



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

[VIGILADA MINEDUCACIÓN Res. 12220 de 2016.]

DISEÑO DE UN PROCESO PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA MANO Y LOS DEDOS EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO EN LA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

Lina Sofia Alegria Quiñones y Laura Sofia Benavides Ocampo

Directora: Luisa Fernanda García Ramírez

*Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero/a
Biomédico/a*

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Programa de Ingeniería Biomédica
Cali, Colombia
2026

Dedicatoria

Dedicamos este proyecto a Dios, a nuestras familias, docentes y a todas las personas que hicieron parte de este proceso académico y personal, brindándonos apoyo, motivación y confianza durante cada etapa de nuestra formación profesional.

Asimismo, dedicamos este trabajo a nuestra directora, la ingeniera Luisa, por su orientación, compromiso y acompañamiento constante a lo largo del desarrollo de este proyecto. Su disposición para guiarnos, resolver nuestras dudas y motivarnos en los momentos de dificultad fue fundamental para culminar este proceso. Agradecemos profundamente su paciencia, confianza y apoyo, los cuales contribuyeron de manera significativa a nuestro crecimiento académico, profesional y personal.

Agradecimientos

Agradecimientos de Lina

Agradezco a Dios por darme la sabiduría, la fortaleza y la oportunidad de llegar hasta este momento tan importante de mi vida. A mis padres, gracias por darlo todo por mí cada día, por cada esfuerzo, sacrificio y muestra de amor que me han permitido alcanzar mis sueños y tener siempre más de lo que imaginé. A mi hermano, gracias por ser mi compañero de vida.

También quiero agradecer a mi amiga Jessy, porque pasamos de compartir un puesto en el colegio a convertirnos en apoyo emocional durante este camino lleno de altos y bajos. A Natalia, por ser una amiga incondicional y acompañarme durante gran parte de mi vida universitaria. Y especialmente a Laura, porque este proyecto fue una experiencia increíble gracias a ella; por cada traspaso, comida, momento de frustración, alegrías y lágrimas que compartimos en este proceso.

Finalmente, quiero dedicar este logro a mi abuela María Ignacia. Gracias por el amor tan inmenso que me brindó. Aunque hoy no esté físicamente presente, quiero decirle que mi amor por ella es infinito y que, toda la vida, seguiremos siendo comadres. Y a mi Yeye, por ser el niño más dulce y alegre, espero que crezcas feliz y sano y que el mundo sea amable contigo.

Agradecimientos de Laura

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por su amor, apoyo y compañía durante todo este proceso. Especialmente, agradezco a mi hermana, Alejandra Benavides, por escucharme cada vez que necesitaba desahogarme, por aguantar mis momentos de frustración, por ayudarme cuando lo necesitaba y por esperarme con paciencia cada vez que debía quedarme más tiempo trabajando en el proyecto. Gracias por estar ahí incluso en los días en los que yo sentía que no podía más, por darme tranquilidad y por hacerme sentir acompañada en todo momento.

A mis amigas, gracias por estar presentes de diferentes maneras durante este proceso. Gracias por sus palabras de ánimo, por escucharme, por distraerme cuando lo necesitaba y por recordarme que también era importante descansar. Su compañía hizo este camino un poquito más fácil y me ayudó a mantenerme firme durante los momentos de mayor exigencia.

Especialmente, quiero agradecer a Nathalia Esparza, quien fue una de las personas que más me acompañó durante el desarrollo de este trabajo de grado. Gracias por escuchar cada avance, cada preocupación, cada explicación y cada detalle del proyecto, incluso cuando tal vez no era fácil entender todo lo que estaba pasando. Gracias por estar pendiente, por apoyarme y por ayudarme cuando lo necesité. Tu compañía significó mucho para mí en este proceso.

Finalmente, a mi compañera de trabajo de grado, Lina Alegría, gracias por confiar en nuestro equipo desde el primer momento. Gracias por asumir este reto conmigo, por tu compromiso, tu paciencia y tu disposición para sacar adelante cada parte del proyecto. A lo largo de este camino enfrentamos dudas, cambios, cansancio y momentos de presión, pero también aprendimos a organizarnos, escucharnos y apoyarnos mutuamente. Me alegra mucho haber coincidido en la clase de Gestión de proyectos, que fue la que empezó todo este proceso.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	4
Título	9
Glosario	10
Resumen ejecutivo	13
Abstract	14
1. Fase de Análisis	15
1.1. Planteamiento del problema	15
1.1.1. Pregunta de investigación	16
1.2. Justificación	16
1.3. Objetivos	18
1.4. Estado del arte	19
1.4.1. Anatomía funcional de la mano y los dedos	19
1.4.2. Biomecánica del movimiento de la mano	23
1.4.3. Análisis cinemático del movimiento de la mano	26
1.4.4. Sistemas de captura del movimiento	28
1.4.5. Protocolos existentes para análisis cinemático de la mano	33
1.5. Requisitos del diseño	37
1.6. Restricciones del diseño	38
1.7. Contribución del proyecto a la formación en ingeniería	40
1.8. Metodología	41
1.8.1. Análisis:	41
1.8.2. Síntesis:	42
1.8.3. Evaluación y Validación:	43
1.8.4. Consideraciones éticas	45
1.9. Plan de trabajo	45
1.9.1. Plan de trabajo:	48
1.9.2. Presupuesto:	48
2. Fase de Síntesis	50

2.1. Diseño conceptual	50
2.2. Selección y definición de tareas funcionales:	53
2.3. Generación de alternativas	55
2.4. Bocetos: Selección Esquema de Marcaje	58
2.4.1. Configuración del sistema de marcadores reflectivos	58
2.4.2. Procesamiento y análisis	60
2.4.3. Códigos de MATLAB	62
2.5. Construcción de un prototipo inicial	67
2.6. Configuración y ubicación de las cámaras del sistema de captura	68
3. Fase de Evaluación	70
3.1. Plan de pruebas o validación	70
3.2. Plan de análisis de resultados	71
3.2.1. Procedimientos matemáticos implementados en MATLAB	73
3.3. Indicadores de éxito	78
3.4. Prototipo final testeado	80
3.4.1. Comparación preliminar con mediciones goniométricas	80
3.4.2. Resultados generales por tarea funcional	91
3.5. Discusión	101
3.6. Conclusiones	103
3.7. Descripción de los siguientes pasos de avance en la tecnología	104
Declaración de IA	107
4. Anexos	112
4.1. Aval del comité de ética	112
4.2. Consentimiento informado	115
4.2.1. Plantilla del Consentimiento informado	115
4.3. Procesamiento de Qualisys	119
4.4. Formato de recolección de datos	119
4.5. Códigos de Matlab	119
4.5.1. Código tarea Flexión-Extensión	119
4.5.2. Código tarea Oposición Pulgar	119
4.5.3. Código tarea Pinza Trípode	119
4.5.4. Código tarea Agarre Cilíndrico	120
4.5.5. Código tarea Abducción Extensión	120

4.6. Resultados de los codigos de Matlab	120
4.7. Protocolo de análisis cinemático de mano y de los dedos.	120

Título: Diseño de un proceso para el análisis cinemático de la mano y los dedos en el laboratorio de análisis de movimiento de la Universidad Javeriana Cali

Título Corto: Análisis cinemático de la mano mediante captura de movimiento

Programa: Ingeniería Biomédica

Autores: Lina Sofia Alegria Quiñones y Laura Sofia Benavides Ocampo

Director(a): Luisa Fernanda Garcia Ramirez

Glosario

- **Análisis cinemático:** Estudio del movimiento de un cuerpo o segmento corporal sin considerar las fuerzas que lo producen. En el análisis de la mano, permite describir variables como la posición, el desplazamiento, los ángulos articulares y las trayectorias de los dedos durante la ejecución de un movimiento.
- **Análisis tridimensional 3D:** Evaluación del movimiento en tres dimensiones espaciales: eje X, eje Y y eje Z. Este tipo de análisis permite conocer la posición y orientación de los segmentos corporales en el espacio durante una tarea motora.
- **Biomecánica:** Disciplina que aplica los principios de la mecánica al estudio del cuerpo humano, con el fin de comprender el movimiento, la función articular y la interacción entre estructuras como huesos, músculos, tendones y ligamentos.
- **Sistema de captura de movimiento:** Conjunto de equipos, sensores, cámaras, marcadores y software especializado utilizados para registrar y analizar el movimiento corporal en el tiempo.
- **Marcadores reflectivos:** Elementos pequeños, generalmente esféricos, que se colocan sobre puntos anatómicos específicos del cuerpo. Estos reflejan la luz emitida por las cámaras del sistema de captura de movimiento y permiten identificar la posición de los segmentos corporales.
- **Reproducibilidad:** Capacidad de obtener resultados similares al repetir una medición bajo condiciones diferentes, como en distintas sesiones, con diferentes evaluadores o en diferentes momentos.
- **Repetibilidad:** Capacidad de obtener resultados similares al repetir una medición bajo las mismas condiciones, es decir, con el mismo participante, equipo, evaluador, protocolo y sesión de medición.
- **Precisión:** Grado de cercanía entre mediciones repetidas. Una medición es precisa cuando los valores obtenidos son consistentes entre sí, aunque no necesariamente coincidan con un valor de referencia.
- **Validación:** Proceso mediante el cual se verifica que un método, protocolo o sistema mide adecuadamente la variable que se desea evaluar. En este contexto, puede realizarse comparando los ángulos obtenidos mediante captura de movimiento con

mediciones de referencia obtenidas con un goniómetro.

- **Rango de movimiento articular (ROM):** Amplitud total de movimiento que puede realizar una articulación entre una posición inicial y una posición final. Generalmente se expresa en grados y permite evaluar la movilidad articular.
- **Ángulo articular:** Medida angular formada entre dos segmentos corporales que se unen en una articulación. En la mano, permite cuantificar movimientos como flexión, extensión, abducción o aducción de los dedos.
- **Cadena cinemática:** Conjunto de segmentos corporales conectados entre sí por articulaciones, cuyo movimiento se relaciona de forma secuencial. En la mano, cada dedo puede considerarse una cadena cinemática conformada por falanges y articulaciones.
- **Segmento:** Porción del cuerpo que se analiza como una unidad durante el movimiento. En el estudio de la mano, un segmento puede corresponder a una falange, un dedo o una región anatómica delimitada por marcadores.
- **Oclusión:** Pérdida temporal de visibilidad de un marcador durante la captura de movimiento. Puede ocurrir cuando el marcador queda cubierto por otro segmento corporal, por un objeto o por la posición de la mano respecto a las cámaras.
- **Artefactos cutáneos:** Errores producidos por el movimiento de la piel y los tejidos blandos con respecto al hueso. Estos pueden afectar la precisión de la medición, debido a que los marcadores se colocan sobre la piel y no directamente sobre las estructuras óseas.
- **Calibración:** Proceso previo a la captura de movimiento mediante el cual se ajusta y verifica el sistema de medición. Permite definir el espacio de trabajo, los ejes de referencia y las condiciones necesarias para registrar los datos con mayor exactitud.
- **Trayectorias:** Recorridos que describen los marcadores o segmentos corporales en el espacio a lo largo del tiempo. Su análisis permite identificar cómo se desplaza una estructura durante la ejecución de un movimiento.
- **MCP:** Sigla de articulación metacarpofalángica. Corresponde a la articulación ubicada entre los huesos metacarpianos de la mano y la falange proximal de cada dedo. Participa en movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción.
- **PIP:** Sigla de articulación interfalángica proximal. Se encuentra entre la falange pro-

ximal y la falange media de los dedos. Participa principalmente en movimientos de flexión y extensión.

- **DIP:** Sigla de articulación interfalángica distal. Se encuentra entre la falange media y la falange distal de los dedos. Permite principalmente movimientos de flexión y extensión.
- **IP:** Sigla de articulación interfalángica. En el pulgar, corresponde a la articulación ubicada entre la falange proximal y la falange distal, debido a que este dedo no posee falange media.
- **CMC:** Sigla de articulación carpometacarpiana. Corresponde a la unión entre los huesos del carpo y los metacarpianos. Es especialmente importante en el pulgar, ya que permite movimientos funcionales como la oposición.
- **Prensi3n:** Acci3n de tomar, sujetar o agarrar un objeto con la mano. Involucra la coordinaci3n del pulgar, los dedos, la palma y las articulaciones para realizar actividades funcionales.
- **Goni3metro:** Instrumento utilizado para medir 3ngulos articulares. En el contexto cl3nico y biomec3nico, permite cuantificar el rango de movimiento de una articulaci3n en grados.

Resumen ejecutivo

El análisis tridimensional 3D es una herramienta importante para la evaluación objetiva de la función musculoesquelética en contextos clínicos, investigativos y de rehabilitación. Sin embargo, muchos laboratorios de análisis de movimiento se enfocan principalmente en el estudio de la marcha y los miembros inferiores, dejando una oportunidad de mejora en el análisis detallado de la mano y los dedos, estructuras que presentan alta complejidad anatómica y funcional debido a sus movimientos finos.

Actualmente, no se cuenta con un proceso estandarizado y adaptado a las condiciones del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Universidad Javeriana Cali que permita realizar de forma sistemática el análisis cinemático de la mano y los dedos. Esta falta de estandarización limita la reproducibilidad de las mediciones, dificulta la comparación entre estudios y reduce el aprovechamiento del laboratorio para aplicaciones orientadas a la rehabilitación.

El objetivo del proyecto es desarrollar y realizar una evaluación preliminar del proceso mediante pruebas piloto un proceso estandarizado para el análisis cinemático de la mano y los dedos, basado en literatura científica y ajustado a las condiciones técnicas y operativas del laboratorio. La estrategia propuesta integra un esquema de marcaje anatómico, la captura de movimiento con el sistema disponible y el procesamiento de datos para obtener variables cinemáticas relevantes.

Como resultado esperado, se plantea un prototipo funcional de proceso que permita realizar mediciones más organizadas, repetibles y útiles para futuros estudios clínicos, terapéuticos y de diseño de dispositivos biomédicos enfocados en miembros superiores.

Abstract

Three-dimensional (3D) motion analysis is an important tool for the objective evaluation of musculoskeletal function in clinical, research, and rehabilitation contexts. However, many motion analysis laboratories mainly focus on gait and lower limb studies, leaving an opportunity for improvement in the detailed analysis of the hand and fingers, structures characterized by high anatomical and functional complexity due to their fine movements.

Currently, there is no standardized process adapted to the conditions of the Motion Analysis Laboratory at Pontificia Universidad Javeriana Cali that allows the systematic kinematic analysis of the hand and fingers. This lack of standardization limits the reproducibility of measurements, complicates comparisons between studies, and reduces the laboratory's potential for rehabilitation-oriented applications.

The objective of this project is to develop and validate a standardized process for hand and finger kinematic analysis based on scientific literature and adapted to the technical and operational conditions of the laboratory. The proposed strategy integrates an anatomical marker placement scheme, motion capture using the available system, and data processing to obtain relevant kinematic variables.

As an expected result, a functional prototype of the process is proposed to enable more organized, repeatable, and useful measurements for future clinical, therapeutic, and biomedical device design studies focused on the upper limbs.

1. Fase de Análisis

1.1. Planteamiento del problema

El análisis del movimiento de manera tridimensional 3D es una de las nuevas herramientas que se usan para evaluar de manera objetiva la función músculo esquelética en las diversas áreas clínicas y de investigación; por eso, se buscan que los sistemas de captura del movimiento puedan registrar con alta precisión los complejos patrones de movilidad, incluyendo la motricidad fina de la mano y los dedos [1, 2]. Sin embargo, aunque existen marcos de referencia y recomendaciones internacionales para la definición de modelos biomecánicos y sistemas de coordenadas segmentarias, como los propuestos por la International Society of Biomechanics (ISB), estos lineamientos no constituyen por sí mismos un operativo estandarizado adaptado a las condiciones específicas de cada laboratorio. En el caso del análisis cinemático de la mano, la literatura reporta múltiples variaciones en la ubicación y número de marcadores, definición de segmentos y procedimientos de captura [1, 2, 3], lo que evidencia que, si bien existen modelos conceptuales estandarizados, no se dispone de un proceso metodológico unificado y validado específicamente para el Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali ni para su aplicación en un entorno clínico-formativo local.

En Colombia existen laboratorios de análisis de movimiento equipados con sistemas de captura de alta precisión, como los utilizados por MovyLab en el Hospital Infantil Universitario de San José [4], la Universidad de los Andes [5], la Universidad Autónoma de Manizales [6], el Centro de Ciencias del Deporte del Ministerio del Deporte [7] y la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Sin embargo, gran parte de estos espacios han orientado sus aplicaciones principalmente al estudio de la marcha, el análisis de miembros inferiores y la evaluación general del movimiento humano. Aunque pueden existir iniciativas o procesos desarrollados en algunos contextos académicos o de investigación para el análisis de la mano, no se evidencia la disponibilidad de un proceso estandarizado y validado específicamente adaptado a las condiciones operativas del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Esta situación limita el aprovechamiento integral de la infraestructura instalada para la evaluación detallada de los movimientos de la mano y los dedos en el entorno local.

Según la literatura científica, se han propuesto diversos modelos biomecánicos y metodo-

logías de análisis cinemático de la mano; sin embargo, estos presentan variaciones significativas en la ubicación y número de marcadores, la definición de sistemas de referencia segmentarios y los métodos para el cálculo de ángulos articulares [1] [2] [3]. Aunque algunos lineamientos generales, como los recomendados por la International Society of Biomechanics, buscan estandarizar la definición de segmentos y sistemas de coordenadas, la implementación práctica de estos modelos depende en gran medida de las condiciones técnicas y configuraciones específicas de cada laboratorio. Esta heterogeneidad metodológica dificulta la comparación directa entre estudios y limita la transferencia de procesos a contextos institucionales particulares.

1.1.1. Pregunta de investigación

¿Cómo se puede desarrollar e implementar un proceso estandarizado que permita realizar el análisis cinemático tridimensional de la mano y los dedos de manera precisa y repetible, adaptado a las condiciones técnicas del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, y evaluar el proceso mediante pruebas piloto y comparación descriptiva con mediciones goniométricas de referencia, validado mediante el análisis del error intra-sesión en la medición del rango de movimiento articular?

Pregunta de investigación

¿Cómo se puede desarrollar e implementar un proceso estandarizado para el análisis cinemático tridimensional de la mano y los dedos, adaptado a las condiciones técnicas del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, y evaluar preliminarmente su repetibilidad mediante pruebas piloto, comparación descriptiva con mediciones goniométricas de referencia y análisis del error intra-sesión?

1.2. Justificación

El análisis tridimensional (3D) del movimiento representa una herramienta de alto valor para la cuantificación objetiva de la función musculoesquelética, especialmente en procesos de rehabilitación y seguimiento clínico. En el caso específico de la mano, la posibilidad de medir con precisión rangos articulares, patrones de coordinación digital y desempeño funcional permite complementar las evaluaciones clínicas tradicionales, que suelen basarse en escalas cualitativas o apreciaciones subjetivas. Contar con un proceso estructurado de

análisis cinemático podría facilitar la obtención de datos cuantitativos confiables, contribuyendo a una toma de decisiones terapéutica más fundamentada y a un seguimiento más preciso de la evolución del paciente. [8]

Las lesiones y alteraciones que afectan la mano pueden generar limitaciones significativas en la capacidad para realizar actividades de la vida diaria, tareas laborales y actividades de autocuidado, impactando negativamente la funcionalidad y la calidad de vida de los individuos. Estudios epidemiológicos han reportado que las lesiones de la mano constituyen una causa frecuente de atención médica y pueden ocasionar discapacidad funcional, restricciones en la participación social y dificultades para el retorno a las actividades habituales. En este contexto, la rehabilitación desempeña un papel fundamental en la recuperación de la movilidad, la destreza manual y la funcionalidad, por lo que resulta necesario contar con herramientas objetivas que permitan evaluar el movimiento y monitorear la evolución de los pacientes durante los procesos terapéuticos. [9, 10, 11]

A pesar de su importancia funcional y clínica, la evaluación del movimiento de la mano continúa representando un reto debido a la gran cantidad de articulaciones involucradas, los múltiples grados de libertad presentes y el reducido tamaño de sus segmentos anatómicos. Tradicionalmente, la valoración de la movilidad de la mano se ha realizado mediante observaciones clínicas y mediciones manuales, las cuales pueden estar sujetas a variabilidad entre evaluadores. En este contexto, el análisis tridimensional del movimiento permite obtener información objetiva y cuantificable sobre el comportamiento articular de la mano y los dedos, contribuyendo a una evaluación más precisa de la función motora, al seguimiento de procesos de rehabilitación y a la valoración de intervenciones terapéuticas o quirúrgicas. [1, 12]

Sin embargo, factores como la ubicación de marcadores, la definición de modelos cinemáticos y la estimación de parámetros específicos generan variabilidad significativa entre investigaciones, lo que afecta la validez y confiabilidad de los resultados. En el caso de la mano, las dificultades se acentúan debido al reducido espacio anatómico, la movilidad de la piel y la complejidad biomecánica del pulgar, lo que resalta la necesidad de diseñar y validar procesos específicos que permitan cuantificar el rango de movimiento y otros parámetros funcionales relevantes. [2, 3]

En este contexto, el laboratorio de análisis de movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, equipado con tecnología de captura de alta precisión, representa un entorno propicio para implementar y aplicar un proceso estandarizado orientado al análisis

cinemático de la mano y los dedos. Este proyecto no solo fortalecerá la capacidad investigativa, sino que podría abrir la posibilidad de desarrollar evaluaciones más objetivas en pacientes sometidos a procesos de rehabilitación y tratamiento quirúrgico.

De esta manera, la adaptación de metodologías validadas en la literatura científica a las condiciones técnicas y operativas del laboratorio universitario permitirá aportar una herramienta útil, confiable y transferible tanto para la investigación como para la práctica clínica, contribuyendo a mejorar la calidad de la evaluación funcional de la mano en el ámbito local y regional.

Con este proyecto se busca establecer una base metodológica para el análisis cinemático de la mano y los dedos mediante un proceso estructurado de captura y procesamiento de movimiento. La disponibilidad de este proceso podría facilitar, en futuros estudios, la cuantificación objetiva de variables cinemáticas relacionadas con el rango de movimiento y la ejecución de tareas funcionales. Asimismo, constituye una herramienta con potencial aplicación en contextos de investigación y rehabilitación, donde la información obtenida podría complementar los procesos de evaluación y seguimiento funcional de la mano.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

Implementar un proceso que permita realizar el análisis cinemático tridimensional de la mano y los dedos, basado en metodologías previamente validadas en la literatura científica, y ajustado a las condiciones técnicas y operativas del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Objetivos específicos:

- Identificar los procesos existentes de análisis cinemático de la mano y los dedos, reconociendo las tecnologías, modelos biomecánicos y metodologías de marcaje más utilizadas y validadas en entornos clínicos y de investigación.
- Adaptar un sistema de marcadores enfocado a la anatomía de la mano que garantice visibilidad, consistencia y comodidad durante la captura de los movimientos definidos.
- Aplicar un proceso adaptado para realizar la captura y el análisis cinemático de la

mano, considerando la disposición de los equipos, los marcadores y el procedimiento de medición con los que cuenta el laboratorio.

- Evaluar de forma preliminar el proceso mediante el análisis de las mediciones cinemáticas y del error intra-sesión, con el fin de identificar la consistencia de las mediciones del rango de movimiento de la mano y los dedos.

1.4. Estado del arte

1.4.1. Anatomía funcional de la mano y los dedos

La mano humana constituye una de las estructuras anatómicas y funcionales más complejas del cuerpo humano, debido a su capacidad para ejecutar una amplia variedad de tareas motoras que requieren tanto fuerza como precisión. Su diseño anatómico especializado le permite participar en actividades funcionales esenciales como la prensión, manipulación de objetos, escritura, comunicación gestual y ejecución de movimientos finos coordinados. Esta elevada capacidad funcional es el resultado de la interacción coordinada entre estructuras óseas, articulares, musculares, tendinosas, ligamentarias y neurológicas, las cuales actúan de manera integrada para producir movimientos precisos y controlados de la muñeca, la palma y los dedos. [13, 14, 15]

Desde el punto de vista biomecánico, la mano puede considerarse como un sistema altamente articulado compuesto por múltiples segmentos móviles interdependientes. La organización estructural de sus componentes permite combinar estabilidad y movilidad, características fundamentales para la adaptación de la mano a diferentes tareas funcionales. Debido a esta complejidad anatómica y funcional, la mano representa una región de gran interés dentro de los estudios biomecánicos y cinemáticos orientados al análisis del movimiento humano. [16]

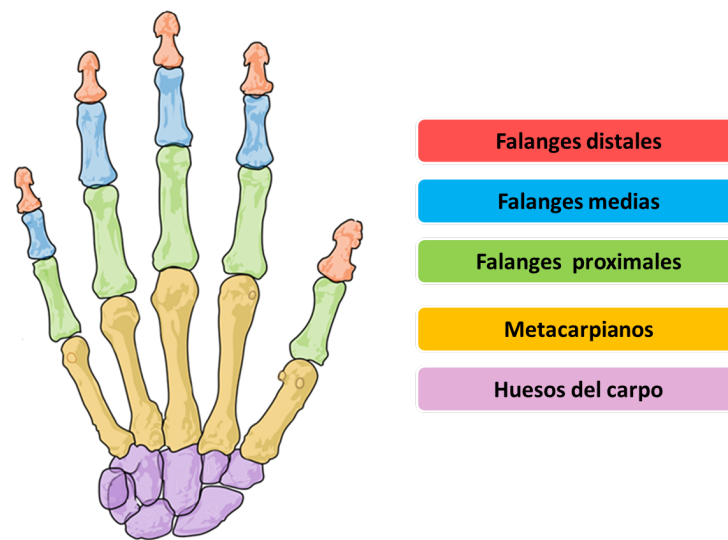


Figura 1: Huesos de la mano. Tomado de [17]

Desde el punto de vista óseo, la mano está conformada por 27 huesos distribuidos en tres regiones anatómicas principales: carpo, metacarpo y falanges. El carpo está compuesto por ocho huesos organizados en dos filas, los cuales conforman la base estructural de la muñeca y permiten la conexión entre la mano y el antebrazo. Esta región desempeña un papel fundamental en la transmisión y distribución de fuerzas durante la ejecución del movimiento, además de proporcionar estabilidad y flexibilidad al complejo articular de la muñeca. [14, 18]

El metacarpo está constituido por cinco huesos largos que forman la estructura de la palma de la mano y sirven como soporte para los movimientos de los dedos. Cada metacarpiano se articula proximalmente con los huesos del carpo y distalmente con las falanges proximales, permitiendo la movilidad coordinada de los dedos durante actividades funcionales. Por su parte, las falanges conforman los segmentos óseos de los dedos y se organizan en falanges proximales, medias y distales; con excepción del pulgar, el cual presenta únicamente dos falanges. Estas estructuras permiten movimientos independientes y coordinados que contribuyen significativamente a la destreza manual y a la capacidad de adaptación de la mano frente a diferentes tipos de tareas. [14, 18]

El pulgar presenta una organización anatómica y funcional diferenciada respecto a los demás dedos debido a la orientación particular de su primer metacarpiano y a la configuración de la articulación carpometacarpiana (CMC). Esta articulación, de tipo silla de

montar, proporciona un elevado grado de libertad de movimiento y permite movimientos en múltiples planos, incluyendo flexión, extensión, abducción, aducción y oposición. A diferencia de los demás dedos, el primer metacarpiano presenta rotación aproximadamente de 90° con respecto a los demás metacarpianos, lo que le permite posicionarse frente a los otros dedos y establecer contacto pulpejo a pulpejo durante las tareas de prensión y manipulación. Esta disposición anatómica favorece la ejecución de agarres de precisión y constituye una de las características funcionales más distintivas de la mano humana. La capacidad de oposición del pulgar permite interactuar eficazmente con los demás dedos durante actividades de prensión, manipulación y control de objetos. [8, 16]

Las principales articulaciones involucradas en el movimiento de la mano y los dedos incluyen las articulaciones metacarpofalángicas (MCP), interfalángicas proximales (PIP), interfalángicas distales (DIP), carpometacarpianas (CMC) y la articulación radiocarpiana de la muñeca. Las articulaciones metacarpofalángicas permiten movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción, mientras que las articulaciones interfalángicas funcionan principalmente como articulaciones de tipo bisagra, permitiendo movimientos de flexión y extensión. Estas estructuras proporcionan los grados de movilidad necesarios para la ejecución de tareas funcionales cotidianas y constituyen elementos fundamentales en los estudios de análisis cinemático de la mano. [18, 15]

Desde el punto de vista funcional, los movimientos más relevantes de los dedos corresponden a la flexión y extensión, que se desarrollan principalmente en el plano sagital alrededor de un eje mediolateral, así como a la abducción y aducción, que ocurren principalmente en el plano frontal alrededor de un eje anteroposterior, especialmente a nivel de las articulaciones metacarpofalángicas. En los dedos largos, los movimientos de abducción y aducción se realizan con respecto al eje funcional de la mano, definido por el tercer dedo y el tercer metacarpiano. Por esta razón, durante estos movimientos el dedo medio permanece relativamente estable mientras los demás dedos se aproximan o se separan de dicho eje. En el caso del pulgar, la disposición anatómica de la articulación carpometacarpiana permite movimientos adicionales como oposición y reposición, los cuales resultan esenciales para la ejecución de patrones de prensión de precisión y manipulación fina de objetos. [8, 16]

La combinación coordinada de estos movimientos permite la realización de diferentes tipos de agarre, incluyendo agarres de fuerza y agarres de precisión, considerados fundamentales para actividades funcionales de la vida diaria. Debido a ello, las articulaciones de la mano y los dedos representan estructuras de especial interés dentro de los estudios biomecánicos

orientados a la cuantificación del movimiento humano. [8]

La funcionalidad de la mano también depende de una compleja organización muscular compuesta por músculos intrínsecos y extrínsecos. Los músculos intrínsecos se encuentran localizados dentro de la propia mano y participan principalmente en movimientos finos y precisos de los dedos, contribuyendo al control motor detallado y a la coordinación durante actividades funcionales. Entre los músculos intrínsecos más relevantes se encuentran los interóseos dorsales y palmares, responsables principalmente de los movimientos de abducción y aducción de los dedos, así como los músculos lumbricales, que contribuyen a la flexión de las articulaciones metacarpofalángicas y a la extensión de las articulaciones interfalángicas. Estas estructuras desempeñan un papel fundamental en el control motor fino y en la coordinación de movimientos precisos de la mano. [13, 15]

Por otra parte, los músculos extrínsecos se originan en el antebrazo y actúan sobre la mano mediante tendones largos que atraviesan la muñeca. Entre los principales músculos extrínsecos involucrados en el movimiento de los dedos se encuentran el flexor superficial de los dedos, el flexor profundo de los dedos y el extensor común de los dedos, responsables de gran parte de los movimientos de flexión y extensión evaluados en estudios cinemáticos de la mano. Estos músculos generan movimientos de mayor amplitud y fuerza, permitiendo acciones funcionales como la flexión y extensión de los dedos y de la muñeca. [13, 15]

Los tendones cumplen un papel fundamental en la transmisión de fuerzas desde los músculos hacia las estructuras óseas, mientras que los ligamentos contribuyen a mantener la estabilidad articular y a limitar movimientos excesivos que puedan comprometer la integridad de las articulaciones durante la ejecución del movimiento. Adicionalmente, la mano posee una extensa red vascular y un sistema de inervación altamente especializado que permite el adecuado suministro sanguíneo y el control sensorial y motor de sus estructuras. La inervación sensitiva proporciona información táctil y propioceptiva esencial para la percepción del entorno y la regulación del movimiento, mientras que la inervación motora permite la activación coordinada de los músculos responsables de la ejecución de tareas funcionales complejas. Estas características convierten a la mano en una estructura fundamental para la interacción del ser humano con el entorno y para la realización de actividades de la vida diaria. [13, 15]

En conjunto, la organización anatómica y funcional de la mano refleja una estrecha relación entre estructura y función, permitiendo la ejecución de movimientos altamente coordinados y adaptativos. Debido a ello, el estudio detallado de sus componentes anatómicos

constituye una base fundamental para el desarrollo de análisis biomecánicos y cinemáticos orientados a la comprensión del movimiento manual, así como para aplicaciones relacionadas con rehabilitación, evaluación funcional y desarrollo de tecnologías biomédicas enfocadas en el miembro superior. [16]

1.4.2. Biomecánica del movimiento de la mano

Desde el punto de vista biomecánico, la mano humana puede describirse como un sistema músculo-esquelético altamente complejo, conformado por múltiples segmentos rígidos interconectados mediante articulaciones que poseen diferentes grados de libertad y permiten una amplia variedad de movimientos funcionales. Esta estructura anatómica especializada le proporciona a la mano la capacidad de ejecutar tareas de precisión, prensión, manipulación y coordinación motora fina, convirtiéndola en una de las regiones con mayor complejidad funcional dentro del sistema musculoesquelético humano. Debido a esta complejidad, el análisis biomecánico de la mano requiere considerar la interacción coordinada entre huesos, articulaciones y segmentos anatómicos durante la ejecución del movimiento.

En términos cinemáticos, cada dedo puede modelarse como una cadena cinemática articulada, en la cual las falanges actúan como segmentos rígidos conectados entre sí mediante articulaciones que funcionan como puntos de rotación. Este modelo permite representar y analizar de manera estructurada los movimientos realizados por cada dedo durante la ejecución de tareas funcionales específicas. A partir de esta representación biomecánica, es posible evaluar variables asociadas al movimiento articular, como ángulos, rangos de movimiento y comportamiento segmentario, permitiendo así una descripción más precisa de la funcionalidad de la mano.

Las articulaciones interfalángicas proximales y distales presentan principalmente un comportamiento biomecánico tipo bisagra, permitiendo movimientos de flexión y extensión sobre un eje predominante. Por otra parte, las articulaciones metacarpofalángicas poseen una mayor complejidad funcional, ya que además de los movimientos de flexión y extensión, permiten movimientos de abducción y aducción que contribuyen a la capacidad de adaptación de la mano frente a diferentes tareas motoras. Esta combinación de movimientos favorece la ejecución coordinada de actividades funcionales y el ajuste de la postura de los dedos durante la interacción con objetos.

Nombre de la articulación	Componentes articulares	Tipo/ Clasificación	Movimientos
Radiocarpiana (muñeca)	Polo distal del radio y zonas proximales del escafoides, semilunar y piramidal	Condilea	Flexión, extensión, abducción (desviación radial), aducción (desviación cubital) y circunducción
Intercarpianas y medio carpianas	Carillas subyacentes entre los huesos del carpo	Artrodia	Deslizamiento
Intercarpianas	Carillas articulares entre el escafoides, semilunar y hueso grande	Encaje recíproco	Deslizamiento
Carpometacarpiana	Zonas distales del trapezoide, hueso grande y hueso ganchoso, y bases de los metacarpianos	Artrodia	Deslizamiento
Trapezio metacarpiana	Porción distal del trapecio y base del primer hueso metacarpiano	Encaje recíproco	Flexión, extensión, abducción, aducción y circunducción
Metacarpofalángica	Cabezas de los huesos metacarpianos y bases de las falanges proximales.	Condilea	Flexión, extensión, abducción, aducción y circunducción
Interfalángica	Porciones distales de las falanges más proximales y bases de las falanges más distales	Troclear	Flexión y extensión

Figura 2: Articulaciones y movimientos de la mano. Tomado de [15]

Adicionalmente, el pulgar representa una de las estructuras más importantes y complejas desde el punto de vista biomecánico, debido a su configuración anatómica particular y a la gran cantidad de movimientos que puede realizar. Sus articulaciones permiten movimientos tridimensionales que incluyen flexión, extensión, abducción, aducción y oposición, siendo este último fundamental para las funciones de prensión y manipulación fina. Gracias a estas características, el pulgar desempeña un papel esencial en la funcionalidad global de la mano y en la realización de actividades que requieren precisión y coordinación motora. [8, 13, 14]

Articulación	Movimiento evaluado	Rango de movimiento (°)
Metacarpofalángicas (MCP) dedos 2-5	Flexión	85° - 90°
	Extensión	30° - 45°
	Abducción	20° - 30°
	Aducción	0°
Interfalángica proximal (PIP)	Flexión	100° - 115°
	Extensión	70° - 90°
Interfalángica Distal (DIP)	Flexión	80° - 90°
	Extensión	20°
Carpometacarpiana del pulgar (CMC)	Flexión / Abducción durante oposición	45° - 50°
Metacarpofalángica del pulgar (MCP)	Flexión	50° - 55°
Interfalángica del pulgar (IP)	Flexión	85° - 90°

Cuadro 1: Rangos de movimiento articular de la mano [19]

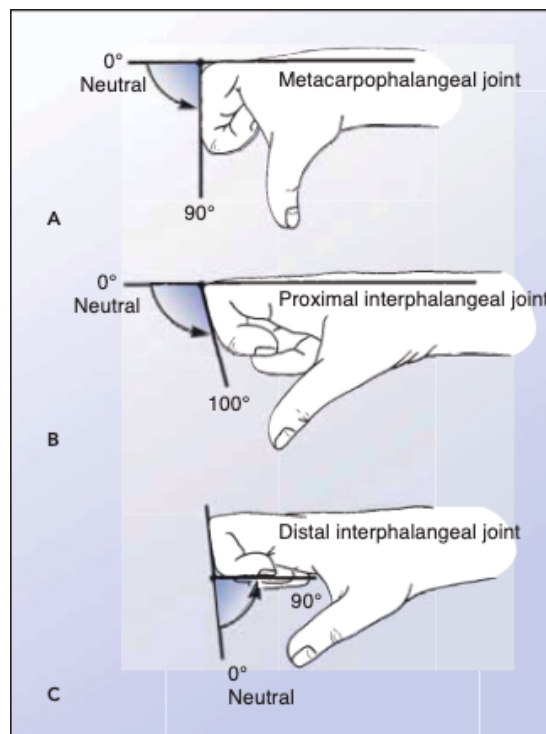


Figura 3: Flexión de MCP, PIP, DIP. Tomado de [16]

El análisis biomecánico del movimiento de la mano permite comprender cómo se distribuyen las fuerzas durante la prensión, cómo interactúan los diferentes segmentos y cómo se generan patrones de movimiento funcionales. Esta comprensión es fundamental para aplicaciones clínicas, rehabilitadoras y tecnológicas, y constituye la base para el posterior análisis cinemático del movimiento manual.

1.4.3. Análisis cinemático del movimiento de la mano

El análisis tridimensional (3D) del movimiento ha demostrado ser una herramienta poderosa para cuantificar la función músculo-esquelética. En las extremidades superiores y, en particular, en la mano, la posibilidad de registrar movimientos finos con alta resolución ha impulsado su uso tanto en investigación como en el ámbito clínico, incluyendo la evaluación pre y postoperatoria, la rehabilitación y los estudios funcionales. [3]

El análisis cinemático se centra en la descripción del movimiento sin considerar las fuerzas que lo generan, evaluando variables como posiciones, trayectorias, velocidades, aceleraciones y ángulos articulares. Sin embargo, la complejidad anatómica de la mano introduce

desafíos significativos, ya que la cercanía entre articulaciones, la superposición de estructuras y el desplazamiento de la piel con respecto al hueso dificultan la medición precisa del movimiento. [8, 20]

Los sistemas de captura óptica del movimiento registran las coordenadas tridimensionales de los marcadores ubicados sobre segmentos anatómicos específicos. A partir de estas coordenadas es posible calcular variables cinemáticas como desplazamientos, trayectorias, velocidades, aceleraciones y ángulos articulares, las cuales permiten describir cuantitativamente el comportamiento del movimiento humano. En el caso de la mano, estas variables constituyen la base para la evaluación objetiva de la movilidad articular y la ejecución de tareas funcionales, permitiendo caracterizar el movimiento de los dedos y su coordinación durante diferentes actividades [1, 3].

Desde el punto de vista del modelado biomecánico, la mano puede representarse como un sistema mecánico compuesto por múltiples segmentos rígidos conectados mediante articulaciones. En este tipo de representación, cada dedo se considera una cadena cinemática abierta, donde las falanges actúan como eslabones y las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas funcionan como puntos de rotación. La muñeca suele tomarse como sistema de referencia proximal, a partir del cual se describe la posición y orientación de los dedos durante la ejecución de diferentes gestos funcionales. [21]

La complejidad del modelo cinemático depende del nivel de detalle requerido por el estudio. Algunos modelos simplificados reducen los grados de libertad para facilitar el análisis, mientras que otros modelos más detallados consideran múltiples grados de libertad con el fin de representar movimientos como flexión, extensión, abducción, aducción y oposición. En la literatura se han reportado modelos de mano con 21, 24 y hasta 28 grados de libertad, lo que evidencia la complejidad anatómica y funcional de esta estructura. [21]

En estudios teóricos y de modelado computacional, una de las metodologías utilizadas para describir la cinemática de los dedos es la convención de Denavit-Hartenberg, la cual permite establecer relaciones geométricas entre segmentos mediante matrices de transformación homogénea. Este enfoque facilita la descripción matemática de la posición y orientación de cada falange respecto a una base de referencia, generalmente ubicada en la muñeca. [21]

En el análisis cinemático de la mano se deben tener en cuenta los ángulos articulares, ya que son una de las variables más relevantes, porque permiten cuantificar el comportamiento funcional de las articulaciones durante tareas específicas. En particular, los estudios se

centran en la medición de los ángulos de extensión y flexión de las articulaciones interfalángicas y metacarpofalángicas, así como los movimientos de abducción y aducción en estas últimas [8, 20]. En el pulgar el análisis cinemático requiere considerar su movimiento tridimensional, debido a su papel en la oposición, la pinza y los agarres funcionales. A diferencia de los dedos largos, el pulgar presenta una configuración anatómica que permite movimientos combinados y tridimensionales, por lo que algunos estudios lo modelan como una cadena cinemática específica. En este sentido, Oropesa Rodríguez et al. analizaron el movimiento de flexión-extensión del dedo pulgar mediante un mecanismo de palanca, definiéndolo como una cadena cinemática de tres grados de libertad para estudiar variables como posición, velocidad y aceleración durante el movimiento. [22]

La literatura reporta una heterogeneidad metodológica considerable en los estudios de análisis cinemático de la mano. Diferentes esquemas de marcaje, modelos cinemáticos, sistemas de captura y tareas funcionales dificultan la comparación directa de resultados y la generalización de los hallazgos. Esta falta de estandarización representa una limitante importante para consolidar la evidencia clínica y establecer valores normativos fiables. [23]

1.4.4. Sistemas de captura del movimiento

Para el análisis cinemático del movimiento de la mano se han desarrollado diversos sistemas de captura del movimiento, cada uno con ventajas y limitaciones específicas.

Sistemas ópticos con marcadores: Los sistemas ópticos con marcadores son ampliamente utilizados en estudios biomecánicos y de análisis de movimiento debido a su alta precisión espacial y temporal en la captura de datos cinemáticos. Estos sistemas emplean cámaras especializadas capaces de detectar marcadores reflectivos ubicados sobre puntos anatómicos específicos del cuerpo, permitiendo reconstruir tridimensionalmente el movimiento de los diferentes segmentos corporales durante la ejecución de tareas funcionales. Debido a sus características técnicas, son considerados el estándar de referencia dentro de los laboratorios de análisis de movimiento y en investigaciones relacionadas con biomecánica humana.

Una de las principales ventajas de estos sistemas radica en su capacidad para obtener mediciones con alta resolución espacial y elevadas frecuencias de muestreo, lo que permite registrar movimientos rápidos y complejos con un alto nivel de precisión. Asimismo,

posibilitan la reconstrucción tridimensional de trayectorias y segmentos anatómicos, facilitando el cálculo de variables cinemáticas como desplazamientos, velocidades, aceleraciones y ángulos articulares. Estas características han favorecido su implementación en estudios clínicos, deportivos, de rehabilitación y análisis funcional del movimiento humano.

Sin embargo, a pesar de su elevada precisión, los sistemas ópticos con marcadores presentan ciertas limitaciones prácticas y operativas. Entre estas limitaciones se encuentran el alto costo de adquisición e implementación de los equipos, la necesidad de contar con un volumen de captura controlado y calibrado, y la dependencia de condiciones específicas de iluminación y disposición de cámaras para garantizar una correcta detección de los marcadores.

Adicionalmente, durante la captura de movimientos complejos de la mano y los dedos, pueden presentarse fenómenos de oclusión de marcadores, especialmente debido a la cercanía entre segmentos anatómicos y a la superposición de estructuras durante determinados movimientos funcionales. Asimismo, estos sistemas pueden verse afectados por artefactos asociados al movimiento de la piel con respecto al hueso, lo que puede introducir errores en la estimación del movimiento articular y en la reconstrucción cinemática de los segmentos analizados. [19]

Sistemas inerciales Los sistemas inerciales de captura de movimiento están basados en el uso de unidades de medición inercial (IMUs, por sus siglas en inglés), las cuales integran sensores como acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para registrar y estimar el movimiento de los diferentes segmentos corporales. Estos sistemas permiten medir variables relacionadas con aceleración lineal, velocidad angular y orientación espacial, convirtiéndose en una alternativa ampliamente utilizada en aplicaciones de análisis biomecánico, rehabilitación, monitoreo funcional y estudios de movimiento humano.

Una de las principales ventajas de los sistemas inerciales es su portabilidad y facilidad de implementación en diferentes entornos, ya que no requieren un espacio de captura controlado ni una configuración compleja de cámaras externas. Gracias a esto, pueden utilizarse tanto dentro como fuera del laboratorio, permitiendo la evaluación del movimiento en escenarios más naturales y funcionales. Adicionalmente, el tamaño reducido de las IMUs facilita su integración en dispositivos portátiles, guantes instrumentados o estructuras de fijación pequeñas, favoreciendo su aplicación en el análisis del movimiento de la mano y los dedos.

Desde el punto de vista práctico, estos sistemas ofrecen una mayor libertad de movimiento para el participante y reducen problemas asociados a la oclusión de marcadores presentes en los sistemas ópticos. Asimismo, su implementación suele requerir menores costos operativos y una infraestructura menos compleja en comparación con los sistemas ópticos de captura de movimiento. Estas características han favorecido su utilización en aplicaciones clínicas, deportivas y de monitoreo continuo del movimiento humano.

Sin embargo, los sistemas inerciales también presentan limitaciones importantes relacionadas con la precisión y estabilidad de las mediciones obtenidas. Uno de los principales desafíos corresponde al fenómeno de *drift*, el cual genera acumulación progresiva de errores durante la integración de las señales de aceleración y velocidad angular, afectando especialmente las estimaciones de posición y orientación a largo plazo. De igual manera, los magnetómetros pueden verse afectados por perturbaciones magnéticas presentes en el entorno, lo que puede introducir errores adicionales en la estimación de la orientación espacial.

Debido a estas limitaciones, el procesamiento de la información obtenida mediante IMUs requiere la implementación de algoritmos de fusión sensorial robustos, capaces de combinar adecuadamente la información proveniente de los diferentes sensores para mejorar la precisión y estabilidad de las mediciones. En los últimos años se han desarrollado múltiples estrategias de procesamiento orientadas a reducir errores y optimizar el rendimiento de estos sistemas, logrando aproximarse al desempeño de los sistemas ópticos en determinadas variables cinemáticas, especialmente aquellas relacionadas con orientación y velocidad angular. No obstante, las mediciones de posición absoluta y aceleración continúan presentando mayores niveles de ruido e incertidumbre en comparación con los sistemas ópticos de captura de movimiento. [1]

Guantes instrumentados Los guantes instrumentados constituyen una de las tecnologías más utilizadas para la captura y medición del movimiento de la mano y los dedos, debido a su capacidad para registrar directamente los movimientos articulares mediante sensores integrados en una estructura portátil. Estos dispositivos incorporan sensores flexibles, potenciómetros, sensores resistivos o tecnologías hápticas que permiten medir la flexión y extensión de las articulaciones de los dedos durante la ejecución de tareas funcionales. Sistemas como el *CyberGlove* han sido ampliamente empleados en aplicaciones relacionadas con biomecánica, rehabilitación, realidad virtual, robótica y análisis funcional

de la mano.

Una de las principales ventajas de los guantes instrumentados radica en su facilidad de uso y en la posibilidad de obtener mediciones articulares sin necesidad de sistemas externos de captura, como cámaras ópticas o espacios de calibración especializados. Gracias a esto, permiten realizar adquisiciones de movimiento de manera rápida y portátil, favoreciendo su implementación en entornos clínicos y de investigación donde se requiere una instrumentación menos compleja. Adicionalmente, estos sistemas facilitan el registro simultáneo de múltiples movimientos articulares de los dedos y del pulgar, permitiendo analizar patrones de movilidad durante la ejecución de diferentes tareas funcionales.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas operativas, diversos estudios han reportado discrepancias significativas entre las mediciones obtenidas mediante guantes instrumentados y las mediciones anatómicas de referencia, especialmente en articulaciones distales y movimientos complejos de los dedos. Estas diferencias pueden estar asociadas a problemas relacionados con el ajuste del guante sobre la mano del usuario, variaciones anatómicas entre individuos, desplazamientos de los sensores durante el movimiento y errores derivados de los procesos de calibración. Debido a ello, la comodidad y facilidad de uso de estos dispositivos no siempre se traduce en una alta precisión biomecánica, particularmente en aplicaciones donde se requiere un análisis detallado y preciso del movimiento articular.

[15]

En Colombia también se han desarrollado propuestas orientadas a la medición automática de la movilidad articular de la mano mediante guantes de datos. Galán et al. desarrollaron un sistema basado en un guante háptico capaz de captar la angulación en flexión y extensión de las articulaciones de los dedos, procesar la información mediante hardware especializado y transmitir los datos a un software para generar representaciones tridimensionales y gráficas útiles en el seguimiento clínico de patologías de la mano. Este tipo de propuestas demuestra el interés creciente por implementar tecnologías portátiles para la evaluación funcional del movimiento manual y el monitoreo de procesos de rehabilitación.

[12]

A pesar de ello, la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos mediante guantes instrumentados continúa dependiendo de diferentes factores técnicos y biomecánicos, entre los cuales se incluyen la adecuada calibración del sistema, el correcto posicionamiento de los sensores y el ajuste del guante a las características anatómicas de cada usuario. Estas limitaciones representan un desafío importante para la obtención de mediciones

consistentes y reproducibles, especialmente en estudios biomecánicos orientados al análisis detallado de los movimientos de la mano y los dedos.

Sistemas sin marcadores: Los sistemas de captura de movimiento sin marcadores (*markerless*) han adquirido una creciente relevancia en los últimos años debido a los avances en visión por computador, inteligencia artificial y sensores de profundidad. A diferencia de los sistemas ópticos tradicionales, estos métodos no requieren la colocación de marcadores físicos sobre el cuerpo del participante, ya que el seguimiento del movimiento se realiza mediante algoritmos capaces de identificar y rastrear automáticamente características anatómicas visibles de la mano y los dedos a partir de imágenes o secuencias de video.

Estos sistemas utilizan cámaras RGB, sensores de profundidad y modelos computacionales entrenados para detectar estructuras anatómicas específicas, como la palma de la mano, las articulaciones y las puntas de los dedos, permitiendo estimar la posición y orientación de los segmentos corporales en tiempo real. Gracias a ello, los sistemas *markerless* ofrecen una alternativa menos invasiva y más cómoda para el usuario, reduciendo la necesidad de preparación previa y eliminando problemas asociados a la colocación, desprendimiento u oclusión de marcadores físicos durante la captura del movimiento.

Una de las principales ventajas de esta tecnología radica en su facilidad de implementación y en la posibilidad de realizar análisis del movimiento en entornos más naturales y menos controlados. Asimismo, estos sistemas favorecen la reducción del tiempo de preparación experimental y permiten una interacción más libre por parte del participante durante la ejecución de tareas funcionales. Debido a estas características, los sistemas sin marcadores han comenzado a implementarse en aplicaciones relacionadas con rehabilitación, interfaces humano-computador, realidad virtual, robótica y monitoreo funcional del movimiento humano.

Adicionalmente, algunos estudios han demostrado que ciertos sistemas *markerless* son capaces de realizar estimaciones de posición y velocidad de la mano con niveles de precisión cercanos a los obtenidos mediante sistemas ópticos comerciales de captura de movimiento. Esto ha favorecido su creciente interés dentro del campo biomecánico y clínico, especialmente en aplicaciones donde se busca reducir la invasividad del procedimiento y simplificar las condiciones experimentales. [19]

Sin embargo, a pesar de los avances recientes, estos sistemas todavía presentan limitacio-

nes importantes relacionadas con la precisión y confiabilidad de las mediciones obtenidas, particularmente en movimientos complejos de la mano y los dedos. Factores como variaciones en la iluminación, oclusiones parciales, superposición entre dedos y limitaciones en la resolución espacial de las cámaras pueden afectar la capacidad de detección y seguimiento de estructuras anatómicas pequeñas.

De igual manera, la validación biomecánica completa de estos sistemas aún es limitada, especialmente en aplicaciones orientadas al cálculo preciso de ángulos articulares de pequeñas articulaciones durante movimientos dinámicos y funcionales. Debido a ello, aunque los sistemas sin marcadores representan una alternativa prometedora para el análisis del movimiento humano, todavía existen desafíos asociados a la precisión, robustez y reproducibilidad de las mediciones obtenidas en comparación con tecnologías ópticas tradicionales.

1.4.5. Protocolos existentes para análisis cinemático de la mano

El desarrollo de protocolos para el análisis cinemático de la mano constituye un aspecto fundamental dentro de los estudios biomecánicos orientados a la evaluación del movimiento humano, debido a que la precisión y reproducibilidad de las mediciones dependen directamente de la correcta definición del esquema de marcaje y del modelo biomecánico utilizado. La mano presenta características anatómicas y funcionales que representan un desafío importante para la captura y análisis del movimiento, entre las cuales se incluyen el reducido tamaño de los segmentos óseos, la proximidad entre estructuras anatómicas, la presencia de tejido blando y la complejidad de los movimientos tridimensionales realizados durante tareas funcionales.

Debido a estas características, diversos estudios han evidenciado la búsqueda constante de estrategias que permitan equilibrar la precisión biomecánica y la viabilidad experimental de los protocolos de captura [2, 3]. En este contexto, la selección del número y distribución de marcadores sobre cada segmento anatómico se convierte en un aspecto crítico, ya que influye directamente en la estimación de orientaciones segmentarias, cálculo de ángulos articulares y estabilidad de las mediciones obtenidas. Como resultado, diferentes investigaciones han propuesto protocolos basados en uno, dos o tres marcadores por segmento, comúnmente denominados FM1, FM2 y FM3 respectivamente, cada uno con ventajas, limitaciones y aplicaciones particulares según los objetivos del análisis y las condiciones experimentales [2].

– Protocolo FM1: Un marcador por segmento

Los protocolos FM1 se caracterizan por emplear un único marcador reflectivo por cada segmento anatómico de la mano. Generalmente, estos marcadores se ubican sobre prominencias óseas cercanas a las articulaciones, con el objetivo de representar el comportamiento cinemático de cada segmento durante la ejecución del movimiento. La principal ventaja de este tipo de esquemas radica en su simplicidad y rapidez de implementación, ya que requieren un número reducido de marcadores y disminuyen considerablemente el tiempo de preparación del participante.

Debido a estas características, los protocolos FM1 son frecuentemente utilizados en contextos clínicos o evaluaciones funcionales donde el tiempo disponible es limitado y la comodidad del participante constituye un factor importante. Asimismo, el reducido número de marcadores disminuye la probabilidad de oclusión durante la captura y facilita la ejecución de tareas funcionales básicas, especialmente en movimientos donde existe una alta proximidad entre los dedos.

Sin embargo, este tipo de esquemas presenta limitaciones importantes desde el punto de vista biomecánico. Al contar únicamente con un punto de referencia por segmento, no es posible definir de manera completa la orientación segmentaria en el espacio tridimensional, lo que reduce la precisión en la estimación de movimientos articulares complejos. Además, estos protocolos son altamente sensibles a artefactos producidos por el desplazamiento de la piel respecto al hueso, fenómeno conocido como skin motion artifact, el cual puede generar errores significativos en la reconstrucción del movimiento real. Como consecuencia, la reproducibilidad y exactitud de las mediciones angulares obtenidas mediante FM1 suelen ser inferiores en comparación con protocolos más robustos. [2]

– Protocolo FM2: Dos marcadores por segmento

Los protocolos FM2 utilizan dos marcadores reflectivos por cada segmento anatómico, generalmente ubicados en dirección proximodistal. Esta configuración permite definir un vector principal del segmento, mejorando considerablemente la estimación de su orientación espacial respecto a los esquemas de un solo marcador. Debido a ello, los protocolos FM2 representan una alternativa intermedia entre simplicidad experimental y precisión biomecánica. [2]

La utilización de dos marcadores permite reducir parcialmente la incertidumbre asociada a la localización y orientación del segmento anatómico, favoreciendo una mayor estabilidad en el cálculo de variables cinemáticas y disminuyendo la sensibilidad frente a artefactos derivados del movimiento de la piel. Como resultado, estos protocolos presentan una mejor repetibilidad de las mediciones articulares y menores errores estándar de medición en comparación con los protocolos FM1, especialmente durante movimientos de flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas[2].

Otra ventaja importante de este tipo de esquemas es que mantienen una complejidad operativa moderada, ya que el número de marcadores continúa siendo relativamente bajo en comparación con protocolos más complejos. Esto facilita su implementación en laboratorios universitarios, entornos clínicos y estudios aplicados donde se requiere un equilibrio adecuado entre precisión, tiempo de preparación y viabilidad experimental. Debido a estas características, los protocolos FM2 son actualmente uno de los esquemas más utilizados en investigaciones relacionadas con análisis funcional y biomecánico de la mano.

– **Protocolo FM3: Tres marcadores por segmento**

Los protocolos FM3 corresponden a los esquemas biomecánicos más robustos y precisos dentro del análisis cinemático de la mano. Estos protocolos incorporan tres marcadores por segmento anatómico, los cuales pueden colocarse directamente sobre el segmento óseo (FM3a) o integrarse mediante estructuras rígidas tipo cluster (FM3b). Esta configuración permite definir un sistema de referencia local para cada segmento, proporcionando una representación más completa y estable de la orientación tridimensional durante la ejecución del movimiento.

Desde el punto de vista biomecánico, los protocolos FM3 permiten obtener una estimación más precisa de los ángulos articulares y de la cinemática segmentaria, especialmente en movimientos complejos y tridimensionales de la mano y los dedos. Asimismo, la utilización de sistemas de referencia locales reduce considerablemente la sensibilidad frente a artefactos cutáneos y mejora la estabilidad de las mediciones obtenidas durante el procesamiento de los datos. Debido a ello, estos protocolos son ampliamente utilizados en investigaciones orientadas a validación metodológica, estudios biomecánicos de alta precisión y desarrollo de modelos cinemáticos avanzados.

No obstante, las ventajas biomecánicas de este tipo de esquemas vienen acompañadas de importantes limitaciones prácticas y operativas. El elevado número de marcadores incrementa el tiempo de preparación del participante y aumenta la complejidad general del protocolo experimental. De igual manera, la alta densidad de marcadores sobre la mano favorece la aparición de fenómenos de oclusión durante movimientos funcionales, particularmente en articulaciones distales y movimientos de prensión.

Adicionalmente, el uso de clusters rígidos puede interferir con la ejecución natural de determinadas tareas funcionales, afectando la comodidad del participante y modificando parcialmente el patrón de movimiento evaluado. Por esta razón, aunque los protocolos FM3 ofrecen la representación cinemática más robusta desde el punto de vista biomecánico, su implementación suele ser menos práctica en contextos clínicos, académicos y formativos donde se requiere una metodología más simple y operativamente viable. [\[1\]](#)

En la mayoría de los modelos biomecánicos reportados en la literatura, cada falange es considerada como un segmento rígido independiente conectado mediante articulaciones que permiten determinados grados de libertad. Generalmente, las articulaciones interfalángicas son modeladas como articulaciones tipo bisagra, permitiendo principalmente movimientos de flexión y extensión, mientras que las articulaciones metacarpofalángicas incluyen adicionalmente movimientos de abducción y aducción.

Por otra parte, el pulgar representa uno de los mayores desafíos dentro del modelado biomecánico de la mano debido a su compleja configuración anatómica y funcional. Sus movimientos tridimensionales, particularmente la oposición, requieren modelos más elaborados capaces de representar adecuadamente sus múltiples grados de libertad. Sin embargo, en muchos protocolos existentes el análisis del pulgar suele simplificarse o incluso omitirse parcialmente, debido a las dificultades asociadas a la colocación de marcadores y a la complejidad de su reconstrucción cinemática.

Las aplicaciones del análisis cinemático de la mano abarcan múltiples áreas dentro del campo biomédico y biomecánico, incluyendo procesos de rehabilitación neurológica, evaluación funcional pre y postoperatoria en cirugía de mano, diseño y validación de prótesis y órtesis, estudios ergonómicos y análisis de actividades de la vida diaria. Asimismo, estos sistemas han comenzado a utilizarse en investigaciones relacionadas con realidad virtual, interfaces humano-computador y desarrollo de tecnologías de asistencia orientadas al miembro superior.

A pesar de los avances tecnológicos y metodológicos reportados en la literatura, la implementación amplia de procesos de análisis cinemático de la mano continúa presentando limitaciones importantes en entornos clínicos y universitarios. Factores como los altos costos de los sistemas de captura, el tiempo requerido para la preparación experimental, la necesidad de personal especializado y la ausencia de procesos estandarizados adaptados a contextos locales dificultan su integración dentro de procesos académicos y clínicos rutinarios.

En este sentido, la literatura revisada evidencia vacíos importantes relacionados con la estandarización de procesos, la validación experimental en contextos universitarios locales, el equilibrio entre precisión biomecánica y practicidad experimental, la adecuada inclusión del análisis del pulgar y la definición de tareas funcionales representativas del comportamiento real de la mano. Estos vacíos justifican la necesidad de diseñar y validar un proceso específico de análisis cinemático de la mano y los dedos, adaptado a las condiciones técnicas y operativas del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, objetivo central del presente trabajo de grado.

1.5. Requisitos del diseño

Para el desarrollo de este diseño se establecerán requisitos técnicos, metodológicos y logísticos. Los cuales se describirán a continuación:

- **Requisitos técnicos:**

- Se requiere acceso al sistema de captura de movimiento que se encuentra en el laboratorio de análisis de movimiento, para el uso de las cámaras que permiten el registro del movimiento.
- Se requiere acceso a un software especializado para el procesamiento y análisis de los datos visuales obtenidos durante la adquisición de las pruebas.
- Se requiere la existencia de una base para la colocación de los marcadores, el cual sirva como referencia para el desarrollo de una nueva propuesta y garantice la repetibilidad de las mediciones.

- **Requisitos Metodológicos:**

- Se debe establecer un modelo cinemático de la mano y los dedos fundamentado

en la literatura científica previamente revisada, incorporando las adaptaciones requeridas de acuerdo con las condiciones experimentales del laboratorio.

- Se necesita implementar un registro de la colocación de los marcadores utilizados, con el propósito de garantizar la repetibilidad de las mediciones entre capturas.
- Se necesita plantear y definir un conjunto de tareas motoras estandarizadas que incluyan movimientos correspondientes a la muñeca, los dedos y el pulgar.

– **Requisitos Logísticos:**

- Se requiere la participación de voluntarios sanos que satisfagan los criterios de inclusión y exclusión definidos para la ejecución de las pruebas experimentales.
- Es necesario contar con la disponibilidad horaria tanto del laboratorio como de los participantes con el fin de garantizar la adecuada ejecución de las sesiones de adquisición de datos.
- Se deben garantizar condiciones adecuadas de bioseguridad durante el procedimiento de colocación de los marcadores empleados en la captura de movimiento. Para ello, es necesario disponer de materiales y elementos de protección apropiados para el correcto desarrollo de las sesiones experimentales.

1.6. Restricciones del diseño

Establecidos y delimitados los requisitos del diseño, se establecen las siguientes limitaciones:

– **Restricciones técnicas:**

- El desarrollo del presente trabajo estará limitado al sistema de captura de movimiento disponible en el Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. En consecuencia, no se contemplará la integración de tecnologías adicionales, equipos externos ni sistemas de medición diferentes a los recursos actualmente disponibles en el laboratorio.
- La calidad, resolución y precisión de los datos obtenidos dependerán directamente de las capacidades técnicas del sistema de captura utilizado. Por esta

razón, podrían presentarse limitaciones en la detección y análisis de movimientos de baja amplitud, alta velocidad o elevada complejidad biomecánica durante las pruebas experimentales.

– **Restricciones Metodológicas:**

- El proceso metodológico desarrollado se enfocará específicamente en el análisis cinemático de la mano y los dedos, priorizando el estudio de variables relacionadas con el movimiento articular y la movilidad segmentaria. En este sentido, no se incluirán análisis dinámicos asociados a fuerzas, torques o momentos articulares, debido al alcance definido para el proyecto.
- El número de sesiones experimentales y de repeticiones realizadas estará condicionado por la disponibilidad del laboratorio y las limitaciones logísticas existentes durante la ejecución del estudio. Esta situación podría restringir la cantidad de datos recolectados y, por consiguiente, limitar el tamaño de la muestra analizada.

– **Restricciones Logísticas:**

- La participación en el estudio estará limitada a voluntarios sanos, por lo cual los resultados obtenidos no podrán extrapolarse de manera directa a poblaciones con patologías o alteraciones musculoesqueléticas de la mano. En consecuencia, el alcance de los hallazgos se restringirá al comportamiento observado en participantes sin afecciones clínicas aparentes.
- El acceso al laboratorio y la programación de las sesiones experimentales dependerán de la disponibilidad horaria del personal encargado y de los espacios institucionales asignados para la realización de las pruebas. Esto podría generar limitaciones en la frecuencia y cantidad de sesiones de adquisición de datos.
- La implementación del experimental dependió de la adquisición de marcadores especializados para sistemas de captura de movimiento. Debido al costo de este tipo de materiales asociados a tecnologías biomecánicas especializadas, fue necesario ajustar el desarrollo del proyecto a las posibilidades de adquisición y disponibilidad de dichos elementos dentro del laboratorio.

1.7. Contribución del proyecto a la formación en ingeniería

El presente proyecto aporta de manera significativa a la formación en Ingeniería Biomédica, ya que permite aplicar de forma práctica e integrada conocimientos relacionados con biomecánica, instrumentación biomédica, análisis de movimiento y procesamiento de datos. El desarrollo e implementación de un proceso para el análisis cinemático de la mano y los dedos en el laboratorio de análisis de movimiento involucra distintas etapas del proceso de diseño en ingeniería, desde la identificación de una necesidad y la revisión de la literatura científica existente, hasta la definición de requerimientos técnicos, selección de materiales, planteamiento metodológico, implementación experimental y validación del proceso desarrollado. De esta manera, el proyecto permite comprender cómo los conceptos teóricos adquiridos durante la formación académica pueden aplicarse en un contexto experimental y de investigación real.

Asimismo, este trabajo contribuye al fortalecimiento de habilidades y competencias propias de la Ingeniería Biomédica, como el diseño enfocado en el usuario, la evaluación de tecnologías aplicadas al área de la salud y la consideración de aspectos éticos asociados a la investigación con participantes humanos. De igual manera, permite adquirir experiencia en el manejo de herramientas computacionales utilizadas para el procesamiento y análisis de datos biomecánicos, así como en la estructuración y ejecución de procesos experimentales bajo condiciones reales de laboratorio. Adicionalmente, el proyecto fomenta competencias transversales relacionadas con la gestión de recursos disponibles, la toma de decisiones frente a restricciones técnicas y logísticas, el trabajo colaborativo y la comunicación clara y efectiva de resultados técnicos y científicos.

En consecuencia, el proyecto no solo contribuye al fortalecimiento de capacidades técnicas, investigativas y metodológicas, sino que también amplía el alcance del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, al incorporar el análisis biomecánico de miembros superiores, específicamente de la mano y los dedos. Esto representa una ampliación importante frente al enfoque actual del laboratorio, el cual se encuentra principalmente orientado al análisis de miembros inferiores. Los resultados obtenidos podrán servir como base para futuras investigaciones relacionadas con evaluación funcional, rehabilitación y análisis del movimiento de miembros superiores.

Este trabajo puede contribuir al desarrollo de nuevas metodologías y tecnologías biomédicas orientadas al estudio y tratamiento de alteraciones funcionales de la mano, generando

un aporte tanto académico como investigativo dentro del área de Ingeniería Biomédica.

1.8. Metodología

El desarrollo de este proyecto se implementará en tres fases principales, las cuales son:

1.8.1. Análisis:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los procesos, protocolos y metodologías existentes para el análisis cinemático de la mano y los dedos, considerando modelos biomecánicos, sistemas de captura de movimiento y esquemas de marcaje reportados en la literatura.
- Identificar los requerimientos técnicos, metodológicos, logísticos y éticos necesarios para la implementación del proceso en el Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Seleccionar y caracterizar los materiales y componentes requeridos para la elaboración e implementación del sistema de marcadores reflectivos utilizado en el prototipo.
- Definir las variables de estudio asociadas al análisis cinemático de la mano y los dedos, clasificándolas en variables independientes, dependientes y controladas.
 - **Variables independientes:** Corresponden a las tareas funcionales ejecutadas por los participantes, incluyendo movimientos globales de apertura y cierre de la mano, movimientos individuales de los dedos, oposición del pulgar, gestos de pinza y agarres funcionales que involucren la coordinación entre varios dedos.
 - **Variables dependientes:** Corresponden a los ángulos articulares obtenidos a partir del procesamiento cinemático de los movimientos evaluados. En este proyecto se analizarán principalmente los ángulos de flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalángicas (MCP), interfalángicas proximales (PIP) e interfalángicas distales (DIP) de los dedos índice, medio, anular y meñique, así como la articulación interfalángica del pulgar. Estos ángulos se obtendrán a partir de las coordenadas tridimensionales registradas por el sistema de captura de movimiento mediante la construcción de vectores segmentarios entre marcadores anatómicos.

- **Variables controladas:** Incluyen la postura del participante durante la prueba, las condiciones ambientales del laboratorio, la distancia y orientación respecto al sistema de captura de movimiento, la ubicación de los marcadores anatómicos y la estandarización de las instrucciones dadas para la ejecución de cada tarea funcional.

1.8.2. Síntesis:

- Elaboración del diseño conceptual del proceso de análisis cinemático y del sistema de marcadores, incluyendo la definición de sus etapas funcionales, la representación mediante diagramas de proceso y la distribución anatómica de los puntos de referencia sobre la mano.
- Generación y evaluación de alternativas para la fijación y ubicación de los marcadores reflectivos, considerando opciones como velcro, imanes o soportes tipo bolsillo. Cada alternativa será analizada de acuerdo con criterios de visibilidad, estabilidad, comodidad, facilidad de colocación, interferencia con el movimiento y viabilidad de implementación.
- Selección de la alternativa preliminar de marcaje y fijación con base en el análisis comparativo de ventajas, desventajas y pertinencia frente a las condiciones técnicas del Laboratorio de Análisis de Movimiento.
- Fabricación del prototipo inicial del sistema de marcadores utilizando los materiales previamente seleccionados y caracterizados.
- Diseño y documentación de las tareas funcionales de movimiento de la mano y los dedos, incluyendo gestos de flexión-extensión, prensión, oposición del pulgar y otros movimientos relevantes para el análisis.
- Prueba preliminar del conjunto de tareas funcionales con los participantes, verificando que los movimientos puedan realizarse de manera natural, controlada y reproducible, según los objetivos del análisis cinemático propuesto.

1.8.3. Evaluación y Validación:

- Evaluar preliminarmente el proceso diseñado mediante pruebas piloto con participantes humanos, con el fin de verificar la viabilidad del esquema de marcaje, la visibilidad de los marcadores, la comodidad durante la ejecución de las tareas funcionales y la calidad de los datos obtenidos para el cálculo de ángulos articulares.
 - ▷ Realizar pruebas piloto con 10 participantes adultos sanos, de sexo femenino y masculino, pertenecientes a la comunidad universitaria de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia.
 - **Establecer como criterios de inclusión:** Tener entre 18 y 35 años, no presentar lesiones, dolor o limitaciones funcionales en manos o muñecas, no tener antecedentes de cirugía reciente en la extremidad superior dominante y pertenecer a la comunidad universitaria activa de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.
 - **Establecer como criterios de exclusión:** Presentar dolor o incomodidad durante la ejecución de las tareas funcionales, no completar el protocolo experimental, solicitar el retiro voluntario del estudio o generar registros con pérdida significativa de marcadores, errores de captura o información insuficiente para el procesamiento de los datos cinemáticos.
 - ▷ Garantizar la participación voluntaria de los sujetos mediante la explicación previa del estudio y la firma del consentimiento informado, previamente aprobado por el comité de ética correspondiente.
 - ▷ Realizar las pruebas en el Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, con una duración aproximada de 15 a 30 minutos por sesión, incluyendo la preparación del participante, la colocación de marcadores y la captura de los movimientos.
 - ▷ Clasificar el presente estudio como una investigación con riesgo mínimo, de acuerdo con la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia [24], debido a que involucra la participación de sujetos humanos en la ejecución de tareas funcionales y la captura tridimensional del movimiento mediante marcadores reflectivos. Aunque los procedimientos realizados no son invasivos

y no representan riesgos significativos para la salud de los participantes, existe una interacción directa con estos y una posible aparición de molestias leves asociadas a la ejecución de los movimientos requeridos durante las pruebas.

- ▷ Explicar a cada participante el objetivo del estudio, el procedimiento experimental y las medidas de seguridad antes de colocar los marcadores sobre los puntos anatómicos definidos en la mano y los dedos.
 - Los movimientos que se van a registrar incluyen una serie de gestos motores funcionales de la mano y los dedos, que abarcan desde movimientos globales de apertura y cierre, movimientos individuales de cada dedo, acciones de oposición del pulgar, gestos de pinza y agarres funcionales que permitan evaluar la coordinación entre los dedos.
- Procesar los datos capturados mediante el software correspondiente y MATLAB, a partir de las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectivos. El análisis se centrará en el cálculo de los ángulos articulares de las articulaciones metacarpofalángicas, interfalángicas proximales, interfalángicas distales y, en el caso del pulgar, la articulación interfalángica.
 - Utilizar una toma representativa para el procesamiento de cada tarea, seleccionada con base en la calidad de la captura y la visibilidad de los marcadores durante el movimiento.
 - Recolectar únicamente coordenadas espaciales y parámetros cinemáticos, sin incluir imágenes faciales, audios ni información personal sensible.
 - Identificar a cada participante mediante un código numérico, garantizando el anonimato y la confidencialidad de la información.
 - Almacenar la información en el dispositivo institucional del laboratorio, protegido con contraseña y con acceso restringido a las investigadoras y a la directora del proyecto.
 - Utilizar los datos únicamente con fines académicos y científicos. Una vez finalizado el proyecto, los archivos serán eliminados de forma segura.
- Realizar ajustes al proceso de marcaje, captura y procesamiento de datos con base en los resultados obtenidos durante las pruebas piloto.

- Elaborar recomendaciones para la futura aplicación del proceso en estudios académicos, clínicos o de rehabilitación, así como proponer mejoras metodológicas para fortalecer el sistema.

1.8.4. Consideraciones éticas

El proyecto se desarrollará acorde a los lineamientos éticos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Antes de participar, cada voluntario recibirá información clara y concisa sobre los objetivos, procedimientos y posibles riesgos de la investigación. La participación será completamente voluntaria y se solicitará la firma de un consentimiento informado previo al inicio de las pruebas; los participantes podrán retirarse del estudio en cualquier momento sin consecuencias.

Las tareas propuestas no implican riesgos físicos ni psicológicos significativos, ya que consisten únicamente en movimientos naturales y no invasivos de la mano, realizados en un ambiente controlado (el Laboratorio de Análisis de Movimiento) y bajo la supervisión de las investigadoras. No se recogerá información sensible, ni imágenes faciales, ni audios; y además la participación de los voluntarios será registrada mediante codificaciones numéricas y almacenados en dispositivos institucionales con acceso restringido. Los resultados serán utilizados únicamente con fines académicos dentro del marco del proyecto y serán eliminados de forma segura una vez finalizado el proyecto.

El proyecto contó con la evaluación y aprobación del Comité de Ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali antes del inicio de las pruebas con participantes humanos, garantizando el cumplimiento de los lineamientos éticos institucionales aplicables a la investigación.

1.9. Plan de trabajo

El siguiente cronograma presenta la organización temporal de las actividades planteadas para el desarrollo del proyecto, desde la fase inicial de revisión bibliográfica y definición del problema, hasta el diseño, implementación, evaluación preliminar y cierre del proceso. Las actividades se distribuyen por semanas de trabajo y se agrupan según las fases metodológicas del proyecto: análisis, síntesis, evaluación y validación, y cierre. Esta planificación permite visualizar la secuencia de tareas necesarias para la construcción del proceso, la

preparación del sistema de marcaje, la ejecución de pruebas piloto, el procesamiento de datos y la elaboración del documento final.

Actividad	Descripción	Semana estimada
<i>Fase 1 - Análisis</i>		
Revisión bibliográfica	Búsqueda de artículos, marcajes y modelos biomecánicos	1 - 5
Redacción de introducción, justificación y objetivos	Preparación de la parte inicial del informe	2 - 8
Marco teórico y estado del arte	Desarrollo de la sección teórica fundamentada en literatura	3 - 9
Planteamiento del problema	Redacción del problema y su contexto	4 - 7
Finalización de la primera parte del documento	Terminar redacción y correcciones de la primera parte del documento	4 - 12
<i>Fase 2 - Síntesis</i>		
Diseño conceptual	Diseño del proceso, diagramas funcionales, esquemas anatómicos	6 - 24
Planteamiento de ubicación de marcadores	Análisis y definición de puntos anatómicos	7 - 14
Diseño del prototipo inicial de los marcadores	Fabricación inicial de los marcadores	8 - 20
Selección de tareas funcionales de la mano	Definición de gestos motores a medir	9 - 15
Preparación del entorno del laboratorio	Ajustes del espacio y pruebas preliminares	26 - 28
<i>Fase 3 - Evaluación y validación</i>		
Pruebas piloto	Verificación de visibilidad, precisión, oclusión y comodidad	26 - 29
Recolección de datos	Sesiones con los voluntarios	30 - 34
Análisis de datos	Procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas, cálculo del error intra	34 - 39
Ajustes y retroalimentación	Ajustes finales del proceso según resultados	39 - 40
<i>Cierre del proyecto</i>		
Finalización del documento final	Redacción del informe final y correcciones	41 - 43

Cuadro 2: Cronograma de desarrollo del Proceso para el análisis de la mano y los dedos.

1.9.1. Plan de trabajo:



Figura 4: Plan de trabajo

1.9.2. Presupuesto:

El siguiente presupuesto presenta los recursos técnicos y materiales adquiridos y utilizados durante el desarrollo del proceso de análisis cinemático de la mano y los dedos. Se incluyen principalmente los componentes necesarios para la elaboración del sistema de marcadores reflectivos, los materiales empleados para su fijación y las herramientas tecnológicas requeridas para la captura y el procesamiento de los datos. Esta información permite identificar los costos asociados al desarrollo del prototipo y diferenciar los recursos asumidos por las investigadoras de aquellos proporcionados por la universidad.

PRESUPUESTO			
Componentes	Valor (COP)	Propio	Universidad
Marcadores reflectivos	344.000	x	
Adhesivo para piel	39.900		x
Cilindro impreso en 3D	15.000		x
Goniómetro	22.800	x	
Total	421.700		

Cuadro 3: Presupuesto de recursos técnicos.

2. Fase de Síntesis

2.1. Diseño conceptual

El diseño conceptual del presente proyecto se centró en definir de manera estructurada el funcionamiento general del proceso propuesto para el análisis cinemático tridimensional de la mano y los dedos. En esta etapa se buscó establecer las funciones principales del sistema, el flujo de operación y la relación entre cada una de las etapas involucradas en la adquisición y procesamiento de los datos biomecánicos. Asimismo, se planteó una metodología que permitiera obtener mediciones reproducibles y consistentes, adaptadas a las condiciones técnicas y operativas del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

En este trabajo, el producto desarrollado corresponde a un proceso integrado compuesto por el esquema de marcaje, la configuración de captura, las tareas funcionales, el procesamiento en MATLAB y el análisis descriptivo de los ángulos articulares.

El proceso diseñado tuvo como objetivo principal realizar la captura, procesamiento y análisis de los movimientos funcionales de la mano mediante un sistema óptico de captura de movimiento y el uso de marcadores reflectivos ubicados sobre referencias anatómicas específicas. Para ello, se planteó un flujo de trabajo compuesto por diferentes etapas funcionales que permitieron organizar de manera secuencial el desarrollo experimental y garantizar la calidad de los datos obtenidos.

1. Preparación del participante:

El proceso inició con la participación de voluntarios que cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos para el estudio. Posteriormente, se realizó una explicación general del procedimiento experimental, seguida de la firma del consentimiento informado (**Anexo 4.2.1**) y la preparación de la extremidad superior analizada. Como parte de esta etapa, se verificó que la piel de la mano estuviera limpia, con el propósito de favorecer la correcta fijación de los marcadores y reducir posibles interferencias durante la captura de movimiento.

2. Colocación del sistema de marcadores:

Una vez preparado el participante, se procedió con la ubicación de los marcadores

reflectivos sobre puntos anatómicos específicos de la mano y los dedos. El esquema de marcaje propuesto para los cuatro dedos se basó en un modelo biomecánico segmentado, en el cual cada dedo fue considerado como una cadena de segmentos rígidos conectados por articulaciones. Por otra parte, el pulgar fue analizado mediante un submodelo específico que permitió representar de manera más adecuada su complejidad funcional y sus grados de libertad. La disposición de los marcadores buscó garantizar visibilidad, precisión y practicidad durante la ejecución de las tareas funcionales, permitiendo la correcta identificación y reconstrucción de los segmentos anatómicos durante el procesamiento de los datos.

3. Configuración y calibración del sistema de captura:

Posteriormente, se realizó la configuración del sistema óptico de captura de movimiento disponible en el laboratorio. Esta etapa incluyó la disposición estratégica de las cámaras dentro del espacio experimental y la calibración del sistema siguiendo los procedimientos establecidos por el laboratorio. La calibración constituyó una etapa fundamental dentro del proceso, ya que permitió asegurar la precisión espacial de las mediciones y mantener la consistencia de los datos obtenidos entre diferentes sesiones de captura.

4. Ejecución de las tareas funcionales:

Una vez calibrado el sistema y colocados los marcadores, el participante ejecutó un conjunto de tareas funcionales previamente definidas y definidas con base en la literatura. Estas tareas incluyeron movimientos de flexión y extensión de los dedos, oposición del pulgar y actividades funcionales orientadas a evaluar diferentes patrones de movilidad de la mano. Cada tarea fue realizada siguiendo instrucciones uniformes y controladas, con el fin de favorecer ejecución consistente entre participantes y obtener datos cinemáticos representativos del comportamiento funcional de la mano.

5. Captura y almacenamiento de datos:

Durante la ejecución de las tareas funcionales, el sistema óptico registró las trayectorias tridimensionales de los marcadores reflectivos ubicados sobre la mano y los dedos. Los datos adquiridos fueron almacenados y organizados de manera codificada, garantizando la confidencialidad de la información y facilitando posteriormente su procesamiento y análisis dentro del entorno experimental.

6. Procesamiento y análisis cinemático:

Los datos obtenidos durante la captura fueron procesados mediante el software especializado Qualisys, permitiendo realizar la reconstrucción tridimensional de los segmentos anatómicos de la mano y los dedos. Posteriormente, los datos procesados fueron exportados y analizados mediante códigos desarrollados en MATLAB, orientados al cálculo de los ángulos articulares y rangos de movimiento asociados a cada una de las tareas funcionales realizadas. De esta manera, el procesamiento de la información permitió obtener parámetros cinemáticos relacionados específicamente con el comportamiento angular de los dedos y del pulgar durante la ejecución de los movimientos evaluados.

7. Obtención de resultados y evaluación del proceso:

Finalmente, los resultados obtenidos permitieron evaluar la precisión, funcionalidad y repetibilidad del proceso diseñado, así como identificar posibles ajustes relacionados con la ubicación de los marcadores, la ejecución de las tareas funcionales o las condiciones generales del proceso experimental. Esta etapa de retroalimentación permitió realizar mejoras progresivas al proceso propuesto y establecer una base metodológica para futuras aplicaciones en investigación biomecánica, análisis funcional y contextos de rehabilitación del miembro superior.

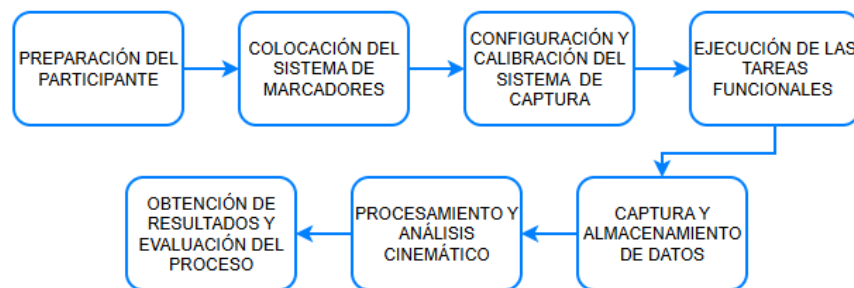


Figura 5: Diagrama funcional del proceso propuesto

2.2. Selección y definición de tareas funcionales:

Con el propósito de hacer un análisis de manera estandarizada para la cinemática de la mano y los dedos, se definió de un conjunto de tareas que permitan hacer la correcta evaluación de los patrones principales de movimiento funcional. Para esta selección, se tomó como referencia el protocolo desarrollado por Fischer et al. [26], el cual propone unos movimientos específicos que están orientados al análisis cinemático mediante sistemas de captura ópticos. Por otro lado, el resto de las actividades se añadieron con el fin de representar patrones relevantes en actividades de la cotidianidad.

El propósito de estas actividades es realizar movimientos controlados, medibles y reproducibles que integren componentes funcionales y sean de relevancia en un entorno de rehabilitación clínica. Además, cada una de estas tareas fue elegida gracias a su simplicidad de ejecución y su potencial para generar datos relevantes para el estudio.

– T1 - Movimientos individuales de cada dedo - flexo extensión:

Para esta tarea se le va a solicitar al participante que realice extensión y flexión de manera aislada a cada uno de sus dedos (sin incluir el dedo pulgar), mientras mantiene el resto de los dedos en posición neutra, con el objetivo de analizar la flexo - extensión de las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximales y distales de cada dedo.

En esta tarea se espera para las articulaciones metacarpofalángicas un ángulo de 85° a 90° , en las interfalángicas proximales alrededor de 100° , y para las interfalángicas distales se espera que el rango de movimiento esté entre 70° a 80° . La utilidad de esta tarea para el estudio es validar la precisión del sistema de captura y en el sentido de la rehabilitación servirá para evaluar la independencia motora.

– T2 - Oposición del pulgar:

En esta ocasión se le va a pedir al participante que se toque la yema de los dedos pulgar, anular, corazón e índice usando la yema de su dedo pulgar de forma secuencial. En esta actividad se busca analizar la movilidad de la articulación carpometacarpiana del pulgar; además, de evaluar la coordinación de las articulaciones durante la oposición.

Se espera observar una flexión y una abducción de la articulación carpometacarpiana de aproximadamente 40° a 60° ; una flexión de la articulación metacarpofalángica del

pulgar cercana a 50° , y una flexión interfalángica aproximadamente de 80° . Con esta actividad se espera caracterizar la destreza funcional del pulgar.

– **T3 - Pinza trípode (índice - pulgar - medio):**

En esta tarea, se le solicitó al participante realizar una pinza trípode mediante el contacto simultáneo de la yema del pulgar con las yemas de los dedos índice y medio, sin sujetar un objeto externo. Esta actividad permitió simular el gesto funcional de pinza, reduciendo la interferencia asociada a la presencia de un objeto durante la captura del movimiento. Con ello, se buscó evaluar la coordinación fina y la oposición del pulgar con los dedos índice y medio, analizando el comportamiento de las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximales y distales de los dedos involucrados.

Se espera que durante la ejecución de estos movimientos se presenten flexiones moderadas de las articulaciones metacarpofalángica e interfalángicas proximales del índice, en un rango de 20° a 50° . Con esta actividad se puede evaluar una actividad cotidiana y también permite hacer el análisis de la precisión y control del movimiento.

– **T4 - Agarre cilíndrico:**

En esta actividad al participante se le va a proporcionar un cilindro de 6 cm de diámetro, para que lo levante y luego vuelva a apoyarlo. El objetivo es analizar la combinación de flexión de los dedos con oposición del pulgar.

En esta actividad se van a observar las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximales de los dedos largos, junto con las carpometacarpiana y metacarpofalángica del pulgar. Se espera encontrar flexiones moderadas que estén dentro de un rango de 30° a 60° en las articulaciones metacarpofalángicas y en un rango de 15° a 45° en las interfalángicas proximales, con la participación activa del pulgar para la estabilización del objeto. Con esta tarea se espera estudiar la coordinación general de la mano en un patrón de agarre funcional.

– **T5 - Extensión y abducción simultánea de los dedos:**

En esta tarea el participante deberá extender completamente los dedos y separarlos en forma de abanico, para luego juntarlos lentamente. El objetivo es analizar los movimientos de abducción y aducción de las articulaciones metacarpofalángicas, observando la coordinación de los dedos. Se espera que la amplitud de los dedos

sea aproximadamente de 20° a 25° , mientras que las articulaciones permanezcan en extensión durante el movimiento.

2.3. Generación de alternativas

Con el fin de establecer un sistema de marcadores adecuado que permita realizar adecuadamente el análisis cinemático de la mano y los dedos, se plantearon diferentes alternativas de marcaje anatómico; todas basadas en la literatura y las condiciones técnicas con las que cuenta el laboratorio. Para establecer estas alternativas se consideraron criterios como la capacidad de representar el movimiento de los segmentos, la visibilidad de los marcadores durante la captura, la facilidad de implementación y la reproducibilidad del proceso.

– ALTERNATIVA 1 - SISTEMA DE MARCAJE SIMPLIFICADO:

La primera alternativa corresponde a un sistema de marcaje simplificado, en el cual se emplea un número reducido de marcadores ubicados en puntos anatómicos generales de la mano y los dedos, priorizando la representación del movimiento global sobre el análisis detallado de cada articulación. Este tipo de configuración ha sido ampliamente utilizado en estudios cinemáticos ya que permite reducir la complejidad experimental y facilitar la implementación del proceso.

Un ejemplo de este enfoque se presenta en el estudio realizado por Ruiz-Chicaiza y Cevallos-Barragán [25], en el cual se analizan los movimientos de flexión-extensión de los dedos y la oposición del pulgar mediante captura de movimiento con fotogrametría, utilizando marcadores pasivos ubicados en puntos anatómicos recomendados por la Sociedad Internacional de Biomecánica (ISB). En dicho trabajo, el marcaje se centra en la colocación de un marcador por falange o en puntos representativos de cada segmento, permitiendo reconstruir el movimiento articular sin necesidad de un sistema de marcaje excesivamente denso.

Este tipo de marcaje presenta como principal ventaja la disminución del tiempo de preparación del participante, así como la reducción del riesgo de oclusión de los marcadores durante la captura, fenómeno que se incrementa a medida que aumenta el número de marcadores, especialmente en movimientos complejos de la mano como la oposición del pulgar. Adicionalmente, un sistema simplificado facilita el procesamiento de los datos y la repetibilidad del proceso, aspectos relevantes en estudios donde se requiere evaluar múltiples participantes o realizar varias sesiones de captura.

Sin embargo, el uso de un número limitado de marcadores implica ciertas limitaciones como la capacidad de describir de manera independiente el movimiento de cada articulación metacarpofalángica e interfalángica, lo que afecta la resolución cinemática del sistema y restringe el análisis detallado del comportamiento articular de los dedos.

– **ALTERNATIVA 2 - SISTEMA DE MARCAJE DETALLADO POR FALANGES:**

En esta alternativa se propone un sistema de marcaje detallado que considera la colocación de marcadores sobre cada segmento que conforman la mano, incluyendo los metacarpos, las falanges proximales, falanges medias y distales de los dedos así como puntos de referencia en la muñeca. Este tipo de configuración ha sido ampliamente utilizada en estudios biomecánicos cuyo objetivo es la medición precisa del movimiento articular de todos los segmentos de la mano mediante técnicas de vídeo.

En la literatura se han reportado sistemas de marcaje que emplean un número elevado de marcadores, distribuidos estratégicamente sobre el dorso de la mano con el fin de definir sistemas de referencia locales para cada segmento y permitir el cálculo de los ángulos fisiológicos de rotación entre segmentos consecutivos. En particular, se han descrito configuraciones que utilizan hasta 29 marcadores para la medición simultánea de los grados de libertad de la mano, permitiendo analizar movimientos de flexión/extensión, abducción/aducción y pronación/supinación en las diferentes articulaciones [25].

Este tipo de marcaje detallado ofrece como principal ventaja una alta precisión en la obtención de variables cinemáticas, ya que permite describir de manera individual el comportamiento de cada dedo y de cada articulación durante la ejecución de tareas funcionales como agarres, manipulaciones y movimientos finos. Además, estudios previos han demostrado que este tipo de sistemas presenta una buena repetibilidad y fiabilidad, con errores angulares relativamente bajos, lo que lo convierte en una alternativa robusta desde el punto de vista técnico y biomecánico. Por otro lado, la implementación de este tipo de marcajes conlleva una serie de desventajas importantes como que el uso de un elevado número de marcadores incrementa el tiempo de preparación del participante, aumenta la complejidad del procesamiento de los datos y eleva el riesgo de oclusión durante la captura del movimiento, en tareas funcionales que involucren contacto entre los dedos o con objetos. Estas limitaciones

pueden afectar la viabilidad del sistema en entornos clínicos o académicos donde se busca un proceso práctico, reproducible y de fácil implementación.

Por lo anterior, aunque el sistema de marcaje detallado permite obtener información cinemática altamente precisa y completa, su complejidad operativa lo convierte en una alternativa menos adecuada para la estandarización de un proceso de análisis cinemático de la mano en un laboratorio de marcha, siendo más apropiado para estudios experimentales altamente controlados o validaciones biomecánicas específicas.

– **ALTERNATIVA 3 - SISTEMA DE MARCAJE COMBINADO**

En esta alternativa se propone un sistema de marcaje combinado, el cual integra la colocación de marcadores en puntos anatómicos clave de la mano con la inclusión de marcadores selectivos en los dedos. Esta configuración busca establecer un equilibrio entre la precisión en el análisis cinemático y la viabilidad experimental del proceso, considerando las limitaciones prácticas propias de un laboratorio de análisis de movimiento.

Los marcadores ubicados en puntos anatómicos de referencia permiten describir el movimiento global de la mano, incluyendo desplazamientos y orientaciones generales del segmento mano–muñeca. De manera complementaria, la incorporación de marcadores en los dedos posibilita el análisis del movimiento relativo durante la ejecución de tareas funcionales, sin llegar al nivel de complejidad de un marcaje detallado por falanges.

A diferencia del sistema de marcaje simplificado, esta alternativa ofrece una mayor capacidad para describir las variables cinemáticas asociadas a los movimientos funcionales de la mano, especialmente en tareas que involucran flexión, extensión y coordinación de los dedos. No obstante, el número total de marcadores se mantiene reducido en comparación con un sistema completamente detallado, lo que contribuye a disminuir el tiempo de preparación del sujeto, la probabilidad de oclusión de marcadores y la complejidad del procesamiento de datos.

Este enfoque combinado ha sido utilizado en estudios de análisis cinemático de la mano como una estrategia para obtener información relevante del movimiento, manteniendo un balance entre resolución biomecánica, repetibilidad del y comodidad del participante. Por tanto, esta alternativa se presenta como una opción intermedia adecuada para el desarrollo del proceso propuesto, permitiendo capturar informa-

ción cinemática suficiente para el análisis funcional de la mano sin comprometer la practicidad del sistema.

2.4. Bocetos: Selección Esquema de Marcaje

La selección del esquema de marcaje constituyó una etapa fundamental dentro del desarrollo del proceso, debido a que la ubicación de los marcadores influye directamente en la calidad de los datos obtenidos y en la precisión del análisis cinemático posterior. Para esta selección se tuvieron en cuenta las alternativas de marcaje revisadas previamente, los objetivos del proyecto, las tareas funcionales definidas, las condiciones técnicas del Laboratorio de Análisis de Movimiento y la necesidad de obtener un procedimiento que pudiera ser reproducible en diferentes participantes.

De acuerdo con lo anterior, se buscó un esquema que permitiera representar el comportamiento angular de la mano y los dedos sin utilizar un número excesivo de marcadores, ya que esto podría aumentar la probabilidad de oclusión, dificultar la captura óptica o interferir con la ejecución natural de los movimientos. Por esta razón, la configuración seleccionada respondió a un equilibrio entre precisión biomecánica, visibilidad de los marcadores, comodidad del participante y viabilidad operativa dentro del laboratorio.

Asimismo, la selección del esquema de marcaje estuvo relacionada con el procesamiento posterior de los datos en MATLAB, ya que la disposición espacial de los marcadores debía permitir la construcción de vectores segmentarios entre puntos anatómicos específicos. Estos vectores fueron necesarios para el cálculo de los ángulos articulares de los dedos y del pulgar durante las tareas funcionales definidas en el proceso.

2.4.1. Configuración del sistema de marcadores reflectivos

Para el desarrollo del proceso de análisis cinemático de la mano y los dedos se seleccionó un sistema de marcaje combinado, compuesto por 20 marcadores reflectivos ubicados sobre puntos anatómicos estratégicos de la mano dominante. Esta configuración permitió representar los principales segmentos de la mano, manteniendo una cantidad de marcadores adecuada para el análisis, sin comprometer de manera significativa la visibilidad del sistema óptico ni la comodidad del participante.

El esquema de marcaje incluyó un marcador ubicado en la región central de la muñeca,

el cual fue utilizado como punto de referencia proximal dentro del análisis. Este marcador cumplió una función importante durante el procesamiento de los datos, ya que permitió establecer una referencia global de la mano y facilitó la construcción de vectores entre la muñeca y las articulaciones metacarpofalángicas de cada dedo. A partir de estas relaciones espaciales fue posible estructurar el cálculo angular desarrollado posteriormente en MATLAB.

Adicionalmente, se ubicaron marcadores sobre las cinco articulaciones metacarpofalángicas (MCP) de la mano dominante, con el propósito de identificar el inicio de cada cadena cinemática digital. Estos puntos anatómicos permitieron representar la base de movimiento de cada dedo y fueron utilizados como referencia para el análisis de los ángulos asociados a las tareas funcionales evaluadas.

Para los dedos índice, medio, anular y meñique se colocaron marcadores reflectivos sobre las articulaciones interfalángicas proximales (PIP) y distales (DIP), con el fin de representar los segmentos intermedios y distales de cada dedo. Esta distribución permitió calcular los ángulos articulares correspondientes a las articulaciones MCP, PIP y DIP en los dedos largos. En el caso del pulgar, se utilizó un marcador sobre la articulación interfalángica (IP), considerando su estructura anatómica diferenciada y buscando reducir interferencias durante la ejecución de los movimientos funcionales.

Finalmente, se ubicó un marcador sobre la uña de cada uno de los cinco dedos, con el propósito de identificar el extremo distal de cada cadena cinemática. Estos marcadores permitieron completar la representación segmentaria de los dedos y fueron necesarios para la construcción de los vectores utilizados en el cálculo de los ángulos articulares.

La distribución de los marcadores reflectivos se resume en la siguiente tabla:

Región anatómica	Cantidad de marcadores	Descripción
Muñeca	1	Marcador central usado como referencia global para el análisis
Articulaciones metacarpofalángicas	5	Un marcador en el nudillo de cada dedo
Dedos índice, medio, anular y meñique	8	Dos marcadores por dedo, ubicados a nivel de PIP y DIP
Pulgar	1	Un marcador a nivel de la articulación interfalángica del pulgar
Uñas	5	Un marcador distal sobre la uña de cada dedo
Total	20	Marcadores reflectivos utilizados

Cuadro 4: Distribución de los marcadores reflectivos.

En el cuadro 4 se presenta la distribución de los marcadores sobre la superficie dorsal de la mano dominante. Esta ubicación favoreció la visibilidad de los marcadores por parte del sistema óptico de captura y redujo la interferencia con la ejecución de las tareas funcionales. Además, la disposición seleccionada facilitó la repetibilidad del procedimiento, debido a que los puntos anatómicos utilizados pueden ser identificados de manera sencilla en diferentes participantes.

Esta configuración permitió obtener información cinemática de los principales segmentos de la mano y los dedos, manteniendo un balance adecuado entre precisión y practicidad. De igual manera, el esquema fue seleccionado teniendo en cuenta el análisis computacional posterior, ya que la ubicación de los marcadores permitió establecer relaciones espaciales entre segmentos anatómicos y realizar el cálculo de los ángulos articulares asociados a las tareas funcionales definidas.

2.4.2. Procesamiento y análisis

Además de la selección del esquema de marcaje, fue necesario desarrollar una estrategia de procesamiento que permitiera analizar los datos obtenidos durante la captura de movimiento. Para ello, las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectivos fueron

inicialmente obtenidas mediante el software Qualisys y posteriormente exportadas para su análisis en MATLAB. Esta etapa permitió transformar la información espacial registrada por el sistema óptico en variables cinemáticas relacionadas con el comportamiento angular de los dedos y del pulgar.

El procesamiento en MATLAB se basó en la lectura de los archivos generados por Qualisys, la identificación de los marcadores correspondientes a cada dedo y la construcción de vectores entre puntos anatómicos consecutivos. A partir de estos vectores se calcularon los ángulos articulares de interés, considerando la relación espacial entre los segmentos que conforman cada cadena cinemática. De esta manera, los códigos desarrollados permitieron obtener los ángulos asociados a las articulaciones metacarpofalángicas, interfalángicas proximales e interfalángicas distales, según correspondiera a cada dedo.

El procesamiento angular tuvo como finalidad transformar los datos espaciales obtenidos durante la captura en parámetros cinemáticos relacionados con el movimiento articular de la mano y los dedos. Para ello, los códigos desarrollados en MATLAB permitieron estructurar la información proveniente de los marcadores y obtener los ángulos correspondientes a las articulaciones evaluadas en cada tarea funcional. De esta manera, el análisis se centró en caracterizar el comportamiento angular de los dedos y del pulgar, facilitando la interpretación de los movimientos realizados durante las pruebas experimentales.

El flujo general del procesamiento puede representarse de la siguiente manera, en la figura 



Figura 6: Diagrama del procesamiento y análisis mediante MATLAB

La Figura 6 resume el flujo general del procesamiento implementado en MATLAB, desde la lectura de los archivos generados por Qualisys hasta la obtención y organización de los resultados angulares. A partir de esta estructura base, se desarrollaron scripts específicos para cada tarea funcional, ajustando la selección de marcadores, el cálculo de ángulos y la presentación de resultados según las características de cada movimiento.

2.4.3. Códigos de MATLAB

Se desarrollaron códigos específicos de acuerdo con las tareas funcionales evaluadas, con el fin de adaptar el análisis a las características de cada movimiento. Estos códigos permitieron identificar los marcadores correspondientes a cada dedo, calcular los ángulos articulares requeridos y organizar los resultados de manera individual para su posterior interpretación. La implementación de estos códigos permitió estandarizar el procesamiento de los datos y disminuir la variabilidad asociada al análisis manual.

La incorporación del procesamiento mediante MATLAB fue una parte importante del proceso, ya que permitió adaptar el análisis cinemático a los objetivos específicos del

proyecto. Mientras que Qualisys permitió obtener la reconstrucción tridimensional de los marcadores, MATLAB permitió realizar el cálculo específico de los ángulos articulares de la mano y los dedos. De esta manera, la integración entre el sistema óptico de captura y los códigos desarrollados permitió obtener resultados organizados, reproducibles y orientados al análisis funcional de los movimientos evaluados.

1. Oposición del pulgar:

En la figura [7](#) se describe el código para la tarea de oposición del pulgar. El código inicia con la carga del archivo .tsv y la lectura de los datos en MATLAB mediante readtable. Posteriormente, se extraen los marcadores de referencia necesarios para analizar el movimiento del pulgar y de los demás dedos evaluados. A diferencia de otras tareas, en este caso el código debe identificar el contacto secuencial del pulgar con cada dedo, ya que la oposición se realiza de manera progresiva hacia el índice, medio, anular y meñique.

Para reconocer estos contactos, el código calcula la distancia entre la uña del pulgar y la uña de cada uno de los dedos. El instante de contacto se determina a partir de la distancia mínima entre las uñas, ya que este valor representa el momento en el que el pulgar se encuentra más cercano al dedo correspondiente. Una vez identificado el frame de contacto, el código extrae los marcadores del dedo involucrado en ese instante específico, lo que permite analizar la postura articular asociada a cada oposición.

Posteriormente, se construyen los vectores segmentarios a partir de los marcadores anatómicos extraídos. Estos vectores permiten representar la orientación de las falanges y calcular los ángulos articulares correspondientes a MCP, PIP y DIP en los dedos largos, o MCP e IP en el caso del pulgar. Después del cálculo geométrico, el código realiza una conversión a ángulo clínico mediante la expresión correspondiente, con el fin de que los resultados sean más interpretables desde el punto de vista funcional. Finalmente, se genera una tabla final con los valores angulares obtenidos para cada contacto del pulgar con los dedos evaluados.

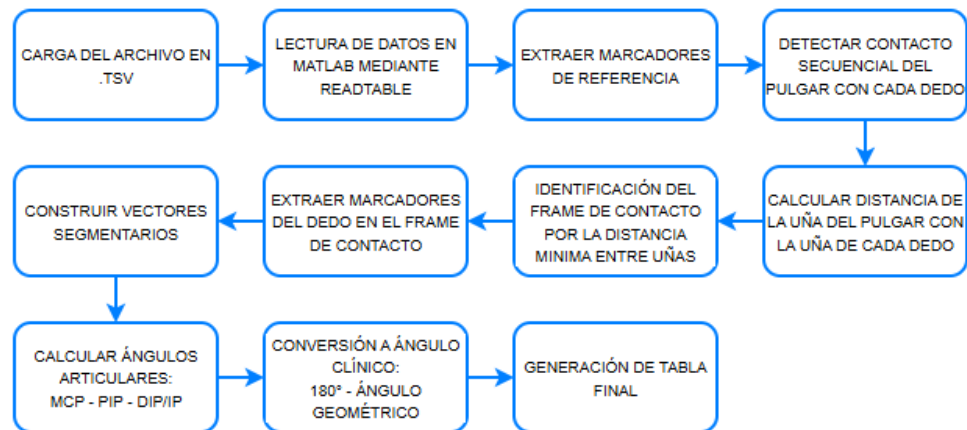


Figura 7: Diagrama de bloques código desarrollado en MATLAB para oposición del pulgar

2. Flexo-extensión por dedo:

Para la tarea de flexión-extensión por dedo, en la figura 8 se describe el código, el cual inicia con la carga del archivo .tsv y la lectura de los datos en MATLAB mediante readtable. Una vez organizada la información, se extraen los marcadores de referencia de cada dedo evaluado, incluyendo los puntos necesarios para representar los segmentos anatómicos y calcular los ángulos articulares. Posteriormente, el código define los dedos que serán analizados, lo que permite procesar de manera individual el movimiento realizado por cada uno.

Después de esta etapa, el código calcula los ángulos articulares en todos los frames del movimiento, considerando las articulaciones MCP, PIP y DIP según corresponda. Esto permite obtener una secuencia completa del comportamiento angular durante la flexión y extensión del dedo. Para mejorar la estabilidad de la señal, el código aplica un suavizado de los ángulos mediante la mediana, reduciendo posibles variaciones bruscas generadas por ruido en las trayectorias de los marcadores.

Además, el código calcula la velocidad del marcador ubicado en la uña, ya que este punto permite identificar con mayor claridad cuándo el dedo comienza a moverse y cuándo finaliza el gesto. A partir de esta información, se detecta la fase real del movimiento y se evita incluir en el análisis los frames en los que el participante aún no ha iniciado la tarea o ya ha regresado al reposo. Luego, se identifica el frame

de máxima flexión y se calcula el promedio de los ángulos en una ventana de tres frames alrededor de dicho instante. Finalmente, el código aplica la convención clínica definida para la interpretación de los ángulos y genera una tabla final con los valores articulares obtenidos para cada dedo.

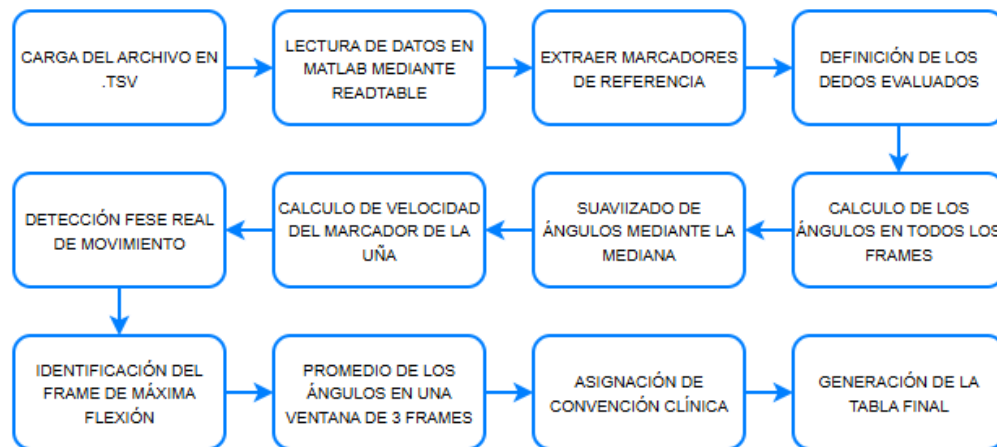


Figura 8: Diagrama de bloques código desarrollado en MATLAB para Flexo-Extensión

3. Extensión - abducción simultánea:

En la figura 9 se describe cómo funciona el código para tarea de abducción-extensión, comenzando con la carga del archivo .tsv y la lectura de los datos en MATLAB mediante readtable. Posteriormente, se extraen los marcadores de referencia necesarios para cada dedo evaluado y se define cuáles dedos serán analizados durante la tarea. Esta etapa es importante porque el código debe diferenciar el comportamiento del pulgar respecto a los dedos largos, ya que no todos presentan la misma estructura anatómica ni las mismas articulaciones.

Luego de definir los dedos evaluados, el código identifica si el dedo corresponde al pulgar o a uno de los dedos largos. Esta diferenciación permite ajustar el cálculo angular según las articulaciones presentes en cada caso. A continuación, se calculan los ángulos articulares MCP, PIP y DIP en cada frame del movimiento, tomando como base las coordenadas de los marcadores anatómicos. Estos cálculos permiten observar cómo cambia la posición articular durante toda la ejecución de la tarea.

Posteriormente, el código detecta la fase real del movimiento, con el fin de evitar analizar frames en los que la mano se encuentra en reposo o en transición. Una vez identificada esta fase, se selecciona el frame de máxima flexión o extensión, según el comportamiento angular registrado. Para obtener un resultado más representativo, se calcula el promedio de los ángulos en una ventana de tres frames alrededor del frame seleccionado. Finalmente, el código asigna signo negativo a los ángulos de extensión, de acuerdo con la convención definida para representar la dirección del movimiento, y genera una tabla final con los valores articulares obtenidos para cada dedo.

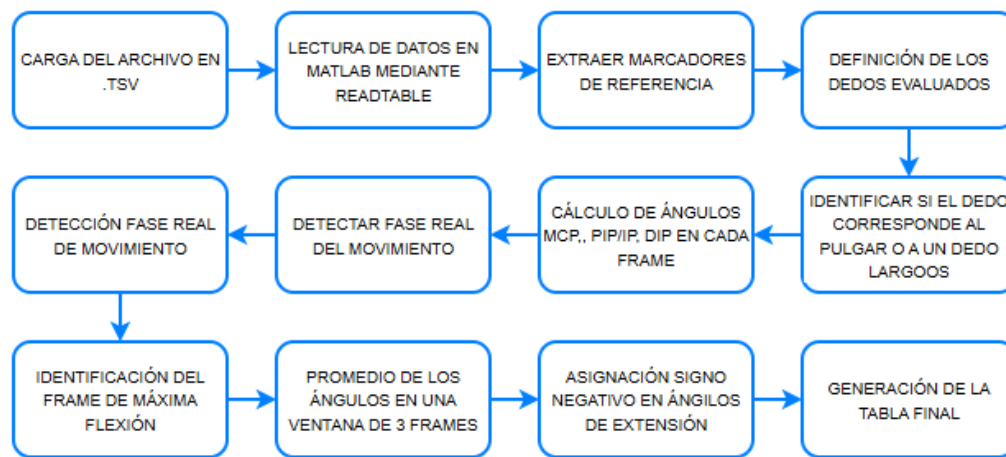


Figura 9: Diagrama de bloques código desarrollado en MATLAB para Extensión - Abducción simultánea

4. Pinza trípode

Para la tarea de pinza trípode, como se ve en la figura 10, el código inicia con la carga del archivo .tsv generado por Qualisys y su lectura en MATLAB mediante la función `readtable`, lo que permite organizar los datos de posición de los marcadores en una estructura manejable para el procesamiento. Posteriormente, se extraen los marcadores de referencia correspondientes al pulgar, índice y medio, debido a que estos son los dedos que participan principalmente en la ejecución de la pinza trípode.

Después de identificar los marcadores necesarios, el código calcula las distancias entre las uñas de los dedos involucrados, específicamente entre pulgar-índice, pulgar-medio

e índice-medio. Estas distancias permiten reconocer el momento en el que los dedos se encuentran más próximos entre sí durante la formación de la pinza. A partir de estas mediciones, se calcula una distancia total de pinza, la cual posteriormente se suaviza mediante una media para reducir variaciones puntuales de la señal y facilitar la identificación del instante más representativo del movimiento.

Con base en la distancia mínima, el código identifica el frame correspondiente al momento de mayor aproximación entre los dedos, es decir, el instante en el que se considera que se realizó la pinza. Para obtener un valor más estable, se selecciona una ventana de análisis alrededor de este frame, incluyendo tres frames antes y tres frames después. Adicionalmente, dentro de una ventana más amplia se identifica el frame de máxima flexión, lo que permite seleccionar el momento más representativo del gesto. Finalmente, el código calcula los ángulos articulares, promedia los valores obtenidos en la ventana de análisis y genera una tabla final con los resultados correspondientes a cada articulación evaluada.

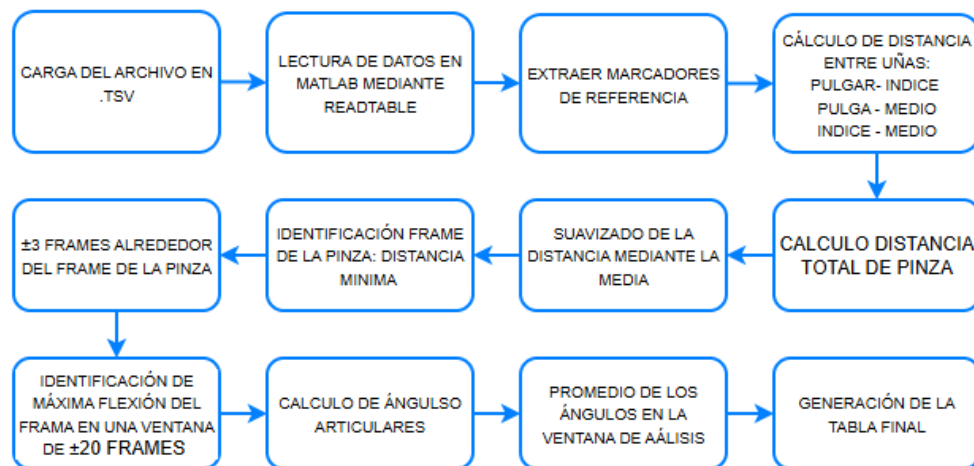


Figura 10: Diagrama de bloques código desarrollado en MATLAB para Pinza trípode

2.5. Construcción de un prototipo inicial

Con el fin de definir una configuración adecuada para el análisis cinemático de la mano y los dedos, se realizó la construcción de un prototipo inicial del esquema de marcaje, el

cual permitió establecer la ubicación preliminar de los marcadores reflectivos sobre puntos anatómicos estratégicos de la mano dominante. Esta etapa tuvo como propósito evaluar de manera visual y funcional la distribución de los marcadores, considerando aspectos como la visibilidad para el sistema de captura óptica, la reducción de oclusiones entre dedos, la comodidad del participante y la viabilidad del procesamiento posterior en MATLAB.

El diseño preliminar incluyó marcadores distribuidos sobre la muñeca, las articulaciones metacarpofalángicas, interfalángicas y los extremos distales de los dedos, buscando representar los principales segmentos involucrados en los movimientos funcionales de la mano. A partir de esta configuración inicial, se pudieron identificar posibles ajustes en la ubicación de los marcadores antes de la implementación definitiva del .

A continuación, en la figura 11 se presenta la distribución propuesta para el prototipo inicial del esquema de marcaje sobre la superficie dorsal de la mano.

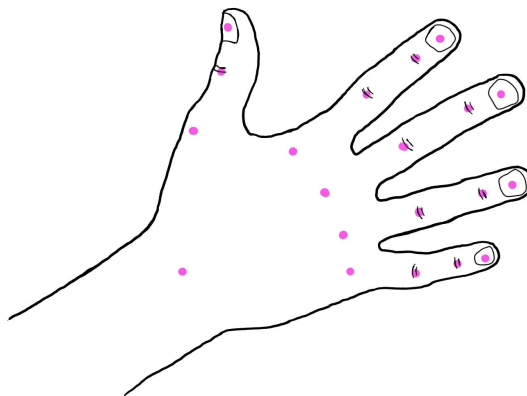


Figura 11: Diseño del prototipo inicial propuesto

2.6. Configuración y ubicación de las cámaras del sistema de captura

Para el desarrollo de las pruebas de captura de movimiento, se realizó una configuración específica del sistema óptico del laboratorio, seleccionando únicamente cuatro de las ocho cámaras disponibles, con el fin de optimizar la visibilidad de los marcadores reflectivos

ubicados sobre la mano y reducir posibles oclusiones durante la ejecución de las tareas funcionales.

Las cámaras utilizadas correspondieron a las cámaras 3, 4, 7 y 8 del sistema de captura. Con el propósito de ajustar el campo visual y mejorar el enfoque sobre la región de interés, cada una de las cámaras fue retirada de su soporte original y ubicada sobre trípodes móviles, permitiendo modificar su posición y altura de manera más flexible dentro del espacio de captura.

Las alturas definidas para cada cámara fueron establecidas de acuerdo con las necesidades de visualización del sistema de marcaje. La cámara 3 fue ubicada a una altura aproximada de 75 cm, la cámara 4 a 85 cm, la cámara 7 a 160 cm y la cámara 8 a 94 cm respecto al nivel del suelo. Esta distribución permitió obtener diferentes ángulos de captura sobre la superficie dorsal de la mano, favoreciendo la detección simultánea de los marcadores reflectivos durante los movimientos evaluados.

En la Figura 12 se presenta la disposición experimental utilizada para la ubicación de las cámaras dentro del laboratorio de análisis de movimiento.



Figura 12: Ubicación de las cámaras

3. Fase de Evaluación

3.1. Plan de pruebas o validación

Para la evaluación del funcionamiento del proceso diseñado, se realizó una evaluación preliminar mediante pruebas piloto con 10 participantes sanos. En esta fase se tuvo como propósito analizar si el esquema de marcaje con 20 marcadores reflectivos, el procedimiento de captura y el procesamiento de datos permitían obtener mediciones cinemáticas adecuadas para el análisis de los ángulos articulares de la mano y los dedos.

Estas pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, utilizando el sistema de captura disponible en el laboratorio. Antes de iniciar cada prueba, se explicó el procedimiento a cada participante, se verificó el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión, y se solicitó la firma del consentimiento informado. Posteriormente, se realizó la preparación de la mano dominante y la colocación de los marcadores reflectivos según el esquema definido.

Durante las pruebas, se le pidió a cada participante realizar las tareas funcionales seleccionadas previamente, siguiendo instrucciones claras y uniformes con el fin de reducir variaciones asociadas con la ejecución de los movimientos. Para el análisis general del proyecto, se tuvieron en cuenta tres tareas funcionales previamente asignadas: flexión y extensión de los dedos, oposición del pulgar y agarre cilíndrico, de acuerdo con el alcance definido para el .

La evaluación del proceso se centró en cuatro aspectos relevantes: la visibilidad de los marcadores durante la captura, la comodidad de los participantes, la calidad de los datos obtenidos y la coherencia de los ángulos articulares calculados mediante MATLAB. Para esto, se tuvo en cuenta si los marcadores permanecieron visibles durante los movimientos, si se presentaron oclusiones, si los participantes pudieron realizar las tareas sin restricciones evidentes y si los datos exportados pudieron ser procesados correctamente.

Durante la etapa preliminar de ajuste metodológico, se realizaron pruebas internas en las dos investigadoras con el fin de verificar la ubicación anatómica de los marcadores, su visibilidad durante los movimientos funcionales establecidos y el funcionamiento general del proceso de captura. Estas pruebas no fueron incluidas como resultados del estudio, ya que su finalidad fue comprobar el esquema de marcaje antes de aplicarlo en los participantes.

Adicionalmente, se realizó una comparación inicial de los ángulos articulares obtenidos mediante MATLAB con mediciones de referencia tomadas con goniómetro en dos casos: una de las investigadoras y la primera participante evaluada. Esta comparación permitió identificar diferencias iniciales entre la medición manual y los valores calculados a partir de la captura de movimiento, así como orientar ajustes en el procesamiento e interpretación de los datos. Sin embargo, debido al número reducido de casos comparados, esta etapa no se considera una validación estadística del error angular, sino una verificación preliminar de la coherencia de los resultados.

Para el análisis general del proyecto, se reportaron únicamente las tres tareas funcionales previamente asignadas y aplicadas de manera uniforme a los participantes, con el fin de mantener la consistencia del análisis dentro del alcance del proceso propuesto.

De esta manera, el plan de evaluación permitió determinar si el proceso propuesto era viable y aplicable dentro de las condiciones técnicas del laboratorio. Los resultados obtenidos en esta fase se usaron como base para realizar ajustes en el esquema de marcaje, mejorar el procesamiento de los datos y fortalecer la implementación del proceso en futuras aplicaciones académicas, clínicas y de rehabilitación.

3.2. Plan de análisis de resultados

Luego de realizar las pruebas piloto, las capturas obtenidas mediante el sistema Qualisys fueron revisadas y procesadas previamente con el fin de verificar la calidad del registro y la continuidad de las trayectorias de los marcadores. Durante algunos movimientos funcionales se presentaron pérdidas temporales de marcadores debido a oclusiones, superposición de los dedos o cambios en la orientación de la mano frente a las cámaras, por lo que fue necesario reconstruir las trayectorias cuando el sistema lo permitía. Posteriormente, los datos fueron exportados en formato .tsv y procesados en MATLAB. A partir de estos archivos, se extrajeron las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectivos ubicados sobre la mano dominante, con el fin de reconstruir la posición de los segmentos de la mano y calcular los ángulos articulares durante la ejecución de los movimientos funcionales.

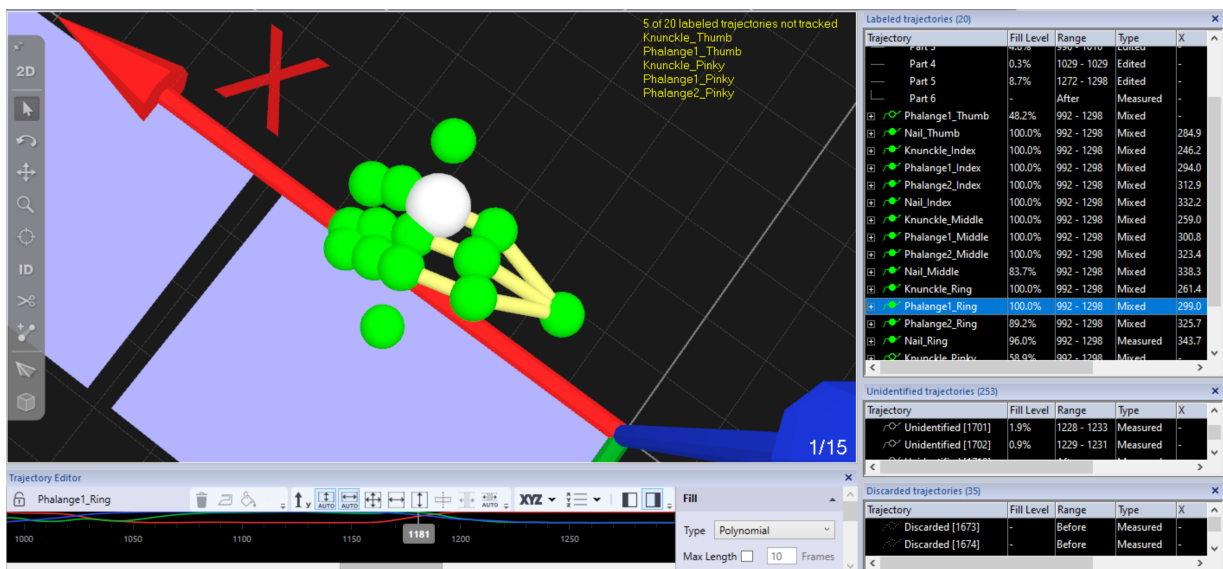


Figura 13: Visualización de movimiento en Qualisys

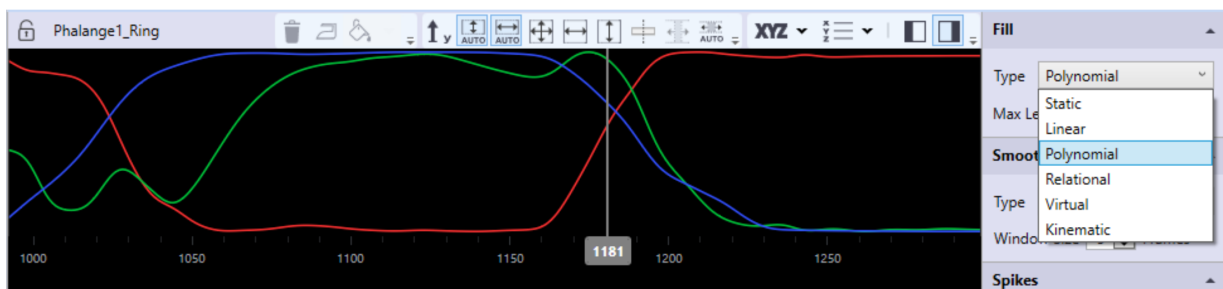


Figura 14: Reconstrucción de marcadores

Las capturas fueron seleccionadas teniendo en cuenta la calidad del registro, la visibilidad de los marcadores y la posibilidad de reconstruir adecuadamente las trayectorias perdidas. En los casos donde la pérdida de marcadores afectaba de manera significativa el movimiento o impedía identificar correctamente los puntos anatómicos, la toma no fue considerada para el análisis. De esta forma, se buscó garantizar que los archivos procesados en MATLAB contaran con la información necesaria para construir los vectores segmentarios y calcular los ángulos articulares.

Para este análisis cinemático, se construyeron vectores segmentarios a partir de la relación espacial entre los marcadores. Estos vectores permiten representar la orientación de cada

segmento de los dedos y posteriormente calcular los ángulos articulares correspondientes. La construcción de los vectores se realizó de la siguiente manera:

Articulación evaluada	Vector 1	Vector 2
MCP	Marcador de la muñeca al marcador metacarpofalángico del dedo	Marcador metacarpofalángico al marcador interfalángico proximal
PIP	Marcador metacarpofalángico al marcador interfalángico proximal	Marcador interfalángico proximal al marcador interfalángico distal
DIP	Marcador interfalángico proximal al marcador interfalángico distal	Marcador interfalángico distal al marcador ubicado en la uña

Cuadro 5: Construcción de vectores.

3.2.1. Procedimientos matemáticos implementados en MATLAB

El cálculo de los ángulos articulares se fundamentó en una aproximación geométrica del movimiento, en la cual los segmentos de los dedos se representaron mediante vectores contruidos entre marcadores anatómicos consecutivos. Esta aproximación es coherente con modelos cinemáticos de la mano que representan los dedos como cadenas de segmentos articulados, permitiendo describir su orientación y movimiento a partir de relaciones espaciales entre puntos de referencia. [21]

Para las tareas en las que se requería identificar el acercamiento entre dos o más dedos, como la oposición del pulgar y la pinza, el instante de análisis se determinó a partir de la distancia euclidiana entre los marcadores de los dedos involucrados. Esta distancia permitió identificar el momento de mayor aproximación entre los dedos, asociado al contacto funcional durante la tarea. La distancia entre dos marcadores se calculó mediante la siguiente expresión:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

En MATLAB, esta operación se implementó mediante la función `vecnorm`, considerando las

coordenadas tridimensionales de los marcadores evaluados. Posteriormente, se seleccionó el frame en el cual la distancia entre los marcadores fue mínima:

$$f_c = \arg \min(d) \quad (2)$$

Donde f_c corresponde al frame de contacto o mayor aproximación entre los dedos involucrados.

Para la tarea de flexión-extensión por dedo, el instante representativo del movimiento se determinó a partir del frame en el cual se presentó la mayor flexión articular. Para ello, se calculó una flexión global del dedo mediante la suma de los ángulos de las articulaciones evaluadas:

$$F_{global} = MCP + PIP + DIP \quad (3)$$

A partir de esta señal, se seleccionó el frame correspondiente al valor máximo de flexión:

$$f_{max} = \arg \max(F_{global}) \quad (4)$$

Con base en los vectores definidos para cada articulación, el cálculo de los ángulos articulares se realizó en MATLAB mediante una relación geométrica entre tres puntos consecutivos. Para cada articulación se tomó un marcador proximal, un marcador articular y un marcador distal, denominados A, B y C, respectivamente, donde B corresponde al punto articular evaluado. A partir de estos puntos se construyeron dos vectores con vértice común en la articulación:

$$\vec{v}_1 = A - B \quad (5)$$

$$\vec{v}_2 = C - B \quad (6)$$

Posteriormente, se calculó el ángulo geométrico entre ambos vectores mediante el producto punto, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\theta_{geom} = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{\|\vec{v}_1\| \|\vec{v}_2\|} \right) \quad (7)$$

En MATLAB, esta operación fue implementada utilizando las funciones *dot* [27], *norm* [28] y *acosd* [29], esta última con el fin de obtener el resultado directamente en grados. De esta manera, el cálculo permitió estimar la apertura angular entre dos segmentos consecutivos del dedo a partir de las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectivos.

Sin embargo, debido a que el ángulo geométrico interno entre los segmentos puede ser cercano a 180° cuando el dedo se encuentra extendido, fue necesario convertir este valor a una interpretación clínica de flexión-extensión. Para ello, se aplicó la siguiente transformación:

$$\theta_{clinico} = 180^\circ - \theta_{geom} \quad (8)$$

Esta transformación permitió expresar los resultados de manera más coherente con la medición clínica convencional, en la cual la posición extendida del dedo se aproxima a 0° y el valor angular aumenta conforme se produce la flexión.

Para el cálculo de las articulaciones de los dedos largos, los vectores se construyeron de acuerdo con la ubicación anatómica de los marcadores. En la articulación MCP se utilizaron los puntos correspondientes a muñeca, nudillo y falange proximal; en la articulación PIP se emplearon los puntos nudillo, falange proximal y falange media; y en la articulación DIP se utilizaron los puntos falange proximal, falange media y uña. En el caso del pulgar, el cálculo se adaptó según la tarea funcional evaluada, considerando la relación entre los marcadores ubicados en el nudillo, la falange proximal y la uña, con el fin de representar de mejor manera el movimiento funcional de oposición y flexión del pulgar.

Además del cálculo angular, los códigos en MATLAB incluyeron criterios para identificar el instante más representativo del movimiento según la tarea evaluada. En tareas como oposición del pulgar y pinza trípode, este instante se determinó a partir de la distancia mínima entre los marcadores de los dedos involucrados. En la tarea de flexión-extensión por dedo, se consideró el frame asociado a la mayor flexión articular, calculada a partir de la suma de los ángulos de las articulaciones evaluadas. En la tarea de abducción-extensión, se seleccionó el instante en el cual se evidenció la mayor separación entre los dedos, con el fin de representar el momento de mayor apertura digital. En algunos casos, se utilizó un promedio de frames alrededor del instante seleccionado, con el propósito de representar

una postura más estable y reducir la influencia de variaciones puntuales de la señal.

Para disminuir la influencia de variaciones puntuales, en algunos casos se calculó un promedio de los ángulos alrededor del frame seleccionado. Para ello, se definió una ventana de frames antes y después del instante de interés:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{k=f-w}^{f+w} \theta_k \quad (9)$$

Donde f corresponde al frame seleccionado, w representa la ventana de análisis alrededor de dicho frame, N es el número total de frames considerados y θ_k corresponde al ángulo calculado en cada frame. En MATLAB, este procedimiento se implementó mediante el cálculo del promedio omitiendo valores no disponibles.

Adicionalmente, se aplicaron procedimientos de suavizado mediante funciones como *movmedian* [30] y *movmean* [31], con el propósito de disminuir pequeñas fluctuaciones asociadas al ruido de captura, vibraciones de los marcadores o artefactos generados por el movimiento de la piel. Estos procedimientos no modificaron la lógica geométrica del cálculo, sino que permitieron mejorar la estabilidad de las señales utilizadas para estimar los ángulos articulares.

Los resultados obtenidos mediante el procesamiento en MATLAB fueron organizados en tablas independientes para cada tarea funcional analizada. En cada tabla se presentaron los valores angulares calculados, diferenciando el dedo evaluado y la articulación correspondiente. Esta organización permitió visualizar de manera más clara los resultados específicos de cada tarea y facilitar la comparación descriptiva entre los ángulos obtenidos. Aunque los datos obtenidos mediante el sistema de captura permiten calcular otras variables cinemáticas, como rango de movimiento, trayectorias, velocidades y aceleraciones, el alcance del presente proyecto se centró en el cálculo y análisis de los ángulos articulares durante las tareas funcionales seleccionadas.

Como parte del análisis comparativo, se realizó una comparación preliminar entre algunos ángulos obtenidos mediante MATLAB y mediciones de referencia tomadas con goniómetro. Esta comparación se realizó únicamente en dos casos: una de las investigadoras y la primera participante evaluada. Para ello, se calculó el error absoluto entre el ángulo estimado mediante MATLAB y el ángulo medido manualmente:

$$Error\ absoluto = |\theta_{MATLAB} - \theta_{goniometro}| \quad (10)$$

Este valor permitió identificar diferencias iniciales entre ambos métodos de medición y orientar ajustes en la interpretación de los resultados. Sin embargo, debido al número reducido de casos comparados, esta etapa no se consideró una validación estadística del error angular, sino una verificación preliminar de la coherencia de los ángulos calculados mediante MATLAB.

Es importante aclarar que no se implementó una corrección matemática directa mediante ajuste lineal en los códigos finales. Aunque inicialmente se consideró la posibilidad de aplicar una relación lineal entre los ángulos obtenidos por MATLAB y las mediciones de referencia con goniómetro, esta opción no fue incorporada dentro del procesamiento final, ya que la comparación goniométrica se planteó únicamente como una verificación preliminar y no como una etapa de calibración del modelo. Por lo tanto, se decidió mantener un método de cálculo basado en la geometría de los marcadores y realizar los ajustes desde el enfoque metodológico, mediante la selección adecuada del frame de análisis, la conversión del ángulo geométrico a ángulo clínico, el suavizado de las señales y la adaptación biomecánica de los vectores según la tarea evaluada.

Debido al alcance preliminar del proyecto, no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales. El análisis se realizó de manera descriptiva, mediante la organización de los ángulos calculados en tablas por tarea funcional, la comparación preliminar con las mediciones de referencia tomadas en los casos definidos para esta etapa y la revisión de la coherencia de los resultados respecto a los rangos articulares esperados para los movimientos funcionales de la mano y los dedos.

Finalmente, los resultados obtenidos sirvieron como base para identificar limitaciones del proceso, especialmente aquellas relacionadas con la ubicación de los marcadores, la visibilidad durante la captura, la selección del instante de análisis, la ejecución del movimiento por parte del participante y las características propias del modelo cinemático utilizado. De esta manera, el plan de análisis permitió evaluar la coherencia preliminar de los ángulos articulares calculados y fortalecer la implementación del dentro del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

3.3. Indicadores de éxito

Como parte del proceso de validación del proceso de análisis cinemático de la mano y los dedos, se establecieron diferentes indicadores de éxito orientados a evaluar el desempeño general del sistema de captura, el esquema de marcaje seleccionado y el procesamiento de los datos obtenidos durante las pruebas experimentales. La definición de estos indicadores permitió realizar un seguimiento estructurado de cada una de las etapas involucradas en el desarrollo del proceso, identificando posibles limitaciones y verificando el cumplimiento de los objetivos planteados dentro del proyecto.

Los indicadores definidos contemplan aspectos relacionados con la correcta colocación de los marcadores reflectivos, la visibilidad de los mismos durante la ejecución de los movimientos funcionales y la reducción de oclusiones generadas por la cercanía entre los dedos o por cambios en la orientación de la mano durante la captura. De igual manera, se consideraron criterios asociados a la comodidad del participante, buscando garantizar que las tareas funcionales pudieran ejecutarse de manera natural y sin restricciones que alteraran el comportamiento biomecánico de la mano.

Adicionalmente, se incluyeron indicadores relacionados con la calidad de los datos exportados desde el sistema Qualisys y su posterior procesamiento en MATLAB, teniendo en cuenta la necesidad de obtener coordenadas tridimensionales suficientemente precisas para la construcción de vectores segmentarios y el cálculo de los ángulos articulares. Dentro de esta etapa también se contempló la comparación de los resultados obtenidos mediante el procesamiento computacional con mediciones realizadas utilizando goniómetro, con el fin de verificar la coherencia de los valores calculados y evaluar la aproximación del proceso frente a métodos clínicos de referencia.

Indicador de éxito	Actividad clave	Criterio de éxito	Entregable parcial	Responsable
Colocación de los marcadores según el modelo que se estableció	Ubicar los 20 marcadores reflectivos sobre la mano dominante según lo definido en la Sección 2.5.	Los marcadores deben ubicarse en los puntos anatómicos establecidos, los cuales fueron: la muñeca, articulaciones MCP, PIP, DIP/IP y las uñas.	Registro fotográfico del esquema de marcaje	Investigadoras
Visibilidad de los marcadores	Verificar mediante la captura de los movimientos funcionales con el sistema Qualisys que los marcadores sí sean visibles.	La mayor cantidad de los marcadores debe permanecer visible durante la ejecución de los movimientos.	Registro de captura y observaciones sobre pérdida de marcadores	Investigadoras
Reducción de oclusiones	Revisar la pérdida de marcadores durante las tareas funcionales.	No deben existir oclusiones que impidan el procesamiento de los datos ni el cálculo de los ángulos articulares.	Reporte de oclusiones o trayectorias incompletas	Investigadoras
Comodidad del participante	Verificar que durante las pruebas piloto los movimientos se puedan ejecutar sin ninguna restricción.	Durante la ejecución de los movimientos, los participantes no deben manifestar ningún tipo de dolor, molestia o restricción.	Retroalimentación dentro de las pruebas piloto y registro en caso de que algún participante lo manifieste	Investigadoras
Calidad de los datos exportados	Exportación de los datos obtenidos por Qualisys en formato .tsv.	Los archivos deben contener coordenadas tridimensionales suficientes que permitan ser procesadas en MATLAB.	Archivos .tsv organizados por participante y movimiento	Investigadoras
Procesamiento correcto en MATLAB	Importación de los datos, construcción de los vectores segmentarios y cálculo de los ángulos articulares.	El código debe permitir obtener valores de ángulos por dedo, articulación y movimiento evaluado.	Tablas de resultados generadas en MATLAB y tabla general con todos los resultados obtenidos generada en Excel	Investigadoras
Comparación con goniómetro	Comparar los ángulos de algunos participantes obtenidos en MATLAB con mediciones tomadas con goniómetro.	Los valores calculados deben ser cercanos y coherentes con la medición clínica de referencia.	Tabla comparativa MATLAB vs. goniómetro	Investigadoras
Ajustes del método	Ajustar los valores obtenidos a medida que se identifiquen desviaciones relevantes, con el fin de obtener valores más cercanos.	Los ajustes realizados deben mejorar la aproximación de los ángulos calculados frente a los valores de referencia.	Tabla de resultados ajustados	Investigadoras
Identificación de limitaciones	Analizar los errores que pueden estar asociados a marcadores, captura o procesamiento.	Se deben identificar cuáles son los principales factores que afectan la precisión del proceso.	Lista de limitaciones identificadas y oportunidades de mejora	Investigadoras y directora
Aplicabilidad del proceso	Evaluar si el proceso es repetible en condiciones similares dentro del laboratorio de la universidad.	El proceso debe poder aplicarse nuevamente siguiendo los mismos pasos sobre todos los participantes.	Identificación del proceso final de marcaje, captura y análisis	Investigadoras

Cuadro 6: Indicadores de éxito definidos para la validación del proceso

3.4. Prototipo final testeado

El prototipo final evaluado correspondió al proceso completo de análisis cinemático de la mano y los dedos, compuesto por el esquema de marcaje con 20 marcadores reflectivos, la captura de los movimientos funcionales mediante el sistema Qualisys y el procesamiento de los datos en MATLAB.

Después de la etapa preliminar de ajuste metodológico realizada con las investigadoras y de la posterior aplicación de las pruebas piloto en los participantes, se comprobó que el esquema de marcaje permitió registrar los principales movimientos de la mano y los dedos, así como calcular los ángulos articulares mediante la construcción de vectores segmentarios. A partir de los resultados obtenidos, se realizaron ajustes en el procesamiento de los datos y en la interpretación de los ángulos, considerando aspectos como la visibilidad de los marcadores, la selección del frame representativo del movimiento y la coherencia de los valores calculados mediante MATLAB.

Adicionalmente, la comparación preliminar con mediciones de referencia tomadas con goniómetro permitió orientar la interpretación inicial de algunos ángulos articulares, sin constituir una validación estadística del método. Esta etapa contribuyó a identificar diferencias entre la medición manual y los valores obtenidos por captura de movimiento, fortaleciendo el ajuste metodológico del proceso.

De esta manera, el prototipo final no corresponde únicamente a la ubicación física de los marcadores, sino al proceso integrado de marcaje, captura, reconstrucción de trayectorias, exportación de datos, procesamiento en MATLAB y análisis de los ángulos articulares. Este proceso permitió establecer una versión preliminar funcional, la cual puede ser utilizada como base para futuras pruebas, mejoras metodológicas y aplicaciones académicas o clínicas dentro del laboratorio.

3.4.1. Comparación preliminar con mediciones goniométricas

Como parte de la evaluación preliminar del prototipo final, se realizó una comparación entre algunos ángulos articulares calculados mediante MATLAB y mediciones de referencia tomadas con goniómetro. Esta comparación se llevó a cabo en dos casos: una de las investigadoras, durante la etapa de ajuste metodológico, y la primera participante evaluada. El propósito de este análisis fue estimar de manera descriptiva la diferencia entre los

valores obtenidos por captura de movimiento y la medición manual, con el fin de verificar la coherencia inicial del cálculo angular.

Para la comparación preliminar con las mediciones goniométricas, se calculó el error absoluto de acuerdo con la Ecuación [10](#), presentada en la sección 3.2.1. Además, se calculó el porcentaje de error con el fin de expresar la diferencia entre ambos métodos en relación con la medición tomada con goniómetro.

$$\text{Error porcentual} = \frac{|\theta_{MATLAB} - \theta_{\text{goniómetro}}|}{|\theta_{\text{goniómetro}}|} \times 100 \quad (11)$$

Donde θ_{MATLAB} corresponde al ángulo calculado mediante el procesamiento en MATLAB y $\theta_{\text{goniómetro}}$ corresponde al ángulo medido manualmente con goniómetro.

Los resultados de esta comparación se organizaron en tablas independientes para cada tarea funcional analizada: flexión-extensión por dedo, oposición del pulgar, pinza trípode y abducción-extensión. En cada tabla se presentan los ángulos obtenidos mediante MATLAB, el error absoluto y el porcentaje de error correspondiente, diferenciando el caso evaluado, el dedo y la articulación. Esta organización permitió identificar de manera más clara las diferencias entre ambos métodos según la tarea funcional y la articulación evaluada.

Es importante aclarar que esta comparación no constituye una validación estadística del método, debido a que fue realizada únicamente en dos casos específicos. Por lo tanto, los resultados se interpretan como una verificación preliminar de la coherencia de los ángulos articulares calculados mediante MATLAB y como una herramienta para identificar posibles ajustes metodológicos en el procesamiento de los datos.

– Tarea 1: Flexión-Extensión por dedo

Participante	Dedo	MCP	Error MCP	PIP	Error PIP	DIP	Error DIP
Investigadora	Index	-40.601	10.601	51.47	18.53	36.265	11.265
	Middle	-31.986	1.986	42.775	22.225	40.42	18.42
	Ring	-49.751	14.751	61.233	52.327	24.686	11.686
	Pinky	-53.206	18.206	53.911	20.894	6.96	29.04
1	Index	-38.922	8.9216	46.39	23.61	23.322	1.6778
	Middle	-37.487	7.4869	48.762	16.238	23.566	1.5661
	Ring	-29.806	5.1937	51.937	13.063	31.978	18.978
	Pinky	-41.031	6.0309	44.031	11.969	23.24	12.76

Cuadro 7: Comparación preliminar para la tarea de flexión-extensión por dedo.

Como se puede observar en el cuadro 7, se observaron diferencias entre los ángulos obtenidos mediante MATLAB y las mediciones tomadas con goniómetro, principalmente en algunas articulaciones MCP. Esta tarea permitió evaluar de manera individual el movimiento de cada dedo, por lo que fue útil para revisar la capacidad de identificar los marcadores anatómicos, construir los vectores segmentarios y calcular los ángulos articulares de forma diferenciada.

Los errores observados en la articulación MCP pueden estar relacionados con la definición del vector proximal utilizado para el cálculo, ya que esta articulación depende de la relación entre el marcador de la muñeca, el nudillo y la falange proximal. Cualquier variación en la ubicación del marcador de la muñeca o del nudillo puede modificar la orientación del vector y, por lo tanto, afectar el ángulo calculado. Además, la articulación MCP se encuentra en una zona donde el movimiento de la piel y los tejidos blandos puede generar desplazamientos del marcador respecto al eje articular real, lo cual puede explicar parte de las diferencias frente a la medición manual.

En las articulaciones PIP y DIP, los errores fueron diferentes entre dedos y casos evaluados. Estas variaciones pueden estar asociadas con la cercanía entre los marcadores, el tamaño reducido de las falanges y la dificultad de mantener una trayectoria completamente estable durante la flexión del dedo. Además, aunque la tarea se realizó de forma individual, el movimiento de un dedo puede generar pequeños desplazamientos en los dedos adyacentes o en la postura general de la mano, lo que puede influir en la reconstrucción de los vectores.

También debe considerarse que la medición con goniómetro corresponde a una medición manual en una postura específica, mientras que el valor calculado en MATLAB proviene de un frame seleccionado dentro de una captura dinámica. Por esta razón, pequeñas diferencias entre el instante medido manualmente y el instante seleccionado por el código pueden generar variaciones en los ángulos obtenidos. En este sentido, la selección del frame de máxima flexión fue un paso importante para intentar representar el momento más comparable con la medición goniométrica.

En algunos casos, los valores negativos observados en MCP pueden estar asociados con la orientación de los vectores segmentarios y con la convención angular utilizada en MATLAB. Por ello, estos valores deben interpretarse considerando el sistema de referencia empleado y no únicamente como una magnitud clínica directa. Esta situación evidencia la necesidad de revisar, en futuras versiones del procesamiento, la estandarización de la dirección de los vectores y la interpretación de los signos angulares.

Con el fin de complementar la comparación preliminar entre los ángulos calculados mediante MATLAB y las mediciones tomadas con goniómetro, se elaboraron gráficas de porcentaje de error para cada tarea funcional. Estas gráficas permiten visualizar de manera más clara las articulaciones que presentaron mayores diferencias entre ambos métodos de medición. Los errores se presentan de forma diferenciada para MCP, PIP/IP y DIP, según la tarea evaluada y el caso analizado.

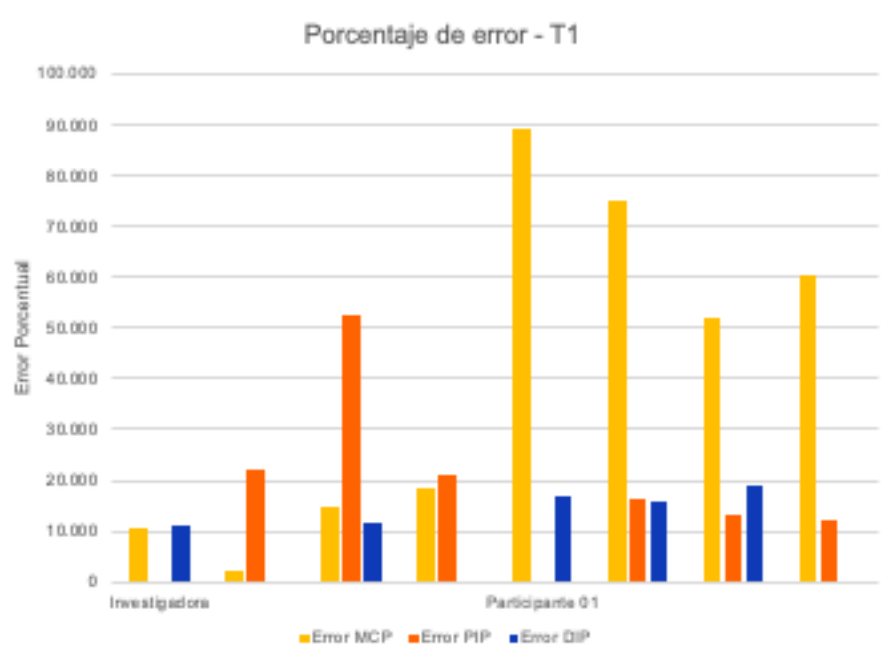


Figura 15: Porcentaje de error en la tarea T1: flexión-extensión por dedo.

En la Figura 15 se observa que el porcentaje de error varió entre articulaciones y entre los dos casos evaluados. En la investigadora, los errores se mantuvieron en valores relativamente menores para la mayoría de las articulaciones, aunque se evidenció un aumento puntual en PIP. En la Participante 01, los errores más altos se presentaron principalmente en la articulación MCP, lo cual puede estar relacionado con la definición del vector proximal utilizado para esta articulación, ya que depende de la ubicación de los marcadores de la muñeca, el nudillo y la falange proximal.

Estos resultados sugieren que la articulación MCP puede ser más sensible a variaciones en la ubicación de los marcadores y en la orientación de los vectores segmentarios. Además, debe considerarse que la medición con goniómetro corresponde a una postura manual específica, mientras que el valor calculado en MATLAB proviene de un frame seleccionado dentro de una captura dinámica, lo que puede generar diferencias entre ambos métodos. Esto representa una oportunidad de mejora para futuras versiones del procesamiento, en las cuales podría revisarse la definición del vector proximal utilizado para MCP o la estandarización de la postura inicial durante la captura.

– Tarea 2: Oposición pulgar

Participante	Dedo	MCP	Error MCP	PIP	Error PIP	DIP	Error DIP
Investigadora	Index	53.456	2.4563	45.918	90.825	22.067	19.332
	Middle	72.218	21.218	39.396	56.06	41.293	24.293
	Ring	39.753	3.965	59.915	10.847	14.782	15.43
	Pinky	46.486	0.51443	24.237	36.763	13.57	15.43
1	Index	48.038	29.616	51.45	35.504	23.45	0.54956
	Middle	58.609	7.609	27.633	32.367	43.853	84.633
	Ring	39.71	72.899	61.639	0.63942	23.463	84.633
	Pinky	58.715	11.715	46.172	14.828	21.839	81.605

Cuadro 8: Comparación preliminar para la tarea de oposición del pulgar.

A partir de los datos vistos en cuadro 8 se evidenció una mayor variabilidad en los errores según el dedo hacia el cual se dirigía el movimiento. Este comportamiento puede explicarse por la complejidad tridimensional de la oposición, ya que el pulgar no realiza únicamente flexión-extensión, sino una combinación de flexión, abducción y rotación funcional para alcanzar cada dedo. [33]

En algunos contactos, especialmente hacia los dedos más alejados, se observaron errores más altos en determinadas articulaciones. Esto puede estar asociado con la mayor distancia anatómica que debe recorrer el pulgar y con la dificultad para mantener visibles todos los marcadores durante el contacto. En particular, cuando el pulgar entraba en contacto con el meñique, algunos marcadores podían quedar parcialmente ocultos por la posición de los demás dedos o por la orientación de la mano frente a las cámaras. Esta situación pudo generar confusión en la identificación de algunos marcadores y afectar la continuidad de sus trayectorias, especialmente en los marcadores ubicados sobre el pulgar y el meñique.

La pérdida temporal u oclusión de estos marcadores pudo influir en el cálculo angular, ya que MATLAB depende de la correcta identificación de las coordenadas tridimensionales para construir los vectores segmentarios. Si un marcador se reconstruye de forma incompleta o presenta interrupciones en su trayectoria, el ángulo calculado puede diferir de la postura real del dedo en ese instante. Por esta razón, la tarea de oposición del pulgar presentó mayores desafíos de procesamiento en comparación con movimientos más simples, como la flexión-extensión por dedo.

Asimismo, la selección del frame de menor distancia entre los dedos pudo verse

afectada por estas oclusiones, ya que el instante de contacto funcional no siempre coincidía con el frame de mejor visibilidad de los marcadores. A esto se suma que la medición con goniómetro representa una postura estática, mientras que el cálculo en MATLAB se obtiene a partir de un instante específico dentro de una captura dinámica. Estas diferencias metodológicas ayudan a explicar parte de la variabilidad observada entre ambos métodos.

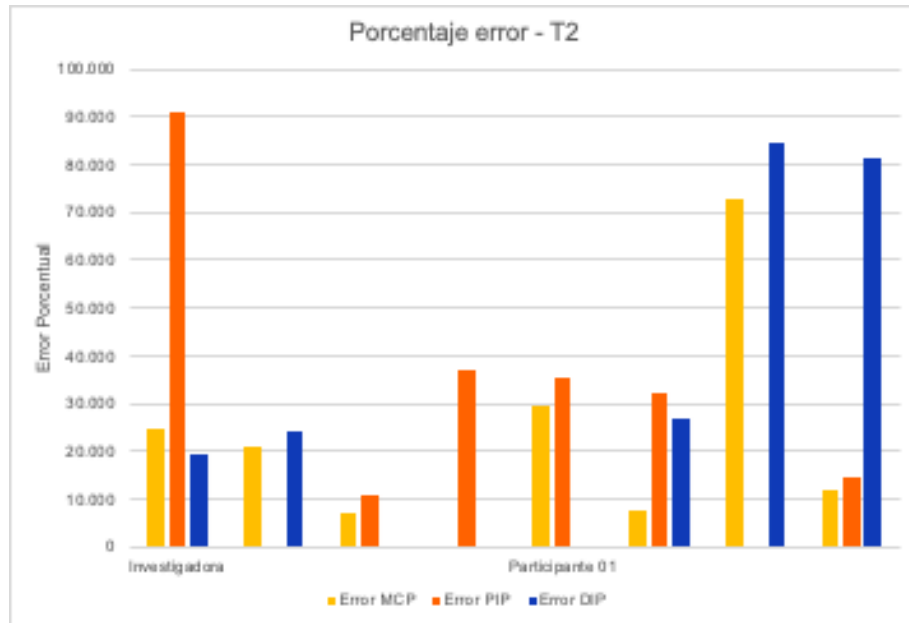


Figura 16: Porcentaje de error en la tarea T2: oposición del pulgar.

La Figura 16 para la tarea de oposición del pulgar permite visualizar que las diferencias entre MATLAB y goniómetro no fueron uniformes entre los casos evaluados ni entre las articulaciones. Se observa que algunos porcentajes de error fueron más altos en determinadas articulaciones, especialmente en PIP y DIP, lo que indica que estas articulaciones presentaron mayor variabilidad durante el cálculo angular.

A diferencia de la tabla, que permite revisar los valores específicos por dedo y articulación, la gráfica facilita identificar de manera general cuáles articulaciones concentraron las mayores diferencias. Este comportamiento refuerza la necesidad de revisar en futuras aplicaciones la visibilidad de los marcadores durante los contactos más complejos y la selección del frame representativo del movimiento.

A pesar de estas diferencias, la tarea de oposición permitió verificar que el código

identifica el momento de mayor aproximación entre los dedos y calcula los ángulos articulares correspondientes. Sin embargo, los resultados indican que el análisis del pulgar requiere especial cuidado debido a su movimiento tridimensional y a la necesidad de definir vectores que representen adecuadamente su comportamiento funcional.

– Tarea 3: Pinza trípode

Participante	Dedo	MCP	Error MCP	PIP_IP	Error PIP_IP	DIP	Error DIP
Investigadora	Thumb	14.409	9.4087	14.409	54.087	90.968	13.903
	Index	48.945	0.055085	31.524	17.476	90.968	13.903
	Middle	51.956	50.436	30.167	78.325	22.439	25.606
1	Thumb	15.113	10.113	15.113	98.875	NaN	NaN
	Index	53.703	47.027	32.597	16.403	10.436	12.564
	Middle	59.614	26.142	36.02	19.804	56.431	19.357

Cuadro 9: Comparación preliminar para la tarea de pinza trípode.

En la tarea de pinza trípode se analizaron los dedos involucrados en el gesto funcional: pulgar, índice y medio. Los errores observados en el cuadro 9 variaron entre articulaciones y entre los dos casos evaluados, lo cual puede estar relacionado con la complejidad del movimiento y con la cercanía entre los dedos durante la ejecución de la pinza.

En esta tarea, la posible oclusión de marcadores representa una limitación importante, ya que el contacto entre el pulgar, el índice y el medio puede dificultar la visibilidad de algunos puntos anatómicos. En particular, debido a la cercanía entre los dedos durante la ejecución del gesto, en algunos momentos podían confundirse los marcadores ubicados en la uña del dedo índice y en la uña del dedo medio, ya que ambos quedaban muy próximos entre sí. Esta situación pudo afectar la identificación correcta de los marcadores y, en consecuencia, la construcción de los vectores segmentarios utilizados para el cálculo de los ángulos articulares. [34, 35]

Adicionalmente, en algunos registros se presentó pérdida temporal de la información correspondiente al marcador de la muñeca. Esta situación resulta relevante, ya que dicho marcador se utiliza como referencia proximal para el cálculo de algunas articulaciones, especialmente la MCP. Por lo tanto, cuando la trayectoria de este

marcador se pierde o se reconstruye de forma incompleta, el cálculo angular puede verse afectado y generar diferencias respecto a la medición obtenida con goniómetro.

Asimismo, pequeñas diferencias en el instante seleccionado para el análisis pueden generar cambios importantes en el ángulo calculado, especialmente en las articulaciones interfalángicas. Esto se debe a que la pinza trípode es un gesto funcional de precisión, en el que variaciones mínimas en la postura de los dedos pueden modificar de manera apreciable la orientación de los segmentos. A esto se suma que la medición con goniómetro corresponde a una postura estática, mientras que el valor calculado en MATLAB se obtiene a partir de un instante específico de una captura dinámica.

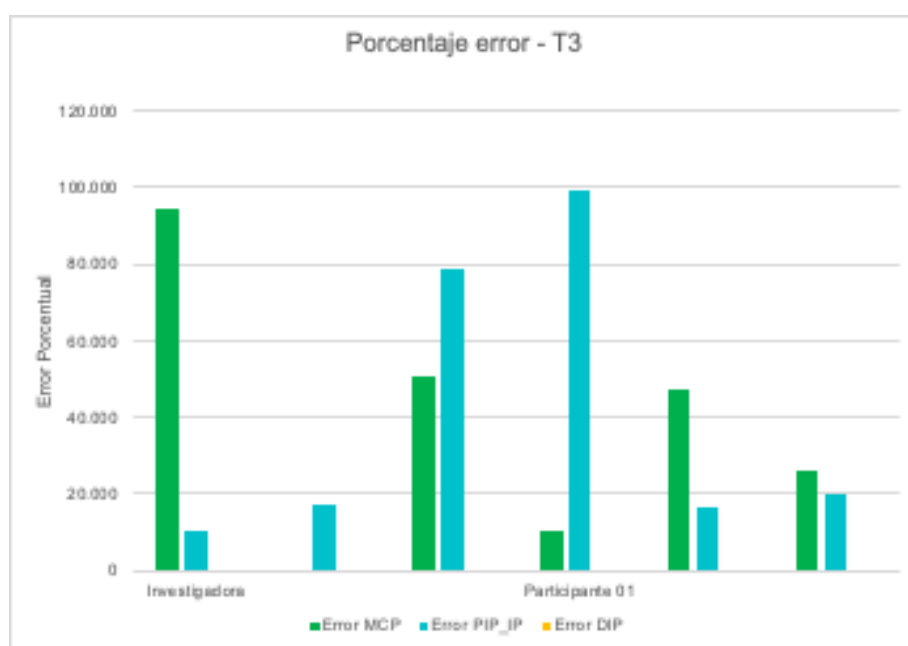


Figura 17: Porcentaje de error en la tarea T3: pinza trípode.

La Figura 17 permite visualizar de manera general la distribución del porcentaje de error durante la tarea de pinza trípode. Se observa que las diferencias no fueron uniformes entre los casos evaluados ni entre las articulaciones, presentándose mayores porcentajes de error en algunas mediciones de MCP y PIP/IP. A diferencia de la tabla, la gráfica facilita identificar rápidamente cuáles articulaciones concentraron las mayores discrepancias entre MATLAB y goniómetro.

Los resultados muestran que la pinza trípode es una tarea útil para evaluar la capacidad del en movimientos funcionales coordinados, pero también evidencia la necesidad

de optimizar la ubicación de los marcadores y la selección del frame representativo. Esto es relevante porque, a diferencia de la flexión-extensión por dedo, la pinza requiere la acción simultánea de varios dedos y una postura más compleja de la mano.

– **Tarea 4: Abducción-Extensión**

Participante	Dedo	MCP	Error MCP	PIP_IP	Error PIP_IP	DIP	Error DIP
Investigadora	Thumb	-19.884	48.844	-19.884	98.844	NaN	NaN
	Index	-21.302	36.981	-8.5442	14.558	-1.731	8.269
	Middle	-21.519	35.493	-15.451	35.493	-75.462	54.538
	Ring	-23.391	36.091	-10.13	6.87	-16.497	10.497
	Pinky	-34.203	3.965	-1.1632	38.368	-5.744	5.744
1	Thumb	-13.008	19.923	-13.008	30.077	NaN	NaN
	Index	-20.266	47.343	-79.173	22.083	-11.208	12.079
	Middle	-10.417	12.583	-55.056	13.494	-15.221	22.213
	Ring	-59.039	21.096	-14.071	29.288	-30.159	30.159
	Pinky	-31.02	89.802	-21.354	16.354	-16.702	16.702

Cuadro 10: Comparación preliminar para la tarea de abducción-extensión.

En la tarea de abducción-extensión, el análisis se centró principalmente en los ángulos de extensión de las articulaciones de los dedos durante la apertura de la mano. Aunque el movimiento incluye la separación lateral entre los dedos, el cálculo angular obtenido mediante MATLAB permitió evaluar principalmente la orientación de los segmentos durante la extensión, de acuerdo con los vectores definidos entre los marcadores anatómicos.

En el cuadro [10](#) se observaron valores angulares negativos en varias articulaciones. Este comportamiento puede estar relacionado con la dirección del movimiento respecto al sistema de referencia utilizado en MATLAB y con la orientación de los vectores segmentarios definidos para el cálculo. Por esta razón, estos valores no deben interpretarse necesariamente como un error del procesamiento, sino como una consecuencia de la convención angular utilizada para representar la extensión de los dedos.

Los errores observados en esta tarea variaron entre dedos y articulaciones. Estas diferencias pueden estar asociadas con la dificultad de representar simultáneamente

la abducción y la extensión mediante un mismo esquema vectorial, ya que la separación de los dedos ocurre en un plano diferente al de la flexión-extensión. Además, la orientación de la mano frente al sistema de cámaras y la visibilidad de los marcadores pueden influir en la reconstrucción de los segmentos durante este movimiento.

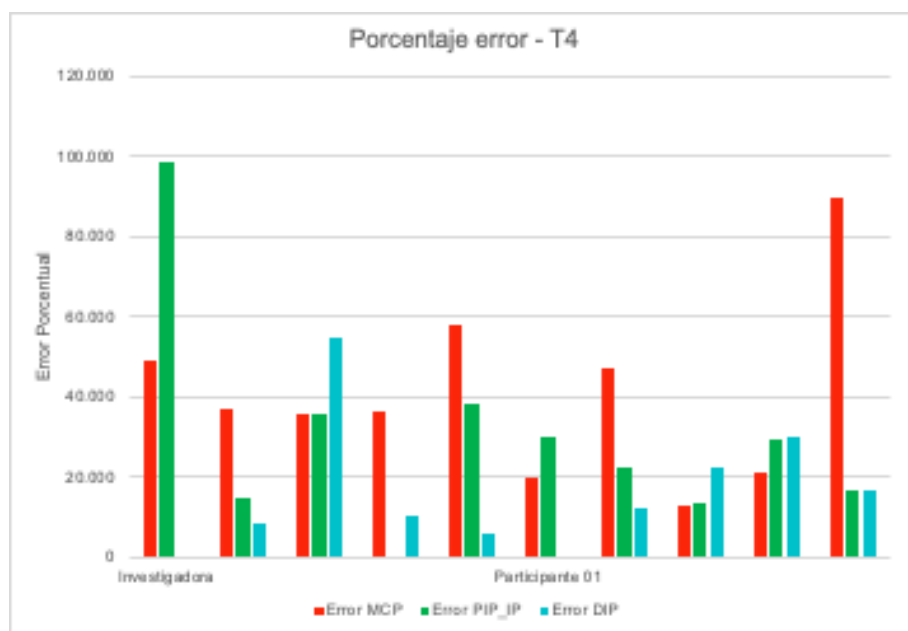


Figura 18: Porcentaje de error en la tarea T4: abducción-extensión.

La Figura 18 muestra la distribución del porcentaje de error durante la tarea de abducción-extensión. Se observa que los errores no fueron uniformes entre los dedos ni entre las articulaciones evaluadas, lo que evidencia una mayor variabilidad en algunas mediciones específicas.

A diferencia del cuadro anterior, que presenta los valores detallados por dedo y articulación, la gráfica facilita identificar de forma general cuáles articulaciones concentraron los mayores porcentajes de error. En este caso, la representación gráfica complementa el análisis de la tabla al mostrar que la tarea de abducción-extensión presentó una respuesta más variable, lo cual refuerza la necesidad de revisar la interpretación de los ángulos de extensión durante la apertura de la mano.

Esta tarea permitió identificar que el análisis de abducción-extensión requiere una interpretación cuidadosa de los ángulos calculados, especialmente porque el interés principal estuvo en observar la extensión articular durante la apertura de la mano.

Para futuras aplicaciones, podría considerarse definir un sistema de referencia más específico que permita diferenciar con mayor claridad entre la amplitud de separación de los dedos y los ángulos de extensión articular.

Análisis general de la comparación preliminar

En conjunto, las tablas y gráficas de porcentaje de error permitieron evidenciar que las diferencias entre los ángulos calculados mediante MATLAB y las mediciones tomadas con goniómetro variaron según la tarea funcional, la articulación evaluada y el caso analizado. Esto indica que el comportamiento del error no fue uniforme y que cada movimiento presentó desafíos particulares durante la captura y el procesamiento.

Las tareas que implicaron mayor contacto o aproximación entre dedos, como la oposición del pulgar y la pinza trípode, presentaron mayor sensibilidad a la oclusión o confusión de marcadores. En contraste, en tareas como flexión-extensión por dedo y abducción-extensión, las diferencias estuvieron más relacionadas con la definición de los vectores segmentarios, la orientación del sistema de referencia y la interpretación de la dirección angular.

De manera general, los resultados permitieron identificar oportunidades de mejora en la ubicación de los marcadores, la reconstrucción de trayectorias, la selección del frame representativo y la estandarización de la convención angular utilizada en MATLAB. Debido a que la comparación con goniómetro se realizó únicamente en dos casos, estos resultados no constituyen una validación estadística del método, sino una verificación preliminar de la coherencia de los ángulos calculados y una base para futuros ajustes metodológicos del proceso.

3.4.2. Resultados generales por tarea funcional

Una vez aplicado el prototipo final, los resultados obtenidos permitieron observar el comportamiento promedio de los ángulos articulares en las tareas funcionales analizadas. Para facilitar la interpretación, se generaron gráficas descriptivas por tarea, considerando las articulaciones MCP, PIP y DIP de los dedos evaluados. Estas gráficas permitieron identificar patrones generales de movimiento, diferencias entre articulaciones y posibles aspectos a mejorar en la interpretación de los valores calculados.

El análisis presentado es de tipo descriptivo, ya que el objetivo principal de esta etapa fue

verificar el funcionamiento del proceso desarrollado y observar la coherencia de los ángulos calculados mediante MATLAB. Por lo tanto, los resultados no buscan establecer valores normativos ni realizar inferencias estadísticas, sino evidenciar la aplicabilidad del proceso de marcaje, captura y procesamiento implementado.

1. Flexo - Extensión por dedo:

La Figura 19 presenta la distribución de los ángulos articulares obtenidos durante la tarea de flexión-extensión por dedo, considerando los resultados de los 10 participantes evaluados. En esta gráfica se comparan las articulaciones MCP, PIP y DIP de los dedos índice, medio, anular y meñique mediante diagramas de cajas y bigotes, con el fin de observar tanto el comportamiento central como la variabilidad del movimiento y la participación de cada articulación durante la ejecución de la tarea.

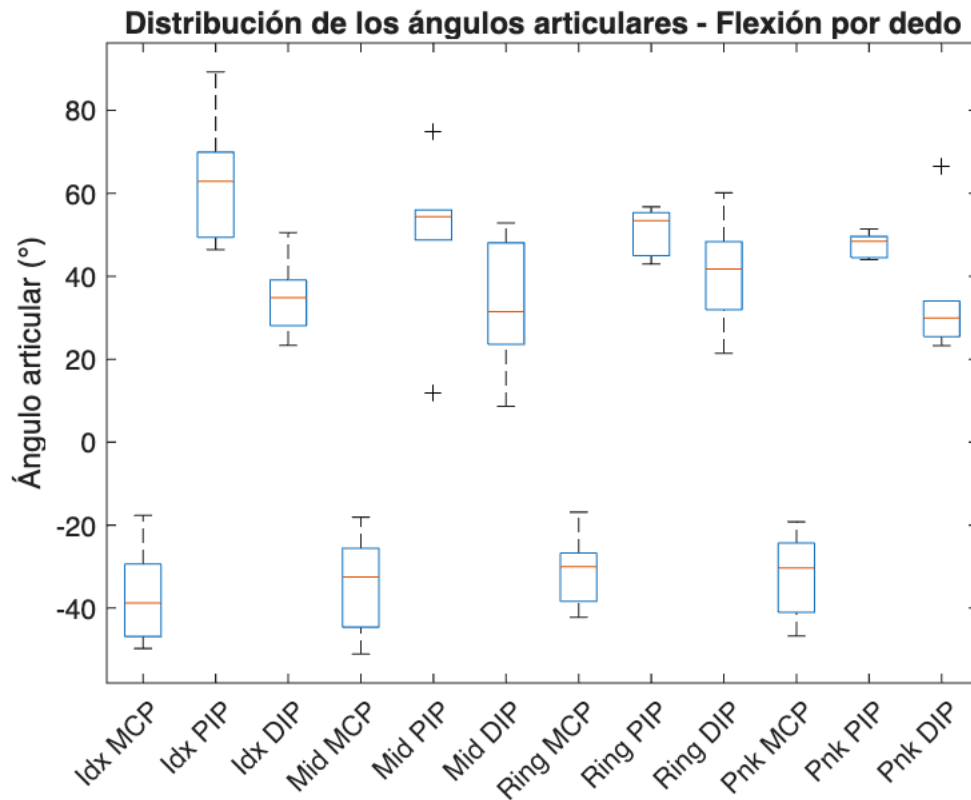


Figura 19: Distribución de ángulos articulares durante la tarea 1 - flexión por dedo.

A partir de los resultados presentados en la Figura 19, se observa que el movimiento realizado durante la tarea de flexión-extensión por dedo estuvo caracterizado principalmente por la participación de las articulaciones interfalángicas proximales (PIP),

donde se registran las medianas más altas de flexión en todos los dedos evaluados, lo que indica que fueron las que más contribuyeron al cierre digital. El dedo índice presentó la mediana más alta en la articulación PIP, con un valor cercano a 65° , acompañado de una mayor dispersión entre participantes. Los dedos medio, anular y meñique mostraron medianas aproximadas entre 45° y 55° , con una variabilidad moderada, evidenciada por el tamaño de las cajas y la longitud de los bigotes.

En la Figura 19 también se evidencia que las articulaciones DIP presentaron valores positivos de flexión, aunque menores que los registrados en las PIP. Sus medianas se ubicaron aproximadamente entre 30° y 45° , con una dispersión relativamente menor en comparación con las PIP, lo que sugiere un comportamiento más homogéneo entre participantes. Este resultado es coherente con la función de las articulaciones interfalángicas durante la flexión de los dedos, ya que las DIP acompañan el cierre digital sin necesariamente alcanzar la misma magnitud angular que las PIP. Se destaca la presencia de un valor atípico en la articulación DIP del meñique, lo que indica que al menos un participante presentó un comportamiento diferente al resto del grupo en esa articulación.

Por otro lado, la gráfica muestra que las articulaciones MCP presentaron medianas negativas en todos los dedos, aproximadamente entre -30° y -40° , con una dispersión baja y cajas compactas que indican consistencia en la respuesta entre participantes. Estos valores no deben interpretarse como ausencia de movimiento ni como un resultado incorrecto, sino como una consecuencia de la dirección del ángulo calculado según la orientación de los vectores y la convención de signos utilizada en MATLAB. Por esta razón, el signo negativo indica el sentido del movimiento respecto al sistema de referencia empleado, mientras que la magnitud del valor refleja que sí existió participación de la articulación MCP durante la tarea. Se observa además un valor atípico en la articulación MCP del dedo medio, que podría asociarse a una variación postural particular de ese participante.

En general, a partir de la Figura 19 se puede inferir que el movimiento realizado correspondió a una flexión digital efectiva, en la cual predominó la participación de las articulaciones PIP, acompañada por la flexión de las DIP y con participación de las MCP en sentido opuesto según la convención angular del análisis. La variabilidad observada entre participantes, especialmente en las articulaciones PIP del dedo índice y en algunas DIP, refleja diferencias individuales en la ejecución del movimiento,

lo cual es esperable en una muestra de sujetos con características antropométricas distintas. En conjunto, estos resultados demuestran que la tarea es útil para analizar la movilidad articular de cada dedo por separado y que el sistema de captura y procesamiento logra representar de manera adecuada los patrones de movimiento específicos de la mano.

2. Oposición pulgar:

Con el fin de analizar el comportamiento articular durante la tarea de oposición del pulgar, se calcularon las distribuciones de los ángulos obtenidos en los 10 participantes. La Figura 20 presenta la comparación de las articulaciones MCP, PIP y DIP durante la oposición del pulgar hacia los dedos índice, medio, anular y meñique mediante diagramas de cajas y bigotes, permitiendo observar tanto el comportamiento central como la variabilidad de cada articulación durante la ejecución del movimiento.

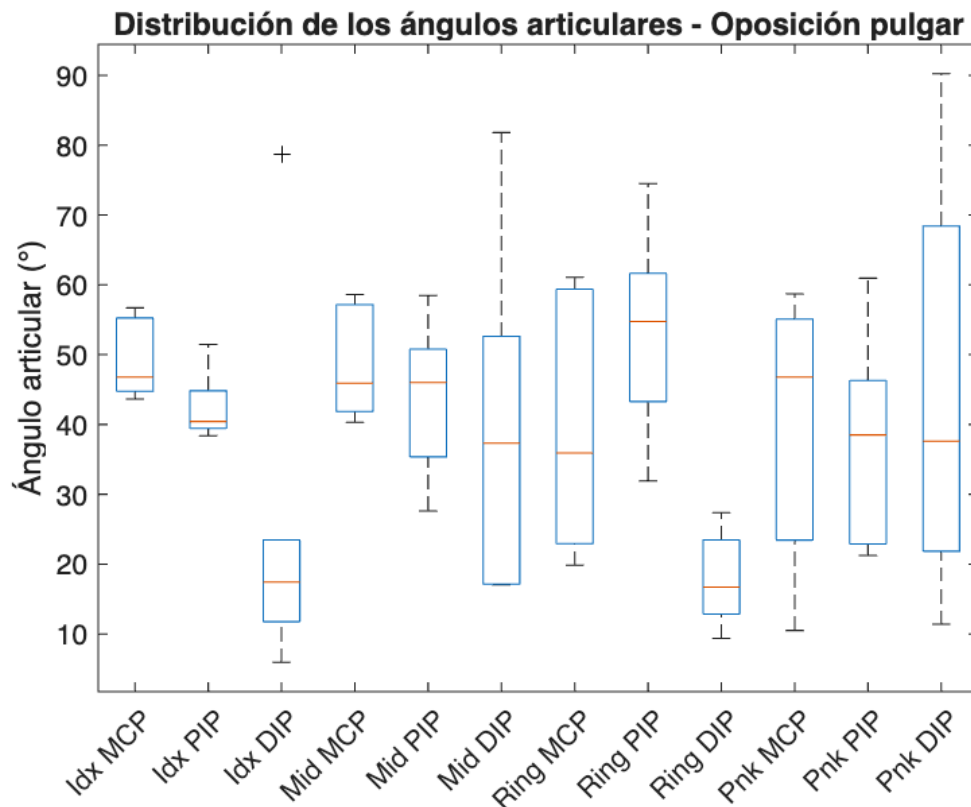


Figura 20: Distribución de ángulos articulares durante la tarea 2 - Oposición del pulgar.

A partir de los resultados presentados en la Figura 20, se observa que durante la

tarea de oposición del pulgar todas las articulaciones registraron valores positivos, a diferencia de lo observado en la tarea anterior, lo que indica que el movimiento se desarrolló en el mismo sentido para las tres articulaciones evaluadas. La articulación MCP presentó medianas relativamente similares entre los dedos, con valores aproximados entre 35° y 47° , siendo el índice y el medio los que mostraron las cajas más compactas, lo que refleja una mayor consistencia en la respuesta entre participantes. En contraste, Ring MCP presentó una mayor dispersión, sugiriendo variabilidad individual en la postura adoptada durante la oposición hacia ese dedo.

En la Figura 20 también se observa que la articulación PIP presentó un comportamiento con mayor variabilidad entre los dedos evaluados y entre participantes. El mayor valor de mediana se registró en la oposición hacia el dedo anular, con un valor cercano a 54° , seguido por el meñique y el medio. El dedo índice mostró la mediana más baja de PIP (42°). Cabe destacar que el meñique presentó la caja de mayor tamaño en esta articulación, con bigotes que alcanzan valores cercanos a 90° , lo que indica que algunos participantes adoptaron posturas con flexión considerablemente mayor en esa articulación durante la oposición hacia ese dedo.

Por otro lado, las articulaciones DIP mostraron el comportamiento más heterogéneo de la gráfica. Las medianas de Idx DIP y Ring DIP fueron notablemente bajas, aproximadamente 17° , mientras que Mid DIP y Pnk DIP alcanzaron valores cercanos a 37° – 38° . La dispersión fue especialmente amplia en Pnk DIP, cuyo bigote superior se extiende hasta cerca de 90° , reflejando diferencias importantes entre participantes en la postura distal adoptada durante esa oposición. Adicionalmente, se identificó un valor atípico en Idx DIP, lo que sugiere que al menos un participante presentó una flexión distal considerablemente mayor al resto del grupo durante la oposición hacia el índice.

En general, a partir de la Figura 20 se puede inferir que la oposición del pulgar es un movimiento que requiere la participación coordinada de las tres articulaciones evaluadas, pero con diferencias marcadas según el dedo involucrado y con mayor variabilidad entre participantes que la observada en la tarea de flexión por dedo. Los valores positivos en todas las articulaciones confirman que el movimiento ocurrió en un sentido consistente con la flexión digital, con ajustes posturales específicos dependiendo de la distancia y posición del dedo hacia el cual se dirigió la oposición. Estos resultados evidencian que el sistema de captura y procesamiento fue capaz

de representar las diferencias articulares propias de una tarea funcional con mayor complejidad postural que la flexión individual de dedos.

3. Pinza Tripode:

Con el fin de analizar el comportamiento articular durante la tarea de pinza trípode, se obtuvo la distribución de los ángulos de los 10 participantes. La Figura 21 presenta mediante diagramas de cajas y bigotes la comparación de las articulaciones MCP, PIP y DIP en los dedos que participan principalmente en esta tarea: pulgar, índice y medio, permitiendo observar tanto la tendencia central como la variabilidad de cada articulación durante la ejecución del agarre.

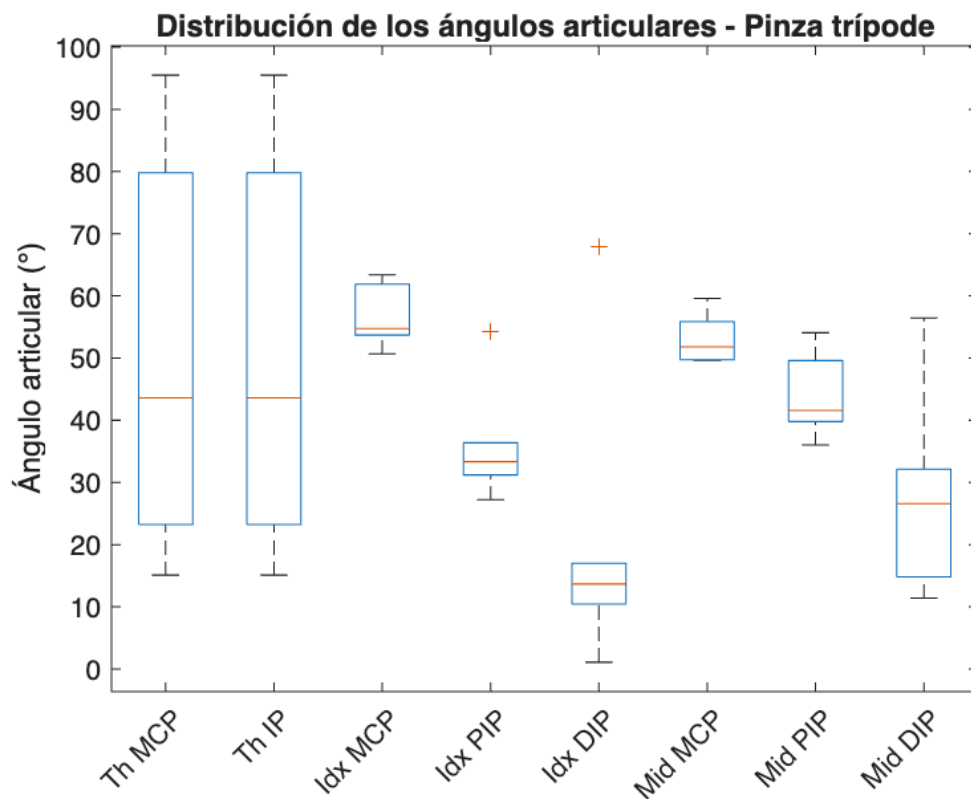


Figura 21: Distribución de ángulos articulares durante la tarea 3 - Pinza trípode.

A partir de los resultados presentados en la Figura 21, se observa que las articulaciones del pulgar (Th MCP y Th IP) presentaron medianas similares, aproximadamente 44° en ambos casos, lo que indica una participación equivalente de las dos articulaciones del pulgar durante la formación de la pinza. Sin embargo, ambas articulaciones mostraron la mayor dispersión de toda la gráfica, con cajas que abarcan desde

aproximadamente 22° hasta 80° y bigotes que se extienden cerca de 95° . Esta alta variabilidad refleja que los participantes adoptaron posturas considerablemente diferentes en el pulgar para ejecutar el agarre, lo cual es coherente con el rol adaptativo que cumple este dedo durante la pinza trípode.

En la Figura 21 también se observa que las articulaciones MCP del índice y del medio presentaron los valores más altos y consistentes entre participantes. Idx MCP registró la mediana más elevada, cercana a 58° , con una caja compacta que refleja baja dispersión. Mid MCP mostró una mediana aproximada de 52° , igualmente con poca variabilidad. Este comportamiento sugiere que las articulaciones metacarpofalángicas del índice y el medio desempeñaron un papel estable y predominante en el posicionamiento de los dedos durante la ejecución de la pinza.

Por otro lado, las articulaciones PIP y DIP del índice y del medio presentaron valores progresivamente menores, en concordancia con el patrón esperado de flexión digital. Idx PIP registró una mediana aproximada de 33° , mientras que Mid PIP alcanzó cerca de 43° , con dispersiones moderadas en ambos casos. Se identificó un valor atípico en Idx PIP (55°), que indica que al menos un participante realizó una flexión interfalángica considerablemente mayor en ese dedo. Las articulaciones DIP mostraron los valores más bajos: Idx DIP con mediana cercana a 14° y Mid DIP con aproximadamente 26° , aunque esta última presentó una dispersión mayor, con bigotes que se extienden hasta cerca de 57° .

Adicionalmente, se observó un outlier en Idx DIP con un valor cercano a 69° , lo que sugiere una postura atípica de flexión distal en ese participante. En el caso del pulgar, no se presenta articulación DIP dado que anatómicamente este dedo cuenta únicamente con las articulaciones MCP e IP.

En general, a partir de la Figura 21 se puede inferir que la pinza trípode es un movimiento que requiere una participación coordinada del pulgar, índice y medio, con predominio de las articulaciones MCP en el índice y el medio, las cuales mostraron los valores más altos y la mayor consistencia entre participantes. El pulgar, aunque con medianas similares, presentó una variabilidad considerablemente mayor, lo que evidencia su rol adaptativo dentro del agarre. La disminución progresiva de los ángulos desde MCP hasta DIP en los dedos índice y medio refleja el patrón típico de flexión en pinza, mientras que la presencia de valores atípicos en algunas articulaciones indica que ciertos participantes adoptaron estrategias posturales diferentes para

lograr el contacto requerido por la tarea.

4. Agarre cilíndrico:

Para la tarea de agarre cilíndrico no se presentan valores angulares, debido a que finalmente se descartó su análisis dentro de los resultados generales. Esta decisión se tomó a partir de las limitaciones observadas durante la etapa de procesamiento en Qualisys, en la cual se evidenciaron oclusiones importantes que interfirieron con la correcta identificación y seguimiento de los marcadores ubicados en la mano.

Durante la ejecución de esta tarea, se observó que, de los 20 marcadores colocados en los participantes, el sistema lograba identificar únicamente entre 9 y 12 marcadores en diferentes momentos del movimiento. Esta pérdida de información afectó la continuidad de las trayectorias y dificultó la reconstrucción adecuada de los segmentos anatómicos necesarios para el cálculo angular. Como consecuencia, no fue posible obtener valores precisos, coherentes y representativos del movimiento que se buscaba evaluar.

Las oclusiones presentadas pueden estar relacionadas con la ubicación de las cámaras, la orientación de la mano respecto al sistema de captura y la naturaleza propia del agarre cilíndrico, ya que al rodear el objeto algunos marcadores quedan parcialmente ocultos por los dedos; por esta razón, los datos obtenidos para esta tarea no fueron considerados suficientemente confiables para su análisis.

A partir de esta limitación, se plantea la necesidad de que en estudios futuros se realicen ajustes en la configuración del sistema de captura, especialmente en la distribución y orientación de las cámaras. Esto permitiría mejorar la visibilidad de los marcadores durante tareas de agarre y reducir la pérdida de información durante el procesamiento. Asimismo, podría considerarse la modificación del esquema de marcaje o del objeto utilizado, con el fin de facilitar la identificación de los marcadores y obtener un análisis cinemático más completo del agarre cilíndrico.

5. Abducción - Extensión:

Con el fin de analizar el comportamiento articular durante la tarea de abducción-extensión, se obtuvo la distribución de los ángulos de los 10 participantes. La Figura [22](#) presenta mediante diagramas de cajas y bigotes la comparación de las articulaciones MCP, PIP y DIP en los dedos pulgar, índice, medio y anular, permitiendo observar tanto el comportamiento central como la variabilidad de cada articulación

durante la ejecución del movimiento.

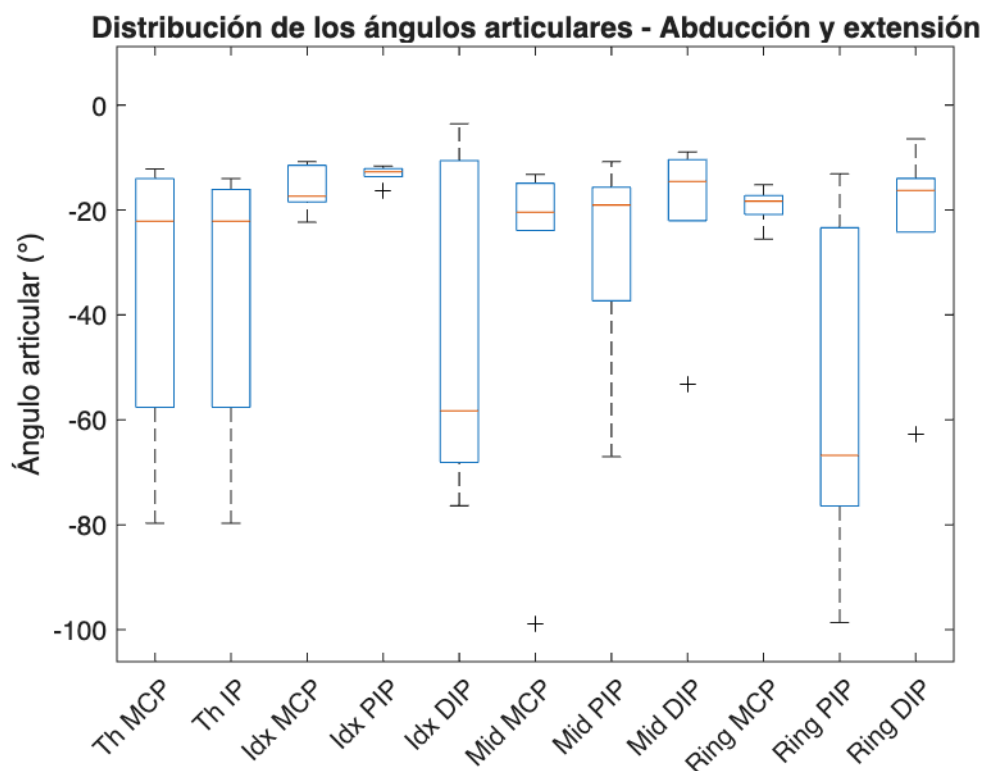


Figura 22: Distribución de ángulos articulares durante la tarea 5 - Abducción - Extensión.

A partir de los resultados presentados en la Figura 22, se observa que durante la tarea de abducción-extensión todos los valores registrados presentaron signo negativo. Este comportamiento es coherente con la dirección del movimiento respecto al sistema de referencia utilizado y con la orientación de los vectores definidos para el cálculo angular en MATLAB, por lo que el signo negativo no debe interpretarse como ausencia de movimiento, sino como una indicación del sentido angular calculado durante la ejecución de la tarea.

Las articulaciones del pulgar (Th MCP y Th IP) presentaron medianas similares, cercanas a -22° , lo que indica una participación equivalente de ambas articulaciones durante el movimiento. Sin embargo, al igual que lo observado en la tarea de pinza trípode, el pulgar mostró la mayor variabilidad entre participantes, con cajas que abarcan desde aproximadamente -10° hasta -60° y bigotes que se extienden cerca de -65° . Este comportamiento refleja la alta adaptabilidad postural del pulgar durante tareas de apertura de la mano.

En cuanto a las articulaciones del índice, Idx MCP e Idx PIP presentaron las cajas más compactas de toda la gráfica, con medianas cercanas a -15° , lo que indica que estos participantes ejecutaron el movimiento de forma muy consistente en esas articulaciones. En contraste, Idx DIP mostró la mayor variabilidad y magnitud de la gráfica, con una mediana aproximada de -60° , una caja que se extiende desde cerca de -65° hasta -20° , y un bigote inferior que alcanza valores cercanos a -100° . Este comportamiento sugiere que la articulación distal del índice tuvo una participación diferencial importante durante la extensión, con estrategias posturales marcadamente distintas entre participantes.

Las articulaciones del dedo medio presentaron medianas cercanas a -20° en MCP, PIP y DIP, con dispersiones moderadas. Se identificó un valor atípico en Mid DIP (-47°), que indica que al menos un participante presentó una extensión distal considerablemente mayor en ese dedo. En el dedo anular, Ring MCP mostró una caja compacta con mediana -20° , mientras que Ring PIP presentó la segunda mayor variabilidad de la gráfica, con una mediana cercana a -65° y una caja que abarca desde aproximadamente -75° hasta -27° , reflejando diferencias importantes entre participantes en la flexión interfalángica proximal durante la extensión. Ring DIP mostró una mediana -20° con un outlier cercano a -60° .

En general, a partir de la Figura 22 se puede inferir que la tarea de abducción-extensión generó un movimiento coordinado de apertura de la mano con participación de todas las articulaciones evaluadas, aunque con patrones de variabilidad marcadamente distintos entre ellas. Las articulaciones MCP e IP del pulgar, la DIP del índice y la PIP del anular concentraron la mayor dispersión entre participantes, lo que sugiere que en estas articulaciones los sujetos adoptaron estrategias posturales diferentes para completar el gesto. En contraste, las articulaciones MCP y PIP del índice mostraron el comportamiento más homogéneo, indicando que el posicionamiento proximal de ese dedo fue consistente durante la ejecución de la tarea. Estos resultados confirman que el sistema de captura y procesamiento fue capaz de representar las diferencias articulares individuales durante un movimiento funcional asociado a la apertura y separación de los dedos.

3.5. Discusión

Los resultados obtenidos permitieron registrar y analizar el comportamiento angular de diferentes articulaciones de la mano durante la ejecución de tareas funcionales representativas de actividades de la vida diaria, evidenciando la capacidad del protocolo desarrollado para capturar movimientos complejos de forma estructurada y reproducible.

Las tareas seleccionadas para la evaluación incluyeron movimientos básicos y funcionales de la mano, tales como flexo-extensión, oposición del pulgar, pinza trípode y abducción-extensión. La selección de estas actividades se encuentra en concordancia con los protocolos reportados en la literatura [1, 2] para la evaluación cinemática de la mano, los cuales resaltan la importancia de incluir movimientos que representen tanto acciones articulares aisladas como patrones funcionales empleados en contextos cotidianos. En el protocolo Fischer et al. [2] se destaca que la evaluación de movimientos funcionales permite caracterizar de manera más completa el desempeño de la mano en aplicaciones clínicas y biomecánicas, mientras que Carpinella et al. [1] se señala que la valoración coordinada de las articulaciones digitales resulta fundamental para comprender el comportamiento cinemático global de la mano.

Los resultados obtenidos mostraron patrones de movimiento coherentes con la biomecánica descrita para la mano humana. Durante las tareas evaluadas se observó una participación coordinada de las articulaciones metacarpofalángicas (MCP), interfalángicas proximales (PIP) e interfalángicas distales (DIP), evidenciando la interacción funcional que existe entre los diferentes segmentos que conforman la cadena cinemática de los dedos. En particular, las articulaciones PIP presentaron una participación importante durante los movimientos de flexión y durante las tareas relacionadas con la prensión, comportamiento que coincide con lo reportado por Arias López [8] y por Nordin y Frankel [16], quienes describen estas articulaciones como elementos clave en la generación de agarres funcionales durante las actividades manuales.

Adicionalmente, la distribución de los ángulos articulares observada mediante los diagramas de caja y bigotes permitió identificar tanto tendencias centrales como variaciones entre participantes. Aunque se evidenció una respuesta general consistente entre los sujetos evaluados, algunas articulaciones presentaron una mayor dispersión de los datos y la presencia de valores atípicos, lo que puede atribuirse a diferencias individuales en la ejecución del movimiento, variaciones anatómicas propias de cada participante y a las

estrategias motoras utilizadas para completar cada tarea funcional.

Los resultados obtenidos en la tarea de oposición del pulgar demostraron la importancia funcional de esta estructura dentro de los patrones de manipulación fina. Se evidencia que la capacidad del pulgar para aproximarse a los demás dedos durante la ejecución de la tarea evaluada es consistente con la descripción anatómica y biomecánica reportada en la literatura, donde la orientación particular del primer metacarpiano y la configuración de la articulación carpometacarpiana permiten movimientos complejos de oposición que diferencian funcionalmente al pulgar del resto de los dedos [8, 16]. Esta característica constituye una de las principales adaptaciones funcionales de la mano humana y resulta esencial para la realización de actividades que requieren precisión, coordinación y control motor fino.

Durante la tarea de pinza trípode se observó la participación coordinada del pulgar, el dedo índice y el dedo medio, patrón ampliamente reconocido como uno de los mecanismos de prensión de precisión más utilizados en actividades funcionales como la escritura, el agarre de utensilios y la manipulación de objetos pequeños. Los resultados obtenidos coinciden con lo descrito por Arias López [8], quien señala que este tipo de agarre depende de una adecuada coordinación entre múltiples articulaciones y grupos musculares para garantizar estabilidad y precisión durante la manipulación de objetos. La capacidad del protocolo para registrar estos movimientos funcionales evidencia su potencial para futuras aplicaciones relacionadas con la evaluación clínica y biomecánica de la función manual.

Por otra parte, durante la tarea de abducción-extensión se observaron cambios angulares asociados a la apertura de la mano y a la separación de los dedos respecto al eje funcional definido por el tercer dedo. Aunque el modelo implementado se enfocó principalmente en el cálculo de ángulos relacionados con la orientación de los segmentos y los movimientos de flexión-extensión, los resultados obtenidos permitieron identificar patrones consistentes con la ejecución de la tarea propuesta y evidenciaron la capacidad del protocolo para registrar diferentes posiciones y movimientos de la mano durante actividades de apertura y posicionamiento digital.

El protocolo desarrollado mostró ser una alternativa viable para la evaluación cinemática de la mano mediante sistemas ópticos de captura de movimiento. La complejidad anatómica de esta estructura representa un desafío importante debido al reducido tamaño de los segmentos, la proximidad entre articulaciones y la posibilidad de oclusión de marcadores durante la ejecución de determinados movimientos. Sin embargo, la estrategia de marcaje

implementada permitió obtener información suficiente para describir el comportamiento angular de las principales articulaciones involucradas en las tareas funcionales seleccionadas. Estos resultados son coherentes con los principios de estandarización propuestos por Kontaxis et al. [3], quienes destacan la necesidad de establecer protocolos consistentes que permitan garantizar la reproducibilidad y comparabilidad de las mediciones cinemáticas del miembro superior.

Finalmente, los resultados obtenidos indican que el proceso desarrollado constituye una herramienta útil para la evaluación del movimiento de la mano dentro del contexto del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La implementación de este protocolo amplía las posibilidades de análisis biomecánico del miembro superior y proporciona una base metodológica para futuras investigaciones orientadas a la evaluación de poblaciones con alteraciones neurológicas o musculoesqueléticas, al seguimiento de procesos de rehabilitación y al desarrollo de nuevas aplicaciones biomédicas relacionadas con la función manual. En este sentido, el trabajo realizado representa un primer paso hacia la consolidación de metodologías estandarizadas para el análisis cinemático de la mano en el contexto académico y clínico.

3.6. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió diseñar y aplicar una metodología para el análisis cinemático de la mano y los dedos mediante sistemas ópticos de captura de movimiento. La implementación del protocolo propuesto hizo posible registrar y analizar el comportamiento angular de las principales articulaciones de la mano durante la ejecución de diferentes tareas funcionales, aportando una herramienta para el estudio del movimiento manual dentro del Laboratorio de Análisis de Movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el proceso desarrollado fue capaz de capturar información cinemática de las articulaciones metacarpofalángicas (MCP), interfalángicas proximales (PIP) e interfalángicas distales (DIP), permitiendo describir patrones de movimiento asociados a tareas de flexo-extensión, oposición del pulgar, pinza trípode y abducción-extensión. Los comportamientos observados fueron consistentes con la biomecánica funcional de la mano reportada en la literatura, lo que respalda la aplicabilidad del protocolo para el análisis de movimientos manuales.

La implementación del modelo biomecánico permitió establecer una metodología estructurada para el cálculo de ángulos articulares y la visualización de los resultados obtenidos. Asimismo, el uso de diagramas de caja y bigotes facilitó la identificación de tendencias centrales, variabilidad entre participantes y posibles valores atípicos, aportando una representación más adecuada del comportamiento de los datos registrados.

A pesar de las dificultades inherentes al análisis de la mano, relacionadas con el reducido tamaño de sus segmentos anatómicos y la posibilidad de oclusión de marcadores durante la captura, el protocolo propuesto permitió obtener información suficiente para caracterizar los movimientos evaluados. Sin embargo, se identificó la necesidad de continuar fortaleciendo el proceso mediante la evaluación de un mayor número de participantes y la incorporación de poblaciones con diferentes características clínicas y funcionales.

Finalmente, este trabajo constituye una base metodológica para futuras investigaciones relacionadas con la evaluación biomecánica de la función manual, el seguimiento de procesos de rehabilitación y el análisis de alteraciones musculoesqueléticas o neurológicas que afecten la movilidad de la mano. De esta manera, se amplían las capacidades de análisis del Laboratorio de Análisis de Movimiento y se genera una herramienta que podrá servir como punto de partida para el desarrollo de nuevas aplicaciones clínicas y académicas en el estudio del movimiento humano.

3.7. Descripción de los siguientes pasos de avance en la tecnología

A partir del desarrollo del presente proyecto, se identificaron diferentes aspectos que pueden ser fortalecidos en estudios posteriores, con el fin de mejorar la precisión, aplicabilidad y alcance del proceso de análisis cinemático de la mano. Considerando la progresión desde la validación conceptual hasta la demostración en un entorno real, y siguiendo las definiciones establecidas por Minciencias y las buenas prácticas propuestas por la NASA para la evaluación del nivel de madurez tecnológica, los futuros avances de este proyecto deben orientarse a fortalecer el proceso desde el punto de vista técnico, metodológico y funcional.

[36, 37]

En este sentido, el proceso desarrollado puede entenderse como una primera aproximación funcional implementada en condiciones de laboratorio. No obstante, para avanzar hacia niveles superiores de madurez tecnológica, resulta necesario realizar nuevas etapas de validación, optimización y demostración en escenarios cada vez más cercanos a su uso real.

Por tanto, los siguientes pasos deben enfocarse en mejorar la confiabilidad de las mediciones, ampliar la cantidad de participantes evaluados, fortalecer el procesamiento de datos y comprobar la aplicabilidad del proceso en diferentes tareas funcionales de la mano.

Uno de los principales avances futuros corresponde a la optimización de la configuración del sistema de captura de movimiento, especialmente en relación con la ubicación y orientación de las cámaras. Durante algunas tareas funcionales, como el agarre cilíndrico, se presentaron oclusiones que dificultaron la identificación continua de los marcadores. Esta situación limitó el análisis de dicho movimiento, ya que no fue posible reconstruir de manera completa las trayectorias necesarias para el cálculo angular. Por esta razón, se recomienda evaluar diferentes distribuciones de cámaras que permitan aumentar la visibilidad de los marcadores durante tareas que involucren contacto entre los dedos, la palma y objetos externos.

Asimismo, se considera importante realizar ajustes al esquema de marcaje empleado. Aunque el proceso permitió obtener información relevante sobre el comportamiento articular de la mano en tareas como flexión-extensión por dedo, oposición del pulgar, pinza trípode y abducción-extensión, algunos movimientos generaron pérdida parcial de marcadores debido a la cercanía entre los dedos, la posición de la mano frente a las cámaras o la interacción con objetos. En futuros estudios podría evaluarse la modificación de la ubicación de ciertos marcadores, con el fin de reducir interferencias, mejorar su visibilidad y facilitar el seguimiento de los segmentos anatómicos durante movimientos más complejos.

Otro aspecto relevante corresponde al fortalecimiento de la validación del proceso mediante instrumentos de medición clínica, como el goniómetro. En el presente proyecto se realizó una comparación inicial entre los ángulos obtenidos mediante el procesamiento en MATLAB y las mediciones realizadas con goniómetro; sin embargo, esta validación se llevó a cabo en un número reducido de participantes. Por esta razón, en estudios futuros se recomienda ampliar la cantidad de sujetos evaluados y aumentar el número de mediciones comparativas, con el fin de establecer con mayor solidez el grado de concordancia entre ambos métodos. Esto permitiría determinar de manera más precisa la confiabilidad del sistema de captura de movimiento y fortalecer el respaldo técnico y metodológico del proceso propuesto.

Adicionalmente, se recomienda ampliar el número de participantes evaluados, con el fin de obtener una muestra más representativa y analizar con mayor profundidad la variabilidad del movimiento entre individuos. En una etapa posterior, el proceso también podría apli-

carse en población con alteraciones funcionales de la mano, como pacientes con lesiones musculoesqueléticas, neurológicas o en procesos de rehabilitación. Esto permitiría evaluar la utilidad del sistema no solo en participantes sanos, sino también como una herramienta de apoyo para el análisis funcional y el seguimiento de la recuperación del movimiento en contextos más cercanos a la práctica clínica.

También se plantea como avance futuro el desarrollo de una interfaz que permita cargar directamente los archivos generados por Qualisys, seleccionar la tarea funcional a analizar y obtener de manera automática los ángulos articulares correspondientes. De esta manera, se facilitaría el uso del proceso, se reduciría el tiempo de procesamiento y se disminuiría la posibilidad de errores asociados al manejo manual de los datos. Este avance permitiría que el sistema sea más accesible, reproducible y fácil de implementar por otros usuarios.

Finalmente, sería importante continuar mejorando los criterios de selección de los frames representativos del movimiento, así como los métodos de filtrado y tratamiento de las trayectorias de los marcadores. Esto permitiría obtener señales más estables y resultados más consistentes durante el análisis angular. En conjunto, estos avances contribuirían al fortalecimiento del proceso propuesto y permitirían avanzar progresivamente en su nivel de madurez tecnológica, pasando de una validación inicial del concepto y del funcionamiento del sistema hacia una posible demostración en entornos reales de evaluación funcional, rehabilitación o apoyo clínico.

Declaración de IA

Durante el desarrollo del presente trabajo de grado se utilizó inteligencia artificial generativa como herramienta de apoyo para la revisión de redacción, organización de ideas y explicación de algunos procedimientos computacionales utilizados en MATLAB. Asimismo, se empleó como apoyo para la formulación de textos descriptivos relacionados con la metodología, el análisis de resultados y la discusión.

El uso de esta herramienta no sustituyó el trabajo experimental, la toma de datos, el procesamiento de la información ni la interpretación final de los resultados. Las decisiones metodológicas, la ejecución de las pruebas, la selección de tareas funcionales, el análisis de los datos obtenidos y la revisión final del contenido fueron responsabilidad de las autoras. Toda la información generada con apoyo de inteligencia artificial fue revisada, ajustada y validada por las investigadoras, de acuerdo con los objetivos y alcances del proyecto.

Referencias bibliográficas

- [1] I. Carpinella, P. Mazzoleni, M. Rabuffetti, R. Thorsen, y M. Ferrarin, «Experimental protocol for the kinematic analysis of the hand: Definition and repeatability», *Gait Posture*, vol. 23, n.º 4, pp. 445–454, jun. 2006. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2005.05.003.
- [2] G. Fischer, D. Jermann, R. List, L. Reissner, y M. Calcagni, «Development and Application of a Motion Analysis Protocol for the Kinematic Evaluation of Basic and Functional Hand and Finger Movements Using Motion Capture in a Clinical Setting—A Repeatability Study», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 18, p. 6436, sep. 2020. DOI: 10.3390/app10186436.
- [3] A. Kontaxis, A. G. Cutti, G. R. Johnson, y H. E. J. Veeger, «A framework for the definition of standardized protocols for measuring upper-extremity kinematics», *Clin. Biomech.*, vol. 24, n.º 3, pp. 246–253, mar. 2009. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2008.12.009.
- [4] Hospital Infantil Universitario de San José, «Laboratorio de Análisis de Movimiento». Disponible en: <https://www.hospitalinfantildesanjose.org.co/dpto-de-apoyo-diagnostico-y-terapeutico/laboratorio-de-analisis-de-movimiento>.
- [5] Universidad de los Andes, «Laboratorio de Análisis de Movimiento». Disponible en: <https://ingbiomedica.uniandes.edu.co/es/laboratorios/laboratorio-analisis-movimiento>.
- [6] Universidad Autónoma de Manizales, «La UAM estrena laboratorio de análisis de movimiento», 2024. Disponible en: <https://www.autonoma.edu.co/blog/noticias/la-uam-estrena-laboratorio-de-analisis-de-movimiento>.
- [7] Ministerio del Deporte de Colombia, «Laboratorio de Biomecánica - Centro de Ciencias del Deporte». Disponible en: <https://www.mindeporte.gov.co/mindeporte/quienes-somos/dependencias/direccion-posicionamiento-y-liderazgo-deportivo/grupo-interno-de-trabajo-centro-de-ciencias-del-deporte/intervenciones-especializadas/laboratorio-de-biomecanica>.

- [8] L. A. Arias López, «Biomecánica y patrones funcionales de la mano», *Morfología*, vol. 4, no. 1, 2012. Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.
- [9] L. O'Brien, L. Robinson, D. Parsons, C. Glasgow, y L. McCarron, «Hand therapy role in return to work for patients with hand and upper limb conditions», *J. Hand Ther.*, vol. 35, n.º 2, pp. 226–232, abr.-jun. 2022. DOI: 10.1016/j.jht.2022.01.002.
- [10] A. Yoshida, M. Yamamoto, C. W. P. Li-Tsang, K. Iwatsuki, y H. Hirata, «A systematic review assessing the effectiveness of hand therapy programmes in adults with burns using the International Classification of Functioning, Disability and Health framework», *Nagoya J. Med. Sci.*, vol. 84, n.º 4, pp. 689–704, nov. 2022. DOI: 10.18999/nagjms.84.4.689.
- [11] L. Kovacs, M. Grob, A. Zimmermann, M. Eder, P. Herschbach, G. Henrich, R. Zimmer, E. Biemer, y N. A. Papadopoulos, «Quality of life after severe hand injury», *J. Plast. Reconstr. Aesthet. Surg.*, vol. 64, n.º 11, pp. 1495–1502, nov. 2011. DOI: 10.1016/j.bjps.2011.02.012.
- [12] R. Galán, Ó. F. Avilés, C. Zubieta, C. Segura, M. Mauleudoux, D. Correa, y A. Durán, «Sistema de medición automática de la movilidad articular de la mano por medio de un guante de datos», *Rev. Colomb. Cir. Plást. Reconstr.*, vol. 21, n.º 2, dic. 2015. [En línea]. Disponible en: https://revistacioplastica.com/files/6_SISTEMA_20DE_20MEDICI_C3_93N.pdf
- [13] «Anatomía y fisiología de la mano», *Portales Médicos*. [En línea]. Disponible en: <https://www.portalesmedicos.com/publicaciones/articles/387/4/articles.php>
- [14] «Anatomía de la mano», *Stanford Medicine Children's Health*. [En línea]. Disponible en: <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=anatomy-of-the-hand-85-P04195>
- [15] J. Bárcenas Vizcarra, «Clase digital 2. Anatomía de la mano y anatomía patológica de la mano reumática», *Recursos Educativos Abiertos*, Universidad de Guanajuato, 23 oct. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-2-anatomia-de-la-mano-y-anatomia-patologica-de-la-mano-reumatica/>

- [16] M. Nordin y V. H. Frankel, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*, 4.^a ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- [17] Anomalías de las manos al nacimiento,” Familia y Salud. [En línea]. Disponible en: <https://www.familiaysalud.es/sintomas-y-enfermedades/aparato-locomotor/extremidades/anomalias-de-las-manos-al-nacimiento>
- [18] S. Trinidad Ríos, P. A. Parra Ramírez, L. F. Pineda Núñez, I. Quintana Rodríguez, C. Pérez Calvo, y S. L. Moyano Calvente, «Anatomía de la muñeca y mano: Atlas radiológico», presentado en el 31.^o Congreso SERAM, Servicio de Radiodiagnóstico, Complejo Hospitalario de Cáceres, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://epos.myesr.org/posterimage/esr/seram2012/111193/mediagallery/428463>
- [19] Physiotutors, «Rango de movimiento activo de la muñeca/mano (AROM)», *Fisiotutores - Wiki Evaluación básica*. [En línea]. Disponible en: <https://www.physiotutors.com/es/wiki/wrist-hand-active-range-of-motion/>
- [20] G. A. Encalada Seminario, «Análisis cinemático y cinético de los mecanismos para una prótesis biomecánica de mano y construcción de un prototipo utilizando el proceso de estereolitografía», Proyecto Técnico, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16530/1/UPS-CT008023.pdf>
- [21] Y. E. Oropesa Rodríguez, A. Ortiz Prado, L. Morales Acosta, y R. González Carbonell, «Modelo CAD de mano humana de 28 grados de libertad para el estudio cinemático», en *Memorias del XXV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Mazatlán, Sinaloa, México, sep. 2019. [En línea]. Disponible en: https://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A3_114.pdf
- [22] Y. E. Oropesa Rodríguez, R. A. González Carbonell, E. Nápoles Padrón, Y. A. Cisneros Hidalgo, y O. Ortega Santiesteban, «Análisis cinemático del movimiento de flexión-extensión del dedo pulgar mediante un mecanismo de palanca», *Rev. Cubana Invest. Bioméd.*, vol. 36, n.^o 4, oct.-dic. 2017. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03002017000400003
- [23] J. R. Langford-Cervantes, M. Alencastre-Miranda, L. Muñoz-Gómez, O. Navarro-Hinojosa, G. Echeverría-Furio, C. Manrique-Juan, y M. Maqueo, «Detección y seguimiento de palmas y puntas de los dedos en tiempo real basado en imágenes de

- profundidad para aplicaciones interactivas», *Res. Comput. Sci.*, vol. 114, pp. 137–149, 2016.
- [24] Ministerio de Salud de Colombia, «Resolución número 8430 de 1993: Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud», Bogotá, Colombia, 4 oct. 1993. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
- [25] P. Ruiz-Chicaiza y C. Cevallos-Barragán, «Estudio cinemático de la mano para movimiento de oposición del dedo pulgar y movimientos de flexión y extensión de los dedos índice, medio, anular y meñique», *Revista de Ingeniería Innovativa*, vol. 3, no. 11, pp. 10–21, sep. 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.ecorfan.org/republicoferu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Innovativa/vol3num11/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V3_N11_2.pdf
- [26] J. L. Sancho Bru, M. Vergara, N. J. Jarque Bou, M. Mora Aguilar, y A. Pérez González, «Medición del movimiento de todos los segmentos de la mano mediante videogrametría», en *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Universitat Jaume I de Castellón de la Plana. [En línea]. Disponible en: <https://repositori.uji.es/server/api/core/bitstreams/31b2a4bd-f8e5-4805-80cc-b9db11b5cfde/content>
- [27] MathWorks, «dot — Producto punto», *MATLAB Documentation*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/dot.html>
- [28] MathWorks, «norm — Norma de vector o matriz», *MATLAB Documentation*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/norm.html>
- [29] MathWorks, «acosd — Arcocoseno en grados», *MATLAB Documentation*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/double.acosd.html>
- [30] MathWorks, «movmedian — Mediana móvil», *MATLAB Documentation*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/movmedian.html>
- [31] MathWorks, «movmean — Media móvil», *MATLAB Documentation*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/movmean.html>
- [32] MathWorks, «vecnorm — Norma de vector», *MATLAB Documentation*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/vecnorm.html>

- [33] Fisioterapia-Online, «Oposición del pulgar», *Glosario de Fisioterapia-Online*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/oposicion-del-pulgar>
- [34] K. DeYoung, «Tripod Grasp: A Fine Motor Skill With A Big Impact», *OT Perspective*, jun. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://otperspective.com/tripod-grasp-fine-motor/>
- [35] C. Beck, «Work on Tripod Grasp (and Pencil Grasp) with Everyday Items», *The OT Toolbox*, jul. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.theotttoolbox.com/tripod-grasp-fine-motor-skills-everyday-items/>
- [36] Aeronautics, N. & Administration, S. «Technology Readiness Assessment Best Practices Guide», Office of the Chief Technologist, Washington. (D,2020)
- [37] Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Anexo 5. Technology Readiness Levels (TRL), 2014. [En línea]. Disponible en: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo5_7.pdf

4. Anexos

4.1. Aval del comité de ética



COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN - CEI

ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTOS

REGISTRO EN ACTA DE APROBACIÓN NO. 11 de NOVIEMBRE DE 2025 DEL CEI

TÍTULO DEL PROYECTO: DISEÑO DE UN PROCESO PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA MANO Y LOS DEDOS EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LA UNIVERSIDAD JAVERIANA De Cali (1ª. vez)

Realizado por los estudiantes **LINA SOFIA ALEGRÍA QUIÑONES Y LAURA SOFIA BENAVIDES OCAMPO**
BAJO LA TUTORÍA DE LA INGENIERA **LUISA FERNANDA GARCÍA RAMÍREZ**

Programa de Ingeniería Biomédica.

RESUMEN: Tiene como objetivo: Diseñar e implementar un proceso estándar que permita el análisis cinemático de la mano y los dedos, adaptando metodologías previamente validadas por la literatura, considerando las condiciones técnicas con las que cuenta el laboratorio de análisis de movimiento en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Tendrá una metodología (tipo estudio e investigación y diseño investigativo sucinto) de tipo aplicada con un diseño experimental – descriptivo cuyo propósito es desarrollar y validar un protocolo estandarizado del análisis de la mano y los dedos. El diseño investigativo se estructura en tres fases: 1). Análisis y revisión de literatura. 2). Diseño y desarrollo del protocolo y los dispositivos de marcadores, 3). Evaluación mediante pruebas piloto en voluntarios sanos, cuya fuente principal será la revisión bibliográfica de literatura científica especializada en biomecánica y análisis cinemático de la mano, complementada con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio de análisis de movimiento de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali a través del sistema de captura del movimiento. Los participantes no obtendrán un beneficio clínico directo, pero sí aportarán al desarrollo de un proceso que contribuirá a investigaciones futuras y a aplicaciones de rehabilitación de la mano y para la población el beneficio será contar con una herramienta estandarizada que en el futuro apoye los procesos de rehabilitación y evaluación funcional de la mano, generando un impacto positivo en pacientes y profesionales de la salud. El riesgo del presente estudio será: Mínimo y estará únicamente asociado a la posible incomodidad temporal por el uso del guante o la colocación de marcadores de piel, esto significa que no tendrá efectos adversos significativos. Los productos serán: Un proyecto de grado que incluirá un proceso para la obtención del análisis cinemático de la mano y los dedos y un sistema de marcadores para la obtención de dicho , todo avalado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, con autorización de las estudiantes investigadoras y la dirección de la ingeniera asesora, sin compromisos de convenios externos. Los resultados se utilizarán para: este proyecto de grado y también podría ser utilizado como base para futuros proyectos en el área de biomédica y rehabilitación de la mano

El CONSEJO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD (FCS), ha establecido el Comité de Ética en Investigación en Salud de la FCS (CEI) de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, el cual está regido por la Resolución 008430 del 4 de octubre de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud; los principios de la Asamblea Médica Mundial expuestos en su Declaración de Helsinki de 1964, última revisión 2013 y las pautas éticas internacionales para la investigación biomédica en seres humanos enunciadas en 1982 por el Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas (CIOMS). Después de haber sido revisado el proyecto por la Secretaría Técnica y en sesión en pleno, se socializa a los miembros del comité de los siguientes documentos del proyecto:

- a) Documento de sometimiento proyectos de investigación en salud.
- b) Carta de presentación del proyecto y solicitud de evaluación al comité de ética
- c) Soporte de la descripción del investigador o grupo de investigadores
- d) Aval metodológico y científico.
- e) Oficio de declaración o conflicto de intereses.
- f) Instrumento de recolección de información.
- g) Comunicado de representante legal de institución de salud, educativa o de los líderes comunitarios. (permisos)
- h) Formato de Autoevaluación ética.
- i) Proyecto de investigación.

1. El Presidente del Comité informa que este estudio pertenece a la categoría con riesgo Mínimo.
2. El Presidente informa que el presente proyecto ha sido revisado en su totalidad quedando con **AVAL APROBADO**

CON RECOMENDACIONES:



Las recomendaciones son:

- A. La mano ha sido muy estudiada por las disciplinas que le competen. En el presente proyecto no hay referencias suficientes que profundicen este aspecto en justificación y estado del arte.
 - B. Definir muy bien todos los procesos en la metodología que se harán en el proyecto.
 - C. Qué son marcadores, nombrar los que aditamentos se van a utilizar (ej: geles) y sus especificaciones para el uso humano, especificar los riesgos, como mitigarlos y cuál es la ruta.
 3. El Comité informa que el presente proyecto ha sido aprobado por un periodo de **6 meses** (Diciembre 2025 – Junio 2026) por lo cual se solicita: Envío de informe final o producto al culminar el proyecto (**Junio 2026**) en el siguiente link <https://forms.office.com/r/gXMqypJkeh>
 4. Si el proyecto se extiende o excede el tiempo de aprobación, **se debe renovar el aval ético**, mediante carta para enmienda del aval.
 5. Si es necesario el CEI podría determinar que se debe de someter de nuevo el proyecto a evaluación. No obstante, el CEI puede ser convocado a solicitud de alguno de sus miembros o de las directivas institucionales para revisar cualquier asunto relacionado con la realización del estudio.
 6. El Comité informará inmediatamente a las directivas institucionales:
 - a. Todo desacato de los investigadores a las solicitudes del Comité.
 - b. Cualquier suspensión o terminación de la aprobación del protocolo por parte del Comité.
 - c. Tener en cuenta siempre la seguridad, tiempo, lugar, permisos de uso y divulgación de los datos, anonimato, confidencialidad, custodia y persona a cargo.
 7. El investigador principal deberá informar al Comité:
 - a. Cualquier cambio o enmienda que se proponga introducir en este proyecto. Estos cambios no podrán iniciarse sin la revisión y aprobación del Comité
 - b. Sucesos inesperados relacionados con la conducción del estudio, informando la subsiguiente respuesta por parte de los investigadores.
 - c. Informar cualquier decisión tomada por otros comités de ética.
 - d. La terminación prematura o suspensión del proyecto explicando la razón para esto.
 - e. Nueva información que pudiera afectar la proporción riesgo-beneficio del estudio.
 - f. El investigador principal deberá presentar el informe a los 6 m a partir de la fecha de aprobación, para verificar el estado actual del protocolo y determinar si se requiere ampliación del aval.
- Para constancia se firma el presente certificado.

Firma

Nombre: Dr. EDUARDO CASTRILLON

Presidente

Comité de Ética en Investigación en Salud de la FCS (CEI)

Firma

Nombre: GLORIA S. LIZARRALDE G. PhD.

Secretaría Técnica

Comité de Ética en Investigación en Salud de la FCS (CEI)

Fecha: CALI, NOVIEMBRE DE 2025

Realizó aval	GLORIA S. LIZARRALDE G.
Revisó y avaló	EDUARDO CASTRILLÓN
Archivo y envío a investigadores	MAIRA ARIZA

4.2. Consentimiento informado

4.2.1. Plantilla del Consentimiento informado

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Título del proyecto: *Desarrollo e implementación de un protocolo estandarizado para el análisis cinemático de la mano y los dedos en el laboratorio de marcha de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.*

Investigadoras: Lina Sofía Alegria Quiñones - Laura Sofía Benavides Ocampo.

Directora del proyecto: Luisa Fernanda García Ramírez.

Programa Académico: Ingeniería Biomédica.

Institución: Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Fecha de Realización: Día (__) Mes (__) Año (20 __)

Lugar de Realización: Laboratorio de movimiento - Pontificia Universidad Javeriana Cali.

1. Descripción del Estudio

Usted está siendo invitado(a) a participar de manera totalmente voluntaria a un estudio que tiene como objetivo desarrollar y validar un protocolo estandarizado para analizar el movimiento de la mano y los dedos mediante un sistema de captura óptica.

En este estudio se busca evaluar la visibilidad, precisión y repetibilidad de un conjunto de marcadores ubicados sobre la piel o sobre un guante especial, mientras realiza específicos movimientos de la mano. Esta información permitirá crear una herramienta de análisis útil para la investigación y para la rehabilitación.

2. Procedimiento

Si usted desea y acepta participar:

1. Se le explicará de manera oral detalladamente el propósito del estudio y podrá hacer todas las preguntas que desee las cuales se le responderán de manera clara y acertada.
2. Se le pedirá que se retire relojes, anillos, manillas, y todo tipo de objetos y/o accesorios que puedan interferir en la toma de las mediciones.
3. Se procederá a colocar los **marcadores reflectivos** sobre puntos específicos de la piel de la mano o sobre un guante diseñado para este experimento. Estos marcadores no generan ningún tipo de molestia o reacción química.
4. Con los marcadores puestos, se le solicitará realizar una serie de movimientos suaves y naturales de la mano y los dedos tales como: abrir y cerrar la mano, flexionar y extender los dedos, realizar movimientos de pinza y agarre de objetos pequeños.
5. En algunos casos, es posible que se le pida que repita los movimientos en otra sesión, con el fin de analizar la repetibilidad de las mediciones.
6. Durante todo el proceso, se grabará únicamente la posición de los marcadores mediante el sistema de cámaras con el que cuenta el laboratorio.

3. Riesgos y molestias

El estudio se considera de riesgo mínimo, por lo cual:

- Las posibles molestias incluyen una ligera incomodidad por el uso del guante o la ubicación de los marcadores aunque no se espera ningún tipo de dolor o lesión.
- En caso de presentar alguna molestia física o emocional, usted podrá detener la prueba en cualquier momento.
- Todo el procedimiento será realizado bajo supervisión de las investigadoras y dentro de un entorno controlado.

4. Beneficios

Aunque con la participación que usted hace en este estudio no recibirá ningún tipo de beneficio o gratificación económica, su participación hace una gran contribución en el desarrollo de una metodología que puede mejorar los procesos de análisis y rehabilitación de la función de la mano en el futuro. Además, si así lo desea, usted puede pedir que se le comparta un resumen de los resultados generales del estudio una vez finalizado.

5. Confidencialidad

Toda la información recolectada será tratada con estricta confidencialidad, por lo cual:

- Sus datos personales se identificarán con un código y no se publicará su nombre o nada de su información personal que permita que sea reconocido(a).
- Los registros y resultados se almacenarán únicamente para fines académicos y científicos dentro de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Los datos no serán compartidos a terceros sin su autorización.

6. Voluntariedad

Su participación es completamente **voluntaria**, quiere decir que usted puede negarse a participar o retirarse en cualquier momento sin ninguna consecuencia académica, laboral ni personal. Su decisión no afectará su relación con la universidad ni con las investigadoras.

7. Costos e incentivos

La participación no implica ningún costo para usted ni retribución económica. Los materiales y recursos utilizados serán asumidos por el proyecto.

8. Contacto y aclaración de dudas

Si tiene preguntas, comentarios o desea más información sobre el estudio, puede comunicarse con:

- Lina Sofía Alegria Quiñones (Investigadora) - linaalegria28@javerianacali.edu.co
- Laura Sofía Benavides Ocampo (Investigadora) - lalabenavides@javerianacali.edu.co
- Luisa Fernanda Garcia Ramirez (Directora) - luisa.garcia@javerianacali.edu.co

En caso de que usted tenga alguna petición, queja, reclamo o sugerencia, puede contactar al comité de ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. etica.investigacion@javerianacali.edu.co

9. Consentimiento del participante

Declaro que he leído este documento, que se me explicó claramente el propósito, los procedimientos, riesgos y beneficios del estudio, y que he tenido la oportunidad de hacer las preguntas que considero pertinentes. Además, comprendo que **mi participación es voluntaria** y que **puedo retirarme** en cualquier momento.

Por lo tanto, **doy mi consentimiento libre y voluntario para participar en este estudio.**

Nombre del participante: _____

Firma: _____

Documento de identidad: _____

Fecha: _____

4.3. Procesamiento de Qualisys

Los datos de cada tarea realizada por los 10 participantes, que fueron procesados mediante Qualisys están disponibles en el siguiente enlace: https://javerianacaliedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/lalabenavides_javerianacali_edu_co/IgDUKRwLN2T1RL4d_yGWYxTEAVJyRfjvG-vUi7gK_6-WI3Q?e=yYVzUR

4.4. Formato de recoleccion de datos

El formato de recolección de datos de las pruebas realizadas, junto con las tablas, datos estadísticos y gráficas están disponibles en el siguiente enlace: https://javerianacaliedu-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/lalabenavides_javerianacali_edu_co/IQAIDsItCKc1Q6t30H36ne=cbJnpG

4.5. Códigos de Matlab

4.5.1. Código tarea Flexión-Extensión

El código usado para encontrar los ángulos de la tarea está disponible en el siguiente enlace: https://drive.mathworks.com/sharing/d20e165b-e6a2-4fd0-b95b-4ee8dc584c82/flexion_extension.m

4.5.2. Codigo tarea Oposición Pulgar

El codigo usado para encontrar los angulos de la tarea está disponible en el siguiente enlace: https://drive.mathworks.com/sharing/d20e165b-e6a2-4fd0-b95b-4ee8dc584c82/oposicion_pulgar.m

4.5.3. Codigo tarea Pinza Trípode

El codigo usado para encontrar los angulos de la tarea está disponible en el siguiente enlace: https://drive.mathworks.com/sharing/d20e165b-e6a2-4fd0-b95b-4ee8dc584c82/Pinza_tripode.m

4.5.4. Codigo tarea Agarre Cilíndrico

El codigo usado para encontrar los angulos de la tarea está disponible en el siguiente enlace:

https://drive.mathworks.com/sharing/d20e165b-e6a2-4fd0-b95b-4ee8dc584c82/agarre_cilindro.m

4.5.5. Codigo tarea Abducción Extensión

El codigo usado para encontrar los angulos de la tarea está disponible en el siguiente enlace:

https://drive.mathworks.com/sharing/d20e165b-e6a2-4fd0-b95b-4ee8dc584c82/abduccion_extension.m

4.6. Resultados de los codigos de Matlab

Los resultados obtenidos durante la realización de las pruebas están disponibles en el siguiente enlace: https://javerianacaliedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/lalabenavides_javerianacali_edu_co/IgBRDRB6ZW3PRoek_kKKdgy7Ae2MVVASaBt13Qo28IIbfio?e=uMbEg1

4.7. Protocolo de análisis cinemático de mano y de los dedos.

Como parte del desarrollo del proyecto, se elaboró un protocolo visual en formato de procedimiento operativo estándar (SOP) que resume los aspectos operativos esenciales del proceso implementado. Este documento incluye la configuración del sistema de captura, el esquema de colocación de los 20 marcadores reflectivos sobre la superficie dorsal de la mano dominante y la descripción estandarizada de las tareas funcionales evaluadas. Su propósito es facilitar la reproducibilidad del proceso en futuras aplicaciones dentro del laboratorio.

PROTOCOLO DE ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA MANO Y LOS DEDOS



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

[VIGILADA MINEDUCACIÓN Res. 12220 de 2016]

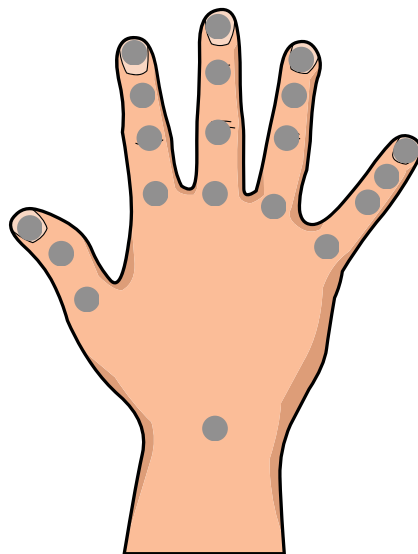
Lina Sofia Alegria
Laura Sofia Benavides

Directora: Luisa Fernanda Garcia Ramirez

Programa de Ingenieria Biomedica
Laboratorio de Analisis de Movimiento
2026

Esquema de colocación de marcadores

Número	Nombre anatomico	Ubicacion
1	Muñeca	Superficie dorsal de la muñeca, alineado con el tendón extensor del dedo medio
2-6	MCP 1-5	Nudillo de la articulación metacarpofalángica de cada dedo (pulgar al meñique)
7-14	PIP-DIP	Articulaciones interfalángicas de los dedos índice, medio, anular y meñique
15	IP	Articulación interfalángicas del dedo pulgar
16-20	Uñas 1-5	Superficie dorsal de la uña de cada dedo (pulgar al meñique)



⚠ Nota: Todos los marcadores se colocan sobre la superficie dorsal de la mano. Verificar visibilidad de los 20 marcadores en el sistema Qualisys antes de iniciar la captura.

Actividades funcionales

Actividad	Descripción	Articulaciones evaluadas
T1 – Movimientos individuales de cada dedo – flexo extensión	Realizar extensión y flexión de manera aislada a cada uno de sus dedos, mientras mantiene el resto de los dedos en posición neutra.	MCP, PIP y DIP de cada dedo.
T2 – Oposición del pulgar:	Tocar la yema de los dedos pulgar, anular, corazón e índice usando la yema de su dedo pulgar de forma secuencial.	MCP y IP del pulgar. MCP, PIP y DIP de cada dedo.
T3 – Pinza trípode (índice – pulgar – medio)	Juntar simultáneamente la yema del pulgar con la yema del dedo índice y el dedo medio.	MCP, PIP y DIP de pulgar, índice y medio.
T4 – Agarre cilíndrico	Se proporciona un cilindro de 6 cm de diámetro, para que lo levante y luego vuelva a apoyarlo.	MCP, PIP y DIP de cada dedo.
T5 – Extensión y abducción simultánea de los dedos:	Extender completamente los dedos y separarlos en forma de abanico, para luego juntarlos lentamente.	MCP, PIP y DIP de cada dedo.

Especificaciones de los marcadores

Característica	Especificación
Tipo de marcador	Marcador reflectivo pasivo
Tamaño	6 mm
Forma	Esférica adhesiva
Material	Esferas de poliestireno recubiertas de material retroreflectivo
Método de fijación	Adhesivo
Compatibilidad	Sistema de captura de movimiento con cámaras
Uso principal	Seguimineto cinemático y captura de movimiento

Configuración de las camaras

Camara	Altura respecto al suelo	Orientación
3	75 cm	Hacia la superficie dorsal de la mano.
4	85 cm	Hacia la superficie dorsal de la mano.
7	160 cm	Vista superior oblicua.
8	94 cm	Hacia la superficie dorsal de la mano.

⚠ Nota: Las cámaras se retiran de su soporte original y se ubican sobre trípodes móviles para permitir ajuste de posición y altura.