

# Desarrollo de soluciones formativas innovadoras en el campo de la valoración funcional centrada en la actualización del currículo de las facultades de ciencias de la salud



## FUNDAMENTOS DE LA BIOMECÁNICA

### Unidad didáctica D: TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS INSTRUMENTAL DE MOVIMIENTO Y FUERZAS

D.1. ¿Cómo se pueden medir los movimientos y qué parámetros se pueden analizar? ¿Cuáles son sus principales aplicaciones?



## Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2. SISTEMAS DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO BASADOS EN IMÁGENES	4
Sistemas basados en marcadores.....6	
Equipo óptico de estereofotogrametría 3D .....6	
Equipo de análisis de movimiento 2D .....8	
Equipo basado en realidad aumentada (RA) ..... 10	
Sistemas sin marcadores..... 12	
3. SISTEMAS INERCIALES	15
4. OTROS	18
Goniómetro..... 18	
Inclinómetros ..... 19	
GPS 21	
5. PRINCIPALES ÁREAS DE APLICACIÓN	23
Entorno clínico.....23	
Deportes .....23	
Ergonomía.....24	
6. EJEMPLOS	25
Caracterización de patologías.....25	
Valoración funcional .....26	
Selección de equipamiento Deportivo .....27	
Evaluación de técnicas deportivas.....28	
Caracterización de las tareas laborales .....30	
Evaluación de dispositivos de ayuda externa .....31	

7. IDEAS CLAVE	33
8. REFERENCIAS	34

## 1. Introducción y objetivos

Recuerda que la cinemática o análisis de movimiento combina conocimientos de diferentes metodologías con el fin de obtener variables cualitativas y cuantitativas y describir el movimiento independientemente de las fuerzas que lo generen.

Los equipos utilizados en el estudio de la biomecánica del movimiento humano ha experimentado grandes avances en los últimos tiempos, desde anotaciones manuales en fotografías hasta sistemas de seguimiento óptico basados en marcadores, sistemas basados en sensores inerciales y sistemas de análisis sin marcadores que utilizan modelos sofisticados, visión artificial y algoritmos complejos de aprendizaje automático [1].

Los sistemas de análisis de movimiento han evolucionado en paralelo a las demandas de áreas como la animación para videojuegos o el cine, desarrollando herramientas más rápidas y potentes para llevar la evaluación biomecánica clínica y deportiva más allá de la investigación de laboratorio.

Los **objetivos** de esta unidad didáctica se centran en:

- Los principales grupos de técnicas de análisis del movimiento.
- Comprender cómo funcionan y la información que brindan.
- Sus principales ventajas y desventajas.
- Presentar las áreas donde se utilizan técnicas instrumentales cinemáticas para el análisis de movimiento.
- Algunos ejemplos de uso y sistemas basados en estas técnicas instrumentales.

Para facilitar el estudio se incluye una clasificación general en función del tipo de sensor o dispositivo utilizado (Figura 1).

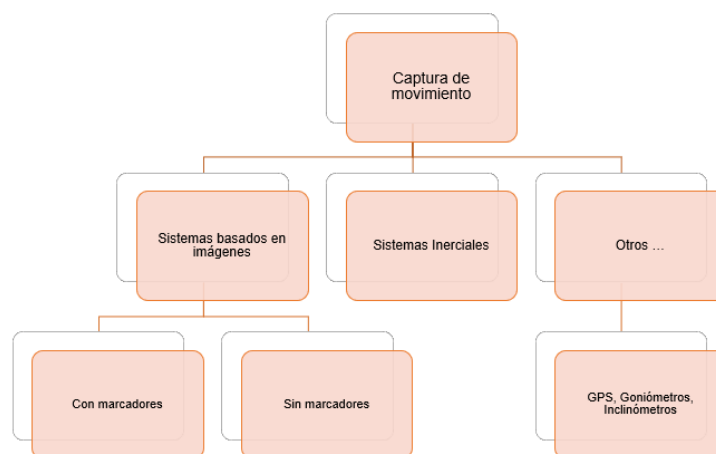


Figure 1 – Clasificación de los sistemas de análisis del movimiento.

## 2. Sistemas de análisis de movimiento basados en imágenes

Desde la introducción del análisis de movimiento en la evaluación biomecánica, los métodos más extendidos se basan en sistemas ópticos, que estudian el objeto a medir utilizando herramientas que registran imágenes.

Los sistemas de análisis de movimiento basados en imágenes se consideran actualmente el estándar de oro en el estudio biomecánico de los movimientos, incluidas las funciones y actividades humanas. Estos sistemas ópticos, basados en diferentes tipos de cámaras, extraen la información necesaria de imágenes o videos secuenciales para describir el movimiento que se produce. Dicha información se extrae utilizando diferentes métodos de procesamiento de señales, dependiendo del equipo.

La tecnología óptica para el análisis de movimiento utiliza cámaras e iluminación especialmente configuradas para el sistema utilizado para observar el objeto que se evalúa de forma sencilla. Los datos para rastrear su desplazamiento en el tiempo se pueden obtener identificando puntos o marcadores que representan el objeto a través de imágenes consecutivas.

La estimación de la posición (3D) y la orientación (3D) son las principales variables que requiere un sistema óptico para establecer los 6 grados de libertad (DoF) o la pose de un objeto. Estas variables, junto con otras extraídas del estudio cinemático como la velocidad y la aceleración, nos permiten estudiar el movimiento del cuerpo o sus segmentos de forma independiente, o en interacción con objetos y / o entornos a lo largo del tiempo.

La frecuencia de adquisición y la resolución de imagen de los sistemas son características fundamentales para extraer las variables cinemáticas que estudian el desplazamiento de los segmentos; también influyen en la selección de los movimientos a estudiar y la precisión de los resultados.

Debido a la complejidad del cuerpo humano por sus múltiples articulaciones, la rigidez parcial de sus segmentos, etc., el estudio biomecánico se basa en modelos cinemáticos, que son simplificaciones más o menos complejas para analizar el movimiento. Los modelos de estudio se crean colocando marcadores en puntos anatómicos específicos según un protocolo establecido que depende del área o segmento anatómico o del movimiento a analizar [2].

En 1973, se estableció la Sociedad Internacional de Biomecánica (ISB) con el objetivo de promover el estudio de la biomecánica <https://isbweb.org/>. Desde 1990, la ISB ha trabajado para proporcionar recomendaciones para la estandarización en la presentación de informes de datos de análisis de movimiento. Estas propuestas de estándares están relacionadas con la definición de sistemas de coordenadas globales, articulares y de orientación, así como modelos de diferentes articulaciones y segmentos corporales.

Cuando la información sobre un movimiento ocurre en un plano (2D), normalmente se utilizan modelos más simples con una sola cámara (vista monocular). Cuando los movimientos son más complejos y ocurren en varios planos (3D), se requiere un modelo más complejo y un sistema multicámara (vista múltiple), donde el marcador es colocado y seguido por múltiples

cámaras. Se recomienda que al menos tres cámaras ubiquen un marcador para realizar una reconstrucción 3D robusta a partir de la información obtenida por cada cámara.

La reconstrucción en 3D de un movimiento por parte de un equipo que usa múltiples vistas es más precisa que si solo se usa una cámara para reconstruir esta información basada en datos de un solo plano.

Otra diferencia entre realizar un análisis 2D o 3D es la generación de procesos más complejos de calibración y reconstrucción de coordenadas, así como la definición de los ángulos articulares [1].

Los procesos que componen estos sistemas se pueden establecer de la siguiente manera (Figura 2):

- Calibración. Para calcular los parámetros de ajuste se utiliza un sistema de referencia cuya geometría y dimensiones son conocidas.
- Detección (digitalización). Identificación de los puntos que definen el modelo seleccionado.
- Seguimiento. El seguimiento lo realizan las cámaras durante el movimiento a analizar. Durante toda la grabación, los puntos o marcadores definidos no deben ocultarse a las cámaras para evitar problemas en la siguiente fase.
- Reconstrucción. Las referencias utilizadas para crear el modelo biomecánico se identifican en las imágenes grabadas y sus posiciones se obtienen en un sistema de coordenadas 3D.
- Análisis. Tratamiento de la información obtenida previamente para extraer las variables definidas.



Figura 2 – Diagrama de los procesos involucrados en el uso de sistemas ópticos.

Los sistemas que procesan información de varias cámaras generalmente requieren un entorno controlado, mayor potencia de procesamiento e infraestructura costosa, como laboratorios de análisis de movimiento, mientras que los sistemas de análisis 2D son más versátiles y menos costosos. La selección del equipo depende de las variables y la presión necesaria para el movimiento a estudiar.

Esta unidad didáctica clasifica los equipos ópticos en dos grandes grupos en función de si utilizan o no **marcadores físicos** para identificar referencias, puntos u objetos que permitan establecer un modelo para reconstruir el movimiento en 2D o 3D.

## Sistemas basados en marcadores

### Equipo óptico de estereofotogrametría 3D

Este equipo suele estar formado por un conjunto de **cámaras** que cubren el espacio donde se produce el movimiento desde diferentes perspectivas, y el **software de análisis**.

La ubicación de las cámaras es fundamental para identificar los marcadores ubicados en el sujeto o en el objeto. El ángulo y la distancia entre las cámaras, su posición en relación entre sí (paralaje), en relación con el objeto estudiado, etc., así como la frecuencia de adquisición y la resolución de las cámaras, todas son condiciones esenciales para identificar de manera eficiente los marcadores, evitando que, por ejemplo, se oculten y se pierdan en las grabaciones realizadas. De esta forma, se establecen las condiciones óptimas para extraer las coordenadas espaciales de los marcadores, definir el modelo para el estudio y extraer las variables determinadas.

Para ello, cada cámara recopila información sobre la posición del marcador o marcadores que se encuentran dentro de su campo de visión y establece su posición en un sistema de referencia local de la propia cámara. Esto sería suficiente para realizar un análisis bidimensional. No obstante, si se desea obtener información tridimensional, la información extraída de cada cámara se integra mediante técnicas de estereofotogrametría que nos permiten reconstruir las coordenadas del marcador en 3D, estableciendo su posición y orientación en un sistema de referencia global. A partir de esta información se pueden obtener variables como los ángulos entre segmentos definidos en el modelo de marcadores (Figura 3).

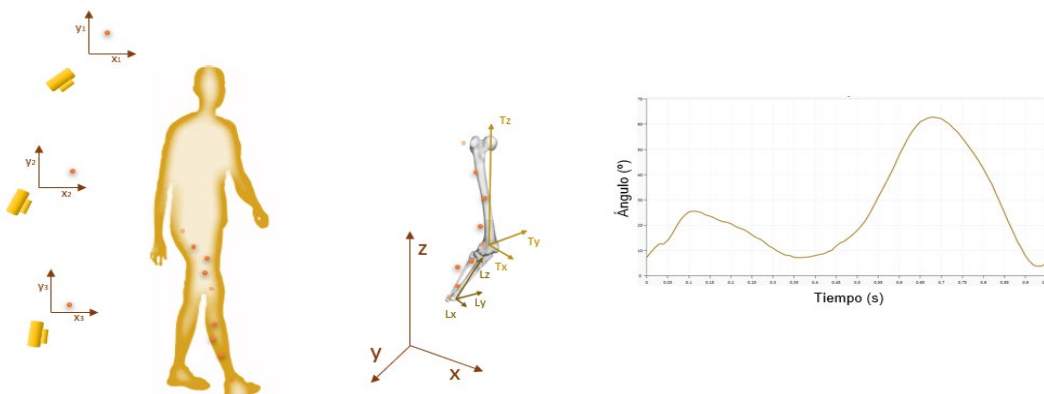


Figura 3 – Adquisición del ángulo de la rodilla durante la marcha mediante un sistema óptico de estereofotogrametría 3D.

Los marcadores utilizados en estos sistemas pueden ser **activos**, basados, por ejemplo, en luz LED, o **pasivos**, como esferas recubiertas con material reflectante [3] que devuelven la luz reflejada al sensor de la cámara. La ventaja de los marcadores activos sobre los pasivos es que pueden proporcionar mediciones más robustas, pero su desventaja es que necesitan baterías y cables, que pueden interferir con la libertad del sujeto para realizar movimientos específicos. Además, la frecuencia de muestreo de las cámaras disminuye cuando se utiliza



un conjunto de marcadores múltiples porque la señal de cada marcador necesita su propia frecuencia para ser identificada individualmente [4].

En el caso de los marcadores reflectantes, cada cámara tiene un foco de luz infrarroja (IR) que emiten sobre su campo de visión. De esta forma, la luz emitida rebota en los marcadores y es captada por el sensor de la cámara. Estos sensores tienen filtros que rechazan la luz natural y recogen solo la radiación IR dispersada por los marcadores. En este caso, el sensor de la cámara detecta un punto blanco en cada marcador detectado, cuyo diámetro depende del tamaño del marcador, la distancia de la persona al marcador, la resolución del sensor, etc. El sistema utiliza el centroide (punto central) de este punto blanco para determinar los cálculos necesarios y la posición del marcador en relación con el sensor. Los modelos utilizados pueden constituir uno o varios segmentos o todo el cuerpo según el propósito del análisis.

Estos sistemas pueden alcanzar frecuencias que van desde 100 Hz o fotogramas por segundo (fps) hasta 500 fps; sin embargo, cuanto mayor es la frecuencia, menor es la resolución, lo que puede afectar la correcta identificación de los marcadores y el cálculo de las variables. La selección de la frecuencia de adquisición depende, por ejemplo, de la velocidad del movimiento evaluado. Cuanto más rápido es el movimiento, más eventos ocurren en períodos de tiempo más cortos; por esa razón, si desea recopilar toda la información, debe aumentar la frecuencia de captura. Como ejemplo, para analizar un movimiento de swing de golf, se necesita una frecuencia de 250 Hz, mientras que la marcha humana a velocidad normal se puede estudiar a 100 Hz sin perder ningún evento del movimiento.

Puede encontrar ejemplos de estos sistemas de análisis en el mercado, como Vicon <https://www.vicon.com/software/nexus/>; BTS Bioengineering <https://www.btsbioengineering.com/products/smart-dx-motion-capture/>; STT Systems <https://www.stt-systems.com/motion-analysis/3d-optical-motion-capture/>; Kinescan/IBV <http:// analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/kinescan-ibv.html>, Qualysis <https://www.qualisys.com/software/qualisys-track-manager/>; etc.

## Parámetros

Los parámetros extraídos del cálculo de las **posiciones** y **orientación** de los segmentos y que se utilizan comúnmente en el análisis cinemático con estos sistemas son: **ángulos relativos** entre segmentos y **ángulos absolutos** en relación al sistema de referencia, sus **velocidades** y **aceleraciones lineales** y **angulares**, así como **distancias** y **longitudes**. La información cinemática combinada con la información extraída del análisis de fuerzas también nos permite dibujar parámetros como los **momentos** externos e internos que ocurren en las articulaciones.

## Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de estos sistemas son su **precisión** (recuerde que son el estándar de oro actual en análisis de movimiento) y su **flexibilidad** para definir modelos que analicen múltiples segmentos y articulaciones en 3D [5].

Algunas de las limitaciones de estos sistemas radican en el hecho de que los marcadores pueden **ocultarse** o **perdersse**, su **sensibilidad a las condiciones de iluminación ambiental** (como cambios en la luz natural en exteriores), el **artefacto** introducido por los marcadores



colocados en tejidos blandos como la piel en movimientos dinámicos, **errores** en la **colocación** de los marcadores, el tiempo necesario para instrumentarlos o **la influencia en la ejecución** de un movimiento por la posición de los marcadores en el cuerpo de la persona evaluada.

Sin embargo, la constante evolución de estos sistemas ha reducido los problemas relacionados, por ejemplo, con los efectos de la luz al introducir mejoras en los filtros de los sensores; o los efectos de los tejidos blandos mediante procedimientos de calibración anatómica que también permiten eliminar algunos marcadores durante la realización de los movimientos a analizar [1].

Los estrictos protocolos de instrumentación ayudan a mejorar la confiabilidad de los resultados en estudios donde las mediciones se realizan en diferentes días o por diferentes examinadores.

## Equipo de análisis de movimiento 2D

Los sistemas de análisis de movimiento 2D se utilizan comúnmente cuando el movimiento a evaluar no es complejo y la información relevante ocurre en un plano de movimiento, cuando la evaluación se realiza en un ambiente al aire libre o de campo, cuando la evaluación no requiere una alta precisión en las variables. extraído, etc.

Estos sistemas constan de una sola cámara, posicionada hacia el espacio de medición, y software de análisis.

Para garantizar una posición y un ángulo correctos de la cámara, es importante considerar una serie de factores como el área de grabación, la posición de la cámara en relación con el plano de medición, los parámetros de distancia focal y apertura del sensor de la cámara, la velocidad de grabación, etc. Los marcadores colocados sobre la persona evaluada deben ser visibles, como en los sistemas tradicionales de captura de infrarrojos, para que el sistema pueda rastrear los marcadores a lo largo de la grabación.

La precisión de este equipo depende de varios factores, principalmente los relacionados con el establecimiento de referencias (puntos de control) para calibrar las medidas y las distorsiones de las lentes de las cámaras a las que están sometidas las imágenes de vídeo.

La principal fuente de error asociada con las lentes es la distorsión radial. Esta distorsión provoca el conocido efecto ojo de pez, que disminuye la precisión cuando las líneas de referencia están en la periferia de la imagen. Para reducir este problema, se proponen una serie de acciones para mejorar las mediciones:

- Las líneas de referencia deben estar en el mismo plano que la imagen.
- El plano donde se realiza el movimiento debe ser perpendicular al eje de la cámara (Figura 4).
- La identificación de los segmentos de referencia y los segmentos a medir deben ubicarse cerca del centro de la imagen; del mismo modo, los segmentos a medir deben estar cerca de los segmentos de referencia.

- No realice ajustes de zoom o vista panorámica para identificar diferentes segmentos.

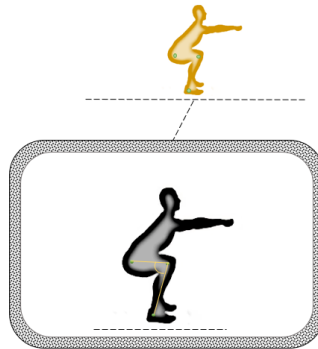


Figura 4 – Ejemplo de posicionamiento perpendicular de la cámara en relación al plano de ejecución de un movimiento de sentadilla, ubicado en el centro de la imagen.

Normalmente, los puntos asociados a los marcadores instrumentados en el sujeto se identifican manualmente en la imagen inicial del movimiento estudiado. Algunos de estos programas de software pueden rastrearlos automáticamente, estableciendo su posición en las diferentes secuencias del video para extraer las medidas relacionadas. Sin embargo, también se permite el reconocimiento manual secuencial en aquellos casos en los que no sea aconsejable o posible colocar marcadores en la persona a evaluar.

Hay algunos ejemplos en el mercado de estos sistemas de análisis como Kinovea <https://www.kinovea.org/> o TEMPLO [https://www.contemplas.com/motion\\_analysis\\_templo.aspx](https://www.contemplas.com/motion_analysis_templo.aspx).

### Parámetros

Los principales parámetros de estudio extraídos de estos sistemas se estiman mediante el cálculo de la posición de los marcadores o segmentos definidos e incluyen **velocidad y aceleración lineal y/o angular, distancias, desplazamientos y ángulos relativos y absolutos** de segmentos o articulaciones.

### Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son: su **accesibilidad**, ya que solo necesitan una cámara, un trípode y un ordenador con el software de análisis (que en muchos casos es gratuito); su **portabilidad**, ya que las evaluaciones pueden realizarse fuera del laboratorio; y la información que brindan, especialmente en el análisis de movimientos simples que ocurren en un plano de movimiento, donde se puede extraer información relevante sin necesidad de una gran precisión.

En cuanto a sus inconvenientes, algunos factores inciden en la **fiabilidad y precisión** de las medidas obtenidas en los sistemas que se utilizan fuera de un ambiente controlado, como la influencia del examinador en la **instrumentación y montaje del sistema**, el hecho de que la avería de un movimiento **en planos 2D** puede provocar errores en las mediciones de ángulos, problemas asociados con las lentes, etc.

En resumen, un sistema de análisis 3D proporciona más precisión y mediciones de volumen, pero es más caro y complejo; sin embargo, un sistema 2D tiene la ventaja de la portabilidad (por ejemplo, para pruebas de campo), además de ser económico y fácil de usar.

### Equipo basado en realidad aumentada (RA)

La realidad aumentada (RA) es una técnica que utiliza visión artificial, procesamiento de imágenes y computación gráfica para agregar contenido digital al mundo físico, brindando interacción en tiempo real [6], visualización y manejo de objetos reales y virtuales.

Esta técnica reconoce marcas o características de la imagen real que se utilizan como coordenadas para superponer o proyectar objetos virtuales en 2D o 3D. La RA puede utilizar objetos o marcadores como marcadores de referencia o características específicas de la imagen real para obtener esta proyección. El rastreo de marcadores de referencia rectangulares es una de las soluciones de rastreo más utilizadas para aplicaciones de video RA [7] (Figura 5).

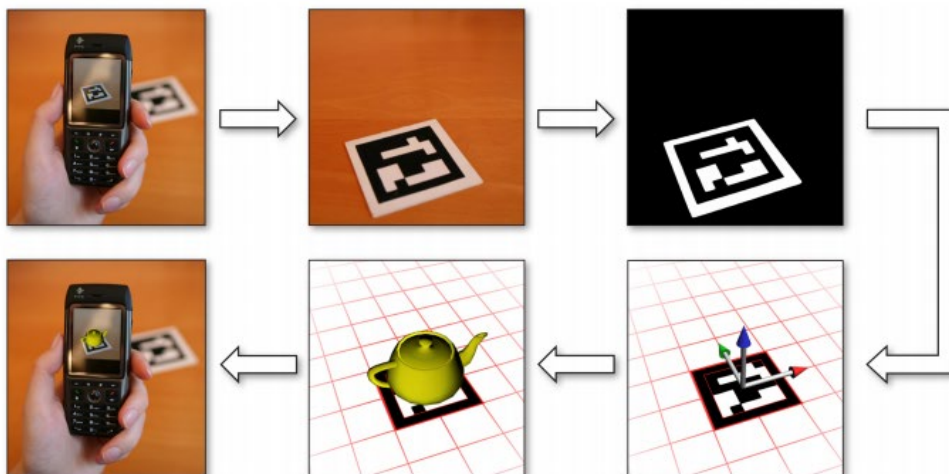


Figura 5 – Diagrama de trabajo básico de una aplicación RA (ARToolKitPlus) para detectar y representar la posición de un objeto en 3D desde una cámara; imagen de Wagner et al. [7].

Esta tecnología se basa en la homografía o geometría proyectiva, que determina una correspondencia entre figuras geométricas planas y estudia las relaciones entre figuras tridimensionales en el espacio y su proyección en un plano. RA utiliza este principio para identificar las rotaciones y traslaciones (cinemática 3D) de un marcador RA relacionado con el punto de enfoque de la cámara y con el plano de la imagen basándose en la forma en que aparecen las esquinas del marcador en la imagen grabada [8]. La principal diferencia entre RA y otros sistemas de procesamiento es que, en RA, los objetos se giran y se mueven en coordenadas 3D en lugar de usar una imagen 2D.

Un sistema RA simple generalmente consta de una cámara, una unidad computacional y una pantalla [6]. Funciona capturando la imagen con la cámara, detectando el marcador e infiriendo la ubicación y orientación de la cámara para proyectar el objeto virtual sobre la imagen real y mostrar el resultado.

La precisión de estos sistemas para estimar la ubicación y orientación de los marcadores depende principalmente de la calibración de la cámara, que básicamente consiste en eliminar

las distorsiones ópticas y configurar la resolución de las imágenes y el tamaño del marcador en píxeles.

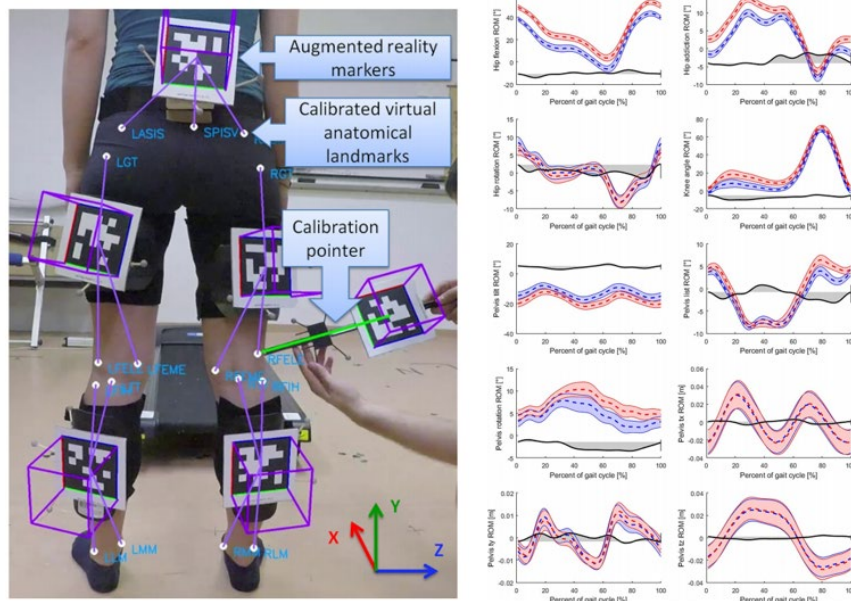


Figura 6 – Izquierda: conjunto de marcadores RA utilizados para extraer información cinemática de los miembros inferiores y comparación de las trayectorias de los ángulos del sistema RA (rojo) y del sistema de análisis de movimiento Optitrack® (azul); derecha: imágenes de Nagymáté et al. [8].

Este equipo se utiliza principalmente en procesos de rehabilitación, debido a la capacidad de interactuar con el usuario, o como sistemas de captura de movimiento. El estudio de Nagymáté et al. [8] propone y valida un sistema de análisis de la marcha asequible en comparación con los sistemas de fotogrametría 3D tradicionales basados en una sola cámara y un conjunto de marcadores de realidad aumentada (RA). Los marcadores RA se colocan en los segmentos a medir (Figura 6) asegurando que sean visibles para la cámara durante toda la captura del movimiento, en este caso, el ciclo de la marcha. Los resultados de los parámetros espacio-temporales y angulares de la marcha se compararon con los resultados obtenidos mediante un sistema óptico de análisis de movimiento 3D.

### Parámetros

Los principales parámetros que proporciona este equipo se extraen después de obtener la posición y orientación del segmento a evaluar a través de los marcadores RA, como en el caso de los sistemas ópticos a través del modelo de marcador que define el segmento. Estos parámetros incluyen los parámetros espacio-temporales, rango de articulación, velocidad, aceleración, etc..

### Ventajas y desventajas

Esta tecnología permite interactuar con diferentes entornos u objetos en tiempo real además de registrar variables cinemáticas asociadas a una actividad, lo que facilita objetivos o tareas relacionadas con procesos de formación o rehabilitación.

El seguimiento basado en marcadores RA puede funcionar con una sola cámara, aunque la captura de movimiento puede limitarse a una sola dirección o en el espacio para que la resolución del equipo pueda procesar la imagen con precisión.

## Sistemas sin marcadores

Los avances actuales en la evaluación del movimiento se centran en el desarrollo de sistemas totalmente automatizados que no utilizan marcadores adheridos al cuerpo. El procesamiento de imágenes computarizado de estos sistemas reconstruye el movimiento a partir de un video o un sensor óptico, de manera que el sujeto no tiene que usar ningún tipo de marcador de seguimiento [3]. Con ello se mejorará la investigación y la práctica sanitaria en diferentes áreas como el ámbito clínico y el deportivo.

Los sistemas más recientes utilizan cámaras estereográficas que imitan la visión binocular humana, o cámaras activas, que proyectan luz en la escena para crear un mapa de profundidad. Estos sistemas mejoran la eficiencia de la adquisición de datos en comparación con los métodos anteriores que utilizaban un conjunto de cámaras sincronizadas y calibradas, así como un entorno cromático.



Figura 7. Imagen del mapa de profundidad usando la herramienta OpenNI, de Dyce et al. [9].

Un mapa de profundidad (Figura 7) es una imagen en la que los píxeles describen la distancia desde un punto en el espacio hasta la cámara, en lugar de la información habitual sobre el color o el brillo. La información sobre la profundidad puede ayudar a reducir los problemas de las cámaras tradicionales: condiciones de iluminación del entorno, sombras, reflejos o fondos irregulares [1].

En este equipo de captura de movimiento, lo principal es reconocer las siluetas o estructuras que hay que localizar y rastrear durante el análisis. Estos sistemas ajustan los modelos del cuerpo humano a las siluetas localizadas y extraen la información sobre los segmentos estudiados. Después, dicha información es procesada mediante procesos de reconstrucción basados en el modelo ajustado a la silueta y la posición del objeto adquirido de la imagen (algoritmos generativos), o procesos que determinan, a través del aprendizaje automático y entrenamiento del sistema de análisis, la posición del modelo utilizando únicamente la imagen (enfoques discriminatorios).



Los componentes típicos de estos sistemas de captura de movimiento sin marcadores son [1]: sistema de cámara, modelo corporal, reconocimiento de la silueta del cuerpo u objeto y los algoritmos utilizados para extraer los parámetros de la silueta, postura y posición del cuerpo. modelo.

Uno de los sistemas de entretenimiento más utilizados que se está aplicando cada vez más en diversos campos como la rehabilitación, es la cámara Kinect® de Microsoft. Esta cámara genera un mapa de profundidad emitiendo luz infrarroja en el cuerpo. Después, el Kinect® rastrea el modelo ajustado en la imagen combinando información sobre la profundidad y la cinemática del cuerpo humano (Figura 8).

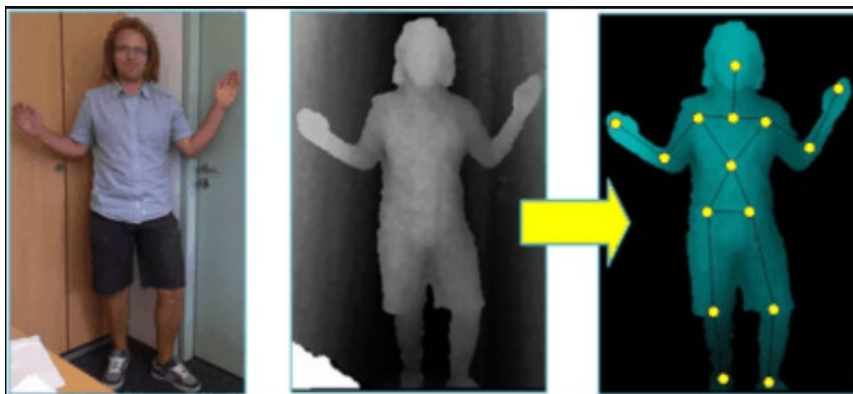


Figura 8. Imágenes del mapa de profundidad de Microsoft Kinect y generación de modelos, imagen extraída de Kristkler et al. [10].

Además, existen sistemas de análisis de movimiento sin marcadores más complejos que se aplican especialmente a los movimientos deportivos. Constan de varias cámaras que rodean el área de análisis y software de reconocimiento corporal con las que posteriormente se asocia un modelo corporal para el cálculo de variables cinemáticas en 3D (Figura 9). Estos sistemas pueden realizar mediciones tanto en laboratorio como en exteriores siempre que las condiciones de iluminación y el contraste de color entre el fondo y el objeto lo permitan; sin embargo, esto afecta su precisión y a algunos planos de movimiento.

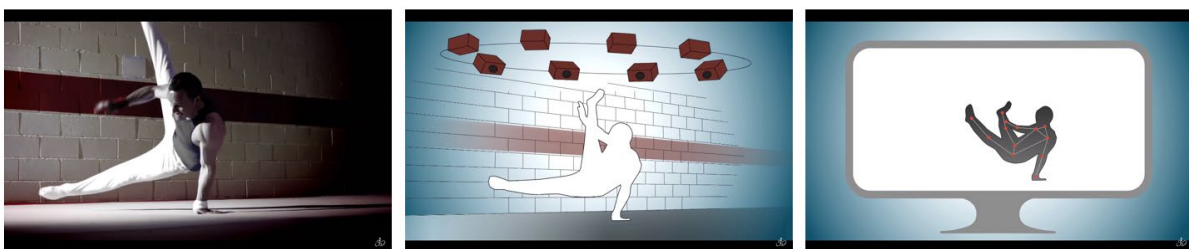


Figura 9 – Movimiento deportivo en tiempo real, reconocimiento de silueta y asignación de un modelo corporal, imágenes extraídas de Simi Shape 3D® (<http://www.simi.com/>).

Actualmente, existen sistemas basados en una sola cámara para extraer información 3D. Siguiendo los procesos de ajuste del plano de movimiento y calibración, rastrean los puntos corporales que conforman un modelo predefinido a través de métodos de inteligencia artificial compuestos por redes neuronales entrenadas en identificar y predecir estos puntos, así como patrones de aprendizaje en base a los datos recibidos. La precisión [11] en las variables de rango de movimiento obtenidas en algunos estudios es suficiente para aplicarlas en campos como la rehabilitación y el entrenamiento deportivo.

### Parámetros

Los parámetros más comunes extraídos con estos sistemas son análogos a los descritos para los sistemas basados en marcadores.

### Ventajas y desventajas

Una de las principales ventajas de estos sistemas es la capacidad de realizar análisis de movimiento en entornos reales, lo que ahorra el tiempo necesario para preparar la medición cuando se utilizan sistemas de laboratorio con instrumentación de marcadores.

La resolución de las cámaras que utilizan estos sistemas es normalmente de 640x480 píxeles, lo que puede ser adecuado en el contexto de los videojuegos, pero puede suponer un problema cuando se utilizan para reconocer segmentos corporales específicos. Además, la resolución temporal, que ronda los 30 Hz, limita su uso a movimientos que no se realizan a gran velocidad.

En cuanto a la precisión de estos sistemas, los estudios incluidos en la bibliografía se relacionan principalmente con movimientos lentos, como la marcha humana, mientras que los movimientos más rápidos como los que se realizan en el deporte quedan por estudiar; sin embargo, cabe señalar que la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio de las rotaciones en el plano transversal son más difíciles [1].



### 3. Sistemas inerciales

Los sistemas inerciales son un tipo de sistemas no ópticos basados en unidades de medida inercial (IMU). En el análisis de movimiento, estas unidades suelen estar compuestas por varios sensores (Figura 10):

- **Acelerómetro.** Mide las fuerzas de aceleración, tanto estáticas (como la gravedad) como dinámicas (generadas por movimiento, golpes, etc.). Los acelerómetros que se utilizan en estos sistemas suelen ser triaxiales, es decir, miden la **aceleración lineal** que se produce en cada uno de los tres ejes del espacio. En movimientos estáticos (cuando el sujeto no se mueve), miden rotaciones angulares.
- **Giroscopio.** Mide la **velocidad angular**, es decir, la velocidad de rotación del sensor, en los tres ejes del espacio.
- **Magnetómetro.** Nos permite conocer la **orientación** del sensor en relación al polo norte magnético, así como la estimación de la posición del sensor junto con la información de los sensores anteriores.



Figur 10 – Imagen de los sensores que componen una IMU, su tamaño, y luego encapsulados comercialmente, extraída de Xsens ®

Los requisitos básicos para estimar la cinemática en 2D y 3D utilizando esta tecnología son [12]:

- Conocer la **orientación y posición del sensor** en un espacio 2D y 3D. De forma aislada, no se puede determinar la posición global, solo su orientación espacial. Por este motivo, esta información se obtiene mediante el uso de algoritmos de fusión a partir de la información de los sensores.
- Determinación de los **ejes** donde se produce el movimiento. Los ejes de los sensores deben estar **alineados** con los ejes de movimiento del sistema de referencia anatómico para facilitar la comprensión funcional de la cinemática articular en 2D y 3D.

Se aplican procedimientos de **calibración y estimación de eventos** donde se usa un cero para corregir los errores de deriva del sensor para resolver los errores en la estimación de la posición como resultado de los cálculos para integrar las señales de los sensores y alinear los ejes. Estos procesos se suelen realizar *ad hoc* para que se analice el movimiento.

Los sensores inerciales ofrecen un método de medición preciso y fiable para evaluar el movimiento humano, pero su precisión y fiabilidad para estimar la información necesaria varía y depende del movimiento a evaluar debido a la necesidad de establecer cálculos específicos.

Sin embargo, la mejora en los procesos de cálculo los convierte en un sistema válido para estudiar los movimientos humanos [5].

Los diferentes sistemas comerciales disponibles en el mercado vienen en cajas pequeñas y ligeras con transmisión inalámbrica de datos. Estos se adjuntan al segmento del cuerpo para estimar el movimiento de dicho segmento en el espacio [13]. Además, se pueden usar dos o más IMU para recibir datos de múltiples segmentos simultáneamente y sincronizados, lo que genera un modelo corporal para estimar la cinemática conjunta (Figura 11).

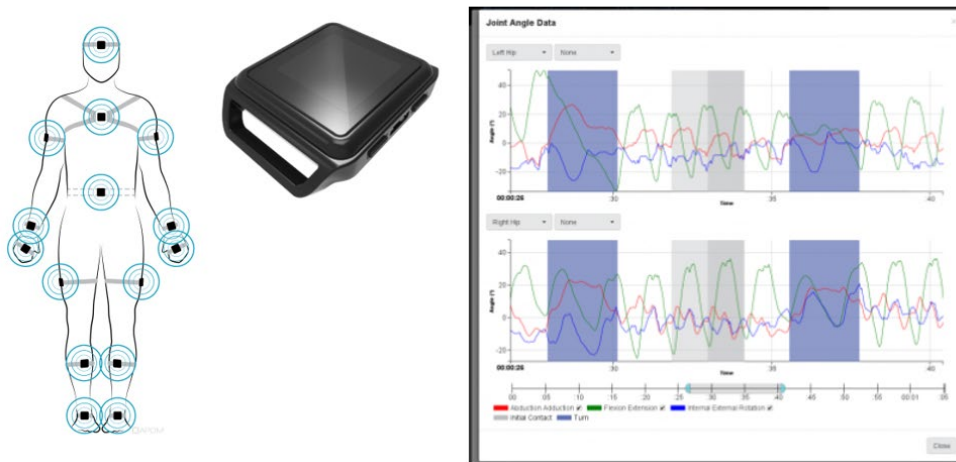


Figura 11 – Ejemplo de un modelo compuesto por sensores inerciales Opal® y los resultados de los ángulos de articulación por el software Moveo Explorer®, imágenes extraídas de <https://www.apdm.com/kinematics/>

Existe mucha literatura sobre el uso y la utilidad de estos sistemas; sin embargo, la identificación de nuevas soluciones para incrementar su precisión y confiabilidad, así como sus aplicaciones, es todavía un campo abierto con grandes expectativas.

### Parámetros

Los parámetros más comunes calculados utilizando un sistema de medición basado en unidades inerciales de movimiento son las **aceleraciones lineales** en los tres ejes del espacio, las **velocidades angulares** en los tres ejes del espacio, la **orientación espacial** (Figura 12), los **ángulos relativos** entre dos segmentos en los tres planos. de espacio, y **eventos espacio-temporales**, dependiendo del movimiento analizado.

### Ventajas y desventajas

Una de las principales ventajas de estos sistemas es la capacidad de realizar análisis 3D dinámicos del movimiento humano sin las limitaciones o dificultades de los sistemas ópticos. Características como su **portabilidad** para ser utilizado fuera del entorno de laboratorio, la **versatilidad** de uso y su precio, los convierten en una alternativa atractiva a los sistemas tradicionales.

Sus inconvenientes incluyen la susceptibilidad a **errores de medición** en el cálculo de la **posición absoluta** debido a la presencia de metales en el entorno de medición, la naturaleza

del sensor y la sensibilidad de los algoritmos de fusión de datos para obtener la posición integrando la aceleración lineal, que afecta a los parámetros de distancia y longitud. Sin embargo, se siguen haciendo grandes avances en esta área para minimizar estos errores.

Otro inconveniente de utilizar sistemas inerciales es la **instrumentación**, que limita la valoración de pequeñas articulaciones o segmentos debido a problemas de tamaño.

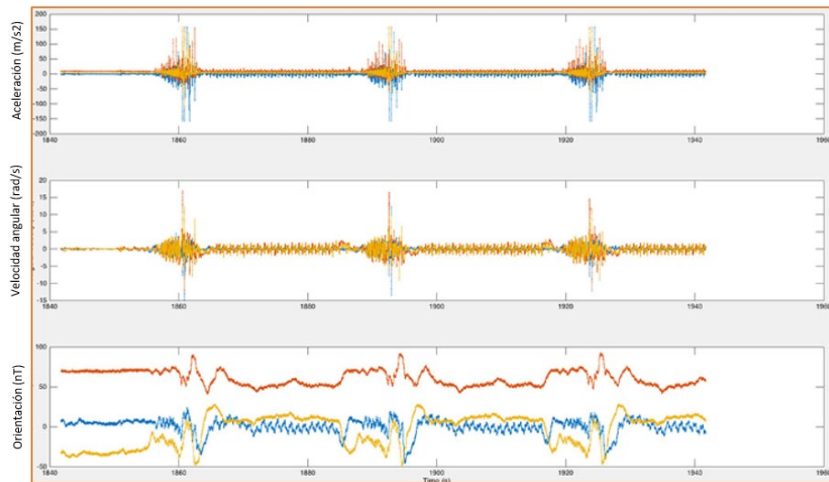


Figura 12 – Visualización de las señales de los parámetros de velocidad angular, aceleración y orientación provenientes de un sensor inercial; imagen extraída de [imeasureu.com](http://imeasureu.com)

## 4. Otros

En esta sección se describen otros sistemas de análisis de movimiento que utilizan tecnologías diferentes a las descritas anteriormente, que se aplican en diversas áreas de la evaluación biomecánica.

### Goniómetro

Los goniómetros son dispositivos pasivos que se utilizan comúnmente en el entorno clínico para medir los ángulos articulares, lo que es útil para objetivar los déficits de movilidad como parte del examen clínico.

Este instrumento (Figura 13) es similar a un protector de ángulo, pero diseñado específicamente para medir los ángulos articulares del cuerpo humano. Existen diferentes tamaños y formas en función de la articulación a evaluar. La medición se realiza alineando el eje del goniómetro con el eje de la articulación a medir, y cada brazo del goniómetro con los segmentos que componen la articulación, luego se indica el ángulo medido [14].

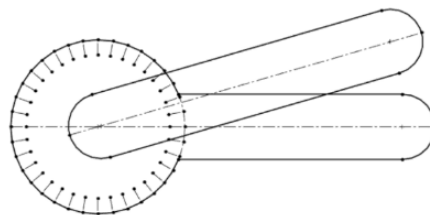


Figura 13 – Representación de un goniómetro para medir ángulos articulares, imagen extraída de Christenson, J. [3].

Desde la introducción de este instrumento, se han desarrollado diversas metodologías para describir cómo se realizan las mediciones y mejorar su fiabilidad, ya que dicha fiabilidad depende de la experiencia del examinador para posicionar correctamente el goniómetro, la articulación y la persona a evaluar. La literatura ofrece diversas publicaciones sobre la fiabilidad de las mediciones realizadas por diferentes examinadores o el mismo examinador en diferentes sesiones de medición.

Una de las metodologías más utilizadas es la propuesta por la Academia Estadounidense de Cirujanos Ortopédicos (AAOS). Desde su inicio en la década de 1960 hasta la última versión de 1994, ha proporcionado ilustraciones sobre cómo realizar las mediciones desde una "posición inicial cero" específica, pero no muestra áreas anatómicas específicas para alinear los brazos del goniómetro, y los valores normativos. proporcionados no van acompañados de datos sobre su fiabilidad y, en algunos casos, se basan en pequeños ejemplos con adultos [15].

Diferentes grupos de investigación han trabajado y continúan trabajando en la mejora de las metodologías que utilizan este instrumento, brindando recomendaciones para cada articulación en base a estudios de fiabilidad, así como valores normativos segmentados por edad y género.

## Parámetros

El parámetro proporcionado por el goniómetro es la medida del ángulo relativo articular entre dos segmentos, sin proporcionar la posición absoluta del segmento o de la articulación en el espacio.

## Ventajas y desventajas

La principal ventaja de este instrumento es que es **económico, fácil de usar y válido**, ya que proporciona información sobre el ángulo articular, que es relevante en un examen clínico, por ejemplo.

Una de las principales desventajas de los goniómetros, aceptada en la mayoría de los contextos donde se utilizan, es su **fiabilidad**.

Para obtener un registro continuo de esta información durante la medición de un movimiento, se desarrollaron **electrogoniómetros**. Estos instrumentos utilizan una resistencia variable o potenciómetro y un sistema de fijación mecánica para que la rotación de una articulación se convierta en un giro del potenciómetro. De esta forma, es posible obtener directamente una señal eléctrica linealmente proporcional al ángulo girado. Existe otro tipo de electrogoniómetros basados en **galgas extensiométricas** (Figura 14), cuya instrumentación es mucho menos engorrosa, y que miden ángulos en diferentes planos según sean uniaxiales, biaxiales o triaxiales.



Figura 14 – Ejemplo de un sistema de electrogoniómetro inalámbrico comercial (Biomec®) utilizado para medir el ángulo de la rodilla (azul) y el tobillo (rojo) en el ciclismo.

## Inclinómetros

Los inclinómetros se pueden definir como instrumentos basados en la gravedad que hacen referencia a sus medidas con respecto a la gravedad, una posición de inicio cero, que indican mediante una aguja ponderada o un fluido (Figura 15).

Los **inclinómetros electrónicos** (Figura 15) son dispositivos que utilizan un **acelerómetro** como elemento sensor. Este acelerómetro utiliza la inercia de una masa ubicada en un sensor de fuerza para medir la aceleración gravitacional. El cambio en la aceleración registrado por el sensor depende de la **inclinación** de dicho sensor, registrando un valor en grados.





Figura 15 – Inclinómetro de burbuja Baseline® Acu-Angle (izquierda) e inclinómetro electrónico DTS 2d Noraxon®.

Se utilizan principalmente para evaluar el rango de movimiento articular, registrando el grado de desviación de la posición anatómica neutra de los diferentes segmentos de los miembros inferiores/superiores, así como de la columna cervical, lumbar y torácica. Para ello, se colocan alineados con los segmentos corporales en estudio o puntos de referencia anatómicos como las apófisis espinosas o la región occipital mediante correas de sujeción (Figura 16).

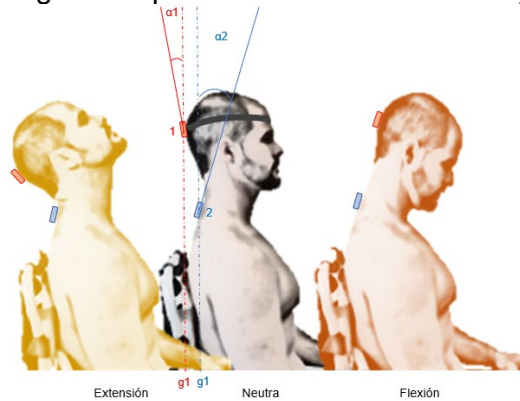


Figura 16 – Evaluación del rango de movimiento de la columna cervical. El valor de cada posición se extrae de la diferencia entre los resultados del inclinómetro 1 (rojo) y 2 (azul), imagen modificada de NedRangos / IBV.

La información que se obtiene de un acelerómetro colocado en el cuerpo o un segmento corporal depende principalmente de cuatro factores: la posición en la que se coloca, la orientación de su ubicación, la postura de la persona y la actividad que va a realizar [16].

## Parámetros

Los inclinómetros permiten registrar el ángulo medido con respecto a la vertical (definido por la dirección de la gravedad) o con respecto a una posición de referencia establecida, así como los ángulos relativos entre los segmentos instrumentados.

## Ventajas y desventajas

La técnica de inclinometría es **fácil de aplicar** en condiciones de campo y causa una mínima interferencia a la persona que realiza el movimiento, especialmente en mediciones casi estáticas o lentas.

Las principales desventajas de los inclinómetros son que no es posible identificar el plano en el que se produce la desviación con respecto a la vertical (por lo tanto, los sensores deben estar cuidadosamente alineados con respecto al plano de medición), y el hecho de que no se pueden utilizar con movimientos rápidos, ya que son sensibles a la aceleración. GPS

## GPS

Los sistemas basados en la ubicación a través del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) se denominan comúnmente sistemas basados en tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global). El desarrollo de estos sistemas de posicionamiento se basa en el reloj atómico, que proporciona una medición precisa del tiempo, y nos permite conocer el lapso de tiempo entre la transmisión de una señal de radio desde el satélite y su recepción por un sistema receptor GPS en la Tierra.

Si se conoce la distancia del satélite al receptor GPS, y hay comunicación con al menos cuatro satélites, el receptor GPS se puede localizar mediante triangulación [17], así como su dirección y velocidad [18].

Estos sistemas se utilizan comúnmente en espacios abiertos, donde no existen interferencias físicas que impidan una correcta comunicación, lo que provoca errores en la precisión de la ubicación. Sin embargo, los problemas provocados por las interferencias de grandes construcciones o condiciones atmosféricas específicas se resuelven mediante mediciones de GPS diferencial (DGPS), que utilizan receptores estacionarios colocados en ubicaciones terrestres para comparar sus posiciones fijas con la posición dada por el satélite [18]. Así, para las mediciones realizadas en entornos cerrados como pabellones deportivos, existen sistemas con equipos de impulso dentro del entorno y/o que incluyen sensores inerciales en el propio dispositivo receptor.

Los principales elementos que componen estos sistemas son un transmisor / receptor de señales en el cuerpo del sujeto, un repetidor de señales ubicado a nivel del suelo, uno o más satélites, o un sistema de posicionamiento local para entornos cerrados o donde la comunicación es difícil (Figura 17).

Además de la información extraída de la ubicación, como la velocidad y las distancias, estos sistemas suelen incluir acelerómetros que brindan información sobre la intensidad y el tipo de movimiento a analizar.

El campo de aplicación más avanzado de estos sistemas es el deporte. La integración de la información de movimiento transferida por estos sistemas junto con datos fisiológicos, tácticos o estratégicos otorga a esta tecnología un gran potencial dentro del deporte.



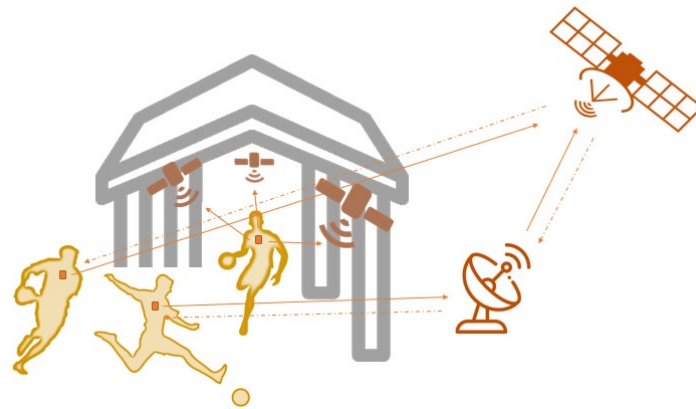


Figure 18 – Elementos de comunicación de los dispositivos receptores GPS.

### Parámetros

Los principales parámetros que se obtienen de estos sistemas son la **ubicación** del receptor (con una precisión de centímetros o metros según el tipo de sistema), **dirección**, **distancia**, **velocidad y aceleración** durante el análisis de movimiento, entrenamiento o competición.

Estos sistemas también pueden contener acelerómetros o sistemas inerciales que pueden proporcionar información más precisa sobre el movimiento: fuerzas de impacto generadas durante el movimiento, aceleraciones que caracterizan el movimiento o parámetros espacio-temporales básicos como la biomecánica de la marcha. También se puede obtener información sobre la intensidad del ejercicio asociando información fisiológica mediante la adquisición de la frecuencia cardíaca.

### Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de estos sistemas son: son dispositivos **pequeños, ligeros y portátiles** que se pueden adquirir a un precio razonable; sobre todo, no interfieren con la realización de los movimientos estudiados; proporcionan **acceso gratuito** a la comunicación con satélites de todo el mundo, que ofrece **información contextualizada** para el entorno y la actividad que se evalúa.

Las desventajas de estos sistemas incluyen una **baja cobertura** de comunicación con el conjunto de satélites disponible en algunos lugares, o el hecho de que la precisión del posicionamiento de algunos sistemas no es adecuada para medir actividades específicas.

## 5. Principales áreas de aplicación

---

Las técnicas instrumentales de análisis cinemático nos permiten cuantificar el movimiento humano mediante el análisis de diferentes variables. Estas variables se determinan en los procedimientos de medición seleccionados para caracterizar el objeto estudiado.

Estas metodologías para el análisis biomecánico instrumentado se implementan y utilizan con frecuencia en el día a día. Este equipo está en constante desarrollo, y debido a las mejoras en la portabilidad y facilidad de uso, esta tecnología se está implementando cada vez más, transferida desde los laboratorios de investigación a los consultorios clínicos, o incluso a los propios usuarios. Sin embargo, es importante especificar correctamente las características técnicas de los equipos, así como sus procedimientos de uso, fiabilidad y validez respecto a las aplicaciones a las que están destinados, lo que evitará un uso inadecuado por parte de profesionales, docentes o usuarios finales.

Los ámbitos en los que se suelen aplicar estas técnicas son el ámbito clínico, el deportivo y la ergonomía. Algunos de los casos de aplicación más comunes en estas áreas se enumeran más específicamente a continuación

### Entorno clínico

Dentro del ámbito clínico, las principales aplicaciones y usos de estas técnicas son las siguientes:

- Caracterizar los movimientos normales y propios de patologías específicas, tanto neurológicas como musculoesqueléticas.
- Cuantificar objetivamente la capacidad funcional de la persona para realizar actividades de la vida diaria y determinar el grado de alteración.
- Planificar las estrategias de rehabilitación, monitorear su avance y adaptarlas.
- Para ayudar a tomar decisiones sobre si continuar, modificar o finalizar un tratamiento.
- Ayudar a implantar y adaptar órtesis y / o ayudas técnicas.
- Obtener indicadores del efecto de un procedimiento para mejorar la eficiencia de los procesos actuales.
- Establecer pautas y monitorear mediante tecnologías portátiles que mejoren la adherencia y motivación de las personas en procesos específicos relacionados con la salud.

### Deportes

Dentro del ámbito deportivo, las principales aplicaciones y usos de estas técnicas son:

- Controlar la técnica deportiva y mejorar el rendimiento corrigiendo cuantitativamente errores y deficiencias en los movimientos técnicos.
- Apoyar a los profesionales en sus técnicas de entrenamiento valorando la asimilación del entrenamiento por parte del deportista.
- Identificar los factores de riesgo de lesiones específicas.

- Evitar lesiones asesorando sobre cómo realizar las técnicas deportivas de forma segura, en base a la información que brindan estas técnicas.

Realizar un seguimiento de la evolución de diversas variables de interés en el proceso de rehabilitación deportiva, que ayuden a la recuperación y adaptación a la práctica deportiva.

## Ergonomía

Las principales aplicaciones de las técnicas instrumentales en el campo de la ergonomía en el lugar de trabajo y el diseño de productos son:

- Evaluación / descripción del riesgo musculoesquelético asociado a un trabajo.
- Caracterización de posiciones repetitivas y movimientos articulares involucrados en un trabajo específico.
- Identificación de patrones de comportamiento provocados por fatiga muscular y sobrecarga en tareas relacionadas con el trabajo.
- Ayuda en el rediseño y validación de trabajos y productos.
- Evaluación de dispositivos y ayudas externas en el contexto laboral.
- Desarrollo de producto bajo criterios ergonómicos.

## 6. Ejemplos

---

En este apartado se incluyen algunos ejemplos de estudios y aplicaciones destinados a nivel profesional o de usuario, que utilizan diferentes técnicas instrumentales para el análisis del movimiento en línea con los objetivos descritos anteriormente.

En los últimos años se han publicado un número cada vez mayor de artículos de investigación clínica relacionados con el análisis biomecánico, lo que muestra un interés creciente en la información diferenciadora extraída de estas técnicas. Esta información se aplica principalmente en áreas asociadas a la evaluación funcional de las capacidades de las personas, caracterización de diversas patologías, establecimiento y planificación de una rehabilitación, etc.

El desarrollo de la tecnología portátil ha contribuido al desarrollo de equipos y sistemas de evaluación para el diagnóstico que pueden ser utilizados por los profesionales de la salud de forma ambulatoria y no se limitan al laboratorio de evaluación biomecánica.

### Caracterización de patologías

La marcha humana es una de las actividades más estudiadas a nivel clínico. Se han desarrollado ampliamente estudios instrumentados de análisis de la marcha humana para comprender la marcha humana normal y para el análisis posterior de diversas patologías que afectan el sistema musculoesquelético.

El análisis clínico de la marcha nos permite extraer información sobre el estado, desarrollo y pronóstico de algunas patologías mediante el análisis de parámetros cinemáticos que tienen correlación con diferentes aspectos funcionales de la marcha. Las características específicas de algunas alteraciones se reflejan en determinados parámetros, tanto cinemáticos como cinéticos, y se realizan estudios para determinar su validez comparándolos con escalas clínicas u otras pruebas funcionales.

Por ejemplo, el estudio de Weiss et al. [19] "Patrón de marcha en artritis reumatoide" analiza parámetros cinemáticos y dinámicos tanto en sujetos con artritis reumatoide (AR) como en un grupo de control para determinar si existen parámetros que determinan los niveles de funcionalidad asociados con el Cuestionario de Evaluación de la Salud (HAQ) - escala de puntuaciones.

Los sujetos con AR pueden sufrir alteraciones en el patrón de marcha humano normal provocadas por cambios degenerativos articulares, lo que conduce a una alteración funcional y cambios en su calidad de vida.

La técnica instrumental utilizada para la grabación cinemática es la fotogrametría 3D con un sistema de análisis Vicon Motion System® (Oxford, Reino Unido) compuesto por 6 cámaras. El modelo de análisis de la marcha es Plug in Gait (PiG), proporcionado por el sistema de captura de movimiento Vicon®. Este modelo consta de 34 marcadores colocados en puntos de referencia anatómicos de la cabeza, el tronco, los brazos, la pelvis, las piernas y los pies.

El resultado cinemático más notable de este estudio es la disminución del rango articular observado en el tronco, cadera, rodilla y tobillo (Figura 18). Además, se observa una correlación de algunos parámetros cinemáticos en los resultados extraídos del HAQ. Estos estudios pueden ser útiles para ayudar a comprender cómo la AR afecta los cambios en la marcha en las extremidades inferiores.

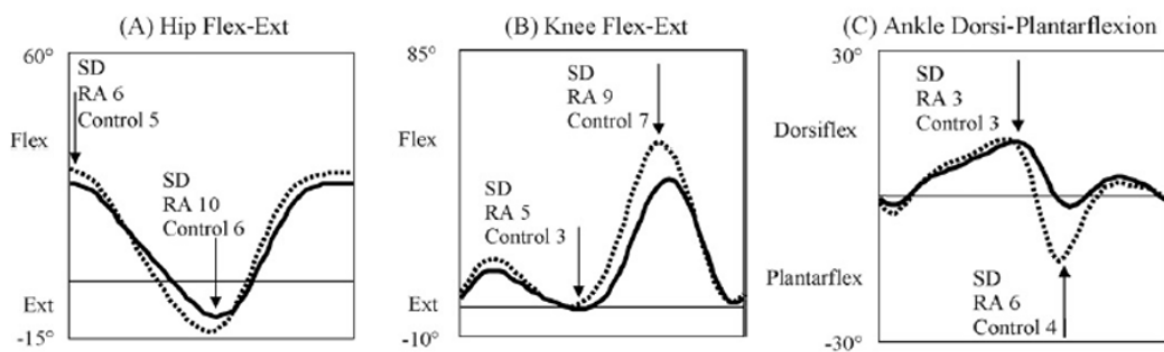


Figura 18 - Cinemática del grupo AR y del grupo control. Ángulos de flexión / extensión de la cadera (A) y rodilla (B), y flexión dorsal / plantar del tobillo (C) durante el ciclo de la marcha. Línea continua (-): grupo de control, línea discontinua: (- -) grupo RA. La desviación estándar (SD) se muestra para todos los parámetros máximos; extraído de Weiss et al. [19].

## Valoración funcional

Las caídas son uno de los problemas actuales de la población mayor de 65 años. Se estima que uno de cada tres adultos mayores se cae cada año, que es la segunda causa mundial de muerte accidental o involuntaria. Las caídas implican un deterioro de la autonomía de las personas mayores, reduciendo su calidad de vida. Las herramientas tradicionales para evaluar el riesgo de caída tienen algunas limitaciones como la subjetividad, en el caso de las escalas funcionales, o el tiempo que requieren su uso en la práctica clínica diaria, en pruebas más completas.

Actualmente se están desarrollando herramientas basadas en técnicas instrumentales para brindar soluciones a la medida de las necesidades de los profesionales de la salud. A modo de ejemplo, el sistema FallSkip utiliza los sensores inerciales de un dispositivo móvil para recopilar información durante la realización de un conjunto simple de pruebas en un entorno clínico. Esta prueba (Figura 19), basada en un protocolo modificado de la prueba Time Up and Go (TUG), recopila parámetros específicos relacionados con la marcha, el equilibrio, el control motor y la fuerza muscular. Estos parámetros están relacionados con la evaluación del riesgo de caídas en personas mayores.

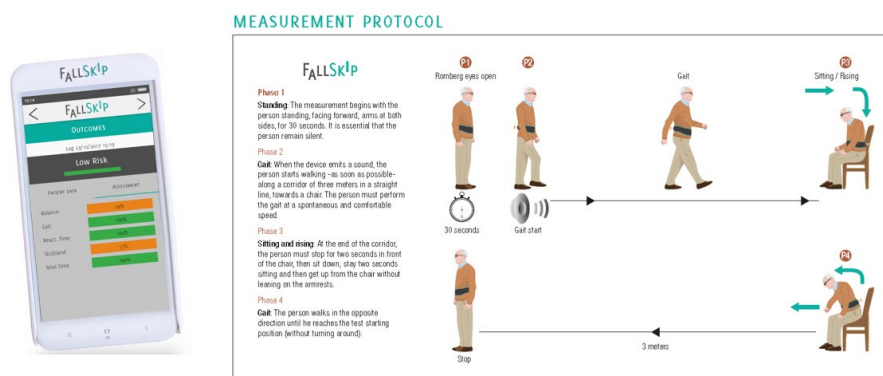


Figura 19 – Dispositivo móvil y protocolo de medición del sistema FallSkip; imágenes extraídas de <http://fallskip.com/>

Con ello se pretende agilizar y simplificar la extracción de información objetiva diferenciadora de interés en base a variables biomecánicas que nos permita conocer el estado funcional de una persona respecto a su riesgo de caída.

Las aplicaciones en el ámbito del deporte son más populares en cuanto a impacto y demanda se debe principalmente al creciente número de personas que hacen deporte y participan en diferentes disciplinas relacionadas con las políticas de promoción de la salud a través de la actividad física.

Las técnicas instrumentales de análisis biomecánico permiten extraer información cuantitativa relacionada con las técnicas de formación, la selección de material didáctico o el seguimiento de variables relacionadas con el rendimiento y la protección de la salud [20].

## Selección de equipamiento Deportivo

Un ejemplo de los resultados de la investigación sobre el análisis cinemático del running y la selección de calzado es el desarrollo de herramientas como el sistema Runalytics® por parte del Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV). Este sistema realiza un análisis en tiempo real de los ángulos articulares del pie durante la postura de la marcha en carrera y los clasifica según el tipo de huella (pronador, supinador, neutral) mediante clasificadores basados en técnicas de gestión de datos y aprendizaje automático. Este sistema utiliza una técnica de análisis basada en imágenes de video junto con marcadores de realidad aumentada ubicados en la pierna y el retropié del corredor, que permite medir el movimiento relativo en el espacio de los segmentos corporales de la pierna y el pie en 3D (Figura 20). Este análisis nos permite asesorar sobre el tipo de pisada a la hora de correr y seleccionar el calzado más adecuado.





Figura 20 – Sistema Runalytics © para el análisis de la huella durante la ejecución; imágenes extraídas de <http://www.runalytics.es/>

## Evaluación de técnicas deportivas

La valoración técnica de los deportistas es un proceso fundamental para evaluar la eficiencia individual y la adaptación a una disciplina deportiva. Esta evaluación nos permite conocer las capacidades del deportista y sentar las bases para la posterior planificación e intervención en el proceso de entrenamiento. Hoy en día, las constantes mejoras en los diferentes aspectos de la preparación del deportista, como la nutrición, la condición física, etc., hacen de la valoración objetiva y precisa de la técnica deportiva un factor diferenciador para conseguir mejores resultados.

Uno de los objetivos de la evaluación de técnicas deportivas es analizar las variables que ocurren en los diferentes eventos clave durante la realización del movimiento deportivo con el fin de detectar deficiencias, oportunidades de mejora y / o efectos del entrenamiento. Tradicionalmente, este tipo de evaluación lo realizaban los entrenadores a través de la observación directa, que es un método sencillo y rápido, pero que requiere experiencia y conocimientos por parte del examinador. La introducción de técnicas instrumentales proporciona un registro objetivo de los parámetros cuantificables específicos del movimiento o disciplina a analizar. Actualmente, los sistemas portátiles y no invasivos permiten realizar este tipo de evaluaciones en el contexto deportivo, aportando realismo y validez, mientras que las evaluaciones de laboratorio ofrecen ventajas como la objetividad, estandarización y fiabilidad [21].

En el caso del tenis, a continuación se incluyen dos ejemplos del uso de técnicas instrumentales para el análisis cinemático. Ambos ejemplos se centran en el análisis de la técnica deportiva.

El artículo de Ebner y Findling [21] “Clasificación de golpes de tenis: comparación de muñeca y raqueta como posición del sensor IMU” estudia una metodología para detectar y clasificar 8 golpes que ocurren en el tenis y visualizar las diferencias en las velocidades angulares y aceleraciones en 3D. extraído de la información proporcionada por dos sensores inerciales: uno ubicado en la raqueta y otro en la muñeca del jugador (Figura 21).



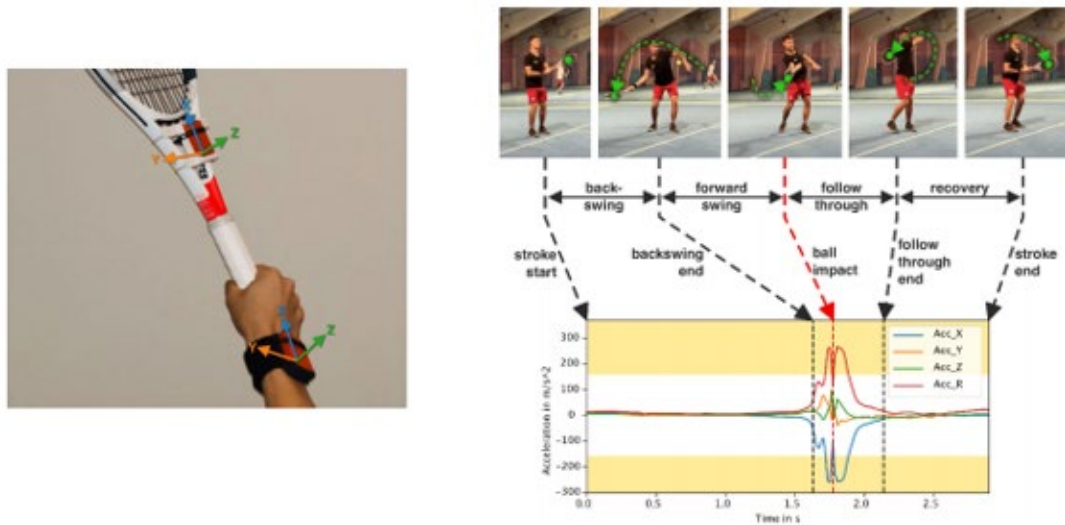


Figura 21 – Montaje de sensores de inercia en la raqueta y la muñeca (izquierda), y ejemplo de las aceleraciones registradas en las diferentes fases de un golpe (derecha); imágenes extraídas de Ebner y Findling [22].

El trabajo de Yang et al. [23] “TennisMaster: un sistema de evaluación del desempeño del servicio en línea basado en IMU” presenta un sistema para evaluar el desempeño del movimiento del servicio durante el entrenamiento. La información también se extrae de dos unidades inerciales ubicadas en la tibia y la muñeca del jugador (Figura 22).

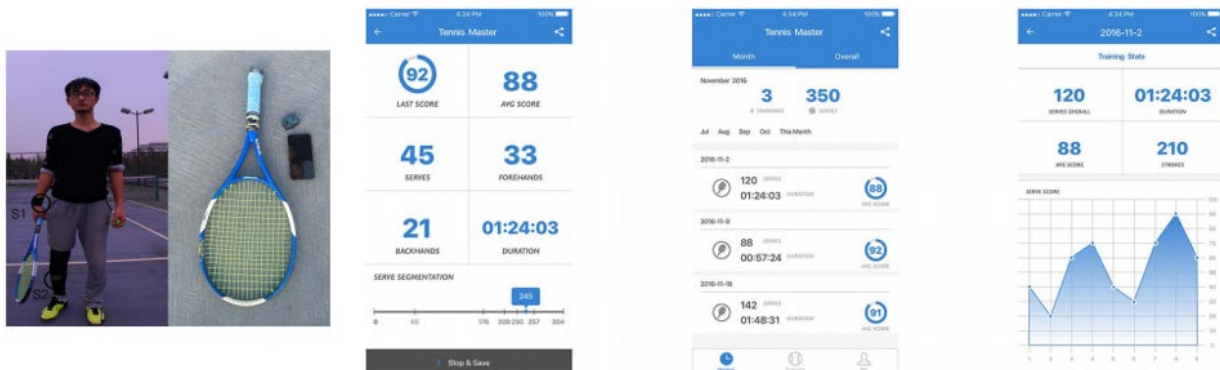


Figura 22 – Montaje de sensores inerciales (S1) en la parte inferior de la raqueta (S2), y en la tibia del jugador (izquierda). Ejemplos de capturas de pantalla de la aplicación que muestran la puntuación del servicio, el número de golpes, el historial de entrenamiento, etc. (derecha). Imágenes extraídas de Yang et al. [23].

Estos sistemas permiten cuantificar la carga que realiza el jugador y el nivel de rendimiento, lo que ayuda al entrenador a abordar y planificar el entrenamiento, así como al jugador al retroalimentarlo sobre el entrenamiento.

En el campo de la ergonomía, el uso de técnicas instrumentales para registrar la movilidad articular, la posición de los diferentes segmentos corporales, los alcances y el desempeño de la tarea, permite investigar, estudiar y desarrollar metodologías para la correcta adaptación de entornos y productos. Dentro del contexto laboral, es importante registrar y cuantificar variables relacionadas con la movilidad y posición de segmentos corporales específicos en tareas específicas del puesto. Esta información nos permite determinar, por ejemplo, el riesgo

de trastornos musculoesqueléticos evaluando el riesgo laboral mediante metodologías basadas en el análisis de posturas incómodas, movimientos repetitivos, etc.

En este sentido, se muestran como ejemplo de aplicación dos estudios relacionados con la ergonomía en el lugar de trabajo.

### Caracterización de las tareas laborales

Los movimientos repetitivos son frecuentes en muchos trabajos y pueden provocar problemas musculoesqueléticos en las extremidades superiores. El trabajo de McDonald et al. [24] “Adaptaciones musculares y cinemáticas al fatigante trabajo repetitivo de las extremidades superiores” incluye un estudio sobre la aparición de fatiga en tareas específicas que involucran a las extremidades superiores, así como sobre los cambios en la cinemática de los patrones a lo largo del tiempo.

La técnica instrumental utilizada para el análisis de movimiento es el sistema Raptor-4 de Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, (CA). Se utilizaron once cámaras grabadas a una frecuencia de 50 Hz y un modelo de 72 marcadores reflectantes para obtener los ángulos 3D de las articulaciones de la muñeca, codo, hombro y tronco. Para simular estas tareas se utilizó una estación de trabajo diseñada en el laboratorio de movimiento junto con otras técnicas instrumentales como la electromiografía de superficie y una plataforma de fuerza (Figura 23). Una de las principales conclusiones del estudio es que las adaptaciones musculares y los patrones cinemáticos dependen de la tarea y del tiempo. (Figura 23). Estos estudios pueden ayudar a profundizar en los cambios posturales que implican determinadas tareas, en función de la carga y el tiempo de ejecución, y así aportar soluciones y estrategias para minimizar los posibles riesgos musculoesqueléticos.

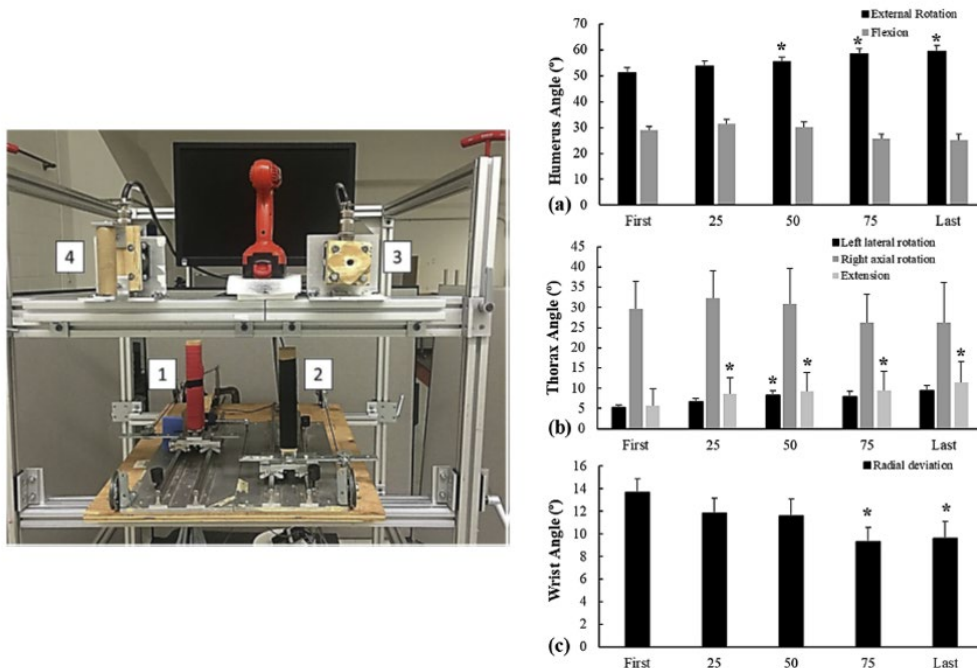


Figura 23 – Estación de trabajo con cuatro tareas: (1) tarea de extracción, (2) tarea de empuje, (3) tarea de perforación y (4) tarea de destino arriba / abajo con 2 niveles de fuerza (izquierda).

Diferencias de ángulo en diferentes articulaciones a lo largo del tiempo durante la tarea de perforación (derecha). Imágenes extraídas de McDonald et al. [24]

## Evaluación de dispositivos de ayuda externa

Las posturas incómodas o las actividades que implican el transporte y elevación de cargas son tareas habituales en determinados trabajos, especialmente en el sector industrial. Además, los trastornos de la columna lumbar son uno de los trastornos más prevalentes en la sociedad actual. Así, se han realizado intervenciones relacionadas con la adaptación ergonómica de herramientas y puestos de trabajo en el entorno laboral del sector industrial; Asimismo, se han desarrollado dispositivos que ayudan en las tareas de manipulación de cargas para minimizar el riesgo de lesiones en la columna lumbar o en las extremidades superiores. Uno de los dispositivos más nuevos que se utilizan actualmente son los exoesqueletos. Estos sistemas pueden ser activos, que contienen actuadores que asisten al sujeto, o pasivos, cuyo principal objetivo es soportar y descargar a través de diferentes elementos como muelles, amortiguadores o materiales con capacidad para almacenar energía y devolverla al sujeto en el momento. tiempo necesario.

El trabajo de Picchiotti et al. [25] "Impacto de dos exoesqueletos de asistencia postural sobre la carga biomecánica de la columna lumbar" estudia el comportamiento de dos modelos diferentes de exoesqueletos (Figura 24) mediante el análisis de variables cinemáticas, así como la actividad y fuerza muscular, también introducidas en este estudio.

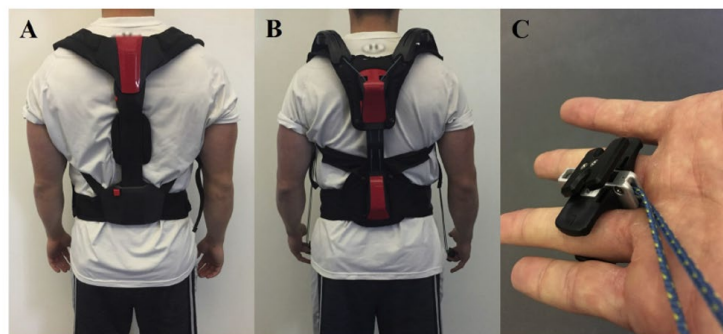


Figura 24 – imágenes de los exoesqueletos ensayados en el estudio: el FLx (A), V22 (B) y el actuador manual del V22, imágenes extraídas de Picchiotti et al. [25].

La técnica instrumental utilizada para el análisis de movimiento es un sistema óptico de captura de movimiento compuesto por 42 cámaras Prime 41 OptiTrack (Natural Point, Corvallis, OR, EE. UU.) Con un modelo de cuerpo completo que consta de 41 marcadores cuya ubicación en el cuerpo está determinada por el Software de captura de movimiento OptiTrack. La frecuencia de grabación se realiza a 120 Hz.

Este estudio compara los resultados de los ángulos de flexión en las articulaciones de los segmentos de tronco, cadera y rodilla durante las tareas de levantamiento con los dos exoesqueletos y una condición de control (Figura 25). Además, los momentos a nivel de la articulación L5 / S1 y la carga biomecánica de los tejidos de la columna lumbar se calcularon utilizando información dinámica.

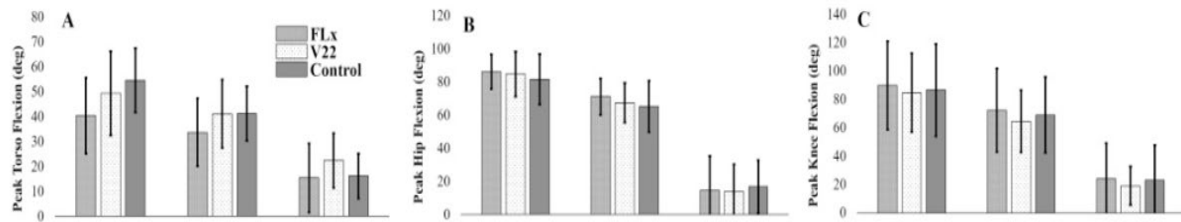


Figura 25 – Diferencias en la flexión máxima de la rodilla entre los dos exoesqueletos evaluados y la condición de control a nivel del tronco (A), la cadera (B) y la rodilla (C); imágenes extraídas de Picchiotti et al. [25].

Estos estudios ayudan a comprender cómo estos dispositivos pueden ayudar a mejorar la postura durante la realización de algunas tareas y la relación o influencia con respecto a la variación en la carga de la zona lumbar (en el caso de este estudio) u otros segmentos, como el miembros superiores en exoesqueletos diseñados para este propósito.

## 7. Ideas clave

---

Las ideas clave de esta unidad didáctica son:

- Existen diferentes técnicas de análisis de movimiento.
- Las principales técnicas se basan en el análisis de imágenes o señales de otros sensores como acelerómetros, giroscopios, etc.
- Los principales parámetros extraídos de estas técnicas están relacionados con la posición, rango de articulación, aceleración y velocidad.
- Es necesario conocer las características y especificaciones técnicas de las diferentes técnicas, así como sus procedimientos de medición para poder seleccionar la técnica según el objeto a medir.
- Se implementan técnicas instrumentales de análisis biomecánico en áreas como el ámbito clínico, el deporte y la ergonomía con múltiples aplicaciones.
- El constante desarrollo tecnológico, como los sistemas de grabación portátiles conectados a aplicaciones móviles, permitirá desarrollar nuevas aplicaciones de evaluación biomecánica y ampliar el ámbito de aplicación.



## 8. Referencias

---

- [1] Colyer, S.L., Evans, M., Cosker, D.P. et al. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. *Sports Med - Open* (2018) 4: 24. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0139-y>.
- [2] Ancillao, A. "Analysis and Measurement of Human Motion: Modern Protocols and Clinical Considerations". *J Robot Mech Eng Resr* (2016),1(4): 30 -37.
- [3] Pueo et al." Application of motion capture technology for sport performance analysis" *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, 2017;32: 241-247.
- [4] Van der Kruk, E., Reijne, M.M." Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review", *European Journal of Sport Science*, 2018 18 (6): 806-819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>.
- [5] Cuesta-Vargas, A., Galán-Mercant, A., Williams, J.M. "The use of inertial sensors system for human motion analysis". *Physical Therapy Reviews*, 2010;15(6): 462-473. <https://doi.org/10.1179/1743288X11Y.0000000006>.
- [6] Siltanen, S. (2012). Siltanen S. Theory and applications of marker-based augmented reality: Licentiate thesis. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2012. 250 p.
- [7] Wagner, Daniel & Schmalstieg, Dieter. (2007). ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices.
- [8] Nagymáté G, Kiss RM (2019) Affordable gait analysis using augmented reality markers. *PLoS ONE* 14(2): [e0212319](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319>.
- [9] Dyce, W., Rodriguez, N., Lange, B., Andary, S., Seilles, A. Tabu search for human pose recognition. *3DIPM: 3D Image Processing, Measurement*, Feb 2014, San Francisco, United States. [ff10.1117/12.2040563](https://doi.org/10.1117/12.2040563). [ffhal-01061640f](https://doi.org/10.1117/12.2040563).
- [10] Kistler, Felix & Lugrin, Birgit & Damian, Ionut & Dang, Chi Tai & Andre, Elisabeth. Natural interaction with culturally adaptive virtual characters. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2012; 6. 39-47. [10.1007/s12193-011-0087-z](https://doi.org/10.1007/s12193-011-0087-z).
- [11] Cronin, N.J., Rantalainen, T., Ahtiainen, J.P., Hynynen, E., Waller B. Markerless 2D kinematic analysis of underwater running: A deep learning approach. *Journal of Biomechanics* 87 (2019) 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.02.021>.
- [12] Picerno, P. "25 years of lower limb joint kinematics by using inertial and magnetic sensors: A review of methodological approaches". *Gait & Posture* 51 (2017) 239–246. [http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.008).
- [13] Al Amri, M. et al. "Inertial Measurement Units for Clinical Movement Analysis: Reliability and Concurrent Validity". *Sensors* 2018, 18, 719; [doi:10.3390/s18030719](https://doi.org/10.3390/s18030719).

- [14] Christenson, J. Chapter Three - Sensors and Transducers. Handbook of Biomechatronics; 2019, Pages 61-93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00003-9>.
- [15] Nancy Berryman Reese, William D. Bandy. Joint Range of Motion and Muscle Length Testing. Ed. Saunders, 2002. ISBN 0721689426, 9780721689425.
- [16] Godfrey, A., Conway, R., Meagher, D., ÓLaighin, G. Direct measurement of human movement by accelerometry. Medical Engineering & Physics. Volume 30, Issue 10, December 2008, Pages 1364-1386. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.09.005>.
- [17] Aughey, Robert.J. Applications of GPS Technologies to Field Sports. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2011, 6, 295-310.
- [18] Maddison, R., Ni Mhurchu, C. Global positioning system: a new opportunity in physical activity measurement. Int J Behav Nutr Phys Act 6, 73 (2009) [doi:10.1186/1479-5868-6-73](https://doi.org/10.1186/1479-5868-6-73).
- [19] Weiss, R. J., Wretenberg, P., Stark, A., Palmblad, K., Larsson, P., Gröndal, L., & Broström, E. Gait pattern in rheumatoid arthritis. Gait & posture, 2008;28(2): 229-234.
- [20] Page del Pozo, A.F., Porcar Seder, R.M. "Biomecánica y eHealth. Aplicaciones basadas en tecnologías de uso masivo", in Tecnología Digital para la salud y la actividad física, Aladro Gonzalvo, A.R., Arbinaga Ibarzábal, F, Ed.Madrid: Pirámide, 2019, pp. 127 – 146.
- [21] Morante, J.C. "Evaluación de la técnica deportiva" en en Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, M. Izquierdo, Ed. Buenos Aires, Madrid: Médica Panamericana, 2008, pp. 157 – 171.
- [22] Ebner, C., Findling, R. D. (2019). Tennis Stroke Classification: Comparing Wrist and Racket as IMU Sensor Position. [10.1145/3365921.3365929](https://doi.org/10.1145/3365921.3365929).
- [23] Yang, D., Tang, J., Huang, Y., Xu, C. Li, J., Hu, L., Shen, G., Liang, C.M., Liu, H. 2017. TennisMaster: an IMU-based online serve performance evaluation system. In Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference (AH '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 17, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3041164.3041186>.
- [24] McDonald, A. C., Mulla, D. M., & Keir, P. J. Muscular and kinematic adaptations to fatiguing repetitive upper extremity work. Applied ergonomics, 2019; 75: 250-256.
- [25] Picchiotti, M. T., Weston, E. B., Knapik, G. G., Dufour, J. S., & Marras, W. S. Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of the lumbar spine. Applied ergonomics, 2029; 75: 1-7.





El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.



This project has been funded with support from the European Commission.

This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein