

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**LEAP MOTION PARA MEDIR LA AMPLITUD DEL MOVIMIENTO DE UNA
ARTICULACIÓN EN LA MANO**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
QUE PRESENTA

JOSÉ RICARDO LÓPEZ TREJO

DIRECTOR

DR. JUAN PABLO GARCÍA VÁZQUEZ

Mexicali, Baja California

Febrero de 2019

TESIS DEFENDIDA POR
José Ricardo López Trejo

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Juan Pablo García Vázquez
Director de Tesis

Dra. Marcela D. Rodríguez Urrea
Secretario

**M.I. María Luisa González
Ramírez**
Miembro del Comité

Dr. Guillermo Galaviz Yañez
Coordinador de Posgrado de la FIM

RESUMEN de la tesis de José Ricardo López Trejo, presentada como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, en el campo de conocimiento **COMPUTACIÓN**, Mexicali B.C., Febrero de 2019.

LEAP MOTION PARA MEDIR LA AMPLITUD DEL MOVIMIENTO DE UNA ARTICULACIÓN EN LA MANO

Resumen aprobado por:

Dr. Juan Pablo García Vázquez
Director de la Tesis

En la terapia de rehabilitación la medición de la amplitud del movimiento se utiliza para fines de diagnóstico, pronóstico, y terapéuticos. En esta tesis, presentamos el desarrollo de un software al que llamamos *LeapAngles*, el cual utiliza uno o más sensores Leap Motion para obtener mediciones de amplitud del movimiento de la abducción entre los dedos de la mano (MA) y la flexión de las articulaciones metacarpofalángicas (FAM). Para probar la precisión del software, se realizó un experimento de confiabilidad y se calculó el índice estadístico llamado coeficiente de correlación intraclase (CCI). El cual permite determinar la confiabilidad en las mediciones obtenidas con dos instrumentos diferentes para determinar su equivalencia. El experimento consistió en que un especialista en rehabilitación física tomó las medidas de los ángulos MA y FAM en la mano de jóvenes y adultos mayores utilizando un goniómetro y el software *LeapAngles*. En los experimentos se concluye que *LeapAngles* puede sustituir al goniómetro para medir la amplitud del movimiento de abducción. Esto debido a que se obtuvo un ICC en el rango de 0.51 a 1 para la mayoría de las articulaciones. Mientras que, el ICC en la medición de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica, en la mayoría de las mediciones fue menor a 0.4. Lo que significa que *LeapAngles* no puede sustituir a la herramienta.

Palabras clave: Leap Motion, Articulaciones, Amplitud del movimiento, Mano

SUMMARY of the thesis of Jose Ricardo Lopez Trejo, presented as a partial requirement to obtain the degree of **MASTER IN SCIENCE**, in the field of knowledge **COMPUTER**, Mexicali B.C., February 2019.

LEAP MOTION TO MEASURE THE AMPLITUDE OF THE MOVEMENT OF A JOINT IN THE HAND

Summary approved by:

PhD. Juan Pablo García Vázquez
Thesis Advisor

In medical care, the measurement of range of motion is used for diagnostic, prognostic, therapeutic and research purposes. In this document, we present the development of a proposed software called LeapAngles, which uses the Leap Motion sensor to obtain amplitude measurements of abduction movement (MA) and flexion of the metacarpophalangeal joints (FAM). To test the accuracy of the software, we conducted an experiment in which a specialist in physical rehabilitation took the measurements of the MA and FAM angles in young and old adults using a goniometer and LeapAngles software. Our experiments conclude that LeapAngles can substitute the goniometer to measure the amplitude of the abduction movement. Due to the CCI values obtained in the measurements that range from 0.51 to 1 in the majority of the articulations. Meanwhile, the CCI obtained in the measurements for the amplitude of the flexion movement of the metacarpophalangeal articulation, in their majority of the measurements were below 0.04. which means that LeapAngles cannot substitute the tool.

Keywords: Leap Motion, Articulations, Amplitude of the movement, Hand

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres José Ricardo López Aguilar y Rosa Delia Trejo Bernal. Así como a mi hermano José Rodrigo López Trejo. Con quienes he tenido la fortuna de contar, quienes me han apoyado y guiado durante mi vida y a quienes les estaré eternamente agradecido.

También dedico esta tesis a mi tutor Juan Pablo García Vázquez, por su guía, comprensión y aliento a seguir adelante.

José Ricardo López Trejo

Agradecimientos

A los miembros de mi comité de tesis: la Dra. Marcela D. Rodríguez Urrea y a la M.I. María Luisa González Ramírez por su apoyo, comprensión y sugerencias.

A mi asesor el Dr. Juan Pablo García Vázquez por ser parte de mi desarrollo como maestro y estar siempre de apoyo cuando lo necesité.

Al M.C.S José Alberto Agüero Grande, por su apoyo, comprensión y sugerencias.

Al M.C. Israel Márquez Rojas de la UVM por responder siempre a mis dudas sobre rehabilitación y mediciones. Así como también, a los licenciados en rehabilitación física, Andrés Castillo Lozoya y Paulina Inocencio por apoyarnos en realizar la mediciones durante los experimentos.

A la Casa del Abuelo por permitirme realizar experimentos en sus instalaciones, en especial a la Lic. Martha por su apoyo.

A los estudiantes del programa educativo de Licenciado en Sistemas Computacionales que participaron en los experimentos

A los profesores organizadores del CICOMP 2016, en especial a la M.C. Mónica Cristina Lam Mora y M.C. Luis Vizcarra Corral quienes me apoyaron con una beca para presentar mi cartel en el congreso

A mis compañeros Luis Eduardo García Ríos y Alberto Francisco Maupome Polanco por su asesoría y su ayuda la cual fue vital para concluir este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para estudiar un posgrado (CVU 687483)

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y a mis profesores del posgrado por brindarme siempre su apoyo y asesoría.

Tabla de Contenido

Dedicatoria	4
Agradecimientos	5
Índice de Tablas	8
Índice de Figuras	9
Capítulo 1: Introducción	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Planteamiento del problema	13
1.3 Objetivos de la tesis	14
1.3.1 General	14
1.3.2 Específicos	14
1.4 Metodología	14
1.5 Organización de la tesis	16
Capítulo 2: Marco Teórico	17
2.1 La mano	17
2.2.1 Articulaciones de la mano y sus movimientos	18
2.2 Leap Motion	20
2.2.1 Seguimiento de Movimiento	21
2.2.1 Características técnicas de Leap Motion	22
2.2.2 Sistema de coordenadas	23
2.2.3 Caja de interacción	24
2.2.4 Visualizador	24
Capítulo 3: Trabajo Relacionado	26
3.1 Medición del movimiento anormal de dedo en resorte	26
3.2 Validación del dispositivo Leap Motion para la medición de temblor fisiológico en la mano	27
3.3 Medición de la apertura del movimiento de pinza	28
3.4 Medición de la amplitud del movimiento de articulaciones de la mano	29
3.5 Medición de los movimientos de agarre y soltar de los dedos	30
3.6 Medición de movimiento de la mano	31
3.7 Resumen	32
Capítulo 4: Diseño de LeapAngles	34
4.1 Introducción	34
4.2 Interfaz de LeapAngles	34

4.2 Captura de información	35
4.3 Cálculo de la amplitud del movimiento	36
4.3.1 Medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano.	37
4.3.2 Medición de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica	39
Capítulo 5: Estudio de Confiabilidad	40
5.1 Recolección de datos	40
5.1.1 Mediciones en Jóvenes	40
5.1.1.1 Resultados	42
5.1.2. Mediciones en Adultos Mayores	44
5.1.2.1 Resultados	46
5.3 Recolección de datos con más de un Leap Motion	48
5.3.1 Descripción del Experimento	48
5.3.2 Resultados	49
5.4 Índice de Correlación entre Clases (ICC)	50
5.4.1 ICC de Experimento 1	51
5.4.2 ICC del Experimento 2	51
5.4.3 ICC del Experimento 3	51
5.5 Discusión	51
Capítulo 6: Conclusiones y Trabajo Futuro	51
6.1 Conclusiones	52
6.2 Contribuciones	52
6.2.1 Publicaciones de la Tesis	52
6.3 Trabajo Futuro	53
Referencias	54
Apéndice 1: Código de LeapAngles	57
Apéndice 2: Tablas de mediciones	100

Índice de Tablas

Tabla 1: Movimientos osteocinemático de los dedos de la mano. Fuente: (Broome, 2005).

Tabla 2: Aspectos técnicos de Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018).

Tabla 3: Magnitudes físicas que puede medir Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018).

Tabla 4: Tabla comparativa de estudios que proponen el uso de Leap Motion para medir la amplitud de movimiento en la mano.

Tabla 5: Valoración de la concordancia según los valores del Coeficiente de Correlación Intraclass.

Índice de Figuras

Figura 1. Goniómetros de diferentes modelos para diferentes articulaciones: a) con cabeza de 360°; b) con cabeza de 180° y c) con cabeza de 120°.

Figura 2. Etapas de la Metodología.

Figura 3. Estructura de la mano humana. Fuente: (Mahiques,2018).

Figura 4. Articulaciones de la mano. Fuente: (Jacobs et al., 2003).

Figura 5. Movimiento de abducción entre los dedos de la mano.

Figura 6. Movimiento de flexión en la articulación metacarpofalángica.

Figura 7. Gestos para interactuar con un software de una computadora mediante el uso de Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018).

Figura 8. Frameobject. Fuente: (Leap Motion, 2018).

Figura 9. Leap Motion Modelo LM-010. Fuente: (Koifman, 2013).

Figura 10. Sistemas de coordenadas cartesianas del dispositivo Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018).

Figura 11. Caja de interacción. Fuente: (LeapMotion, 2018).

Figura 12. Visualización de la mano en un espacio tridimensional.

Figura 13. Posturas evaluadas en el dedo de gatillo. Fuente:(Chophuk, 2015).

Figura 14. Posición del Quanser, Leap Motion y Trigno. Fuente:(Portillo O. 2015).

Figura 15. Apertura de la pinza medida en el experimento. Fuente:(Hornsey et al. 2015).

Figura 16. Módulo Web para medir las articulaciones. Fuente: (Elnaggar, 2016).

Figura 17. Fotografías de las posturas de la mano (a) palmar, (b) ulnar y (c) dorsal Fuente: (Okazaki S. et. al. 2017).

Figura 18. Instalación del Leap Motion y el disco de plástico. Fuente: (Coton et al., 2016).

Figura 19. Interfaz de *LeapAngles*.

Figura 20. *LeapAngles* y visualizador de Leap Motion.

Figura 21. Ejemplo de recolección de datos con *LeapAngles*.

Figura 22. Modelo propuesto geométrico del dedo propuesto por Pham et al., 2015 para calcular posiciones y ángulos de las articulaciones de la mano. Fuente: (Pham et al., 2015).

Figura 23. Muestreo de las mediciones de Leap Angles.

Figura 24. Fisioterapeuta realizando la medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano con un goniómetro NC-70100.

Figura 25. Fisioterapeuta realizando la medición de la amplitud del movimiento de flexoextensión de la articulación metacarpofalángica proximal en la mano con un goniómetro EGM-426.

Figura 26. Medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano utilizando la aplicación *LeapAngles*.

Figura 27. Medición de la amplitud del movimiento de flexoextensión de la articulación metacarpofalángica proximal y distal en la mano utilizando la aplicación *LeapAngles*.

Figura 28. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos índice y medio en jóvenes. Medición con goniómetro y Medición con *LeapAngles*.

Figura 29. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos medio y anular en jóvenes. Medición con goniómetro y Medición con *LeapAngles*.

Figura 30. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos anular y meñique en jóvenes. Medición con goniómetro y Medición con *LeapAngles*.

Figura 31. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo índice en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 32. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo medio en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 33. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo anular en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 34. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo meñique en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 35. Especialista realizando la medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano utilizando un goniómetro NC-70100.

Figura 36. Especialista realizando la medición de la amplitud del movimiento de flexoextensión del metacarpo en la mano utilizando un goniómetro EGM-426.

Figura 37. Medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano en adultos mayores utilizando la aplicación *LeapAngles*.

Figura 38. Medición de la amplitud del movimiento de abducción de los dedos de la mano utilizando la aplicación *LeapAngles*.

Figura 39. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos índice y medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles*.

Figura 40. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos medio y anular en adultos mayores. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles*.

Figura 41. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos anular y meñique en adultos mayores. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles*.

Figura 42. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo índice en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 43. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 44. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo anular en adultos mayores. Medición con goniómetro y con

LeapAngles.

Figura 45. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo meñique en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 46. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo índice en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 47. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 48. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo anular en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 49. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo meñique en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

Figura 50. Fisioterapeuta realizando la medición: a) amplitud del movimiento de abducción con un goniómetro angular de 7 y 360 grados; y) amplitud de la flexión con los goniómetros baseline 12-1011 deluxe de metal.

Figura 51. Medición del movimiento de abducción y flexión con el software *LeapAngles* modificado.

Figura 52. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos índice y medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 53. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos medio y anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 54. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos anular y meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 55. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo índice en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 56. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 57. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 58. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 60. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo índice en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

Figura 61. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con

LeapAngles a 180 y 120 grados.

Figura 62. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles a 180 y 120 grados.*

Figura 63. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles a 180 y 120 grados.*

Figura 64. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo índice en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles a 180 y 120 grados.*

Figura 65. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles a 180 y 120 grados.*

Figura 66. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles a 180 y 120 grados.*

Figura 67. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles a 180 y 120 grados.*

Figura 68. OpenCV funcionando con Canny Edge Detection.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

La medición de la amplitud del movimiento se refiere al máximo grado y dirección en que una articulación se puede mover (Palmer y Epler, 2002). Esta medida es utilizada por un fisioterapeuta para evaluar la ganancia o pérdida fisiológica, identificar patologías, dar seguimiento a la efectividad de una terapia de rehabilitación física o para determinar la capacidad de un individuo para realizar sus actividades de vida diaria (Taboadela, 2014; Chuang et al., 2002; Sanz et al., 1999).

La medición de la amplitud puede ser activa o pasiva (Salinas-Durán et al., 2008). En la medición activa, el paciente con su propia fuerza de forma voluntaria, corregidos o ayudados por el fisioterapeuta realizan el movimiento en la articulación ha ser medida; mientras que, en la pasiva, el paciente no realiza ningún movimiento voluntario de las articulaciones durante la medición.

El goniómetro es el instrumento utilizado para medir la amplitud del movimiento articular (Taboadela, 2014). Este instrumento puede ser de plástico o metal, y tiene forma de semicírculo o círculo graduado (ver **Figura 1**). Es parecido a un transportador pero con dos brazos largos. Un brazo se considera móvil y el otro fijo, estando ambos unidos al cuerpo con un remache o pivote, tal como se ilustra en la **Figura 1** (Palmer et al., 2002).

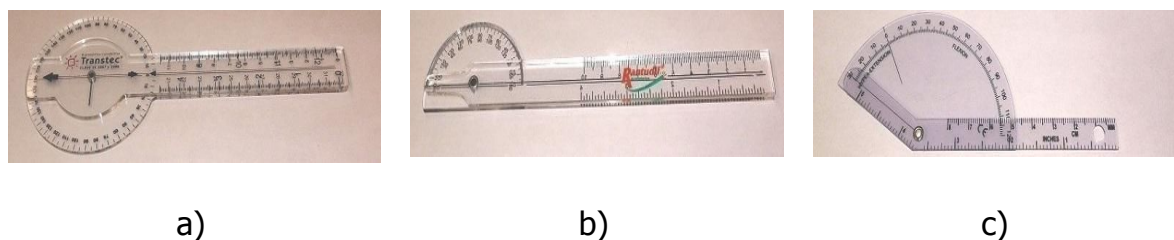


Figura 1: Goniómetros de diferentes modelos para diferentes articulaciones: a) con cabeza de 360°; b) con cabeza de 180° y c) con cabeza de 120°.

Existen una gran variedad de goniómetros, los cuales son utilizados para medir diferentes articulaciones del cuerpo. Hay goniómetros con brazos cortos para segmentos anatómicos cortos, como, por ejemplo, los dedos de la mano (Palmer et al., 2002).

1.2 La mano y sus movimientos

La mano es considerada el principal instrumento para la manipulación física del ambiente; cuyas funciones principales son tomar o sostener objetos (Palastanga et al., 2007). Se compone por 27 huesos, los cuales se agrupan en tres subgrupos: huesos de la muñeca, huesos de la palma y huesos de los dedos. Está compuesta por 25 articulaciones que permiten la realización de 58 movimientos diferentes que nos permiten interactuar con el ambiente (Palastanga et al. 2007).

Las articulaciones de la mano que se consideran parte del estudio de esta tesis son las metacarpofalángicas (MCF), las interfalángicas proximales (IFP) e interfalángicas distales (IFD). Dentro de los diferentes movimientos que puede realizar la mano humana, se centra en el movimiento de abducción entre los dedos de la mano, que se define como el movimiento lateral con separación de la línea media del tronco, considerando tronco al dedo medio de la mano. Así como, el movimiento flexoextensor de la articulación metacarpofalángica, que se refiere al movimiento de inclinación en el que disminuye el ángulo de una articulación aproximando los huesos que une (Bates, 1998). Movimientos necesarios para realizar movimiento involucrados en actividades diarias, por ejemplo, el agarre al tomar un cepillo de dientes o pinza al abrochar la camisa (Ukegbu et al., 2014; Matsui et al., 2014; López, 2012).

1.3 Planteamiento del problema

Diversos estudios reportan los problemas que enfrentan los fisioterapeutas al realizar mediciones con el goniómetro, así como, se requieren diversos goniómetros para medir diversos tipos de articulaciones (Taboadela, 2014; Bronzino, 2009); existe una variabilidad en las mediciones de la amplitud del movimiento de las articulaciones

entre terapeutas esto es debido a que en algunos casos es difícil colocar y mantener los brazos del goniómetro a lo largo de los huesos de los segmentos a lo largo de la medición, y el eje de rotación no siempre es claro (Dössel et al., 2010; Ashok, 2008), especialmente cuando las articulaciones son pequeñas, como en los dedos de la mano (Eini et al., 2010; Laskoski et al., 2009).

Además, el contacto físico del goniómetro con la mano puede aumentar el riesgo de infección, específicamente en pacientes que tienen laceraciones en la piel (Pham, et al., 2015). Por lo que en este trabajo de tesis, se propone desarrollar una herramienta de software con base a Leap Motion, un dispositivo que permite rastrear el movimiento de hueso, dedo o mano a través de fotogramas que proporcionan información relacionada con sus medidas, dirección, posición y velocidad al cambiar su posición en el espacio (Spiegelmock, 2013).

1.4 Objetivos de la tesis

1.4.1 General

"Determinar la confiabilidad del dispositivo Leap Motion para medir la amplitud del movimiento de flexoextensión de la articulación metacarpofalángica y la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano".

1.4.2 Específicos

- Desarrollar una aplicación que utilice el dispositivo Leap Motion para medir la amplitud del movimiento flexoextensión de la articulación metacarpofalángica, proximal y distal. Así como, la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano.
- Contrastar mediciones obtenidas por un fisioterapeuta utilizando un goniómetro convencional contra las obtenidas utilizando la aplicación desarrollada que utiliza el dispositivo Leap Motion.

1.5 Metodología

Con el fin de llevar a cabo este trabajo de tesis y cumplir con los objetivos propuestos se siguió una metodología que consiste en tres etapas, las cuales se muestran en la **Figura 2**.



Figura 2: Etapas de la Metodología

Etapa 1: Desarrollo. Esta etapa consistió en el desarrollo de la aplicación, *LeapAngles*. Esta aplicación utiliza el dispositivo Leap Motion para modelar la mano en un espacio tridimensional. Modelo del cual se puede obtener la posición en coordenadas (x,y,z) de cada uno de los huesos que componen la mano e incluso la velocidad de desplazamiento. Esta información es utilizada para calcular valores como el largo y ancho de hueso, así como, para calcular la amplitud del movimiento de una articulación.

La aplicación *LeapAngles* fue diseñada para calcular la amplitud del movimiento de flexoextensión de la articulación metacarpofalángica, proximal y distal. Así como, la amplitud de movimiento de abducción entre los dedos de la mano. Para lograr esto la aplicación utiliza el modelo geométrico del dedo propuesto por Pham et al., (2015). En el cual un vector es representado por un hueso o dedo de la mano en un espacio tridimensional.

Etapa 2: Experimentos. Esta etapa consistió en recolectar mediciones de la amplitud del movimiento de las articulaciones metacarpofalángica, proximal y distal. Así como, de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano en personas jóvenes y adultos mayores para contrastar los resultados entre ambos grupos.

La etapa de recolección consistió de dos fases, en la primera fase, un fisioterapeuta realizó mediciones de la amplitud del movimiento de flexoextensión metacarpofalángica y de abducción entre los dedos de la mano utilizando un goniómetro convencional. En la segunda fase, el fisioterapeuta realizó las mismas mediciones pero ahora utilizando la aplicación *LeapAngles*.

Un total de 220 mediciones fueron recolectadas, de las cuales 60 (30 de jóvenes y 30 de adultos mayores) corresponden a la amplitud del movimiento entre los dedos de la mano; y 160 (80 de jóvenes y 80 de adultos mayores) a la amplitud de movimiento de la articulación metacarpofalángica.

Etapas 3: Análisis de los Datos.

Para determinar la confiabilidad de Leap Motion para medir la amplitud de movimiento de las articulaciones. En esta etapa, se calculó el índice estadístico llamado coeficiente de correlación intraclase (CCI). El cual permite determinar la confiabilidad en las mediciones obtenidas con dos instrumentos diferentes para determinar su equivalencia. En esta tesis, se utilizó CCI para determinar la equivalencia entre las mediciones realizadas con un goniómetro y la aplicación *LeapAngles*. En los experimentos se indentificó que LeapAngles puede sustituir al goniómetro para medir la amplitud del movimiento de abducción. Esto debido a que se obtuvo un ICC en el rango de 0.51 a 1 para la mayoría de las articulaciones. Mientras que, el ICC en la medición de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica, en la mayoría de las mediciones fue menor a 0.4. Lo que significa que LeapAngles no puede sustituir a la herramienta.

1.6 Organización de la tesis

Esta tesis está conformada por seis capítulos y dos apéndices. En este primer capítulo se presentó la motivación para realizar este trabajo de tesis. En siguiente capítulo, se presentan algunos conceptos relevantes. En el capítulo 3, se presentan diversos proyectos de investigación que han propuesto el uso del dispositivo Leap Motion para medir la movimientos en la mano. La funcionalidad de la aplicación *LeapAngles* es presentada en el capítulo 4. En el capítulo 5, se describen el proceso de recolección de datos de las mediciones de la amplitud del movimiento de las

articulaciones en jóvenes y adultos mayores. Así como, el análisis de correlación intraclase (ICC) que se realizó para determinar la confiabilidad de Leap Motion para medir la amplitud del movimiento de una articulación. Para finalizar, en el capítulo 6, se concluye este trabajo y se plantea trabajo futuro.

Capítulo 2: Marco Teórico

En este capítulo se da al lector información sobre las tecnologías y técnicas empleadas en este trabajo de tesis. El capítulo inicia describiendo la estructura de la mano y posteriormente, se informa sobre las características técnicas y de funcionalidad del dispositivo Leap Motion.

2.1 La mano

Según la real academia española, la mano, *“es una parte del cuerpo humano unida a la extremidad del antebrazo y que comprende desde la muñeca inclusive hasta la punta de los dedos”* (RAE, 2018).



Figura 3. Estructura de la mano humana. Fuente: (Mahiques, 2018).

La mano es considerada el principal instrumento para la manipulación física del ambiente; cuyas funciones principales son tomar o sostener objetos (Palastanga et al., 2007).

La mano se compone por 27 huesos, los cuales se agrupan en tres subgrupos: huesos de la muñeca, huesos de la palma y huesos de los dedos, ver **Figura 3** (Carter, 2004). El subgrupo de la muñeca se compone de 8 huesos: trapecio, trapezoide, grande, ganchoso, pisiforme, piramidal, semilunar y escafoide. Mientras que, el subgrupo de la palma se compone del primero al quinto metacarpiano. Finalmente, la el subgrupo de los huesos de los falanges o dedos que son 14. Dos huesos para el dedo pulgar y tres para el resto de los dedos. Estos están separados en tres secciones: la falange más cercana a la mano se llama proximal, a continuación viene la falange media (esta no la encontramos en el dedo pulgar), y por ultimo la mas distante de la mano es la falange distal.

2.2.1 Articulaciones de la mano y sus movimientos

La mano está compuesta por 25 articulaciones que permiten la realización de 58 movimientos diferentes que nos permiten interactuar con el ambiente (Palastanga et al. 2007).

Las articulaciones de la mano son las carpometacarpianas (CMC), las metacarpofalángica (MCF), las interfalángicas proximales (IFP), interfalángicas distales (IFD) y la interfalángica del pulgar (IF), estas se presentan en la **Figura 4**.

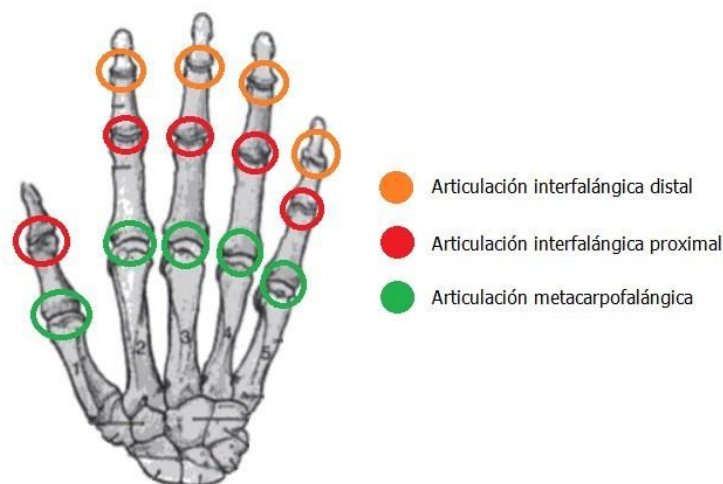


Figura 4: Articulaciones de la mano. Fuente: (Jacobs et al., 2003)

Las articulaciones CMC del segundo, tercer y cuarto dedo son articulaciones

planas que tienen un ligero movimiento de flexión o extensión. La primera y la quinta articulación de CMC (articulaciones trapeciometacarpiana y ganchosametacarpiana), son soportes biplanos y tienen un movimiento de flexión o extensión y abducción o aducción.

Las articulaciones MCF de los dedos son pequeñas articulaciones elipsoidales que pueden flexionarse y extenderse, así como efectuar movimientos de aducción y abducción. La MDC del pulgar es una articulación condiloidea con mucha movilidad. Puede efectuar movimientos de flexión o extensión (flexoextensión), y de aducción o abducción y también tiene un cierto grado de pronación y supinación. Las articulaciones IFP e IFD de los dedos, así como la IF del pulgar, pueden, fundamentalmente, doblarse y extenderse. En este trabajo de tesis nos enfocaremos a medir la amplitud del movimiento de las articulaciones presentadas en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Movimientos osteocinemáticos de los dedos de la mano. Fuente: (Broome, 2005).

Movimiento osteocinemático en:	Articulación	Movimiento en grados
Dedos	MCF	Flexión: 90° Extensión: 30° a 45° Aducción/Abducción: 40°
	IFP	Flexión: 100° Extensión: 0°
	IFD	Flexión: 90° Extensión: 20°

Las articulaciones de los dedos de la mano se dividen en, articulaciones interfalángicas distales, proximales y metacarpofalángicas (ver **Figura 4**).

Dentro de los diferentes movimientos que puede realizar la mano humana, nos enfocaremos en el movimiento de abducción entre los dedos de la mano, y el movimiento flexoextensor de la articulación metacarpofalángica. Debido a que estos movimientos se relacionan con los movimientos de pinza y agarre, necesarios para realizar las actividades de vida diaria (Ukegbu et al., 2014; Matsui et al., 2014; López, 2012).

La **abducción**, se define como el movimiento lateral con separación de la línea media del tronco, considerando tronco al dedo medio de la mano, ver **Figura 5**; mientras que, la **flexión**, se define como el movimiento de inclinación en el que disminuye el ángulo de una articulación aproximando los huesos que une (Bates, 1998), ver **Figura 6**.



Figura 5: Movimiento de abducción entre los dedos de la mano

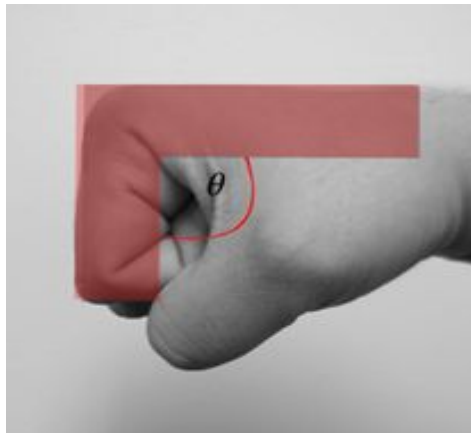


Figura 6: Movimiento de flexión en la articulación metacarpofalángica

2.2 Leap Motion

Es un dispositivo periférico de entrada que permite a los usuarios interactuar con el software de una computadora mediante movimientos realizados con la mano o los dedos (Spiegelmock, 2013). Cuatro son los gestos que han sido habilitados en las librerías de Leap Motion: círculo, deslizar, toque de tecla y toque de pantalla (Spiegelmock, 2013). En la **Figura 7** se muestran estos gestos.

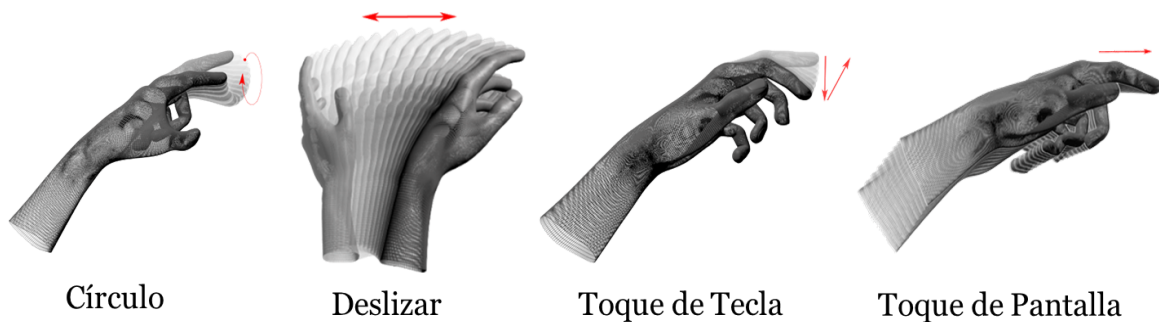


Figura 7: Gestos para interactuar con un software de una computadora mediante el uso de Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018)

2.2.1 Seguimiento de Movimiento

Leap Motion permite hacer el seguimiento del movimiento a través de fotogramas que proporcionan información sobre el movimiento y posición de las manos y dedos. Por ejemplo, en la **Figura 8**, se puede observar que es posible obtener la posición de una articulación, el largo y ancho de un hueso, y la posición de la mano.



Figura 8: Frameobject. Fuente: (Leap Motion, 2018).

El seguimiento y detección de las manos y dedos funciona mejor cuando el dispositivo puede percibir la silueta de la mano. El dispositivo combina los datos obtenidos del mundo real mediante los sensores con modelos en tercera dimensión de manos humanas permitiendo afrontar las diferentes condiciones de seguimiento y detección.

2.2.1 Características técnicas de Leap Motion

Las dimensiones del dispositivo Leap Motion son 8 cm de largo por 3 cm de ancho. Las especificaciones técnicas del dispositivo utilizado en esta tesis se listan en la **Tabla 2**. Los principales componentes del dispositivo son: tres diodos emisores de luz (LEDs), dos cámaras VGA monocromáticas y un microcontrolador (ver **Figura 9**).

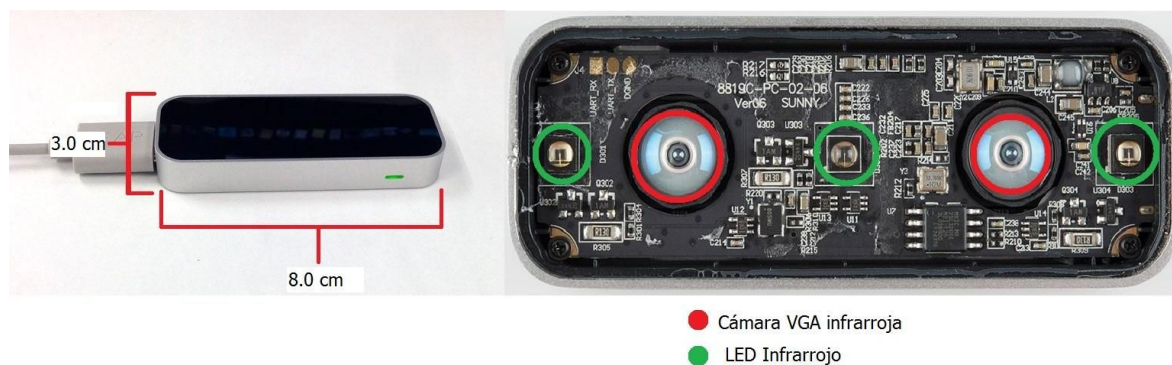


Figura 9: Leap Motion Modelo LM-010. Fuente: (Koifman, 2013).

Tabla 2: Aspectos técnicos de Leap Motion. Fuente:(Leap Motion, 2018)

Especificación	Valor
Precisión	0.1 mm
Tasa de muestreo	250 fps (del inglés cuadros por segundo)
Ángulo de visión	150
Interfaz de conexión	Universal Serial Bus

2.2.2 Sistema de coordenadas

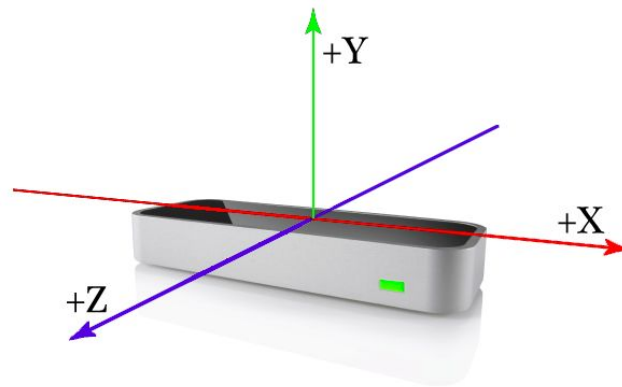


Figura 10. Sistemas de coordenadas cartesianas del dispositivo Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018).

El dispositivo utiliza un sistema de coordenadas cartesianas, en donde el centro del dispositivo es la coordenada $[0, 0, 0]$. Desde la posición del usuario, el eje Y tiene valores positivos hacia arriba, el eje X hacia la derecha, y el eje Z hacia el usuario, ver **Figura 10**.

El API (del inglés Application Programming Interface) de Leap Motion permite medir cuatro tipo de magnitudes físicas utilizando la información del sistema de coordenadas, ver **Tabla 3**

Tabla 3. Magnitudes físicas que puede medir Leap Motion. Fuente: (Leap Motion, 2018)

Magnitud	Unidad de Medida
Distancia	Milímetros
Velocidad	Milímetro/Segundos
Ángulo	Radianes
Hora	Microsegundos

2.2.3 Caja de interacción

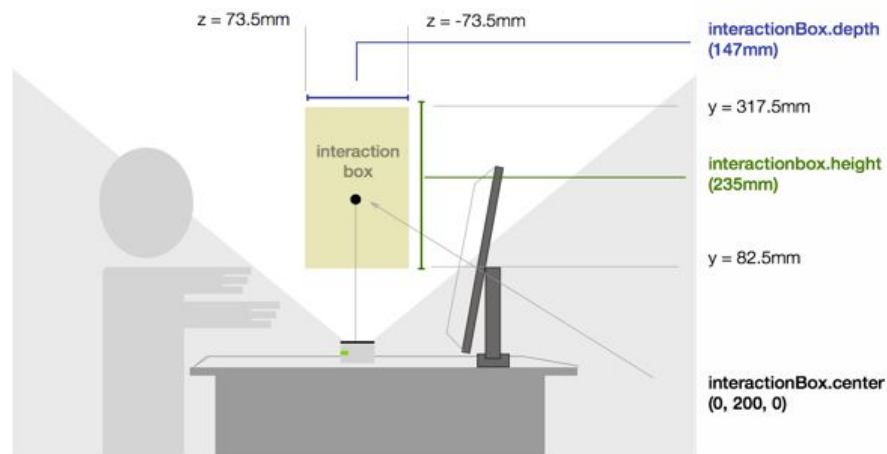


Figura 11: Caja de interacción. Fuente: (Leap Motion, 2018).

La caja de interacción del Leap Motion es un área rectangular, alineada sobre los ejes del rango de visión del Leap Motion, la cual provee de coordenadas normalizadas para la posición de la mano y los dedos dentro de esta área. La región de la caja de interacción está definida por un centro (0,200,0) y dimensiones alrededor de los ejes X,Y,Z. En el caso de Y es de 82.5 mm a 317.5 mm, mientras que Z va de -73.5 mm a 73.5 mm (Ver **Figura 11**).

La caja de interacción crea el mapa de coordenadas del sistema de Leap Motion utilizado para dibujar la mano en el espacio tridimensional. En este trabajo de tesis la caja de interacción es utilizada como referencia para colocar la mano del paciente.

2.2.4 Visualizador

El visualizador del Leap Motion es una herramienta que permite ver la información generada por el dispositivo. Este despliega el número de cuadros por segundo, permite cambiar las coordenadas de la cuadrícula en la imagen, desplegar la información de rastreo de la mano, incluyendo los ejes, el campo de visión y las coordenadas de la punta de los dedos (Ver **Figura 12**). También permite controlar la cámara la cual despliega el recorrido de la punta de los dedos en un ambiente

tridimensional. En este trabajo de tesis, el visualizador es utilizado para asegurar la detección de la mano.

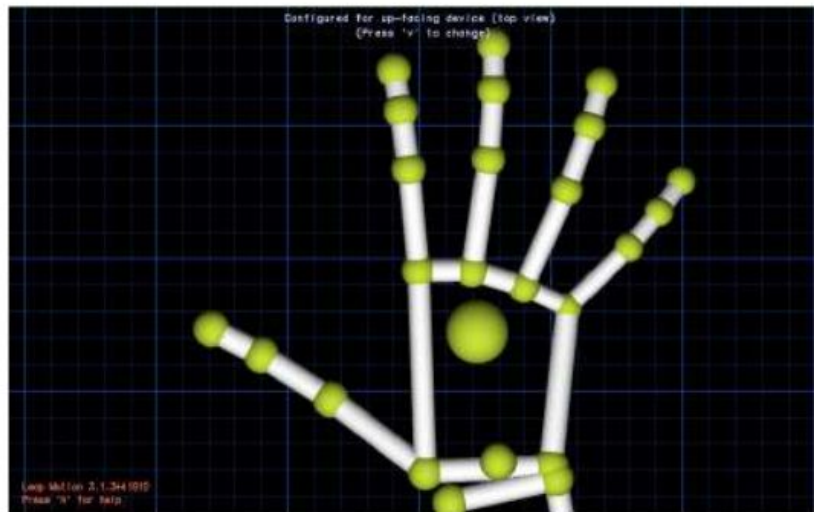


Figura 12: Visualización de la mano en un espacio tridimensional.

Capítulo 3: Trabajo Relacionado

Este capítulo inicia presentando diversos proyectos que proponen el uso del dispositivo Leap Motion para realizar mediciones en la mano humana. Posteriormente, se presenta una tabla comparativa, y finalmente, se enfatiza la contribución de este trabajo de tesis.

3.1 Medición del movimiento anormal de dedo en resorte

En *Chophuk et al.* (2015), presentan el desarrollo de una aplicación que utiliza el dispositivo Leap Motion para evaluar el movimiento anormal de la tenosinovitis estenosante del tendón flexor conocida comúnmente como “dedo en resorte”. Una condición que afecta a los tendones en el dedo cuando estos se inflaman.

Para evaluar el movimiento las mediciones que se realizan son: (a) medición de la flexión de la articulación interfalángica proximal del pulgar; (b) medición del ángulo de la articulación interfalángica proximal de cada dedo en posición neutral; (c) medición del ángulo de flexión de la articulación metacarpofalángica de cada dedo, y (d) medición del ángulo de abducción radial del pulgar (Ver **Figura 13**).

Para evaluar la herramienta, se realizaron mediciones en un individuo utilizando un goniómetro y se compararon contra las mediciones obtenidas con la aplicación propuesta.

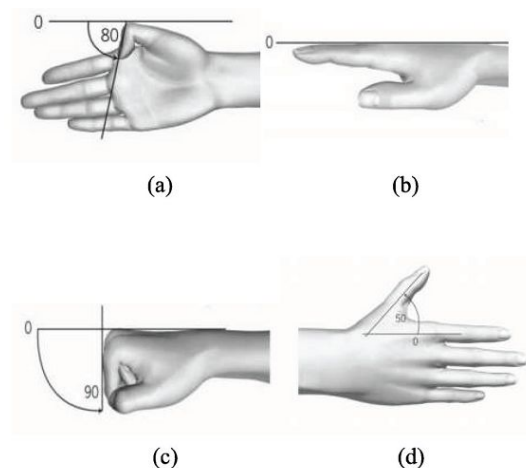


Figura 13. Posturas evaluadas en el dedo de gatillo. Fuente:(Chophuk, 2015).

Los resultados indican que las mediciones tomadas con la aplicación tienen un error del 4.25 grados en la articulación interfalángica proximal del pulgar, 7 grados en la medición de la articulación interfalángica proximal de cada dedo, 10 grados en la medición del ángulo de flexión de la articulación metacarpofalángica, y finalmente, 2.25 grados en la medición del ángulo de abducción radial del pulgar.

3.2 Validación del dispositivo Leap Motion para la medición de temblor fisiológico en la mano

Portillo O. et. al. (2015), proponen validar si el dispositivo Leap Motion puede medir los temblores o vibraciones de una mano sintética, la cual fue excitada mecánicamente en un ancho de banda similar al del temblor fisiológico (8-12 Hz) para compararlos con los resultados del dispositivo comercial Trigno Wireless EMG.

Para este estudio se empleó el dispositivo Leap Motion el cual fue evaluado en pruebas dinámicas para medir los temblores o vibraciones de una mano sintética, utilizando el sistema rotatorio Quanser srv-02 Plant (Quanser Inc, Canada) las vibraciones fueron grabadas con un acelerómetro triaxial Trigno wireless EMG y finalmente se compararon y analizaron los espectros de las señales de ambos dispositivos visualmente y con un análisis de coherencia (ver **Figura 14**).

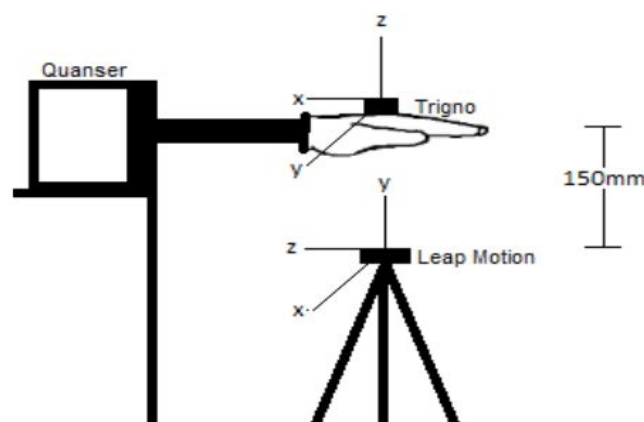


Figura 14. Posición del Quanser, Leap Motion y Trigno. Fuente:(Portillo O. 2015).

En los resultados, se obtuvo una fuerte coherencia prácticamente para todas las pruebas que hicieron en la banda de 8 a 12 Hz, lo cual indicó que el Leap Motion podría ser utilizado para la medición de temblores fisiológicos. Sin embargo, se

declaró que son necesarias pruebas adicionales para dar conclusiones estadísticamente significativas.

3.3 Medición de la apertura del movimiento de pinza

En Hornsey et. al. (2015), se evaluó la precisión del Leap Motion para medir la apertura del movimiento de pinza, específicamente para la separación entre el dedo pulgar y el dedo índice (Ver **Figura 15**).

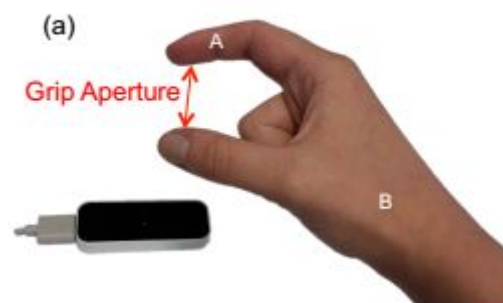


Figura 15. Apertura de la pinza medida en el experimento. Fuente:(Hornsey et al. 2015).

Trece barras de madera fueron creadas con medida de 1 a 13 centímetros con incrementos de 1 centímetro entre ellas. Estas fueron sostenidas por los participantes sujetando los dos extremos de las barras entre sus dedos pulgar e índice posando sobre el Leap Motion, después era removidas, pero se mantuvo la mano en una posición estable. Diez pruebas fueron realizadas antes de volver a comprobar la distancia entre los dedos con la barra utilizada y se repitieron otras 10 pruebas, dando en total 20 repeticiones para cada tamaño de barra. La posición de los dedos fue capturada desde un Leap Motion utilizando MATLAB y la librería Matleap (Feigelman, 2016); se calculó la distancia euclidiana entre los dos extremos.

Los resultados indican que la media cuadrática fue disminuyendo con el incremento de apertura de la pinza; en pinzas pequeñas el error fue de 8.78 mm en la pinza de 10 mm, y un error de 2.67 en una pinza de 100 mm. La media cuadrática fue de 4.44 mm; y para pinzas más grandes de 50 mm, el error cuadrático medio fue de menos de 4 mm.

3.4 Medición de la amplitud del movimiento de articulaciones de la mano

En *Elnaggar et al.* (2016) desarrollaron una herramienta web que utiliza el dispositivo Leap Motion para ayudar al personal médico de rehabilitación o paciente a dar seguimiento a la efectividad de una terapia de rehabilitación.

La aplicación web está compuesta por tres módulos. El primer módulo provee información sobre los ángulos de movimiento relacionados con las articulaciones metacarpofalángicas (MCF), interfalángica proximal (IP) y interfalángica distal (ID) de los cuatro dedos de la mano (Ver **Figura 16**). Así como, información de las articulaciones interfalángica distal (ID) y proximal (IP) del dedo pulgar. El segundo módulo provee información del ángulo de movimiento entre los dedos, relacionados con los movimientos de aducción y abducción; y finalmente, el tercer módulo provee información sobre los ángulos de rotación de la muñeca: flexión, extensión, ulnar, radial, pronación y supinación. Para demostrar la efectividad de la herramienta los autores realizaron un experimento en el cual un sujeto fue medido por un experto utilizando los métodos y herramientas indicadas en el área de rehabilitación, así como también emplearon la herramienta Web para contrastar las mediciones.

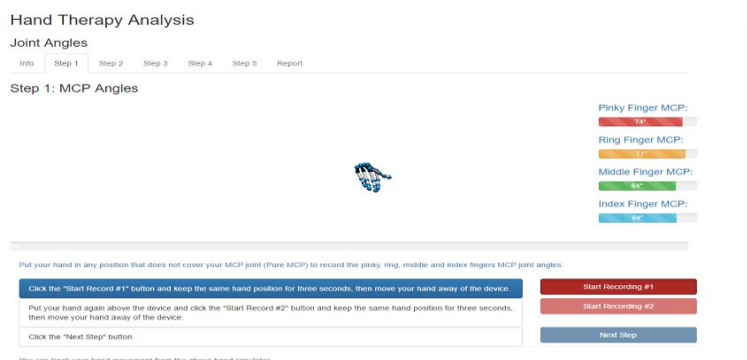


Figura 16. Módulo Web para medir las articulaciones. Fuente: (Elnaggar, 2016).

Sus resultados indican que obtuvieron un error mínimo de 9.1 y un error máximo de 22.9 grados al medir los ángulos de las articulaciones de los dedos, mientras que, el error mínimo entre los ángulos de los dedos fue de 10.8 y el máximo de 20.0 grados; y finalmente en las mediciones de la muñeca fue de 5.6 el menor y 9.3 grados el mayor.

3.5 Medición de los movimientos de agarre y soltar de los dedos

Okazaki S. et. al. (2017) mencionan que Leap Motion es un dispositivo con muchas ventajas en términos de costo, tamaño y precisión. Sin embargo, también dice que este no ha sido investigado en su enteridad para saber si el sensor tiene la suficiente precisión para evaluaciones clínicas, particularmente en la flexión y extensión de los dedos, los cuales son importante para el diagnóstico y el pronóstico en pacientes con accidentes cerebrovasculares o de parálisis cerebral. Por lo que decidieron probar la validez y confiabilidad del Leap Motion para medir los movimientos de agarre y de soltar. Un solo participante, repitió movimientos de flexión, extensión y la posición de la punta de sus dedos fue medida utilizando el Leap Motion de los lados, palmares, ulnares y dorsales de la mano (Ver **Figura 17**). La posición de la punta del dedo fue medida con un rastreador de movimiento electromagnético y un video. El movimiento de los dedos detectado por el Leap Motion fue comparado con los que fueron detectados con el otro instrumento.

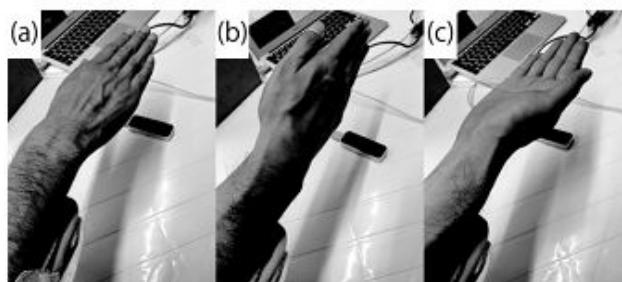


Figura 17. Fotografías de las posturas de la mano (a) palmar, (b) ulnar y (c) dorsal
Fuente: (Okazaki S. et. al. 2017).

Se determinó que el Leap Motion tiene una confiabilidad más alta en detectar la posición de la punta de los dedos sensando desde la parte palmar y dorsal de la mano, comparado con la parte ulnar. En las mediciones palmares y dorsales, se detectó una subestimación del movimiento del dedo en rango medio de su excursión comparado el movimiento detectado por el video. Sin embargo, la subestimación resultó ser altamente correlacionada, con sesgo proporcional, especialmente en las medidas del lado palmar, que pudieron ser calibradas por una análisis de regresión no lineal. Las mediciones del lado palmar, fueron las más estables para evaluar la

flexión y la extensión. Se concluyó que tomando en consideración la excursión y con calibración apropiada, la validez y confiabilidad del Leap Motion es suficiente para la evaluación cuantitativa de la flexión y extensión en laboratorios de experimentos y también en escenarios clínicos.

3.6 Medición de movimiento de la mano

Coton J. et. al. (2016) presentó un estudio para evaluar la factibilidad de usar el dispositivo Leap Motion para la evaluación clínica del movimiento de manos. Se desarrolló un sistema para permitirle a los pacientes con debilidad muscular utilizar el sensor. Este sistema fue utilizado en 2 pacientes afectados por atrofia muscular de la columna vertebral.

Existe un sistema preestablecido dentro del Leap Motion para seguir la trayectoria de los dedos de la mano (Item 180). Se usó con 4 sujetos, 2 pacientes con debilidad muscular y dos pacientes sanos.

El paciente debía estar sentado. su antebrazo debía estar relajado sobre una mesa o un soporte con el codo a aproximadamente 90°. El sujeto debía trazar el contorno de un CD con su dedo. Dependiendo de sus capacidades, 2 círculos son posibles, el círculo interno con un diámetro de 3.5 cm y el círculo externo con un diámetro de 12 cm. El dedo utilizado podía ser elegido por el sujeto y el ejercicio comenzaría en el centro del CD. Para utilizar el Leap Motion los usuarios deberían de mantener su antebrazo y mano balanceadas de entre 9 y 20 cm sobre el sensor, lo que significa que es un ejercicio casi imposible para las personas con atrofia muscular, por lo que se creó un soporte de plexiglas por el cual pudiera pasar la luz infrarroja de los LEDs del Leap Motion (Ver **Figura 18**).

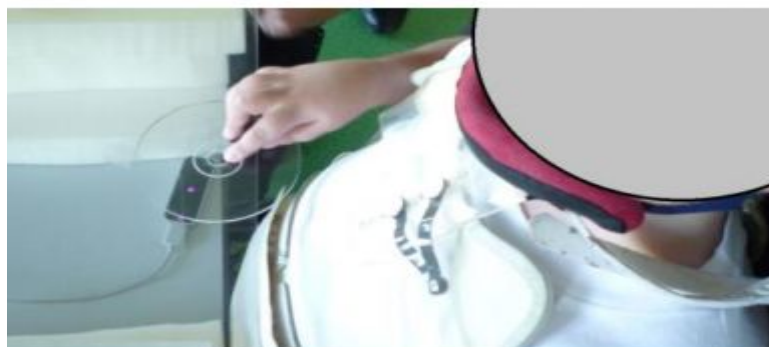


Figura 18. Instalación del Leap Motion y el disco de plástico. Fuente: (Coton et al.,

2016).

La evaluación consistió de un protocolo estándar cuyo propósito es cuantificar y representar enfermedades neuromusculares y su estado de avance.

Los resultados mostraron que el dispositivo Leap Motion no es lo suficientemente robusto para análisis clínicos precisos. También, la instalación del sistema propuesto complica el proceso.

Tabla 4. Tabla comparativa de estudios que proponen el uso de Leap Motion para medir la amplitud de movimiento en la mano.

Referencia	Articulación/ Movimiento	Medida de desempeño	No. de Sujetos	Edades	Estudio de Confiabili dad
<i>Chophuk et al.</i> (2015)	Separación entre dedo pulgar y dedo índice	Diferencia entre goniómetro y Leap Motion	1	No disponible	NO
Portillo et. al. (2015)	Temblor fisiológico de la mano	Comparación en Hz de los temblores	0 (mano sintética)	No disponible	NO
Hornsey et. al. (2015)	Apertura de la pinza pulgar-índice	Medida en cms	7	No disponible	NO
<i>Elnaggar et al.</i> (2016)	Medición de la flexión de las articulaciones de la mano	Diferencia entre goniómetro y Leap Motion	3	Entre 20 - 45 años	NO
Okazaki S. et. al. (2017)	Medición de la Flexión, extensión y la posición de la punta de sus dedos de los lados, palmares, ulnares y dorsales	Error cuadrático medio entre dispositivos	1	No disponible	NO

Coton J. et. al. (2016)	Precisión al seguir la guía de un disco de plástico	Error cuadrático medio	6 (2 sanos y 4 con Atrofia muscular)	No disponible	NO
Lopez-Trejo et al (2017)	Medición de las articulaciones de abducción y flexión del MCP	ICC	30 (20 jóvenes y 10 adultos mayores)	Jóvenes entre 18 y 28 años Adultos mayores entre 65 y 85 años	SI

3.7 Resumen

Los trabajos presentados en las secciones anteriores proponen aplicaciones basadas en Leap Motion para medir movimientos o articulaciones de la mano. Para determinar la eficacia de la aplicación desarrollada realizan mediciones en sujetos utilizando la aplicación desarrollada y una herramienta convencional, (p. ej. goniómetro). Sus resultados se limitan reportar pruebas preliminares del uso de las aplicaciones propuestas (Ver tabla 4). Sin embargo, a diferencia del trabajo previo, en esta tesis se propone realizar un estudio de confiabilidad, que es aquel en el cual se determina la consistencia y equivalencia entre las mediciones obtenidas mediante dos instrumentos (Scholtes et al., 2011).

Capítulo 4: Diseño de *LeapAngles*

En este capítulo se presenta la funcionalidad de *LeapAngles*, el software desarrollado en este trabajo de tesis. El cual utiliza la información de Leap Motion para calcular la amplitud del movimiento de las articulaciones de la mano.

4.1 Introducción

Se desarrolló una aplicación para computadora a la cual llamamos *LeapAngles*. Esta utiliza el dispositivo Leap Motion (modelo: LM-010) para modelar la mano en un espacio tridimensional. De este modelo tridimensional se pueden extraer coordenadas de la posición de los huesos o articulaciones que componen la mano.

La aplicación fue desarrollada en lenguaje JAVA, Versión 7; utilizando el entorno de desarrollo NetBeans¹, versión 8.1. Para configurar el dispositivo se utilizó la librería nativa para JAVA, llamada Leap.jar² y el visualizador de realidad virtual descrito en la sección 2.2.4 que son proporcionados por el fabricante en la siguiente dirección electrónica: <https://www.leapmotion.com/setup>.

4.2 Interfaz de LeapAngles

La interfaz de la aplicación *LeapAngles* presenta la siguiente información: (1) Un menú de opciones para seleccionar la amplitud de movimiento que se desea medir. Este menú está formado por los botones: MCP, DIP, PIP y Abducción; (2) una imagen que indica que amplitud va a ser medida. Esta imagen sirve también para dar indicaciones al paciente de cómo debe colocar su mano sobre el dispositivo Leap Motion; (3) El valor medido de la amplitud de movimiento de cada una articulaciones involucradas, por ejemplo, en la **Figura 19** presenta la amplitud de flexión de MCP de cuadro diferentes dedos en grados; y finalmente, (4) el botón de start o activación, cuya funcionalidad es tomar mediciones durante 5 segundos, realizar los cálculos y almacenar las mediciones en un archivo con extensión .txt (del inglés text

¹ <https://netbeans.org/>

² https://developer-archive.leapmotion.com/documentation/java/devguide/Leap_SDK_Overview.html

file); y finalmente, el visualizador de Leap Motion para verificar que la mano se ha detectado correctamente por el dispositivo Leap Motion (Ver **Figura 20**).



Figura 19. Interfaz de *LeapAngles*.

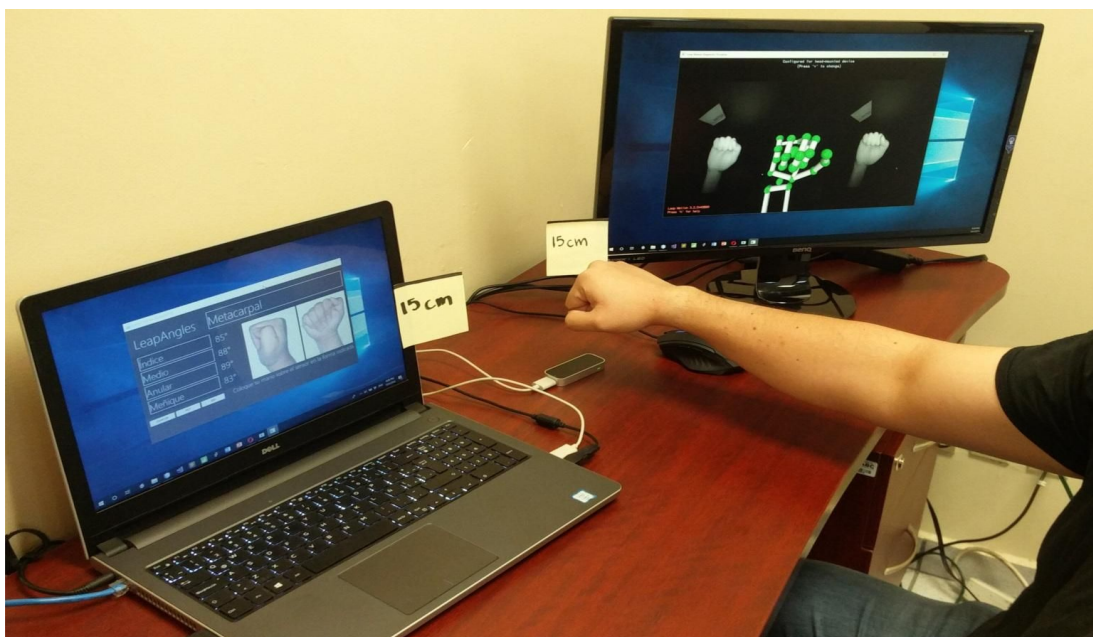


Figura 20. *LeapAngles* y el visualizador de Leap Motion.

4.2 Captura de información

La información que se captura al momento de presionar el botón de inicio en la interfaz de usuario de *LeapAngles*. Un total de 20 mediciones son tomadas en 5 segundos, tal como se muestra en la **Figura 21**. Para tener una sola medición se calcula la moda de cada grupo de mediciones. Esto es el número que más se repite, por ejemplo, en el caso de la Figura 21, el ángulo detectado entre el dedo índice y medio sería 11.08 grados.

1	Ind-Med	Med-Anu	Anu-Men
2	10.975692	10.558998	25.321457
3	11.011097	10.559277	25.346006
4	11.034531	10.553164	25.37641
5	11.0517	10.55568	25.403322
6	11.06637	10.557824	25.424229
7	11.079653	10.560545	25.444298
8	11.085462	10.566766	25.465664
9	11.086884	10.573059	25.48161
10	11.088286	10.571794	25.49487
11	11.090221	10.566394	25.498003
12	11.091215	10.565742	25.485561
13	11.091393	10.563171	25.468086
14	11.088713	10.563916	25.447311
15	11.088321	10.556761	25.434486
16	11.080968	10.560358	25.428705
17	11.077609	10.55732	25.423145
18	11.079812	10.551671	25.415754
19	11.084592	10.5404005	25.408943
20	11.085391	10.53605	25.405638

Figura 21. Mediciones de la amplitud del movimiento recolectadas con LeapAngles.

4.3 Cálculo de la amplitud del movimiento

Para calcular la amplitud de movimiento de las articulaciones en este trabajo de tesis se adoptó el modelo propuesto por Pham et al 2015, el cual se presenta en la **Figura 22**.

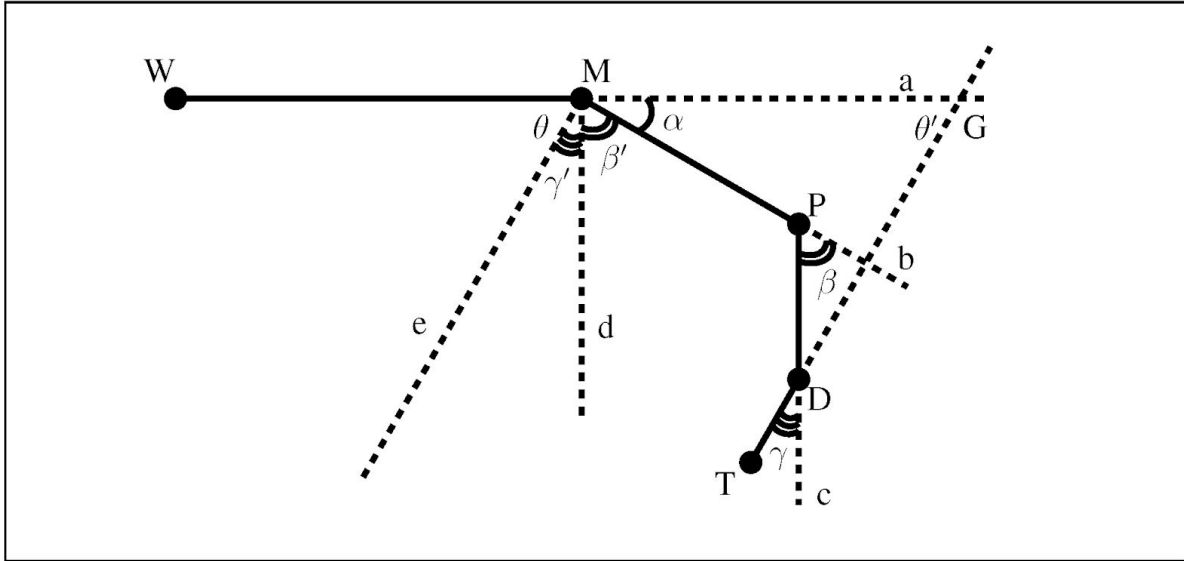


Figura 22: Modelo propuesto geométrico del dedo propuesto por Pham et al., 2015 para calcular posiciones y ángulos de las articulaciones de la mano. Fuente: (Pham et al., 2015).

4.3.1 Medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano.

Para calcular la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano se utiliza la operación de producto punto, mostrada en la **Ecuación (1)**, que geométricamente, es el producto de las magnitudes euclidianas de dos vectores (A y B) y el coseno del ángulo entre ellos (Marden, 1998). Considerando que la medida de interés es el ángulo θ , por lo que la ecuación utilizada se presenta en **Ecuación (2)**.

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \theta \quad (1)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| |\vec{B}|}\right) \quad (2)$$

En donde A y B son vectores representados por los dedos de la mano entre los que se desea medir un ángulo.

En el software *LeapAngles* se utilizó la función de **angleTo** de la librería Leap.jar, la cual ayuda a obtener el ángulo en radianes entre dos vectores tridimensionales (x,y,z). A partir del ángulo obtenido se utilizó la función de java **Math.toDegrees** para transformar este resultado a grados, una vez que se tienen los resultados en grados, de todas las mediciones recolectadas se obtiene la moda,

el valor que más se repetía. Se considero la moda porque se observó que cuando la mano era colocada sobre el Leap Motion los ángulos varían y posteriormente, se mantienen estables las mediciones hasta que el paciente mueve su mano fuera del ángulo de visión del dispositivo Leap Motion. Por lo que el ángulo real era el que más se repetía (Ver **Figura 23**).

1	Ind-Med	Med-Anu	Anu-Men
2	10.975692	10.558998	25.321457
3	11.011097	10.559277	25.346006
4	11.034531	10.553164	25.37641
5	11.0517	10.55568	25.403322
6	11.06637	10.557824	25.424229
7	11.079653	10.560545	25.444298
8	11.085462	10.566766	25.465664
9	11.086884	10.573059	25.48161
10	11.088286	10.571794	25.49487
60	10.364241	11.085232	24.773428
61	10.26897	11.1481285	24.677876
62	10.197749	11.195332	24.574118
63	10.129781	11.227387	24.474407
64	10.071323	11.241814	24.390007
65	10.017889	11.260053	24.30334
66	9.971628	11.27428	24.216301
67	9.932463	11.2825575	24.135832
68	9.892328	11.287392	24.065168
69	9.859355	11.292781	24.000517
70	9.834913	11.296687	23.942677
148	11.601962	8.807675	26.775814
149	11.715645	8.7418375	26.731684
150	11.808341	8.679192	26.70551
151	11.886853	8.618374	26.679073
152	11.9579525	8.563757	26.64938
153	12.03067	8.515599	26.610949
154	12.090198	8.473151	26.562548
155	12.1301775	8.436987	26.503836
156	12.170724	8.405996	26.45421
157	12.195273	8.3827915	26.40499
158	12.196081	8.376698	26.359547
159	12.196276	8.372923	26.322193
160	12.189921	8.372524	26.282673

Figura 23. Muestreo de las mediciones de *LeapAngles*.

4.3.2 Medición de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica

Para calcular la amplitud del movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica del modelo propuesto por Pham et al., 2015 se obtuvo la ecuación para el ángulo α mostrada en la **Ecuación 3**.

$$\alpha = \arccos \frac{\vec{WM} \cdot \vec{MP}}{|\vec{WM}| \cdot |\vec{MP}|} \quad (3)$$

En donde WM y MP son vectores representados por los huesos de los falanges de cada dedo a ser medido.

Capítulo 5: Estudio de Confiabilidad

Este capítulo inicia describiendo el proceso de recolección de datos con respecto a la amplitud de movimiento de las articulaciones de la mano en jóvenes y adultos mayores. Posteriormente, se realiza un análisis descriptivo de los datos, y se finaliza, con un análisis estadístico del índice de correlación intraclase (ICC) para determinar la equivalencia entre las mediciones realizadas con el goniómetro y la aplicación *LeapAngles*.

5.1 Recolección de datos

El objetivo de esta actividad es recolectar mediciones de la amplitud de movimiento flexoextensor de la articulación metacarpofalángica proximal y distal. Así como, la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano en Jóvenes y adultos mayores.

5.1.1 Mediciones en Jóvenes

Se midió a diez jóvenes; 9 hombres y 1 mujer. Las edades de los participantes oscilaban entre los 21 y 28 de edad; la edad promedio fue de 22.4 años. Los participantes son diestros y declararon no tener problemas en las articulaciones de la mano.

La medición consistió en dos etapas. En la primera etapa, un fisioterapeuta realizó mediciones de la amplitud del movimiento flexoextensor de la articulación metacarpofalángica proximal y distal. Así como, de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano utilizando un goniómetro, tal como se muestra en la **Figura 24** y **Figura 25**.



Figura 24. Fisioterapeuta realizando la medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano con un goniómetro NC-70100.

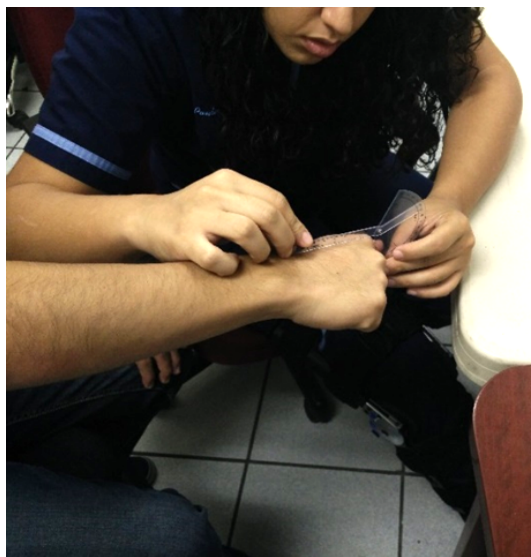


Figura 25. Fisioterapeuta realizando la medición de la amplitud del movimiento de flexoextensión de la articulación metacarpofalángica proximal en la mano con un goniómetro EGM-426.

En la segunda etapa, consistió en que el fisioterapeuta realizaba las mismas mediciones pero utilizando la aplicación *LeapAngles*.

En esta etapa se le solicitaba al sujeto participante que colocará su mano derecha sobre el dispositivo Leap Motion, a una distancia de 15 cm, para asegurar que estuviera dentro del cuadro de interacción, tal como se muestra en la **Figura 26 y 27**. Se consideró una distancia de 15 cm debido a que a esta distancia en el

sensor detecta las articulaciones y puede desplegar la imagen de estas en el visualizador.

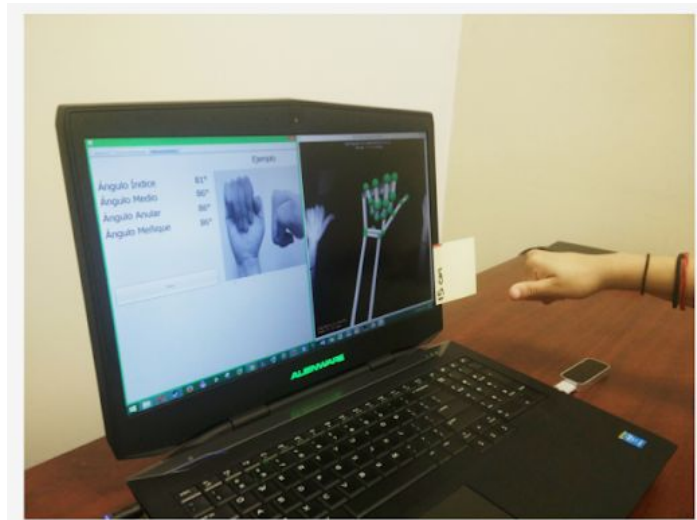


Figura 26. Medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano utilizando la aplicación *LeapAngles*.

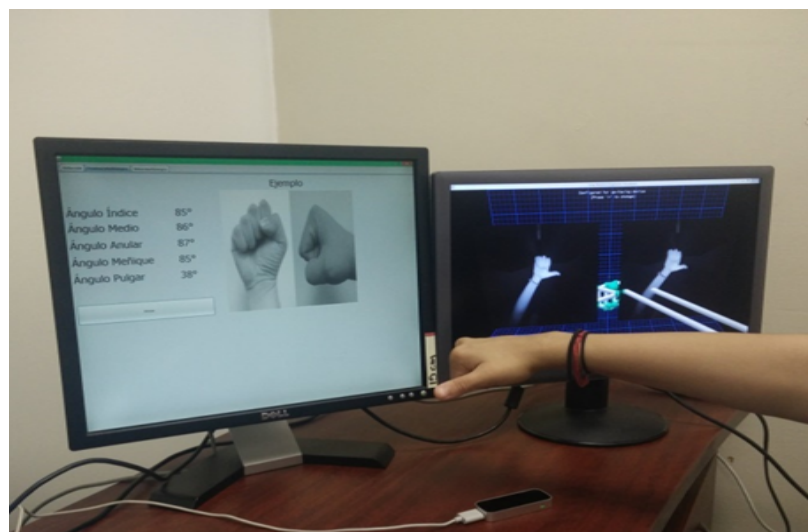


Figura 27. Medición de la amplitud del movimiento de flexoextensión de la articulación metacarpofalángica proximal y distal en la mano utilizando la aplicación *LeapAngles*.

5.1.1.1 Resultados

En las **Figuras 28, 29 y 30** se presentan las mediciones recolectadas de la abducción entre los dedos de la mano. Mientras que en las **Figuras 31, 32, 33 y 34** se representan las mediciones recolectadas de la flexión de la articulación

metacarpofalángica.

Con respecto a la amplitud de la abducción, se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento entre medio y anular, con un error promedio de 3.5 grados con una desviación estándar de 2.3. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento entre anular y meñique, con un error promedio de 5.5 grados con una desviación estándar de 5.3.

Además, con respecto a la amplitud de movimiento de las articulaciones metacarpofalángicas se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento entre índice y anular, con un error promedio de 6 y 6.4 grados con una desviación estándar de 2.8 y 3.7 respectivamente. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento entre medio y meñique, con un error promedio de 5.7 y 7.7 grados con una desviación estándar de 3.9 y 4.4 respectivamente.

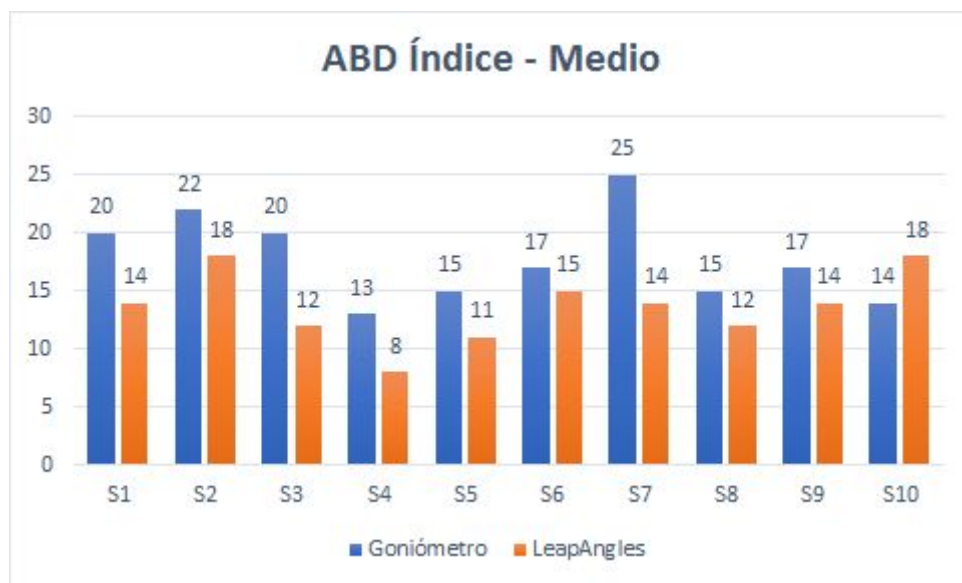


Figura 28. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos índice y medio en jóvenes. Medición con goniómetro y Medición con *LeapAngles*.

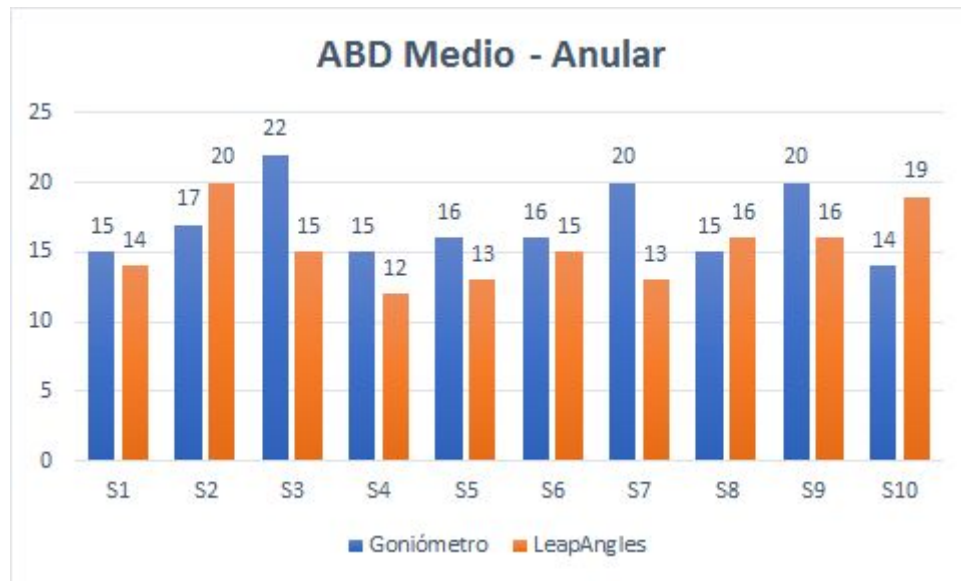


Figura 29. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento entre el dedo medio y anular en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

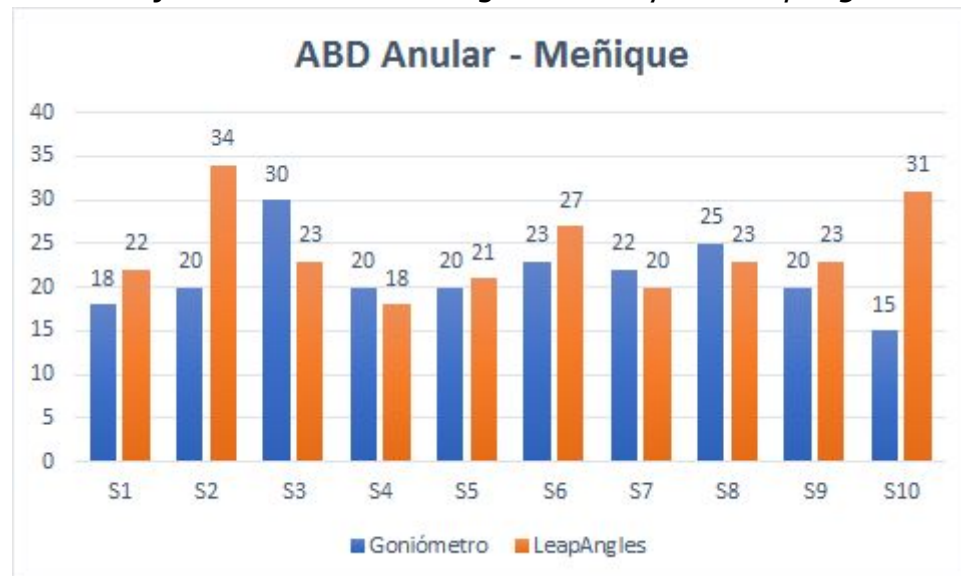


Figura 30. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos anular y meñique en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

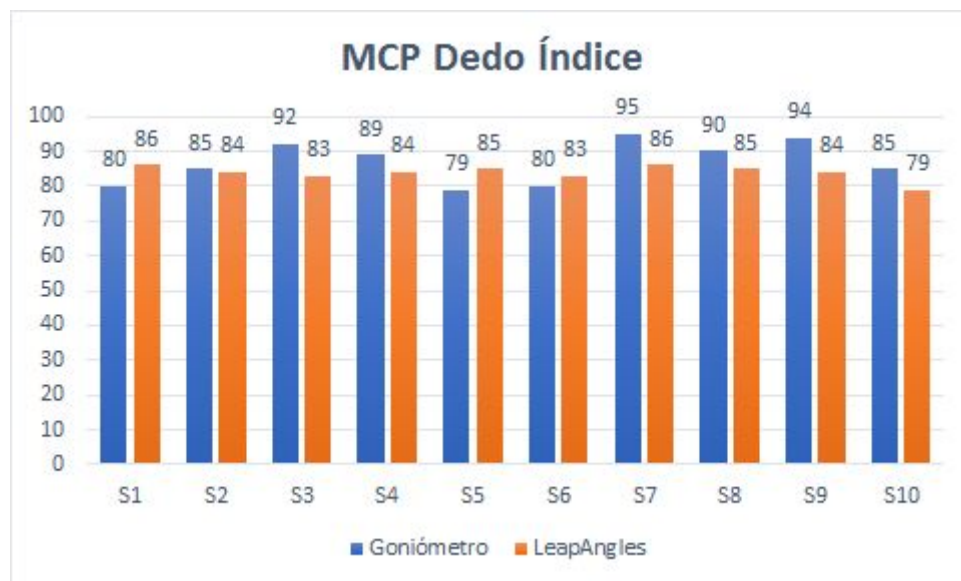


Figura 31. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo índice en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

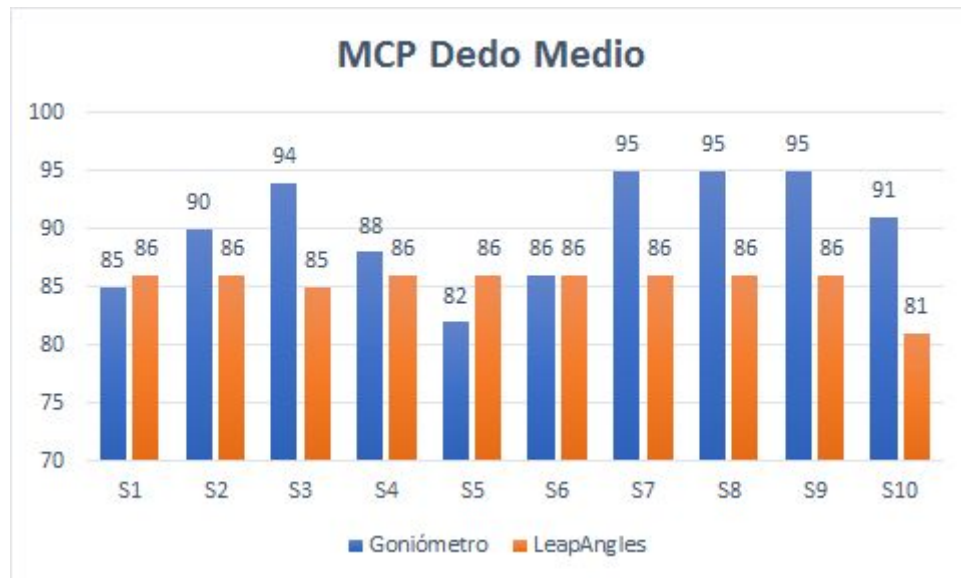


Figura 32. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo medio en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

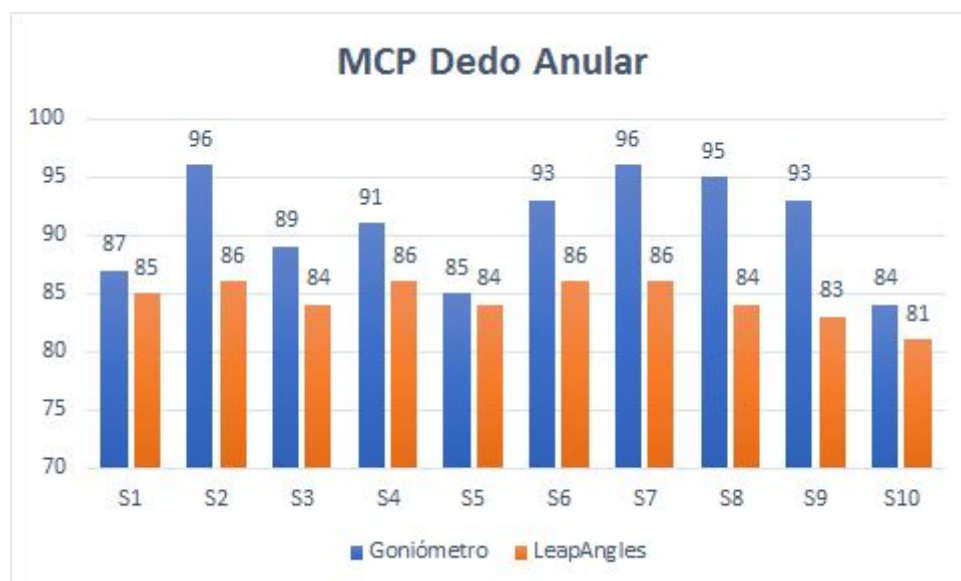


Figura 33. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo anular en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

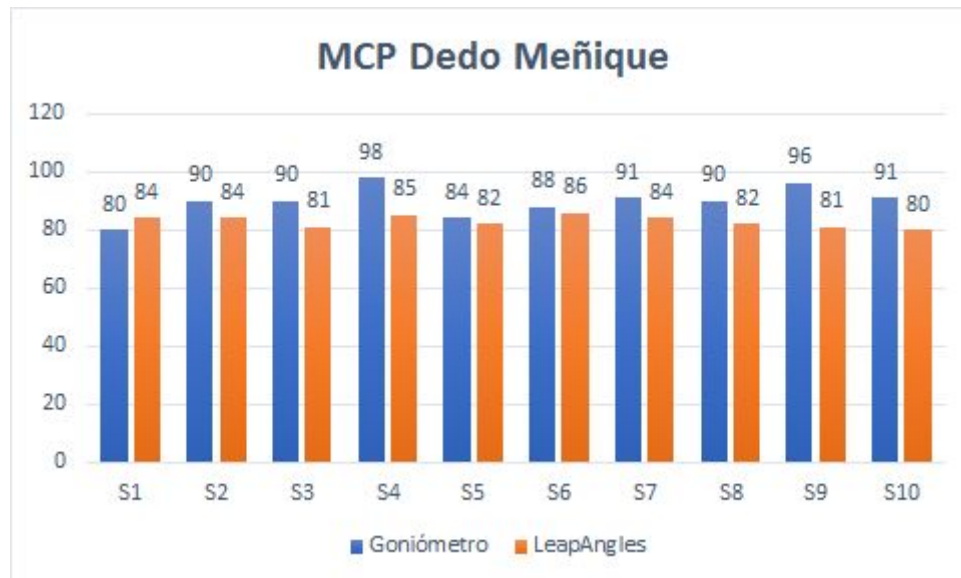


Figura 34. Muestras recolectadas de la amplitud del movimiento de flexión del dedo anular en jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

5.1.2. Mediciones en Adultos Mayores

En este experimento participaron 10 adultos mayores de la casa del abuelo. Las edades de los adultos mayores oscilan entre 77 y 94 años de edad; la edad promedio fue de 80.5 años. Los adultos mayores son diestros y todos manifestaron presentar problemas en las articulaciones consecuencia del envejecimiento natural.

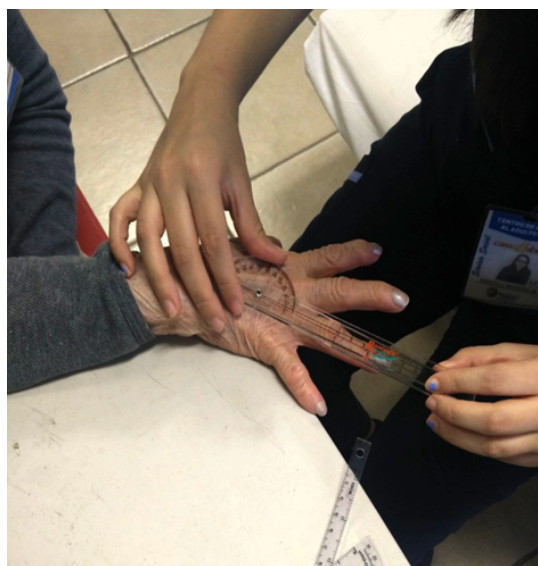


Figura 35. Especialista realizando la medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano utilizando un goniómetro NC-70100.



Figura 36. Especialista realizando la medición de la amplitud del movimiento de flexoextensión del metacarpo en la mano utilizando un goniómetro EGM-426.



Figura 37. Medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano en adultos mayores utilizando la aplicación *LeapAngles*.

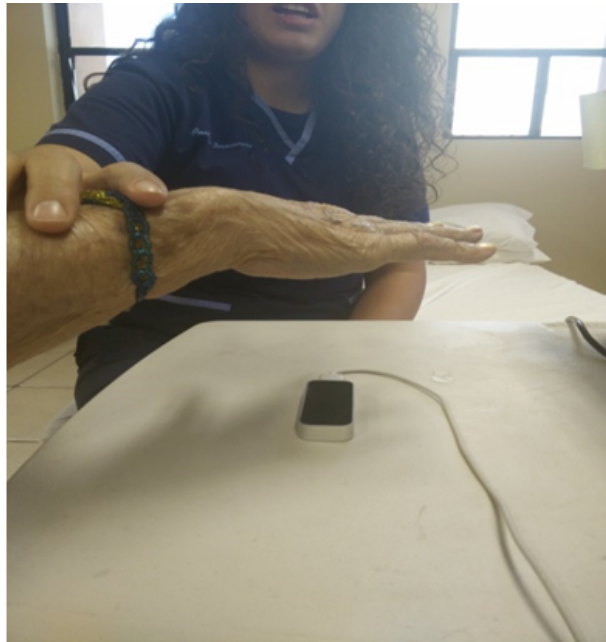


Figura 38. Medición de la amplitud del movimiento de abducción de los dedos de la mano utilizando la aplicación *LeapAngles*.

5.1.2.1 Resultados

En las **Figuras 39, 40 y 41** se presentan las mediciones de la abducción. Mientras que de la **Figura 42** a la **Figura 49** se presentan mediciones de la de la amplitud de la articulación metacarpofalángica proximal y distal.

Con respecto a la amplitud de la abducción, se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento entre anular y meñique, con un error promedio de 5.4 grados con una desviación estándar de 4.6. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento entre medio y anular, con un error promedio de 12.9 grados con una desviación estándar de 9.1.

Además, con respecto a la amplitud de movimiento de las articulaciones metacarpofalángicas se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento entre anular y medio, con un error promedio de 10.5 y 10.9 grados con una desviación estándar de 5.8 y 6.1 respectivamente. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento entre índice y meñique, con un error promedio de 14.6 y 13.3 grados con una desviación estándar de 10.5 y 7.6.

Por último, con respecto a la amplitud de movimientos de las articulaciones

proximales se puede observar que las mediciones con menor diferencia son la amplitud de movimiento entre índice y meñique, con un error promedio de 14.8 y 13.8 grados con una desviación estándar de 10.2 y 9.3 respectivamente. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento entre anular y medio, en promedio 16.1 y 15.1 grados con una desviación estándar de 12.6 y 10.9.

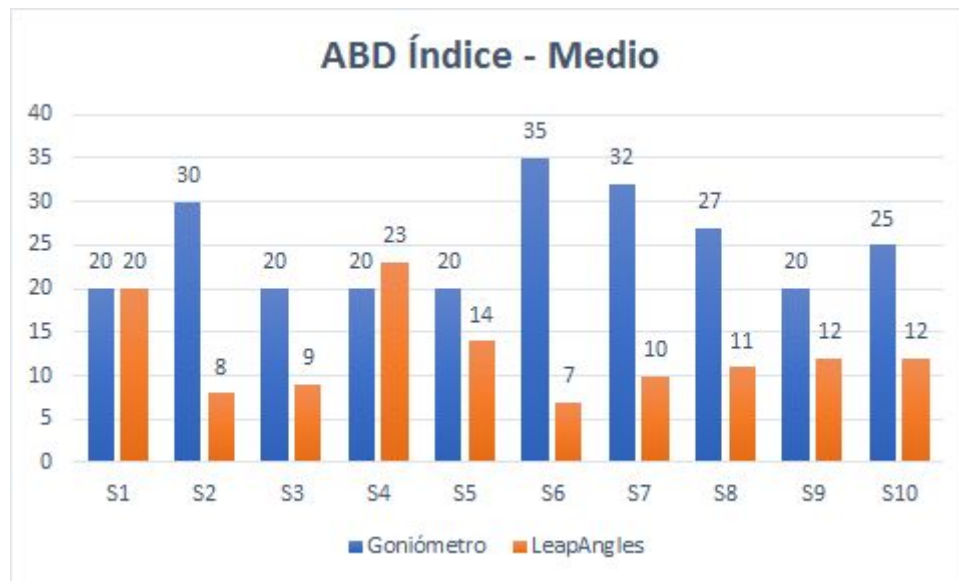


Figura 39. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos índice y medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles*.

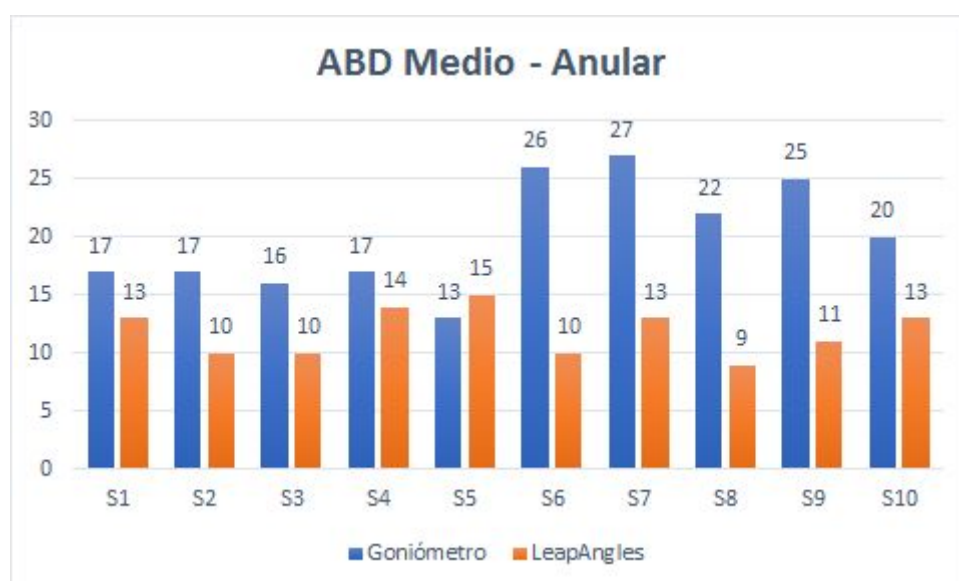


Figura 40. Mediciones de la amplitud del movimiento entre el dedo medio y anular en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

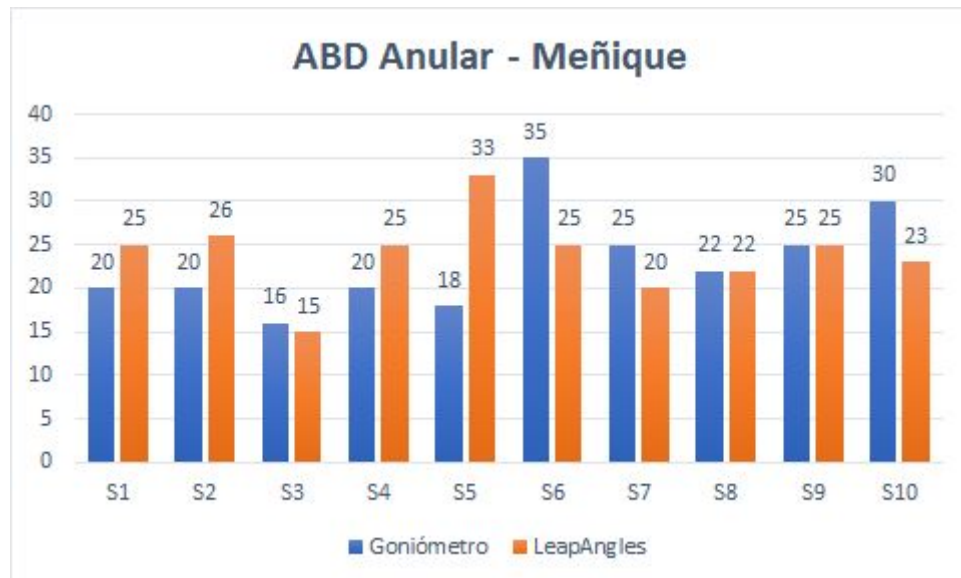


Figura 41. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos anular y meñique en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

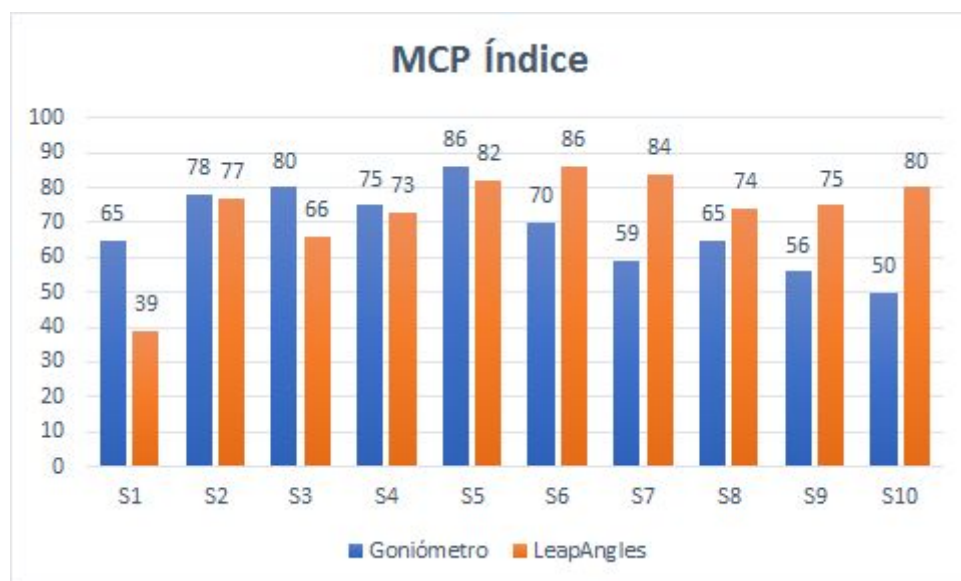


Figura 42. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo índice en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

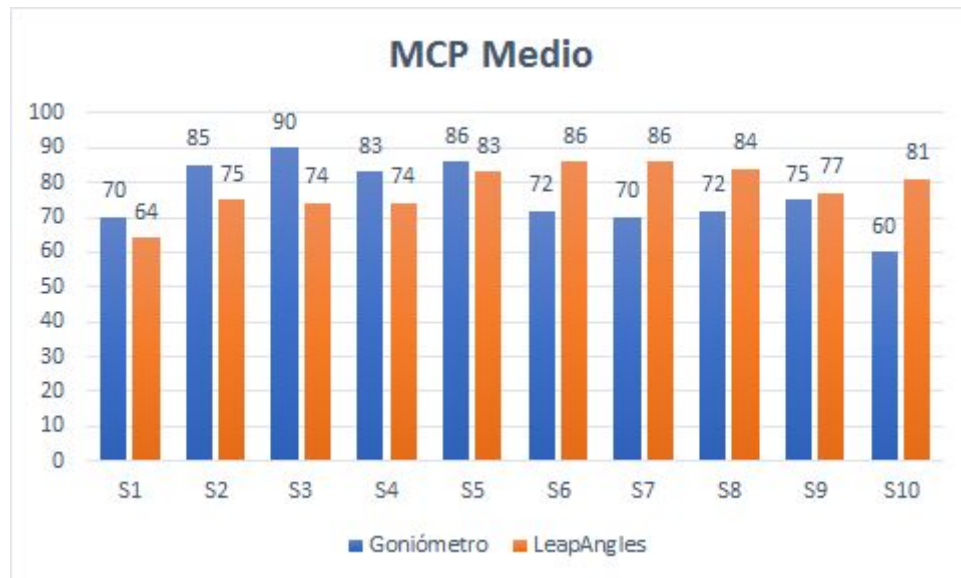


Figura 43. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

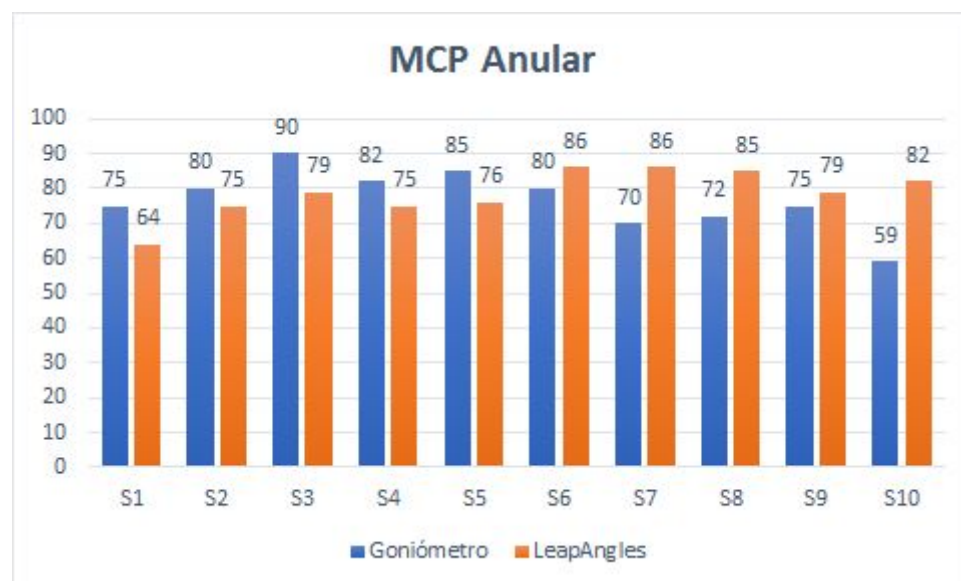


Figura 44. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

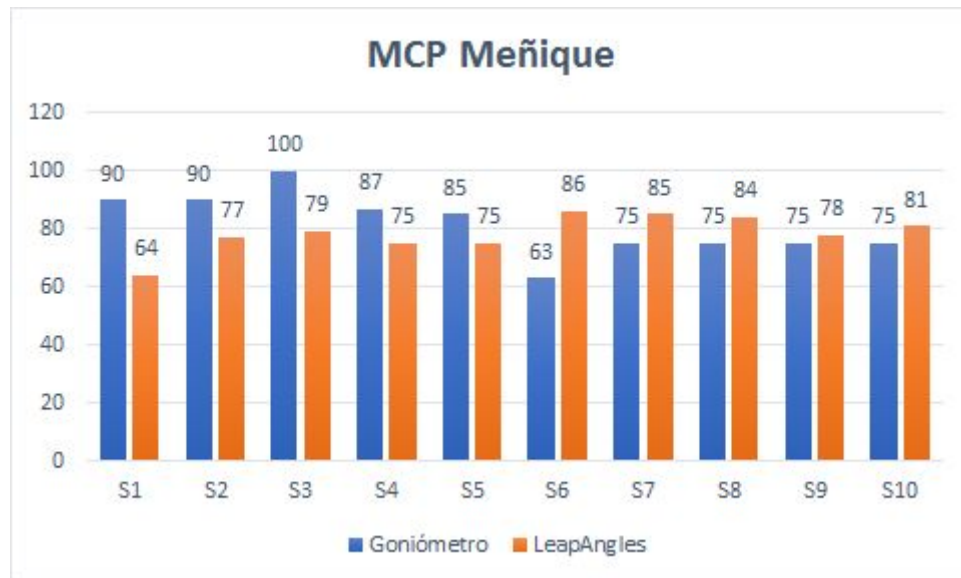


Figura 45. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo meñique en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

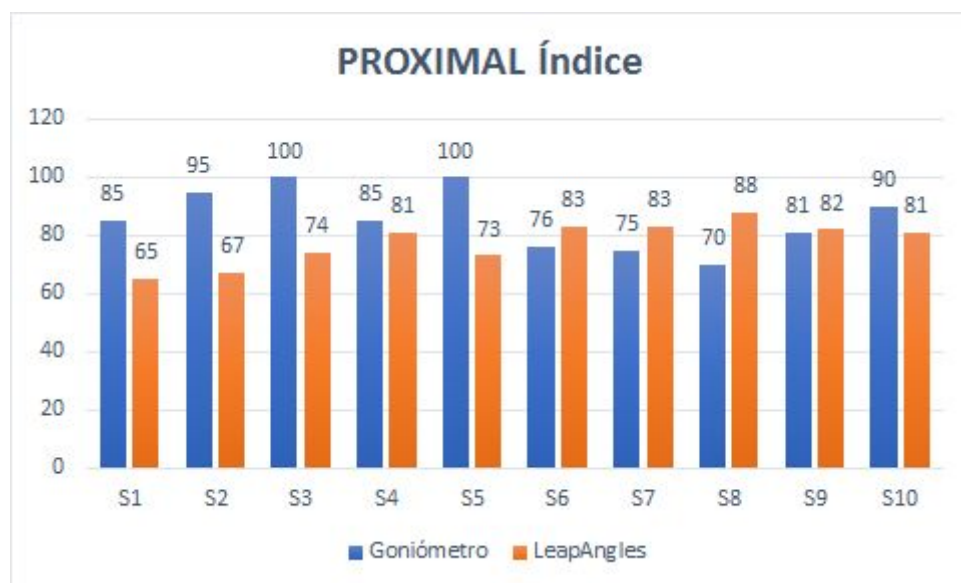


Figura 46. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo índice en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

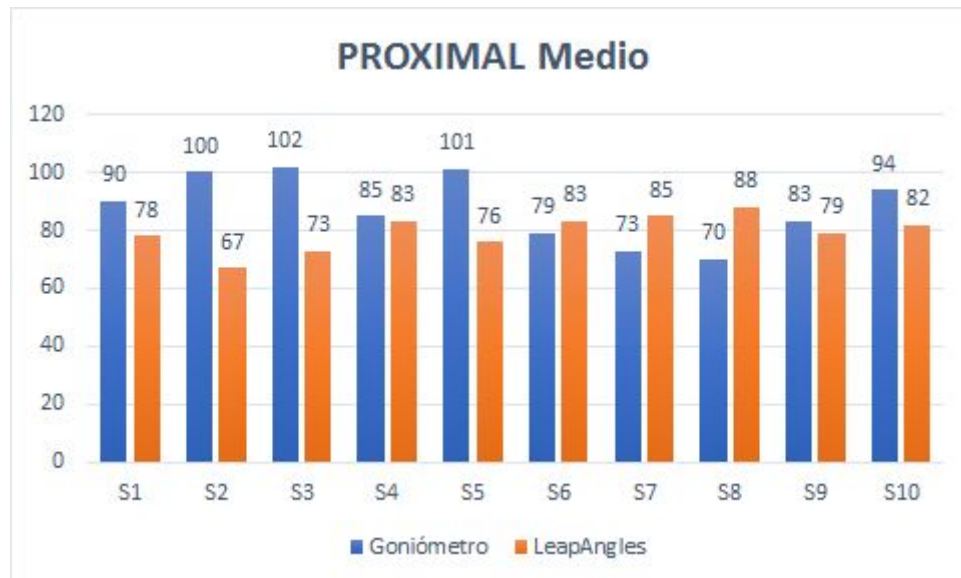


Figura 47. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo medio en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

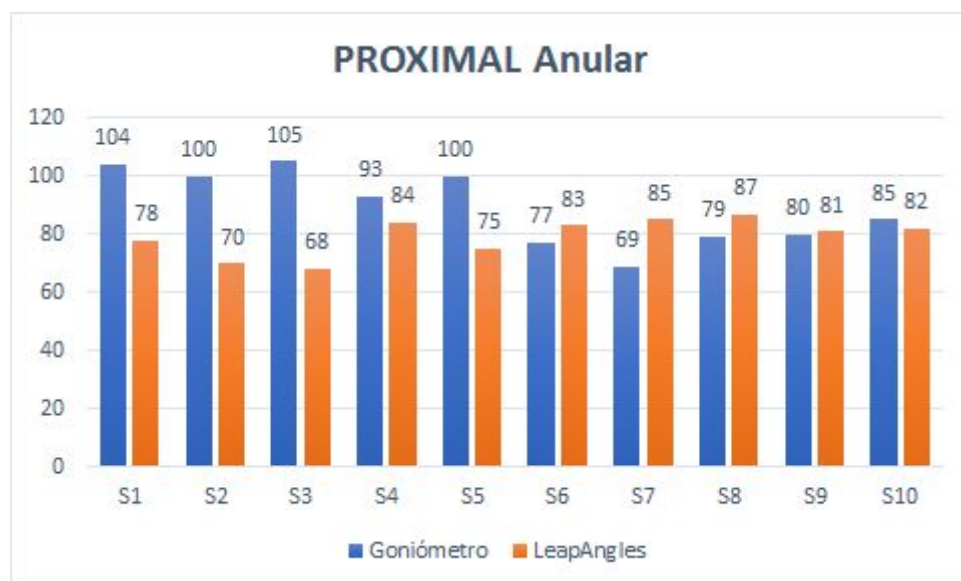


Figura 48. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo anular en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

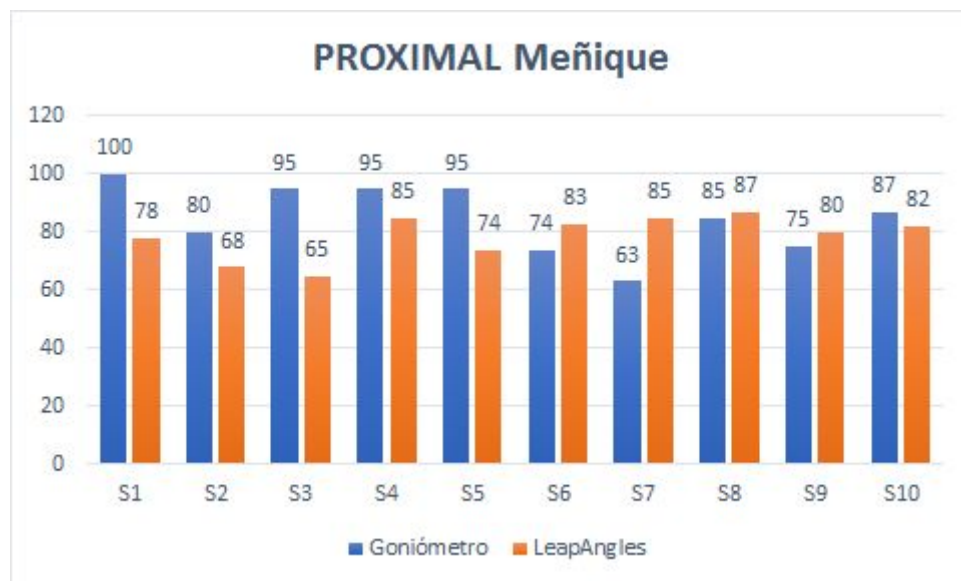


Figura 49. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo meñique en adultos mayores. Medición con goniómetro y con *LeapAngles*.

5.3 Recolección de datos utilizando dos Leap Motion

5.3.1 Descripción del Experimento

En el experimento participaron 3 fisioterapeutas, 20 sujetos de entre 18 y 25 años, con una edad promedio de 20.8. Todos los sujetos son diestros y no presentaban ningún problema con sus articulaciones de la mano.

En esta ocasión se utilizaron dos sensores Leap Motion para medir la abducción y la amplitud de las articulaciones metacarpofalángicas. El primer Leap Motion se colocó a un ángulo de 180°, mientras que el segundo dispositivo, se colocó a un ángulo de 120°, esto permite tomar mediciones de la mano desde dos perspectivas diferentes y comparar los resultados de ambas mediciones.

El software *LeapAngles* fue modificado para que recolectar mediciones de los dos dispositivos en diferentes instancias de tiempo; esto es, se realizaban mediciones independientes con cada Leap Motion y posteriormente, ambas mediciones era comparadas.

Al igual que en los experimentos descritos en las secciones 5.1.1 y 5.1.2, se realizaron dos fases. En la primera los fisioterapeutas recolectaban mediciones de la amplitud del movimiento flexoextensor de la articulación metacarpofalángica proximal y distal. Así como, de la amplitud del movimiento de abducción entre los

dedos de la mano utilizando un goniómetro, tal como se muestra en la **Figura 50a** y **Figura 50b**; y posteriormente, se utilizaba el software LeapAngles modificado (ver **Figura 51**).

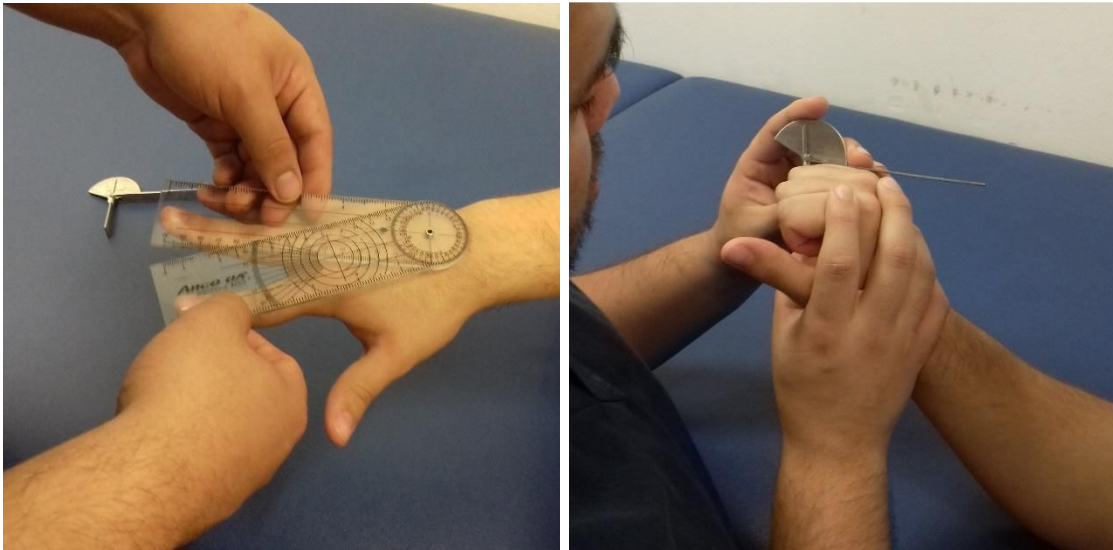


Figura 50. Fisioterapeuta realizando la medición: a) amplitud del movimiento de abducción con un goniómetro angular de 7 y 360 grados; y) amplitud de la flexión con los goniómetros baseline 12-1011 deluxe de metal.



Figura 51. Medición del movimiento de abducción y flexión con el software *LeapAngles* modificado.

5.3.2 Resultados

En las **Figuras 52, 53 y 54** se presentan las mediciones obtenidas de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano. Mientras que de la **Figura 55** a la **67** se presentan las mediciones de la amplitud de movimiento de las articulaciones metacarpofalángica, proximal y distal.

Con respecto a la amplitud de la abducción, se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento entre anular y meñique utilizando el Leap Motion a 180 grados, con un error promedio de 6 grados con una desviación estándar de 5.4. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento entre índice y medio utilizando el Leap Motion a 180 grados, con un error promedio de 12.2 grados con una desviación estándar de 9.5.

Además, con respecto a la amplitud de movimiento de las articulaciones metacarpofalángicas se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento del dedo anular con un error promedio de 4 grados utilizando el Leap Motion en un ángulo de 120 grados y del dedo índice con un error promedio de 8 grados una utilizando el Leap Motion en ángulo de 120 grados, con una desviación estándar de 2.9 y 6.4 respectivamente . Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento del dedo medio con un error promedio de 16.6 grados utilizando el Leap Motion en ángulo de 180 grados y del dedo meñique con un error promedio de 15 grados utilizando el Leap Motion en ángulo de 180 grados, con una desviación estándar de 8.1 y 7.8 respectivamente.

Con respecto a la amplitud de movimiento de las articulaciones proximales se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento del dedo meñique con un error promedio de 14.2 grados utilizando el Leap Motion en un ángulo de 180 grados y del dedo medio con un error promedio de 15 grados una utilizando el Leap Motion en ángulo de 180 grados, con una desviación estándar de 11.9 y 11.4 respectivamente . Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento del dedo índice con un error promedio de 30.4 grados utilizando el Leap Motion en ángulo de 120 grados y del

dedo anular con un error promedio de 25.2 grados utilizando el Leap Motion en ángulo de 120 grados, con una desviación estándar de 10.8 y 14.2 respectivamente.

Por último, Con respecto a la amplitud de movimiento de las articulaciones distales se puede observar que las mediciones con la menor diferencia son la amplitud del movimiento del dedo anular con un error promedio de 30.4 grados utilizando el Leap Motion en un ángulo de 180 grados y del dedo índice con un error promedio de 32 grados una utilizando el Leap Motion en ángulo de 180 grados, con una desviación estándar de 21.2 y 10.7 respectivamente. Mientras que, las de mayor diferencia se presenta en la amplitud del movimiento del dedo medio con un error promedio de 44.8 grados utilizando el Leap Motion en ángulo de 120 grados y del dedo meñique con un error promedio de 42.6 grados utilizando el Leap Motion en ángulo de 120 grados, con una desviación estándar de 25.5 y 19.5 respectivamente.

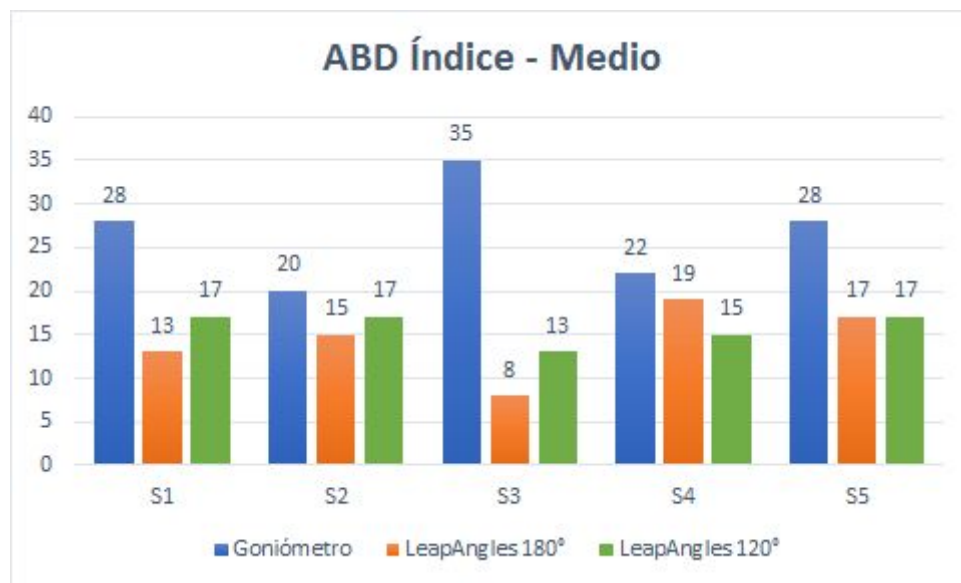


Figura 52. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos índice y medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

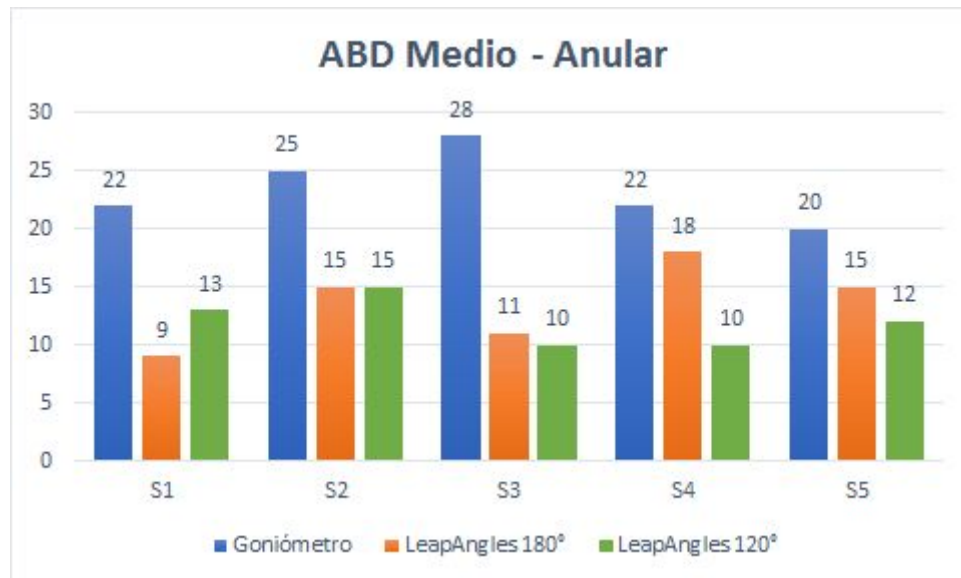


Figura 53. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos medio y anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

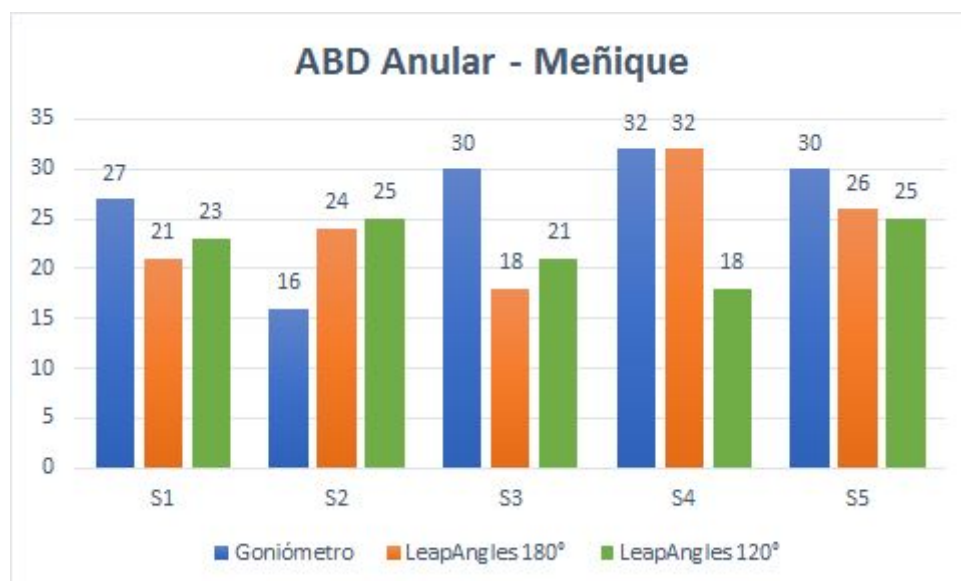


Figura 54. Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos anular y meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y medición con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

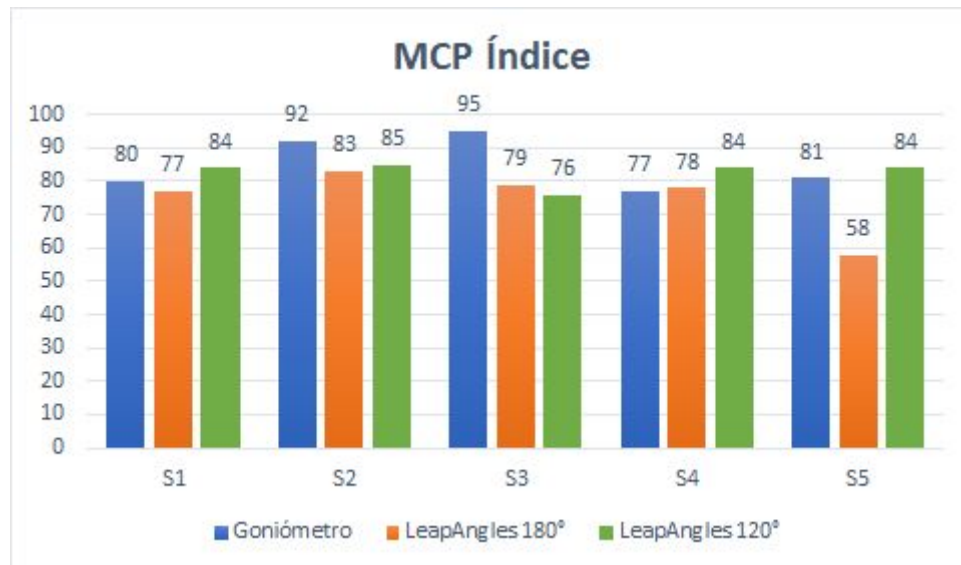


Figura 55. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo índice en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

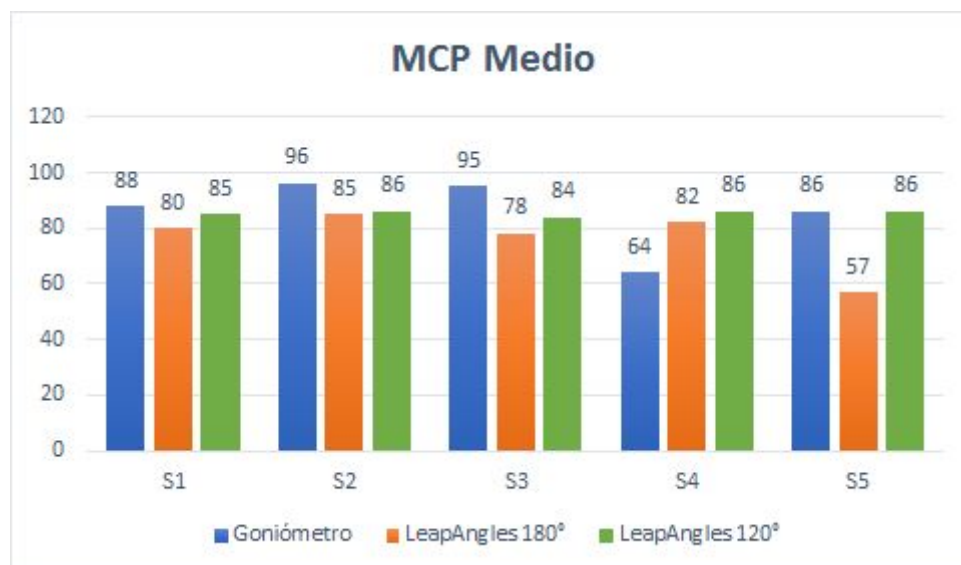


Figura 56. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

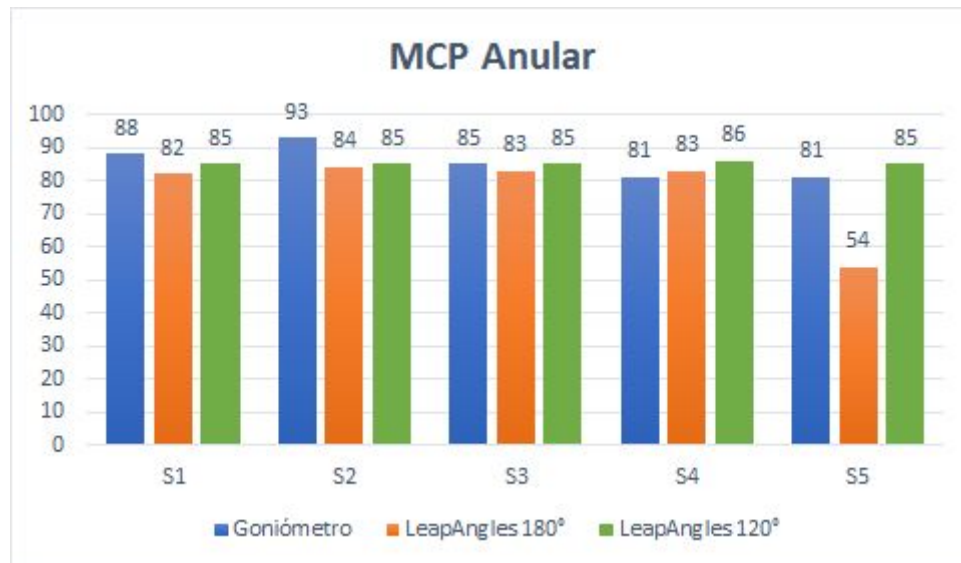


Figura 57. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

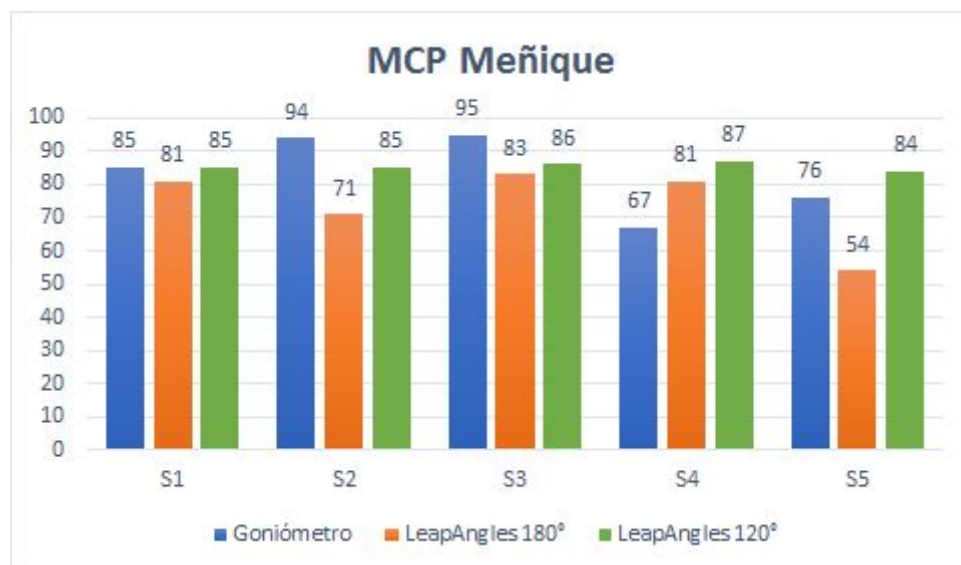


Figura 58. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación MCP del dedo meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

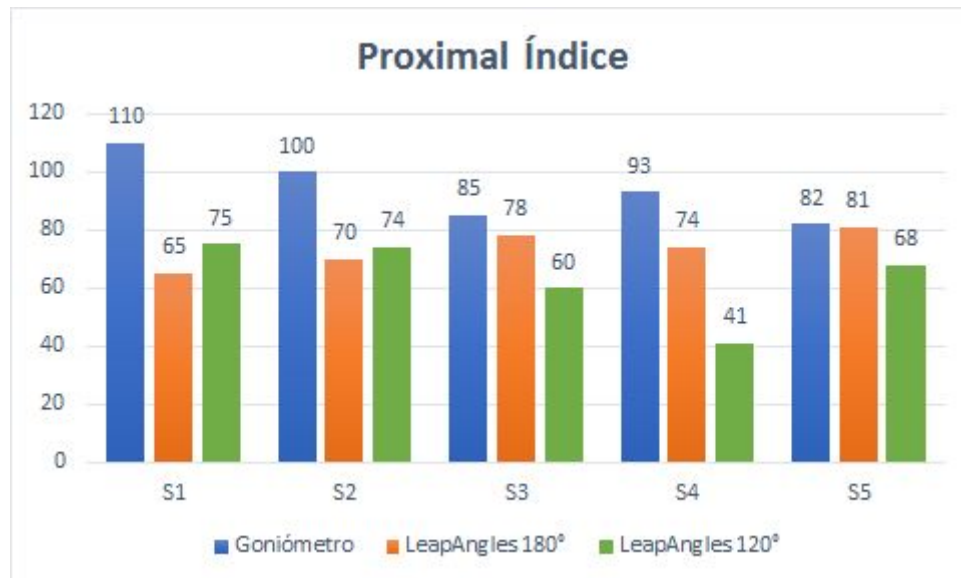


Figura 60. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo índice en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

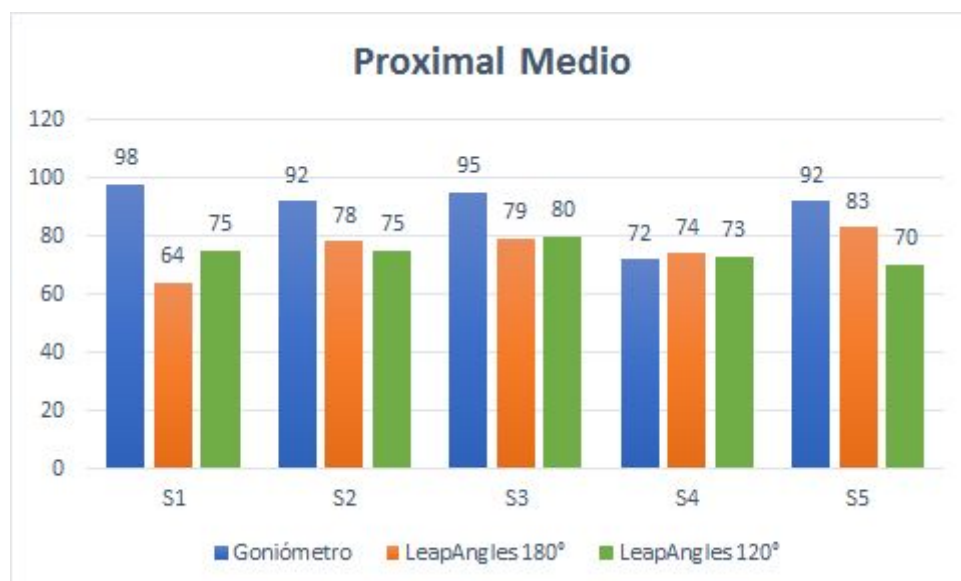


Figura 61. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

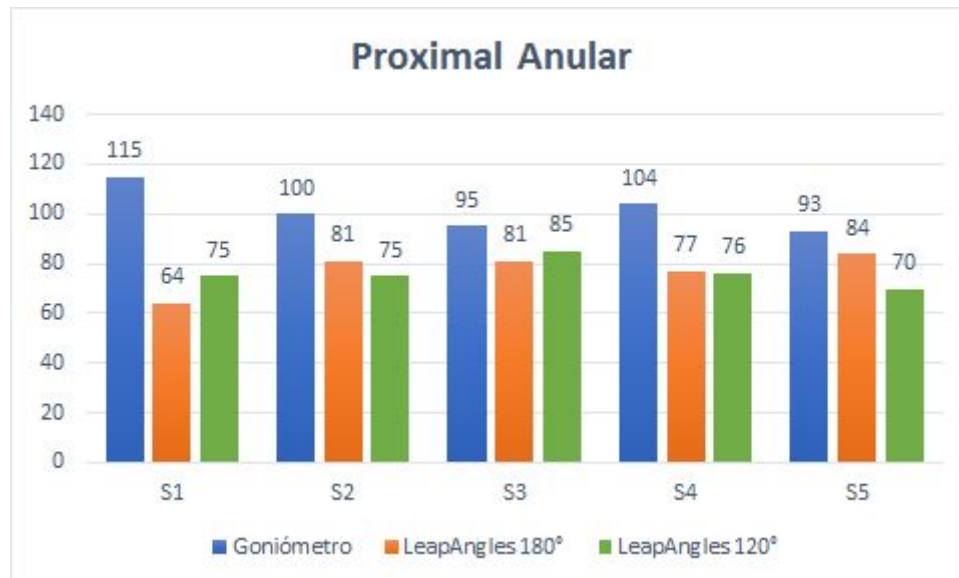


Figura 62. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

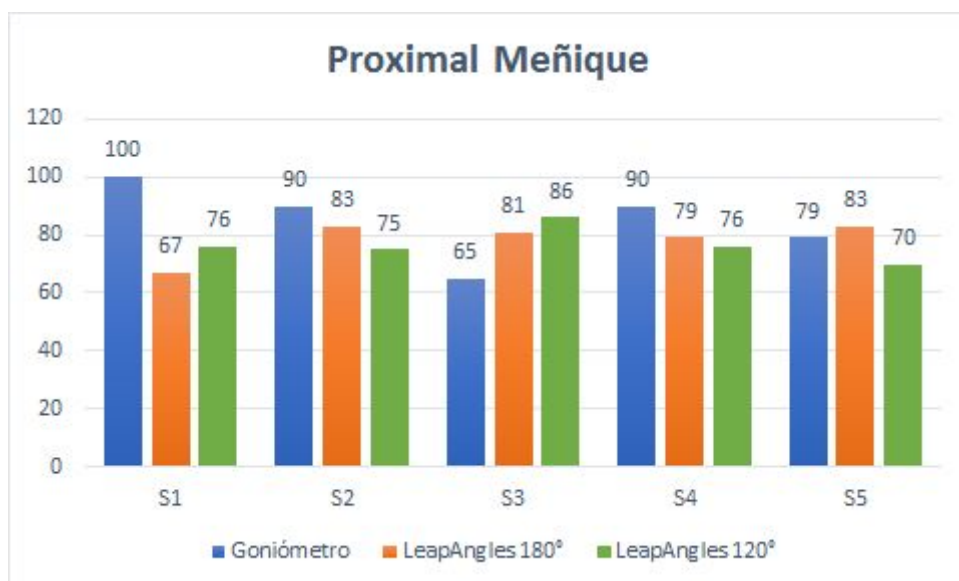


Figura 63. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Proximal del dedo meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

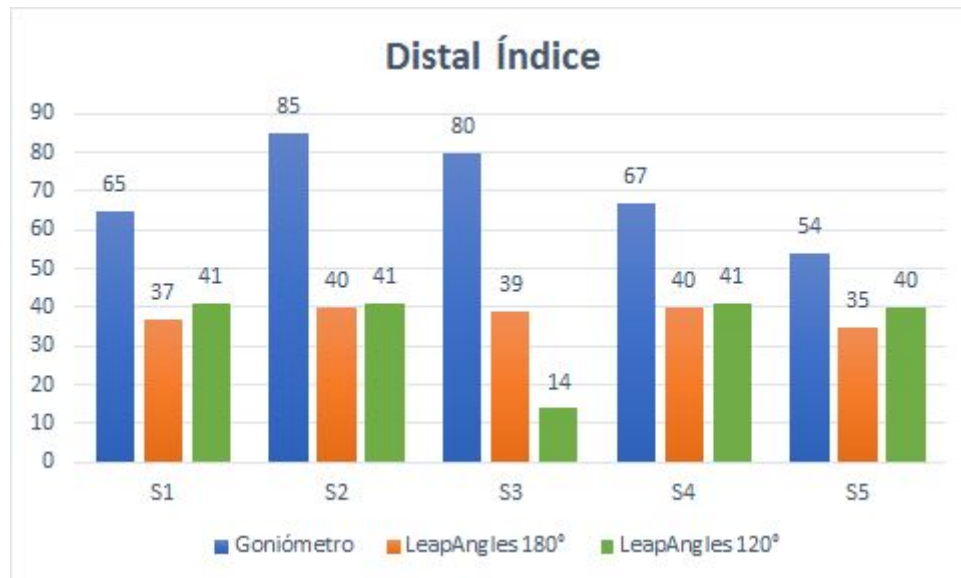


Figura 64. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo índice en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

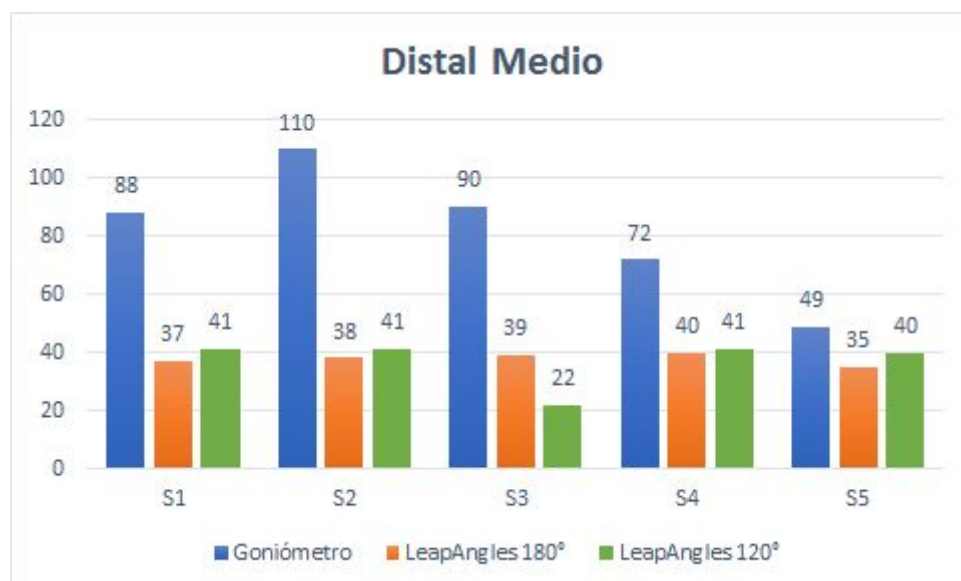


Figura 65. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo medio en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

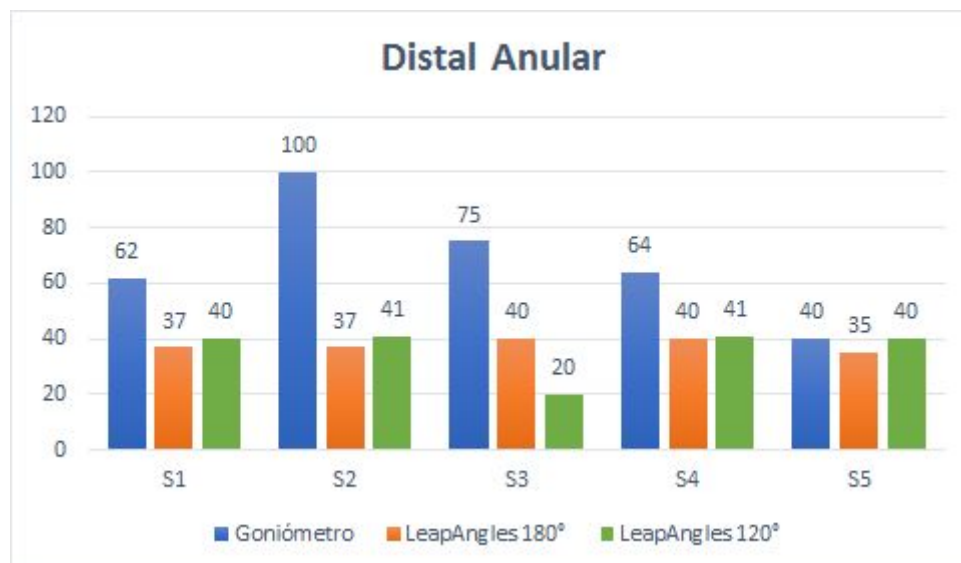


Figura 66. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo anular en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

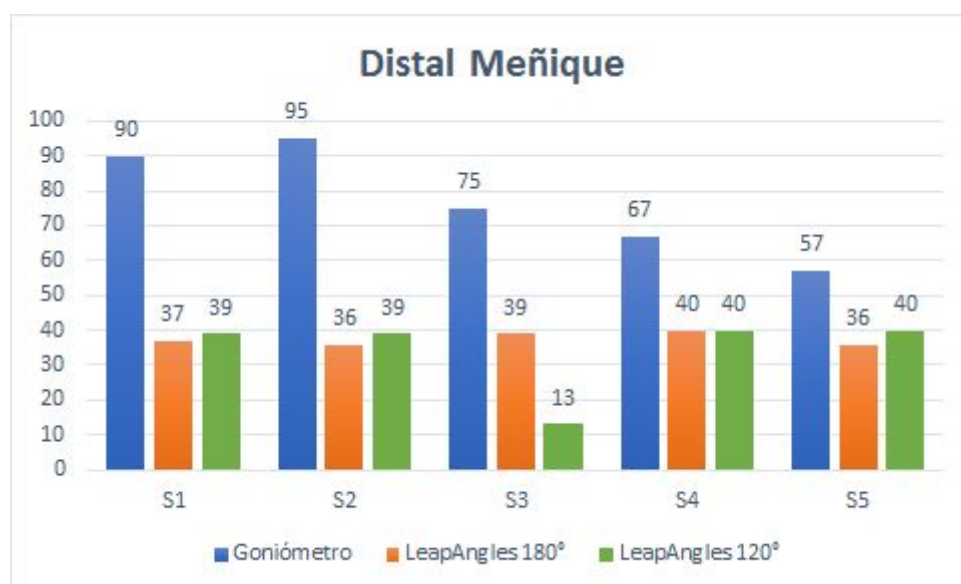


Figura 67. Mediciones de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación Distal del dedo meñique en adultos jóvenes. Medición con goniómetro y con *LeapAngles* a 180 y 120 grados.

5.4 Índice de Correlación entre Clases (ICC)

Para determinar la fiabilidad de Leap Motion para medir la amplitud de movimiento de las articulaciones. En esta etapa, se calculó el índice estadístico llamado coeficiente de correlación intraclass (ICC). El cual permite determinar la fiabilidad en las mediciones obtenidas entre dos instrumentos son equivalentes (Fernández et al.,

2004). En esta tesis se comparan las mediciones obtenidas con el goniómetro convencional y con la aplicación *LeapAngles*.

La **Ecuación 4** se utiliza para el índice de correlación intraclase (Mandeville, 2007).

$$\text{ICC} = \frac{(DE_A)^2 + (DE_B)^2 + (DE_{B-A})^2}{((DE_A)^2 + (DE_A)^2 + (\underline{X}_{B-A})^2 - (DE_{B-A})^2)/n} \quad (4)$$

5.4.1 Implementación del ICC

Para realizar el análisis de ICC en este trabajo de tesis utilizamos RStudio, un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos (Verzani, 2011). En este entorno instalamos la librería **ICC**. Esta contiene las funciones **ICCest** que ayuda a calcular el ICC utilizando el análisis de la varianza de una sola vía³ (del inglés one way anova)(Wolak, 2012).

La función **ICCest** recibe los siguientes parámetros para hacer el cálculo: (1) el nombre del primer vector de mediciones; (2) el nombre del segundo vector de mediciones; (3) los datos del primer vector que contienen las mediciones recolectadas utilizando el goniómetro; (4) los datos del segundo vector que contienen las mediciones recolectadas utilizando la aplicación *LeapAngles*. El nivel de confianza fue calculado utilizando el método de Smith (1957).

El valor del ICC obtenido fue interpretando utilizando el grado de acuerdo con la escala propuesta por Landis y Koch (Mohamed, 2004), ver **Tabla 5**.

Tabla 5: Valoración de la concordancia según los valores del Coeficiente de Correlación Intraclase.

Valor	Grado de acuerdo
1 < ICC > 0.81	Casi perfecto
0.80 < ICC < 0.61	Substancial
0.60 < ICC < 0.41	Moderado

³ <https://www.rdocumentation.org/packages/ICC/versions/2.3.0/topics/ICCest>

$0.40 < ICC < 0.21$	Regular
$0.01 < ICC < 0.20$	Leve
$ICC = 0$	Pobre

5.4.2 ICC en medición de Jóvenes

Los resultados indican que el índice de correlación intraclase en la medición de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano fue de 0.51 a 1. Para interpretar este resultado, se utilizó la tabla 5, que presenta el grado de acuerdo propuesto en la escala de Landis y Koch (Mohamed, 2004). En la cual se especifica que un ICC en el rango 0.51 a 1, es un valor de confiabilidad que indica que LeapAngles pueda sustituir a la herramienta. Mientras, que el índice de correlación intraclase en la medición de la amplitud del movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica en encuentran en el rango de 0 a 0.4. Lo que significa que las mediciones proporcionadas por LeapAngles no son precisas. Por lo que no puede sustituir a la herramienta y debe revisarse el modelo propuesto para realizar esta medición.

5.4.3 Limitaciones del estudio

En este estudio se considero realizar mediciones en jóvenes y adultos mayores para determinar si la herramienta podría ser utilizada por el especialista en ambos grupos. Sin embargo, durante la ejecución del estudio, se presentaron dos situaciones con los adultos mayores: (1) presentan movimientos involuntarios (p. ej. temblor en manos) y (2) tienen dificultad para mantener una posición durante la prueba. Lo que causó que el Leap motion no pudiera rastrear la mano adecuadamente. Por lo que se obtuvieron mediciones con errores.

Capítulo 6: Conclusiones y Trabajo Futuro

El capítulo inicia presentando algunas conclusiones del trabajo de investigación realizado. Posteriormente, se presentan las contribuciones de este trabajo de tesis, y finalmente, se concluye listando los nichos de oportunidad para continuar con este trabajo de investigación.

6.1 Conclusiones

En el primer capítulo de esta tesis, enunciamos que el objetivo de este trabajo de tesis era desarrollar una herramienta de software basada en Leap Motion para apoyar al fisioterapeuta a medir la amplitud de movimiento de las articulaciones de la mano. En donde la medición no requiere el contacto físico con el paciente; que la alineación a la articulación a ser medida sea automática, y que se puedan medir múltiples articulaciones simultáneamente.

Como resultado de este trabajo se desarrolló la herramienta *LeapAngles* la cual puede medir la amplitud de movimiento de abducción entre los dedos de la mano y la flexión de la articulación metacarpofalángica. Las prueba de confiabilidad de la aplicación *LeapAngles* nos indica que es posible realizar mediciones goniométricas con LeapAngles debido a que se obtuvieron niveles de concordancia de moderado y sustancial (ICC en el rango de 0.51 a 1.0). Mientras que para la medición de la amplitud del movimiento de la articulación metacarpofalángica se obtuvieron resultados deficientes (ICC menor a 0.40).

En comparación con el trabajo de *Elnaggar et al.* (2016) donde también se realizaron mediciones sobre los movimientos de abducción y de flexión, los errores reportados fueron superiores a los presentados en este trabajo siendo el error mínimo de 9.1 grados y el error máximo de 22.9 grados al medir la flexión y un error mínimo de 10.8 grados y máximo de 20 grados al medir la abducción, mientras que, LeapAngles tuvo un error mínimo de 4 grados y un error máximo de grados 16.6 grados al medir la flexión y un error mínimo de 6 grados y un máximo de 12.2 grados al medir la abducción, cabe tomar en cuenta que estos resultados varían en

cuanto a cantidad de sujetos siendo un total de 3 en el trabajo de *Elnaggar* y 10 sujetos en este trabajo, así como la utilización de 2 dispositivos Leap Motion en este trabajo contra 1 en el trabajo de *Elnaggar* y con la participación de 3 fisioterapeutas en comparación de 1 en el trabajo de *Elnaggar*.

6.2 Contribuciones

Las contribuciones obtenidas como resultado de esta tesis, se presentan en las siguientes subsecciones:

6.2.1 Publicaciones de la Tesis

Con los resultados de la tesis se obtuvieron los siguientes artículos de congreso:

- López Trejo José Ricardo, García Vázquez Juan Pablo, González Ramírez María Luisa, Vizcarra Corral Luis Enrique, y Márquez Rojas Israel (2017). **Hand Goniometric Measurements Using Leap Motion**, 2017 2nd International Workshop on Ambient Assisted Living and e-health (**AALEH 2017**). Las Vegas, NV, 2017, pp. 137-141. doi: 10.1109/CCNC.2017.7983095.

En este artículo se presenta un experimento y la evaluación del software desarrollado *LeapAngles*, el cual permite medir la amplitud del movimiento flexoextensor y abducción en la mano de sujetos sanos diestros.

- López Trejo Ricardo, García-Vázquez Juan Pablo, Vizcarra Corral Luis Enrique y Castillo Lozoya Andrés. (2016). **Uso de Leap Motion para la Medición de Valores Goniométricos de la Mano**. En memorias del VIII Congreso Internacional en Ciencias Computacionales - CiComp 2016, realizado en la ciudad de Ensenada, Baja California, México.

En este artículo se reporta la funcionalidad de la aplicación *LeapAngles* desarrollada para medir la amplitud del movimiento de abducción en la mano de sujetos sanos.

- López Trejo Ricardo, García-Vázquez Juan Pablo (2016). **Diseño de videojuegos ambientales para ayudar al adulto mayor a mejorar sus habilidades motoras finas**. En el marco de la 17va Feria de Posgrados de Calidad, realizado en la ciudad de La Paz, Baja California, México.

Este cartel se presenta la propuesta de tesis que tiene por objetivo desarrollar

videojuegos terapéuticos que utilicen el dispositivo Leap Motion para realizar mediciones goniométricas, las cuales sean utilizadas por los especialistas para conocer las habilidades motoras finas en adultos mayores.

6.3 Trabajo Futuro

A partir de este trabajo de tesis se identificaron varios problemas que pueden ser abordados como trabajo futuro.

- Durante el diseño de aplicación se identificó que Leap Motion proporciona un modelo aproximado de la mano humana. El cual fue diseñado solo para modelar la mano derecha de un sujeto adulto. Por lo que no funciona para obtener información de la mano izquierda ni para obtener información en manos de niños, ya que no puede modelar la mano. Lo que afecta al cálculo de la amplitud del movimiento de una articulación. Por tal motivo, se considera como trabajo futuro utilizar la librería de visión artificial desarrollada por intel (OpenCV⁴) en conjunto con el algoritmo de detección de bordes "canny edge detection" para recolectar información de la posición o movimiento de la mano en un espacio tridimensional con el objetivo de crear nuestro propio modelo de la mano.
- Considerando que en algunas ocasiones los huesos de la mano suelen ocluir la vista de otros huesos por la cámaras del Leap Motion. Se podría considerar utilizar diseñar un modelo con librerías de OpenCV para manejar más de un Leap Motion con la finalidad de observar la mano desde diversos ángulos.
- Considerando que el dispositivo Leap Motion puede ser programado para obtener información de la distancia, la velocidad de desplazamiento de la mano y los ángulos de movimientos de una articulación. Esta información podría ser utilizada para crear un modelo de aprendizaje automático que ayude a diagnosticar una patología en la mano humana. Por ejemplo, determinar la presencia de artritis o el nivel de parkinson.

⁴ <https://opencv.org/>

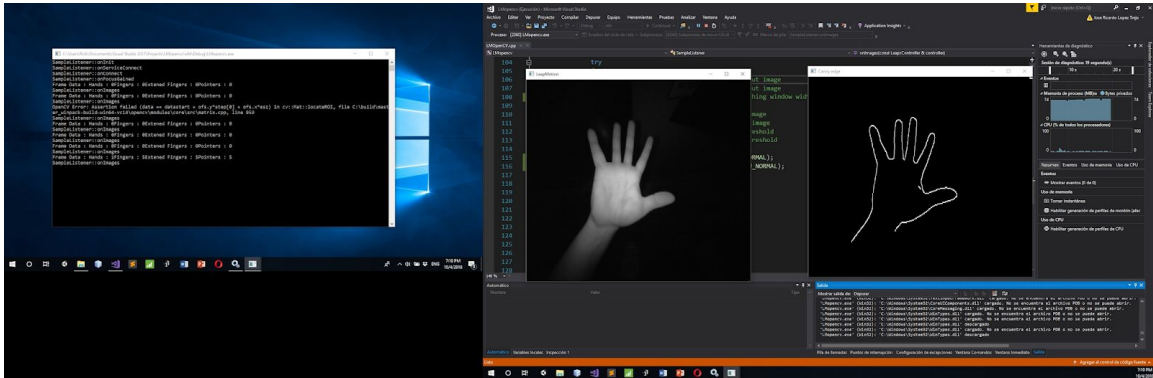


Figura 68. Prueba con OpenCV para la detección de la mano humana utilizando Canny Edge Detection.

Referencias

- Arias A., Biomecánica y patrones funcionales de la mano, Morfolia, Vol. 4, No.1, 2012, Universidad Nacional de Colombia, pp. 15.
- Ashok, C. (2008). Test your Physical Fitness, Kalpaz Publications, ISBN:978-8178356815.
- Bronzino, J. D. (2015) The biomedical engineering handbook, Medical devices and human engineering, CRC Taylor & Francis, 4ta edición. ISBN.
- Broome, R.T. (2005). Técnica Quiropráctica de las Articulaciones Periféricas, Editorial Paidotribo, ISBN: 9788480198066.
- Carter M., Weber T., (2004) Reflexología de la mano. Clave para una salud perfecta, Editorial Paidotribo, ISBN: 8480197870.
- Chophuk, P., Chumpen, S., Tungjikusolmun, S., Phasukkit, P. (2015). Hand postures for evaluating trigger finger using Leap Motion controller. In 2015 8th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), IEEE. pp. 1-4.
- Chuang, T., Huang, W., Chiang, S., Tsai Y. (2002). A virtual reality-based system for hand function analysis, vol. 69, pp. 189–196.
- Carvalho, R. M. F. D., Mazzer, N., Barbieri, C. H. (2012). Analysis of the reliability and reproducibility goniometry photogrammetry regarding the hand. *Acta ortopédica brasileira*, Vol. 20, No. 3, pp. 139-149.
- Coton, J., Veytizou, J., Thomann, G., & Villeneuve, F. (2016). Feasibility Study of Hand Motion Analysis by the Leap Motion Sensor. *AMSE Model. Meas. Control. Ser. C Chem. Geol. Environ. Bioeng*, Vol. 77, No. 2, pp. 73-83.
- Dössel O., Schlegel W.C. (2010). Development of Telematic Goniometer, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Springer Science & Business Media, pp. 227-230. ISBN: 9783642038891.
- Eini, D. S., Ratzon, N., Rizzo, A. A., Yeh, S. C., Lange, B., Yaffe, B., Kizony R., (2010). A simple camera tracking virtual reality system for evaluation of wrist range of motion. In Proc. 8th ICDVRAT, pp. 123-130.
- Feigelman, J., Ganscha, S., Claassen, M. (2016). matLeap: A fast adaptive Matlab-ready tau-leaping implementation suitable for Bayesian inference. *arXiv preprint arXiv:1608.07058*.
- Fernández, P., Pértegas Díaz, S., (2004). La fiabilidad de las mediciones clínicas: el

análisis de concordancia para variables numéricas, Atención primaria en la red,

Fleiss J.L. (1986). The design and analysis of clinical experiments. New York: Wiley; 1986.

Hernández Aguado I, Porta Serra M, Miralles M, García Benavides F, Bolúmar F. (1990) La cuantificación de la variabilidad en las observaciones clínicas. *Med Clin (Barc)* 1990; 95: 424-429.

Hornsey, R.L, Hibbard, P.B. (2015). Evaluation of the accuracy of the Leap Motion controller for measurements of grip aperture. In Proceedings of the 12th European Conference on Visual Media Production, ACM, p. 13.

Laskoski, G. T., Martins L. D. L., Pichorim, S. F., Abatti P. J., (2009). Development of a Telematic Goniometer, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, pp. 227-230.

Leap Motion (2018). <https://developer-archive.leapmotion.com/documentation> (Accedida en septiembre de 2018).

López, L. A. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfología*, Vol. 4, No. 1, pp. 14-24.

Mandeville, P. B. (2007). Tips Bioestadísticos: El coeficiente de correlación de concordancia de Lin. *Ciencia UANL*, Vol. 10, No. 1, pp. 91-94.

Marsden, J. E., Tromba, A. J., Muñiz, P. C. (1998). Cálculo vectorial, Addison-Wesley Longman.

Matsui, Y., Fujita, R., Harada, A., Sakurai, T., Nemoto, T., Noda, N., & Toba, K. (2014). Association of grip strength and related indices with independence of activities of daily living in older adults, investigated by a newly-developed grip strength measuring device. *Geriatrics & gerontology international*, 14, 77-86.

Mahiques, A., (2018). <http://www.cto-am.com/mano.htm#Anatomia>. (Accedida en septiembre de 2018).

Mohamed M. Shoukri. (2004). Measures of Interobserver Agreement. Chapman & Hall/ CRC, Boca Raton, FL, USA.

Osnaya-Moreno, H., Romero-Espinosa, J. F., Mondragón-Chimal, M. A., Ochoa-González, G., Escoto-Gómez, J. A. (2014). Estudio epidemiológico de las lesiones traumáticas de mano en un Centro médico de Toluca, Estado de México. *Cirugía y Cirujanos*, Vol. 82, No. 5, pp. 511-516.

Palmer, M. L., Epler M. E., (2002). Fundamentos de las técnicas de evaluación

musculoesquelética, Fundamentos de Fisioterapia y Rehabilitación, Editorial Paidotribo, Vol. 85, pp. 30.

Palastanga N., Field, D., Soames, R. (2007). Anatomía y Movimiento Humano. Estructura y Funcionamiento, Editorial Paidotribo, ISBN: 9788480195003.

Pham, T., Pathirana, P. N., Trinh, H., Fay, P. (2015). A non-contact measurement system for the range of motion of the hand. Sensors, Vol. 15, No. 8, pp. 18315-18333.

Prieto L, Lamarca R, Casado A. La evaluación de la fiabilidad en las observaciones clínicas: el coeficiente de correlación intraclase. Med Clin 1998: Vol. 110, No. 4, pp. 142-145.

RAE, Real Academia Española, <http://www.rae.es/> (Fecha de último acceso: septiembre de 2018)

Ripollés Ortí, M. Martín Rioboó E., Díaz Moreno, A., Aranguren Baena, B., Murcia Simón, M., Toledano Medina, A., Fonseca del Pozo, F.J. (2001) Concordancia en la medición de presión arterial entre diferentes profesionales sanitarios. ¿Son fiables los esfigmomanómetros de mercurio? Atención Primaria. Vol. 27. Núm. 4, pp. 234-243.

Salinas-Durán F., Lugo-Agudelo L. H. (2008). Rehabilitación en salud, Universidad de Antioquia, 2 da. edición, ISBN: 9789587141658.

Sanders, B. (2014) Mastering Leap Motion, Packt Publishing Ltd, ISBN: 9781783551408.

Sanz, C. M., Moreno, E. C., Aparicio, A. V., Ballabriga, S. N., García T. M., (1999). Análisis cinemático del codo en las actividades de vida diaria, Rehabilitación, Vol. 22, No. 5, pp. 1-9.

Scholtes, Vanessa & Terwee, Caroline & Poolman, Rudolf. (2011). What makes a measurement instrument valid and reliable?. Injury. 42. 236-40. 10.1016/j.injury.2010.11.042.

Sourial, M., Elnaggar A., Reichardt, D., (2016) Development of a virtual coach scenario for hand therapy using Leap Motion, 2016 Future Technologies Conference (FTC), San Francisco, CA, pp. 1071-1078. doi: 10.1109/FTC.2016.7821736.

Spiegelmock, M. (2013). Leap Motion Development Essentials, Packt Publishing Ltd, ISBN: 9781849697736.

Smith, C. (1957). On the estimation of intraclass correlation, Annals of human genetics, vol. 21, no. 4, pp. 363–373, 1957.

Skirven, T.M., Osterman, A. L., Fedorczyk, J., Amadio P. C. (2011). Rehabilitation of

the Hand and Upper Extremity, Elsevier Health Sciences, 6ta Edición, ISBN: 9780323081269.

- Taboadela C. H. (2014) Goniometría. Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales, capítulo 1. Introducción a la goniometría, Asociart ART, (1a ed.). Buenos Aires, pp. 1, 18, 44.
- Ukegbu, U., Maselko, J., Malhotra, R., Perera, B., Østbye, T. (2014). Correlates of Handgrip Strength and activities of daily living in elderly Sri Lankans. *Journal of the American Geriatrics Society*, 62(9), 1800-1801.
- Wolak, M. E., Fairbairn, D. J., Paulsen, Y. R. (2012). Guidelines for estimating repeatability, *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 3, no. 1, pp. 129–137, 2012.

Apéndice 1: Código de *LeapAngles*

https://drive.google.com/drive/folders/1IX9jEYXTQ1Z_9OUoFCXM9o6QL2MbDQjJ?usp=sharing

Apéndice 2: Tablas de mediciones

A2.1 Mediciones en Jóvenes

Tabla x.x Mediciones de la amplitud del movimiento de abducción entre los dedos de la mano

Sujeto	Entre índice y medio (G)	Entre índice y medio (L)	Entre medio y Anular (G)	Entre medio y Anular (L)	Entre Anular y Meñique (G)	Entre Anular y Meñique (L)
S1	20°	14°	15°	14°	18°	22°
S2	22°	18°	17°	20°	22°	34°
S3	20°	12°	22°	15°	30°	23°
S4	13°	8°	15°	12°	20°	18°
S5	15°	11°	16°	13°	20°	21°
S6	17°	18°	16°	15°	23°	27°
S7	25°	14°	20°	13°	22°	20°
S8	15°	12°	15°	16°	25°	23°
S9	17°	14°	20°	16°	20°	23°
S10	14°	18°	14°	19°	15°	31°

A2.2. Mediciones en Adultos Mayores

SujetoID	Edad	Índice		Medio		Anular		Meñique	
S1	78º	65º	39º	70º	64º	75º	64º	90º	64º
S2	77º	78º	77º	85º	75º	80º	75º	90º	77º
S3	90º	80º	66º	90º	74º	90º	79º	100º	79º
S4	85º	75º	73º	83º	74º	82º	75º	87º	75º
S5	92º	86º	82º	86º	83º	85º	76º	85º	75º
S6	83º	70º	86º	72º	86º	80º	86º	63º	86º
S7	82º	59º	84º	70º	86º	70º	86º	75º	85º
S8	78º	65º	74º	72º	84º	72º	85º	75º	84º
S9	94º	56º	75º	75º	77º	75º	79º	75º	78º
S10	87º	50º	80º	60º	81º	59º	82º	75º	81º

Tabla X. Amplitud del movimiento de abducción

SujetoID	Edad	Índice-Medio		Medio-Anular		Anular-Meñique	
S1	78º	20º	20º	17º	13º	20º	25º
S2	77º	30º	8º	17º	10º	20º	26º
S3	90º	20º	9º	16º	10º	16º	15º
S4	85º	20º	23º	17º	14º	20º	25º
S5	92º	20º	14º	13º	15º	18º	33º
S6	83º	35º	7º	26º	10º	35º	25º
S7	82º	32º	10º	27º	13º	25º	20º
S8	78º	27º	11º	22º	9º	22º	22º
S9	94º	20º	12º	25º	11º	25º	25º
S10	87º	25º	12º	20º	13º	30º	23º

Apéndice 3: Mediciones de los fisioterapeutas (UVM)

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: LFT 1 Fecha: 15/marzo/2017

No. de sujeto: 5 Edad: 79 Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (✓) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 5:38 Hora de fin de medición: 5:43

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	92°		100°		85°		20°	
Medio	96°		92°		110°			
Anular	93°		100°		100°		25°	
Meñique	91°		90°		95°		76°	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	95°		110°		80°		18°	
Medio	85°		120°		90°			
Anular	90°		110°		80°		20°	
Meñique	90°		85°		90°		22°	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: LFT1 Fecha: 75/marzo/2017No. de sujeto: 6 Edad: 27 Sexo: (M) (F)El Sujeto es: Diestro (☒) Zurdo ()Hora de inicio de medición: 5:46 Hora de fin de medición: 5:51Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	45°		85°		80°		35°	
Medio	45°		95°		90°			
Anular	85°		95°		875°		28°	
Meñique	45°		65°		75°		30°	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	85°		85°		65°		28°	
Medio	95°		80°		75°			
Anular	90°		95°		55°		20°	
Meñique	85°		60°		75°		25°	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 3 Fecha: 15-Marzo-2017No. de sujeto: 8 Edad: 21 Sexo: ☒ (M) ☐ (F)

El Sujeto es: Diestro () Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 17:06 Hora de fin de medición: 17:24

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano ~~derecha~~ Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	77		93		67		22	
Medio	64		72		72			
Anular	81		104		64		22	
Meñique	67		90		67		32	

Mano ~~Izquierda~~ Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	71		96		72		30	
Medio	69		89		65			
Anular	69		111		70		12	
Meñique	72		76		88		30	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 3 Fecha: 17-Marzo-17No. de sujeto: 10 Edad: 21 Sexo: ☒ (M) ☐ (F)El Sujeto es: Diestro () Zurdo ☒Hora de inicio de medición: 5:39 Hora de fin de medición: 5:48

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	81		82		54		28	
Medio	86		92		49			
Anular	81		93		40		20	
Meñique	76		79		57		30	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	81		95		74		28	
Medio	91		99		61			
Anular	84		72		60		19	
Meñique	74		90		61		39	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 3 Fecha: 15-MARZO-17No. de sujeto: 11 Edad: 21 Sexo: (M) (~~F~~)El Sujeto es: Diestro ☒ Zurdo ()Hora de inicio de medición: 5:50 Hora de fin de medición: 5:56

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	75		106		15		29	
Medio	90		123		10			
Anular	95		124		30		12	
Meñique	95		105		44		30	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	76		117		71		28	
Medio	88		117		71			
Anular	86		86		80		23	
Meñique	90		86		96		32	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 3 Fecha: 15-Marzo-17No. de sujeto: 12 Edad: 20 Sexo: (M) (~~F~~)El Sujeto es: Diestro ☒ Zurdo ()Hora de inicio de medición: 6:03 Hora de fin de medición: 6:09

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	81		106		44		29	
Medio	81		103		62			
Anular	88		112		41		18	
Meñique	90		109		66		40	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	83		100		60		29	
Medio	96		105		50			
Anular	84		106		35		11	
Meñique	83		98		60		30	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 2° Fecha: 15.03.2017No. de sujeto: 18 Edad: 20 Sexo: (M) (F)El Sujeto es: Diestro (☒) Zurdo ()Hora de inicio de medición: 17:39 Hora de fin de medición: 17:39

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		92°		55°			
Medio	91°		96°		72°			
Anular	80°		96°		72°			
Meñique	80°		92°		76°			

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		90°		70°			
Medio	90°		100°		75°			
Anular	80°		100°		40°			
Meñique	80°		100°		80°			

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 2° Fecha: 15-03-2017No. de sujeto: 17 Edad: 20 Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (X) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 17:39 Hora de fin de medición: 17:45

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		110°		61°			
Medio	90°		110°		78°			
Anular	90°		118°		80°			
Meñique	90°		110°		80°			

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		105°		85°			
Medio	92°		105°		85°			
Anular	90°		110°		85°			
Meñique	90°		100°		90°			

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 2° Fecha: 15-03-2017No. de sujeto: 20 Edad: 21 Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (x) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 17:47 Hora de fin de medición: 17:55

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		92°		62°			
Medio	91°		95°		58°			
Anular	85°		96°		65°			
Meñique	90°		96°		66°			

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	85°		91°		65°			
Medio	90°		90°		65°			
Anular	80°		91°		64°			
Meñique	80°		85°		60°			

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 2° Fecha: _____No. de sujeto: 16 Edad: _____ Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (X) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 16:15 Hora de fin de medición: 17:27

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	95°		95°		75°			
Medio	95°		95°		85°			
Anular	95°		95°		80°			
Meñique	90°		95°		80°			

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		90°		80°			
Medio	90°		100°		90°			
Anular	95°		110°		80°			
Meñique	90°		100°		85°			

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: LFT1 Fecha: 15/marzo/2017No. de sujeto: 7 Edad: 19 Sexo: (M) (F)El Sujeto es: Diestro (☒) Zurdo ()Hora de inicio de medición: 5:33 Hora de fin de medición: 5:59Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	70°		80°		90°		26	
Medio	35°		100°		95°			
Anular	85		115°		100°		22°	
Meñique	85		80°		95°		22°	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	100°		100		85		22	
Medio	105		95		105			
Anular	45		80		90		18	
Meñique	100°		100		80°		35°	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 3 Fecha: 15-Marzo-2017No. de sujeto: 9 Edad: 21 Sexo: (M) ☒ (F)El Sujeto es: Diestro ☒ Zurdo ()Hora de inicio de medición: 17:25 Hora de fin de medición: 17:37

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	65		89		75		20	
Medio	72		106		74		22	
Anular	75		98		67			
Meñique	74		105		75		39 42	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	74		94		73		19	
Medio	80		99		76			
Anular	86		108 88		76		19	
Meñique	74		85		70		39	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 2° Fecha: 15-03-2017No. de sujeto: 17 Edad: Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (x) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 17:27 Hora de fin de medición: Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: Marca y Modelo del Goniómetro utilizado:

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	85°		100°		70°			
Medio	90°		100°		72°			
Anular	90°		90°		90°			
Meñique	90°		90°		95°			

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	95°		100°		75°			
Medio	100°		100°		75°			
Anular	95°		100°		85°			
Meñique	90°		105°		90°			

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: LFT 1 Fecha: 15/marzo/2017No. de sujeto: 3 Edad: 21 Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (✓) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 5:25 Hora de fin de medición: 5:30Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	92°		118°		86°		28°	
Medio	98°		118°		98°			
Anular	90°		120°		94°		28°	
Meñique	90°		105°		92°		38°	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	40°		110°		90°		35°	
Medio	92°		116°		86°			
Anular	40°		102°		80°		30°	
Meñique	96°		98°		90°		38°	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: LFT 1 Fecha: 14/mar/2017No. de sujeto: 2 Edad: 20 Sexo: (M) (F)

El Sujeto es: Diestro (✓) Zurdo ()

Hora de inicio de medición: 5:19 Hora de fin de medición: 5:24

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	88°		118°		90°		35°	
Medio	100°		115°		92°			
Anular	100°		118°		86°		36°	
Meñique	93°		98°		90°		25°	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	92°		110°		90°		35°	
Medio	98°		100°		86°			
Anular	92°		108°		90°		35°	
Meñique	88°		110°		85°		26°	

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: 2 Fecha: _____No. de sujeto: 15 Edad: 20 Sexo: (M) (F)El Sujeto es: Diestro (☒) Zurdo ()Hora de inicio de medición: 16:04 Hora de fin de medición: 16:15Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	90°		100°		60°			
Medio	90°		95°		80°			
Anular	80°		95°		80°			
Meñique	90°		95°		85°			

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	85°		90°		45°			
Medio	95°		90°		45°			
Anular	100°		90°		45°			
Meñique	100°		93°		45°			

Formato de mediciones goniométricas

Nombre del LRF: L1 Fecha: 15/03/2017No. de sujeto: 1 Edad: 14 Sexo: M (F)El Sujeto es: Diestro ☒ Zurdo ()Hora de inicio de medición: 17:07 Hora de fin de medición: 17:17

Enfermedad identificada: (Ninguna) Otra: _____

Marca y Modelo del Goniómetro utilizado: _____

Mano Derecha

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	100°		80°		98°		22°	
Medio	98°		85°		60°			
Anular	100°		80°		98°		24°	
Meñique	98°		80°		100°		20°	

Mano Izquierda

Dedo	MCP	MCP LM	Proximal	Proximal LM	Distal	Distal LM	Abducción	Abducción LM
Índice	80°		100°		43°		30°	
Medio	88°		98°		80°			
Anular	85°		95°		60°		28°	
Meñique	88°		93°		62°		27°	