



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### 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

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

PABLO ANDRÉS RUIZ CHICAIZA

[pablo.ruiz01@epn.edu.ec](mailto:pablo.ruiz01@epn.edu.ec)

DIRECTOR: Ing. CEVALLOS BARRAGÁN CARLOS ENRIQUE, Ph.D.

[carlos.cevallos02@epn.edu.ec](mailto:carlos.cevallos02@epn.edu.ec)

CODIRECTOR: Ing. GUERRERO BARRAGÁN VÍCTOR HUGO, Ph.D.

[victor.guerrero@epn.edu.ec](mailto:victor.guerrero@epn.edu.ec)

Quito, abril 2019

## Contenido

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>I</b>
<b>DECLARACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>XIV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Pregunta de Investigación .....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos .....	2
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Biomecánica de la mano.....	4
1.2.1. Planos y cortes.....	4
1.2.2. Estructura de la mano .....	5
1.2.3. Movimientos de la mano .....	7
a) Flexión – Extensión de los dedos.....	8
b) Oposición del dedo pulgar .....	9
1.3. Técnicas de análisis cinemático el cuerpo humano.....	10
1.3.1. Análisis de movimiento mediante rayos-X .....	10
1.3.2. Análisis de movimiento mediante imágenes por resonancia magnética .....	11
1.3.3. Análisis de movimiento mediante goniometría.....	11
1.3.4. Análisis de movimiento mediante video análisis .....	12
1.3.5. Análisis de movimiento mediante fotogrametría (MOCAP).....	12
a) Marcadores pasivos.....	15

b) Marcadores activos.....	16
c) Disposición de marcadores.....	16
1.4. Métodos para el cálculo de rangos de movimiento de las articulaciones de los dedos.....	18
1.4.1. Ángulos de Euler.....	18
1.4.2. Modelo de Cheng y Percy .....	19
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
2.1. Diseño de la metodología.....	20
2.2. Procedimiento general para la adquisición del movimiento .....	22
2.3. Muestreo .....	24
2.4. Determinación del protocolo de pruebas para adquisición de datos .....	25
2.4.1. Equipos requeridos .....	26
2.4.2. Información al participante .....	26
2.4.3. Preparación del sujeto.....	27
2.5. Protocolo de pruebas para la adquisición de movimientos .....	29
2.6. Cálculo de rango de movimiento de los gestos motrices de la mano .....	29
2.7. Prueba de los modelos cinemáticos en modelos virtuales CAD .....	31
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
3.1. Resultados .....	32
3.1.1. Variables de posición en movimientos de flexión y extensión de los dedos trifalángicos.....	32
3.1.2. Variables de posición en movimientos de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos.....	35
3.2. Discusión .....	42
3.2.1. Movimiento de flexión y extensión en dedos trifalángicos. ....	42
3.2.2. Movimiento de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos .....	44
3.2.3. Pruebas realizadas en OpenSim.....	45
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>46</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>52</b>

Calibración del equipo .....	52
<b>ANEXO II.....</b>	<b>54</b>
Tratamiento de datos .....	54
Rastreo de trayectorias generadas mediante MOCAP .....	58
Interpolación de trayectorias .....	58
Suavizado de trayectorias.....	59
Creación de Puntos .....	60
Creación de vectores unitarios.....	61
Creación de sistemas de coordenadas .....	62
Ángulos de proyecciones ortogonales .....	63
Obtención de modelos cinemáticos .....	63
Adquisición del tiempo de valores máximos y mínimos de movimiento.....	63
Adquisición de ángulos en un tiempo determinado .....	64
Creación de ciclos .....	64
Adquisición de la media del Ciclo .....	65
Establecimiento del punto inicial .....	66
<b>ANEXO III.....</b>	<b>67</b>
Protocolo de adquisición de datos .....	67
Fase de adquisición .....	67
<b>ANEXO IV. ....</b>	<b>71</b>
Consentimiento informado .....	71
<b>ANEXO V. ....</b>	<b>75</b>
Cuestionario para participantes del estudio .....	75
<b>ANEXO VI. ....</b>	<b>76</b>
Prueba de modelos cinemáticos en modelos virtuales CAD Opensim .....	76
<b>ANEXO VII. ....</b>	<b>79</b>
Punto de referencia para el cálculo de los rangos de movimiento de las articulaciones de la mano.....	79
<b>ANEXO VIII. ....</b>	<b>81</b>

Datos iniciales de los participantes para el protocolo .....	81
<b>ANEXO IX.</b> .....	<b>85</b>
Resultados obtenidos de movimientos de la mano con su desviación estándar.....	85
Variables de posición en movimientos de flexión y extensión de los dedos trifalángicos .....	85
Variables de posición en movimientos de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos .....	86
<b>ANEXO X.</b> .....	<b>91</b>
Informe del comité de ética .....	91
<b>ANEXO XI.</b> .....	<b>95</b>
Protocolo de pruebas para la adquisición de modelos .....	95
Protocolo de flexión – extensión para los dedos D II y D IV .....	95
Protocolo de flexión – extensión para los dedos D III y D V .....	101
Protocolo de oposición del dedo pulgar para los dedos D II y D IV .....	106
Protocolo de oposición del dedo pulgar para los dedos D III y D V .....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Planos del cuerpo humano. ....	5
Figura 1.2. Huesos de la mano. ....	6
Figura 1.3. Articulaciones de la mano. ....	7
Figura 1.4. Flexión-Extensión de los dedos. ....	8
Figura 1.5. Oposición del dedo pulgar. ....	9
Figura 1.6. Tipos de oposición del dedo pulgar. ....	10
Figura 1.7. Técnica de análisis de movimiento mediante rayos-X. ....	10
Figura 1.8. Técnica de análisis de movimiento mediante imágenes por resonancia magnética. ....	11
Figura 1.9. Técnica de análisis de movimiento mediante goniometría. ....	11
Figura 1.10. Software de vídeo-análisis Tracker. ....	12
Figura 1.11. Sistema de captura de movimiento MOCAP. ....	13
Figura 1.12. Sistema inercial para captura de movimiento. ....	14
Figura 1.13. Estructura general para análisis de sistemas de movimiento del cuerpo humano. ....	15
Figura 1.14. Marcadores pasivos para la captura de movimiento. ....	15
Figura 1.15. Marcadores activos para captura de movimiento. ....	16
Figura 1.16. Disposición de marcadores pasivos para la captura de movimiento. ....	17
Figura 1.17. Ángulos de Euler utilizados para definir los rangos de movimiento de las articulaciones. ....	18
Figura 1.18. Modelo de cálculo de ángulos de flexión/extensión y aducción/abducción. ....	19
Figura 2.1. Estructura general para el análisis de movimiento MOCAP. ....	22
Figura 2.2. Fase de inicialización de la captura de movimiento. ....	22
Figura 2.3. Fase de tracking de la captura de movimiento. ....	23
Figura 2.4. Fase de estimación del gesto motriz en la captura de movimiento. ....	23
Figura 2.5. Fase de prueba y resultados en la captura de movimiento. ....	24
Figura 2.6. Toma de datos de los movimientos realizados por el participante en laboratorio de MOCAP. ....	25
Figura 2.7. Posicionamiento de marcadores para flexión y extensión de los dedos trifalángicos. ....	28
Figura 2.8. Posicionamiento de marcadores para oposición del dedo pulgar. ....	28
Figura 2.9. Interfaz computacional del protocolo de pruebas para adquisición de movimientos. ....	29

Figura 2.10. Sistema de coordenadas móvil para el cálculo de ángulo generado en flexión/extensión del vector unitario. ....	30
Figura 2.11. Ángulos de las proyecciones ortogonales de vectores unitarios.....	30
Figura 2.12. Modelo CAD utilizado para la comprobación de movimientos. ....	31
Figura 3.1. Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos trifalángicos.. ....	33
Figura 3.2. Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas proximales de los dedos trifalángicos.. ....	34
Figura 3.3. Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas distales de los dedos trifalángicos.. ....	35
Figura 3.4. Movimientos de flexión-extensión de la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. ....	37
Figura 3.5. Movimientos de aducción-abducción de la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos.....	38
Figura 3.6. Movimientos de flexión-extensión de la articulación metacarpofalángica del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. ....	38
Figura 3.7. Movimientos de flexión-extensión de la articulación interfalángica del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. ....	39
Figura 3.8. Movimientos de flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos trifalángicos en movimientos de oposición hacia el dedo pulgar. ....	40
Figura 3.9. Movimientos de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas proximales de los dedos trifalángicos en movimientos de oposición hacia el dedo pulgar. ....	41
Figura 3.10. Movimientos de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas distales de los dedos trifalángicos en movimientos de oposición hacia el dedo pulgar. ....	41
Figura A1.1. Objetos de calibración del sistema de coordenadas. ....	52
Figura A1.2. Posicionamiento de cámaras optoelectrónicas .....	53
Figura A2.1. Modelos de conectividad de la mano.....	54
Figura A2.2. Monitoreo de datos adquiridos.....	55
Figura A2.3. Montaje del modelo de conectividad.....	56
Figura A2.4. Puntos fantasmas en archivos “.tdf”.....	57
Figura A2.5. Monitoreo de trayectorias de los puntos del modelo virtual.....	57
Figura A2.6. Número de marcadores generados al final del tratamiento de datos. ....	58
Figura A2.7. Comando “interpolate track”. ....	58
Figura A2.8. Interpolación de trayectorias.....	59
Figura A2.9. Comando “Smooth track”.....	59

Figura A2.10. Suavizado de trayectorias.....	60
Figura A2.11. Creación de la junta metacarpofalángica J MCP en el dedo índice.....	61
Figura A2.12. Creación del vector unitario entre el punto I J MCP y el punto I2. ....	62
Figura A2.13. Comando “Point and 3 unit vectors” para la creación de sistemas de coordenadas.....	62
Figura A2.14. Sistema de coordenadas de la junta metacarpofalángica del dedo índice. ....	62
Figura A2.15. Comando “Reference rotated by an angle around X axis” para la rotación de sistemas de coordenadas alrededor del eje X.....	63
Figura A2.16. Comando "Angles of orthogonal projection" para el cálculo de ángulos. ....	63
Figura A2.17. Comando "Angles of orthogonal projection" para la determinación de tiempos en un evento determinado. ....	63
Figura A2.18. Selección de los tiempos del ángulo máximo alcanzado. ....	64
Figura A2.19. Comando “Event defined value” define el valor del evento en los tiempos que se determine.....	64
Figura A2.20. Comando “Event defined cycle” para la creación de ciclos a partir de un evento determinado. ....	64
Figura A2.21. Secuencia de ciclos del evento J MCP I. ....	65
Figura A2.22. Comando “Cycle sequence mean” para el cálculo del valor medio de la secuencia de ciclos.....	65
Figura A2.23. Valor medio del ciclo J MCP I. ....	65
Figura A2.24. Comando “Single event on 1 object” para obtener un tiempo en un evento determinado.....	66
Figura A2.25. Comando “Event defined value” para realizar diferencia entre dos valores determinados.....	66
Figura A2.26. Definición del punto inicial en un ciclo determinado. ....	66
Figura A3.1. Dedos totalmente extendidos. ....	67
Figura A3.2. Movimiento de Flexión y extensión de los dedos. ....	68
Figura A3.3. Movimientos de oposición del dedo pulgar. ....	69
Figura A3.4. Movimientos de flexión – extensión del dedo pulgar.....	69
Figura A3.5. Movimientos de abducción – aducción del dedo pulgar. ....	70
Figura A6.1. Modelo cinemático de flexión-extensión aplicado en modelo CAD – OpenSim.....	76
Figura A6.2. Modelo cinemático de oposición del pulgar-índice aplicado en modelo CAD – OpenSim.....	76



Figura A6.3. Modelo cinemático de oposición del pulgar-medio aplicado en modelo CAD – OpenSim.....	77
Figura A6.4. Modelo cinemático de oposición del pulgar-anular aplicado en modelo CAD – OpenSim.....	77
Figura A6.5. Modelo cinemático de oposición del pulgar-meñique aplicado en modelo CAD – OpenSim. ....	77
Figura A6.6. Enlace QR de los resultados en vídeo.....	78
Figura A6.7. Enlace QR de datos obtenidos.....	78
Figura A7.1. Sistema de referencia para el cálculo de flexión-extensión de los dedos trifalángicos. ....	79
Figura A7.2. Sistema de referencia para el cálculo de la oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. ....	80
Figura A9.1. Curva media (negro) con su desviación estándar (verde) medidas en grados (°) y obtenidas para cada una de las articulaciones de los dedos trifalángicos durante la flexión y extensión en un ciclo.....	85
Figura A9.2. Curva media (negro) con su desviación estándar (verde) medidas en grados (°) y obtenidas para cada una de las articulaciones de los dedos índice y pulgar durante el movimiento de oposición en un ciclo.....	86
Figura A9.3. Curva media (negro) con su desviación estándar (verde) medidas en grados (°) y obtenidas para cada una de las articulaciones de los dedos medio y pulgar durante el movimiento de oposición en un ciclo.....	87
Figura A9.4. Curva media (negro) con su desviación estándar (verde) medidas en grados (°) y obtenidas para cada una de las articulaciones de los dedos anular y pulgar durante el movimiento de oposición en un ciclo.....	88
Figura A9.5. Curva media (negro) con su desviación estándar (verde) medidas en grados (°) y obtenidas para cada una de las articulaciones de los dedos meñique y pulgar durante el movimiento de oposición en un ciclo.....	89
Figura A9.6. Curva media (negro) con su desviación estándar (verde) medidas en grados (°) y obtenidas en la articulación CMC para cada uno de los movimientos de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos tomando en cuenta únicamente los movimientos de aducción/abducción.....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Comparación de rangos de movimiento presentes en diferentes publicaciones.....	9
Tabla 2.1. Fortalezas y debilidades de los distintos tipos de EO analizados.....	20
Tabla 2.2. Continuación de fortalezas y debilidades de los distintos tipos de EO analizados.....	21
Tabla 2.3. Protocolos BTS Bioengineering.....	25
Tabla 2.4. Instrumentación del laboratorio.....	26
Tabla 3.1. Media del rango de movimiento y desviación estándar de las articulaciones durante los movimientos de flexión y extensión de los dedos trifalángicos.....	32
Tabla 3.2. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo índice y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS)..	36
Tabla 3.3. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo medio y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS)..	36
Tabla 3.4. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo anular y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS)..	36
Tabla 3.5. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo meñique y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS)..	37
Tabla A1.1. Error de calibración del sistema de Captura de Movimiento.....	52
Tabla A2.1. Comandos para la creación de puntos.....	60
Tabla A2.2. Comandos para la creación de puntos.....	61
Tabla A2.3. Comandos para la creación de vectores unitarios.....	61
Tabla A8.1. Medidas antropométricas del participante 1.....	81
Tabla A8.2. Medidas antropométricas del participante 2.....	81
Tabla A8.3. Medidas antropométricas del participante 3.....	82
Tabla A8.4. Medidas antropométricas del participante 4.....	82
Tabla A8.5. Medidas antropométricas del participante 5.....	82
Tabla A8.6. Medidas antropométricas del participante 6.....	83
Tabla A8.7. Medidas antropométricas del participante 7.....	83
Tabla A8.8. Medidas antropométricas del participante 8.....	83
Tabla A8.9. Medidas antropométricas del participante 9.....	84

## GLOSARIO

**Antropometría.** – Es la ciencia de obtener cálculos sistemáticos del cuerpo humano como los son: el largo, ancho, diámetro de los huesos.

**Movimientos Naturales.** – Son movimientos que realiza el ser humano sin que hay tenido que aprender anteriormente y los efectúa por instinto.

**Rangos articulares.** – Se refiere a la distancia (generalmente en grados) que recorren las articulaciones desde una posición referencial.

**Goniómetro.** – Es un instrumento utilizado en la biomecánica para el cálculo de los rangos articulares.

**MOCAP.** – Técnica utilizada en biomecánica para capturar los movimientos del cuerpo humano mediante cámaras optoelectrónicas.

**Fotogrametría.** – Es una técnica que tiene como propósito conocer el movimiento del objeto en el espacio a partir del estudio de fotografías que llegan a formar modelos digitales.

**Hilera digital.** – Conjunto de huesos conformado por el hueso metacarpiano y las falanges proximal media y distal (en el caso del pulgar las falanges proximal y distal).

**Articulaciones.** – Unión entre dos huesos del cuerpo humano (específicamente en los huesos de la mano).

**Carpó.** – conjunto de huesos que conforman la muñeca. Está compuesto de 8 huesos (escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, trapecio, trapezoide, grande y ganchoso).

**Metacarpianos.** – Conjunto de huesos que conectan los huesos del carpo con las falanges proximales de los dedos de la mano.

**Proximales.** – Proximidad del hueso hacia el punto de origen (en el caso de la falange proximal, indica la proximidad hacia el hueso metacarpiano).

**Distales.** – Lejanía del hueso hacia el punto de origen (en el caso de la falange distal, indica la que es la falange más lejana respecto al hueso metacarpiano).

**Huesos.** – Estructuras óseas que soportan los órganos del cuerpo humano.

**Pulpejo.** – Parte más carnosa y redondeada ubicada en la punta de los dedos.

**Falange.** – Hueso largo y pequeño que conforman las hileras digitales de las manos.

**Marcadores.** – Objetos de forma redonda (reflectivos) que se colocan en los sujetos de estudio para capturar su movimiento mediante cámaras utilizadas en la técnica de MOCAP.

**Cámaras Optoelectrónicas.** – Cámaras de alta precisión rodeadas de luces LED utilizadas en la técnica de MOCAP para obtener el posicionamiento y movimiento de marcadores.

**Aducción.** – Movimiento de acercamiento de un miembro del cuerpo hacia el plano medio.

**Abducción.** – Movimiento de alejamiento de un miembro del cuerpo lejos del plano medio.

## RESUMEN

La presente investigación estudia el movimiento cinemático de la mano para el movimiento de oposición del dedo pulgar y los movimientos de flexión y extensión de los dedos mediante la técnica de fotogrametría (captura de movimiento). Para el cumplimiento del objetivo se utilizó el paquete de herramientas de captura de movimiento "BTS Smart". Mediante este paquete se definieron protocolos de cada ejercicio ejecutado para la toma de datos a partir de diversas experimentaciones realizadas en el laboratorio de análisis de movimiento "BioFoot". Los datos fueron obtenidos a través de cámaras optoelectrónicas que captan el movimiento de marcadores reflectivos ubicados en la mano, en los puntos recomendados por la Sociedad Internacional de Biomecánica (ISB) en 9 pacientes que no tenían ningún tipo de problema neuronal, reumatológico o traumatológico. Se obtuvo la media del movimiento y sus desviaciones estándar para cada uno de los movimientos en un ciclo determinado. El estudio de los movimientos conllevó a adquirir datos característicos de los ejercicios realizados, como son: el rango de movimiento de la flexión y extensión de los dedos, y el rango de movimiento de la aducción y abducción del dedo pulgar. Posteriormente, los datos conseguidos fueron ingresados en un modelo virtual mediante la herramienta "OpenSim" con el objetivo de verificar si los movimientos obtenidos cumplían con los rangos que se esperaban obtener. Finalmente, se definieron los puntos iniciales del movimiento y se concluyó que los rangos de movimiento de cada una de las articulaciones de la mano en los ejercicios realizados son aceptables respecto a los alcances trazados.

**Palabras clave:** Articulación, cinemática, dedos, fotogrametría, mano, movimiento.

## **ABSTRACT**

The current research studies the kinematic movements of the hand for the opposition movements of the thumb and flexion-extension movements of the fingers by photogrammetry (motion capture). To perform the aim, the toolbox "BTS Smart" was used. This software helps to realize the motion capture, the data treatment and to get the kinematic movements. Protocols for each exercise executed were defined and carried out in the "BioFoot" Lab. The data were collected through optoelectronic cameras capture movements of reflective markers placed in the hand as the International Society of Biomechanics (ISB) suggest it, in nine patients who didn't have any neuronal, rheumatologic or traumatological problems. The mean, the standard deviation, the range of movement of the adduction-abduction movements of the thumb and the flexion-extension movements of the fingers were obtained by data acquired via the movements study. Subsequently, the software "OpenSim" was used to verify the correct movement expected to get of the fingers thought the data previously acquired and implanted in the virtual model. Eventually, the initial points of each movements were determined, and it can possible to conclude that the movements range of each one of the joints in the hand that was obtained in the present research are acceptable.

**Keywords:** Joints, hand, kinematic, movements, fingers, photogrammetric.

# **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**

## **INTRODUCCIÓN**

La mano es reconocida como el órgano que ayudó al hombre al desarrollo del cerebro desde su nacimiento, ya que cada acción que realiza el ser humano, desde llevar el alimento a la boca hasta acciones complejas de precisión como la pintura, intervienen las manos (Kapandji, 2006). El estudio de la mano, parte desde la antropometría para la creación de productos muy simples desde guantes hasta la construcción de herramientas complejas de operación con alta precisión mediante el estudio del movimiento (Lee y Jung, 2015). El diseño y fabricación de robots rehabilitadores se basan en los movimientos naturales del cuerpo humano, sin embargo, no siempre se logra generar gestos motrices completamente fluidos o iguales sin ayuda de herramientas adecuadas ya que no se suele considerar la ergonomía (Hansen et al., 2018). La biomecánica de la mano a partir su estudio cinemático es una herramienta que permite conocer los gestos motrices que son necesarios para simular la mano (Deshpande et al., 2013).

Existen técnicas como la goniometría que ayudan a identificar los rangos de movimiento que llegan a alcanzar las diferentes articulaciones en el cuerpo humano por medio de mediciones de rangos articulares con un goniómetro. Sin embargo, para el cálculo espacial de los movimientos combinados en las diferentes articulaciones como es el caso en el dedo pulgar se llega a complicar el cálculo mediante esta técnica. La fotogrametría es una técnica que permite el monitoreo en tiempo real de movimientos generados por un objeto en el espacio (Coupier et al., 2016). Estos movimientos son captados por cámaras de alta velocidad y equipadas con sensores especializados que permiten capturar el movimiento (MOCAP, *motion capture*) de marcadores especiales colocados sobre el objeto a estudiar. MOCAP es una técnica utilizada en el área de biomecánica para estudiar los movimientos del cuerpo humano y ayudar a detectar inconvenientes, como son los problemas en la cervical (Moreno et al., 2018), daños en la rodilla (Park et al., 2018), enfermedades en la mano (Conti et al., 2016), que afectan el movimiento natural de la persona (Mérida, 2014).

Es por las razones antes referidas que en el presente estudio se capturó el gesto motriz de la mano al realizar movimientos de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos

y movimientos de flexión-extensión de los dedos trifalángicos. Este proceso se llevó a cabo a través de un equipo especializado para MOCAP. Una vez realizado este proceso se obtuvo el modelo cinemático de cada uno de los dedos y se procedió a realizar pruebas virtuales mediante el software “OpenSim” (Delp et al., 2007), una herramienta de simulación cinemática y dinámica del cuerpo humano que servirá como punto de partida para futuros proyectos de estudios en la mano.

## **Pregunta de Investigación**

¿Es posible obtener un estándar cinemático de la mano para movimientos naturales de oposición del dedo pulgar y de flexión y extensión de los dedos?

## **Objetivo general**

Establecer un estándar cinemático de la mano para los movimientos naturales de oposición del pulgar y de flexión y extensión de los dedos.

## **Objetivos específicos**

Establecer un protocolo de pruebas que permita la recolección de los movimientos de la mano.

Capturar los movimientos de la mano a partir de un equipo de MOCAP.

Obtener modelos cinemáticos de la mano a partir del monitoreo o tracking de las trayectorias.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes

El campo de estudio de la biomecánica tiene importancia en el desarrollo de métodos y técnicas para el análisis de la fisiología de movimiento dentro del cuerpo humano. Las diferentes áreas de estudio, como son la antropometría, la cinemática, la cinética y la electromiografía (EMG) ayudan a evaluar de forma específica las características funcionales de movimiento que tiene la mano. Dentro de estas áreas, realizar un estudio del movimiento cinemático permite obtener estándares para validar el movimiento de objetos robóticos y comparación de movimientos en estudios biomédicos (Conti, Meli, y Ridolfi, 2016; Davis, Ounpuu, Tyburski, y Gage, 1991; Lee y Jung, 2015).

El área de estudio de la cinemática de la mano se enfoca en evaluar ángulos, trayectorias, velocidades y las aceleraciones, a partir de observar las funciones que cumple la mano. Existen técnicas que facilitan la evaluación del movimiento cinemático, no obstante, cada una cuenta con distintos alcances. Algunas de las técnicas utilizadas para el estudio cinemático de la mano son: rayos-X, imágenes por resonancia magnética, goniómetros manuales, electrogoniometría, video análisis, y marcadores basados en sistemas de análisis de movimiento (Lee y Jung, 2015). En el trabajo de Baker et al., (2007) se realizó el cálculo de las posturas de la muñeca y los dedos de la mano, en el que comparó las técnicas de goniometría y capturas de movimiento, donde resalta la dificultad de identificar movimientos complejos de la mano, mientras que el uso de captura de movimiento facilita la adquisición de los movimientos complejos de la mano. Coupier et al., (2016) analizó los movimientos de flexión-extensión y aducción-abducción de los dedos de la mano mediante fotogrametría, donde señaló la importancia de la calibración de las cámaras y ubicación de los marcadores en las manos. Conti et al., (2016) construyó un exoesqueleto de arquitectura portable, en su investigación realizó un modelo cinemático de la mano y lo validó mediante la comparación entre el modelo cinemático y la captura del movimiento de la mano. Coert et al., (2003) cuantificó el movimiento circundante del pulgar mediante técnica de video, en su investigación resaltó la importancia de estudiar los movimientos del pulgar ya que es un movimiento esencial para realizar las funciones normales de la mano. Kapandji, (2006) Enfatiza que los movimientos más importantes en relación con su funcionalidad son: el movimiento de flexión y extensión de los dedos, además de la oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. Nakamura et al., (1999) analizó en vivo la rotación normal del brazo utilizando un método de resonancia magnética, en esta técnica señala que además de utilizar resonancia magnética era necesario otros

instrumentos como el goniómetro para realizar el cálculo. Mallon et al., (1991) utiliza la técnica de electro goniometría (uso de goniómetros digitales) para evaluar el rango de movimiento en las articulaciones de las manos de personas saludables, donde enfatiza que no existe diferencias notables al realizar la comparación de rangos dependiendo del sexo. Batmanabane y Malathi, (1985) utiliza la técnica de rayos X para evaluar los rangos de movimiento de los ejercicios de aducción/abducción en los dedos trifalángicos. Una vez obtenida la radiografía, ubica los huesos evaluados y mediante dos líneas calculó el ángulo generado.

Con base en las facilidades y dificultades mostradas previamente en el párrafo anterior, la presente investigación tiene como objetivo el estudio cinemático de la mano para los movimientos de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos y la flexión y extensión de los dedos. Mediante la técnica de fotogrametría (Captura de Movimiento) se logrará obtener las trayectorias que sigue cada uno de los dedos acorde con los movimientos señalados. El aporte de esta investigación en la biomecánica, con base en lo anterior mencionado, será ayudar a obtener modelos cinemáticos estándares de la mano realizando movimientos combinados entre el dedo pulgar y los dedos trifalángicos. Además, al ser parte del proyecto de vinculación PVS 2017 011 se logra crear relaciones de trabajo entre diferentes proyectos de titulación y gracias a la colaboración de BioFoot y KINÉTICO, entidades dedicadas al tratamiento personas en procesos de rehabilitación física, el presente trabajo se puede presentar como punto de partida para nuevas investigaciones en el Ecuador.

## **1.2. Biomecánica de la mano**

La mano es un conjunto de huesos y estructuras de tejido blando. El estudio de su relación con el entorno ha sido de gran aporte para conocer la importancia que tiene la mano en el ser humano (Repetto, 2005). Por el enfoque del estudio de los movimientos realizados por mano y no las causas que lo provocan (osteocinemática), únicamente se mencionarán sus huesos y articulaciones.

### **1.2.1. Planos y cortes**

En anatomía se refieren a planos como superficies planas imaginarias y se utilizan como puntos específicos para estudiar las estructuras del cuerpo humano, Figura 1.1. Los principales son 3 (Álvarez, 2007):

- a) Plano Frontal: Es un plano vertical que divide al cuerpo u órgano en una parte posterior (frontal) y anterior (dorsal). En este plano, los dedos realizan los movimientos de adducción-abudcción.
- b) Plano Sagital: Es un plano vertical que divide al cuerpo u órgano en dos partes iguales. En el caso de la mano la divide en un lado izquierdo y derecho. En este plano, los dedos de la mano realizan los movimientos de flexión-extensión.
- c) Plano Transversal: Es un plano horizontal que divide al cuerpo u órgano en una parte superior e inferior. En este plano, los dedos realizan movimientos de rotación.

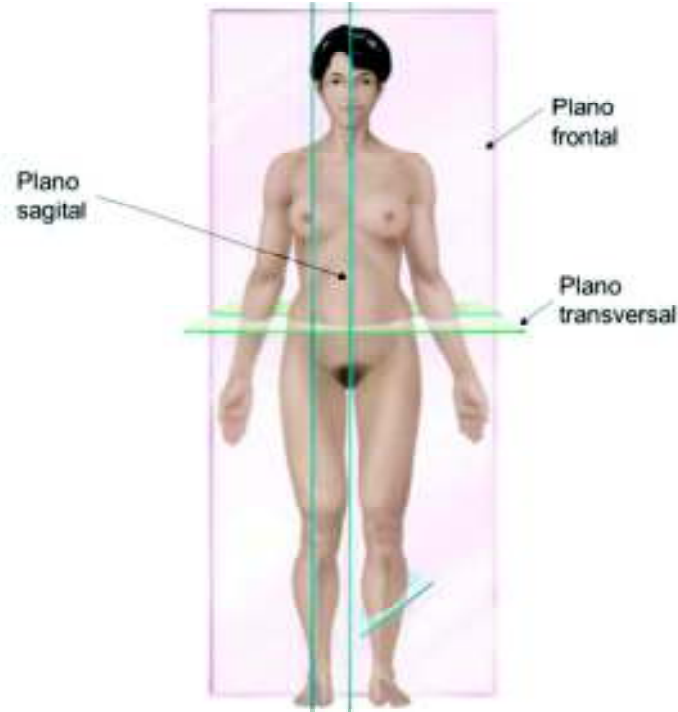


Figura 1.1. Planos del cuerpo humano.  
 Plano sagital, plano transversal y plano frontal.  
 (Fuente: (Tortora, G. J., y Derrickson, 2013))

### 1.2.2. Estructura de la mano

La mano está compuesta por 19 huesos y 14 articulaciones. Se conoce como hilera digital al conjunto o cadena de huesos formada por un hueso metacarpiano y tres falanges (en el caso del dedo pulgar 2 falanges). Las hileras digitales son enumeradas desde el pulgar hasta el dedo meñique: I (pulgar), II (índice), III (corazón), IV (anular), V (meñique) ,Figura 1.2. Cada una de las hileras digitales se conecta con articulaciones carpometacarpianas (Nordin, M. et al., 2004).

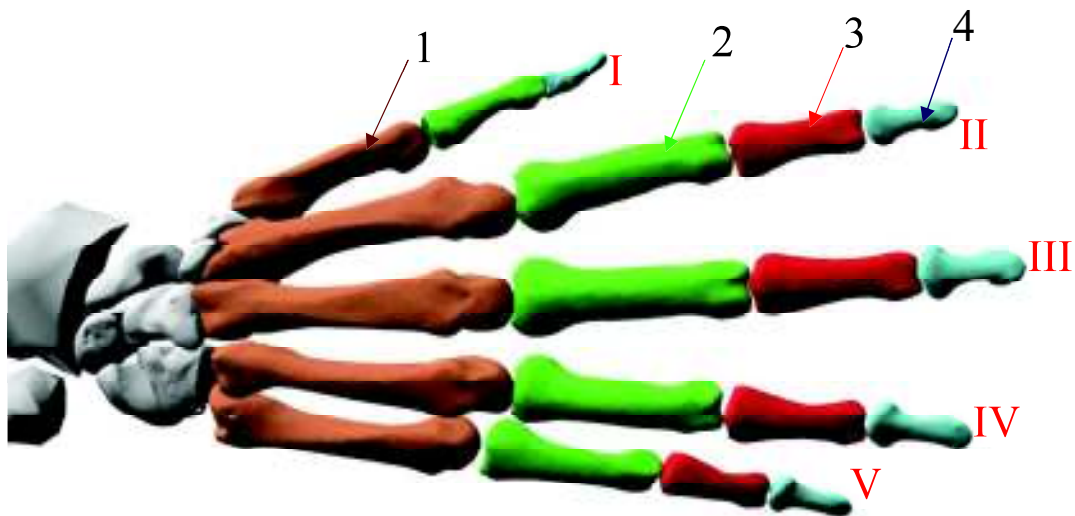


Figura 1.2. Huesos de la mano.

1. Metacarpianos (café) 2. Falanges proximales (verde) 3. Falanges medias (rojo) 4. Falanges distales (celeste).  
(Fuente: Propia)

Las articulaciones son uniones entre los extremos de los huesos, en el caso de la mano, son las uniones que conectan: los huesos del carpo con los extremos proximales de los metacarpianos (articulación carpometacarpiana – amarillo); los extremos distales de los metacarpianos con los extremos proximales de las falanges proximales (articulación metacarpofalángica – azul); los extremos distales de las falanges proximales con los extremos proximales de las falanges medias (articulación interfalángica proximal – tomate); los extremos distales de las falanges medias con los extremos proximales de las falanges distales (articulación interfalángica distal – verde) y en el caso del dedo pulgar al no contar con una falange media únicamente cuenta con una articulación interfalángica (morado) que conecta el extremo distal de la falange proximal con el extremo proximal de la falange distal, Figura 1.3.

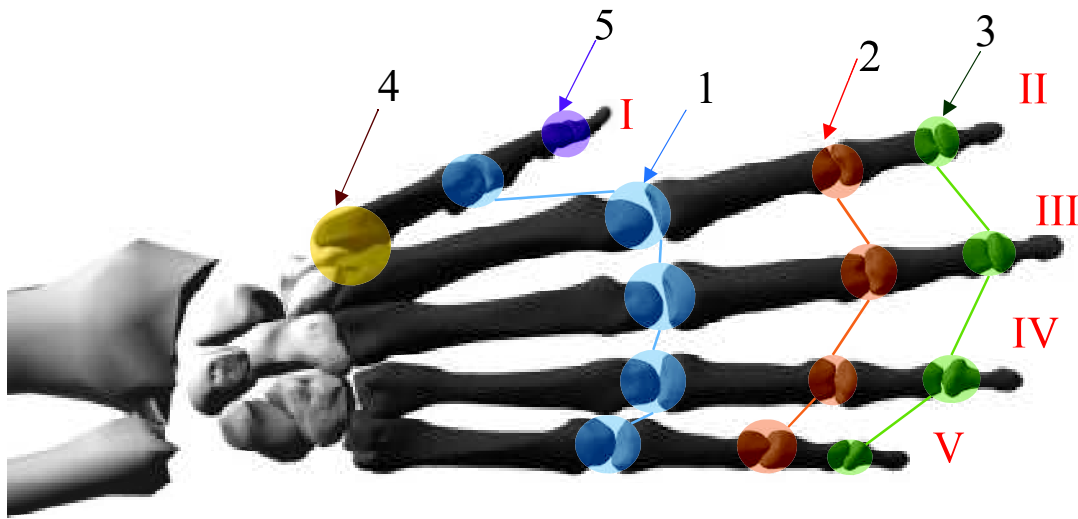


Figura 1.3. Articulaciones de la mano.

1. Metacarpofalángica (MCF-MCP-azul) 2. Interfalángica proximal (IFP-PIP-tomate) 3. Interfalángica distal (IFD-DIP-verde) 4. Carpometacarpiana (CMC-amarillo) 5. Interfalángica (IF-IP-morado).

(Fuente: Propia)

### 1.2.3. Movimientos de la mano

Los huesos de la mano tienen diferentes geometrías, por lo cual, las articulaciones MCF, IFP, IFD, CMC (pulgares) e IF cuentan con diferentes grados de libertad y rangos de movimiento en diferentes gestos motrices, tales como: flexión y extensión de los dedos; abducción y aducción de los dedos; y oposición del dedo pulgar.

Las articulaciones MCF permiten realizar movimientos en los 3 planos: en el plano sagital (flexión y extensión); en el plano frontal (abducción y aducción); y en el plano transversal (pronación y supinación). Las articulaciones IFP, IFD e IF únicamente permiten movimientos de flexión y extensión en el plano sagital. Lo que deja en claro la complejidad del estudio completo de la mano y sus combinaciones de movimientos. Dentro de la rehabilitación (Goggins y Williams, 2018) y en conjunto con el proyecto de vinculación PVS 2017 011 luego de hablar con el centro de rehabilitación KINETICO se estableció que se necesitan estos movimientos para la rehabilitación en las manos, los mismos que son objeto del presente estudio.

En la presente investigación se estudia únicamente los movimientos de:

- Oposición del dedo pulgar.
- Movimientos de flexión y extensión de los dedos.

### a) Flexión – Extensión de los dedos

La flexión de los dedos es la disminución del ángulo formado en las articulaciones, mientras que en la extensión este ángulo formado en las articulaciones incrementa a medida que que continua el movimiento, Figura 1.4.

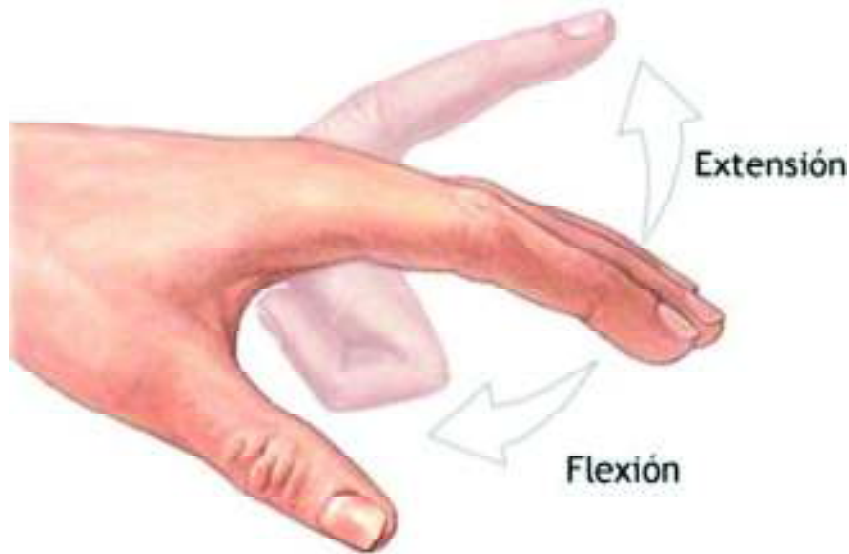


Figura 1.4. Flexión-Extensión de los dedos.  
Movimiento de apertura y cierre de los dedos.  
(Fuente: (DrTango, 2016))

En la Tabla 1.3. se enlistan los rangos de movimientos encontrados en diferentes trabajos de investigación para cada una de las articulaciones de los dedos trifalángicos. Estos rangos de movimiento son tomados desde el ángulo 0 o posición neutral de la mano. La diferencia de valores se da debido a que se utilizaron diferentes técnicas para la medición de los rangos de movimientos. Nordin, M. et al., (2004) recopiló los antecedentes descritos de diferentes trabajos realizados mediante el cálculo y grabación de los movimientos de la mano, sin embargo, no presenta una técnica específica utilizada, entre las cuales hace referencia a la radiografía y goniometría. Coupier et al., (2016) obtuvo los ángulos presentes mediante la técnica de Captura de Movimiento, por ello, difiere de los rangos articulares obtenidos por Nordin. Degeorges et al., (2005) utiliza la misma técnica que Coupier, sin embargo, al utilizar una diferente disposición de marcadores, cambia la forma de realizar el tratamiento de datos y los resultados llegan a variar. Mediante un goniómetro digital, Mallon et al., (1991) calculó los rangos de movimiento que se observan en la Tabla 1.3. Como se puede apreciar, todos los datos son diferentes, sin embargo, se mantienen cercanos.

Tabla 1.1. Comparación de rangos de movimiento presentes en diferentes publicaciones.

Dedos trifalángicos	Flexión/Extensión (°)		
	MCF	IFP	IFD
(Nordin, M. et al., 2004)	90	110	90
(Coupier et al., 2016)	72-83	91-114	64-87
(Degeorges et al., 2005)	78-118	72-119	6-66
(Mallon et al., 1991)	101-128	108-117	66-84

(Fuente: Propia)

## b) Oposición del dedo pulgar

La oposición del dedo pulgar es un movimiento especial del cuerpo, en el cual se combinan varios movimientos, en especial los movimientos de flexo-extensión y aducción-abducción en la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar. En este movimiento el pulgar realiza su trayectoria desde su posición natural hasta llegar a tocar el pulpejo de alguno de los dedos trifalángicos, Figura 1.5 (Nordin, M. et al., 2004).

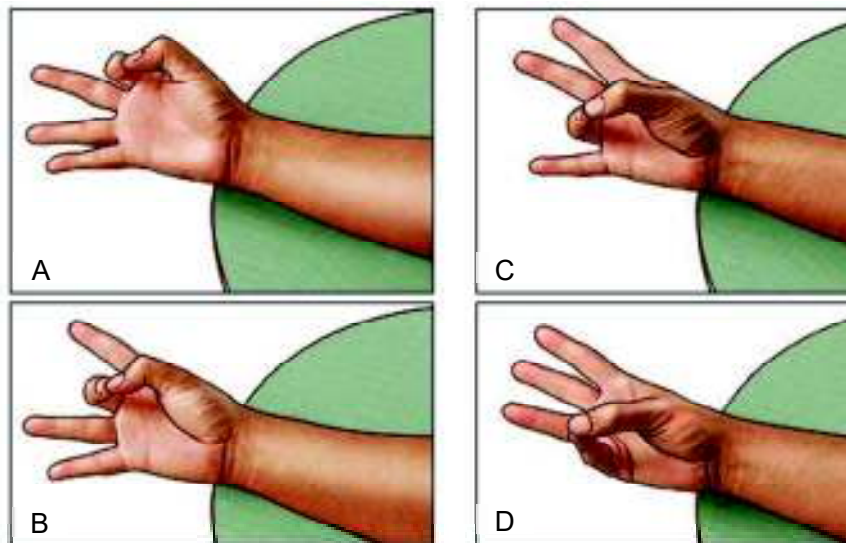


Figura 1.5. Oposición del dedo pulgar.

Unión de pulpejos del pulgar y otro dedo a oponerse.

- A) Oposición pulgar-índice. B) Oposición pulgar-medio. C) Oposición pulgar-medio. D) Oposición pulgar-anular.

(Fuente: (Healthwise, 2017))

Este tipo de movimientos tiene diferentes características, como se observan en la Figura 1.6: Cuando los dos pulpejos se tocan entre sí se trata de una pinza terminal, esta pinza se caracteriza por realizarla con el mayor rango de movimiento, Figura 1.6 A; cuando tienen un contacto superficial mayor que en la pinza terminal se trata de una pinza subterminal, en la cual tiene un mayor agarre pero menor fuerza, Figura 1.6 B; cuando el pulpejo del dedo pulgar se apoya en la cara lateral de la segunda falange del dedo índice se trata de una pinza lateral, su principal característica es que adquiere una mayor fuerza con un movimiento menos fino, Figura 1.6 C. Estas son las 3 principales pinzas que se realizan de

oposición, sin embargo, para el presente trabajo se estudió la oposición de pinza terminal al ser la pinza más fina de realizar.



Figura 1.6. Tipos de oposición del dedo pulgar.

A. Unión entre pulpejos – B. Mayor contacto superficial – C. Unión entre pulpejo y cara lateral.

Fuente: (Nordin, M. et al., 2004)

### 1.3. Técnicas de análisis cinemático el cuerpo humano

#### 1.3.1. Análisis de movimiento mediante rayos-X

Esta técnica utiliza el rastreo de movimiento (tracking) de objetos mediante cámaras de alta velocidad que captan las imágenes tomadas mediante un emisor de rayos-X y un intensificador de imágenes, Figura 1.7. Este método puede capturar el movimiento en un solo plano con una mayor precisión que otros métodos, sin embargo, para movimientos combinados en tres dimensiones no se logra mantener la captura de todos los movimientos, además de estar expuesto a la radiación del emisor (Nowroozi y Brainerd, 2013).

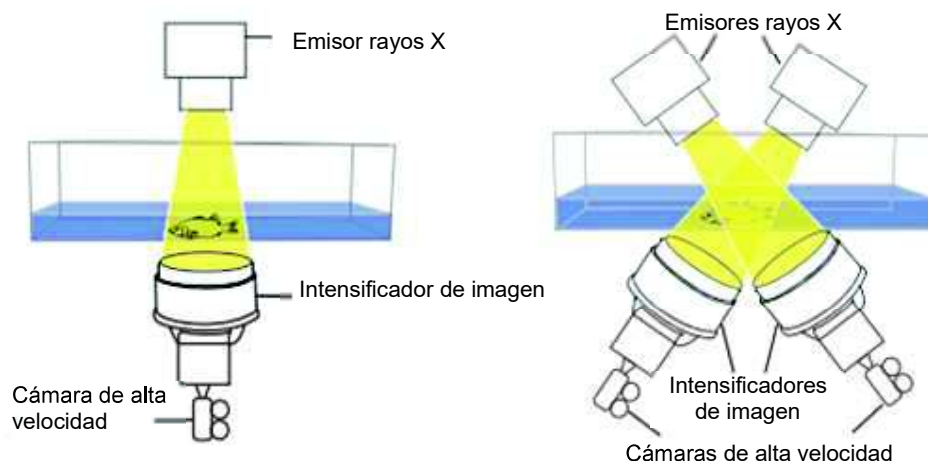


Figura 1.7. Técnica de análisis de movimiento mediante rayos-X.  
Movimiento captado por cámaras de alta velocidad y un emisor de rayos X.  
(Fuente: (Nowroozi y Brainerd, 2013))



### 1.3.2. Análisis de movimiento mediante imágenes por resonancia magnética

Esta técnica utiliza un equipo de resonancia magnética y goniómetros ubicados en el equipo para realizar el análisis del movimiento, Figura 1.8; Sin embargo, se limita al análisis de datos en un solo plano, por lo que no se puede observar los movimientos combinados en tres dimensiones (Nakamura et al. , 1999).

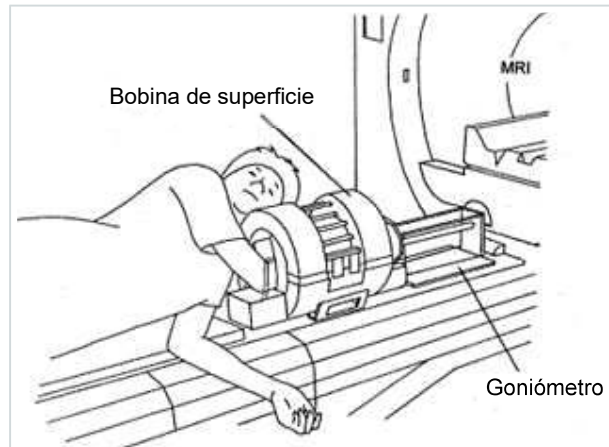


Figura 1.8. Técnica de análisis de movimiento mediante imágenes por resonancia magnética. Sujeto ingresa en equipo de resonancia magnética y se calcula el movimiento realizado. (Fuente: (Nakamura et al., 1999))

### 1.3.3. Análisis de movimiento mediante goniometría

La goniometría se caracteriza por el cálculo de los ángulos formados en las articulaciones que se desea estudiar mediante un goniómetro ubicado en esa articulación, Figura 1.9. La ventaja respecto a los demás métodos es la visualización en directo que se puede obtener, sin embargo, para movimientos combinados como es el gesto motriz de oposición del dedo pulgar se dificulta su cálculo debido a que solo obtiene resultados en un plano (Carter et al., 2009).

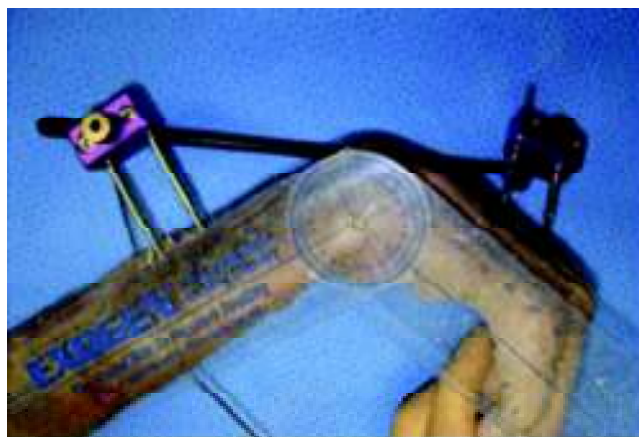


Figura 1.9. Técnica de análisis de movimiento mediante goniometría. Objeto de medición de ángulos formados en un vértice o junta. (Fuente:(Carter et al., 2009))

### 1.3.4. Análisis de movimiento mediante video análisis

El video análisis es una técnica utilizada recientemente en la que su funcionamiento es similar a la captura de movimiento por la técnica de fotogrametría, en la cual, se utiliza cámaras de alta precisión para el estudio cinemático del cuerpo Figura 1.10. La ventaja principal de este método es el bajo costo que se tiene en comparación a la captura de movimiento, además de obtener valores similares (Zagal, 2017). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que al ser poco desarrollada únicamente se utiliza para realizar cálculos en dos dimensiones.

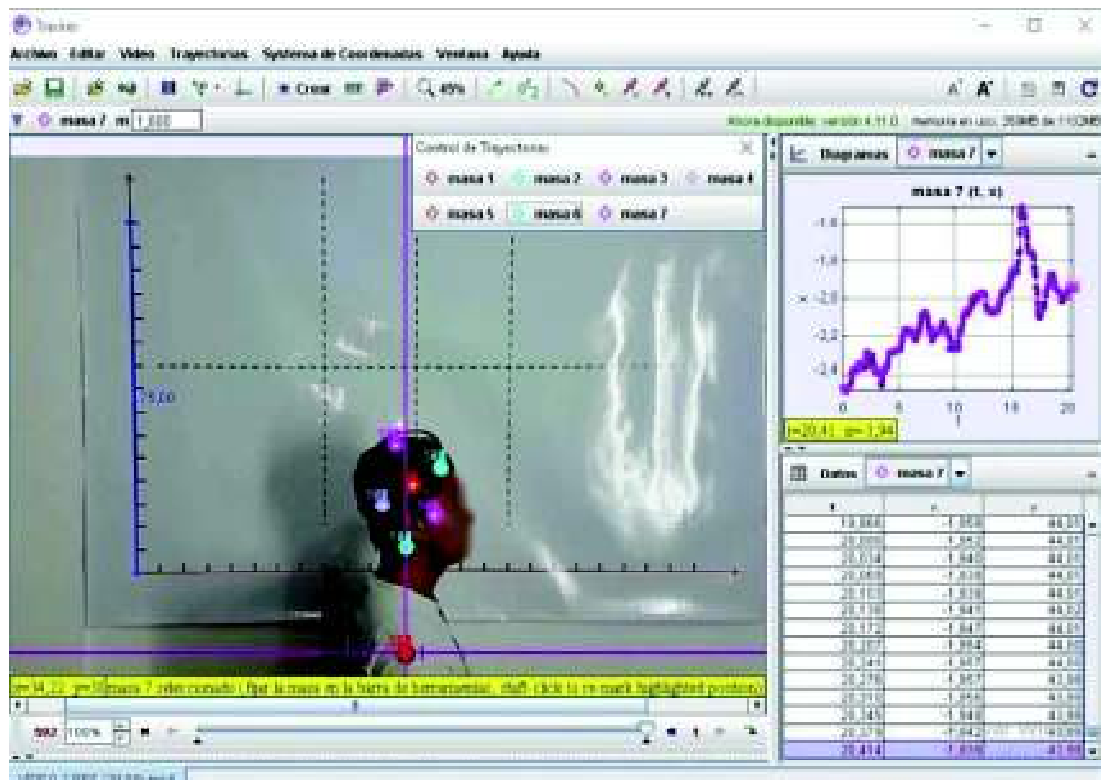


Figura 1.10. Software de video-análisis Tracker.  
Movimientos de objetos capturados en vídeo por cámaras de alta precisión.  
(Fuente: (Ruiz, 2018))

### 1.3.5. Análisis de movimiento mediante fotogrametría (MOCAP)

El análisis del cuerpo humano mediante herramientas computacionales se ha ido incrementando con el crecimiento de la tecnología. La técnica conocida como captura de movimiento humano (fotogrametría) se define como el procesos de capturar a gran escala los movimientos del cuerpo de un sujeto con alta resolución (Moeslund y Granum, 2001). Los sistemas de fotogrametría utilizan cámaras de alta precisión que localizan el posicionamiento de marcadores reflectivos que pueden ser pasivos o activos, una vez localizada su ubicación, esta información es procesada mediante herramientas

computacionales como “BTS Smart” basado en bibliotecas de Matlab. La Figura 1.11 contiene los elementos utilizados en un sistema para captura de movimiento (*MOCAP*). La precisión de esta técnica dependerá de: El número de cámaras utilizadas, ya que al tener un mayor número de cámaras utilizadas aumenta el área de captura de movimiento que se puede obtener, el número de marcadores utilizados, ya que al tener un mayor número de marcadores puede interferir en el objeto evaluado y causar fenómenos de oclusión; y el área de trabajo, ya que al aumentar la distancia de las cámaras hacia el objeto evaluado, las cámaras no logran apreciar la distancia a la que se encuentra el objeto.

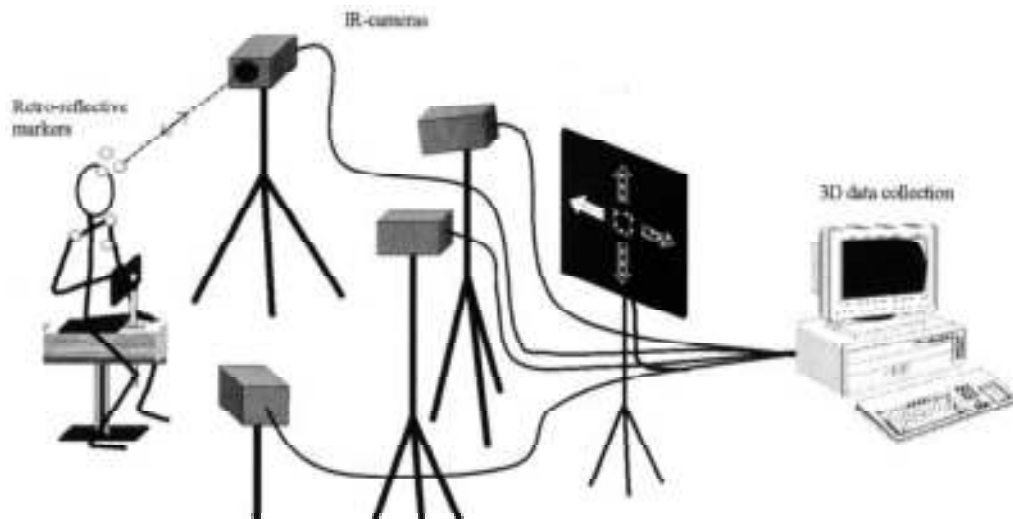


Figura 1.11. Sistema de captura de movimiento *MOCAP*.  
Movimiento de marcadores reflectivos capturados por equipo de fotogrametría.  
(Fuente: (Öhberg et al., 2003))

Existen otros sistemas de captura de movimiento que se basan en sensores inerciales (giroscopios) que recolectan información del sensor y lo llevan a herramientas computacionales Figura 1.12. Estos sistemas no necesitan de cámaras y son fáciles de transportar, sin embargo, los sistemas con marcadores reflectivos resaltan por su mayor realismo en los movimientos capturados, además, los sistemas inerciales son más invasivos ya que ocupan un mayor espacio que los marcadores pasivos o activos (Kitagawa y Windsor, 2008).

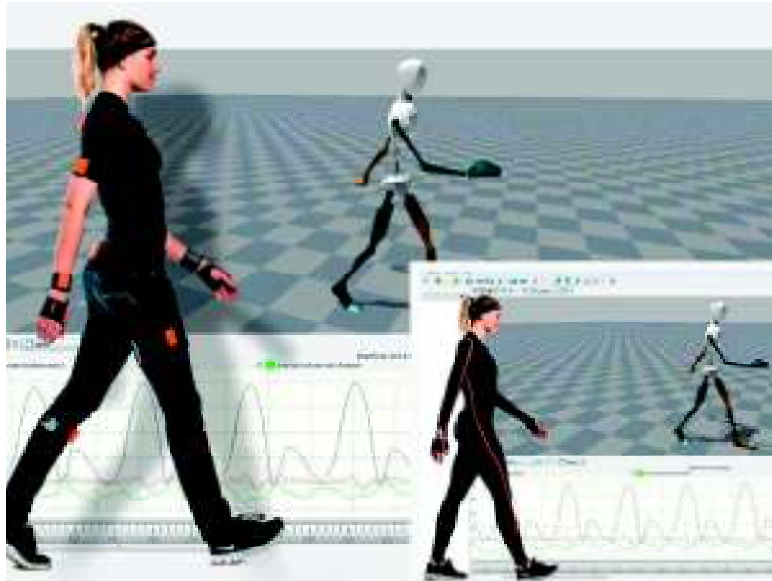


Figura 1.12. Sistema inercial para captura de movimiento. Movimientos de sensores inerciales ubicados en puntos estratégicos que captan el movimiento del sujeto.

(Fuente: (BiomechSolutions, 2016))

Moeslund y Granum, expone una estructura para el análisis del movimiento humano mediante la captura de movimiento, Figura 1.13. Este algoritmo sirve para cualquier tipo de análisis que se realice, ya sea cinemático, cinético o dinámico (Moeslund y Granum, 2001). En la inicialización se cubren todas las acciones necesarias para que el sistema comience a trabajar como es la preparación del participante, calibración del sistema y la inicialización del programa. En la fase de *Traking* se realizan trabajos de preparación de los datos recolectados para su posterior reconocimiento ya que se solventan los problemas que se puede llegar a obtener debido a una mala calidad de captura de movimiento. En la fase de estimación del gesto motriz se realizan todas las actividades para conocer cómo se mueve el cuerpo que se estudia, como el cálculo de su orientación, espesor, posición, entre otros. Finalmente, en la fase de reconocimiento se evalúan los datos obtenidos en la fase de estimación del gesto motriz, reconociendo los tipos de movimiento, como puede ser el caminar o correr. El análisis de captura de movimiento mediante fotogrametría se utilizan dos tipos de marcadores: pasivos y activos (Bravo et al., 2016).

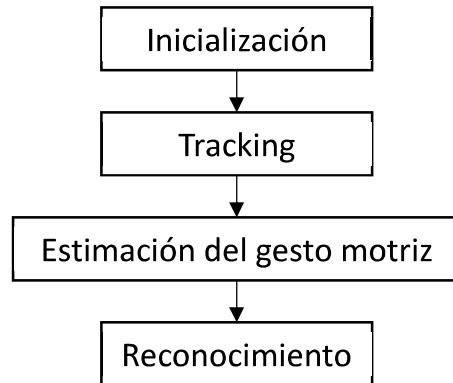


Figura 1.13. Estructura general para análisis de sistemas de movimiento del cuerpo humano.  
(Fuente: (Moeslund y Granum, 2001))

### a) Marcadores pasivos

En los sistemas de captura de movimiento los marcadores pasivos son colocados en los puntos de interés para el previo estudio, Figura 1.14. La luz proveniente de las cámaras optoelectrónicas refleja en los marcadores pasivos, detectando su posición gracias a su material reflectante. La desventaja de estos marcadores respecto a los activos se da a causa de que al momento de perder visión de las cámaras hacia los marcadores debido a otras partes del cuerpo del sujeto y las cámaras tienden a confundirse por lo que se pierde claridad en la captura de movimiento, este fenómeno es conocido como oclusión (Bravo et al., 2016). Sin embargo, se puede obtener una mayor gama de gestos motrices que con marcadores pasivos sería más complejo debido al tamaño de los marcadores pasivos y sus cables, ya que los marcadores pasivos son de varios diámetros.



Figura 1.14. Marcadores pasivos para la captura de movimiento.  
Marcadores de superficie reflectiva ubicados en sujeto de estudio.  
(Fuente: (Diaz et al., 2009))

## b) Marcadores activos

En los sistemas de captura de movimiento con marcadores activos se utilizan diodos de emisión de luz LED, Figura 1.15. Una vez que emiten su luz, son captados por sistemas ópticos que triangulan su posición. A diferencia de los marcadores pasivos, estos cuentan con su propia luz y pueden sincronizar su posición mediante conexiones Wireless que beneficia en el tratamiento de datos (*tracking*) ya que no se genera el fenómeno de oclusión (Field et al., 2009).



Figura 1.15. Marcadores activos para captura de movimiento.  
Marcadores electrónicos ubicados en el sujeto de estudio.  
(Fuente: (Northern Digital Inc., 2018))

## c) Disposición de marcadores

Puesto que existen movimientos que son combinaciones de ejercicios de flexión/extensión y aducción/abducción, además de poder ubicar un mayor número de marcadores se utiliza la técnica de análisis de movimiento mediante fotogrametría a partir de marcadores pasivos. Esta técnica enfocada en la mano tiene 4 disposiciones para la ubicación de los marcadores (Lee y Jung, 2015):

- 1) Un marcador ubicado en cada falange y metacarpiano (sin embargo, es posicionado en cada articulación), Figura 1.16a.
- 2) Dos marcadores utilizados ubicados en los extremos de cada falange, Figura 1.16b.
- 3) Tres marcadores colocados de forma triangular para formar sistemas de coordenadas, Figura 1.16c.
- 4) Cluster o conjunto de cuatro marcadores, de la misma manera que los tres marcadores, el cluster forma sistemas de coordenadas, Figura 1.16d.

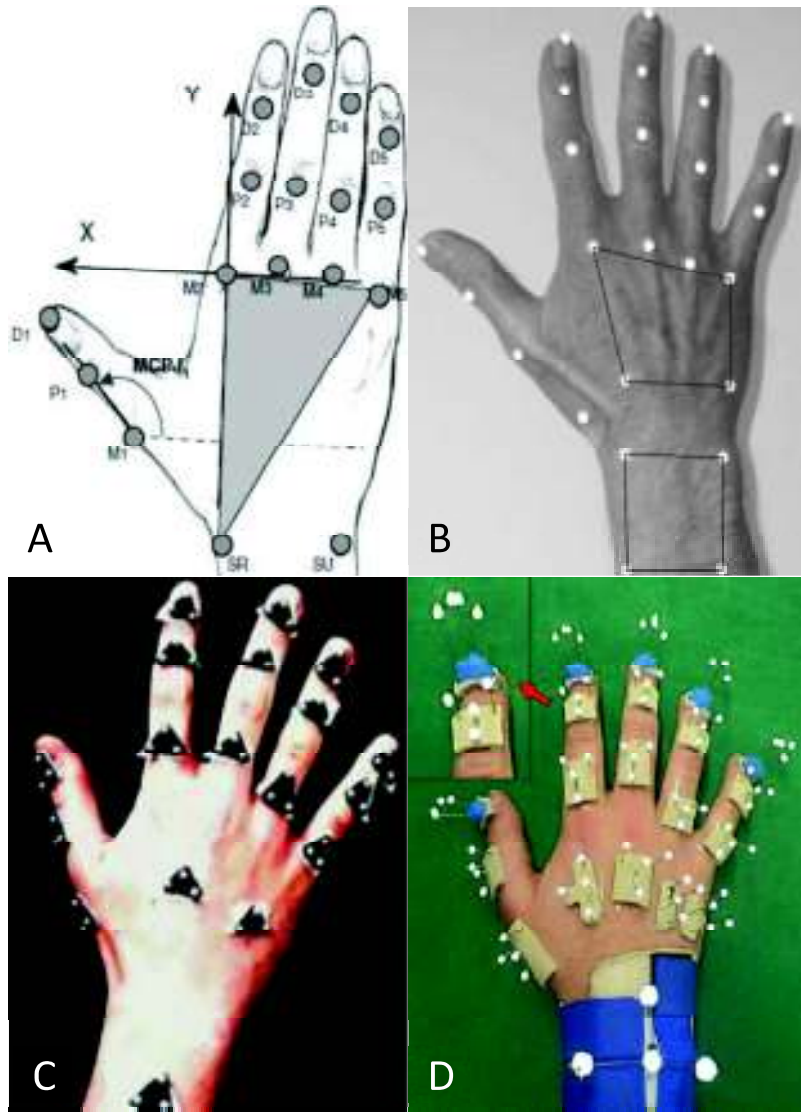


Figura 1.16. Disposición de marcadores pasivos para la captura de movimiento. A.- 1 marcador para cada articulación. B. – 2 marcadores por cada falange. C. – 3 marcadores por cada falange. D. – Cluster para cada falange.

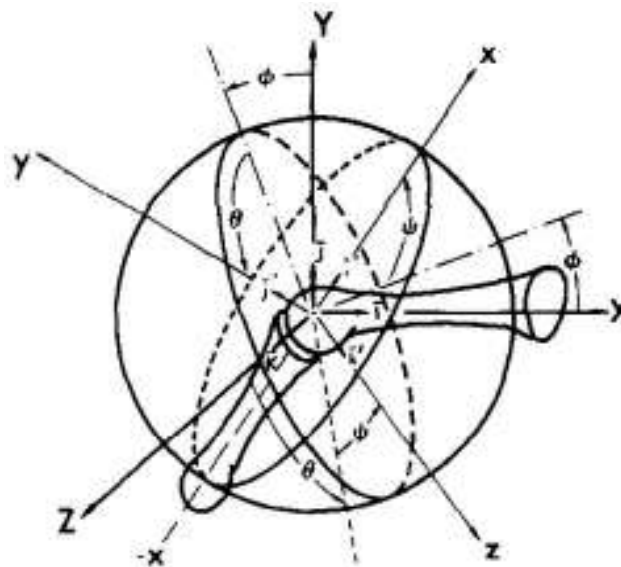
(Fuentes: A (Carpinella et al., 2011), B (Metcalf et al., 2008), C (Vignais y Keir, 2013), D (Couplier et al., 2016))

Para el cálculo de los rangos de movimiento en las articulaciones de la mano, las disposiciones A y B de la Figura 1.16 utilizan métodos para el cálculo de ángulos generados por vectores unitarios dados por los marcadores, mientras que, las disposiciones C y D de la Figura 1.17 utilizan métodos para el cálculo de ángulos generados entre sistemas de coordenadas móviles y sistemas de coordenadas fijos. La diferencia entre estos dos métodos es que, en el caso de los ángulos de Euler se puede calcular la flexión/extensión, aducción/abducción y pronación/supinación de los dedos, mientras que para las disposiciones A y B no se puede calcular la pronación/supinación de los dedos.

## 1.4. Métodos para el cálculo de rangos de movimiento de las articulaciones de los dedos

### 1.4.1. Ángulos de Euler

Los ángulos de Euler son el conjunto de 3 ángulos que representan la orientación que toma un sistema de 3 ejes ortogonales de coordenadas móvil (x, y, z) respecto a otro sistema de 3 ejes ortogonales de coordenadas fijo (X, Y, Z), Figura 1.17. El uso de estos ángulos en biomecánica se presenta como una ventaja para conocer los movimientos de flexión/extensión ( $\Phi$ ), aducción/abducción ( $\Theta$ ) y rotación axial (pronación/supinación) ( $\Psi$ ) (Chao et al., 1976).



X, Y, Z ( $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ ): sistema fijo  
 x, y, z ( $\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$ ): sistema móvil  
 $\Phi$ : flexión-extensión  
 $\Theta$ : abducción-aducción  
 $\Psi$ : rotación axial

Figura 1.17. Ángulos de Euler utilizados para definir los rangos de movimiento de las articulaciones.  
 (Fuente: (Chao et al., 1976))

Para calcular los 3 ángulos de Euler se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \Theta &= \sin^{-1}(\vec{j} \cdot \vec{k}') \\ \Phi &= \cos^{-1}\{(\vec{j} \cdot \vec{j}') / \cos \Theta\} \\ \Psi &= \sin^{-1}\{(\vec{i} \cdot \vec{k}') / \cos \Theta\} \end{aligned} \quad (1)$$



Donde:

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  = vectores unitarios del sistema de coordenadas fijo, y

$\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$  = vectores unitarios del sistema de coordenadas móvil

### 1.4.2. Modelo de Cheng y Pearcy

Cheng y Pearcy, (1999) propuso un modelo para el cálculo de la rotación de juntas tridimensionales, en el cual, hace una notación en la que la flexión/extensión tiene relación con la abducción/aducción que tienes las articulaciones. Para resolver este problema, los autores deciden proyectar hacia el plano frontal el vector unitario para el cálculo del ángulo de flexión/extensión y con rotación respecto al eje Z, mientras que, se proyecta hacia el plano sagital el vector unitario para el cálculo del ángulo de abducción/aducción, Figura 1.18.

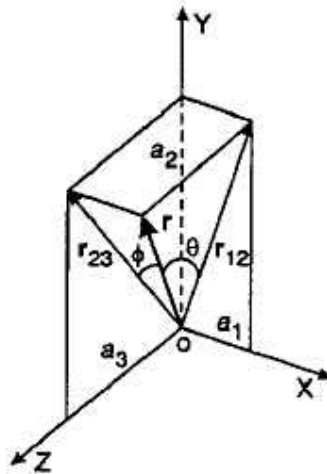


Figura 1.18. Modelo de cálculo de ángulos de flexión/extensión y aducción/abducción.  
(Cheng y Pearcy, 1999)

El vector unitario es representado con la letra  $r$ , mientras que sus componentes con las letras  $a_1, a_2$  y  $a_3$ . Las proyecciones del vector son: Para el plano sagital XY  $r_{23}$  y en el plano frontal YZ  $r_{12}$ . El ángulo que representa la flexión/extensión se denota con el signo  $\Phi$ , mientras que, el ángulo que representa la abducción/aducción se denota con el signo  $\theta$ . Para el cálculo de los dos ángulos se utiliza las ecuaciones 2 y 3 (Cheng y Pearcy, 1999).

$$\Phi = \arccos \sqrt{1 - a_1^2} \quad 0 \leq \Phi \leq \pi \quad (2)$$

$$\theta = \arccos \sqrt{1 - a_3^2} \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (3)$$

## 2. METODOLOGÍA

La metodología de medición pasó por un proceso de aprobación de protocolo de estudios previo avalado por el Comité de Ética de la Universidad Católica del Ecuador, en el cual, se garantiza que todos los procesos se realizarán con seguridad para el participante y se respetarán los datos personales de los mismos (Código 2018-29-EO Anexo X). Todo el proceso revisado por el comité de ética se detalla en el diseño de la metodología, en donde se incluye la muestra utilizada en la toma de datos.

### 2.1. Diseño de la metodología

Manterola y Otzen, (2014) indican que, el diseño de un estudio puede ser una de las etapas más complicadas para cualquier proceso de investigación. El decidir entre un estudio observacional o experimental representa una de las principales complicaciones, lo que le ha llevado a analizar cada tipo de estudio.

El presente trabajo, al no modificar o alterar ningún tipo de variable que se requiere analizar, no se evalúa como un estudio experimental, al contrario, es un estudio observacional. Por lo tanto, se pretende evaluar con qué características cumple este trabajo con referencia en la Tabla 2.1.

Con base en los criterios mencionados en la Tabla 2.1, se seleccionó como metodología de investigación al estudio observacional de corte transversal, ya que las muestras que se toman no son alterables con el tiempo, se realiza un control en los participantes para el presente estudio y pueden servir como punto de partida para estudios posteriores.

Tabla 2.1. Fortalezas y debilidades de los distintos tipos de EO analizados.

<b>Tipo de estudio</b>	<b>Utilidad</b>	<b>Limitaciones</b>
Reporte y serie de casos	<ul style="list-style-type: none"><li>- Descripción de un cuadro clínico.</li><li>- Conocimiento de la historia natural de enfermedades o EI.</li><li>- Descripción de enfermedades o EI raros.</li><li>- Descripción de manifestaciones inusuales.</li><li>- Vigilancia epidemiológica.</li><li>- Formulación de hipótesis de posibles factores de riesgo (no probarlas).</li><li>- Obtención de frecuencias.</li><li>- Reporte del inicio o presencia de una epidemia o emergencia de nuevas enfermedades.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Subjetividad personal (generación de sesgos de medición y reporte).</li><li>- No permiten comparaciones.</li><li>- Representan experiencia limitada a un investigador.</li><li>- La presencia de un factor de riesgo puede ser solo azar.</li><li>- No representan evidencia sólida para alterar la práctica clínica.</li><li>- No permiten describir con exactitud cuadro clínico ni historia natural de una enfermedad o EI.</li></ul>

(Fuente: Manterola y Otzen, 2014)

Tabla 2.2. Continuación de fortalezas y debilidades de los distintos tipos de EO analizados.

<b>Tipo de estudio</b>	<b>Utilidad</b>	<b>Limitaciones</b>
Estudios de corte transversal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proveen evidencia de asociación estadística válidas para variables inalterables en el tiempo (sexo, raza o grupo sanguíneo).</li> <li>- Hay control en la selección de los sujetos y las mediciones.</li> <li>- No hay espera para el desarrollo del EI.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No establecen secuencia acontecimientos (exposición – enfermedad o EI).</li> <li>- No útiles para estudiar enfermedades o EI raros.</li> <li>- No permiten establecer relación causal.</li> <li>- No permiten establecer incidencia ni riesgo relativo.</li> </ul>
Estudios de corte transversal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permiten estudiar diferentes desenlaces.</li> <li>- No existen pérdidas de seguimiento.</li> <li>- Son rápidos y económicos.</li> <li>- Constituyen el primer paso para estudios posteriores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presentan potenciales sesgos (selección de la muestra y de recuerdo).</li> </ul>
Estudios poblacionales y correlacionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permiten comparar frecuencias de enfermedad o EI entre diferentes grupos durante un mismo período de tiempo, o en una misma población en diferentes períodos de tiempo. Permiten formular hipótesis.</li> <li>- Son rápidos y económicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No permiten asociar exposición – enfermedad o EI.</li> <li>- No se puede controlar efecto de potenciales confundentes.</li> <li>- Una falta de correlación puede no significar una falta de asociación entre la exposición y el EI en estudio.</li> </ul>
Estudios de casos y controles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ideales para el estudio de enfermedades o EI raros o poco frecuentes.</li> <li>- Relativamente económicos.</li> <li>- Son de corta duración.</li> <li>- Aportan información descriptiva.</li> <li>- Permiten generar hipótesis de investigación y estudiar fuerza de asociación entre una enfermedad o EI y él o los factores de exposición en estudio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitados a una variable desenlace.</li> <li>- No permiten establecer secuencia de acontecimientos (los casos ya están enfermos).</li> <li>- Presentan potenciales sesgos (selección de la muestra y medición).</li> <li>- No permiten determinar prevalencia ni incidencia.</li> </ul>
Estudios de cohorte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ideales para evaluar incidencia e historia natural de una EI.</li> <li>- Permiten indicar causalidad (debido a que, al inicio del seguimiento, todos los sujetos están libres del EI en estudio).</li> <li>- De gran utilidad para estudiar enfermedades con resultados letales.</li> <li>- Adecuados para evaluar efectos de exposiciones raras.</li> <li>- Permiten estudiar distintas variables de resultado de forma simultánea.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son caros.</li> <li>- Requieren periodo de seguimiento (su mayor limitación es la pérdida de seguimiento de los integrantes de las cohortes).</li> <li>- No son útiles para estudiar enfermedades o EI raros.</li> <li>- Resultados pueden afectarse por factores confundentes.</li> <li>- Son susceptibles de sesgos (de selección, de mal clasificación y de seguimiento [la pérdida de 20% de las cohortes afecta la validez de los resultados]).</li> </ul>

(Fuente: Manterola y Otzen, 2014)

## 2.2. Procedimiento general para la adquisición del movimiento

Moeslund y Granum, exponen una estructura para el análisis del movimiento humano mediante la captura de movimiento. Se tomó como referencia esta estructura para generar un algoritmo que sirva como un proceso general del presente trabajo, Figura 2.1.



Figura 2.1. Estructura general para el análisis de movimiento MOCAP.  
(Fuente: Propia)

En la fase de inicialización, Figura 2.2, se cubren todas las acciones que se necesita realizar para que la operación de captura de movimiento se realice adecuadamente. Por ello, se debe realizar un calibrado del sistema para conseguir que las cámaras capten los marcadores con el menor error posible, los datos de calibración se presentan en la Tabla I.1 del Anexo I. Posteriormente, ingresa el participante y se procede a explicar los movimientos que se explicarán en el protocolo de adquisición de datos, Anexo III. Una vez explicados los movimientos, el participante firmó un documento de consentimiento informado donde se detalla que se puede cancelar el proceso en el momento que se desee y se asegura que sus datos personales serán confidenciales. Finalmente, se preparó al participante colocando los marcadores y se procedió a realizar la captura de movimiento.

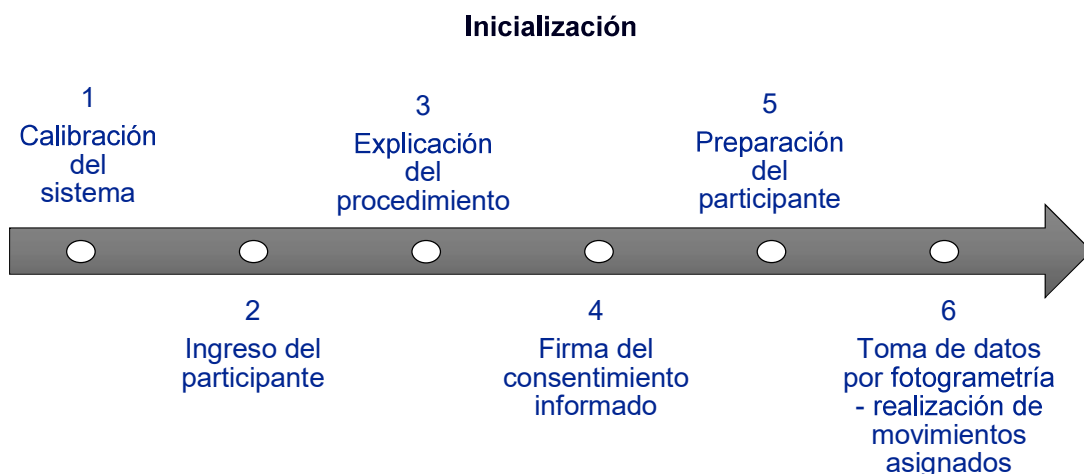


Figura 2.2. Fase de inicialización de la captura de movimiento.  
(Fuente: Propia)

La Figura 2.3 es un diagrama de flujo que hace alusión al rastreo de los marcadores. En la fase de "Tracking" o rastreo en la captura de movimiento realizaron los procesos que se necesitan previo a la estimación de los rangos de movimiento en las articulaciones de los

gestos motrices estudiados como lo son la creación un modelo de conectividad, implantación de modelo de conectividad y tratamiento de datos. Todos estos procesos serán revisados en el Anexo II.

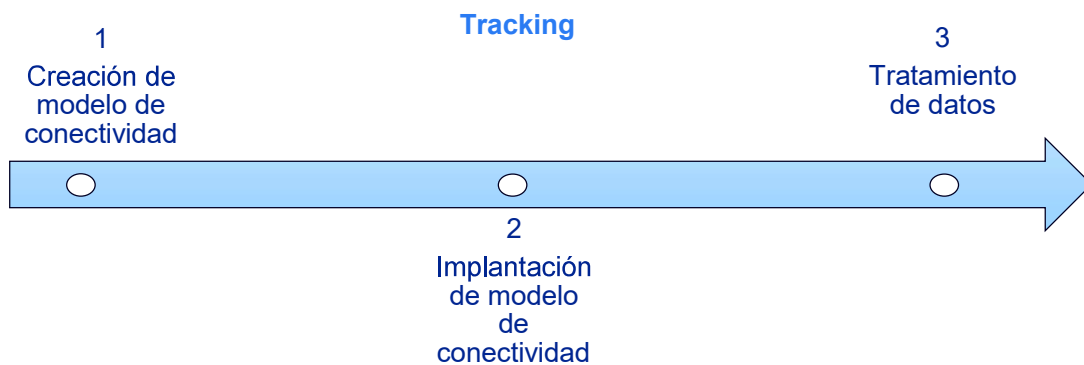


Figura 2.3. Fase de tracking de la captura de movimiento.  
(Fuente: Propia)

Una vez finalizada la fase de “Tracking” se comienza la siguiente fase de estimación del gesto motriz. En esta fase se identificó como están relacionados los huesos de la mano y su configuración en cada movimiento. Por lo tanto, para precisar la información requerida se comenzó con la interpolación de los datos iniciales, el suavizado de sus movimientos, orientación de los marcadores y sus vectores generados, entre otros. Los puntos principales se aprecian en la Figura 2.4; Sin embargo, el proceso total se describe en el Anexo II.

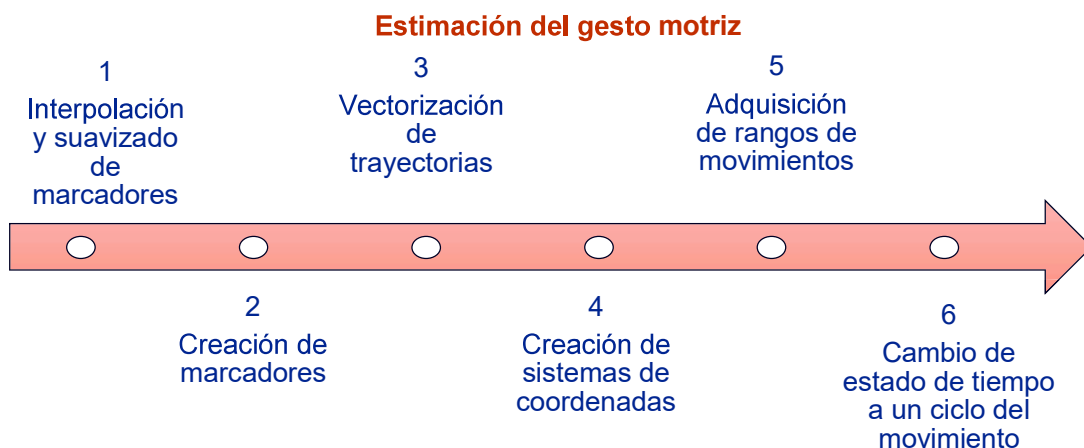


Figura 2.4. Fase de estimación del gesto motriz en la captura de movimiento.  
(Fuente: Propia)

Una vez termina esta fase se continuó con la fase de pruebas y resultados, Figura 2.5. En esta fase se realizan los procesos finales para obtener los resultados, en el cual, se realiza

la obtención media de los rangos de movimiento, media y desviación estándar del total de participantes. Estos resultados son implementados en un modelo virtual, como se observa en el Anexo VI.

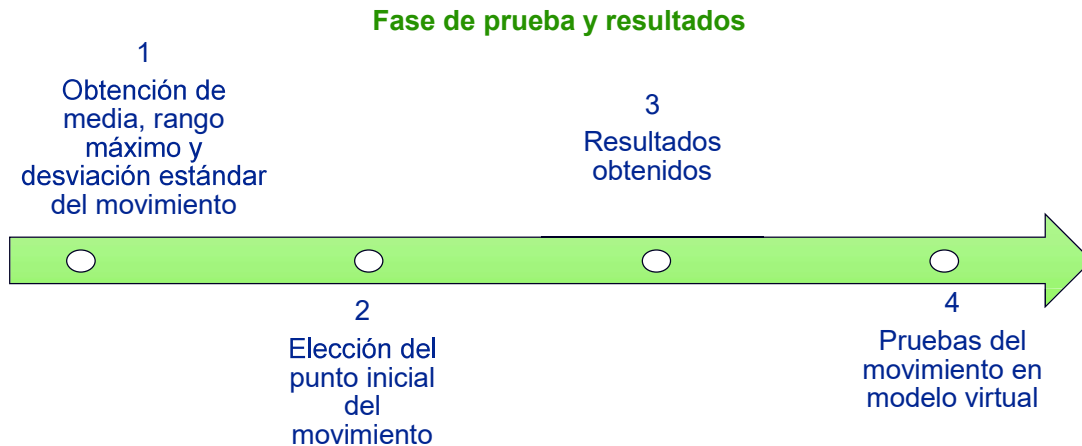


Figura 2.5. Fase de prueba y resultados en la captura de movimiento.  
(Fuente: Propia)

### 2.3. Muestreo

Mejía, Julio (2000) enfatiza que, el muestreo por conveniencia puede ser utilizado para definir hipótesis, establecer nuevas características a la investigación y servir como punto de partida en líneas de investigación. Otzen y Manterola, (2017) relatan las ventajas de utilizar este tipo de muestreo no probabilístico, en el que se tiene mayor accesibilidad y proximidad al tipo de muestra que uno desee estudiar.

Por lo tanto, la presente investigación, al ser una de las primeras enfocadas en utilizar técnicas como la fotogrametría en el Ecuador, se decidió utilizar un muestreo no probabilístico como lo es el muestreo por conveniencia, en el cual, se tomó una muestra de 9 personas (5 hombres y 4 mujeres) para estudiar el movimiento cinemático de la mano para los diferentes ejercicios a realizar, Figura 2.6. Las personas que participaron en este estudio no debían tener ningún tipo de problema neuronal o físico, además, debían ser personas en un rango de edad de 18 a 30 años (media 24 años). Para establecer su participación voluntaria, posterior a la toma de datos, firmaron un documento de consentimiento informado, en el que consta todos los detalles de cómo se utilizarán sus datos y los derechos que tiene la persona. Estos datos para la muestra, adquiridos de cada una de las personas, se los obtuvo a partir de un protocolo de pruebas. El participante sigue este procedimiento hasta la culminación de la adquisición.



Figura 2.6. Toma de datos de los movimientos realizados por el participante en laboratorio de MOCAP.  
(Fuente: Propia)

## 2.4. Determinación del protocolo de pruebas para adquisición de datos

El protocolo de pruebas para adquisición de datos se basa en los procedimientos que se siguen en el equipo BTS Bioengineering, en el cual, se tienen varios protocolos de pruebas para facilitar la adquisición de datos, como se observa en la Tabla 2.3. En este protocolo se especifica los equipos requeridos para las pruebas, la preparación del participante y los ejercicios motrices que va a realizar el participante.

Tabla 2.3. Protocolos BTS Bioengineering.


Protocolos	Aplicaciones	Referencia
Davis	Análisis multifactorial de la marcha	(Davis, Ounpuu, Tyburski, y Gage, 1991)
Helen Hayes (Conventional Gait Model)	Análisis multifactorial de la marcha en el suelo y en la caminadora	(Kadaba et al., 1989)
Oxford Foot Model	Análisis biomecánico de los pies en la marcha	(Stebbins, Harrington, Thompson, Zavatsky, y Theologis, 2006)
SHCG Foot Model	Análisis multisegmental de la marcha con enfoque en el pie	(Kadaba et al., 1989)
Upper Limb (Modified Rab)	Análisis funcional de los movimientos de las extremidades superiores	-
Cervical Spine Mobility	Evaluación Funcional de la Movilidad Cervical	-
Digivec	Análisis de las fuerzas de reacción al suelo	-

(Fuente : BTS Bioengineering, 2018)

### 2.4.1. Equipos requeridos

La investigación requirió el uso del equipo BTS SMART-DX con un mínimo de 6 cámaras para el análisis cinemático. Además, se utilizó marcadores reflectivos pasivos que sirven para la detección de los movimientos a realizar, los marcadores fueron colocados con cinta hipoalérgica. Todos los instrumentos utilizados se observan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Instrumentación del laboratorio.

Instrumento	Imagen
6 cámaras optoelectrónicas	
3 cámaras de video	
Marcadores reflectivos de varios diámetros	
Cinta doble faz hipoalérgica	

(Fuente: Propia)

### 2.4.2. Información al participante

El protocolo de la toma de datos se inició con la “información al participante”, dentro del cual se siguieron los siguientes pasos:

1. Se proporcionó información sobre los objetivos que se pretende alcanzar mediante la adquisición de datos, la importancia de los trabajos de investigación, número de



sesiones a realizar, el procedimiento que se seguirá, el compromiso entre el participante y el investigador.

2. Se realizó un cuestionario para saber si el participante se encuentra en las condiciones adecuadas para realizar los procedimientos requeridos, Anexo V. En esta encuesta también se incluyen algunos datos importantes (edad, género).
3. Una vez que se verificó mediante el cuestionario que el participante puede realizar los procedimientos requeridos, se procede a hacer firmar al participante un consentimiento informado, Anexo IV. El consentimiento informado proporcionó al participante información sobre sus derechos y expresa la decisión voluntaria de participar en el estudio.

### **2.4.3. Preparación del sujeto**

Para cada uno de los ejercicios que se van a realizar se ubicaron marcadores reflectivos pasivos en la mano del participante con cinta hipoalérgica siguiendo el sistema utilizado por la Sociedad Internacional de Biomecánica, los puntos fueron ubicados acorde con los siguientes ejercicios:

Para el ejercicio de flexión-extensión de los dedos trifalángicos se utilizó dos configuraciones de ubicación:

a) En la primera configuración se utilizaron 12 marcadores: 4 marcadores en una base a 3 cm de la muñeca, Figura 2.7A; 4 marcadores en el dedo índice, 3 de los 4 marcadores ubicados en el medio de cada falange y el restante 3 cm atrás de la junta metacarpofalángica, en el hueso metacarpiano del índice; y los siguientes 4 marcadores se ubican de la misma forma que los 4 marcadores ubicados en el dedo índice pero aplicados al dedo anular.

b) En la segunda configuración se utilizó 12 marcadores, ubicados en la misma distribución, pero para los dedos medio y meñique, Figura 2.7B.

Para el ejercicio de oposición del dedo pulgar se utilizó dos configuraciones de ubicación:

a) En la primera configuración se utilizaron 15 marcadores: 4 marcadores en una base a 3 cm de la muñeca, Figura 2.8A; 4 marcadores en el dedo índice, 3 de los 4 marcadores ubicados en el medio de cada falange y el restante se ubica 3 cm atrás de la junta metacarpofalángica, en el hueso metacarpiano del índice; los siguientes 4 marcadores de la misma forma que los marcadores ubicados en el dedo índice pero aplicados al dedo

anular; y los últimos 3 marcadores en el medio de cada una de las falanges del dedo pulgar y en el medio del hueso metacarpiano del pulgar.

b) En la segunda configuración se utilizaron 15 marcadores, ubicados en la misma distribución, pero para los dedos medio y meñique, mientras que, el pulgar permanece con la misma configuración, Figura 2.8B.

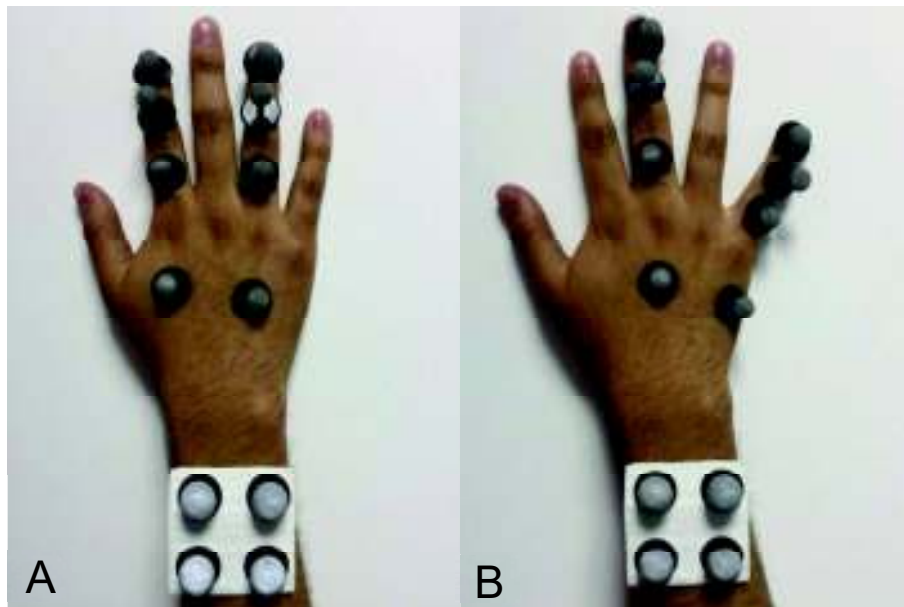


Figura 2.7. Posicionamiento de marcadores para flexión y extensión de los dedos trifalángicos. A. Primera distribución de marcadores – B. Segunda distribución de marcadores. (Fuente: Propia)

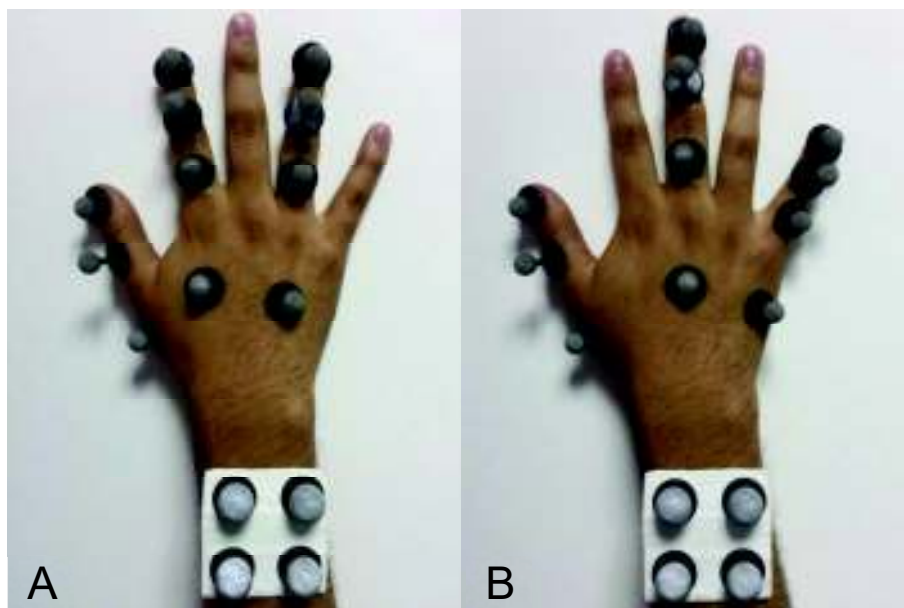


Figura 2.8. Posicionamiento de marcadores para oposición del dedo pulgar. A. Primera distribución de marcadores – B. Segunda distribución de marcadores. (Fuente: Propia)

## 2.5. Protocolo de pruebas para la adquisición de movimientos

EL protocolo de pruebas para la adquisición de movimientos se basa en procedimientos que se deben realizar mediante herramientas computacionales (BTS Smart) para obtener los modelos cinemáticos necesarios a partir de los datos adquiridos, Figura 2.9. El tratamiento de datos, el rastreo de sus trayectorias y la obtención de los modelos cinemáticos para cada uno de los ejercicios realizados se detallará con profundidad en el Anexo II.

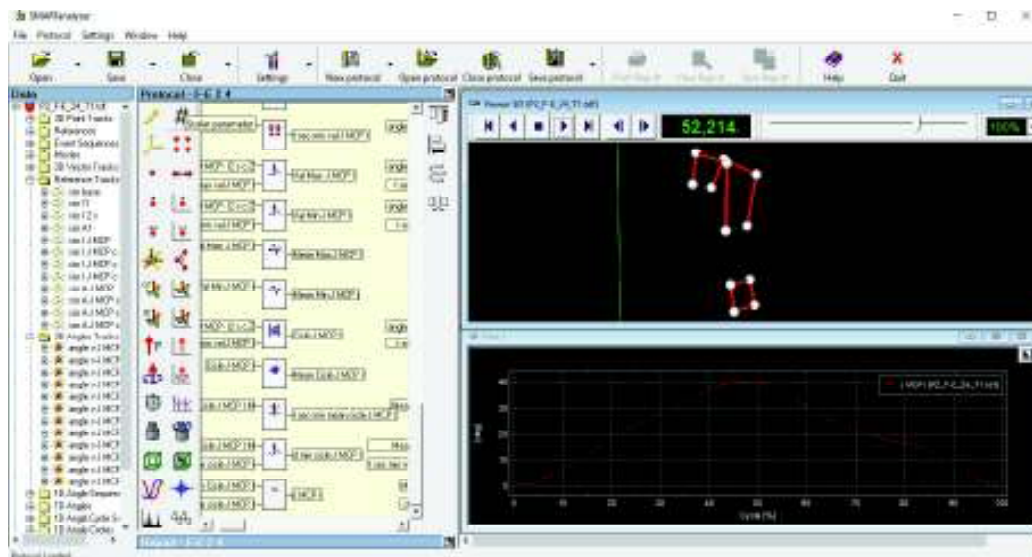


Figura 2.9. Interfaz computacional del protocolo de pruebas para adquisición de movimientos. (Fuente: Propia)

## 2.6. Cálculo de rango de movimiento de los gestos motrices de la mano

Se tomo como referencia para el cálculo de rango de movimiento de los ejercicios de flexión/extensión de los dedos trifalángicos y oposición del dedo pulgar al método realizado por Cheng y Percy, (1999). Sin embargo, el cambio realizado de este método es que se utilizó un sistema de coordenadas móvil para anular la relación que existe entre los movimientos de flexión/extensión y abducción/abducción, Figura 2.10.

En la Figura 2.11 se puede observar la diferencia entre un sistema de coordenadas estático y un sistema de coordenadas móvil. En el sistema de coordenadas estático (líneas verdes), existe una variación en el ángulo generado en el plano sagital para el movimiento de abducción/aducción, lo que genera un error mínimo (1-1.75°) en el valor del ángulo de

flexión/extensión, mientras que, en el sistema de coordenadas móvil, el eje X rota siguiendo el movimiento de abducción/aducción para tener la flexión/extensión total de la articulación.

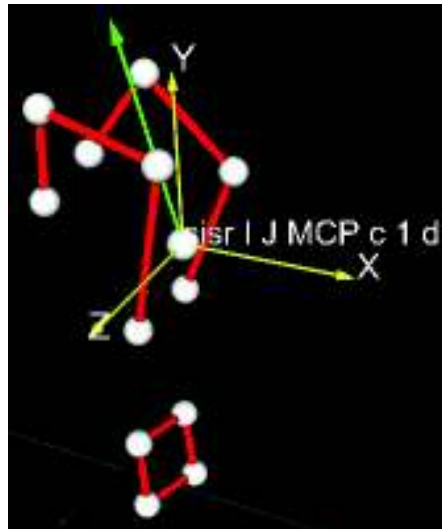


Figura 2.10. Sistema de coordenadas móvil para el cálculo de ángulo generado en flexión/extensión del vector unitario. En verde se visualiza el vector unitario. En amarillo se observa el sistema de coordenadas. (Fuente: Propia)

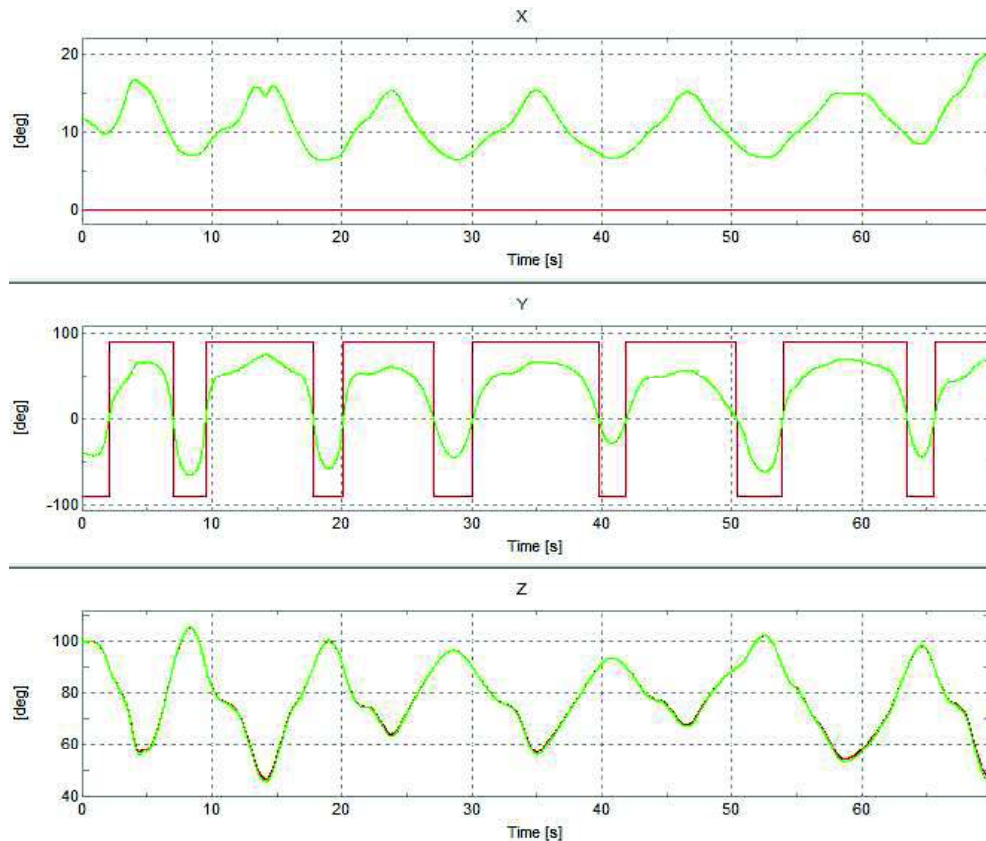


Figura 2.11. Ángulos de las proyecciones ortogonales de vectores unitarios. En verde se muestra el vector unitario respecto a un sistema de coordenada estático. En rojo se muestra el vector unitario respecto a un sistema de coordenadas móvil. (Fuente: Propia)

## 2.7. Prueba de los modelos cinemáticos en modelos virtuales CAD

Una vez que se obtuvieron los modelos cinemáticos de cada dedo para los ejercicios realizados, se exportaron los modelos cinemáticos en el modelo CAD desarrollado por Gonzalez et al. (1997) utilizado en la biomecánica en la herramienta “Opensim” (Delp et al., 2007) para observar si cumplen los resultados con lo esperado, Figura 2.12.

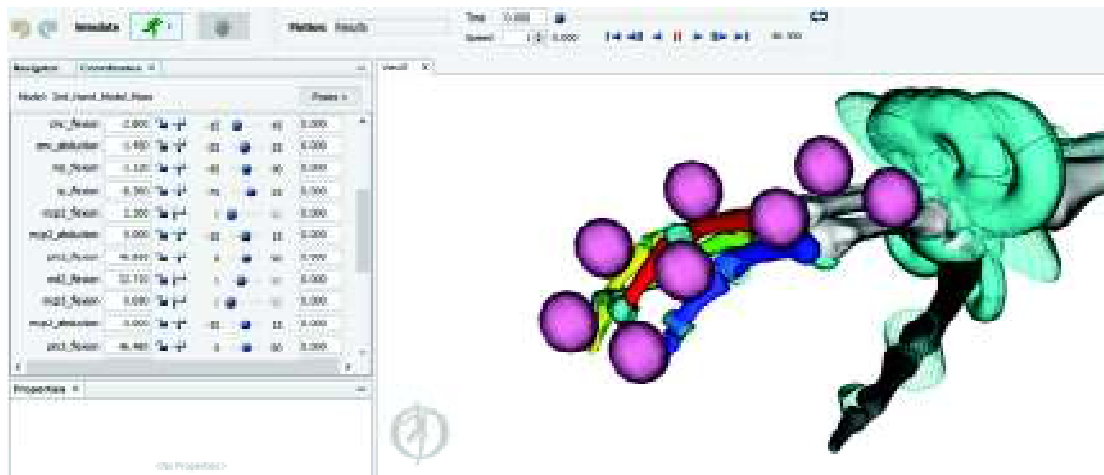


Figura 2.12. Modelo CAD utilizado para la comprobación de movimientos.  
(Fuente: Propia)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Variables de posición en movimientos de flexión y extensión de los dedos trifalángicos

La Tabla 3.1 presenta los rangos de movimiento de las articulaciones de los dedos trifalángicos junto con sus desviaciones estándar. Se puede observar en la Figura A9.1 del Anexo IX las gráficas de las articulaciones junto con sus desviaciones estándar (DS).

Tabla 3.1. Media del rango de movimiento y desviación estándar de las articulaciones durante los movimientos de flexión y extensión de los dedos trifalángicos.

Dedos	Articulaciones	Flex/Ext	DS
D II	MCF	62	27
	IFP	73	16
	IFD	77	16
D III	MCF	67	22
	IFP	78	12
	IFD	69	13
D IV	MCF	76	26
	IFP	80	14
	IFD	71	20
D V <sup>f‡</sup>	MCF <sup>f</sup>	81 <sup>f</sup>	21 <sup>f</sup>
	IFP	75	12
	IFD <sup>‡</sup>	61 <sup>‡</sup>	14 <sup>‡</sup>

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 3.1 la articulación con el mayor ángulo de flexión-extensión es la articulación metacarpofalángica del dedo V con 81° y una desviación estándar de 21° (f). Mientras que, la articulación en el menor rango de movimiento es la articulación interfalángica distal del dedo V con 61° y una desviación estándar de 14° (‡). Una de las causas del incremento de la desviación estándar se produjo debido que los participantes no realizaron adecuadamente los movimientos pese a ver sido informados de los movimientos que debían realizar. Además, los marcadores respecto a los dedos son bastante grandes e incómodos, lo cual ocasionaba que los participantes no realicen el movimiento adecuado de los dedos. Por lo tanto, la desviación estándar sirve como rangos en los cuales una persona puede tener un movimiento normal de la mano. En la Figura 3.1 se puede apreciar el rango de movimiento de las juntas metacarpofalángicas de cada uno de los dedos trifalángicos.

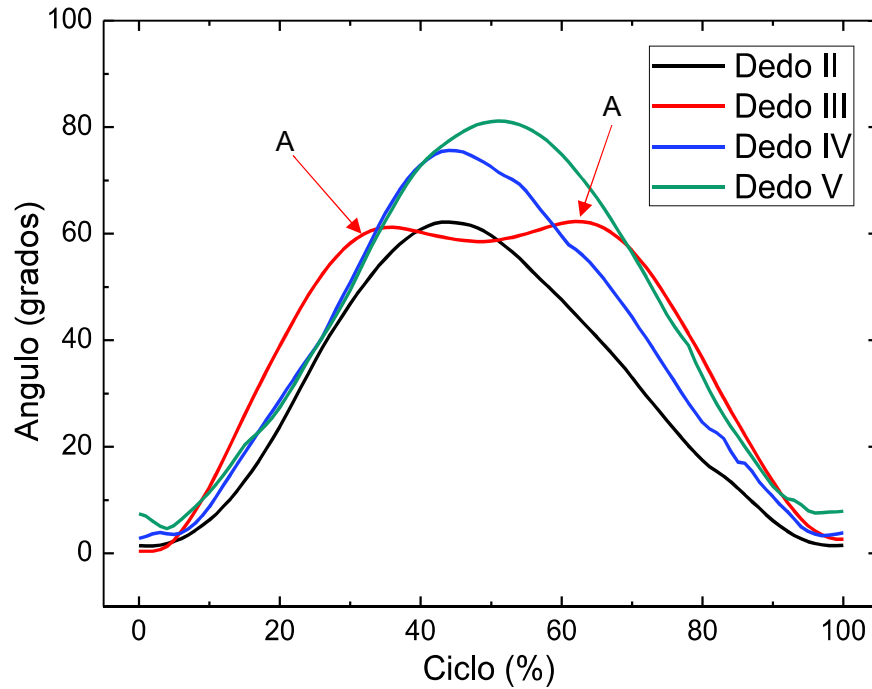


Figura 3.1. Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos trifalángicos. Ángulo  $0^\circ$  representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

En esta gráfica se puede apreciar que el mayor rango de movimiento respecto a las articulaciones metacarpofalángicas se da en el dedo V (verde), mientras que el menor rango de movimiento en el dedo II (negro) y sin embargo, se debe resaltar que dedo III (rojo) cuenta con un movimiento atípico al tener dos picos de movimiento (flechas A), esto se debe a que sobrepasó el límite de  $0$  a  $\pi$  proporcionado por las ecuaciones de Cheng y Pearcy y no se logró obtener el punto máximo de movimiento, aunque si se puede observar que su pico máximo si se encuentra relacionado con el movimiento normal de los dedos.

En la Figura 3.2 se puede apreciar el rango de movimiento de las juntas interfalángicas proximales de los dedos trifalángicos.

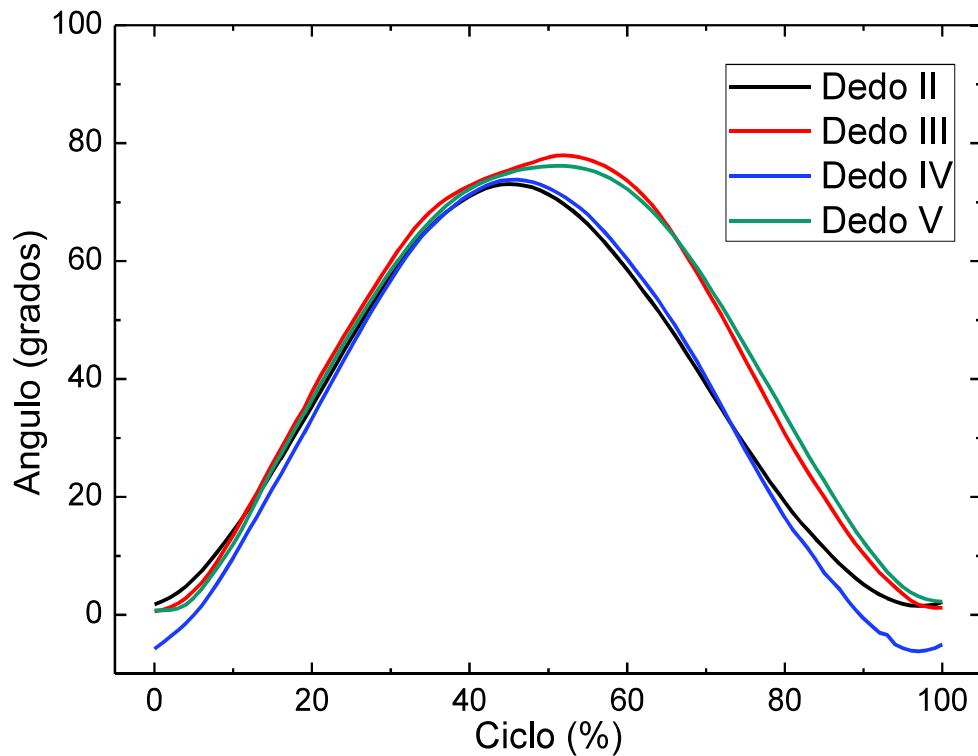


Figura 3.2. Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas proximales de los dedos trifalángicos. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

En esta gráfica se puede apreciar que todos los movimientos tienen un comportamiento de flexión-extensión normal, en el cual, con un mayor rango de movimiento llega el dedo III (rojo), sin embargo, se debe resaltar que el dedo IV (azul) tiene un movimiento negativo que indica una hiperextensión en el dedo IV (azul). También se observa que el dedo III (rojo) y V (verde) duran más tiempo en la fase de flexión, al contrario de los dedos II (negro) y IV (verde) en los cuales, dura menos.

En la Figura 3.3 se puede apreciar el rango de movimiento de las juntas interfalángicas distales de los dedos trifalángicos.



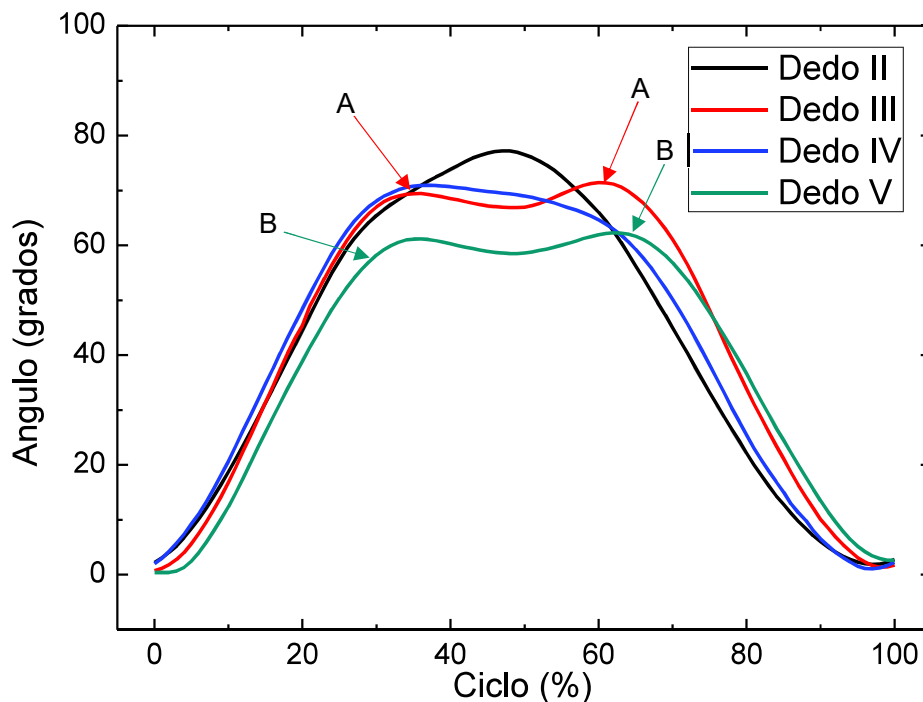


Figura 3.3. Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas distales de los dedos trifalángicos. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

En esta gráfica se puede apreciar que el dedo II (negro) cuenta con el mayor rango de movimiento, sin embargo, también se observa el mismo fenómeno que en la Figura 3.1 en la que se observan dos picos debido a que salen del rango, dedo III (rojo A) y V (verde B). Esto quiere decir que, si bien es cierto que el dedo II (negro) obtienen el mayor rango de movimiento, se deben considerar los dedos III (rojo) y V (verde) ya que no se observa su pico máximo de movimiento. Inclusive el rango del dedo III (rojo) puede llegar a ser igual o mayor que el rango del dedo II (negro).

### 3.1.2. Variables de posición en movimientos de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos

La Tabla 3.2 presenta los rangos de movimientos de las articulaciones del dedo pulgar e índice. Se puede observar en la Figura A9.2 del Anexo IX las gráficas de las articulaciones junto con sus desviaciones estándar.

Tabla 3.2. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo índice y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS). Los datos son medidos en grados (°).

<b>Dedo</b>	<b>Articulación</b>	<b>Flex/Ext</b>	<b>DS</b>	<b>Ad/Ab</b>	<b>DS</b>	<b>Min/Max Flex/Ext</b>	<b>Min/Max Ad/Ab</b>
DI	CMC	7	3	13	5	1-7	1-13
	MCF	17	13			1-17	
	IF	52	29			8-52	
DII	MCF	30	17			1 - 30	
	IFP	24	11			45 - 69	
	IFD	25	12			30 - 55	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.3 se observan los rangos de movimientos de las articulaciones del dedo pulgar y medio (del corazón). Se puede observar en la Figura A9.3 del Anexo IX las gráficas de las articulaciones junto con sus desviaciones estándar.

Tabla 3.3. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo medio y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS). Los datos son medidos en grados (°).

<b>Dedo</b>	<b>Articulación</b>	<b>Flex/Ext</b>	<b>DS</b>	<b>Ad/Ab</b>	<b>DS</b>	<b>Min/Max Flex/Ext</b>	<b>Min/Max Ad/Ab</b>
DI	CMC	9	4	16	8	2-9	2-16
	MCF	16	14			1-16	
	IF	63	60			3-63	
DIII	MCF	20	10			1 - 20	
	IFP	29	9			46 - 74	
	IFD	29	11			46 - 74	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.4 se observan los rangos de movimientos de las articulaciones del dedo pulgar y anular. Se puede observar en la Figura A9.4 del Anexo IX las gráficas de las articulaciones junto con sus desviaciones estándar.

Tabla 3.4. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo anular y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS). Los datos son medidos en grados (°).

		<b>Flex/Ext</b>	<b>DS</b>	<b>Ad/Ab</b>	<b>DS</b>	<b>Min/Max Flex/Ext</b>	<b>Min/Max Ad/Ab</b>
DI	CMC	10	6	20	9	1-10	1-20
	MCF	19	18			2-19	
	IF	90	93			5-90	
DIV	MCF	34	13			2 - 34	
	IFP	38	12			46 - 83	
	IFD	48	14			32 - 78	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.5 se observan los rangos de movimientos de las articulaciones del dedo pulgar y meñique. Se puede observar en la Figura A9.5 del Anexo IX las gráficas de las articulaciones junto con sus desviaciones estándar y en la Figura A9. 6 se puede apreciar las gráficas de la aducción-abducción del dedo pulgar.

Tabla 3.5. Rango de movimiento de las articulaciones del dedo meñique y pulgar para movimiento de oposición en conjunto con la desviación estándar (DS). Los datos son medidos en grados (°).

		Flex/Ext	DS	Ad/Ab	DS	Min/Max Flex/Ext	Min/Max Ad/Ab
DI	CMC	14	9	22	12	2-14	1-22
	MCF	21	21			4-21	
	IF	64	44			6-64	
DV	MCF	46	17			1 - 46	
	IFP	46	26			1 - 46	
	IFD	52	16			33 - 82	

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.4 se puede observar el rango de movimiento de la junta carpometacarpiana del dedo pulgar y su movimiento hacia los dedos trifalángicos.

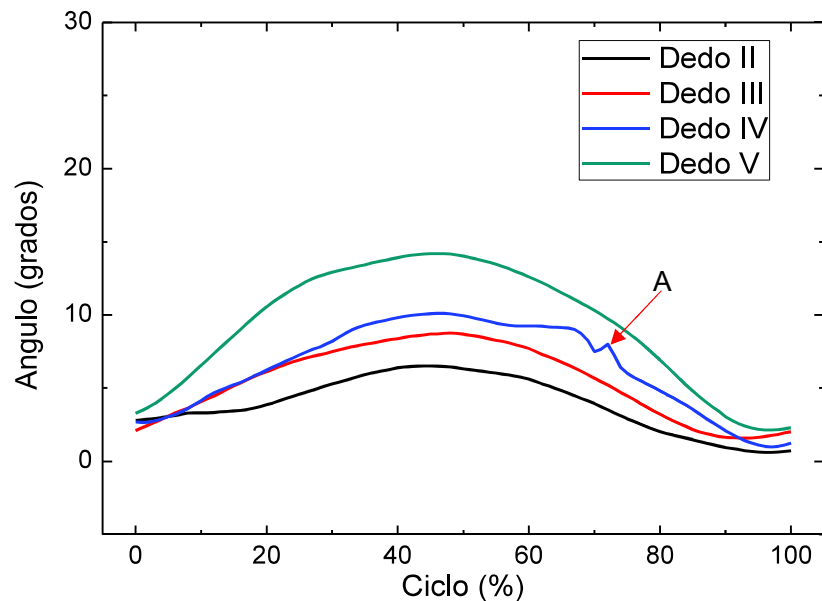


Figura 3.4. Movimientos de flexión-extensión de la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.

(Fuente: Propia)

Como se puede observar el dedo con mayor rango de movimiento es el dedo V (verde), mientras que, el dedo II (negro) obtiene el mayor rango de movimiento debido a que se encuentra más alejado del dedo pulgar el dedo meñique. Se debe notar que en el dedo IV (azul) se tiene ruido en el movimiento (A), esto puede darse debido a que los puntos se llegan a ocultar de las cámaras y no se logra capturar el movimiento. En la Figura 3.5 se aprecia el rango de movimiento en aducción-abducción de la junta carpometacarpiana del dedo pulgar en relación con los movimientos de oposición del dedo pulgar.

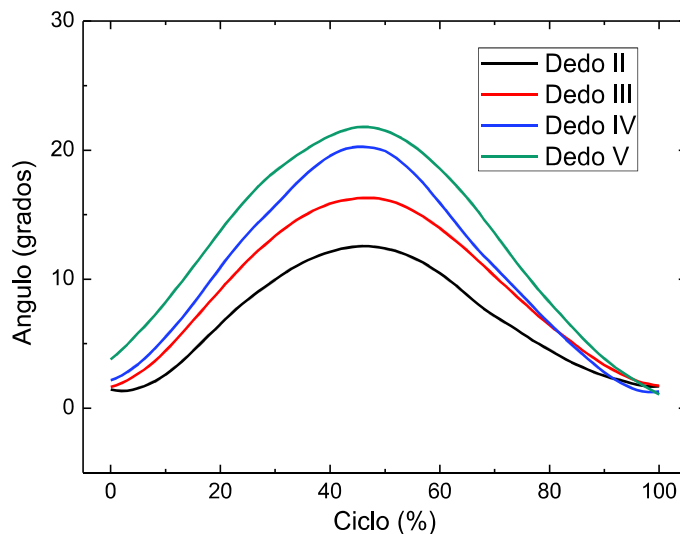


Figura 3.5. Movimientos de aducción-abducción de la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

En esta se puede apreciar que no lleva ningún tipo de ruido en sus movimientos, además que el dedo con llevar el mayor rango de movimiento es el dedo V (verde), mientras que, el dedo II (negro) realiza el menor movimiento respecto a los demás dedos. Se debe tomar en cuenta que los ángulos tomados siguen con la lógica de a una mayor distancia de los dedos hacia el pulgar, realizan un mayor rango de movimiento. En la Figura 3.6 se observa el movimiento de flexión extensión de la articulación metacarpofalángica del dedo pulgar.

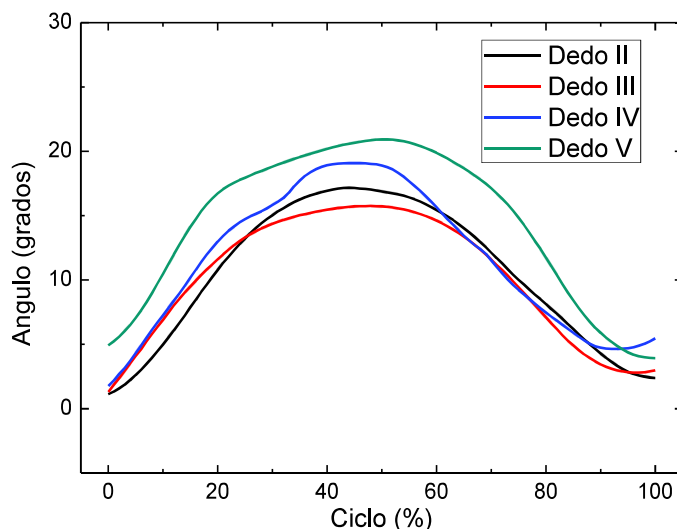


Figura 3.6. Movimientos de flexión-extensión de la articulación metacarpofalángica del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o posición de punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

En esta gráfica se puede observar que el mayor movimiento de aducción-abducción lo realiza el dedo V (verde), mientras que el dedo con el menor rango de movimiento es el dedo III (rojo). Este caso se debe a que el dedo más grande de la mano es el dedo medio III (rojo) y el pulgar debe trasladarse menos que en el caso de los demás dedos. Se debe notar que las gráficas no se mantienen con la misma geometría, sin embargo, mantienen su movimiento suave y no uno brusco. En este gráfico se observa que no hay mucho ruido que hubiera afectado a la captura de movimiento.

En la Figura 3.7 se observa los movimientos de flexión y extensión de la articulación interfalángica del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos.

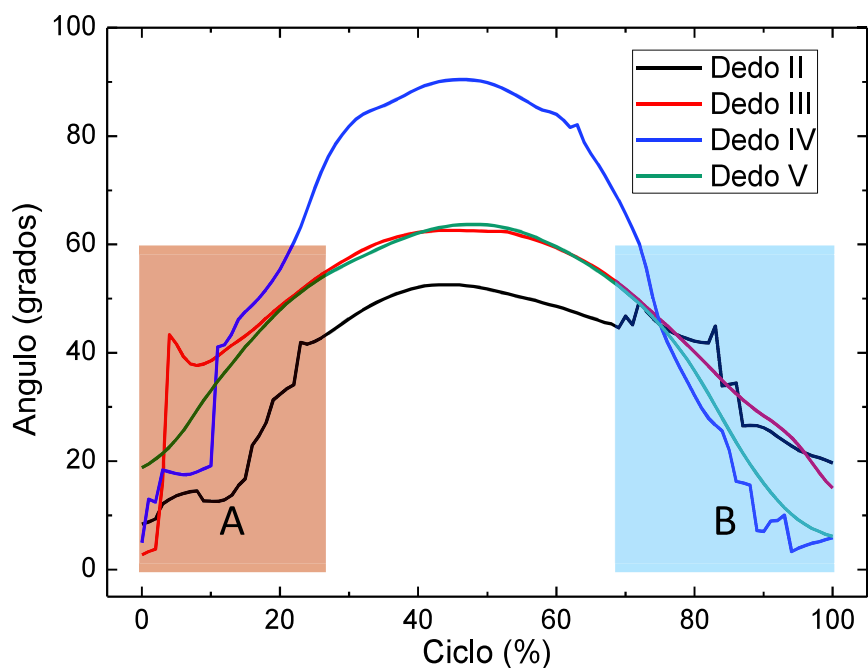


Figura 3.7. Movimientos de flexión-extensión de la articulación interfalángica del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.

(Fuente: Propia)

En esta gráfica se puede apreciar que se tiene varios puntos de ruido en todas las gráficas de los dedos, con excepción del dedo V (verde), en el cual, se conserva un movimiento bastante suave respecto a los demás. Principalmente existe más ruido en los puntos iniciales (A rojo) y finales (B azul), que vienen a ser los puntos de extensión de los dedos. La causa general para que se realicen este tipo de ruidos se da por los puntos que se ocultan de las cámaras y no logran ser identificados para realizar su respectivo rastreo o *tracking*.

En la Figura 3.8 se puede observar el movimiento de flexión extensión de los dedos trifalángicos en su junta metacarpofalángica para los ejercicios de oposición del dedo pulgar.

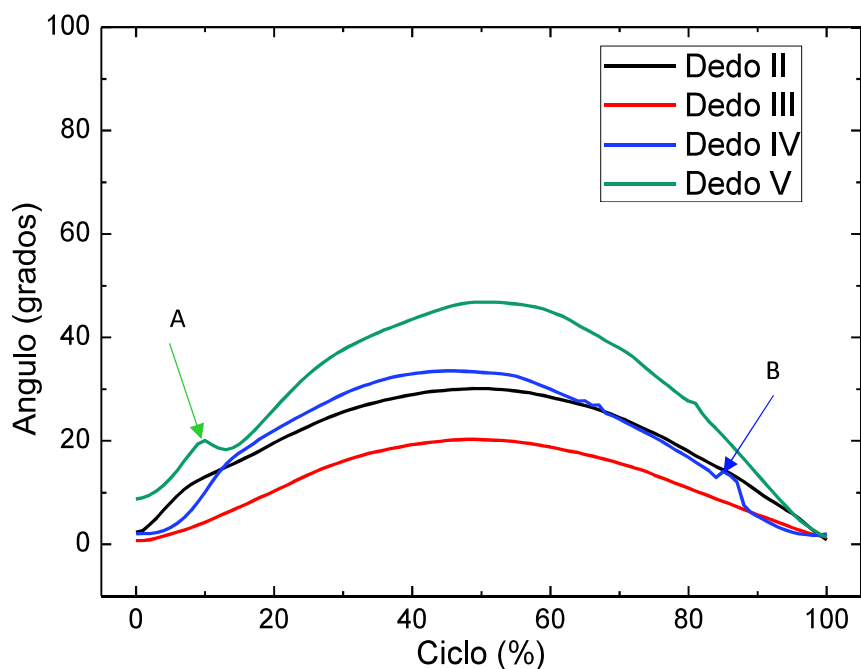


Figura 3.8. Movimientos de flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos trifalángicos en movimientos de oposición hacia el dedo pulgar. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.

(Fuente: Propia)

En esta gráfica se puede observar que nuevamente el dedo con el mayor rango de movimiento es el V (verde), mientras que el dedo con un menor rango de movimiento es el dedo III (rojo). También se presentan ruido en los movimientos iniciales del dedo V (verde A) y finales del dedo IV (azul B). Estos movimientos se repiten para las articulaciones interfalángicas proximales y distales debido a que se genera un mayor movimiento a medida que se encuentran los dedos alejados del pulgar, como se observa en las Figuras 3.9 y 3.10. En el caso de la junta interfalángica proximal (Figura 3.9) el que realiza el menor movimiento es el dedo III (rojo) mientras que el dedo V (verde) continúa realizando el mayor rango de movimiento, además, se observa ruido en el dedo II (negro A) al final del ciclo. Observando el movimiento de la articulación interfalángica distal (Figura 3.10) el que realiza el menor movimiento es el dedo II (negro) y el dedo V (verde) realiza el mayor movimiento, sin embargo, el dedo III (rojo) no se aleja mucho del movimiento del dedo II (negro), por lo que se sigue manteniendo la tendencia de ser el que realiza menos movimiento hacia el dedo pulgar.

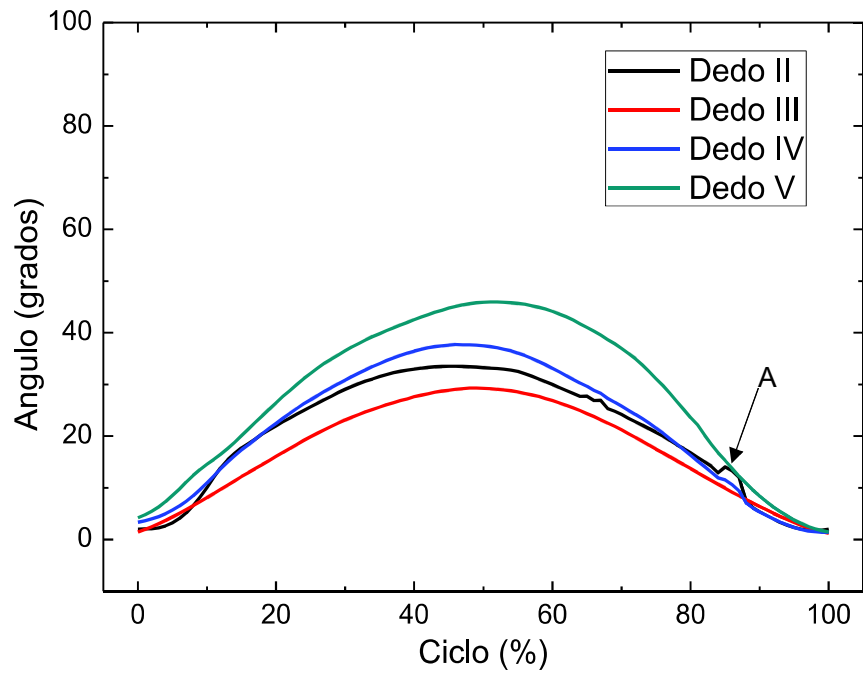


Figura 3.9. Movimientos de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas proximales de los dedos trifalángicos en movimientos de oposición hacia el dedo pulgar. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

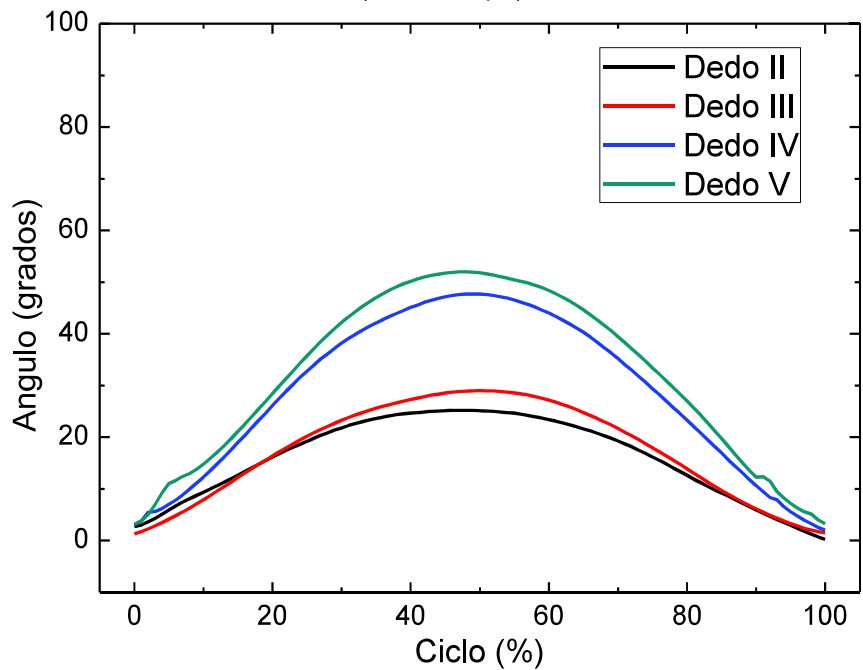


Figura 3.10. Movimientos de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas distales de los dedos trifalángicos en movimientos de oposición hacia el dedo pulgar. Ángulo 0° representa la posición de extensión normal de la mano o punto inicial del movimiento de flexión, llegado al punto máximo en la mitad del ciclo comienza la extensión.  
(Fuente: Propia)

## **3.2. Discusión**

La presente investigación expone resultados cinemáticos recolectados de los dedos trifalángicos (II, III, IV, V) durante movimientos de flexión y extensión, también se presenta resultados cinemáticos de la oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos (pinza terminal).

Al momento de realizar el rastreo “*tracking*” de los movimientos capturados se tuvo problemas en los ejercicios de oposición del dedo pulgar ya que al tener un mayor número de marcadores se generó el fenómeno de oclusión (explicado en el marco teórico, subcapítulo 1.3, análisis de movimiento mediante fotogrametría, a) marcadores pasivos), para el caso de la flexión/extensión de los dedos trifalángicos no se tuvo mayor problema ya que los movimientos realizados son más simples y con menor número de marcadores.

El protocolo de prueba para la adquisición de movimientos cinemáticos tomó en cuenta que únicamente se puede realizar para una persona a la vez y no de forma colectiva como se realizó para los protocolos citados en la Tabla 2.3, esto se produjo ya que existieron datos iniciales que ingresaron en el protocolo para que se realice el cálculo, Anexo VIII. Además, se debe tomar en cuenta que todos los rangos calculados de las articulaciones de los dedos se realizaron a partir de sistemas de referencia ubicados para el caso de los dedos trifalángicos en la J MCP y para el caso del dedo pulgar ubicado en la J TMC, Anexo VII, a causa de que los marcadores fueron ubicados en los puntos medios de cada falange. Por consiguiente, no se pudo realizar la creación de las demás articulaciones, por lo que se optó por esta opción.

### **3.2.1. Movimiento de flexión y extensión en dedos trifalángicos.**

La Tabla 3.1 muestra la media y la desviación estándar de los dedos trifalángicos (DII, DIII, DIV y DV) de la mano derecha durante movimientos de flexión y extensión. Estos datos son menores comparados con la literatura que se observa en la Tabla 1.3. Esta diferencia de resultados se produjo ya que no se realizaron los movimientos hasta la máxima flexión y extensión de los dedos, al contrario, los movimientos se ejecutaron hasta donde se sienta cómodo el participante.

Coupier et al., (2016) al realizar el análisis cinemático de la mano para movimientos de flexo-extensión, aducción-abducción y pronación-supinación obtiene rangos de movimiento del dedo pulgar y de los dedos trifalángicos mediante una distribución de marcadores tipo cluster. En la presente investigación se utilizó únicamente un marcador por cada falange



ubicado en los puntos recomendados por la Sociedad Internacional de Biomecánica (Wu et al., 2005). Mediante la distribución propuesta, se obtuvo en la junta metacarpofalángica y en la interfalángica distal, ángulos que se ubican entre los rangos encontrados por Coupier. Únicamente en el caso de la junta interfalángica proximal se obtuvo un ángulo menor por 11 grados.

Mallon et al., (1991) utilizó la técnica de goniometría mediante un goniómetro digital, en la cual, obtuvo rangos de movimiento mayores que la presente investigación. Únicamente se obtuvo valores similares en la junta interfalángica distal con 77°. Si bien es cierto en los dos estudios no se limita el movimiento para cada participante, se obtienen diferentes resultados ya que no se utiliza la misma técnica de recolección de datos. En la que Mallon et al. realizó la recolección de datos mediante goniometría y la presente investigación mediante captura de movimiento.

Degeorges et al., (2005) realizó el estudio de las rotaciones realizadas en las juntas de los dedos de la mano mediante una distribución de tres marcadores en cada una de las falanges para obtener sistemas de coordenadas móviles y hallar los ángulos de cada junta. En el presente trabajo como se expresó anteriormente no se tiene esta disposición y los ángulos obtenidos son de las proyecciones ortogonales de un vector unitario en los planos del sistema de coordenadas generado. Se obtuvo para todas las juntas de los dedos trifalángicos rangos de movimiento que se encuentran en los límites denotados por Degeorges et al. en su publicación.

Otra de las diferencias para la adquisición de datos y la literatura consultada es la forma de capturar el movimiento y su cálculo. Coupier et al. utilizó sistemas de coordenadas realizados a partir de marcadores ubicados en cada falange, mientras que, en el presente trabajo se utilizaron los marcadores en los puntos medios de las falanges como se describió en la metodología.

Cheng y Percy, (1999) realizó un modelo para el cálculo de los ángulos generados en las articulaciones, en el cual, utilizó sistemas de coordenadas que permanecen estáticos. Mientras que, en el presente trabajo se utilizaron sistemas de coordenadas que rotan alrededor del eje X para seguir al movimiento de abducción/abducción generado por las falanges, con lo que se pudo obtener el rango total de flexión/extensión (Ver video "Rotación de sistemas de coordenadas" de la Figura A6.6).

Como se observa en los gráficos del Anexo IX, la mayor desviación estándar, con un valor de 27°, se da en la articulación MCF (II) y es la de mayor dispersión de datos. En los movimientos de las juntas MFC (III), IFP (III) e IFP (V) no se alcanza a obtener el punto

máximo de movimiento, esto se debe a que el sistema de coordenadas para todos los participantes es constante en el eje Z (solo rota), por lo que si una persona ubica la mano en una posición diferente a la indicada el ángulo formado desde el eje X en el plano XY, Figura 2.9, superaba la condición dada en la ecuación 3 y tomaba los datos como si estuviera reduciendo su rango de movimiento. Por lo que, para el caso de las juntas antes mencionadas, no tienen un punto máximo de movimiento como las otras gráficas. Para el caso de todas las juntas IFP, todos los rangos de movimiento se conservaron semejantes a diferencia de las juntas MCF e IFD, debido a que su rango de movimiento si se conservaba en los cuadrantes indicados para el movimiento.

### **3.2.2. Movimiento de oposición del dedo pulgar hacia los dedos trifalángicos**

Para el movimiento de oposición del dedo pulgar se dividieron los resultados dependiendo del dedo al cual se oponía el dedo pulgar. Para el primer movimiento, Tabla 3.2 (oposición pulgar – índice), se obtuvo el mayor ángulo de flexión en la junta IF con 52° (29 ° DS), mientras que, el mínimo movimiento de flexión lo realizó la junta CMC con 7° (3° DS); para el segundo movimiento, Tabla 3.3 (oposición pulgar - medio), el mayor ángulo de flexión se realizó en la junta IF con 63 ( 60° DS) y el menor ángulo de flexión en la junta CMC con 9° (4° DS); en el tercer movimientos, Tabla 3.4 (oposición pulgar – anular), el mayor ángulo se obtuvo en la junta IF con 90 (93° DS), mientras que el menos ángulo en la junta CMC 10° (6° DS); finalmente en el cuarto movimiento, Tabla 3.5 (oposición pulgar – meñique), el ángulo mayor se obtuvo en la junta IF con 64° (44° DS) y el menor ángulo en la junta CMC con 14° (9 DS).

Como se observa en los resultados las desviaciones estándar en la junta IF son altas debido a que cada persona realiza sus movimientos de diferente forma, además de ser mayores sus rangos de movimiento que el movimiento realizado por las juntas de los dedos trifalángicos. Se debe resaltar que para los dedos trifalángicos no se calculó la aducción/abducción ya que únicamente el alcance del desarrollo del exoesqueleto en el proyecto de vinculación PVS 2017 011 se realiza movimientos de flexión/extensión y con libertad de movimiento de aducción/abducción en los dedos trifalángicos (II, III, IV, V). En el caso del dedo pulgar al tener un movimiento combinado se necesita conocer también la aducción/abducción. Este ejercicio obtuvo mayor rango en la oposición del dedo pulgar hacia el dedo meñique con ángulo de 22° (12° DS), Tabla 3.5. Esta desviación estándar es considerable con respecto a su media, y se puede apreciar que las curvas de aducción/abducción tienen una tendencia creciente a medida avanzan de dedos DII, DIII, DIV y DV, Figura A9.6. No se encontró en la literatura, trabajos en los que se realicen

movimientos combinados de oposición del dedo pulgar, sin embargo, una vez ingresados los datos en el software “OpenSim (Delp et al., 2007)” se puede observar que las falanges distales del dedo pulgar y de los dedos trifalángicos se acercan notablemente. Se debe tomar en cuenta que en el modelo utilizado únicamente incluye el hueso de la mano y no los músculos ni la piel de los dedos.

### **3.2.3. Pruebas realizadas en OpenSim**

Una vez obtenidos los modelos cinemáticos se implementaron en el modelo CAD de la mano utilizado en este trabajo, desarrollado por Gonzalez et al., (1997) en software “OpenSim (Delp et al., 2007)”. En los primeros resultados cinemáticos probados fueron los ángulos de flexión/extensión de los dedos trifalángicos (Anexo VI), se aprecia que cumple con los movimientos esperados. En el caso de la oposición del dedo pulgar se incluyó todos los datos de la oposición del pulgar hacia los demás dedos en un solo archivo. Estos datos tuvieron un menor acercamiento al resultado esperado ya que los dedos no llegaban a cerrar la pinza terminal, sin embargo, se logró un resultado aproximado. Todas las pruebas realizadas se detallan en el Anexo VI. Para mejorar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, el protocolo queda abierto para ingresar un mayor número de personal y de esta manera mejorarlo.

Todos los datos utilizados se encuentran en el siguiente repositorio digital: <https://figshare.com/s/85e3106637b9a5ec2d0e> . También se puede obtener los datos del código QR mostrado en la Figura A6.7.

## 4. CONCLUSIONES

- Se estableció un estándar cinemático para los movimientos de oposición del dedo pulgar y flexión y extensión de los dedos trifalángicos a partir de los modelos cinemáticos obtenidos en conjunto de sus desviaciones estándar que sirven como límites de un movimiento normal de la mano.
- La presente investigación logró obtener modelos cinemáticos que pueden ser utilizados en prótesis como guías para el movimiento natural de la mano, además de una media comparativa para personas en procesos de recuperación del movimiento de la mano. Con el movimiento máximo en las articulaciones: MCF 82°, IFP 80° e IFD 77° dado esto en los ejercicios de flexión y extensión de los dedos trifalángicos.
- El uso de un marcador en lugar de 3 para un sistema de coordenadas en los puntos recomendados por la Sociedad Internacional de Biomecánica genera mayor complicación para el estudio cinemático de los dedos.
- Se obtuvo un protocolo de pruebas para la adquisición de datos y la adquisición de movimientos, en los cuales, con pocas modificaciones en las instrucciones y códigos se logran adaptar para nuevas pruebas en las manos.
- Se capturó el movimiento de la mano para los ejercicios de flexión/extensión de los dedos sin problemas a partir de la disposición de cámaras utilizada.
- Se mejoró el cálculo de ángulos generados por un vector unitario a partir de las proyecciones ortogonales propuesto por Cheng y Pearcy, (1999) con la implementación de sistemas de coordenadas móviles.
- Se verificó que los modelos cinemáticos obtenidos cumplen con las expectativas esperadas en los movimientos de flexión/extensión de los dedos trifalángicos y oposición del dedo pulgar mediante la revisión de las trayectorias en el software "OpenSim".
- La presente investigación con la implementación de sistemas de coordenadas móviles y estándares cinemáticos logra ser un aporte importante para las posteriores investigaciones dentro del campo de la cinemática de la mano y su continuidad con su estudio dinámico.

## Referencias Bibliográficas

- Álvarez, A. (2007). *Anatomía, fisiología e higiene*. (E. científicas Á. C. Ltda., Ed.) (10ª). Quito, Ecuador.
- Baker, N. A., Cook, J. R., Baker, N. A., Cham, R., Hale, E., y Redfern, M. S. (2007). Measurements of Wrist and Finger Postures: A Comparison of Goniometric and Motion Capture Techniques Measurements of Wrist and Finger Postures: A Comparison of Goniometric and Motion Capture Techniques, (Septiembre 2015), 70–78. <https://doi.org/10.1123/jab.23.1.70>
- Batmanabane, M., y Malathi, S. (1985). Movements at the Carpometacarpal and Metacarpophalangeal Joints of the Hand and Their Effect on the Dimensions of the Articular Ends of the Metacarpal Bones, *110*, 102–110.
- BiomechSolutions. (2016). ANÁLISIS DE MOVIMIENTO BASADO EN TECNOLOGIA INERCIAL. Recuperado de <https://www.biomech-solutions.com/analisis-movimiento-tecnologia-inercial-xsens.html>
- Bravo, D. A. M., Rengifo, C. F. R., Agredo, W. R., Física, D. De, Cauca, U., y No, C. (2016). Comparación de dos Sistemas de Captura de Movimiento por medio de las Trayectorias Articulares de Marcha y DartFishTM , entre otros . E, *37*(2), 149–160.
- BTS Bioengineering. (2018). Protocolos. Recuperado de <http://www.btsbioengineering.com/es/products/bts-gaitlab/>
- Carpinella, I., Jonsdottir, J., y Ferrarin, M. (2011). Multi-finger coordination in healthy subjects and stroke patients: A mathematical modelling approach. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *8*(1). <https://doi.org/10.1007/s10835-013-9189-3>
- Carter, T. I., Pansy, B., Wolff, A. L., Hillstrom, H. J., Backus, S. I., Lenhoff, M., y Wolfe, S. W. (2009). Accuracy and Reliability of Three Different Techniques for Manual Goniometry for Wrist Motion: A Cadaveric Study. *YJHSU*, *34*(8), 1422–1428. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2009.06.002>
- Chao, E. Y., Oprande, J. D., y Axmear, F. E. (1976). THREE-DIMENSIONAL FORCE ANALYSIS OF FINGER JOINTS IN SELECTED ISOMETRIC HAND FUNCTIONS. *Journal of Biomechanics*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9290\(76\)90116-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9290(76)90116-0)
- Cheng, P., y Pearcy, M. (1999). A three-dimensional definition for the flexion / extension

and abduction / adduction angles, 37, 440–444.

- Coert, J. H., van Dijke, G. A. H., Hovius, S. E. R., Snijders, C. J., y Meek, M. F. (2003). Quantifying thumb rotation during circumduction utilizing a video technique. *Journal of Orthopaedic Research*, 21(6), 1151–1155. [https://doi.org/10.1016/S0736-0266\(03\)00114-1](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(03)00114-1)
- Conti, R., Meli, E., y Ridolfi, A. (2016). A novel kinematic architecture for portable hand exoskeletons. *Mechatronics*, 35, 192–207. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.002>
- Couplier, J., Hamoudi, S., Telese-Izzi, S., Feipel, V., Rooze, M., y Van Sint Jan, S. (2016). A novel method for in-vivo evaluation of finger kinematics including definition of healthy motion patterns. *Clinical Biomechanics*, 31, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.10.002>
- Davis, R. B., Ounpuu, S., Tyburski, D., y Gage, J. R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10(5), 575–587. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90046-Z)
- Degeorges, R., Parasie, J., Mitton, D., Imbert, N., Goubier, N., y Lavaste, F. (2005). Three-dimensional rotations of human three-joint fingers: an optoelectronic measurement . Preliminary results, 43–50. <https://doi.org/10.1007/s00276-004-0277-4>
- Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Thelen, D. G. (2007). OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(11), 1940–1950. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.901024>
- Deshpande, A. D., Xu, Z., Weghe, M. J. Vande, Brown, B. H., Ko, J., Chang, L. Y., Matsuoka, Y. (2013). Mechanisms of the Anatomically Correct Testbed Hand, 18(1), 238–250.
- Diaz, Christian; Toro, Maria; Forero, Johana; Torres, A. (2009). Detección, rastreo y reconstrucción tridimensional de marcadores pasivos para análisis de movimiento humano. *Revista ingeniería Biomédica*, 3(6), 56–67.
- DrTango, I. (2016). Reimplantación de los dedos - Serie—Cuidados postoperatorios. Recuperado de [https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp\\_presentations/100097\\_5.htm](https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_presentations/100097_5.htm)
- Field, M., Stirling, D. A., y Naghdy, F. (2009). Motion capture in robotics review, 1697–1702.

- Goggins, T., y Williams, S. (2018). Rehabilitation of the hand. *Orthopaedics and Trauma*, 33(1), 62–65. <https://doi.org/10.1016/j.mporth.2018.11.008>
- Gonzalez, R. V., Buchanan, T. S., Delp, S. L. (1997). How muscle architecture and moment arms affect wrist flexion-extension moments. *Journal of Biomechanics*, 30, 705–712. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(97\)00015-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0021-9290(97)00015-8)
- Hansen, C., Gosselin, F., Mansour, K. Ben, Devos, P., y Marin, F. (2018). Design-validation of a hand exoskeleton using musculoskeletal modeling. *Applied Ergonomics*, 68(Febrero 2017), 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.015>
- Healthwise. (2017). Ejercicios de calentamiento para el codo de tenista. Recuperado de <https://espanol.kaiserpermanente.org/static/health-encyclopedia/es-us/kb/zm25/11/zm2511.shtml>
- Kadaba, M., Ramakrishnan, H., Wootten, M., Gainey, G., Gorton, G., y Cochran, G. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal adult gait. *Classic Papers in Orthopaedics*, 399–401. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8\\_101](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8_101)
- Kapandji, A. I. (2006). *Fisiología Articular. Igarss 2014* (6a ed.). Panamericana, Editorial Medica. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Kitagawa, M., y Windsor, B. (2008). *MoCap for artists: Workflow and Techniques for Motion Capture. Workflow and Techniques for Motion Capture*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-240-81000-3.50004-8>
- Lee, K. S., y Jung, M. C. (2015). Ergonomic evaluation of biomechanical hand function. *Safety and Health at Work*, 6(1), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.09.002>
- Mallon, W. J., Brown, H. R., y Nunley, J. A. (1991). Digital ranges of motion : Normal values in young adults. *Journal of Hand Surgery*, 16(5), 882–887. [https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(10\)80155-8](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(10)80155-8)
- Manterola, C., y Otzen, T. (2014). Estudios Observacionales: Los Diseños Utilizados con Mayor Frecuencia en Investigación Clínica. *International Journal of Morphology*, 32(2), 634–645. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022014000200042>
- Metcalf, C. D., Notley, S. V, Chappell, P. H., Burridge, J. H., y Yule, V. T. (2008). Validation and Application of a Computational Model for Wrist and Hand Movements Using Surface Markers, 55(3), 1199–1210.

- Moeslund, T. B., y Granum, E. (2001). A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture. *Computer Vision and Image Understanding*, 81(3), 231–268. <https://doi.org/10.1006/cviu.2000.0897>
- Moreno, A. J., Utrilla, G., Marin, J., Marin, J. J., Sanchez-valverde, M. B., y Royo, A. C. (2018). Cervical Spine Assessment Using Passive and Active Mobilization Recorded Through an Optical Motion Capture. *Journal of Chiropractic Medicine*, 17(3), 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2017.12.004>
- Nakamura, T., Yabe, Y., Horiuchi, Y., y Yamazaki, N. (1999). In vivo motion analysis of forearm rotation utilizing magnetic resonance imaging, 14, 315–320.
- Nordin, M., Frankel, V. H., y Forssén, K. (2004). *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. (McGraw-Hill., Ed.). Interamericana.
- Northern Digital Inc. (2018). Optotrak Accessories. Recuperado de <https://www.ndigital.com/msci/products/optical-accessories/>
- Nowroozi, B. N., y Brainerd, E. L. (2013). X-ray motion analysis of the vertebral column during the startle response in striped bass , *Morone saxatilis*, 2833–2842. <https://doi.org/10.1242/jeb.085118>
- Öhberg, F., Grip, H., Wiklund, U., Sterner, Y., y Karlsson, J. S. (2003). Chronic Whiplash Associated Disorders and Neck Movement Measurements: An Instantaneous Helical Axis Approach, 7(4), 274–282. <https://doi.org/10.1109/TITB.2003.821328>
- Park, S., Lee, S., Yoon, J., y Chae, S. (2018). Finite element analysis of knee and ankle joint during gait based on motion analysis. *Medical Engineering and Physics*. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.11.003>
- Repetto, A. (2005). *Bases biomecánicas para el análisis del movimiento humano* (CD-Room). Buenos Aires Argentina.
- Ruiz, C. A. (2018). Fiabilidad de la técnica de vídeo-análisis en el análisis cinemático de la flexo-extensión del cuello, 160. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19341>
- Stebbins, J., Harrington, M., Thompson, N., Zavatsky, A., y Theologis, T. (2006). Repeatability of a model for measuring multi-segment foot kinematics in children. *Gait and Posture*, 23(4), 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.03.002>
- Tortora, G. J., y Derrickson, B. (2013). *Principios de anatomía y fisiología*. (Médica



Panamericana, Ed.).

Vignais, N., y Keir, P. J. (2013). Dynamic Assessment of Finger Joint Loads Using Kinetic and Kinematic Dynamic Assessment of Finger Joint Loads Using Kinetic and Kinematic Measurements, (Junio 2014).

Wu, G., Van Der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Buchholz, B. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion - Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042>

Zagal, J. J. (2017). *Análisis de Video del Comportamiento Cinemático de la Rodilla, Usando el Método de Eje Finito Helicoidal*. Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19001>