir esta brecha, pero aún presentan algunas limitaciones que deben superarse. Al mismo tiempo, existe un número creciente de publicaciones científicas que emplean sistemas basados en IMU no comerciales, sino personalizados y de fabricación propia, en aplicaciones médicas y deportivas. Aunque estas soluciones pueden contribuir a la popularización de esta tecnología, cuentan con funciones más limitadas y la descripción sobre cómo diseñarlas y construirlas desde cero sigue siendo escasa en la literatura. El objetivo de este trabajo es doble: (i) Demostrar la viabilidad de construir una solución de desarrollo propio y asequible para el seguimiento de la orientación de múltiples partes del cuerpo simultáneamente, proporcionando una descripción detallada desde cero del hardware necesario, las herramientas y las operaciones matemáticas para estimar y representar el movimiento 3D en tiempo real. (ii) Mostrar cómo la introducción de una estrategia de salto de canal adaptada en un protocolo de comunicación en los 2.4 GHz, puede abordar algunas de las limitaciones actuales de comunicación en soluciones comerciales de nivel básico. Así, el sistema propuesto permite el seguimiento inalámbrico en tiempo real de la orientación de las partes del cuerpo humano con hasta 10 sensores de desarrollo propio, al menos a 50 Hz. Además, ofrece una adquisición de datos de movimiento fiable en entornos con alta congestión de Bluetooth y Wi-Fi, donde el uso de soluciones comerciales de nivel básico podría ser inviable. Este sistema puede servir como base para el desarrollo de soluciones asequibles de análisis del movimiento humano que no requieran un análisis cinemático preciso.

**Abstract:** Recent studies confirm the applicability of Inertial Measurement Unit (IMU)-based systems for human motion analysis. Notwithstanding, high-end IMU-based commercial solutions are yet too expensive and complex to democratize their use among a wide range of potential users. Less featured entry-level commercial solutions are being introduced in the market, trying to fill this gap, but still present some limitations that need to be overcome. At the same time, there is a growing number of scientific papers using not commercial, but custom do-it-yourself IMU-based systems in medical and sports applications. Even though these solutions can help to popularize the use of this technology, they have more limited features and the description on how to design and build them from scratch is yet too scarce in the literature. The aim of this work is two-fold: (i) Proving the feasibility of building an affordable custom solution aimed at simultaneous multiple body parts orientation tracking; while providing a detailed bottom-up description of the required hardware, tools, and mathematical operations to estimate and represent 3D movement in real-time. (ii) Showing how the introduction of a custom 2.4 GHz communication protocol including a channel hopping strategy can address some of the current communication limitations of entry-level commercial solutions. The proposed system can be used for wireless real-time human body parts orientation tracking with up to 10 custom sensors, at least at 50 Hz. In addition, it provides a more reliable motion data acquisition in Bluetooth and Wi-Fi crowded environments, where the use of entry-level commercial solutions might be unfeasible. This system can be used as a groundwork for developing affordable human motion analysis solutions that do not require an accurate kinematic analysis.

## 3.2 Modelo de utilidad en Explotación

**Título:** *“Dispositivo de monitorización de movimientos corporales”*

**Número de solicitud:** U202330073

**Fecha de presentación:** 07/12/2021

**Número de publicación:** ES1299927

**Fecha de publicación:** 23/05/2023

**Fecha de concesión:** 07/08/2023

**Estado:** Concedida

**Inventores:** Javier González Alonso (40%),  
Mario Martínez Zarzuela (40%), David Oviedo Pastor (20%)

**Solicitante:** Universidad de Valladolid

**Clasificación CIP:** G06F 3/00

**Agente:** Gustavo Adolfo González Peces

**Empresa explotación:** Afer Eurobelt

---

**Resumen:** *El dispositivo descrito es un sistema avanzado de monitorización que permite registrar, medir y analizar, de forma precisa, los movimientos de cada segmento corporal del usuario. Este sistema está compuesto por varios nodos con sensoría inercial que interactúan para proporcionar información detallada sobre los movimientos, y, por ende, traducibles a cinemática del cuerpo humano en el dispositivo maestro de comunicación, dando así lugar a mediciones de rango articular respondiendo a escalas de valoración ergonómica.*

**Descripción técnica:**

*El sistema consta de nodos emisores y nodos receptores. Los nodos emisores son pequeños dispositivos que se fijan a diferentes segmentos del cuerpo del usuario, como extremidades o el torso. Estos nodos están equipados con sensores inerciales capaces de detectar y generar señales de posición 3D en el espacio precisas (de al menos 9 grados de libertad), que son transmitidas de forma inalámbrica a el/los nodos receptores. La transmisión de los datos entre los nodos emisores y receptores se realiza a través de un canal inalámbrico robusto, diseñado para evitar interferencias y resistir condiciones ambientales adversas incluyendo saturación de la banda frecuencial y reducir en gran medida las interferencias de origen electromagnético. Una vez que el/los nodos receptores obtienen las señales de los nodos emisores, estas son procesadas por una unidad de procesamiento integrada en los receptores o en una unidad final de procesamiento conectada mediante interfaces estándar como USB o Bluetooth. El sistema admite la integración de varios nodos emisores distribuidos en diferentes partes del cuerpo, así como la posibilidad de múltiples usuarios monitorizados de manera simultánea. Las unidades maestras cuya función será principalmente receptora, podrán convertirse en unidades emisoras si cuentan con emisores sub-Ghz, posibilitando modos de funcionamiento adicionales que faciliten el distanciamiento interpersonal de los trabajadores. En este modo el sistema estará configurado con medios de alerta para avisar caso de que la distancia entre los nodos maestros (uno por usuario) sea inferior a un valor predeterminado.*

**Principales características del dispositivo:**

*Los nodos emisores incluyen sensores que miden las aceleraciones y giros de los segmentos corporales, así como el campo magnético para referencia adicional,*

---

permitiendo el cálculo preciso de la orientación del segmento. Los valores tomados por cada nodo garantizarán al menos salidas instantáneas de nueve grados de libertad del algoritmo interno de fusión. Estas salidas de cada segmento corporal serán tenidas en cuenta en el software tras el nodo de recepción para poder mostrar una reproducción visual de los movimientos del sujeto, así como facilitar el posterior análisis de cinemática humana.

- **Comunicación inalámbrica:** La comunicación entre los nodos emisores y receptores es inalámbrica, asegurando libertad de movimiento. Los medios de transmisión inalámbrica están diseñados para asegurar una conexión estable, incluso en entornos con posibles interferencias.
- **Fijación en el cuerpo:** Los nodos emisores están diseñados para ser fijados en diferentes partes del cuerpo mediante medios de sujeción específicos, garantizando una correcta colocación y estabilidad durante el monitoreo. Esta colocación se regirá por las necesidades de registro de segmentos corporales de la aplicación concreta, a razón de al menos dos nodos por articulación.
- **Procesamiento y almacenamiento de datos:** El sistema incluye capacidades para procesar en tiempo real las señales recibidas por los nodos emisores y puede almacenar estos datos para su posterior análisis. Esta información es crucial para estudios biomecánicos, rehabilitación física, entrenamiento deportivo, o aplicaciones médicas.
- **Alertas integradas:** El dispositivo incorpora varios mecanismos de alerta. Estos incluyen avisos sobre el estado de la batería de los nodos, alertas sobre la calidad de la conexión inalámbrica, y avisos en caso de que la distancia entre nodos receptores sea menor a un umbral predefinido, lo que podría indicar un problema en la precisión de la medición.

Concluiremos que este dispositivo está diseñado para proporcionar una solución tecnológica robusta y confiable en la monitorización de movimientos corporales, con aplicaciones potenciales en áreas como la medicina, el deporte y la rehabilitación. Su diseño modular y su capacidad de procesamiento permiten una medición detallada de los movimientos corporales en tiempo real o para análisis posteriores, ofreciendo gran versatilidad y precisión.

### 3.3 Artículo: “*Desarrollo de un Pipeline Integrado para la Evaluación Ergonómica en la Industria Automotriz*”

En este capítulo se presenta el trabajo que aborda el diseño y validación de un *pipeline* integral de hardware y software para la evaluación ergonómica en entornos industriales.

A continuación, se expone la información relacionada con la publicación:

**González-Alonso et al. (2024):** Development of an end-to-end hardware and software pipeline for affordable and feasible ergonomics assessment in the automotive industry.

J. González-Alonso, C. Simón-Martínez, M. Antón-Rodríguez, D. González-Ortega, F. J. Díaz-Pernas, and M. Martínez-Zarzuela, "Development of an end-to-end hardware and software pipeline for affordable and feasible ergonomics assessment in the automotive industry," *Safety Science*, vol. 173, p. 106431, 2024.

– DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106431>

– Factor de impacto (JCR 2023\*): 4.7

\*A falta de conocer el informe que incluye los datos del año de publicación, se incluyen los datos del informe 2023:

Área de conocimiento	Posición	Cuartil
Operations Research & Management Science	21/106	Q1
Engineering, Industrial	15/69	Q1

**Resumen:** En este trabajo se presenta un *pipeline* hardware-software completo para automatizar la evaluación ergonómica en entornos industriales. La solución modular propuesta puede interoperar con sistemas comerciales a lo largo de las diferentes fases del proceso de evaluación ergonómica. El *pipeline* descrito incluye sensores Inerciales de Medición del Movimiento (IMU) de diseño propio, dos herramientas de adquisición en tiempo real del movimiento del trabajador, procesamiento mediante cinemática inversa y generación de informes según el método Rapid Upper Limb Assessment (RULA). Se basa en herramientas de código abierto como Unity3D y OpenSim para evitar los problemas derivados del uso de tecnologías propietarias, como la toma de decisiones en condiciones de “caja negra” en materia de seguridad. Los experimentos se llevaron a cabo en una fábrica automotriz en un entorno de trabajo con riesgo de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (WMSDs, por sus siglas en inglés). La solución propuesta obtuvo resultados comparables a los de un sistema estándar de referencia de alta precisión, logrando una correlación cruzada de 0.95 en la medición de ángulos articulares y un Error Cuadrático Medio (RMSE) inferior a 10 para los codos y 12 para los hombros entre ambos sistemas. Además, la diferencia en la puntuación global de RULA entre los dos sistemas es inferior al 5 %. Este trabajo ofrece una solución de bajo coste para la evaluación del riesgo de WMSDs en el lugar de trabajo, contribuyendo a la reducción de trastornos musculoesqueléticos y del absentismo laboral asociado en la industria, con un impacto positivo en la salud de los trabajadores a largo plazo. Nuestro estudio facilita la investigación futura y promueve el uso de sistemas portátiles para el análisis ergonómico, permitiendo que estos sistemas de prevención lleguen a diversos entornos industriales.

**Abstract:** An end-to-end hardware-software pipeline is introduced to automatize ergonomics assessment in industrial workplaces. The proposed modular solution can interoperate with commercial systems throughout the ergonomics assessment phases involved in the process. The pipeline includes custom-designed Inertial Measurement Unit (IMU) sensors, two real-time worker movement acquisition tools, inverse kinematics processing and Rapid Upper Limb Assessment (RULA) report generation. It is based on free tools such as Unity3D and OpenSim to avoid the problems derived from using proprietary technologies, such as security decisions being made under “black box” conditions. Experiments were conducted in an automotive factory in a workplace with WMSDs risk among workers. The proposed solution obtained comparable results to a gold standard solution, reaching measured joint angles a 0.95 cross-correlation and a Root Mean Square Error (RMSE) lower than 10 for elbows and 12 for shoulders between both systems. In addition, the global RULA score difference is lower than 5 % between both systems. This work provides a low-cost solution for WMSDs risk assessment in the workplace to reduce musculoskeletal disorders and associated sick leave in industry, impacting the health of workers in the long term. Our study can ease further research and popularize the use of wearable systems for ergonomics analysis allowing these workplace prevention systems to reach different industrial environments.

### 3.4 Artículo: “ME-WARD: Implementación Multimodal para la Evaluación Ergonómica en Entornos Industriales con herramientas digitales”

En este capítulo se presenta un trabajo que aborda el problema de la integración de múltiples tecnologías de HMC en una herramienta digital configurable para la evaluación ergonómica. Este enfoque permite procesar datos de sistemas basados en IMUs y modelos de estimación de poses humanas 3D a partir de video, proporcionando evaluaciones ergonómicas escalables y accesibles.

A continuación, se expone la información relacionada con la publicación:

**González-Alonso et al. (2025): ME-WARD: A multimodal ergonomic analysis tool for musculoskeletal risk assessment from inertial and video data in working places.**

**J. González-Alonso, P. Martín-Tapia, D. González-Ortega, M. Antón-Rodríguez, F.J. Díaz-Pernas, M. Martínez-Zarzuela, “ME-WARD: A multimodal ergonomic analysis tool for musculoskeletal risk assessment from inertial and video data in working places,” Expert Systems with Application, (pendiente de publicación), 2025.**

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127212>
- Factor de impacto (JCR 2023\*): 7.5

\*A falta de conocer el informe que incluye los datos del año de publicación, se incluyen los datos del informe 2023:

Área de conocimiento	Posición	Cuartil
Computer Science, Artificial Intelligence	24/197	Q1
Operations Research & Management Science	6/106	Q1
Engineering, Electrical & Electronic	25/353	Q1

---

**Resumen:** Este estudio presenta ME-WARD (Evaluación Ergonómica Multimodal del Lugar de Trabajo y Riesgo a partir de Datos), un nuevo sistema para la evaluación ergonómica y el análisis del riesgo musculoesquelético que implementa el método Rapid Upper Limb Assessment (RULA). ME-WARD está diseñado para procesar datos de ángulos articulares obtenidos a partir de sistemas de captura de movimiento, incluyendo configuraciones basadas en unidades de medición inercial (IMUs) y modelos de seguimiento de la postura humana mediante aprendizaje profundo. La flexibilidad de esta herramienta permite la evaluación del riesgo ergonómico utilizando cualquier sistema capaz de medir con precisión los ángulos articulares, ampliando la aplicabilidad de RULA más allá de las soluciones propietarias. Para validar su desempeño, la herramienta se probó en un entorno industrial durante el ensamblaje de cintas transportadoras, un proceso que involucra tareas de alto riesgo ergonómico, como la inserción de varillas y el empuje de componentes. Los experimentos emplearon sistemas IMU de referencia junto con un sistema avanzado monocular de estimación de pose 3D. Los resultados confirmaron que ME-WARD genera puntuaciones de RULA confiables, alineadas estrechamente con las métricas obtenidas mediante IMU en movimientos dominados por la flexión. Además, mostró un rendimiento comparable al sistema monocular, aunque con limitaciones en el seguimiento de movimientos laterales y rotacionales. Este trabajo resalta el potencial de integrar múltiples tecnologías de captura de movimiento en un *pipeline* de evaluación ergonómica unificado y accesible. Al admitir diversas fuentes de entrada, incluyendo sistemas de bajo coste basados en video, el enfoque multimodal propuesto ofrece una solución escalable y rentable para la evaluación ergonómica, allanando el camino para una adopción más amplia en entornos industriales con recursos limitados.

**Abstract:** *This study presents ME-WARD (Multimodal Ergonomic Workplace Assessment and Risk from Data), a novel system for ergonomic assessment and musculoskeletal risk evaluation that implements the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method. ME-WARD is designed to process joint angle data from motion capture systems, including inertial measurement unit (IMU)-based setups, and deep-learning human body pose tracking models. The tool's flexibility enables ergonomic risk assessment using any system capable of reliably measuring joint angles, extending the applicability of RULA beyond proprietary setups. To validate its performance, the tool was tested in an industrial setting during the assembly of conveyor belts, which involved high-risk tasks such as inserting rods and pushing conveyor belt components. The experiments leveraged gold-standard IMU systems alongside a state-of-the-art monocular 3D pose estimation system. The results confirmed that ME-WARD produces reliable RULA scores that closely align with IMU-derived metrics for flexion-dominated movements and comparable performance with the monocular system, despite limitations in tracking lateral and rotational motions. This work highlights the potential of integrating multiple motion capture technologies into a unified and accessible ergonomic assessment pipeline. By supporting diverse input sources, including low-cost video-based systems, the proposed multimodal approach offers a scalable, cost-effective solution for ergonomic assessments, paving the way for broader adoption in resource-constrained industrial environments.*

# 4 Conclusiones y futuros trabajos

## 4.1 Conclusiones

Los trastornos musculoesqueléticos (MSDs) representan una de las principales causas de baja laboral y reducción de la calidad de vida en entornos laborales y clínicos. En este contexto, la necesidad de herramientas objetivas y eficientes para evaluar la carga postural y prevenir estos trastornos se ha vuelto crucial. Aunque los sistemas ópticos de captura de movimiento y las tecnologías basadas en visión artificial han permitido avances en la evaluación ergonómica y el análisis cinemático, siguen presentando barreras importantes, como altos costes, dependencia de infraestructuras especializadas y limitaciones en entornos no controlados.

Para superar estas limitaciones, esta tesis investigó una solución alternativa basada en sensores inerciales vestibles y herramientas de código abierto, con el objetivo de proporcionar un sistema accesible y confiable para la monitorización postural en tiempo real y la evaluación ergonómica. En este sentido, el sistema desarrollado ha sido validado en entornos reales, con la supervisión de expertos ergónomos y médicos especializados en fisioterapia y traumatología. Como resultado, se ha demostrado su aplicabilidad en el ámbito industrial, donde contribuye a la prevención de riesgos ergonómicos en trabajadores y facilita la valoración funcional de sujetos con MSDs.

A lo largo de esta investigación, se ha seguido una secuencia lógica de desarrollos y validaciones. El diagrama de la Figura 4.1 relaciona las hipótesis de partida con los resultados de investigación y las conclusiones derivadas de las aportaciones realizadas durante el desarrollo de esta tesis. Estas conclusiones se resumen a continuación:

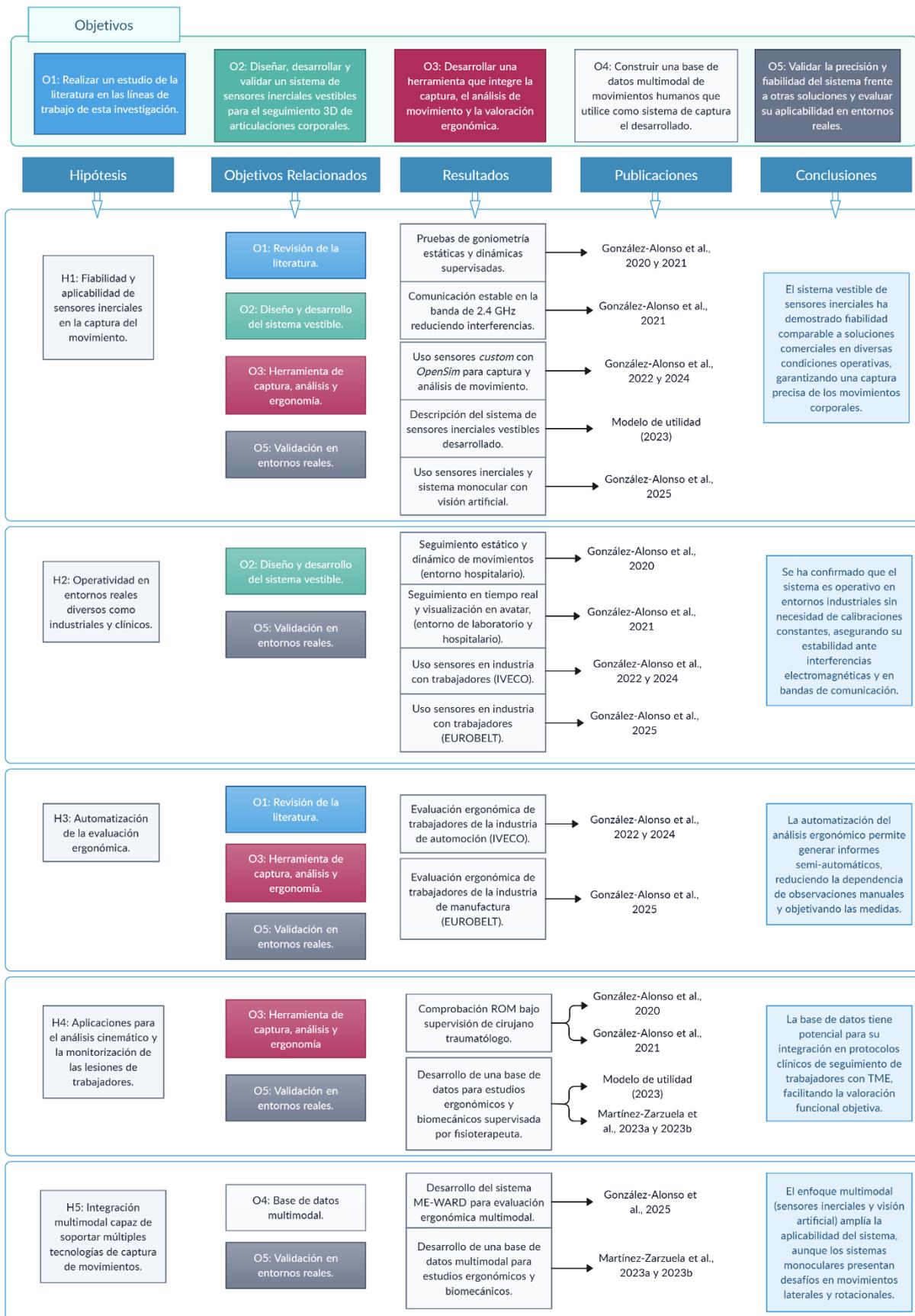


Figura 4.1. Diagrama de relación de los elementos de la tesis doctoral.

1. **El sistema vestible de sensores inerciales ha demostrado fiabilidad comparable a soluciones comerciales** en diversas condiciones operativas, garantizando una captura precisa de los movimientos corporales.
2. **Se ha confirmado que el sistema es operativo en entornos industriales y clínicos** sin necesidad de calibraciones constantes, mostrando estabilidad frente a interferencias electromagnéticas y en condiciones de saturación del espectro de radiofrecuencia.
3. **La automatización del análisis ergonómico permite generar informes semi-automáticos**, reduciendo la dependencia de observaciones manuales y objetivando las mediciones.
4. **La base de datos registrada tiene potencial para el reconocimiento de actividades y para su integración en protocolos clínicos y ergonómicos**, facilitando la valoración funcional de trabajadores con MSDs.
5. **El enfoque multimodal del sistema (sensores vestibles basados en IMUs y visión artificial) amplía la aplicabilidad del sistema**, aunque los sistemas monoculares presentan desafíos en la detección de movimientos laterales y rotacionales.

Estas conclusiones consolidan la aportación de esta tesis al campo de la ergonomía y la biomecánica, proporcionando una solución accesible, validada y aplicable en entornos reales para la prevención de riesgos musculoesqueléticos. En esta línea, los resultados obtenidos han permitido alcanzar de manera progresiva los objetivos propuestos al inicio del trabajo, que se concretan en las siguientes contribuciones principales:

- **Contribución 1: Revisión y definición de tecnologías y métodos de HMC**

Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura técnica y científica sobre la captura del movimiento humano, abarcando sistemas ópticos multicámara, sensores inerciales, visión artificial con sensores monoculares y enfoques tradicionales basados en observación supervisada. Con ello se definieron las tecnologías y métodos de adquisición a utilizar durante el desarrollo de la tesis

---

doctoral, así como las metodologías de análisis cinemático y evaluación ergonómica a incorporar en el sistema.

A partir de esta revisión, se eligió el desarrollo de un sistema vestible propio basado en sensores inerciales como la alternativa más adecuada para la captura de movimiento en entornos reales, debido a su portabilidad, bajo coste y robustez frente a las limitaciones de los sistemas ópticos en entornos no controlados. Para mejorar la flexibilidad del sistema ante diferentes escenarios de aplicación, se adoptó un enfoque multimodal que soporta tecnologías complementarias de captura. En cuanto a la evaluación ergonómica, se optó por la escala RULA, reconocida por su sencillez, rapidez de aplicación y eficacia en la identificación de posturas de riesgo en el ámbito industrial.

- **Contribución 2: Desarrollo de un sistema de sensores inerciales vestibles**

En segundo lugar, se ha diseñado y fabricado un sistema de sensores inerciales vestibles, con la capacidad de operar en entornos industriales y clínicos. El sistema ha sido desarrollado con el propósito de capturar y analizar datos cinemáticos en tiempo real, minimizando los efectos de interferencias electromagnéticas y garantizando una comunicación estable de hasta 10 sensores a 50Hz en la banda de 2.4 GHz. A diferencia de otros sistemas de captura de movimiento, la solución desarrollada se distingue por ser modular, inalámbrica y de bajo coste, manteniendo, no obstante, una alta precisión en la reconstrucción del movimiento y en el seguimiento de los segmentos corporales.

En cuanto a su validación, la evaluación inicial del prototipo, presentada en González-Alonso et al. (2020), demostró su precisión en la medición de la flexión y abducción del hombro, así como en la flexión del codo. En comparación con un goniómetro digital se obtuvo una diferencia entre 2° y 2.27°, mientras que con respecto a sensores comerciales el error fue inferior a 3.8°. Posteriormente, en González-Alonso et al. (2021), se llevó a cabo una validación adicional mediante una articulación mecánica con rótula, donde se obtuvo un error inferior a 1° en pruebas estáticas. En pruebas dinámicas, el sistema fue comparado con DeepStream SDK de NVIDIA, registrando una diferencia en la medición del ángulo del codo de 4.96° en el brazo derecho y

4.29° en el izquierdo, con un coeficiente de correlación superior a 0.99. Estas validaciones confirman que los datos de cinemática humana obtenidos con el sistema desarrollado son precisos y replicables, consolidando así su viabilidad frente a soluciones más costosas y complejas.

- **Contribución 3: Modelo de utilidad y generación de una base de datos multimodal**

En tercer lugar, se ha registrado un modelo de utilidad, el cual formaliza la innovación propuesta y su aplicabilidad en la evaluación ergonómica y la valoración funcional. En particular, este modelo de utilidad ha permitido establecer un marco de trabajo para la visualización y análisis en tiempo real del rango de movimiento, lo que ha supuesto una mejora significativa en la accesibilidad de las herramientas de evaluación ergonómica.

Como parte de esta investigación, se ha generado una base de datos multimodal, compuesta por registros de movimientos humanos en actividades cotidianas, utilizando sensores inerciales y cámaras monoculares. Esta base de datos demuestra su aplicabilidad para la valoración funcional de sujetos y tiene el potencial de ser utilizada en investigaciones futuras para el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial enfocados en evaluación ergonómica y monitorización del movimiento humano (Martínez-Zarzuela et al., 2023b).

- **Contribución 4: Implementación de una plataforma integral multimodal de análisis ergonómico**

La cuarta contribución de esta tesis ha sido la implementación de *pipeline* software para la adquisición, análisis cinemático y evaluación ergonómica del movimiento humano. Esta plataforma ha sido diseñada para ser compatible con diferentes tecnologías de captura de movimiento: sistemas basados en sensores inerciales, tanto comerciales (alta gama) como de desarrollo propio (bajo coste), así como con cámaras monoculares con algoritmos de visión artificial y aprendizaje profundo. El enfoque adoptado ha permitido definir un *pipeline* estructurado, abarcando todo el proceso de monitorización de movimientos, desde la captura en entornos reales, pasando por el análisis y valoración funcional, hasta la obtención de resultados de evaluación ergonómica. Automatizando así la detección de posturas de riesgo, reduciendo la

dependencia de un único tipo de sensor y facilitando la personalización de los análisis según las necesidades del usuario final.

Con la inclusión de múltiples opciones de entrada a la herramienta desarrollada ME-WARD (González-Alonso et al., 2025), se han puesto de manifiesto las limitaciones actuales de sistemas de detección de movimientos con una cámara. Los análisis han revelado limitaciones en movimientos laterales y rotacionales, especialmente en configuraciones monoculares, donde la correlación se reduce dependiendo del plano de movimiento. En concreto, se obtuvieron correlaciones promedio de 0.82 en tareas de flexión y una reducción a 0.55 en movimientos laterales y rotacionales.

A medida que avanzan los métodos de detección y los algoritmos de aprendizaje profundo, se espera que esta herramienta evolucione y mejore su precisión y aplicabilidad en la evaluación ergonómica y la prevención de MSDs en entornos diversos.

- **Contribución 5: Validación en entornos reales**

Por último, se ha llevado a cabo la validación de la herramienta ME-WARD y del modelo de utilidad en diversos entornos reales, incluyendo fábricas y entornos clínicos. Inicialmente, se realizaron comparaciones con goniometría y la supervisión de expertos médicos como traumatólogos y fisioterapeutas. Posteriormente, se llevó a cabo su valoración en entornos industriales menos controlados bajo la supervisión de ergónomos de los departamentos de prevención de riesgos laborales y recursos humanos.

En González-Alonso et al. (2022 y 2024), se realizaron evaluaciones en los talleres de chapa y pintura de IVECO Valladolid, comparando el *pipeline* desarrollado con el sistema comercial Xsens Awinda. La precisión de la plataforma multimodal con los sensores vestibulares de desarrollo propio y la cinemática inversa de OpenSim registró una diferencia menor al 5% en la puntuación global de RULA en comparación con Xsens Motion Cloud. En tareas de bajo riesgo ergonómico, la diferencia en RULA fue inferior al 0.5%, mientras que, en tareas de flexión repetitiva, la variación se situó en un rango de  $\pm 1.2\%$ . Los resultados obtenidos con Xsens MVN Pro, mostraron diferencias en ángulos articulares inferiores a  $12^\circ$  en hombros e inferiores a  $10^\circ$  en codos, con una correlación cruzada superior a 0.95. Además, la puntuación global de

RULA en distintos subprocesos analizados no difería en más de un 5% respecto a las métricas de referencia.

Asimismo, en González-Alonso et al. (2025) se analizó el sistema en la fábrica de montaje de cintas transportadoras de Afher Eurobelt Valladolid, analizando tanto el sistema vestible como una solución monocular. Los resultados mostraron que la solución monocular obtuvo coeficientes de correlación de 0.66 a 0.92 en flexión, aunque en movimientos laterales y rotacionales los valores fueron más variables, oscilando entre 0.1 y 0.76, poniendo de manifiesto los retos inherentes a los sistemas monoculares en el manejo de dinámicas complejas y multiangulares.

Actualmente, el modelo de utilidad se encuentra en explotación y es utilizado conjuntamente con la herramienta ME-WARD para analizar la lesividad de distintos puestos de trabajo en el montaje de cintas transportadoras modulares.

Estos resultados de la investigación han demostrado que el sistema desarrollado es capaz de capturar y analizar el movimiento con una precisión comparable a un sistema comercial, operar en entornos reales sin necesidad de condiciones controladas y facilitar la evaluación ergonómica mediante escalas estandarizadas con un enfoque automatizado. Su compatibilidad con múltiples sensores y metodologías de visión artificial amplía sus posibilidades de aplicación, consolidando el potencial de esta solución en la evaluación ergonómica y la prevención de MSDs en diversos entornos.

Por todo esto, se espera que el desarrollo de soluciones accesibles y escalables permita avanzar hacia una digitalización más eficiente en la evaluación ergonómica y la monitorización, promoviendo entornos de trabajo más seguros y saludables. Con este trabajo, se establece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de la biomecánica, la ergonomía y la salud ocupacional.

## **4.2 Resultados**

Los resultados de esta investigación se han materializado en un total de tres publicaciones científicas, dos artículos de congreso y una patente en explotación.

---

Los hallazgos de esta tesis se han difundido a través de las siguientes publicaciones en revistas indexadas *JCR*:

- González-Alonso, J., Oviedo-Pastor, D., Aguado, H.J., Díaz-Pernas, F.J., González-Ortega, D., & Martínez-Zarzuela, M. (2021). Custom IMU-Based Wearable System for Robust 2.4 GHz Wireless Human Body Parts Orientation Tracking and 3D Movement Visualization on an Avatar. *Sensors*, 21(19), 6642. <https://doi.org/10.3390/s21196642>
- González-Alonso, J., Simón-Martínez, C., Antón-Rodríguez, M., González-Ortega, D., Díaz-Pernas, F.J., & Martínez-Zarzuela, M. (2024). Development of an end-to-end hardware and software pipeline for affordable and feasible ergonomics assessment in the automotive industry. *Safety Science*, 173, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106431>
- González-Alonso, J., Martín-Tapia, P., González-Ortega, D., Antón-Rodríguez, M., Díaz-Pernas, F.J., & Martínez-Zarzuela, M. (2025). MEWARD: A multimodal ergonomic analysis tool for musculoskeletal risk assessment from inertial and video data in working places. *Expert Systems With Applications*, 278, 127212. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127212>

Además, se ha registrado y explotado el modelo de utilidad titulado:

- *Sistema de sensores inerciales vestibulares para la evaluación ergonómica y monitorización del movimiento humano*. Número de solicitud: U202330073. Fecha de concesión: 07/08/2023. Número de publicación: ES1299927. Empresa explotación: Ather Eurobelt.

Y las siguientes ponencias en congresos:

- González-Alonso, J., Martínez-Zarzuela, M., Díaz-Pernas, F.J., & H. J. Aguado (2020). Validación de prototipo con sensores vestibulares para captura y análisis de movimientos del cuerpo humano con aplicación en medicina. En Hornero Sánchez, Roberto; Poza Crespo, Jesús; Gómez Peña, Carlos; García Gadañón, María (eds.). Libro de Actas del

XXXVIII Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica. 1 ed. Sociedad Española de Ingeniería Biomédica; 2020. p. 397-400.

- González-Alonso, J., Simón-Martínez, C., Díaz-Pernas, F.J., Antón-Rodríguez, M., González-Ortega, D., & Martínez-Zarzuela, M. (2022). Automatización del método RULA para análisis ergonómico con sensores inerciales vestibles. En Hornero Sánchez, Roberto; Poza Crespo, Jesús; Gómez Peña, Carlos; García Gadañón, María (eds.). Libro de Actas del XL Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica. 1 ed. Sociedad Española de Ingeniería Biomédica; 2022. p. 270-273.

Así mismo, los desarrollos realizados han sido utilizados parcialmente en los siguientes proyectos:

- *ErgoTwyncare*: Valoración ergonómica de puestos de trabajo mediante gemelo digital y tecnología de sensores vestibles.  
Financiación: Consejería de Empleo e Industria de Castilla y León (España).  
Duración: 33 meses  
Importe: 68.000 €  
Código del proyecto: INVESTUN/21/VA/0003.
- *Rehabot*: Smart assistant to complement and assess the physical rehabilitation of children with cerebral palsy in their natural environment.  
Financiación: Ministerio de Ciencia e Innovación de España.  
Duración: 36 meses (vigente)  
Importe: 88.330 €  
Código del proyecto: PID2021-124515OA-I00.

Los avances tecnológicos desarrollados se han aplicado en colaboración con empresas a través de los siguientes contratos de transferencia:

- *Recogida de datos y análisis de movimientos articulares de extremidades superiores para la evaluación de puestos de trabajo.*

Investigador Principal (IP): M. Martínez-Zarzuela

Duración: 1 año

Importe: 18.000 €

Entidad u organismos financiadores: IVECO ESPAÑA, S.L.

Número de investigadores: 7

Fecha de inicio: 05/10/2017

Resultados relevantes: Implementación del sistema de captura de movimiento basado en sensores vestibles para analizar posturas en la línea de ensamblaje y realizando la valoración funcional de las mismas.

- *Recogida de datos y análisis de movimientos articulares de extremidades superiores para la evaluación de puestos de trabajo: hombro, codo y muñeca.*

Investigador Principal (IP): M. Martínez-Zarzuela

Duración: 1 año

Importe: 25.000 €

Entidad u organismos financiadores: IVECO ESPAÑA, S.L.

Número de investigadores: 5

Fecha de inicio: 17/10/2018

Resultados relevantes: Ampliación del contrato anterior, modificando el sistema de captura e incorporando un análisis detallado de las articulaciones específicas durante tareas repetitivas en la línea de montaje.

- *Adecuación de sistema de análisis de movimientos en puestos de trabajo para favorecer su utilización por el personal de la empresa.*

Investigador Principal (IP): M. Martínez-Zarzuela

Duración: 1 año

Importe: 25.000 €

Entidad u organismos financiadores: IVECO ESPAÑA, S.L.

Número de investigadores: 6

Fecha de inicio: 17/10/2019

Resultados relevantes: Personalización del sistema de análisis de movimientos para su integración en la rutina diaria de los operarios, facilitando su adopción y usabilidad. Adecuación del sistema software para la generación de valoraciones funcionales semi-automáticas y facilitar el manejo por parte de los supervisores de prevención y seguridad laboral.

- *Monitorización de cintas transportadoras para mantenimiento predictivo: estudio de viabilidad*

Investigador Principal (IP): M. Martínez-Zarzuela

Duración: 1 año

Importe: 10.000 €

Entidad u organismos financiadores: AFHER-EUROBELT, S.A.

Número de investigadores: 2

Fecha de inicio: 01/10/2022

Resultados relevantes: En este contrato de transferencia se evaluaron distintas tecnologías para la monitorización de cintas transportadoras y se desarrolló un prototipo funcional. A partir de este proyecto se consiguió el contrato de explotación para utilizar el sistema en monitorización de movimientos de los trabajadores.

Además, la labor de transferencia tecnológica y la innovación derivadas de esta investigación han sido reconocidas en diversos certámenes y competiciones, destacando los siguientes reconocimientos:

- Tercer lugar en los "*Premios Iniciativa Campus Emprendedor 2019*": El proyecto "*TwynCare: Valoración ergonómica de puestos de trabajo y rehabilitación con sistemas vestibles*" fue distinguido con la tercera posición en este certamen, resaltando su potencial innovador y aplicabilidad en el ámbito laboral.
- Ganador del "*Premio Explorer Universidad de Valladolid Explorer Space 2019*": El mismo proyecto, "*TwynCare*", obtuvo el primer lugar en esta competición organizada por el Banco Santander, reconociendo su excelencia en innovación y emprendimiento.

- Finalista en los "*Startup Olé 2020 Digital Edition Pitch Competition*": "*TwynCare*" fue finalista en esta competición internacional, que contó con la participación de 100 países y 254 startups. Además, el proyecto fue galardonado como ganador en la categoría *Autotech*, destacando su relevancia en el sector tecnológico y automotriz.

## 4.3 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos en esta tesis han demostrado la viabilidad del sistema desarrollado para la captura de movimientos, análisis cinemático y la evaluación ergonómica en entornos industriales. Sin embargo, existen diversas áreas de mejora y expansión que podrían potenciar su aplicabilidad y alcance. Las líneas de investigación futuras se pueden agrupar en dos grandes categorías: **(i) mejoras técnicas del sistema** y **(ii) nuevas aplicaciones o contextos de uso**.

- **Mejoras Técnicas del Sistema**

Las siguientes líneas de trabajo se centran en optimizar la precisión, adaptabilidad y robustez del sistema:

- **Usabilidad y facilidad de implementación**

Actualmente, el sistema requiere un proceso de calibración manual previo a su uso. El usuario debe adoptar una postura específica que sirva como referencia para las mediciones posteriores (generalmente pose N). Una posible mejora es el desarrollo de un método de calibración automática basado en visión artificial, que capture la pose inicial del usuario reduciendo su intervención y facilitando su aplicación en distintos escenarios sin ajustes previos.

- **Ampliar el alcance ergonómico incorporando nuevos modelos de evaluación**

Si bien el sistema implementado utiliza el método RULA para la evaluación ergonómica, sería beneficioso integrar otras metodologías estandarizadas como OWAS, NIOSH o REBA (ampliando RULA a miembros inferiores), o incluso automatizando herramientas propias de los departamentos de

prevención de riesgos laborales de diferentes empresas. Esto permitiría una valoración más completa y adaptada a un mayor número de aplicaciones y sectores laborales.

- **Integrar la sensorización de nuevas métricas fisiológicas**

Para complementar el análisis cinemático actual, se propone la automatización de la toma de medidas cinéticas como la fuerza ejercida y la carga soportada por el trabajador. Esto se podría conseguir gracias a la incorporación al sistema de otros dispositivos como sensores de electromiografía (EMG), guantes de fuerza o sistemas de detección automática del peso a partir de análisis de video. Dicha implementación facilitaría la optimización de la carga, un importante factor de riesgo asociado a los trastornos musculoesqueléticos.

- **Optimizar la captura de movimiento con configuraciones multicámara**

Un enfoque futuro sería la implementación de una configuración multicámara, el cual permita mejorar la reconstrucción del movimiento en escenarios dinámicos con movimientos complejos y evitar oclusiones o defectos en la iluminación. Estas soluciones deberán constar de cámaras comerciales de bajo coste y tamaño reducido para mantener el enfoque de la investigación, que aboga por popularizar el acceso a estos sistemas sin afectar a la precisión de la estimación ni a la correcta ejecución del puesto de trabajo.

- **Mejorar el análisis de datos con modelos avanzados de inteligencia artificial**

Se contempla la exploración de modelos avanzados de inteligencia artificial para optimizar el análisis y clasificación de patrones de movimiento. La integración de modelos de detección de pose más avanzados como OpenPose, MotionBERT (Zhu et al., 2023) o MotionAGFormer (Mehraban et al., 2023), pueden mejorar los resultados obtenidos con sistemas de captura monoculares.

- **Extender las capacidades del sistema a otras funcionalidades**

Además de la evaluación postural en entornos laborales, el sistema podría ampliarse para analizar parámetros biomecánicos de la marcha, lo que

facilitaría su aplicación en contextos clínicos, como la rehabilitación de pacientes con movilidad reducida o la prevención de caídas en personas de avanzada edad.

- **Nuevas Aplicaciones y Contextos de Uso**

Más allá de la optimización técnica, el sistema desarrollado tiene el potencial de aplicarse en diversos escenarios. Se identifican las siguientes líneas de investigación orientadas a su implementación en nuevos contextos:

- **Prevención proactiva previa a la implantación de puestos de trabajo**

Se propone el desarrollo de un módulo de simulación en Realidad Virtual que permita evaluar y optimizar la ergonomía de los puestos de trabajo antes de su implementación. Esta solución ofrecería a las empresas una herramienta para diseñar y adaptar entornos laborales en un entorno virtual simulado, realizando evaluaciones ergonómicas en el propio espacio virtual. Así, las modificaciones serían analizadas objetivamente antes de su implantación, permitiendo ahorrar costes y lesiones debido a posibles planteamientos iniciales incorrectos.

- **Aplicación del sistema a la rehabilitación clínica y el seguimiento de trabajadores lesionados**

Dado su potencial para evaluar el movimiento humano en tiempo real, el sistema podría ser adaptado para el seguimiento de las terapias de rehabilitación para trabajadores con lesiones musculoesqueléticas. Su uso en centros de fisioterapia y traumatología permitiría realizar valoraciones objetivas del progreso del paciente, facilitando la personalización de los tratamientos. Además, el sistema permite el monitoreo y la supervisión remota a través de la recogida de métricas objetivas. Este enfoque contribuiría a mejorar la adherencia a los tratamientos y optimizar los procesos de reincorporación laboral.

- **Validación ampliada en otros sectores y estudios longitudinales**

Finalmente, se plantea la realización de estudios longitudinales en entornos industriales y clínicos, con el fin de evaluar el impacto del sistema en la reducción de riesgos ergonómicos a largo plazo. Asimismo, se propone su

aplicación en otros sectores productivos, como la construcción, la logística y la atención sanitaria, donde los riesgos musculoesqueléticos son una fuente importante de lesiones de los trabajadores.

Estas líneas de trabajo representan una hoja de ruta para la evolución del sistema propuesto, con el objetivo de mejorar su precisión, aplicabilidad y alcance. Mientras que las mejoras técnicas permitirán consolidar la robustez del sistema, su implementación en nuevos entornos facilitará la transferencia de conocimiento y su impacto en la prevención y tratamiento de los MSDs en diferentes ámbitos.



---

# Bibliografía

Abhayasinghe, N., Murray, I., & Sharif Bidabadi, S. (2019). Wearable movement sensors for rehabilitation: A focused review of technological and clinical advances. *PM&R*, 10, S220–S232.

<https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2609392>

Abobakr, A., Nahavandi, D., Hossny, M., Iskander, J., Attia, M., Nahavandi, S., & Smets, M. (2019). RGB-D ergonomic assessment system of adopted working postures. *Applied Ergonomics*, 80, 75–88.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.05.004>

Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., Lutz, K., Zizlsperger, L., Luft, A. R., Guimarães, V., Schättin, A., & de Bruin, E. D. (2020). Effects of an In-home Multicomponent Exergame Training on Physical Functions, Cognition, and Brain Volume of Older Adults: A Randomized Controlled Trial. *Front. Med.* 6:321.

<https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00321>

Adrian WR (1993) Research methodology in software engineering. In: Summary of the Dagstuhl workshop on future directions in software engineering” Ed. Tichy, Habermann, and Prechelt, ACM software engineering notes, SIGSoft, pp 36–37.

Ahmed, H., Iqbal, A., & Shaphe, M. A. (2016). Comparison of Trunk Stabilization Exercises Using a Gym Ball and Conventional Back Care Exercises for Patients With Chronic Lower Back Pain. *Middle East Journal of Rehabilitation and Health*, 3(2). <https://doi.org/10.17795/mejrh-37493>

Alberto, R., Draicchio, F., Varrecchia, T., Silvetti, A. & Iavicoli, S. (2018). Wearable Monitoring Devices for Biomechanical Risk Assessment at Work: Current Status and Future Challenges—A Systematic Review. *International*

---

Journal of Environmental Research and Public Health, 15(9).

<https://doi.org/10.3390/ijerph15092001>

Al Borno, M., O'Day, J., Ibarra, V., Dunne, J., Seth, A., Habib, A., Ong, C., Hicks, J., Uhrich, S., & Delp, S. (2022). OpenSense: An open-source toolbox for inertial-measurement-unit-based measurement of lower extremity kinematics over long durations. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19, 22. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01001-x>

Álvarez, D., Álvarez, J. C., González, R. C., & López, A. M. (2012). Ambulatory human upper limb joint motion monitoring. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference* (pp. 15–19). Graz, Austria. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229695>

Álvarez, D., Alvarez, J. C., González, R. C., & López, A. M. (2015). Upper limb joint angle measurement in occupational health. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 19(2), 159–170. <https://doi.org/10.1080/10255842.2014.997718>

Aminian, K., Robert, P., Buchser, E. E., Rutschmann, B., Hayoz, D., & Depairon, M. (1999). Physical activity monitoring based on accelerometry: Validation and comparison with video observation. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 37, 304–308. <https://doi.org/10.1007/BF02513304>

An, K. N., & Chao, E. Y. (1984). Kinematic analysis of human movement. *Annals of Biomedical Engineering*, 12, 585–597. <https://doi.org/10.1007/BF02371451>

Aqueveque, P., Gómez, B. A., Saavedra, F., Canales, C., Contreras, S., Ortega-Bastidas, P., & Cano-de-la-Cuerda, R. (2020). Validation of a portable system for spatial-temporal gait parameters based on a single inertial measurement unit and a mobile application. *European Journal of Translational Myology*, 30, 268–276. <https://doi.org/10.4081/ejtm.2019.9002>

Aslani, N., Noroozi, S., Davenport, P., Hartley, R., Dupac, M., & Sewell, P. (2018). Development of a 3D workspace shoulder assessment tool incorporating electromyography and an inertial measurement unit—a preliminary study. *Medical & biological engineering & computing*, 56(6), 1003–1011. <https://doi.org/10.1007/s11517-017-1745-4>

- Azcueta, J. P. V., Libatique, N. C., & Tangonan, G. L. (2014). In situ sports performance analysis system using inertial measurement units, high-fps video camera, and the Android platform. En *Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2014 International Conference on* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2014.7016249>
- Aziz, O., Park, E. J., Mori, G., & Robinovitch, S. N. (2012). Distinguishing near-falls from daily activities with wearable accelerometers and gyroscopes using support vector machines. In *Proceedings of the 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 5837–5840). San Diego, CA, USA. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347321>
- Banos, O., Moral-Munoz, J. A., Diaz-Reyes, I., Arroyo-Morales, M., Damas, M., Herrera-Viedma, E., Hong, C. S., Lee, S., Pomares, H., Rojas, I., & Villalonga, C. (2015). mDurance: A Novel Mobile Health System to Support Trunk Endurance Assessment. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15(6), 13159–13183. <https://doi.org/10.3390/s150613159>
- Baroni, G., Ferrigno, G., & Pedotti, A. (1998). Implementation and application of real-time motion analysis based on passive markers. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 36(6), 693–703. <https://doi.org/10.1007/BF02518871>
- Bhosale, T., Kudale, H., Kumthekar, V., Garude, S., & Dhumal, P. (2015). Gait analysis using wearable sensors. *2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA)*, 267–269. <https://doi.org/10.1109/ICESA.2015.7503353>
- Bouvier, B., Duprey, S., Claudon, L., Dumas, R. & Săvescu, A. (2015). Upper Limb Kinematics Using Inertial and Magnetic Sensors: Comparison of Sensor-to-Segment Calibrations. *Italian National Conference on Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s150818813>
- Buonocunto, P., Giantomassi, A., Marinoni, M., Calvaresi, D., & Buttazzo, G. (2018). A limb tracking platform for tele-rehabilitation. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2, 1–23. <https://doi.org/10.1145/3148225>

- 
- Cancela, J., Pastorino, M., Arredondo, M. T., Nikita, K. S., Villagra, F., & Pastor, M. A. (2014). Feasibility study of a wearable system based on a wireless body area network for gait assessment in Parkinson's disease patients. *Sensors*, 14, 4618–4633. <https://doi.org/10.3390/s140304618>
- Caputo, F., Greco, A., D'Amato, E., Notaro, I., & Spada, S. (2019). IMU-Based Motion Capture Wearable System for Ergonomic Assessment in Industrial Environment. In: Ahram, T. (eds) *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 795. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94619-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94619-1_21)
- Carnevale, A., Longo, U.G., Schena, E., Massaroni, C., Lo Presti, D., Berton, A., Candela, V., & Denaro, V. (2019). Wearable systems for shoulder kinematics assessment: a systematic review. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 20, 546. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2930-4>
- Carvajal, M.J.G., García, F.M., Gualdrón, C.I.L. (2019). Ergonomic Evaluation Tools Associated with Biomechanical Risk Factors in Work Activities: Review of Literature. In: Bagnara, S., Tartaglia, R., Albolino, S., Alexander, T., Fujita, Y. (eds) *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*. IEA 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 818 (263–271). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96098-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96098-2_34)
- Cereatti, A., Della Croce, U., & Sabatini, A. M. (2017). Three-dimensional human kinematic estimation using magneto-inertial measurement units. In B. Müller, S. I. Wolf, G.-P. Brüeggemann, Z. Deng, A. McIntosh, F. Miller, & W. S. Selbie (Eds.), *Handbook of human motion* (pp. 1–24). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30808-1\\_162-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30808-1_162-1)
- Chartered Society Of Physiotherapy, J. C. (2011). A survey of NHS Physiotherapy waiting times, workforce and caseloads in the UK 2010-2011. Recuperado el 26 de mayo de 2019, a partir de <http://www.csp.org.uk/publications/survey-nhs-physiotherapy-waiting-times-workforce-caseloads-uk-2010-2011>
- Chen, H., Schall, M. C. & Fethke, N. B. (2020). Measuring upper arm elevation using an inertial measurement unit: An exploration of sensor fusion algorithms

---

and gyroscope models. *Applied Ergonomics*, 89.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103187>

- Chen, K.-H., Chen, P.-C., Liu, K.-C., & Chan, C.-T. (2015). Wearable sensor-based rehabilitation exercise assessment for knee osteoarthritis. *Sensors*, 15, 4193–4211. <https://doi.org/10.3390/s150204193>
- Chiang, C.-Y., Chen, K.-H., Liu, K.-C., Hsu, S. J.-P., & Chan, C.-T. (2017). Data collection and analysis using wearable sensors for monitoring knee range of motion after total knee arthroplasty. *Sensors*, 17, 418. <https://doi.org/10.3390/s17020418>
- Choffin, Z., Jeong, N., Callihan, M., Sazonov, E., & Jeong, S. (2023). Lower Body Joint Angle Prediction Using Machine Learning and Applied Biomechanical Inverse Dynamics. *Sensors*, 23(1), 228. <https://doi.org/10.3390/s23010228>
- Clapper, M. P., & Wolf, S. L. (1988). Comparison of the Reliability of the Orthoranger and the Standard Goniometer for Assessing Active Lower Extremity Range of Motion. *Physical Therapy*, 68(2), 214-218. <https://doi.org/10.1093/ptj/68.2.214>
- Cole, D.C., Ibrahim, S., Shannon, H.S. (2005). Predictors of work-related repetitive strain injuries in a population cohort. *Am. J. Public Health* 95, 1233–1237. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2004.048777>
- Colim, A., Cardoso, A., Arezes, P., Braga, A.C., Peixoto, A.C., Peixoto, V., Wolbert, F., Carneiro, P., Costa, N., & Sousa, N. (2021). Digitalization of Musculoskeletal Risk Assessment in a Robotic-Assisted Assembly Workstation. *Safety*, 7(4), 74. <https://doi.org/10.3390/safety7040074>
- Costa, V., Ramírez, Ó., Otero, A., Muñoz-García, D., Uribarri, S., Raya, R. (2020). Validity and reliability of inertial sensors for elbow and wrist range of motion assessment. *PeerJ* 8, e9687. <https://doi.org/10.7717/peerj.9687>
- Coviello, G., & Avitabile, G. (2020). Multiple synchronized inertial measurement unit sensor boards platform for activity monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 20, 8771–8777. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2982744>

- 
- Crabolu, M., Pani, D., Raffo, L., Conti, M., Crivelli, P., & Cereatti, A. (2017). In vivo estimation of the shoulder joint center of rotation using magneto-inertial sensors: MRI-based accuracy and repeatability assessment. *Biomedical Engineering Online*, 16, 34. <https://doi.org/10.1186/s12938-017-0324-0>
- Cutti, A. G., Giovanardi, A., Rocchi, L., Davalli, A., & Sacchetti, R. (2008). Ambulatory measurement of shoulder and elbow kinematics through inertial and magnetic sensors. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 46, 169–178. <https://doi.org/10.1007/s11517-007-0296-5>
- Da Gama, A., Fallavollita, P., Teichrieb, V., & Navab, N. (2015). Motor rehabilitation using Kinect: a systematic review. *Games for health journal*, 4(2), 123-135. <https://doi.org/10.1089/g4h.2014.0047>
- David, G. C. (2005). Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders, *Occupational Medicine*, 55(3), 190–199. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi082>
- Delp, S.L., Anderson, F.C., Arnold, A.S., Loan, P., Habib, A., John, C.T., Guendelman, E., & Thelen, D.G. (2007). OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(11), 1940–1950. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.901024>
- Derman, W. E. (2007). CHAPTER 11 - Special Considerations for Patients with Chronic Illness or Disease. En W. R. Frontera, S. A. Herring, L. J. Micheli, J. K. Silver, A. E. for the Cd, & T. P. Young (Eds.), *Clinical Sports Medicine* (pp. 131-145). Edinburgh: W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/B978-141602443-9.50014-3>
- Díaz Hernández, S., Stephenson, J., & Labrador, M. (2019). Use of wearable sensor technology in gait, balance, and range of motion analysis. *Applied Sciences*, 10, 234. <https://doi.org/10.3390/app10010234>
- Diego-Mas, J. A. and Alcaide-Marzal, J. (2014). Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work. *Applied Ergonomics*, 45(4). <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.12.001>

- Eikeland, O. (2006). Validity in action research – validity of action research. En K. A. Nielsen & L. Svensson (Eds.), *Action and interactive research – beyond practice and theory*. Shaker, 193-240.
- El-Gohary, M., Pearson, S., McNames, J., Mancini, M., Horak, F., Mellone, S., & Chiari, L. (2014). Continuous monitoring of turning in patients with movement disability. *Sensors*, 14, 356–369.  
<https://doi.org/10.3390/s140100356>
- El-Gohary, M., & McNames, J. (2015). Human joint angle estimation with inertial sensors and validation with a robot arm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62, 1759–1767. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2403368>
- Elhayek, A., de Aguiar, E., Jain, A., Tompson, J., Pishchulin, L., Andriluka, M., Bregler, C., Schiele, B., & Theobalt, C. (2015). Efficient ConvNet-based marker-less motion capture in general scenes with a low number of cameras. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 3810–3818. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299005>
- El-Helow, M. R., Zamzam, M. L., Fathalla, M. M., El-Badawy, M. A., El Nahhas, N., El-Nabil, L. M., Awad, M. R., & Von Wild, K. (2015). Efficacy of modified constraint-induced movement therapy in acute stroke. *European journal of physical and rehabilitation medicine*, 51(4), 371–379.
- European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2019). *Work-related musculoskeletal disorders: Prevalence, costs, and demographics in the EU*. Recuperado el 10 de octubre de 2024, de:  
<https://osha.europa.eu/es/publications/msds-facts-and-figures-overview-prevalence-costs-and-demographics-msds-europe>
- European Commission. (2016). *Digital futures: Final report. A journey into 2050 visions and policy challenges*. DG CONNECT. Recuperado el 10 de octubre de 2024, de:  
[https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/futurium\\_scientific\\_report\\_v10revcl\\_v2\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/futurium_scientific_report_v10revcl_v2_0.pdf)
- European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions (Eurofound). (2017). *Sixth European Working Conditions Survey – Overview report (2017 update)*. Publications Office of the European Union. Recuperado

el 10 de octubre de 2024, de

<https://www.eurofound.europa.eu/en/publications/2016/sixth-european-working-conditions-survey-overview-report>

Fang, Z., Woodford, S., Senanayake, D. & Ackland, D. (2023). Conversion of Upper-Limb Inertial Measurement Unit Data to Joint Angles: A Systematic Review. *Italian National Conference on Sensors*.  
<https://doi.org/10.3390/s23146535>

Fantozzi, S., Giovanardi, A., Magalhães, F., Di Michele, R., Cortesi, M. & Gatta, G. (2016). Assessment of three-dimensional joint kinematics of the upper limb during simulated swimming using wearable inertial-magnetic measurement units. *Journal of sports sciences*.  
<https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1088659>

Generosi, A., Agostinelli, T., Ceccacci, S. et al. A novel platform to enable the future human-centered factory. *Int J Adv Manuf Technol* 122, 4221–4233 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09880-z>

Gerber, C. N., Carcreff, L., Paraschiv-Ionescu, A., Armand, S., & Newman, C. J. (2020). Multidimensional measures of physical activity and their association with gross motor capacity in children and adolescents with cerebral palsy. *Sensors*, 20, 5861. <https://doi.org/10.3390/s20205861>

Ghasemi, F., Mahdavi, N. (2020). A new scoring system for the Rapid Entire Body Assessment (REBA) based on fuzzy sets and Bayesian networks. *Int. J. Ind. Ergon.* 80, 103058. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.103058>

Glass, R. L. (1995). A structure-based critique of contemporary computing research. *Journal of Systems and Software* 28 (1): 3–7.  
[https://doi.org/10.1016/0164-1212\(94\)00077-Z](https://doi.org/10.1016/0164-1212(94)00077-Z)

González-Alonso, J., Martínez-Zarzuela, M., Díaz-Pernas, F.J., & H. J. Aguado (2020). Validación de prototipo con sensores vestibulares para captura y análisis de movimientos del cuerpo humano con aplicación en medicina. En Hornero Sánchez, Roberto; Poza Crespo, Jesús; Gómez Peña, Carlos; García Gadañón, María (eds.). Libro de Actas del XXXVIII Congreso Anual de la Sociedad

---

Española de Ingeniería Biomédica. 1 ed. Sociedad Española de Ingeniería Biomédica; 2020. p. 397-400

- González-Alonso, J., Oviedo-Pastor, D., Aguado, H.J., Díaz-Pernas, F.J., González-Ortega, D., & Martínez-Zarzuela, M. (2021). Custom IMU-Based Wearable System for Robust 2.4 GHz Wireless Human Body Parts Orientation Tracking and 3D Movement Visualization on an Avatar. *Sensors*, 21(19), 6642. <https://doi.org/10.3390/s21196642>
- González-Alonso, J., Simón-Martínez, C., Díaz-Pernas, F.J., Antón-Rodríguez, M., González-Ortega, D., & Martínez-Zarzuela, M. (2022). Automatización del método RULA para análisis ergonómico con sensores inerciales vestibulares. En Hornero Sánchez, Roberto; Poza Crespo, Jesús; Gómez Peña, Carlos; García Gadañón, María (eds.). *Libro de Actas del XL Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*. 1 ed. Sociedad Española de Ingeniería Biomédica; 2022. p. 270-273
- González-Alonso, J., Simón-Martínez, C., Antón-Rodríguez, M., González-Ortega, D., Díaz-Pernas, F.J., & Martínez-Zarzuela, M. (2024). Development of an end-to-end hardware and software pipeline for affordable and feasible ergonomics assessment in the automotive industry. *Safety Science*, 173, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106431>
- González-Alonso, J., Martín-Tapia, P., González-Ortega, D., Antón-Rodríguez, M., Díaz-Pernas, F.J., & Martínez-Zarzuela, M. (2025). ME-WARD: A multimodal ergonomic analysis tool for musculoskeletal risk assessment from inertial and video data in working places. *Expert Systems With Applications*, 278, 127212. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127212>
- Greco, A., Caterino, M., Fera, M., & Gerbino, S. (2020). Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production. *Applied Sciences*, 10(21), 7758. <https://doi.org/10.3390/app10217758>
- Greenwood, S., & Koufaki, P. (2017). Chapter 67 - Physical Activity, Function, and Exercise-Based Rehabilitation for Dialysis Patients. En A. R. Nissenson & R. N. Fine (Eds.), *Handbook of Dialysis Therapy (Fifth Edition)* (pp. 819-828.e2). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39154-2.00067-9>

- 
- He, Q., Zheng, Z., Zhu, X., Zhang, H., Su, Y., Xu, X. (2022). Design and implementation of low-cost inertial sensor-based human motion capture system. In: 2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI), pp. 664–669.  
<https://doi.org/10.1109/ICCSI55536.2022.9970563>
- Health and Safety Executive. (2021). Health and safety statistics 2020/21. Recuperado el 24 de noviembre de 2023, de: <https://www.hse.gov.uk/statistics/>
- Health Consumer Powerhouse. (2017). *Euro health consumer index*. Health Consumer Powerhouse.
- Hellmers, S., Fudickar, S., Lange, E., Lins, C., & Hein, A. (2017). Validation of a motion capture suit for clinical gait analysis. En Proceedings of the 11th EAI International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (pp. 120–126). ACM.
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201–205. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Hillcrest Laboratories. BNO080 Datasheet Revision 1.3. Recuperado el 20 de agosto de 2021, de:  
[https://cdn.sparkfun.com/Assets/1/3/4/5/9/BNO080\\_Datasheet\\_v1.3.pdf](https://cdn.sparkfun.com/Assets/1/3/4/5/9/BNO080_Datasheet_v1.3.pdf)
- Höglund, G., Grip, H., & Öhberg, F. (2021). The importance of inertial measurement unit placement in assessing upper limb motion. *Medical Engineering & Physics*, 92, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2021.03.010>
- Horak, F., King, L., & Mancini, M. (2015). Role of Body-Worn Movement Monitor Technology for Balance and Gait Rehabilitation. *Physical Therapy*, 95(3), 461–470. <https://doi.org/10.2522/ptj.20140253>
- Hossain, H. M. S., Khan, M. A. A. H., & Roy, N. (2017). SoccerMate: A personal soccer attribute profiler using wearables. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops) (pp. 164–169). Kona, HI, USA.  
<https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2017.7917551>

- Hsu, Y.-L., Wang, J.-S., Lin, Y.-C., Chen, S.-M., Tsai, Y.-J., Chu, C.-L., & Chang, C.-W. (2013). A wearable inertial-sensing-based body sensor network for shoulder range of motion assessment. In Proceedings of the 2013 1st International Conference on Orange Technologies (ICOT) (pp. 328–331). Tainan, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/ICOT.2013.6521225>
- Huang, C., Kim, W., Zhang, Y., & Xiong, S. (2020). Development and Validation of a Wearable Inertial Sensors-Based Automated System for Assessing Work-Related Musculoskeletal Disorders in the Workspace. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), 6050. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176050>
- Ismail, N. H. B., & Basah, S. N. B. (2015). The applications of Microsoft Kinect for human motion capture and analysis: A review. In *Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICoBE.2015.7235894>
- Iyer, V., Hermans, F., & Voigt, T. (2015). Detecting and avoiding multiple sources of interference in the 2.4 GHz spectrum. In T. Abdelzaher, N. Pereira, & E. Tovar (Eds.), *Proceedings of the Wireless Sensor Networks* (pp. 35–51). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15582-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15582-1_3)
- Jacob, A., Wan Zakaria, W. N., & Md Tomari, M. R. B. (2016). Implementation of IMU sensor for elbow movement measurement of badminton players. In *Proceedings of the 2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)* (pp. 1–6). Ipoh, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ROMA.2016.7847813>
- Jette, A., & Haley, S. (2005). Contemporary measurement techniques for rehabilitation outcomes assessment\*. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 37(6), 339-345. <https://doi.org/10.1080/16501970500302793>
- Karhu, O., Kansil, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8(4), 199–201. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(77\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90002-5)
- Karvonen, H., Mikhaylov, K., Acharya, D., & Rahman, M. (2020). Performance evaluation of Bluetooth low energy technology under interference. In

- 
- Proceedings of the 13th EAI International Conference on Body Area Networks (pp. 147–156). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29897-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29897-5_12)
- Khoshelham, K., & Elberink, S. O. (2012). Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, 12(2), 1437-1454. <https://doi.org/10.3390/s120201437>
- Kidziński, Ł., Yang, B., Hicks, J. L., Rajagopal, A., Delp, S. L., & Schwartz, M. H. (2020). Deep neural networks enable quantitative movement analysis using single-camera videos. *Nature Communications*, 11, 4054. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17807-z>
- King, L. A., Mancini, M., Fino, P. C., Chesnutt, J., Swanson, C. W., Markwardt, S., & Chapman, J. C. (2017). Sensor-Based Balance Measures Outperform Modified Balance Error Scoring System in Identifying Acute Concussion. *Annals of biomedical engineering*, 45(9), 2135–2145. <https://doi.org/10.1007/s10439-017-1856-y>
- Kitchenham, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. Joint Technical Report, Keele University TR/SE-0401 and NICTA 0400011T.1, July 2004.
- Kitchenham B, Pearl Brereton O, Budgen D et al (2009) Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review. *Inf Softw Technol* 51:7–15. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
- Kleiner, A. F. R., Pacifici, I., Vagnini, A., Camerota, F., Celletti, C., Stocchi, F., De Pandis, M. F., & Galli, M. (2018). Timed Up and Go evaluation with wearable devices: Validation in Parkinson's disease. *Journal of bodywork and movement therapies*, 22(2), 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.07.006>
- Kolber, M. J., & Hanney, W. J. (2012). The reliability and concurrent validity of shoulder mobility measurements using a digital inclinometer and goniometer: a technical report. *International journal of sports physical therapy*, 7(3), 306–313.
- Kuiken, T. A., Amir, H., & Scheidt, R. A. (2004). Computerized biofeedback knee goniometer: acceptance and effect on exercise behavior in post-total knee

- arthroplasty rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 1026-1030. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.08.088>
- Lai, D.T.H., Palaniswami, M., & Begg, R. (Eds.). (2012). *Healthcare Sensor Networks: Challenges Toward Practical Implementation* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11195>
- Laidig, D., Müller, P., & Seel, T. (2017). Automatic anatomical calibration for IMU-based elbow angle measurement in disturbed magnetic fields. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 3, 167–170. <https://doi.org/10.1515/cdbme-2017-0035>
- Lee, J. K., Han, S. J., Kim, K., Kim, Y. H., & Lee, S. (2020). Wireless epidermal six-axis inertial measurement units for real-time joint angle estimation. *Applied Sciences*, 10, 2240. <https://doi.org/10.3390/app10072240>
- Lexell, J. E., & Downham, D. Y. (2005). How to Assess the Reliability of Measurements in Rehabilitation. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 84(9), 719. <https://doi.org/10.1097/01.phm.0000176452.17771.20>
- Li, J., Liu, X., Wang, Z., Zhao, H., Zhang, T., Qiu, S., Zhou, X., Cai, H., Ni, R., Cangelosi, A. (2022). Real-time human motion capture based on wearable inertial sensor networks. *IEEE Internet Things Journal*. 9, 8953–8966. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3119328>
- Li, W., & Wang, J. (2013). Effective Adaptive Kalman Filter for MEMS-IMU/Magnetometers Integrated Attitude and Heading Reference Systems. *Journal of Navigation*, 66(1), 99–113. <https://doi.org/10.1017/S0373463312000331>
- Lim, S. and D'Souza, C. (2020). A Narrative Review on Contemporary and Emerging Uses of Inertial Sensing in Occupational Ergonomics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102937>
- Lin, L. F., Lin, Y. J., Lin, Z. H., Chuang, L. Y., Hsu, W. C., & Lin, Y. H. (2018). Feasibility and efficacy of wearable devices for upper limb rehabilitation in patients with chronic stroke: a randomized controlled pilot study. *European*

---

journal of physical and rehabilitation medicine, 54(3), 388–396.

<https://doi.org/10.23736/S1973-9087.17.04691-3>

Lind, C., Abtahi, F. & Forsman, M. (2023). Wearable Motion Capture Devices for the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders in Ergonomics—An Overview of Current Applications, Challenges, and Future Opportunities. *Italian National Conference on Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s23094259>

Liu, L., Miguel Cruz, A., Rios Rincon, A., Buttar, V., Ranson, Q., & Goertzen, D. (2015). What factors determine therapists' acceptance of new technologies for rehabilitation – a study using the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). *Disability and Rehabilitation*, 37(5), 447-455.

<https://doi.org/10.3109/09638288.2014.923529>

Liu, L., Wang, H.-H., Qiu, S., Zhang, Y.-C., & Hao, Z.-D. (2021). Paddle stroke analysis for kayakers using wearable technologies. *Sensors*, 21, 914.

<https://doi.org/10.3390/s21030914>

Liu, R., Peng, L., Tong, L., Yang, K., Liu, B. (2018). The design of wearable wireless inertial measurement unit for body motion capture system. In: 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), pp. 557–562. <https://doi.org/10.1109/IISR.2018.8535742>

López-Nava, I.H., & Muñoz-Meléndez, A. (2016). Wearable Inertial Sensors for Human Motion Analysis: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 16(22), 7821–7834. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2609392>

Madgwick, S.O.H., Harrison, A.J.L., Vaidyanathan, R. (2011). Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 1–7.

<https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975346>

Mahadas, S., Mahadas, K., Hung, G.K. (2019). Biomechanics of the golf swing using OpenSim. *Comput. Biol. Med.* 105, 39–45.

<https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.12.002>

- 
- Mahony, R., Hamel, T., Pflimlin, J.-M. (2008). Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Trans. Autom. Control* 53, 1203–1218. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738>
- Maldonado, A., Realyvásquez, A., Hernandez, J., & García-Alcaraz, J. (2015). Ergonomic assessment for the task of repairing computers in a manufacturing company: A case study. *Work*, 52(2), 393–405. <https://doi.org/10.3233/WOR-152118>
- Maletsky, L. P., Sun, J., & Morton, N. A. (2007). Accuracy of an optical active-marker system to track the relative motion of rigid bodies. *Journal of Biomechanics*, 40(3), 682–685. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.01.017>
- Mancini, M., Chiari, L., Holmstrom, L., Salarian, A., & Horak, F. B. (2016). Validity and reliability of an IMU-based method to detect anticipatory postural adjustments prior to gait initiation. *Gait & Posture*, 43, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.08.015>
- Manghisi, V.M., Uva, A.E., Fiorentino, M., Bevilacqua, V., Trotta, G.F., & Monno, G. (2017). Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor. *Applied Ergonomics*, 65, 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.02.015>
- Manzur, M., & Hachiya, H. (2019). Uso de sensores inerciales como herramienta complementaria en estudios de puesto de trabajo en Chile, para la medición cuantitativa de movimiento repetitivo como factor de riesgo en la calificación de patologías músculo-esqueléticas de extremidades superiores. Asociación Chilena de Seguridad (ACHS). Obtenido en: [https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/default-document-library/210-2017\\_bni\\_hachi-manzur\\_sensores-para-mov-repetitivo\\_informe-final\\_150319.pdf?sfvrsn=9b326e05\\_0](https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/default-document-library/210-2017_bni_hachi-manzur_sensores-para-mov-repetitivo_informe-final_150319.pdf?sfvrsn=9b326e05_0)
- Martínez-Zarzuela, M., González-Alonso, J., Antón-Rodríguez, M., Díaz-Pernas, F. J., Müller, H., & Simón-Martínez, C. (2023a). Multimodal video and IMU kinematic dataset on daily life activities using affordable devices (VIDIMU) [Data set]. *Scientific Data*, 10(648), v1.1.0. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8210563>

- 
- Martínez-Zarzuela, M., González-Ortega, D., Antón-Rodríguez, M., Díaz-Pernas, F. J., Müller, H., & Simón-Martínez, C. (2023b). A comparative study on wearables and single-camera video for upper-limb out-of-the-lab activity recognition with different deep learning architectures. *Gait & Posture*, 106(Supplement 1), S119–S120.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2023.07.149>
- Maruyama, T., Toda, H., Ishii, W., Tada, M. (2020). Inertial measurement unit to segment calibration based on physically constrained pose generation. *SICE J. Control Measur. Syst. Integr.* 13 (3), 122–130.  
<https://doi.org/10.9746/jcmsi.13.122>
- Maurice, P., Malaisé, A., Amiot, C., Paris, N., Richard, G.-J., Rochel, O., Ivaldi, S. (2019). Human movement and ergonomics: an industry-oriented dataset for collaborative robotics. *Int. J. Robot. Res.* 38, 1529–1537.  
<https://doi.org/10.1177/0278364919882089>
- McAtamney, L., & Corlett, E.N. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
- Mehraban, S., Adeli, V., & Taati, B. (2023). *MotionAGFormer: Enhancing 3D human pose estimation with a Transformer-GCNFormer network*. arXiv.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.16288>
- Menolotto, M., Komaris, D.-S., Tedesco, S., O’Flynn, B., & Walsh, M. (2020). Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. *Sensors*, 20(19), 5687. <https://doi.org/10.3390/s20195687>
- Merriaux, P., Dupuis, Y., Boutteau, R., Vasseur, P., & Savatier, X. (2017). A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*, 17(7), 1591.  
<https://doi.org/10.3390/s17071591>
- Microsoft Corporation. (2013). Kinect v2 for Xbox One [Dispositivo de hardware]. Microsoft Corp. Redmond, WA. Recuperado de:  
<https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>

- 
- Miezial, M., Taetz, B., & Bleser, G. (2016). On inertial body tracking in the presence of model calibration errors. *Sensors*, 16, 1132.  
<https://doi.org/10.3390/s16071132>
- Moghadam, S. M., Yeung, T., & Choisne, J. (2023). A comparison of machine learning models' accuracy in predicting lower-limb joints' kinematics, kinetics, and muscle forces from wearable sensors. *Scientific Reports*, 13(1), 5046. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31906-z>
- Mousavi Hondori, H., & Khademi, M. (2014). A Review on Technical and Clinical Impact of Microsoft Kinect on Physical Therapy and Rehabilitation. *Journal of medical engineering*, 2014, 846514.  
<https://doi.org/10.1155/2014/846514>
- Muller, P., Begin, M.-A., Schauer, T., & Seel, T. (2017). Alignment-free, self-calibrating elbow angles measurement using inertial sensors. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 21, 312–319.  
<https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2639537>
- Mulrow, C. D. (1994). Rationale for systematic reviews. *BMJ (Clinical research ed.)*, 309(6954), 597–599. <https://doi.org/10.1136/bmj.309.6954.597>
- Musaloiu-E, R., & Terzis, A. (2008). Minimising the effect of WiFi interference in 802.15.4 wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 3, 43–54. <https://doi.org/10.1504/IJSNET.2008.016461>
- Narasimhappa, M., Mahindrakar, A. D., Guizilini, V. C., Terra, M. H., & Sabat, S. L. (2020). MEMS-based IMU drift minimization: Sage Husa adaptive robust Kalman filtering. *IEEE Sensors Journal*, 20, 250–260.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2941273>
- Neuderth, S., Schwarz, B., Gerlich, C., Schuler, M., Markus, M., & Bethge, M. (2016). Work-related medical rehabilitation in patients with musculoskeletal disorders: the protocol of a propensity score matched effectiveness study (EVA-WMR, DRKS00009780). *BMC Public Health*, 16, 804.  
<https://doi.org/10.1186/s12889-016-3437-7>
- NIOSH. (2024). *Acerca de la ergonomía y los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud

Ocupacional. Recuperado de

<https://www.cdc.gov/niosh/ergonomics/es/about/acerca-de-la-ergonomia-y-los-trastornos-musculoesqueleticos-relacionados-con-el-trabajo.html>

Niswander, W., Wang, W., Kontson, K. (2020). Optimization of IMU sensor placement for the measurement of lower limb joint kinematics. *Sensors* 20, 5993. <https://doi.org/10.3390/s20215993>

Nordic Semiconductor. (2005). NRF24L01 single chip 2.4 GHz transceiver product specification. Recuperado el 24 de febrero de 2021, de: <https://www.nordicsemi.com/Products/Nrf24-Series>

NVIDIA. (2021). NVIDIA Maxine AR SDK. Recuperado el 14 de octubre de 2024, de: <https://developer.nvidia.com/maxine/>

Oarde, D. E., Libatique, N. C., Tangonan, G. L., Sotto, D. M., & Pacaldo, A. T. (2014). Digital motion analysis system for rehabilitation using wearable sensors. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)* (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2014.7016235>

Omboni, S., Padwal, R. S., Alessa, T., Benczúr, B., Green, B. B., Hubbard, I., Kario, K., Khan, N. A., Konradi, A., Logan, A. G., Lu, Y., Mars, M., McManus, R. J., Melville, S., Neumann, C. L., Parati, G., Renna, N. F., Ryvlin, P., Saner, H., Schutte, A. E., & Wang, J. (2022). The worldwide impact of telemedicine during COVID-19: current evidence and recommendations for the future. *Connected Health and Telemedicine*, 1, 7–35. <http://dx.doi.org/10.20517/ch.2021.03>

OpenPose: Real-Time Multi-Person Keypoint Detection Library for Body, Face, and Hands Estimation. Available online: <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose> (accessed on 5 March 2018).

OptiTrack, Motion Capture for Movement Sciences, (n.d.). <http://www.optitrack.com/applications/movement-sciences/index.html> (accessed February 16, 2025).

- 
- O'Reilly, M., Caulfield, B., Ward, T., Johnston, W., & Doherty, C. (2018). Wearable inertial sensor systems for lower limb exercise detection and evaluation: A systematic review. *Sports Medicine*, 48, 1221–1246. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0878-4>
- Oxford Metrics Ltd. Vicon Trusted Motion Capture Systems for Life Sciences & Biomechanics (1984). uk registered no. 1801446. Recuperado el 27 de febrero de 2025, de <https://www.vicon.com/applications/life-sciences/>
- Özkaya, N., Nordin, M., Goldsheyder, D., & Leger, D. (2012). Fundamentals of biomechanics: *Equilibrium, motion, and deformation* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44738-4>
- Pagnon, D., Domalain, M., & Reveret, L. (2022). Pose2Sim: An End-to-End Workflow for 3D Markerless Sports Kinematics—Part 2: Accuracy. *Sensors*, 22(7), 2712. <https://doi.org/10.3390/s22072712>
- Panariello, D., Grazioso, S., Caporaso, T., Palomba, A., Di Gironimo, G., & Lanzotti, A. (2022). Biomechanical analysis of the upper body during overhead industrial tasks using electromyography and motion capture integrated with digital human models. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16, (733–752). <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00862-9>
- Panwar, M., Biswas, D., Bajaj, H., Jobges, M., Turk, R., Maharatna, K., & Acharyya, A. (2019). Rehab-Net: Deep learning framework for arm movement classification using wearable sensors for stroke rehabilitation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66, 3026–3037. <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2899927>
- Pau, M., Corona, F., Casula, C., Pili, R., Murgia, M., & Guicciardi, M. (2016). Use of three-dimensional gait analysis to assess the effectiveness of conventional rehabilitation protocols in people with Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, 22, e12. <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2015.10.523>
- Paulich, M., Schepers, M., Rudigkeit, N., & Bellusci, G. (2018). Xsens MTw Awinda: Miniature Wireless Inertial-Magnetic Motion Tracker for Highly

---

Accurate 3D Kinematic Applications (Technical report). Xsens.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23576.49929>

Pedraza-Hueso, M., Martín-Calzón, S., Díaz-Pernas, F. J., & Martínez-Zarzuela, M. (2015). Rehabilitation using Kinect-based games and virtual reality. *Procedia Computer Science*, 75, 161-168.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.233>

Pereira, A., Guimarães, V., & Sousa, I. (2017). Joint angles tracking for rehabilitation at home using inertial sensors: A feasibility study. In *Proceedings of the 11th EAI International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare* (pp. 146–154). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.

<https://doi.org/10.1145/3154862.3154888>

PhaseSpace Motion Capture – Infinite Possibilities, (n.d.). Recuperado el 27 de febrero de 2025, de <https://www.phasespace.com/>

Picerno, P., Viero, V., Donati, M., Triossi, T., Tancredi, V., & Melchiorri, G. (2015). Ambulatory assessment of shoulder abduction strength curve using a single wearable inertial sensor. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 52, 171–180. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2014.06.0146>

Plantard, P., Shum, H. P. H., Le Pierres, A. & Multon, F. (2017). Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. *Applied Ergonomics*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.10.015>

Ploderer, B., Fong, J., Withana, A., Klaic, M., Nair, S., Crocher, V., Vetere, F., & Nanayakkara, S. (2016). ArmSleeve: A patient monitoring system to support occupational therapists in stroke rehabilitation. En *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems (DIS '16)* (pp. 700–711). Association for Computing Machinery.

<https://doi.org/10.1145/2901790.2901799>

Poitras, I., Dupuis, F., Biemann, M., Campeau-Lecours, A., Mercier, C., Bouyer, L.J., & Roy, J.-S. (2019). Validity and Reliability of Wearable Sensors for Joint Angle Estimation: A Systematic Review. *Sensors*, 19(7), 1555.

<https://doi.org/10.3390/s19071555>

- 
- Porciuncula, F., Roto, A. V., Kumar, D., Davis, I., Roy, S., Walsh, C. J., & Awad, L. N. (2018). Wearable movement sensors for rehabilitation: A focused review of technological and clinical advances. *PM&R*, 10, S220–S232.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.06.013>
- Porras, D. C., Siemonsma, P., Inzelberg, R., Zeilig, G., & Plotnik, M. (2018). Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait: Systematic review. *Neurology*, 10–1212.  
<https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000005603>
- Qualisys, Motion capture – Mocap. Recuperado el 27 de febrero de 2025, de <https://www.qualisys.com/>
- Raghavendra, P., Sachin, M., Srinivas, P.S., Talasila, V. (2017). Design and development of a real-time, low-cost IMU based human motion capture system. In: *Computing and Network Sustainability: Proceedings of IRSCNS 2016*. Springer, Singapore, pp. 155–165. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3935-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3935-5_17)
- Rajagopal, A., Dembia, C.L., DeMers, M.S., Delp, D.D., Hicks, J.L., & Delp, S.L. (2016). Full-Body Musculoskeletal Model for Muscle-Driven Simulation of Human Gait. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(10), 2068–2079. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2586891>
- Rana, M., & Mittal, V. (2021). Wearable sensors for real-time kinematics analysis in sports: A review. *IEEE Sensors Journal*, 21, 1187–1207.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3019016>
- Ranavolo, A., Draicchio, F., Varrecchia, T., Silvetti, A., & Iavicoli, S. (2018). Wearable Monitoring Devices for Biomechanical Risk Assessment at Work: Current Status and Future Challenges—A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(9), 2001.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph15092001>
- Raptis, T. P., Passarella, A., & Conti, M. (2019). Data management in Industry 4.0: State of the art and open challenges. *IEEE Access*, 7, 97052–97093.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929296>

- 
- Redström, J. (2017). *Making design theory*. MIT Press.  
<https://doi.org/10.7551/mitpress/11160.001.0001>
- Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Larue, C., & Plamondon, A. (2017). Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 55, 609–619. <https://doi.org/10.1007/s11517-016-1537-2>
- Roldán Jiménez, C. (2017). *Estudio de la cinemática del miembro superior e inferior mediante sensores inerciales* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga]. Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga. Obtenido en: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/14954>
- Rosado, A.S., Baptista, J.S., Guilherme, M.N.H., Guedes, J.C. (2023). Economic impact of work-related musculoskeletal disorders—a systematic review. In: Arezes, P.M. et al. (Eds.), *Occupational and Environmental Safety and Health IV*, Springer International Publishing, Cham, pp. 599–613.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-12547-8\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12547-8_48)
- Russell, T. G., Buttrum, P., Wootton, R., & Jull, G. A. (2004). Rehabilitation after total knee replacement via low-bandwidth telemedicine: The patient and therapist experience. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 10(1\_suppl), 85–87. <https://doi.org/10.1258/1357633042614384>
- Russell, T. G. (2007). Physical rehabilitation using telemedicine. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 13(5):217–220.  
<https://doi.org/10.1258/135763307781458886>
- Salisu, S., Ruhaiyem, N.I.R., Eisa, T.A.E., Nasser, M., Saeed, F., & Younis, H.A. (2023). Motion Capture Technologies for Ergonomics: A Systematic Literature Review. *Diagnostics*, 13(15), 2593.  
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13152593>
- Sánchez Manchola, M. D., Bernal, M. J. P., Munera, M., & Cifuentes, C. A. (2019). Gait phase detection for lower-limb exoskeletons using foot motion data from a single inertial measurement unit in hemiparetic individuals. *Sensors*, 19, 2988. <https://doi.org/10.3390/s19132988>

- Schall, M., Fethke, N., Chen, H., Oyama, S. & Douphrate, D. (2016). Accuracy and repeatability of an inertial measurement unit system for field-based occupational studies. *Ergonomics*.  
<https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1079335>
- Schenk, P., Colombo, G., Maier, I. (2013). New Technology in Rehabilitation: Possibilities and Limitations. In: Pons, J., Torricelli, D., Pajaro, M. (eds) *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation. Biosystems & Biorobotics*, vol 1. Springer, Berlin, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-34546-3\\_157](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34546-3_157)
- Schlagenhauf, F., Sreeram, S., & Singhose, W. (2018, June). Comparison of kinect and vicon motion capture of upper-body joint angle tracking. In 2018 IEEE 14th international conference on control and automation (ICCA) (pp. 674-679). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2018.8444349>
- Sers, R., Forrester, S., Moss, E., Ward, S., Ma, J., & Zecca, M. (2020). Validity of the Perception Neuron inertial motion capture system for upper body motion analysis. *Measurement*, 149, 107024.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107024>
- Seth, A., Hicks, J. L., Uchida, T. K., Habib, A., Dembia, C. L., Dunne, J. J., Ong, C. F., DeMers, M. S., Rajagopal, A., Millard, M., Hamner, S. R., Arnold, E. M., Yong, J. R., Lakshminanth, S. K., Sherman, M. A., Ku, J. P., & Delp, S. L. (2018). OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement. *PLoS Computational Biology*, 14(7), e1006223. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006223>
- Silva, A.S. (2014). wearable sensors systems for human motion analysis: sports and rehabilitation. Universidade do Porto (Portugal) ProQuest Dissertations & Theses. 27720234.
- Silva, C. C., Silva, A., Sousa, A., Pinheiro, A. R., Bourlinova, C., Silva, A., Salazar, A., Borges, C., Crasto, C., Correia, M. V., Vilas-Boas, J. P., & Santos, R. (2014). Co-activation of upper limb muscles during reaching in post-stroke subjects: an analysis of the contralesional and ipsilesional limbs. *Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society*

---

*of Electrophysiological Kinesiology*, 24(5), 731–738.

<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.04.011>

Slade, P., Habib, A., Hicks, J.L., Delp, S.L. (2022). An open-source and wearable system for measuring 3D human motion in real-time. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 69, 678–688. <https://doi.org/10.1109/TBME.2021.3103201>

<https://doi.org/10.1109/TBME.2021.3103201>

Stanzani, R., Dondero, P., Mantero, A., Testa, M. (2020). Measurement accuracy of an upper limb tracking system based on two hillcrest labs BNO080 IMU sensors: an environmental assessment. *IEEE Sens. J.* 20, 10267–10274.

<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2992733>

Stringer, E. T. (2007). *Action research* (3.<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications. ISBN 978-1-4129-5223-1.

Swann C (2002) Action research and the practice of design. *Design Issues*. 18 (1):

49–61. <https://doi.org/10.1162/07479360252756287>

Swinnen, E., Beckwée, D., Meeusen, R., Baeyens, J.-P., & Kerckhofs, E. (2014). Does Robot-Assisted Gait Rehabilitation Improve Balance in Stroke Patients? A Systematic Review. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 21(2), 87-100.

<https://doi.org/10.1310/tsr2102-87>

Taylor, L., Miller, E., Kaufman, K.R. (2017). Static and dynamic validation of inertial measurement units. *Gait & Posture*, 57, 80–84.

<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.05.026>

Tognetti, A., Lorussi, F., Bartalesi, R., Quaglini, S., Tesconi, M., Zupone, G., & De Rossi, D. (2005). Wearable kinesthetic system for capturing and classifying upper limb gesture in post-stroke rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2, 8. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-8>

Valero, E., Sivanathan, A., Bosché, F., & Abdel-Wahab, M. (2016).

Musculoskeletal disorders in construction: A review and a novel system for activity tracking with body area network. *Applied Ergonomics*, 54, 120–130.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.11.020>

Van Crombrugge, I., Sels, S., Ribbens, B., Steenackers, G., Penne, R., &

Vanlanduit, S. (2022). Accuracy Assessment of Joint Angles Estimated from

---

2D and 3D Camera Measurements. *Sensors*, 22(5), 1729.

<https://doi.org/10.3390/s22051729>

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*.

CreateSpace, Scotts Valley, CA. ISBN:978-1-4414-1269-0

Vargas-Valencia, L.S., Elias, A., Rocon, E., Bastos-Filho, T., Frizera, A. (2016).

An IMU-to-body alignment method applied to human gait analysis. *Sensors*

16, 2090. <https://doi.org/10.3390/s16122090>

Vignais, N., Miezal, M., Bleser, G., Mura, K., Gorecky, D., Marin, F. (2013).

Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. *Appl. Ergon.* 44, 566–574.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.11.008>

Vignais, N., Bernard, F., Touvenot, G., & Sagot, J.-C. (2017). Physical risk factors identification based on body sensor network combined to videotaping. *Applied Ergonomics*, 65, 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.003>

Vijayakumar, J., & Choi, J. (2022). Emerging Trends of Ergonomic Risk

Assessment in Construction Safety Management: A Scientometric

Visualization Analysis. *International Journal of Environmental Research and*

*Public Health*, 19(23), 16120. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316120>

Vivas Albán, O., Valencia Chacón, D., Quijano Guzmán, K., & Bonett, V. (2020).

Estimación de la cinemática de las articulaciones de miembro inferior por medio del filtro de Kalman extendido. *INGE CUC*, 16(1), 252–266.

<https://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.19>

Vogelsang, K., Liere-Netheler, K., Packmohr, S., & Hoppe, U. (2019). Barriers to digital transformation in manufacturing: development of a research agenda.

Recuperado de: [https://aisel.aisnet.org/hicss-52/in/digital\\_transformation/3/](https://aisel.aisnet.org/hicss-52/in/digital_transformation/3/)

Walmsley, C. P., Xu, W., Ortega-Sanchez, C., Campbell, A., Imms, C., Elliott, C., & Williams, S. A. (2019). Validation of custom wearable sensors to measure angle kinematics: A technical report. *Health Technology*, 9, 887–892.

<https://doi.org/10.1007/s12553-019-00360-1>

- 
- Wang, Q., Markopoulos, P., Yu, B., Chen, W., & Timmermans, A. (2017). Interactive wearable systems for upper body rehabilitation: a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 14(1), 20.
- Wang, W., & Adamczyk, P. G. (2019). Analyzing gait in the real world using wearable movement sensors and frequently repeated movement paths. *Sensors*, 19, 1925. <https://doi.org/10.3390/s19081925>
- Weygers, I., Kok, M., Konings, M., Hallez, H., De Vroey, H., & Claeys, K. (2020). Inertial sensor-based lower limb joint kinematics: A methodological systematic review. *Sensors*, 20, 673. <https://doi.org/10.3390/s20030673>
- Whelan, D., O'Reilly, M., Ward, T., Delahunt, E., & Caulfield, B. (2015). Evaluating performance of the single leg squat exercise with a single inertial measurement unit. In *Proceedings of the 3rd 2015 Workshop on ICTs for improving Patients Rehabilitation Research Techniques* (pp. 144–147). ACM. <https://doi.org/10.1145/2838944.2838979>
- Windolf, M., Götzen, N., & Morlock, M. (2008). Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems—Exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics*, 41(12), 2776–2780. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.06.024>
- Wittmann, F., Lambercy, O., & Gassert, R. (2019). Magnetometer-based drift correction during rest in IMU arm motion tracking. *Sensors*, 19, 1312. <https://doi.org/10.3390/s19061312>
- Wu, G., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J. (DirkJan), Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A. R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F. W., & Buchholz, B. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042>
- Wüest, S., Massé, F., Aminian, K., Gonzenbach, R., & de Bruin, E. D. (2016). Reliability and validity of the inertial sensor-based timed “Up and Go” test in individuals affected by stroke. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 53, 599–610. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2015.04.0065>

- Xsens Technologies. (2016). MTw Awinda User Manual (Document No. MW0502P). Recuperado el 20 de diciembre de 2022, de: [https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/Manuals/MTw\\_Awinda\\_User\\_Manual.pdf](https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/Manuals/MTw_Awinda_User_Manual.pdf)
- Xsens Technologies. (2020). Movella DOT. Recuperado el 30 de junio de 2021, de: <https://www.xsens.com/xsens-dot>
- Yang, P., Xie, L., Wang, C., & Lu, S. (2019). IMU-Kinect: A motion sensor-based gait monitoring system for intelligent healthcare. In Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp/ISWC '19) (pp. 350–353). London, UK. <https://doi.org/10.1145/3341162.3343766>
- Zhang, S., Xiao, K., Zhang, Q., Zhang, H., & Liu, Y. (2013). Improved extended Kalman fusion method for upper limb motion estimation with inertial sensors. In Proceedings of the 2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP) (pp. 587–593). Beijing, China. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2013.6568143>
- Zhang, Z. (2012). Microsoft Kinect sensor and its effect. IEEE MultiMedia, 19(2), 4-10. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2012.24>
- Zhou, H., & Hu, H. (2010). Reducing drifts in the inertial measurements of wrist and elbow positions. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59, 575–585. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2025065>
- Zhou, L., Tunca, C., Fischer, E., Brahms, C. M., Ersoy, C., Granacher, U., & Arnrich, B. (2020). Validation of an IMU gait analysis algorithm for gait monitoring in daily life situations. In Proceedings of the 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (pp. 4229–4232). Montreal, QC, Canada. <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9176827>
- Zhu, W., Ma, X., Liu, Z., Liu, L., Wu, W., & Wang, Y. (2023). MotionBERT: A unified perspective on learning human motion representations. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2210.06551>

Zucchi, B., Mangone, M., Agostini, F., Paoloni, M., Petriello, L., Bernetti, A., Santilli, V., & Villani, C. (2020). Movement analysis with inertial measurement unit sensor after surgical treatment for distal radius fractures. *BioResearch*, 9, 151–161. <https://doi.org/10.1089/biores.2019.0035>