

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Biomédica

Desarrollo de un sistema de medición del movimiento articular de los dedos de la mano

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniería Biomédica

Presenta:

Valeria Martínez Tello

Dirigido por:

Ing. José de Jesús Santana Ramírez

Santiago de Querétaro, Querétaro, 2022

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Biomédica

**Desarrollo de un sistema de medición del movimiento articular de los dedos
de la mano**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniería Biomédica

Presenta:
Valeria Martínez Tello

Dirigido por:
Ing. José de Jesús Santana Ramírez

Santiago de Querétaro, Querétaro. 2022

SINODALES

Ing. José de Jesús Santana Ramírez

Presidente

Ing. Eduardo Martínez Segoviano

Sinodal

Ing. Gilberto Bustamante Balderas

Sinodal



Santiago de Querétaro, 21 de febrero del 2022.

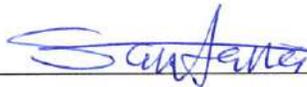
**H. CONSEJO ACADÉMICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

P R E S E N T E.

Por medio de la presente, me permito informarle que he revisado **el Trabajo de tesis**, titulado **“Desarrollo de un sistema de medición del movimiento articular de los dedos de la mano”**, presentado por la alumna, **Valeria Martínez Tello**, con número de expediente **257423**. Dicho trabajo lo encuentro **APROBADO Y TERMINADO** para que continúe con los trámites de titulación.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE



Ing. José de Jesús Santana Ramírez
Director de Tesis

Santiago de Querétaro, 21 de febrero del 2022.

**H. CONSEJO ACADÉMICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

PRESENTE.

Por medio de la presente, me permito informarle que he revisado **el Trabajo de tesis**, titulado **“Desarrollo de un sistema de medición del movimiento articular de los dedos de la mano”**, presentado por la alumna, **Valeria Martínez Tello**, con número de expediente **257423**. Dicho trabajo lo encuentro **APROBADO Y TERMINADO** para que continúe con los trámites de titulación.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE



Ing. José de Jesús Santana Ramírez
Director de Tesis



Ing. Eduardo Martínez Segoviano
Sinodal

Santiago de Querétaro, 21 de febrero del 2022.

**H. CONSEJO ACADÉMICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

PRESENTE.

Por medio de la presente, me permito informarle que he revisado **el Trabajo de tesis**, titulado **“Desarrollo de un sistema de medición del movimiento articular de los dedos de la mano”**, presentado por la alumna, **Valeria Martínez Tello**, con número de expediente **257423**. Dicho trabajo lo encuentro **APROBADO Y TERMINADO** para que continúe con los trámites de titulación.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE



Ing. José de Jesús Santana Ramírez
Director de Tesis



Ing. Gilberto Bustamante Balderas
Sinodal

Resumen

Las sesiones de terapia física son clave dentro de la recuperación de lesiones, dentro del área de fisioterapia existen herramientas, las cuales se utilizan para lograr avances dentro de cada sesión de los pacientes. Si bien las técnicas de estas áreas son conocidas por ejecutar las tareas de forma subjetiva dentro la plantilla médica, la obtención de nuevas herramientas a partir de métodos cuantitativos ha generado un interés creciente. Esta tesis implementa un dispositivo que realiza la medición del movimiento articular de los dedos de la mano. La iniciativa para desarrollar este proyecto nace de la necesidad de tener una herramienta que ayude a obtener los ángulos de las articulaciones de forma cuantitativa, a través de la conexión de sensores inerciales MPU-6050 conectados mediante comunicación serial al microcontrolador Arduino, donde a su vez se realizó la conexión con el software Matlab, en el cual se obtuvieron los datos de los ángulos de los diferentes movimientos, para poder analizarlos en el software Excel. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas experimentales con pacientes sanos para comprobación, teniendo como finalidad enriquecer las terapias físicas dentro del área de rehabilitación, disminuyendo el porcentaje de errores propios de la plantilla médica en las sesiones terapéuticas de los pacientes.

Palabras clave: dispositivo, MPU-6050, medición, movimiento articular, terapias físicas.

Abstract

Physical therapy sessions are key within the recovery of injuries, within the area of physical therapy there are tools, which are used to achieve progress within each patient session. Although the techniques of these areas are known to perform the tasks subjectively within the medical staff, obtaining new tools from quantitative methods has generated a growing interest. This thesis implements a device that performs the measurement of the articular movement of the fingers of the hand. The initiative to develop this project arises from the need to have a tool that helps to obtain the angles of the joints in a quantitative way, through the connection of inertial sensors MPU-6050 connected by serial communication to the Arduino microcontroller, where in turn the connection was made with the Matlab software, in which the data of the angles of the different movements were obtained, to be able to analyze them in the Excel software. Finally, experimental tests were carried out with healthy patients for verification, with the purpose of enriching the physical therapies within the rehabilitation area, reducing the percentage of errors of the medical staff in the therapeutic sessions of the patients.

Keywords: device, MPU-6050, measurement, joint movement, physical therapies.

Dedicatorias

A mi papá, por ser mi guía y mi mayor ejemplo para seguir.

A mi mamá, por apoyarme siempre.

A mi hermana, por ser mi protectora.

Los quiero infinitamente.

Agradecimientos

“Uno mira hacia atrás con agradecimiento a los maestros brillantes, pero con gratitud a aquellos que tocaron nuestros sentimientos humanos. El plan de estudios es tanto la materia prima necesaria, pero el calor es el elemento vital de la planta en crecimiento y para el alma del niño.” – Carl Jung.

En primer lugar, el más valioso agradecimiento es a mi papá, por siempre apoyarme incondicional, académica y personalmente, por su admirable paciencia conmigo, por ser el principal pilar en mi vida, definitivamente un triunfo mío es uno tuyo. Agradezco de igual forma, a mi mamá brindarme mi formación académica, así como ayudarme en la creación del primer prototipo de mi tesis y a mi hermana por apoyarme en las pruebas experimentales del prototipo y en toda mi vida.

Extiendo mi infinita gratitud a Tralu por apoyarme en la realización de la tesis desde su inicio hasta el final, por ser partícipe de este camino, siendo pieza clave en efectuar cada uno de los procesos del proyecto.

Agradezco a mi director de tesis, José de Jesús Santana, a quien reconozco como una admirable persona, gracias por la confianza, paciencia, tiempo, dedicación y colaboración, desde el principio apoyó el proyecto y a pesar de los meses nunca dejó de creer en que podía llegar a concluirlo.

De igual modo, agradezco al Ing. Eduardo Segoviano, por su enseñanza en las clases y por su apoyo en la realización del proyecto. Al sinodal, Ing. Gilberto Bustamante por su aceptación en la participación del proyecto.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser durante cinco años mi casa de estudios con excelente formación académica.

Por último, a todos mis amigos que han compartido la vida conmigo, que me apoyaron en el proyecto y ayudaron como motivación para terminar la tesis.

ÍNDICE

Resumen	2
Abstract	3
Dedicatorias	4
Agradecimientos	5
ÍNDICE	6
Índice de Tablas	9
Índice de figuras	10
Introducción	12
Capítulo 1	13
Introducción	13
1.1 Definición del problema	13
1.2 Objetivo general y objetivos específicos	14
1.3 Antecedentes	14
1.4 Justificación	15
Capítulo 2	16
Anatomía, biomecánica y goniometría de la mano	16
2.1 La mano humana	16
2.1.1 Huesos de la mano	16
2.1.2 Descripción huesos metacarpianos	17
2.1.3 Músculos de la mano	18
2.1.4 Articulaciones de la mano	23
2.2 Biomecánica de la mano	26
2.3 Goniometría de la mano	32
2.3.1 Goniometría del pulgar	32
2.3.2 Goniometría de los dedos de la mano	35
Capítulo 3	38
Rehabilitación de la mano	38
3.1 Rehabilitación	38
3.2 Fisioterapia	38

3.3 Ejercicios Terapéuticos	39
Capítulo 4.....	40
Descripción de componentes	40
4.1 Sensor MPU-6050	40
4.2 Multiplexor CD74HC4051	41
4.3 Microcontrolador	42
4.4 Software	43
4.4.1 Arduino	43
4.4.2 Matlab	44
4.4.3 Solidworks.....	44
Capítulo 5.....	46
Diseño y construcción del dispositivo	46
5.1 Hardware	46
5.1.1. Esquema de sistema de hardware del dispositivo	46
5.1.2. Arquitectura del guante sensorizado.....	47
5.2 Guante.....	47
5.3 MPU-6050	50
5.3.1 Ubicación del MPU-6050	50
5.3.2 Distribución de pines	51
5.4 Multiplexor CD74HC4051	52
5.4.1 Distribución de pines.....	52
5.5 Microcontrolador Arduino UNO R3 (Rev3).....	54
5.5.1 Distribución de pines.....	54
5.6 Arquitectura de hardware adicional.....	56
5.6.1 Ubicación de la arquitectura de hardware adicional	57
Capítulo 6.....	59
Desarrollo de la programación	59
6.1 Software	59
6.1.1. Esquema del software del dispositivo	59
6.2 Software Arduino	60
6.2.1 Programación para adquisición de datos	61
6.3 Software Matlab	66

6.4 Software Excel	68
Capítulo 7	70
Resultados y conclusiones	70
7. 1 Resultados	70
a) Flexión-Extensión Metacarpofalángica (FEM)	70
b) Flexión-Extensión Interfalángica proximal	72
c) Flexión-Extensión Interfalángica distal	74
d) Abducción-aducción de los dedos	76
e) Flexión-extensión total del pulgar	77
f) Flexión-extensión Metacarpofalángica del pulgar	79
g) Flexión-extensión Interfalángica del pulgar	80
h) Abducción-aducción palmar del pulgar	82
Error Absoluto Total	83
7. 2 Conclusiones	84
7. 3 Recomendaciones	85
Referencias	86

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Músculos del pulgar.	20
Tabla 2.2 Músculos del meñique.	20
Tabla 2.3 Otros músculos que colaboran en el movimiento de mano.	23
Tabla 4.1 Características del sensor inercial MPU-6050.	41
Tabla 7.1 Desviación estándar FEM.....	Error! Bookmark not defined.
Tabla 7.2 Promedios Error Absoluto FEM.	72
Tabla 7.3 Desviación estándar FEIPr.....	73
Tabla 7.4 Promedios Error Absoluto FEIPr.	74
Tabla 7.5 Desviación estándar FEID	75
Tabla 7.6 Promedios Error Absoluto FEID.....	75
Tabla 7.7 Desviación estándar AAD	77
Tabla 7.8 Promedios Error Absoluto AAD.	77
Tabla 7.9 Desviación estándar FETP.....	78
Tabla 7.10 Promedios Error Absoluto FETP.	79
Tabla 7.11 Desviación estándar FEMP.....	Error! Bookmark not defined.
Tabla 7.12 Promedios Error Absoluto FEMP.	80
Tabla 7.13 Desviación estándar AAD.....	81
Tabla 7.14 Promedios Error Absoluto FEIP.	81
Tabla 7.15 Desviación estándar AAPP	82
Tabla 7.16 Promedios Error Absoluto AAPP.....	83
Tabla 7.17 Promedios de Error Absoluto Total.....	83

Índice de figuras

Figura 2.1 Vista anterior esquemática de los huesos de la mano y de los dedos	18
Figura 2.2 Movimiento de flexión y movimiento de extensión de la mano	27
Figura 2.3 Abducción radial y cubital de la mano	28
Figura 2.4 Movimiento de supinación y pronación	28
Figura 2.5 Movimiento de flexión-extensión de los dedos sobre el hueso metacarpiano.	29
Figura 2.6 Movimiento de abducción y aducción de los dedos trifalángicos.....	29
Figura 2.7 Movimiento del dedo pulgar, (a) aducción, (b) abducción, (c) flexión, (d) oposición, (e) reposición de aducción-extensión.	30
Figura 2.8 Falanges y articulaciones del dedo índice.....	30
Figura 2.9 Las falanges con su articulación en forma de polea.	31
Figura 2.10 Posiciones de la mano	31
Figura 2.11 Clasificación de los agarres de la mano según la forma y los elementos involucrados.	32
Figura 2.12 Posición 0, abducción y aducción de articulación carpometacarpiana	33
Figura 2.13 Movimiento de oposición de articulación carpometacarpiana	33
Figura 2.14 Flexión del pulgar a partir de la posición 0.....	34
Figura 2.15 Extensión del pulgar a partir de la posición 0.	34
Figura 2.16 Flexión de la articulación interfalángica a partir de la posición 0.	34
Figura 2.17 Extensión interfalángica a partir de la posición 0.	35
Figura 2.18 Flexión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0.	35
Figura 2.19 Extensión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0.	36
Figura 2.20 Flexión de la articulación interfalángica a partir de la posición 0.....	36
Figura 2.21 Extensión de la articulación interfalángica de la posición 0.	36
Figura 2.22 Flexión de la articulación distal partiendo de la posición 0.	37
Figura 2.23 Extensión de la articulación distal del dedo índice.....	37
Figura 4.1 Sensor MPU-6050 mostrando los ejes X, Y, Z.....	41
Figura 4.2 Configuración de pines del Multiplexor CD74HC4051	42
Figura 4.3 Arduino Uno y sus partes	43
Figura 5.1 Etapas del hardware del proyecto electrónico.....	47
Figura 5.2 Primer prototipo del guante.	48
Figura 5.3 Prototipo con cintas velcros adheridas al guante	48
Figura 5.4 Medidas del porta-sensor	49
Figura 5.5 Porta-sensores en Solidworks	50

Figura 5.6 Porta sensores en el guante	50
Figura 5.7 Prototipo con los porta sensores en cada dedo.....	51
Figura 5.8 Distribución de pines del MPU-6050	52
Figura 5.9 Sensores MPU-6050 en el guante	52
Figura 5.10 Distribución de pines del Multiplexor CD74HC4051	53
Figura 5.11 Diagrama electrónico del proyecto.....	54
Figura 5.12 Distribución de pines de Arduino UNO.	55
Figura 5.13 Diagrama de la conexión con el Arduino	55
Figura 5.14 Medidas de la base de los componentes electrónicos	56
Figura 5.15 Base para los componentes electrónicos en Solidworks.....	57
Figura 5.16 Medidas de la tapa de la base de los componentes electrónicos	57
Figura 5.17 Tapa de la base de los componentes electrónicos en Solidworks.....	57
Figura 5.18 Prototipo del proyecto	58
Figura 6.1 Etapas del software del proyecto electrónico.....	60
Figura 6.2 Ubicación de la inclusión de Librerías en Arduino	61
Figura 6.3 Diagrama de flujo del código.....	62
Figura 6.4 Declaración de Registros y Variables en el código	63
Figura 6.5 Código de sensores MPU6050.....	64
Figura 6.6 Código implementando ecuaciones matemáticas.....	65
Figura 6.7 Menú de los movimientos en Matlab.	66
Figura 6.8 Ciclo while para obtención de datos.....	67
Figura 6.9 Ciclo for para especificar la cantidad de datos.....	68
Figura 6.10 Impresión de datos y etiquetas	68
Figura 6.11 Datos numéricos filtrados del software Matlab.....	70
Figura 6.12 Promedios de flexión, extensión y abertura por cada dedo.....	69
Figura 7.1 Representación gráfica del promedio FEM	71
Figura 7.4 Representación gráfica del promedio FEIPr	73
Figura 7.6 Representación gráfica del promedio FEID.....	75
Figura 7.8 Representación gráfica del promedio AAD	76
Figura 10 Representación gráfica del promedio FETP	78
Figura 7.12 Representación gráfica del promedio FEMP	79
Figura 7.14 Representación gráfica del promedio FEIP	81

Introducción

Una de las principales herramientas que utiliza el humano son sus manos, pueden realizar actividades sumamente delicadas y precisas, así como labores pesadas y duras, en ellas se encuentran las falanges que permiten el desarrollo de infinidad de actividades, de igual modo la cualidad del dedo pulgar da a la mano de los seres humanos una ventaja evolutiva, logrando la prensión de objetos en comparación con otros seres vivos.

Los traumatismos de mano y muñeca son eventos frecuentes dentro del área de urgencias [Mutual, 2012] las fracturas predominantes son las fracturas de falanges con 54%, seguidas de las fracturas metacarpianas con 33%, distribuidas entre un 86% de varones y un 24% de mujeres [Gil, 2014].

Los ejercicios terapéuticos son primordiales dentro del proceso de recuperación, corresponden a la ejecución de movimientos mecánicos de las articulaciones, alcanzando el nivel óptimo de los movimientos corporales, mejorando la función física de los pacientes. La aplicación de principios de ingeniería y conceptos de medicina y biología dentro del área de la salud, pueden utilizarse con el fin de mejorar la atención médica.

La ingeniería biomédica tiene un papel del área de rehabilitación logrando desarrollar actividades y nuevos prototipos para mejorar las terapias físicas. Además, está orientada a diseñar, implementar e investigar herramientas tecnológicas referidas a las aplicaciones que tienden a mejorar la calidad de las terapias físicas. Tiende a enfocarse hacia la biomecánica del movimiento humano, así como analizar las posturas desde el punto de vista cinemático y cinético.

La medición de la movilidad articular de los dedos de la mano está incluida dentro de las sesiones de rehabilitación en el área de terapia física para la evaluación de la funcionalidad de la mano, determinando la efectividad del tratamiento o como un indicador de mejora.

En este trabajo se propone un sistema de medición electrónico para la evaluación de forma cuantitativa la movilidad articular de los cinco dedos de la mano de una persona, transmitiendo los datos a un ordenador. Así mismo, en el presente documento se redactan los conceptos básicos y el diseño del dispositivo, también se describe el protocolo de pruebas en sujetos sanos, así como los resultados obtenidos en la población muestra.

*“El único modo de hacer un gran trabajo,
es amar lo que haces”
- Steve Jobs*

Capítulo 1

Introducción

1.1 Definición del problema

En 2014, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publicó que el 6% de la población tiene alguna discapacidad, de acuerdo con el Programa Nacional para el Desarrollo y la inclusión de las personas con discapacidad 2014-2018 se mencionó que una de las mayores limitaciones es de tipo físico, necesitando así servicios de salud y rehabilitación.

A nivel mundial la información y los datos objetivos sobre los recursos humanos para la rehabilitación son insuficientes y fragmentarios. El nivel de los profesionistas del país se encuentra por debajo de las grandes potencias, por lo que es necesario que los fisioterapeutas se acerquen a nuevas técnicas, así como a los avances tecnológicos que posibilitan un mayor éxito en los tratamientos.

Dentro del área de terapia física existen diversos ejercicios, métodos e instrumentos para los tratamientos, actualmente para la medición de la movilidad articular se utiliza el goniómetro, que es una herramienta en forma de semicírculo o círculo graduado en 180° o 360°, utilizado para medir ángulos entre dos objetos, en este caso son los dedos de la mano. Aunque es una herramienta válida, la funcionalidad de la herramienta se basa en la experiencia del fisioterapeuta con respecto al enfoque de su utilización, por lo que existe la posibilidad del error humano o de percepción dentro de la consulta.

Por esta razón, se propone diseñar un sistema que permita obtener, de una forma cuantitativa y objetiva, la medición de los ángulos de las articulaciones que componen los dedos trifalángicos y el pulgar en los movimientos según los ejes de flexión-extensión y abducción-aducción.

1.2 Objetivo general y objetivos específicos

Objetivo General:

Diseñar y desarrollar un dispositivo electrónico embebido en un guante que permita la medición cuantificable de los parámetros cinemáticos propios de la actuación de las articulaciones pertenecientes a los dedos trifalángicos y el pulgar en el eje flexión-extensión y abducción-aducción de la mano sana.

Objetivos Particulares:

1. Diseñar y construir el dispositivo de soporte para los sensores inerciales MPU 6050.
2. Implementar la instrumentación de los sensores mencionados en el objetivo uno.
3. Diseñar un algoritmo computacional basado en un modelo cinemático de la mano, específicamente enfocado en la movilidad articular.
4. Realizar pruebas experimentales en pacientes sanos con el goniómetro y el dispositivo.

1.3 Antecedentes

Actualmente existen métodos de rehabilitación para fracturas metacarpianas que incluyen sesiones de terapia física dentro de centros de rehabilitación especializados en el mejoramiento de la movilidad de la mano. La rehabilitación con intervenciones como ejercicios y otras intervenciones físicas se utilizan para ayudar a prevenir las complicaciones como la rigidez y el dolor, restaurar la función y acelerar la recuperación. Los métodos ortopédicos en las fracturas del cuello del 5º metacarpiano resultaron funcionales, ya que mantienen la angulación tras la reducción e inducen un buen control de tolerancia del dolor asociando a la reincorporación laboral precoz [Burget, 2010].

En la última década, diferentes métodos se han efectuado para mejorar el desarrollo de terapias físicas de mano, en particular se han desarrollado guantes de datos para neuro-rehabilitación, que se encargan de monitorear los movimientos de la mano y la posición de los dedos empleando tela conductiva y sensores de flexión, este monitoreo sirve para controlar un videojuego para actividades de rehabilitación de manos.

En este sentido, investigadores de ingeniería biomédica de la universidad nacional de Singapur diseñaron un guante robótico que ayuda a pacientes a recuperar la movilidad de las manos, dispone de sensores para detectar las señales musculares, el cuerpo principal del guante está hecho de lycra, con sensores de caucho de silicona por encima, además tiene la ventaja que se adapta al tamaño de la mano con cintas de velcro ajustables [García, 2018].

En el ámbito de dispositivos ortopédicos se diseñaron guantes antiartríticos, para el tratamiento del dolor, la rigidez y la hinchazón asociados a la artritis, creado con algodón

comprimido, dando suavidad en la compresión y el calor ayuda a controlar y reducir la hinchazón de las articulaciones [Arenas, 2012].

Así mismo la Universidad de Córdoba diseñó un guante de datos diseñado a partir de sensores de flexibilidad construidos junto con un acelerómetro, fue construido con un sistema de comunicación inalámbrico facilitando en gran modo la ergonomía y facilidad de uso [Castruita, 2013]. Además, se creó un guante mioeléctrico para rehabilitación de extremidad superior con potencial aplicación a pacientes hemipléjicos con el que se realizó un sistema controlado por señales mioeléctricas resultantes de la apertura y cierre de la mano, el cual sirve de ayuda para efectuar los movimientos completos de flexión y extensión de la mano en pacientes hemipléjicos cuyos ángulos de movimiento están angularmente muy reducidos [Arenas, 2012].

En México, la Universidad Autónoma de Sinaloa creó un guante de datos de alta precisión para imitar los movimientos de una mano de forma virtual, por medio de sensores inerciales los cuales miden la aceleración y velocidad angular para detectar el movimiento de los dedos de la mano, capturando la información permitiendo su análisis [Villeda, 2018].

1.4 Justificación

La creación de un dispositivo que ayude en la evaluación dentro de las terapias físicas, a través de la obtención valores cuantitativos de ángulos de las articulaciones de los dedos de la mano en posiciones específicas.

La presente investigación se enfocará en analizar los valores cuantitativos de las señales en el eje X, Y y Z, las cuales se utilizarán para determinar la posición de la articulación a evaluar y con ello, mediante la instrumentación descritos en este trabajo, determinará la movilidad articular de los dedos de la mano.

Así el presente trabajo permitirá mostrar los valores de posición de los dedos de la mano y profundizar en ellos como parte del análisis, además de ofrecer una forma nueva sobre el área de rehabilitación física. Por lo que ayudará al personal del área de fisioterapia, además de obtener los datos de la posición en tres ejes para realizar la evaluación, también se pretenderá ser una medida exacta y no bajo la experiencia profesional.

*“La mano es el verdadero órgano de la civilización,
iniciador de la evolución humana”
- Ernst Fisher*

Capítulo 2

Anatomía, biomecánica y goniometría de la mano.

2.1 La mano humana

El hombre posee cuatro miembros: dos miembros superiores y dos miembros inferiores. El miembro superior está constituido por dos segmentos: la cintura escapular y la porción libre del miembro superior al cual pertenece la mano. La base de la mano está compuesta por un complejo sistema de huesos, ligamentos, poleas, tendones, nervios y vasos. Cada mano posee 27 huesos, 8 en el metacarpo, 5 metacarpianos, y un total de 14 falanges. Aunque se le considera como una sola articulación, la muñeca es en realidad una articulación compuesta, con movimiento global, debido a las interacciones entre los huesos individuales del carpo, así como interacciones distales con las bases de los metacarpianos y en dirección proximal con la superficie articular distal de cubito y radio [Angulo M., Álvarez A. y Fuentes Y, 2011].

La mano es el órgano terminal de la extremidad superior, que en el ser humano es una de las partes más importantes del cuerpo, por su riqueza funcional, brinda la posibilidad de ser un segmento efector, sensitivo, permite realizar múltiples movimientos y acciones necesarias para la supervivencia y relación con el medio ambiente [Quinayás, 2020].

2.1.1 Huesos de la mano

El esqueleto de la mano está compuesto por 27 huesos repartidos en 3 grupos: el carpo, el metacarpo y los dedos.

Los huesos del carpo son 8 y están dispuestos en 2 filas transversales. La fila superior comprende los huesos escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme. La fila inferior comprende los huesos trapecio, trapecoide, grande y ganchoso. Todos estos huesos tienen forma cuboidea y se les podría describir seis caras a cada uno de ellos, además son huesos cortos, formados por una delgada capa de hueso compacto que rodea un bloque de hueso esponjoso, son bastante frágiles. De estos huesos, el más expuesto de todos, y por lo tanto,

el que con mayor frecuencia resulta fracturado, es el escafoides [Angulo M., Álvarez A. y Fuentes Y, 2011].

Los huesos del metacarpo constituyen el esqueleto de la palma y el dorso de la mano. Está formado por cinco huesos: los metacarpianos. Estos huesos se articulan de manera proximal con los huesos de la segunda fila del carpo. Se separan los unos de los otros para servir de base a cada uno de los cinco dedos. Se les denomina: primero (I), segundo (II), tercero (III), cuarto (IV) y quinto (V) metacarpianos, partiendo del pulgar al meñique.

2.1.2 Descripción huesos metacarpianos

Los metacarpos son huesos largos cuyo cuerpo presenta una cara posterior o dorsal, plana, dos caras en relación con los músculos interóseos de los dedos y una cresta anterior o palmar. De sus dos extremidades, la superior o proximal, denominada base del metacarpiano se articula con el carpo, por una parte, y con los metacarpianos vecinos por la otra. La extremidad inferior, distal o digital, también se denomina cabeza del metacarpiano; se articula con la falange proximal del dedo correspondiente. Características particulares permiten distinguir los metacarpianos entre sí:

- El I metacarpiano, el del pulgar, es más corto que los demás; su base no presenta carillas articulares laterales puesto que no contacta con el vecino.
- El II metacarpiano sólo posee una cara articular medial en su base, para el III, y su extremidad proximal tiene forma de V. que sirve de inserción al extensor radial largo del carpo dorsalmente y del flexor radial del carpo ventralmente.
- El III metacarpiano presenta una carilla articular a cada lado de su base y una apófisis estiloides dorsal en su extremidad proximal para la inserción del músculo extensor radial corto del carpo.
- El IV metacarpiano también tiene dos carillas articulares, una en cada lado de su base, pero no posee apófisis estiloides.
- Por último, el V metacarpiano presenta una apófisis estiloides, supero medial, para el músculo extensor cubital del carpo, pero tiene una sola carilla articular lateral.

Los metacarpianos son huesos largos con una diáfisis y dos epífisis. El canal medular de la diáfisis tiene dimensiones reducidas. La capa compacta periférica es espesa. Sus fracturas son bastante frecuentes en los boxeadores. Las extremidades están formadas por hueso esponjoso.

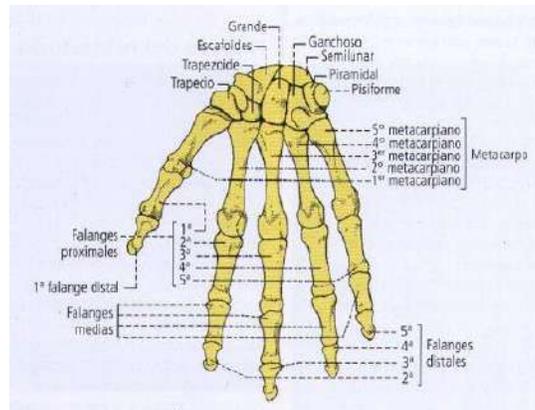


Figura 2.1 Vista anterior esquemática de los huesos de la mano y de los dedos (Latarjet, 2011)

Las falanges también son huesos largos el extremo proximal es la base y el distal la cabeza, unidos a través del cuerpo. Hay tres falanges en cada dedo excepto en el pulgar que solo tiene dos, la mano tiene catorce falanges:

- Cinco falanges proximales: que se articulan con los cinco metacarpianos formando la articulación metacarpofalángica que son condíleas que permiten movimientos de flexión, extensión, abducción, aducción.

- Cuatro falanges medias: que se articulan con las proximales formando las articulaciones interfalángicas proximales que son trocleares (movimiento de flexión y extensión).

- Cinco falanges distales: que se articulan con las medias formando las articulaciones interfalángicas distales, también trocleares.

Los metacarpianos son una región clave para la arquitectura de la mano en la formación de los tres arcos de la mano.

- Arco carpiano: es un arco transversal que pasa por las dos filas de huesos del carpo y el ligamento anular del carpo, el cual contiene el nervio mediano y los flexores de los dedos.

- Arco metacarpiano: arco transversal que forman los cinco metacarpianos, permiten el ahuecamiento de la palma de la mano, favorece a la prensión.

- Arcos longitudinales: transcurren a lo largo de los cinco dedos, desde la carpometacarpiana hasta la falange distal, favorece a la prensión.

2.1.3 Músculos de la mano

Todos los músculos de la mano son palmares. Dorsalmente sólo encontramos los tendones de los músculos extensores y la fascia dorsal de la mano, que es la continuación de la fascia antebrachial en la región posterior. Se distingue una fascia superficial dorsal subcutánea, y

una fascia profunda dorsal o interósea, cubriendo los interóseos dorsales. Entre ambas pasan los tendones de los músculos extensores

Los músculos de la mano se pueden dividir en dos grupos:

- Los músculos extrínsecos que son aquellos cuya masa muscular está situada en el antebrazo y cuyos tendones se insertan en los huesos de la mano. Se subdividen en músculos flexores (de la muñeca y de los dedos), situados en la cara volar, y los músculos extensores (de la muñeca y dedos), situados dorsalmente.
- Los músculos intrínsecos, que tienen su origen e inserción dentro de la mano, como sucede con los músculos tenares que actúan sobre el pulgar (abductor corto, oponente, y flexor corto) y los hipotenares que actúan sobre el meñique (abductor, flexor y oponente). Este grupo se completa con el músculo abductor del pulgar, los músculos interóseos (3 dorsales y 4 volares) y los músculos lumbricales (4 volares). Todos ellos actúan en los movimientos de separación y aproximación de los dedos entre sí.

Músculos del pulgar

Nombre	Orígenes	Inserción	Función
Abductor corto	Huesos escafoides y trapecio. Retináculo de los flexores (ligamento transverso del carpo).	Borde radial de la base de la falange proximal del pulgar	Abducción de la primera articulación metacarpofalángica. Para obtener precisión en los movimientos forman una triada con el oponente del pulgar y el flexor corto del mismo. Participa con el oponente del pulgar en la extensión de la primera articulación metacarpofalángica. Durante los movimientos de abducción de la referida articulación metacarpofalángica, este músculo es más activo que el abductor largo del pulgar.
Abductor largo del pulgar	Cara posterior de la ulna (cúbito), membrana interósea y tercio medio de la cara posterior del radio	Superficie radial de la base del primer metacarpiano	Abductor del pulgar y de la articulación radiocarpiana
Flexor corto	Trapecio y retináculo de los flexores	Base de la falange proximal del pulgar	Flexiona la falange proximal del pulgar. Para obtener precisión en los movimientos, los músculos oponentes del pulgar y abductor corto del mismo actúan con el flexor corto del pulgar formando una tríada, al parecer, el flexor corto del pulgar contribuye,

			energéticamente, a formar la pinza con el índice sólo en posición de aducción. Al presentarse abducción, la acción del flexor corto del pulgar es reemplazada por la del oponente del pulgar.
Oponente del pulgar	Ligamento transverso del carpo y hueso trapecio	Cara anterior y lado radial del primer metacarpiano.	Gira el pulgar hacia la línea media de la mano y opone a los otros dedos. Aduce y rota medialmente el primer metacarpiano y mantiene la profundidad del primer espacio interóseo, acciones fundamentales en los movimientos de precisión. Extensión del pulgar
Aductor del pulgar	Cabeza oblicua: trapecio, trapecoide, hueso grande, base de metacarpianos. Cabeza transversa: Cara anterior del tercer metacarpiano	Borde ulnar (cubital) de la base de la falange proximal del pulgar	Aducción del pulgar; participa en la oposición
Extensor largo del pulgar	Tercio medio de la cara posterior de la ulna (cúbito)	Base de la falange distal del pulgar	Extensión de la articulación interfalángica del pulgar

Tabla 2.1 Músculos del pulgar.

Músculos del meñique

Nombre	Orígenes	Inserción	Función
Abductor del meñique	Hueso pisiforme y tendón del flexor ulnar del carpo	Base de falange proximal del 5º dedo	Abducción del 5º dedo. También participa en la flexión de la 5ª articulación metacarpofalángica.
Oponente del meñique	Ligamento transverso del carpo y hueso ganchoso	Borde ulnar del 5º metacarpiano	Aproxima el 5º metacarpiano hacia el pulgar; hace más profundo el hueco de la palma de la mano. Desplaza la cabeza del 5º metacarpiano en dirección palmar-radial.
Flexor corto del meñique	Ligamento transverso del carpo y hueso ganchoso	Base de la falange proximal del 5º dedo	Flexión de la falange proximal del 5º dedo; participa en la función del abductor y oponente del meñique.

Tabla 2.2 Músculos del meñique.

Músculos lumbricales e interóseos

Los lumbricales y los interóseos son unos músculos pequeños pero importantes que se insertan principalmente en la expansión extensora.

Los lumbricales son cuatro pequeños músculos que se asocian con los tendones del flexor profundo de los dedos de la palma de la mano, se encuentran representados:

- Vaina del tendón flexor del índice;
- músculos de la eminencia tenar;
- relación del primer lumbrical, por su lado radial, con el primer interóseo dorsal;
- flexor largo del pulgar

Orígenes: Estos cuatro músculos, están unidos a los tendones del flexor profundo de los dedos, en la siguiente forma:

- Primero: lado radial del tendón del índice;
- Segundo: lado radial del tendón del dedo medio;
- Tercero: lado radial del tendón del dedo medio y lado ulnar del tendón del dedo anular;
- Cuarto: lado radial del tendón del 4º dedo y lado ulnar del tendón del 5º dedo.

Inserción: Base de las falanges terminales de los dedos 2º a 5º (junto con los músculos extensores de los dedos e interóseos).

Funciones: Importantes extensores de las articulaciones interfalángicas (refuerzan acciones del extensor de los dedos y de los interóseos); flexionan las articulaciones metacarpofalángicas a condición de que las interfalángicas se encuentren extendidas.

Los músculos interóseos se sitúan entre los metacarpianos y se disponen en dos grupos, uno palmar y otro dorsal:

---Interóseos dorsales

Orígenes: Cada uno de estos cuatro músculos emerge, mediante dos cabezas, de los lados adyacentes a los huesos metacarpianos.

Inserciones:

- Primero: lado radial de la falange proximal del 2º dedo;
- Segundo: lado radial de la falange proximal del 3er dedo;
- Cuarto: lado ulnar de la falange proximal del 4º dedo

Funciones: Las tradicionalmente aceptadas como abductores de los dedos 2º, 3º y 4º alejándose del dedo medio, son simplistas y carecen de fundamento electromiográfico. Desde este último punto de vista, se ha demostrado que:

1. Flexionan la articulación metacarpofalángica ante esfuerzo, aun el moderado
2. Actúan en la extensión de las articulaciones interfalángicas proximal y distal. Esta acción no puede explicarse por sus inserciones y sólo se aprecia al existir flexión de las articulaciones metacarpofalángicas.
3. Junto con los lumbricales, evitan la hiperextensión que ejercería el músculo extensor de los dedos sobre la falange proximal

---Interóseos palmares

Son tres músculos

Orígenes:

- Primero: lado ulnar del 2º metacarpiano
- Segundo: lado radial del 4º metacarpiano
- Tercero: lado radial del 5º metacarpiano

Inserciones:

- Primero: lado ulnar de la falange proximal del 2º dedo;
- Segundo: lado radial de la falange proximal del 4º dedo;
- Tercero: lado radial de la falange proximal del 5º dedo.

Funciones: Las tradicionalmente aceptadas como aductores de dedo en que se insertan hacia el dedo medio, son simplistas y carecen de fundamento electromiográfico. Desde este último punto de vista, se ha demostrado que:

1. Flexionan la articulación metacarpofalángica ante esfuerzo, aun el moderado.
2. Actúan en la extensión de las articulaciones interfalángicas proximal y distal. Esta acción no puede explicarse si se basa en sus inserciones y sólo se aprecia al existir flexión de las articulaciones metacarpofalángicas.
3. En conjunto, los lumbricales evitan la hiperextensión que ejercería el músculo extensor de los dedos sobre la falange proximal.
4. Son importantes en la prehensión porque actúan como rotadores de las falanges y flexores de las articulaciones metacarpofalángicas.

Otros músculos que colaboran en el movimiento de mano

Nombre	Orígenes	Inserción	Función
Extensor el índice	Cara posterior de la ulna y	Cara posterior de	Extensión de la falange proximal del dedo índice

	membrana interósea	la falange proximal del dedo índice	
Extensor ulnar del carpo (cubital posterior)	Epicóndilo lateral del húmero y borde posterior de la ulna	Lado medial de la base del 5° metacarpiano	Extiende la articulación radiocarpiana, junto con los músculos extensor de capo extensor corto del carpo y extensor de los dedos. La función es sincrónica, sin existir primacía de un músculo sobre otro
Extensor de los dedos	Epicóndilo lateral del húmero y septo intermuscular (antes tabique)	Falange media, dorso de su base y falange distal, dorso de su base.	Extiende del 2° al 5° dedo. Participa en la extensión de la articulación radiocarpiana; tanto los extensores radiales largo y corto del carpo como su extensor ulnar, actúan sincrónicamente con el extensor de los dedos; ninguno tiene primacía para este movimiento.
Extensor radial corto del carpo	Epicóndilo lateral del húmero	Cara posterior de la base del tercer metacarpiano	Extiende la articulación radiocarpiana, junto con los músculos extensor largo del carpo, extensor ulnar del carpo y extensor de los dedos. La función es sincrónica sin existir primacía de un músculo sobre los otros.
Extensor radial largo del carpo	Cresta supracondílea del húmero	Cara posterior de la base del segundo metacarpiano.	Extiende la articulación radiocarpiana, junto con los músculos extensor corto del carpo, extensor ulnar del carpo y extensor de los dedos. La función es sincrónica sin existir primacía de un músculo sobre los otros.
Palmar corto	Lado ulnar del ligamento transverso del carpo y aponeurosis palmar	Piel de la palma de la mano, en su lado ulnar.	Pliega la piel de la palma de la mano, en su lado ulnar; de esta manera, profundiza el hueco de la mano. No comprobada desde el punto de vista electromiográfico.

Tabla 2.3 Otros músculos que colaboran en el movimiento de mano.

2.1.4 Articulaciones de la mano

1.- Articulación radiocarpiana: Es una articulación sinovial de tipo elipsoide que une a la epífisis inferior del radio con el carpo. Se le designa “radiocarpiana” pues el cúbito no participa directamente en su constitución. Sus medios de unión son:

- Cápsula: Es una membrana fibrosa insertada exactamente alrededor de las superficies articulares. Se fijan en particular en los bordes anterior y posterior de la superficie articular del radio y en los bordes del disco articular; abajo, en el contorno articular de las caras correspondientes de los tres huesos del carpo que constituyen el cóndilo carpiano (escafoides, semilunar y piramidal).
- Ligamentos: Refuerzan la cápsula y permiten a los huesos desplazarse notablemente los unos con respecto a los otros.

- A. Ligamento anterior: oblicuo abajo y medialmente, está formado por dos fascículos que convergen hacia abajo. El fascículo radiocarpiano palmar se origina en el borde anterior de la cara articular del radio y sobre su apófisis estiloides para terminar en el semilunar y en el piramidal. Las fibras que provienen de la apófisis estiloides terminan en la cara anterior del hueso grande. El fascículo cubito carpiano palmar, oblicuo abajo y lateral, se extiende en abanico desde el cúbito hasta la cara anterior del semilunar, del piramidal y sobre el hueso grande, entre la cabeza del cúbito y la apófisis estiloides.
- B. Ligamento posterior (radiocarpiano dorsal): es menos grueso. Se extiende desde el borde posterior del radio, oblicuo hacia abajo y medial a la cara dorsal del piramidal. Algunas fibras se insertan en el semilunar.
- C. Ligamento colateral cubital: es potente y elástico. Se inserta arriba en el vértice y el lado medial de la apófisis estiloides del cúbito. Se dirige hacia abajo y se ensancha en abanico, dividiéndose en dos fascículos: el anterior, que se inserta en el hueso pisiforme, y el posterior que lo hace en la cara dorsal del piramidal.
- D. Ligamento colateral radial: es igualmente sólido y elástico. Se fija en el vértice de la apófisis estiloides del radio y desde aquí se extiende sobre el lado anterolateral del hueso escafoides.
- E. Ligamento radioescafolunar: radioescafolunar anterior. Dirigido hacia abajo y atrás, llega a la interlínea escafolunar. Se divide abajo en una inserción escafoidea y en una inserción lunar más desarrollada

2.-Articulaciones del carpo: Los huesos que constituyen el carpo se encuentran articulados entre sí y dispuestos en dos filas. Se distinguen:

- Articulaciones de los huesos del carpo entre sí

En la primera fila del carpo se distinguen las articulaciones del escafoides con el semilunar, de éste con el piramidal y de éste con el pisiforme. En la segunda fila del carpo, el trapecio se articula con el trapecoide, éste con el hueso grande y este último con el hueso ganchoso. Existe una articulación propia en la unión del pisiforme con la piramidal llamada articulación pisipiramidal, ésta no presenta ligamento interóseo, se le describe:

- un ligamento superior, que una al pisiforme con la apófisis estiloides del cúbito
- un ligamento palmar, del pisiforme al hueso ganchoso
- un ligamento dorsal, que lo une al hueso piramidal

-dos ligamentos inferiores, fuertes, que de la parte inferior del pisiforme se dirigen al gancho del hueso ganchoso y a la extremidad superior del 5° metacarpiano.

- Articulación entre la primera y la segunda fila

Une a los huesos de la primera fila, excepto el pisiforme, con los de la segunda fila del carpo.

Las dos filas están unidas por ligamentos palmares y dorsales. Los primeros convergen sobre el hueso grande, los segundos son más cortos y unen individualmente cada uno de los huesos.

3.- Articulaciones de la palma y de los dedos: Se dividen en cuatro:

- i. Articulaciones carpometacarpianas: Su anatomía está dominada por el contraste que existe entre la articulación carpometacarpiana del pulgar, que es muy móvil, y las de los otros metacarpianos, que son muy poco móviles.

- a. Articulación carpometacarpiana del pulgar:

Es esencial para el buen funcionamiento del pulgar, en particular para los movimientos de oposición. Están constituidos los medios de unión por una cápsula laxa y gruesa permitiendo la gran movilidad del pulgar

- b. Articulación carpometacarpiana de los otros cuatro metacarpianos que unen la última fila del carpo a la base de los metacarpianos:

El 2° metacarpiano se articula con el trapecio, el trapezoide y el grande, penetrando como una cuña en el carpo. El 3er metacarpiano se articula con el hueso grande. La superficie de contacto es cóncava adelante, convexa atrás, coronada aquí por la saliente posterolateral del metacarpiano. El 4° metacarpiano se articula a la vez con una extensa superficie en la cara inferior del hueso ganchoso y por una cara pequeña con el hueso grande. El 5° metacarpiano dispone, con el hueso ganchoso, de una articulación en silla de montar bastante semejante a la del 1er metacarpiano, aunque menos marcada. Su movilidad está restringida por la unión del 5° metacarpiano con el cuarto.

Están reforzados con tres tipos de ligamentos:

Palmares: donde se distinguen: uno transversal, que desde la cara anterior del trapecio se dirige hacia el 2° y 3° metacarpiano; dos se insertan en el hueso grande y terminan en el 2° y 3er metacarpiano; un último ligamento del hueso ganchoso, al 4° metacarpiano. El 5° metacarpiano no tiene ligamento propio: está reemplazado por el ligamento pisimetacarpiano en forma de V. cuyo vértice truncado corresponde al 5° metacarpiano y por sus dos ramas se fija, por la medial, en el pisiforme, y por la latera l, en el gancho del hueso ganchoso.

Dorsales: son más fuertes que los precedentes: el 2º metacarpiano está unido al trapecioide por dos ligamentos; un fascículo puede también unirlo al trapecio. El 3er metacarpiano está unido por dos ligamentos al hueso grande. El 4º y el 5º metacarpiano están unidos cada uno por un ligamento al hueso ganchoso.

Interóseo: Tendido desde el hueso grande y el hueso ganchoso hasta el lado medial del 3er metacarpiano.

- ii. Articulaciones intermetacarpianas: Reúnen al 2º y el 3er metacarpiano. al 3er y el 4º, al 4º y el 5º. El 1er metacarpiano queda libre. Son articulaciones planas cuyas cavidades sinoviales son prolongaciones de la articulación carpometacarpiana. Están muy sólidamente unidas por ligamentos interóseos muy cortos, extendidos de un metacarpiano al metacarpiano vecino. Ligamentos palmares y dorsales complementan esta unión. En número de tres palmares y tres dorsales. se extienden en las respectivas caras: del 2º al 3º, del 3º al 4º y del 4º al 5º metacarpiano.
- iii. Articulaciones metacarpofalángicas: Unen la extremidad distal de cada metacarpiano a la parte proximal de la 1er falange de cada uno de los cinco dedos. Poseen en su conjunto una gran movilidad. Están unidos por dos tipos de ligamentos:
 - Ligamentos laterales, medial y lateral, con forma de triángulo, cuyo vértice se inserta en el tubérculo metacarpiano y la base en la parte lateral y anterior de la falange. Se tienden al máximo cuando la falange está flexionada.
 - Ligamento transverso profundo, que une la cara palmar de las articulaciones, excepto la del pulgar. Se adhiere al fibrocartílago falángico, formación que espesa la cápsula adelante. Insertado sólidamente en la falange, pero de manera bastante laxa en el metacarpiano. Formaciones laterales unen este fibrocartílago y el ligamento metacarpiano transverso profundo a la cara dorsal del dedo, labrando espacios para los tendones de los músculos interóseos y lumbricales, a los lados de estas articulaciones.
- iv. Articulaciones interfalángicas: Estas articulaciones ponen en contacto la base y la cabeza de dos falanges sucesivas. El pulgar posee una sola articulación. Esta articulación es reforzada por dos ligamentos laterales, triangulares, semejantes a los de la articulación metacarpofalángica.

2.2 Biomecánica de la mano

La mano constituye el extremo distal de la cadena cinética del miembro superior y se encarga de realizar movimientos de gran riqueza y precisión que, junto a la oposición del pulgar, permiten a la mano una función tridigital indispensable para la correcta biomecánica prensora de la misma.

Movimientos de los dedos y de la mano

- Movimientos de flexión y extensión de la mano: La flexión de la mano alcanza una amplitud que varía de 80° a 90° , es principalmente un movimiento de la articulación radiocarpiana. El movimiento de la extensión de la mano es principalmente un movimiento de la articulación medio carpiana donde alcanza 50° (La extensión llega 30° en la articulación radiocarpiana y a 50° en la medio carpiana).

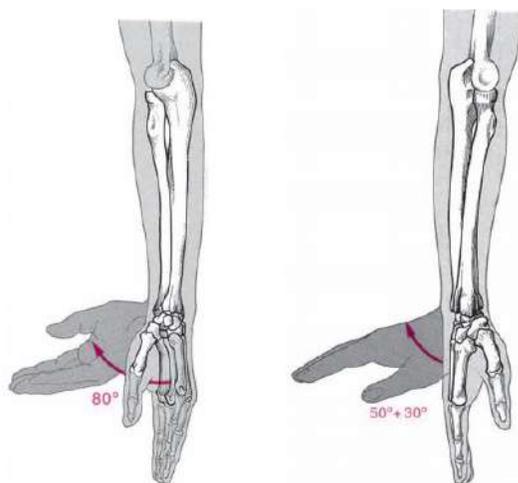


Figura 2.2 Movimiento de flexión y movimiento de extensión de la mano (Llusá, 2003)

- Movimientos de abducción radial y cubital de la mano: La amplitud del movimiento de abducción cubital es de 40° en total.
 - Abducción cubital: aproximadamente 25° , a partir de la abducción radial la mano se dirige medialmente, de manera que el dedo viene a ocupar el lugar del dedo meñique.
 - Abducción radial: aproximadamente 25° , a partir de la abducción cubital la mano se dirige lateralmente, de manera que los dedos pulgar e índice, que en abducción cubital ocupaban la posición de los dedos anular y meñique, en abducción radial se sitúan lateralmente del dedo medio.

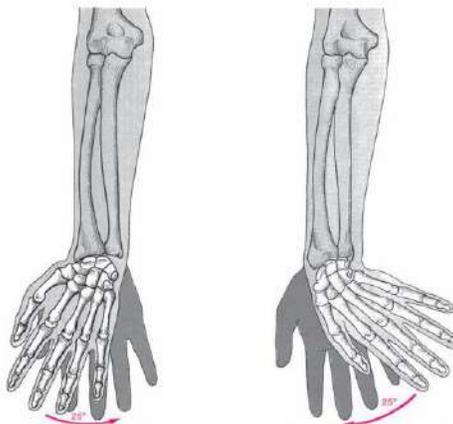


Figura 2.3 Abducción radial y cubital de la mano. (Llusá, 2003)

- Movimientos de rotación o pronosupinación de la mano:
 - Movimiento de supinación: La mano se encuentra inicialmente en pronación, con el dorso de la mano situada anteriormente. La supinación descruza del radio y lo desplaza lateralmente. El movimiento alcanza 120° .
 - Movimiento de pronación: La mano se encuentra inicialmente en supinación. Los dos huesos del antebrazo están paralelos. La pronación cruza el radio anteriormente al cúbito en el curso del movimiento, que alcanza los 120° .

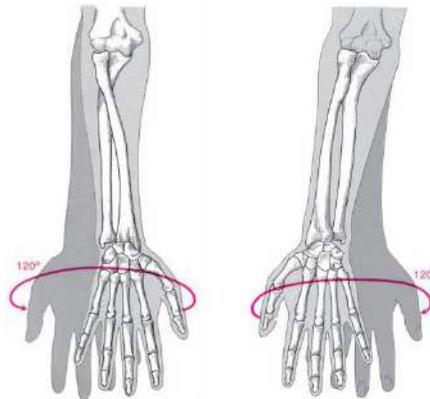


Figura 2.4 Movimiento de supinación y pronación (Llusá, 2003)

- Movimiento de flexión-extensión de los dedos:
 - Flexión-extensión: Este movimiento se efectúa alrededor de un eje transversal. Este movimiento alcanza normalmente una amplitud de 30° , pero puede llegar a 90° como consecuencia de un apoyo forzado sobre los dedos en el sentido de la hiperextensión. En la flexión palmar de la falange proximal, ésta se desliza bajo la cara palmar de la cabeza del hueso metacarpiano. Este movimiento alcanza normalmente 90° . Se observa a veces el fenómeno denominado «dedo en resorte», si las superficies articulares se hallan deformadas: se detiene la flexión y luego se produce una brusca continuación del movimiento al pasar la falange sobre la cresta que separa la parte glenoidea de la parte falángica. La extensión total del movimiento de flexión-extensión de la primera falange es de $30^\circ + 90^\circ$, es decir, 120° . Las particularidades individuales hacen que esos valores sean muy relativos. De todos modos, los dedos medio y anular parecen ser los menos móviles en la mayor parte de los sujetos.

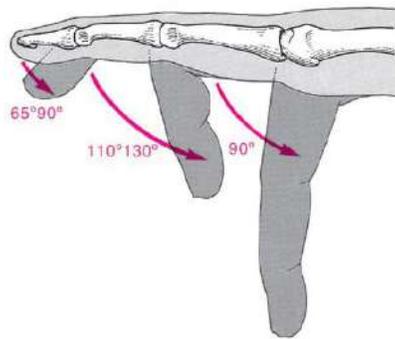


Figura 2.5 Movimiento de flexión-extensión de los dedos sobre el hueso metacarpiano (Llusá, 2003).

- Abducción-aducción de los dedos: El movimiento de abducción alcanza 60° para el dedo índice y 45° para los dedos anular y meñique.

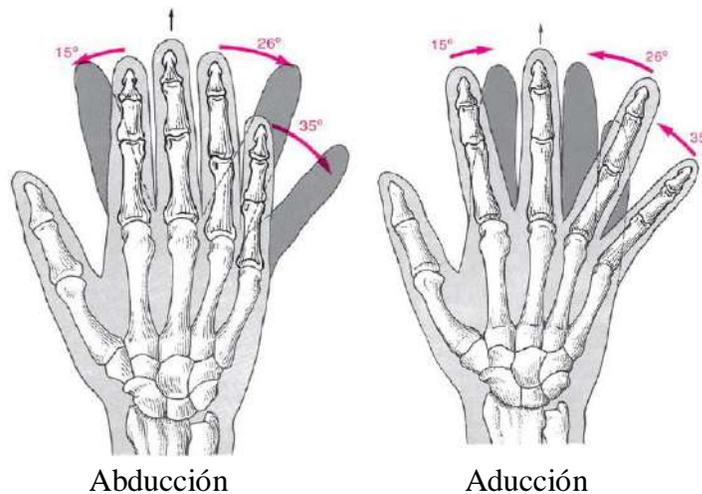


Figura 2.6 Movimiento de abducción y aducción de los dedos trifalángicos (Llusá, 2003).

El dedo pulgar se encuentra fijo por debajo de los otros dedos y puede realizar los movimientos de cierre y rotación, debido a la gran movilidad de su metacarpo. Esto permite variar la orientación en que se desarrolla el movimiento de doblado y extensión del dedo pulgar, propiedad a través de la cual es posible oponer el dedo pulgar a los otros dedos. El dedo pulgar es el agente de la pinza pulgar-dedos, sin él, los movimientos de los dedos constituirían solo prensiones globales en vez de movimientos precisos. El dedo pulgar puede realizar los siguientes movimientos:

1. Abducción-extensión (Figura 2.7a) que separa el dedo pulgar del eje de la mano, su amplitud es de 35 a 40° , este movimiento abre la mano.
2. La aducción (Figura 2.7b) que aproxima el dedo pulgar al eje de la mano. Su amplitud es de 35 a 40° .

3. La oposición (Figura 2.7c) que, combinada con la flexión del dedo pulgar, lo conduce frente al dedo meñique. Se trata de un movimiento de prensión o cierre de la mano y presenta una amplitud de 45° a 60° .
4. La reposición (Figura 2.7d) devuelve el dedo pulgar a su posición inicial de partida, su amplitud es necesariamente igual a la del movimiento precedente.

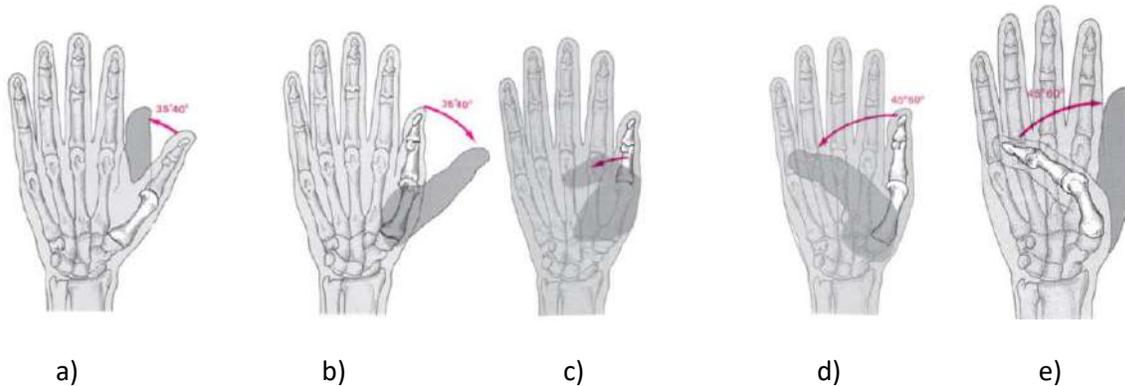


Figura 2.7 Movimiento del dedo pulgar, (a) aducción, (b) abducción, (c) flexión, (d) oposición, (e) reposición de aducción-extensión (Llusá, 2003).

Los dedos presentan principalmente tres articulaciones; articulación metacarpofalángica (MCP): que une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar; articulación interfalángica proximal (PIP): localizada entre las falanges media y proximal del dedo; articulación interfalángica distal (DIP): ubicada entre las falanges media y distal del dedo. La figura 2.8 muestra un esquema del dedo índice y sus falanges y articulaciones.



Figura 2.8 Falanges y articulaciones del dedo índice (Carletti J, 2020).

Los movimientos que se pueden realizar en la primera articulación metacarpofalángica (MCP) son: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación y circunducción. Las articulaciones entre los metacarpianos y las falanges proximales de los dedos son articulaciones condíleas, que permiten flexión, extensión, abducción, aducción, circunducción y una rotación limitada. Las articulaciones entre falanges son de tipo polea (como se muestra en la Figura 2.9) y permiten principalmente los movimientos de flexión y de extensión.

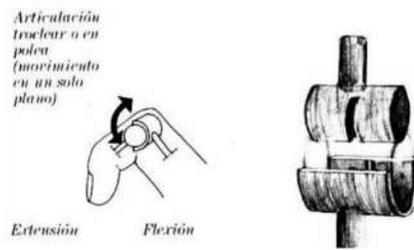


Figura 2.9 Las falanges con su articulación en forma de polea (Londoño, 2015)

Los encargados de realizar los movimientos anteriormente mencionados son los músculos intrínsecos y extrínsecos de la mano. Los músculos extrínsecos se originan en el antebrazo, se insertan en la mano y desempeñan una función de agarre potente. Los músculos intrínsecos se encuentran por completo en la mano y realizan principalmente movimientos de precisión entre los dedos y el pulgar. La combinación de los músculos mencionados permite realizar diversas posiciones como por ejemplo el agarre de empuñadora fuerte, el gancho de agarre o la pinza de precisión.

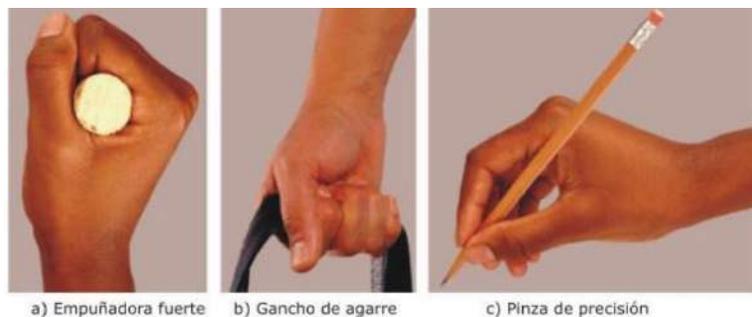


Figura 2.10 Posiciones de la mano (Londoño, 2015)

La compleja organización anatómica y funcional de la mano converge en la prensión como principal función de la mano. La prensión depende de la integridad de la cadena cinética de huesos y articulaciones extendida desde la muñeca hasta las falanges distales. Los patrones 17 de función de prensa son movimientos en los que se agarra un objeto y éste se mantiene en parte o de forma completa dentro de la superficie de la mano, estos patrones se clasifican en: agarres de fuerza y agarres de precisión. Los agarres de fuerza son aquellos en los cuales los dedos están flexionados en las tres articulaciones, el objeto se encuentra entre los dedos y la palma, el pulgar se aduce y queda posicionado sobre la cara palmar del objeto, hay una ligera desviación cubital y se realiza una ligera dorsiflexión para aumentar la tensión de los tendones flexores.

Los agarres de precisión son aquellos utilizados para la manipulación de objetos pequeños entre el pulgar y las caras flexoras de los dedos, la muñeca se posiciona en dorsiflexión, los dedos permanecen semiflexionados y el pulgar se aduce y opone. Los agarres de precisión

se clasifican de acuerdo a las partes de las falanges utilizadas para soportar el objeto que se está manipulando, por ejemplo: Pinza terminal, pinza palmar, pinza lateral, pinza pulpejo, pinza digito-palmar. En la Figura 2.10 se puede apreciar algunos de los agarres que se mencionaron y la diferencia entre los agarres de fuerza que utilizan la palma para ayudarse, mientras que los de precisión involucran únicamente a los dedos (como en las prensiones digitales). La función principal de la mano, por lo tanto, es realizar agarres, tanto de precisión como de fuerza, esta implementación permite al ser humano utilizar su mano como una herramienta; esta utilidad necesaria para la vida cotidiana provoca la preocupación de los cuidados de la mano, así como de estudiar sus patologías.

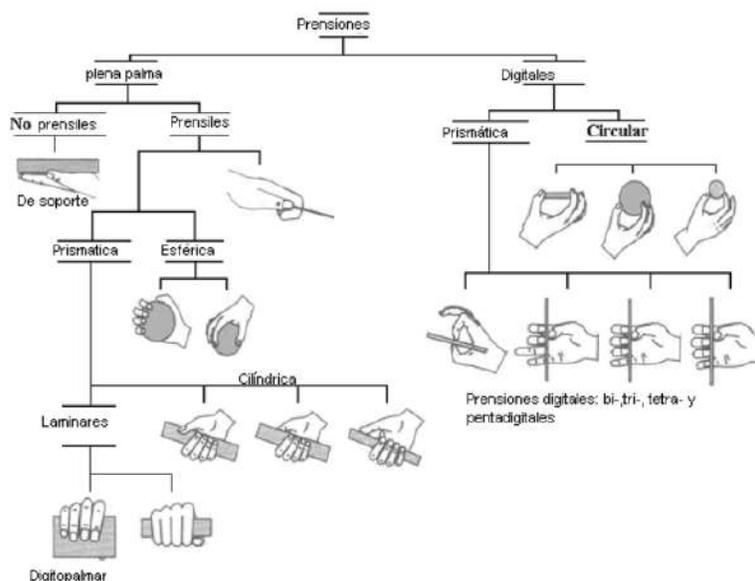


Figura 2.11 Clasificación de los agarres de la mano según la forma y los elementos involucrados. (Londoño, 2015)

2.3 Goniometría de la mano

La única articulación carpometacarpiana de la mano capaz de valorarse por el goniómetro es la articulación trapezometacarpiana, que corresponde a la columna mecánica del dedo pulgar. Es una articulación de silla de montar (tienen poco o nulo movimiento) que posee dos grados de movimiento. Estos movimientos articulares se ejecutan alrededor de ejes con dirección oblicua respecto a los planos de referencia espacial.

2.3.1 Goniometría del pulgar

Como anteriormente se mencionó el pulgar tiene 3 articulaciones:

1) Articulación carpometacarpiana:

- **Abducción-Aducción:** La abducción del pulgar es de 0 a 70°. La aducción del pulgar es de 0° porque el dedo choca contra la mano y no puede efectuar este movimiento.

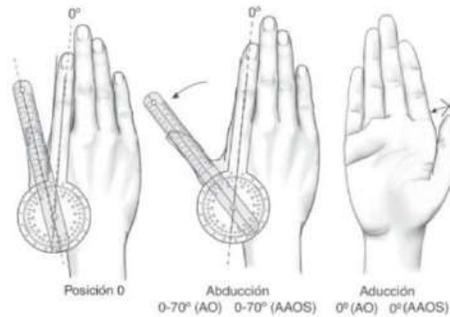


Figura 2.12 Posición 0, abducción y aducción de articulación carpometacarpiana (Génot C, 2019)

- **Oposición:** Se mide con una regla la distancia en cm entre el pulpejo del pulgar y la base del quinto dedo. Se considera normal cuando el pulpejo del pulgar alcanza la base de menique. Un recorrido menor de 8 cm se considera anormal.



Figura 2.13 Movimiento de oposición de articulación carpometacarpiana. (Génot C, 2019)

2) Articulación metacarpofalángica:

- **Flexión:** Con el codo a 90° y el antebrazo apoyado sobre una mesa, con la muñeca en posición 0 y del dedo pulgar en posición 0, dando como ángulo de 0° a 50°.

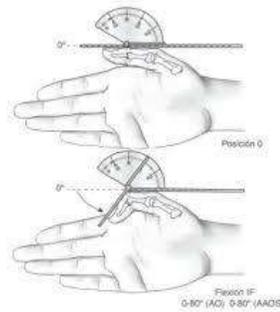


Figura 2.14 Flexión del pulgar a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

- Extensión: El codo en 90°, con la mano y el antebrazo apoyados sobre una mesa, con la muñeca en posición 0 y el dedo pulgar en posición 0, dando como ángulo de 0°

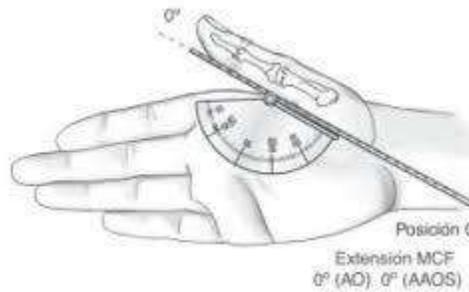


Figura 2.15 Extensión del pulgar a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

3) Articulación interfalángica:

- Flexión: El codo 90°, con la mano y el antebrazo apoyados sobre una mesa, con la muñeca en posición 0 y el dedo pulgar en posición 0, dando como ángulo de 0 a 80°.

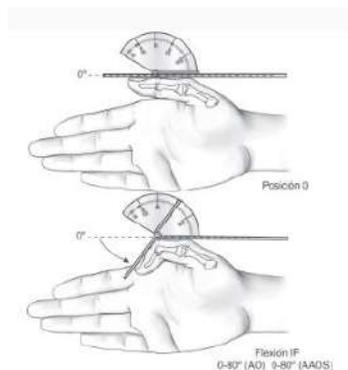


Figura 2.16 Flexión de la articulación interfalángica a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

- Extensión: El codo 90°, con el antebrazo apoyados sobre una mesa, con la muñeca en posición 0 y el dedo pulgar en posición 0, midiendo un ángulo de 0° a 20°.

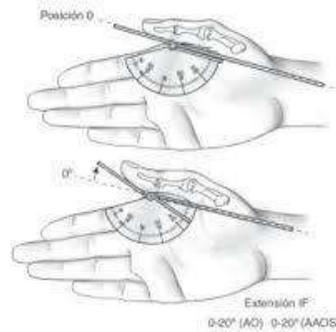


Figura 2.17 Extensión interfalángica a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

2.3.2 Goniometría de los dedos de la mano

Las articulaciones de los dedos de la mano son tres:

1) Articulación metacarpofalángica

- Flexión: El codo 90°, con la mano y el antebrazo apoyados sobre una mesa, con la muñeca en posición 0 y los dedos en posición 0, dando como ángulo de 0° a 90°.

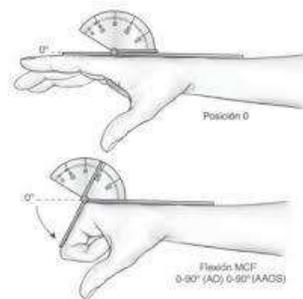


Figura 2.18 Flexión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

- Extensión: El codo 90°, con la mano y el antebrazo apoyados sobre una mesa, con la muñeca en posición 0 y los dedos en posición 0, dando un ángulo de 0° a 30° (AO) y 0° a 40° (AAOS).

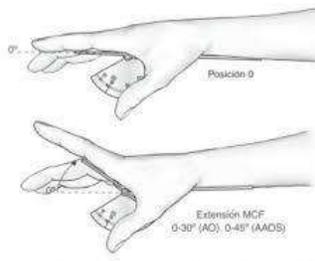


Figura 2.19 Extensión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

2) Articulación interfalángica proximal:

- Flexión: Con un ángulo de 0-100° (AO) y 0-100° (AAOS).

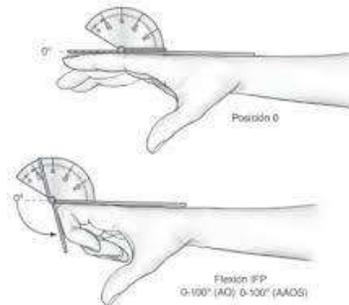


Figura 2.20 Flexión de la articulación interfalángica a partir de la posición 0 (Génot C, 2019)

- Extensión: Con ángulo de 0° (AO) y 0° (AAOS)

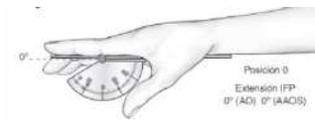


Figura 2.21 Extensión de la articulación interfalángica de la posición 0 (Génot C, 2019)

3) Articulación interfalángica distal

- Flexión: Con ángulo de 0-90° (AO) y 0-90° (AAOS)

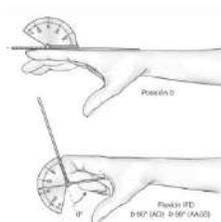


Figura 2.22 Flexión de la articulación distal partiendo de la posición 0 (Génot C, 2019)

- Extensión: Con ángulo de 0° (AO) y 0° (AAOS)

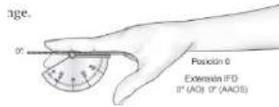


Figura 2.23 Extensión de la articulación distal del dedo índice (Génot C, 2019)

*“Es necesario adaptar la terapia al paciente
y no el paciente a la terapia”
- Louis T.J. Landouzy*

Capítulo 3

Rehabilitación de la mano

3.1 Rehabilitación

La rehabilitación médica constituye una especialidad médica que tiene como objetivo primordial restablecer al máximo la función del cuerpo perdida por una enfermedad congénita o una enfermedad adquirida reintegrando al enfermo a la familia, a su trabajo y a la sociedad. Dentro de los objetivos por conseguir están la independencia en las actividades de la vida diaria, como la capacidad de caminar, de alimentarse la higiene personal y la capacidad de auto vestirse.

3.2 Fisioterapia

La fisioterapia es también conocida como terapia física, el concepto ha ido evolucionando a lo largo de la historia ya que reflejan la concepción que se tenía de la disciplina en cada momento. La Organización Mundial de la Salud (OMS) en 1968 la describe como “el arte y la ciencia del tratamiento por medio del ejercicio terapéutico, calor, frío, luz, agua, masaje y electricidad. Además, la Fisioterapia incluye la ejecución de pruebas eléctricas y manuales para determinar el grado de afectación de la inervación y la fuerza muscular, pruebas para determinar las capacidades funcionales o la amplitud del movimiento articular y medidas de la capacidad vital, así como ayudas diagnósticas para el control de la evolución”. La Confederación Mundial para la Fisioterapia (WCTP) la define como “el conjunto de métodos, actuaciones y técnicas que, mediante la aplicación de medios físicos curan, previenen y adaptan a personas afectadas de disfunciones somáticas y orgánicas o las que se desea mantener un nivel adecuado de la salud”

La terapia física se sirve, predominantemente, de factores físicos, como son la energía mecánica, el calor, el frío, las radiaciones de luz visibles e invisibles, así como numerosas y muy distintas formas de la energía eléctrica con fines terapéuticos.

Los resultados que se pretende lograr son: aliviar el dolor, desinflamar, recuperar arcos de movimiento, reducir el deterioro muscular, corrección de la postura, entre otras actividades destinadas al tipo de lesión o enfermedad que tenga la persona a tratar. Caso contrario que

no se tratara de rehabilitar una lesión física, las consecuencias pueden ser malas tanto físicas como psicológicas, por ejemplo: aburrimiento, frustración, enojo, aislamiento, incremento de la dependencia.

La terapia de la mano, integrada dentro del equipo de cirugía de mano, tiene un papel crucial en la recuperación de las lesiones de la mano o muñeca

3.3 Ejercicios Terapéuticos

La intervención mediante el ejercicio terapéutico es uno de los servicios sanitarios que ofrece la fisioterapia a pacientes. El ejercicio terapéutico se considera un elemento central de la mayoría de los planes de asistencia de la fisioterapia, al cual se suman otras intervenciones; tiene como finalidad:

- Mejorar el estado físico, de salud y la sensación general de bienestar de las personas diagnosticadas.
- Prevenir complicaciones y reducir el uso de medios sanitarios.
- Mejorar o mantener el estado físico de personas sanas.
- Prevenir o reducir al mínimo futuras alteraciones, pérdidas funcionales o discapacidades de cualquier persona.

Los métodos de intervención que comprende el ejercicio terapéutico son, entre otros, actividades o técnicas para mejorar la movilidad, la fuerza, el control neuromuscular, la capacidad cardiovascular y la resistencia muscular, la coordinación equilibrio y destrezas funcionales, los patrones respiratorios y la relajación, la integración de la postura y los patrones de movimiento.

Un factor importante que influye en la eficacia de cualquier programa terapéutico es la educación del paciente y la participación activa en un plan sistemático de asistencia. Las mejoras funcionales a largo plazo y la prevención de futuras lesiones se producirán sólo si el paciente entiende los objetivos del plan de ejercicio e incorpora los consejos e instrucciones del terapeuta en todos los aspectos de las rutinas de la vida diaria.

El modelo empleado por los fisioterapeutas para tratar a los pacientes involucra seis etapas: exploración, evaluación, diagnóstico, pronóstico e intervención y resultados.

*“Vi en un sueño una mesa donde todos los
elementos encajaban según lo requerido.
Al despertar, inmediatamente lo escribí
en una hoja de papel”
- Dimitri Mendeléyev*

Capítulo 4

Descripción de componentes

En este capítulo se describen todos los componentes electrónicos que integran el dispositivo, esto es, el microcontrolador, los sensores utilizados, baterías, su función, la circuitería de acondicionamiento de señal que necesitan, así como los instrumentos de validación que se han utilizado. Además, se describen también los programas para la visualización de datos.

4.1 Sensor MPU-6050

EL MPU6050 es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (DoF) pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría, estabilización, etc. Integra un DMP (Procesador digital de movimiento) capaz de realizar complejos algoritmos de captura de movimiento de 9 ejes.

Se comunica a través de una interfaz I2C y posee una librería muy difundida para su uso inmediato. Este sensor puede entregar 6 grados de libertad e incorpora un regulador de tensión a 3.3V y resistencias pull-up para su uso directo por I2C. Su conexión es sencilla a través de su interfaz I2C master, permitiendo así controlar sensores externos adicionales como magnetómetros o barómetros, entre otros.

Para una captura precisa de movimiento rápido y lento, posee un rango de escala programable de 250/500/1000/2000 grados/seg para el giroscopio y de 2g/4g/8g/16g para el acelerómetro.

Especificaciones:

- Voltaje de operación: 3V/3.3V~5V DC
- Grados de libertad (DoF): 6

- Rango Acelerómetro: 2g/4g/8g/16g
- Rango Giroscopio: 250Grad/s, 500Grad/Seg, 1000Grad/Seg, 2000Grad/Seg
- Interfaz: I2C
- Tamaño: 2.0cm x 1.6cm x 0.3cm

- ❖ Sensor Giroscópico: Un giroscopio es un dispositivo que mide las velocidades angulares basándose en el mantenimiento del impulso de rotación. El giroscopio muestra el cambio de rango en rotación en sus ejes X, Y y Z.
- ❖ Acelerómetro: Mide la aceleración lineal, inclinación o vibración y transforma la magnitud física de aceleración en otra magnitud eléctrica.

El MPU-6050 cuenta con una resolución de 16-bits, lo cual significa que divide el rango dinámico en 65536 fracciones, estos aplican para cada eje X, Y y Z al igual que en la velocidad angular.

Rango De Escala Completa Giroscopio	Rango De Escala Completa Acelerómetro	Sensibilidad del Acelerómetro
±250	±2	16384
±500	±4	8192
±1000	±8	4096
±2000	±16	2048

Tabla 4.1 Características del sensor inercial MPU-6050.

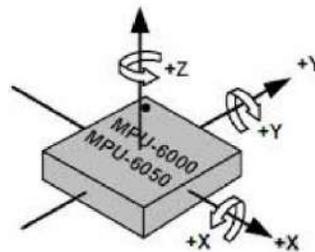


Figura 4.1 Sensor MPU-6050 mostrando los ejes X, Y, Z (Google, sf).

4.2 Multiplexor CD74HC4051

El Multiplexor CD74HC4051 es un multiplexor/demultiplexor analógico de 8 canales con tres entradas digitales seleccionables, una entrada activa, 8 entradas/ salidas independientes y una entrada/ salida común. El VCC tiene un rango de 2,0 a 10,0 V. El multiplexor cuenta con tres entradas de selección digitales (S0, S1 y S2), ocho entradas / salidas independientes (Yn), una entrada / salida común (Z) y una entrada de habilitación digital (E). Cuando E es ALTO, los interruptores están desactivados. Las entradas incluyen diodos

de abrazadera. Esto permite el uso de resistencias limitadoras de corriente para conectar las entradas a voltajes superiores a VCC.

- Amplio rango de voltaje de entrada analógica: ± 5 V.
- Conversión de nivel lógico: para permitir que la lógica de 5 V se comunique con señales analógicas de ± 5 V.

74HC4051

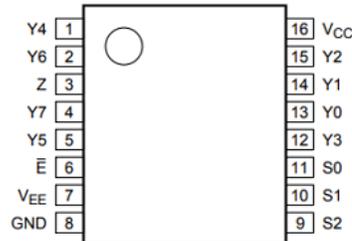


Figura 4.2 Configuración de pies del Multiplexor CD74HC4051 (Google, s.f)

4.3 Microcontrolador

Arduino Uno es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328. Cuenta con 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM (Modulación por ancho de pulsos) y otras 6 son entradas analógicas. Además, incluye un resonador cerámico de 16 MHz, un conector USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reseteado.

Especificaciones:

- Voltaje: 5 V
- Voltaje de entrada: 6-20 V
- Pines Digitales: 14 (de los cuales 6 son salida PWM)
- Entradas Analógicas: 6
- Velocidad de operación: tiene una velocidad de reloj interno de 16 MHz.
- Corriente DC por pin E/S: 40 mA
- Corriente DC para pin de 3.3 V: 50 mA
- Bus datos: 8 IBM, 64 Intel, x8 Multiplicador
- Procesador: ATMEGA 328
- Memoria Flash: 32k bytes
- Memoria SRAM: 2k bytes

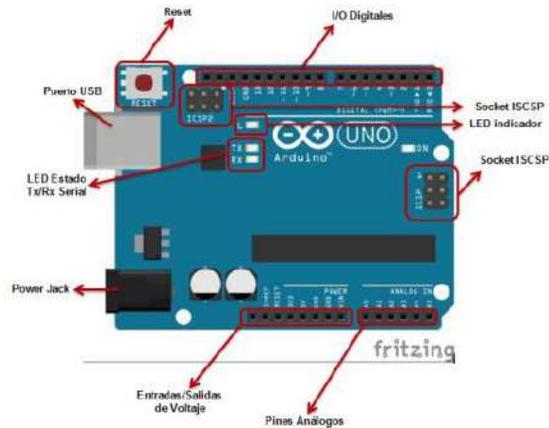


Figura 4.3 Arduino Uno y sus partes (Google, s.f)

4.4 Software

4.4.1 Arduino

El software Arduino es un IDE, Entorno de Desarrollo Integrado (siglas en inglés de Integrated Development Environment). Es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación. El IDE de Arduino es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Además, incorpora las herramientas para cargar el programa ya compilado en la memoria flash del hardware. Implementa el lenguaje de programación de Arduino y el bootloader ejecutado en la placa. La principal característica del software de programación y del lenguaje de programación es su sencillez y facilidad de uso. Arduino se puede utilizar para desarrollar elementos autónomos, conectándose a dispositivos e interactuar tanto con el hardware como con el software.

Las características principales del entorno de desarrollo son:

- El lenguaje de programación es simple y se basa en C++ y C.
- Se tiene la capacidad de experimentar y depurar de código en tiempo de ejecución de programa.
- Existe amplia cantidad de recursos que han sido desarrollados como funciones, ejemplos de programas y librerías.

Este software cuenta, además, con ejemplos de programas para la utilización de sensores, comunicación, salidas pwm, conversión A/D, entre otros. También posee un monitor serial que permite visualizar los datos recibidos por el computador mediante comunicación serial.

4.4.2 Matlab

Matlab es una plataforma de programación y cálculo numérico para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Matlab combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arreglos directamente. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. Una vasta biblioteca de herramientas (Toolboxes) integradas le permite empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio.

Características principales:

- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería
- Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados
- Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales, ajustar sistemas de control y muchas otras tareas
- Herramientas complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®
- Opciones de implementación libres de derechos para compartir programas de MATLAB con los usuarios finales

4.4.3 Solidworks

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software que ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño. SOLIDWORKS ofrece soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño. La sencillez que es parte de su propuesta de valor es decisiva para lograr el éxito de muchos clientes. La solución de SOLIDWORKS incluye cinco líneas de productos diferentes:

- Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes
- Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.
- Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible

- Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida.
- Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.

Capítulo 5

Diseño y construcción del dispositivo

El hardware y software realizados para el diseño y construcción del guante electrónico, se estudian las magnitudes a medir y los materiales a emplear, además de implementar la instrumentación previamente explicada, de igual forma se desarrolla el algoritmo para obtención, registro y visualización de los ángulos pertenecientes a las diferentes posiciones de la mano del paciente.

Para el diseño del guante electrónico se adquirieron guantes textiles recubiertos de nitrilo de tres tamaños: chico, mediano y grande, a los cuales se le añadieron fragmentos de 10cm x1cm de tela velcro, adheridos en el dorso del guante siendo funcionales para pegar los sensores MPU-6050 en las distintas falanges dependiendo del ángulo articular que se deseó estudiar. Posteriormente se realizó la conexión con el multiplexor que permite seleccionar una o más señales de entrada analógicas o digitales de baja velocidad, combinarlas y transmitir las a mayor velocidad en un único medio compartido o dentro de un único dispositivo compartido, de ahí se conectó a la tarjeta Arduino y mediante comunicación serial se conectó a la computadora.

5.1 Hardware

5.1.1. Esquema de sistema de hardware del dispositivo

En la Figura 5.1 se observa la división del proyecto, enfocado desde el hardware empleado en el proyecto. En el cual, se muestran los componentes más importantes en cada etapa como los sensores inerciales y el multiplexor para la etapa de adquisición, el multiplexor y el microcontrolador en la etapa de procesamiento, y la computadora en la etapa de la interfaz visual. Finalmente, la etapa interfaz visual, donde se mostrarán los datos capturados por el guante, se detallará más adelante en la etapa de software, que se representa con un monitor y los logos de los softwares utilizados.

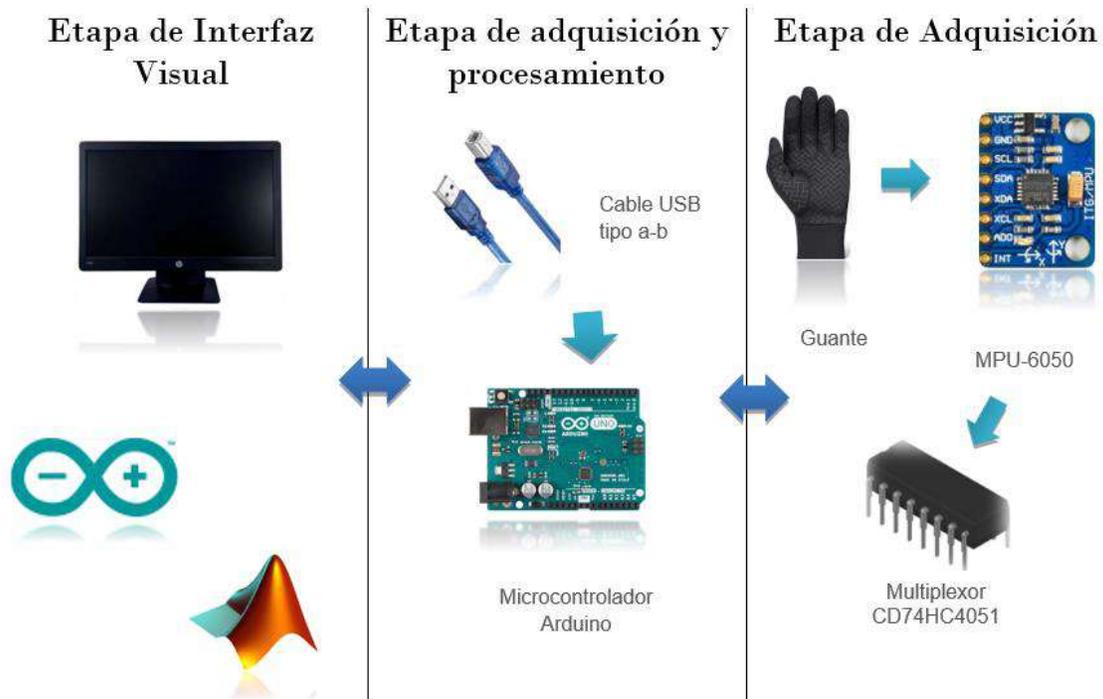


Figura 5.1 Etapas del hardware del proyecto electrónico.

5.1.2. Arquitectura del guante sensorizado

En la etapa de sensado la estructura soporte es un guante en el cual se montaron 5 sensores inerciales MPU 6050, ubicados en el dorso de los dedos pulgar, índice, medio, anular y meñique; el multiplexor y la tarjeta Arduino. Las señales de los sensores inerciales son capturadas mediante el multiplexor el cual recibe varias entradas de datos y las transmite en una única salida, posteriormente son enviadas al microcontrolador mediante una comunicación I2C. Por ello fue necesario incluir una etapa de calibración de los sensores, mediante el tiempo de lectura de los datos. Finalmente, se obtienen todos los datos mediante la comunicación serial para ser enviados por medio del cable USB tipo A-B al computador.

5.2 Guante

Para el desarrollo del guante se realizaron varios prototipos, el primero de ellos se diseñó siguiendo el patrón de un modelo de la mano, el material empleado fue tela tipo nylon, el cual tiene propiedades de flexibilidad y resistentes apropiadas para el proyecto, se necesitaron servicios de costurera profesional para poder coser los patrones con máquina de coser, pero este diseño tuvo dificultades, debido al molde utilizado para el guante, así como que el prototipo presentaba problemas al momento de ajustar los sensores en las posiciones requeridas para el estudio, por lo que se descartó. Figura 5.2



Figura 5.2 Primer prototipo del guante.

El prototipo final se optó por la adquisición guantes textiles recubiertos de nitrilo de tres tamaños: chico, mediano y grande, lo que permite flexibilidad, comodidad y resistencia, logrando no tener problemas en realizar los ejercicios terapéuticos, aunque su mayor desventaja fueron las rugosidades que se formaron en la palma de la mano cuando se cerraba en posición de puño, no obstante, no se conectó ningún sensor en la palma de la mano. Al guante seleccionado se le añadieron 5 fragmentos de tela velcro, con un tamaño de 10 cm de largo y 1 cm de ancho, en la parte dorsal del guante. Los fragmentos se fijaron al guante con pegamento para no comprometer la integridad del guante ni limitar su movimiento. Figura 5.3



Figura 5.3 Prototipo con cintas velcros adheridas al guante

Se diseñaron 5 porta-sensores en el software Solidworks, con la finalidad de servir como base para los sensores MPU-6050. Los porta-sensores se colocarán en distintos puntos de estudio sobre los dedos, por esta razón durante su diseño se tomaron en cuenta las medidas anatómicas proporcionadas por la literatura, y así se obtiene un prototipo ergonómico para

el paciente y que le brinda al sensor estabilidad en las distintas posiciones de estudio. En la Figura 5,4 se muestran los planos del prototipo.

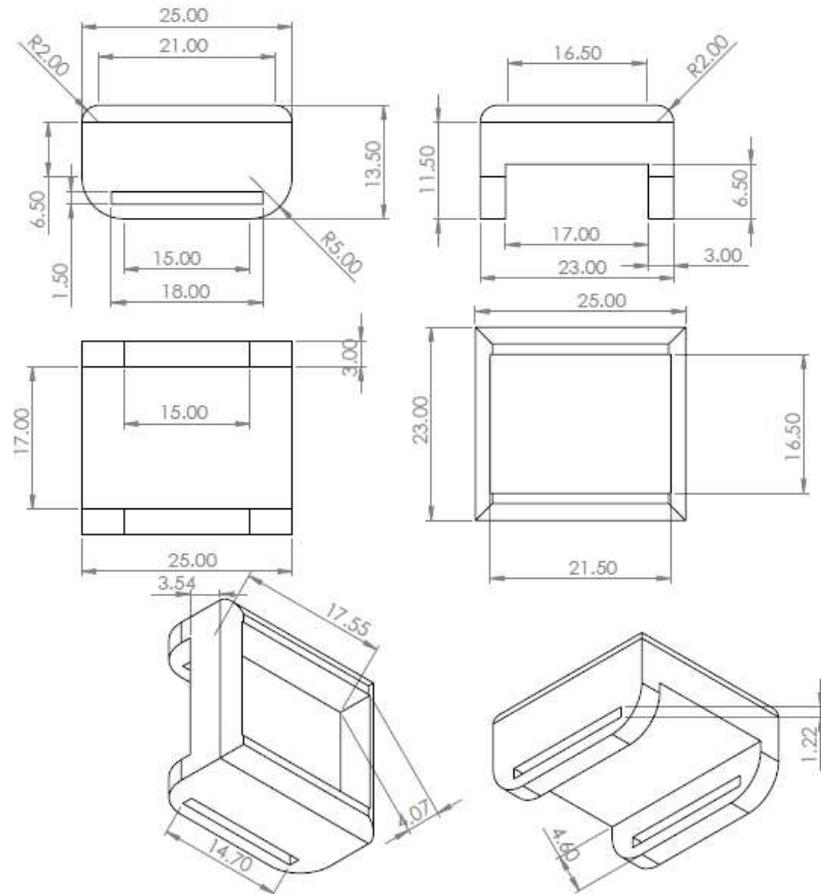


Figura 5.4 Medidas del porta-sensor

El prototipo del porta-sensor como se muestra en la Figura 5.4, se realizó por medio de impresión 3D utilizando PLA como material de utilización por su versatilidad y funcionamiento, tiene un ancho de 23 mm, de largo tiene 25 mm y 13.5mm de altura. El tamaño del porta-sensores se ajustó de manera que no colisionaran lo porta-sensores durante el estudio y al espacio necesario para albergar al sensor MPU6050. En la cara superior del prototipo existe una ranura con las medidas de 16.5mm de ancho, 21.5mm de largo y hacia el interior de la pieza 4.07mm, dicha ranura corresponde al espacio donde se colocará el sensor. En la parte inferior del porta-sensor se crearon dos pestañas de cada lado y a lo largo del prototipo con 6.5mm de altura cada una. Las pestañas tendrán una separación de 17mm, donde dicho espacio servirá para que el paciente coloque su dedo durante el estudio. Las pestañas contarán con una ranura de 14.7mm de largo, 3mm de ancho y una altura de 6.5mm.



Figura 5.5 Porta-sensores en Solidworks

Como complemento para el porta-sensores se utilizaron 5 fragmentos de tiras de tela nylon de 6cm largo y 1 cm de ancho, a los cuales a cada uno se les adhirieron en uno de sus extremos un recuadro de tela velcro de 1 cm. Las tiras se insertaron en las ranuras de las pestañas del prototipo. Las pestañas junto con las tiras del nylon, tienen la funcionalidad de sujetar y ajustar alrededor del dedo logrando estabilizar el sensor en el punto de estudio. Se diseñó de tal manera que se puede cambiar de posición según se requiera en el experimento. La parte inferior del prototipo queda sobre el dorsal de la mano, dejando a la vista la parte superior del porta-sensor, cada dedo contara con uno de los porta-sensor como se muestra en la Figura 5.6



Figura 5.6 Porta sensores en el guante.

5.3 MPU-6050

5.3.1 Ubicación del MPU-6050

Como anteriormente se comentó el sensor inercial MPU-6050 permite obtener la orientación espacial angular, este componente ya realiza la conversión de señales analógicas a digitales internamente, evitando tener un ruido controlado y permitiendo tener mayores entradas analógicas libres para la conexión de los sensores de flexibilidad con el microcontrolador.

El acelerómetro es de 3 ejes con rango de escala de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$. Donde g es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2) y según la aplicación se debe configurar la sensibilidad. El giroscopio también es de 3 ejes con rango de escala de $\pm 250^\circ/\text{s}$, $\pm 500^\circ/\text{s}$, $\pm 1000^\circ/\text{s}$, y $\pm 2000^\circ/\text{s}$.

Es importante recordar que mientras más alto es el rango de escala, la lectura de datos es menos precisa, debido que la sensibilidad disminuye. Se configuró con una sensibilidad de aceleración de $\pm 2g$ y una velocidad angular de $\pm 250^\circ/s$.

El MPU6050 tiene como características principales que cada eje tiene una resolución de salida de 16 bits, un consumo de corriente en el orden de los microamperios ideal para ser alimentado por medio de una conexión USB, permite una comunicación por el protocolo I2C, ser alimentado con un voltaje de 5V y presenta un error de orientación de 1° .

El encapsulado del MPU6050 es de tipo SMD con dimensiones de 4 x 4 x 0.9 mm y la tarjeta del acelerómetro tiene una dimensión de 3 x 2.5 x 0.02 cm, la cual se aprecia en la Figura 3.18. La cual, está diseñada para conectar directamente la alimentación VCC a 5 voltios, la tierra GND, la señal de reloj SCL, la señal de datos SDA.

Por lo que se decidió colocar los 5 sensores inerciales MPU 6050 dentro de los porta sensores adheridos a las tiras de velcro en el dorso de los dedos: pulgar, índice, medio, anular y meñique, el diseño de los porta sensores se creó con la finalidad de poder moverlos sobre las falanges permitiendo el análisis de los diferentes ángulos de las articulaciones. Figura 5.7.



Figura 5.7 Prototipo con los porta sensores en cada dedo.

5.3.2 Distribución de pines

La distribución de pines del MPU-6050:

- Los pines VCC y GND conectan la alimentación de 3.3V y referencia del módulo respectivamente.
- Los pines SCL y SDA permiten el envío de datos del módulo a la tarjeta utilizando comunicación.
- Los pines XDA y XCL permiten conectar al MPU-6050 dispositivos externos como magnetómetros, lo que permitiría al módulo actuar como un dispositivo de hasta 9 ejes.

- El pin AD0 permite conectar simultáneamente dos MPU-6050 a la tarjeta, simplemente cambiando el estado lógico de dicho pin.
- El pin INT se conecta a un pin de interrupción de la tarjeta permitiendo saber cuándo un dato ha sido enviado.

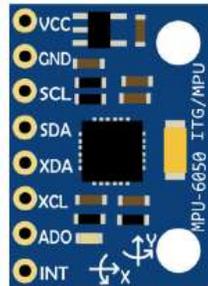


Figura 5.8 Distribución de pines del MPU-6050 (Google, s.f)

Se utilizaron únicamente los pines VCC, GND, SCL, SDA, se dejaron sin utilizar los pines XDA, XCL, AD0 y INT, ya que no se utilizó un dispositivo externo ni un esclavo.

Los sensores fueron conectados a través de cable electrónico de 20 cm de largo a una placa de cobre donde se conectaron al multiplexor CD74HC4051.



Figura 5.9 Sensores MPU-6050 en el guante

5.4 Multiplexor CD74HC4051

El multiplexor CD74HC4051 es un interruptor analógico controlado digitalmente, tiene amplio rango de voltaje de entrada analógica: ± 5 V máximo, voltaje de control de funcionamiento: 2 V a 6 V, voltaje del interruptor: 0 V a 10 V.

5.4.1 Distribución de pines

La distribución de pines del Multiplexor CD74HC4051:

- Posee 16 canales de analógicos.

- Los pines VCC y GND tensión de alimentación positiva de 5 V y referencia del módulo respectivamente.
- Los pines SCL y SDA permiten el envío de datos del módulo a la tarjeta utilizando comunicación I2C.
- Los pines S0, S1 y S2 son entradas de selección permiten conectar al microcontrolador lo que permitiría al módulo comunicación con él.
- Los pines A, E, VEE, permiten la conexión con tecnología COMS, el VEE es la tensión de alimentación negativa, el E es la entrada de habilitación
- Los pines A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 son las señales de entrada.

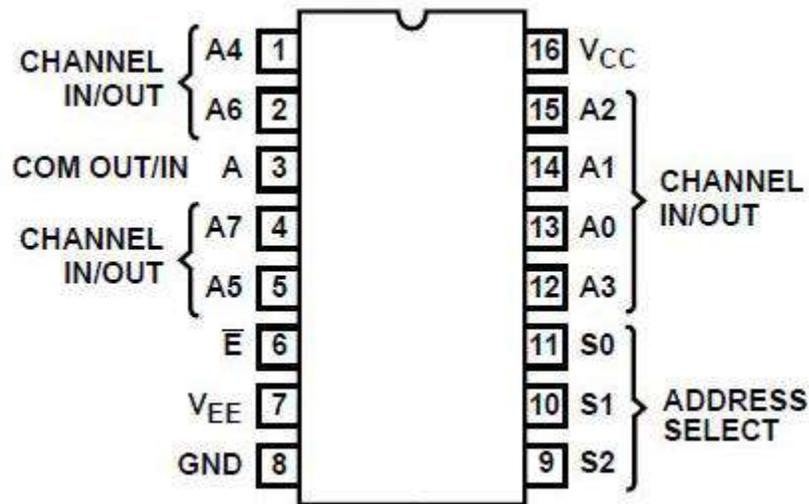


Figura 5.10 Distribución de pines del Multiplexor CD74HC4051 (Google, s.f)

Para la conexión de los cinco sensores MPU con el Multiplexor CD74HC4051 se utilizó una placa fenólica prediseñada de 8cm x 4 cm. Primeramente se soldaron pines a los MPU-6050 con cera para soldar, soldadura y cautín, se utilizó cable eléctrico para los pines VCC, GND, SCL y SDA de los cinco MPU-6050 los cuales se conectaron de la siguiente forma: 1) Los pines VCC de los cinco sensores inerciales se conectaron en serie en la placa de cobre para posteriormente conectarlas con el pin 16 (VCC) del multiplexor, 2) Los pines GND de los cinco sensores inerciales y finalmente se conectaron con el Arduino en el pin de 5V. En el pin 16 del multiplexor se conectó con el capacitor. 3) Los pines SCL fueron conectados en la placa de cobre a través de cable eléctrico en serie, que a su vez se conectaron al pin A1 del microcontrolador Arduino, 4) Los pines SDA se conectaron cada uno de los 5 sensores inerciales a un diferente pin en el multiplexor, el pin SDA del MPU1 se conectó al pin 1 del multiplexor, el pin SDA del MPU2 se conectó al pin 5 del multiplexor, el pin SDA del MPU3 se conectó al pin 15 del multiplexor, el pin SDA del MPU4 se conectó al pin 14 del multiplexor, el pin SDA del MPU5 se conectó al pin 15 del multiplexor. El pin 3 del multiplexor (COM out/in) se conectó al pin A4 del microcontrolador del Arduino. El pin 6, 7 y 8 se conectó al GND de la placa de cobre que a

su vez están conectadas el GND de los cinco sensores inerciales. El pin 16 (Vcc) se conectó a un capacitor de 0.1 mF cerámico que a su vez se conectó a la placa de cobre, donde también se conectaron los Vcc cinco sensores MPU-6050. Finalmente, los pines 11 (S0), 10 (S1) y 9 (S2) son los pines digitales que se conectaron hacia pines digitales del Arduino, posteriormente se explicará la conexión placa de cobre- Arduino.

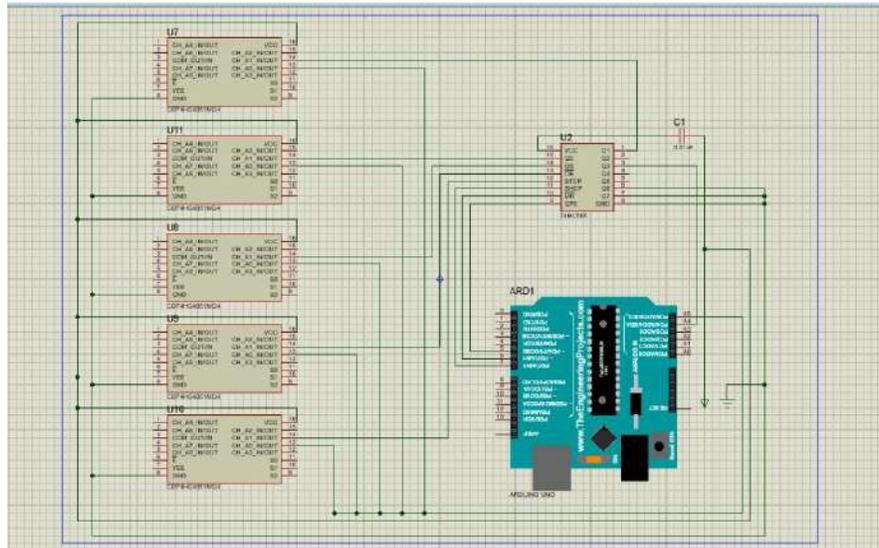


Figura 5.11 Diagrama electrónico del proyecto.

5.5 Microcontrolador Arduino UNO R3 (Rev3)

El Arduino Uno es un microcontrolador Atmel AVR conectado bajo la configuración del “sistema mínimo” sobre una placa de circuito impreso a la que se le pueden conectar placas de expansión (shields) a través de la disposición de los puertos de entrada y salida presentes en la placa seleccionada, es alimentada por un puerto USB, y se programan mediante un computador, usando comunicación en serie.

5.5.1 Distribución de pines

La distribución de pines del Microcontrolador Arduino Uno:

- A0, A1, A2, A3, A4, A5 son las entradas analógicas
- Posee pin 5 voltios y 3.3 voltios.
- Pin de tierra (GND).
- Pin de Reset
- Pines del 2 al 13 son pines digitales de entrada y salida
- Pines Tx y Rx son pines puerto serial
- Entrada de Fuente, regulada de 5 voltios y máximo 12 voltios.
- Puerto USB para conexión al PC.

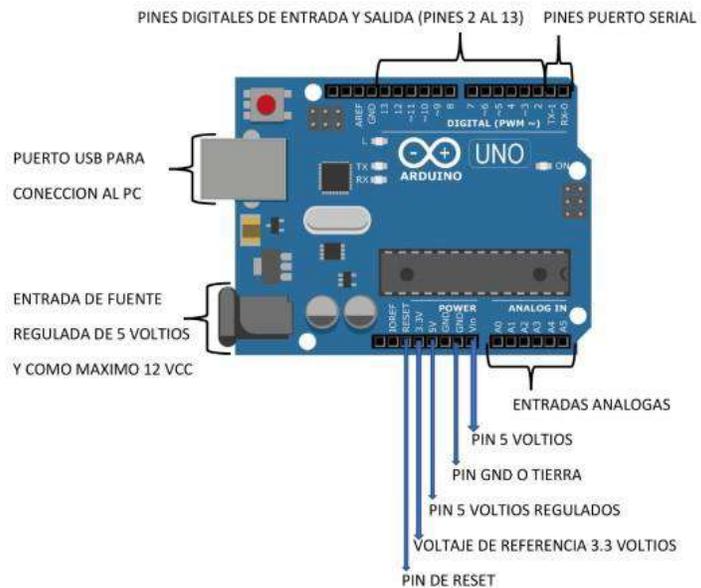


Figura 5.12 Distribución de pines de Arduino UNO. (Google. s.f)

Los pines 11 (S0), 10 (S1) y 9 (S2) son los pines digitales del multiplexor, se conectan a los pines digitales 7,6 y 5 respectivamente. En la placa de cobre se soldó cable electrónico para la salida de Vcc y GND que se conectan en el pin 5 voltios y pin GND del Arduino, Los pines SCL se conectan a los pines analógicos del microcontrolador Arduino de la siguiente forma: 1) El pin SCL del MPU1 se conectó al pin digital 3 del Arduino, 2) El pin SCL del MPU2 se conectó al pin digital 4 del Arduino, 3) El pin SCL del MPU3 se conectó al pin digital 5 del Arduino, 4) El pin SCL del MPU4 se conectó al pin digital 6 del arduino,5) El pin SCL del MPU5 se conectó al pin digital 7 del Arduino.

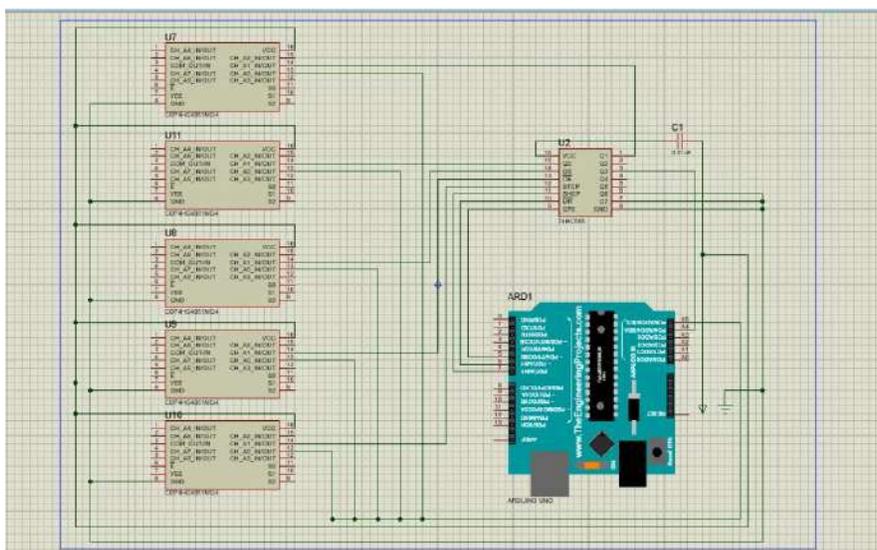


Figura 5.13 Diagrama de la conexión con el Arduino

5.6 Arquitectura de hardware adicional

Se utilizó arquitectura de hardware adicional en el proyecto, se diseñó en el software Solidworks una carcasa impresa en PLA para los componentes electrónicos de la etapa de procesamiento del prototipo, dicho armazón se compone de dos piezas. La primera de ellas es una caja que tiene como funcionalidad ser base de la placa de cobre y el microcontrolador, brindando equilibrio, protección y soporte para los componentes durante el movimiento para realizar el estudio. El diseño es una caja de 125mm de largo, 95mm de ancho y 45mm de altura, con espacio suficiente para poder albergar los componentes electrónicos, además de tener aberturas para las conexiones USB y también tiene 5 aberturas de menor tamaño para los cables de los sensores MPU-6050, cada una de ellas es específica para cada grupo de cables de los sensores.

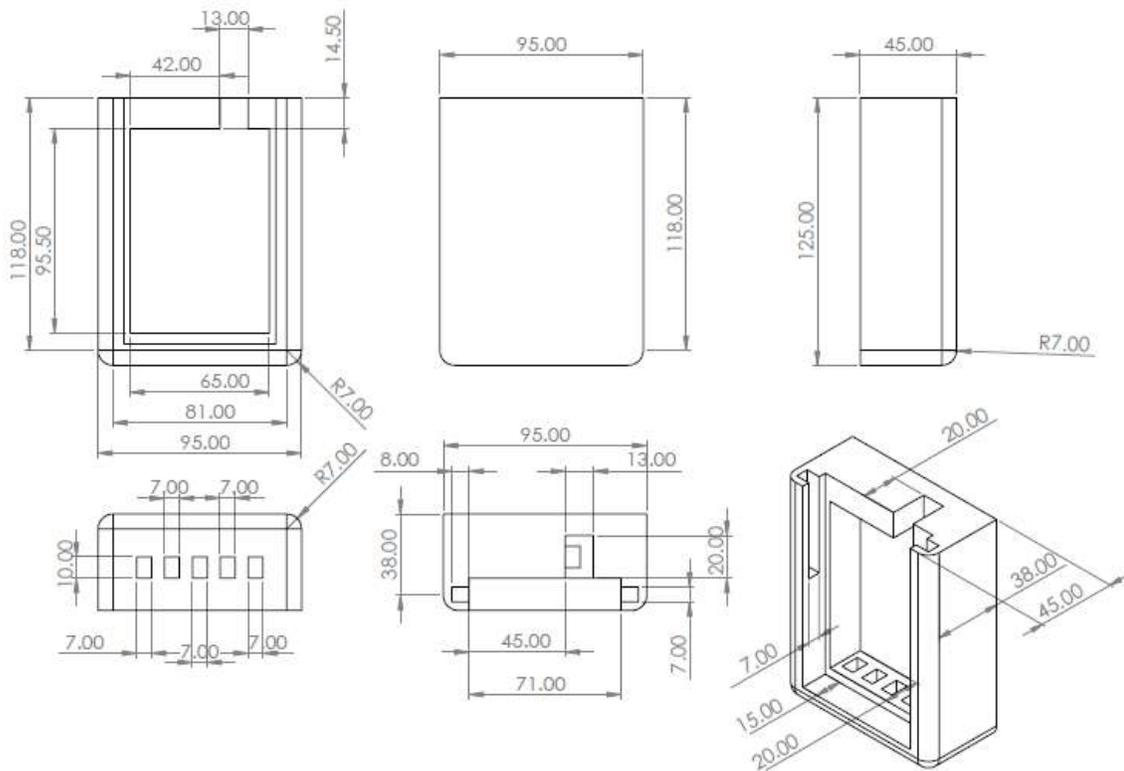


Figura 5.14 Medidas de la base de los componentes electrónicos

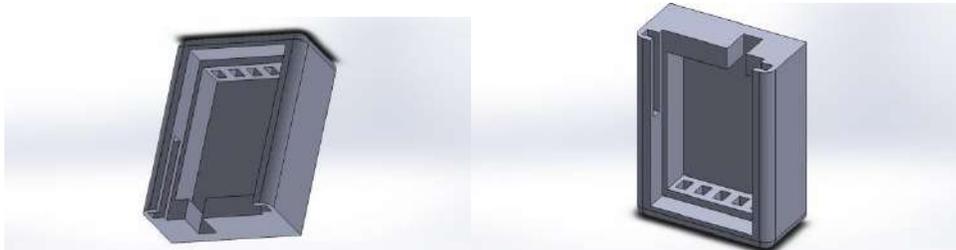


Figura 5.15 Base para los componentes electrónicos en Solidworks.

La segunda pieza del armazón es una tapa que tiene la finalidad de cerrar la caja y mantener los componentes eléctricos protegidos contra elementos externos. La tapa se puede deslizar para abrir o cerrar de manera que se puede acceder fácilmente al interior de la caja.

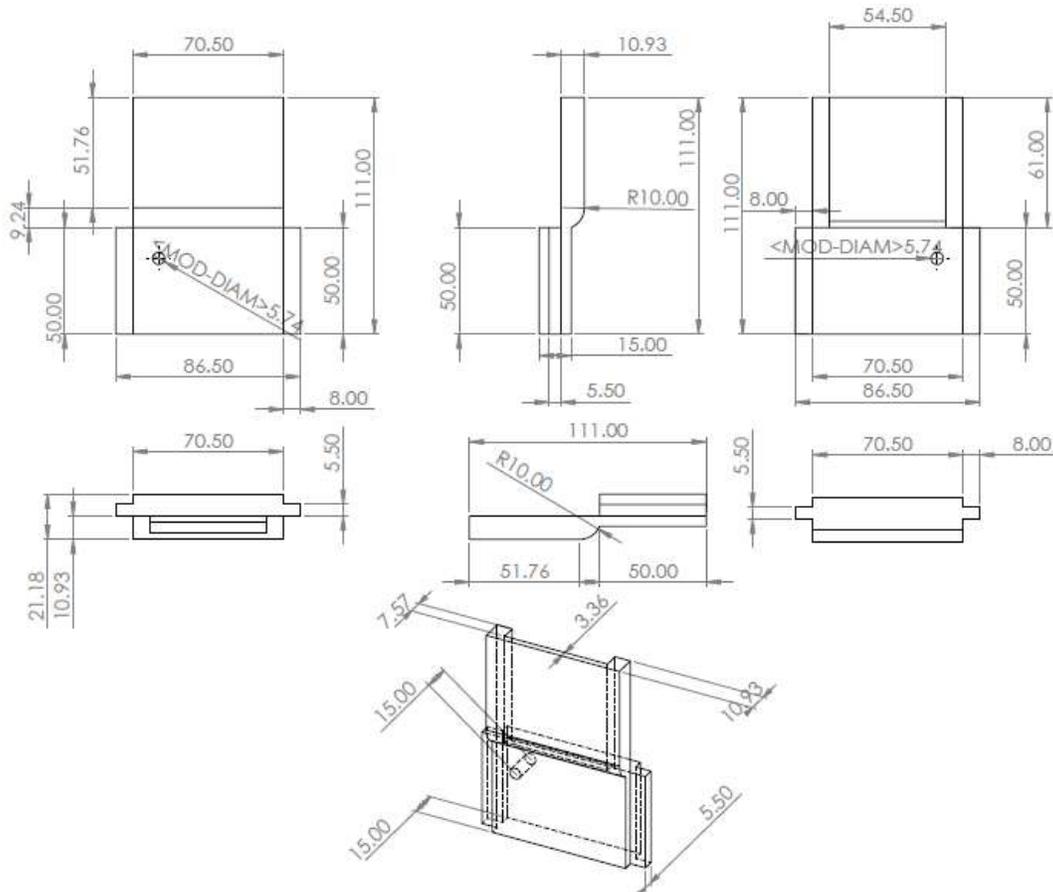


Figura 5.16 Medidas de la tapa de la base de los componentes electrónicos

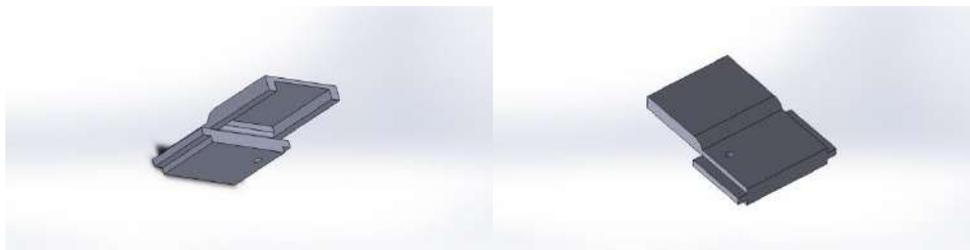


Figura 5.17 Tapa de la base de los componentes electrónicos en Solidworks.

5.6.1 Ubicación de la arquitectura de hardware adicional

La arquitectura de hardware adicional se diseñó con la finalidad de dar equilibrio a los componentes electrónicos, por lo que se introdujeron la placa de cobre junto con el

microcontrolador de Arduino, se insertaron los cables electrónicos por las aberturas de la base, posteriormente se conectaron de acuerdo a los diagramas, así mismo se colocó el cable USB para conectar el microcontrolador Arduino con el computador. Figura. 5.18



Figura 5.18 Prototipo del proyecto

Para el funcionamiento del proyecto electrónico es necesario una computadora o laptop que posea por lo menos un puerto USB para la conexión con el guante sensorizado. Se ejecutó la aplicación diseñada, además de ser donde se realiza gran parte del procesamiento de los datos de los sensores.

*“La verdad sólo se puede encontrar
en un lugar: el código”
- Robert C. Martin.*

Capítulo 6

Desarrollo de la programación

En el presente capítulo se describe la programación y el software utilizado en el proyecto, se describe la programación implementada para el desarrollo de la comunicación entre los componentes electrónicos, así como la obtención de los datos en los diferentes softwares utilizados.

6.1 Software

6.1.1. Esquema del software del dispositivo

En la Figura 6.1 se observa la división del software utilizado en el proyecto, en el cual, se muestran los componentes más importantes en cada etapa como las herramientas utilizadas para la captura de los datos digitales en la etapa del software Arduino, las herramientas y las ventanas de visión para la comunicación entre el software Arduino-Matlab y por último el software Excel para el análisis y el esquemático de los datos, siendo clave en el estudio de los resultados.

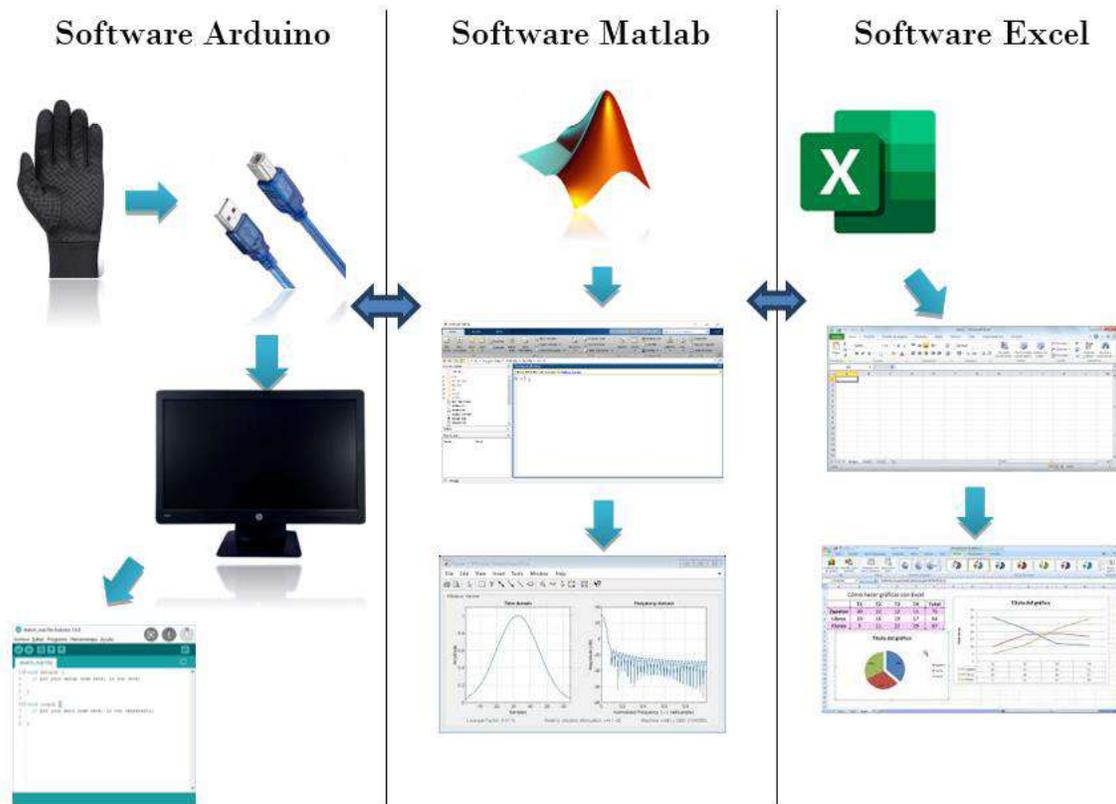


Figura 6.1 Etapas del software del proyecto electrónico.

6.2 Software Arduino

El software compilador utilizado con el microcontrolador Arduino Uno fue el Arduino (IDE) versión 1.8.13, el cual facilita la escritura de código y la carga en la placa. Funciona con Windows, Mac OS X y Linux. El entorno está escrito en Java y basado en Processing y otro software de código abierto. El software utiliza cualquier microcontrolador Arduino.

- Tiene un lenguaje de programación sencillo y de fácil uso
- Código Abierto (Hardware y Software libres). Toda la información para la enseñanza, el aprendizaje y el desarrollo de proyectos, así como los diagramas eléctricos, el software y las actualizaciones son de libre acceso y distribución sin costo alguno.
- Flexibilidad y Versatilidad. Cada tarjeta Arduino puede adaptarse para operar en múltiples aplicaciones. Los pines del microcontrolador son fácilmente accesibles a través de terminales hembra o macho comunes.
- Amplia compatibilidad. El entorno de programación Arduino IDE es totalmente compatible con los sistemas operativos más populares: Windows, MAC y Linux, pudiendo operar incluso en versiones antiguas de estos sistemas y en computadoras con recursos limitados de hardware.

- Lenguaje de programación de fácil comprensión. Basado en el popular C++, el lenguaje Arduino es sumamente fácil de entender y aplicar exitosamente desde el principio (tiene una magnífica curva de aprendizaje).

6.2.1 Programación para adquisición de datos

Como anteriormente se ha explicado los sensores inerciales fueron conectados al multiplexor y de igual forma al microcontrolador Arduino, para la adquisición de datos de los sensores MPU-6050 se utilizó el protocolo de comunicación I2C, siendo los pines principales SDA y SCL.

Librerías

En el proyecto se utilizaron dos librerías que facilitan la programación las cuales proporcionan la obtención simplificada y directa de valores, la primera librería se llama I2Cdev, la cual es una librería tipo wire.h, le permite comunicarse con dispositivos por bus I2C (Inter-Integrated Circuit o 2 alambres), usa dos líneas: SDA (datos) y SCL (reloj), uno los GND. La segunda librería es llamada MPU6050 la cual permite la comunicación con los sensores inerciales MPU 6050, desarrollada por Jeff Rowberg, está disponible en línea y de forma gratuita. El proceso de instalación de ambas librerías es en el software Arduino, en la sección Programas, en la Opción Incluir Librerías, se muestra una ventana nueva donde se buscan las librerías deseadas para después instalarlas, inmediatamente se escriben automáticamente en el Archivo.

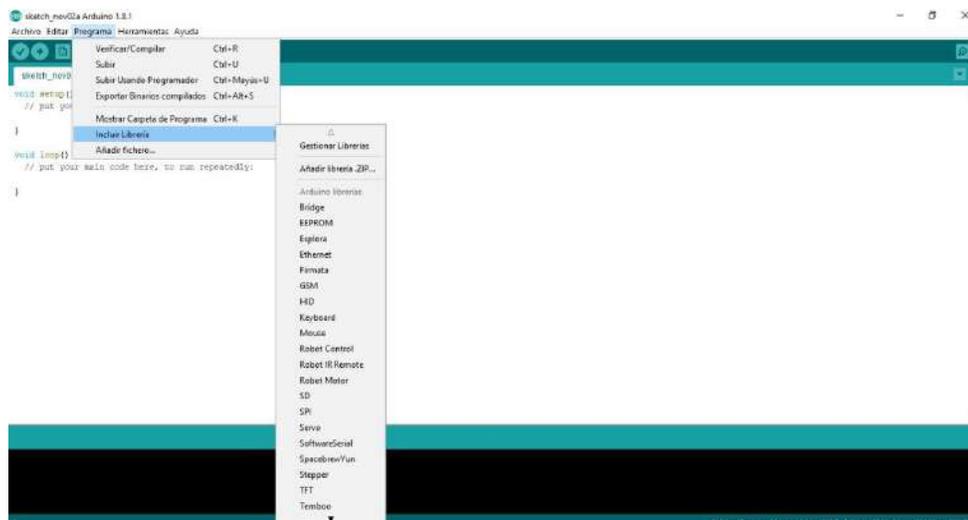


Figura 6.2 Ubicación de la inclusión de Librerías en Arduino

Figura: Librería MPU6050 a) Ruta de Acceso b) Ventana de instalación de librerías

Código

Primeramente, la comunicación entre el dispositivo y el ordenador se basa en el reconocimiento de la tarjeta electrónica, se configuró a través de un ciclo indefinido, se detendrá hasta que la comunicación USB-computador sea detenida hasta que el cable USB sea desconectado.

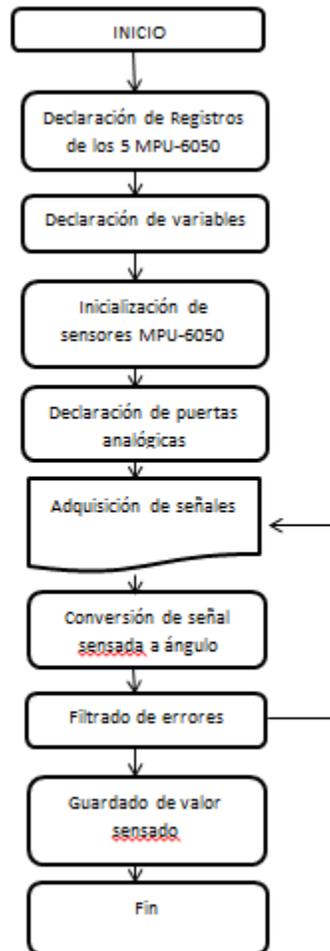


Figura 6.3 Diagrama de flujo del código

Primeramente, se añadieron las librerías I2Cdev.h, MPU6050.h y Wire.h las cuales sirven para poder utilizar los sensores MPU6050 con el software Arduino, así como la adquisición de datos. Se realizó la inicialización de variables, dándole a cada MPU6050 una combinación de 3 valores en los pines digitales que servirán como un identificador para el multiplexor quien abrirá o cerrará las puertas analógicas. El multiplexor dependiendo de los valores que envíe Arduino permitirá el paso de los datos de alguno de los MPU6050. Se realizó la declaración de registros (0x68), el cual habilita y deshabilita el giroscopio según la comunicación I2C. De igual forma se realizó la declaración de variables tanto del acelerómetro como del giroscopio. Se escribió las variables para la conversión de voltaje a unidades medibles (kgF).

```

#include <I2Cdev.h>
#include <MPU6050.h>
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#include "Wire.h"
#endif
MPU6050 mpu_0(0x68);
MPU6050 mpu_1(0x68);
MPU6050 mpu_2(0x68);
MPU6050 mpu_3(0x68);
MPU6050 mpu_4(0x68);

int16_t ax_0, ay_0, az_0, ax_1, ay_1, az_1, ax_2, ay_2, az_2, ax_3, ay_3, az_3, ax_4, ay_4, az_4;
int16_t gx_0, gy_0, gz_0, gx_1, gy_1, gz_1, gx_2, gy_2, gz_2, gx_3, gy_3, gz_3, gx_4, gy_4, gz_4;

#define OUTPUT_READABLE_ACCELYRO
int i=0;
//Mux control pins
int s0 = 7;
int s1 = 6;
int s2 = 5;
long tiempo_prev0;
long tiempo_prev1;
long tiempo_prev2;
long tiempo_prev3;
long tiempo_prev4;
float dt0,dt1,dt2,dt3,dt4,dt5;
float dt0,dt1,dt2,dt3,dt4,dt5;
float ang_x0, ang_y0,ang_x1, ang_y1,ang_x2, ang_y2,ang_x3, ang_y3,ang_x4, ang_y4;
float ang_x_prev0, ang_y_prev0,ang_x_prev1, ang_y_prev1,ang_x_prev2, ang_y_prev2,ang_x_prev3, ang_y_prev3,ang_x_prev4, ang_y_prev4;
//Mux in "SIG" pin
int SIG_pin = 0;

const int MPU=0x68;

```

Figura 6.4 Declaración de Registros y Variables en el código

Posteriormente, se inicializó el monitor serial para tener una velocidad de comunicación de 9600 baudios, se determinó esta velocidad para visualizar los cambios en el monitor serial durante las pruebas previas a la implementación del dispositivo con el paciente. Se declararon los pines como entradas y salidas, se inicializó la comunicación wire, así como abrir el canal de comunicación, así como asignar el valor de la velocidad de la comunicación.

Además, se realiza la inicialización del sensor MPU 0, los pines digitales S0, S1, y S2 reciben valores de 0 o 1 para la comunicación con el multiplexor, de igual forma se inicializa el wire, determinación de registro de comunicación y verificación de transmisión, se determinó la palabra clave “initialize” para establecer comunicación con el sensor y por último se agrega la condición que muestre la frase “Falla detectada” cuando sea igual a 0. Este conjunto de líneas se repite 5 veces correspondiendo a los 5 sensores MPU6050, en donde se cambian los nombres de las variables y pines.

```

void setup() {

  pinMode(s0, OUTPUT);
  pinMode(s1, OUTPUT);
  pinMode(s2, OUTPUT);

  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
  |   Wire.begin();
  #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
  #endif

  Serial.begin(9600);

  // ===== MPU: 0 =====
  digitalWrite(s0, LOW);
  digitalWrite(s1, LOW);
  digitalWrite(s2, LOW );
  delay(5);
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU);
  Wire.write(0x6B); // PWR_MGMT_1 register
  Wire.write(0); // set to zero (wakes up the MPU-6050)
  Wire.endTransmission(true);
  delay(15);
  mpu_0.initialize();

```

Figura 6.5 Código de sensores MPU6050

Se utilizó un ciclo for el cual tiene como finalidad el contabilizar los datos, se calcularon los ángulos con el acelerómetro, gracias al empleo de la ecuación que se muestra en la Figura #. También se realiza la conversión de lectura analógica a sistema internacional, usando la función map. Finalmente, se imprimen los datos requeridos en el monitor serial.

$$\theta_x = \tan^{-1}\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right)$$

$$\theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right)$$

Ecuación 1. Ecuación para obtención de ángulos

```

mpu_0.getAcceleration(&sax_0, &say_0, &az_0);
mpu_0.getRotation(&gx_0, &gy_0, &gz_0);
//Calcular los ángulos con acelerometro
dt0 = (millis()-tiempo_prev0)/1000.0; //delta tiempo
tiempo_prev0=millis(); //tiempo en milisimas
float accel_ang_x0=atan(ay_0/sqrt(pow(ax_0,2) + pow(az_0,2)))*(180.0/3.14);
float accel_ang_y0=atan(-ax_0/sqrt(pow(ay_0,2) + pow(az_0,2)))*(180.0/3.14);
  ang_x0 = 0.98*(ang_x_prev0+(gx_0/131)*dt0) + 0.02*accel_ang_x0;
  ang_y0 = 0.98*(ang_y_prev0+(gy_0/131)*dt0) + 0.02*accel_ang_y0;
  // se guarda el angulo en angulo previo para utilizarlo
ang_x_prev0=ang_x0;
ang_y_prev0=ang_y0;
// Serial.print("0");
// Serial.print(",");
Serial.print(ang_x0);
Serial.print(",");
Serial.print(ang_y0);
  Serial.print(",");
  delay(5);
digitalWrite(s0, HIGH);
digitalWrite(s1, LOW);
digitalWrite(s2, LOW);
delay(5);

```

Figura 6.6 Código implementando ecuaciones matemáticas

Se utiliza la función `getAcceleration` y `getRotation` para la lectura del acelerómetro y el giroscopio de los 3 ejes. Se determina una variable correspondiente a delta tiempo, el cual estará contando el tiempo en milisegundos menos el tiempo previo registrado entre mil para mostrarse en segundos. `Tiempo_prev` guarda el tiempo para restarlo en la siguiente medición, este tiempo se guarda en milisegundos. Se declaran las variables `accel_ang_x0` y `accel_ang_y0` donde por medio de la fórmula de la Figura 6.6 y en la misma se convierte de radianes a grados (se multiplica por $180/\pi$).

Posteriormente, se utiliza la variable `ang_x` y `ang_y` para el el filtro complementario, el cual combina la mediciones del giroscopio y el acelerómetro logrando una medida exacta, `Ang_x_prev`=guarda el ángulo obtenido para la siguiente medición.

$$\text{ángulo} = 0.98(\text{ángulo} + w_{\text{giroscopio}}dt) + 0.02(\text{ang}_{\text{acelerómetro}})$$

Ecuación 2. Ecuación para obtención de ángulo en programa

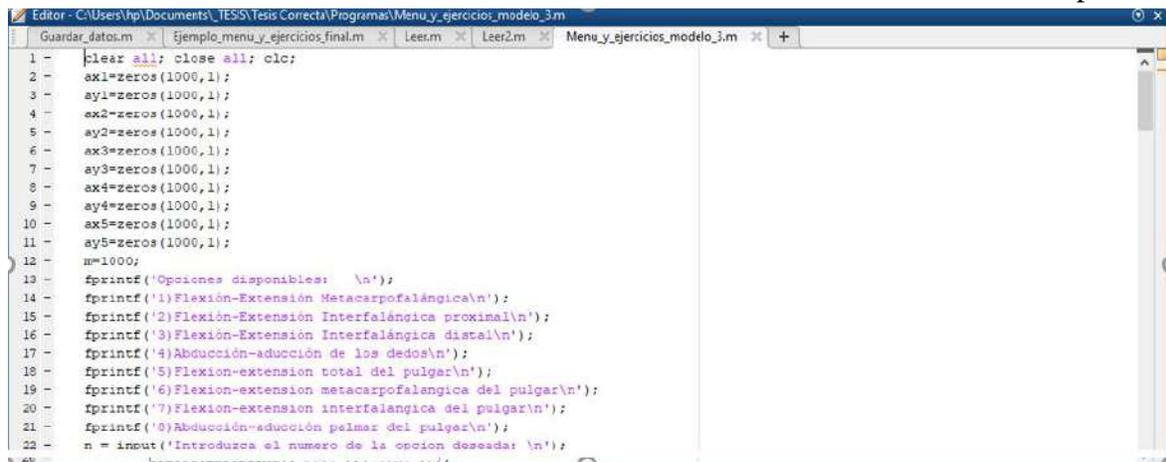
Se imprimen los resultados en el monitor serial, se separan por comas para su posterior procesamiento. Se envían mediante el monitor serial la siguiente combinación para la identificación del siguiente MPU6050, este identificador abre la puerta del multiplexor para el siguiente MPU6050 y así sucesivamente.

6.3 Software Matlab

Los datos obtenidos del monitor serial del software Arduino, se comunican al software Matlab para poder procesar los datos dependiendo de las pruebas y las posiciones para la medición de ángulos. En el software Matlab se implementó un código de programación con el cual se dio orden a la captación de datos, se organizó dependiendo de la posición que realizaba el paciente. Por último, se programaron los valores en ángulos, para poder analizarlos en el software Excel.

Código

Primeramente, se declararon las variables vacías para guardar los datos obtenidos del software Arduino, también se declara la variable “m” correspondiente a la cantidad de muestras que se están adquiriendo de lo transmitido por el software Arduino. De igual forma se agregó un menú que es parte de la interfaz, para que el usuario pueda escoger de las diferentes opciones.



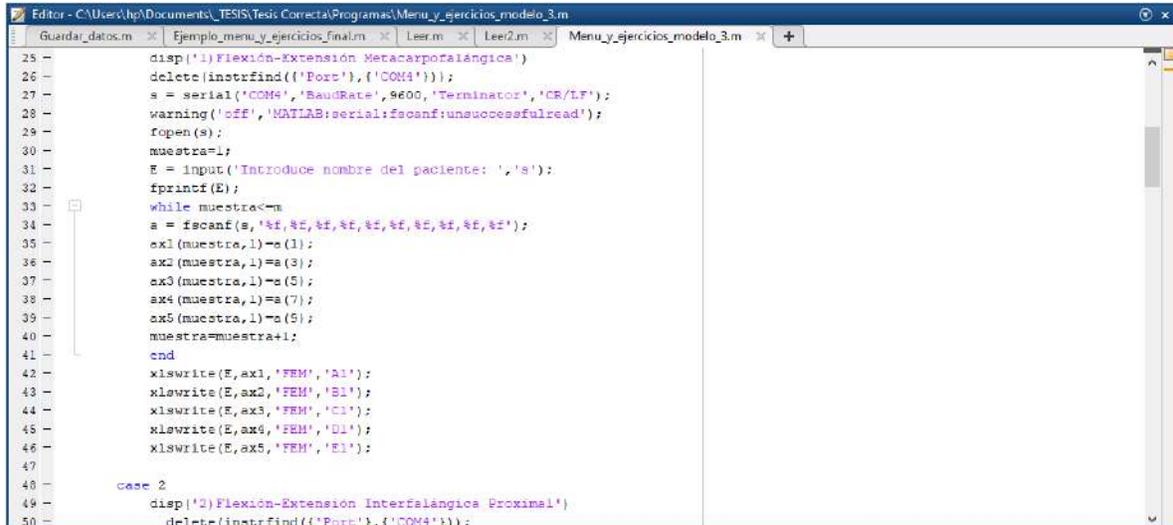
```
1 - clear all; close all; clc;
2 - ax1=zeros(1000,1);
3 - ay1=zeros(1000,1);
4 - ax2=zeros(1000,1);
5 - ay2=zeros(1000,1);
6 - ax3=zeros(1000,1);
7 - ay3=zeros(1000,1);
8 - ax4=zeros(1000,1);
9 - ay4=zeros(1000,1);
10 - ax5=zeros(1000,1);
11 - ay5=zeros(1000,1);
12 - m=1000;
13 - fprintf('Opciones disponibles: \n');
14 - fprintf('(1)Flexión-Extensión Metacarpofalángica\n');
15 - fprintf('(2)Flexión-Extensión Interfalángica proximal\n');
16 - fprintf('(3)Flexión-Extensión Interfalángica distal\n');
17 - fprintf('(4)Abducción-aducción de los dedos\n');
18 - fprintf('(5)Flexion-extension total del pulgar\n');
19 - fprintf('(6)Flexion-extension metacarpofalángica del pulgar\n');
20 - fprintf('(7)Flexion-extension interfalángica del pulgar\n');
21 - fprintf('(8)Abducción-aducción palmar del pulgar\n');
22 - n = input('Introduzca el numero de la opcion deseada: \n');
```

Figura 6.7 Menú de los movimientos en Matlab.

Se utilizaron casos los cuales se repitieron varias veces, variando la cantidad de los datos obtenidos. Así mismo se agrega la opción para que el usuario pueda introducir la elección a elegir, se utiliza la función “switch” la cual lee la variable n y lo compara con los casos, realizando el caso con el que coincida. Dentro de cada caso hay un grupo de instrucciones específicas para cada opción dentro del menú. Se abre la comunicación con el puerto serial del Arduino, se pide al usuario agregar el nombre del paciente para guardar los datos en un documento Excel con el mismo nombre, también se utiliza la función “while-end” para adquirir continuamente los datos hasta llegar al número de muestreo rápido.

La variable “a” es tipo vector donde se guardan los datos obtenidos en el monitor serial, el programa divide los datos por cada coma, asigna un número, encuentra una coma y lo guarda en el siguiente espacio del vector, se dividen los datos en variables vacías para diferenciarlos de cada dedo. Terminado el while, las variables con los datos son guardados,

con ayuda de la función `xlswrite`, que convierte un grupo de variables en una hoja de Excel. Los datos se guardan en un documento de Excel con el nombre del paciente, en una hoja con el nombre de la prueba realizada, y en una columna cada grupo de ángulos. El proceso se repite en cada case pero cambiando la cantidad de ángulos que se guarda.



```
25 - disp('1)Flexión-Extensión Metacarporalángica')
26 - delete(instrfind('Port',{ 'COM4'}));
27 - s = serial('COM4','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');
28 - warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulread');
29 - fopen(s);
30 - muestra=1;
31 - E = input('Introduce nombre del paciente: ','s');
32 - fprintf(E);
33 - while muestra<=m
34 -     a = fscanf(s,'%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f');
35 -     ax1(muestra,1)=a(1);
36 -     ax2(muestra,1)=a(3);
37 -     ax3(muestra,1)=a(5);
38 -     ax4(muestra,1)=a(7);
39 -     ax5(muestra,1)=a(9);
40 -     muestra=muestra+1;
41 - end
42 -     xlswrite(E,ax1,'FEM','A1');
43 -     xlswrite(E,ax2,'FEM','B1');
44 -     xlswrite(E,ax3,'FEM','C1');
45 -     xlswrite(E,ax4,'FEM','D1');
46 -     xlswrite(E,ax5,'FEM','E1');
47 -
48 - case 2
49 -     disp('2)Flexión-Extensión Interfalángica Proximal')
50 -     delete(instrfind('Port',{ 'COM4'}));
```

Figura 6.8 Ciclo while para obtención de datos

Adicionalmente se realizó un código para la lectura de los datos obtenidos del código anterior, por lo que de la carpeta de todas las pruebas realizadas se revisaron para obtener los promedios. Se utilizó la función “for” para todos los documentos, con el cual se lee el nombre del documento y la hoja seleccionada, se guardan los datos dentro del documento en la variable `datos`.

Se utilizó el valor absoluto trabajar solo con números positivos, estos datos entran a la función “if” que corresponde al momento en el que se realiza el movimiento, se filtra para evitar datos que no correspondan a lo que se busca estudiar, dichos resultados se guardan en distintas variables.

```

1 - clear all; close all; clc;
2 - docufi=10;
3 - %% Doc 3-6 cuanto viejo
4 - %% Doc 1-2 y 18 copias
5 - %% Doc 7 en adelante cuanto nuevo
6 - for i = 1:docufi
7 -     nombre = sprintf('%d.xls',i); % con esto se genera el nombre del fichero
8 -     dato = xlsread(nombre,'FEM'); % para despues leerlo con xlsread
9
10 -     datop=dato'-1;
11 -     for j=1:5
12 -         for w=1:1000
13 -             if(w >= 417) && (w <= 650)
14 -                 fill(w-416,j)=datop(w,j);
15 -             elseif (w >=777)
16 -                 fil2(w-776,j)=datop(w,j);
17 -             end
18 -         end
19 -     end
20 -     promeD(i,:)= mean(fill);
21 -     promeD= mean(fill);
22 -     promeE(i,:)= mean(fil2);
23 -     promeE= mean(fil2);
24 -     diferencial= promeD-promeE;
25 -     diferencial2= promeD+promeE;
26 -     Diferencial(i,:)= promeD(i,:)-PromeE(i,:);

```

Figura 6.9 Ciclo for para especificar la cantidad de datos.

Se usan las variables con los datos filtrados para obtener el promedio gracia a la función “mean”, se obtiene la diferencia entre los promedios, se guardan los promedios y diferencias en un documento para su análisis.

```

262 -     end
263 -     end
264 -     end
265 -     promeD(i,:)= mean(fill);
266 -     promeD= mean(fill);
267 -     promeE(i,:)= mean(fil2);
268 -     promeE= mean(fil2);
269 -     diferencial= promeD-promeE;
270 -     diferencial2= promeD+promeE;
271 -     Diferencial(i,:)= promeD(i,:)-PromeE(i,:);
272 -     Diferencial2(i,:)= promeD(i,:)+PromeE(i,:);
273 -     doc=sprintf('P (%d).xls',i);
274 -     xlswrite(doc,dato,'AAPP','A3');
275 -     xlswrite(doc,datop,'AAPP','B3');
276 -     xlswrite(doc,fill,'AAPP','M3');
277 -     xlswrite(doc,fil2,'AAPP','S3');
278 -     xlswrite(doc,promeD,'PrAAPP','B3');
279 -     xlswrite(doc,promeE,'PrAAPP','B4');
280 -     xlswrite(doc,diferencial,'PrAAPP','B5');
281 -     xlswrite(doc,diferencial2,'PrAAPP','B6');
282 -     xlswrite('PROMEDIOS.xls',PromeD,'PrAAPP','B3');
283 -     xlswrite('PROMEDIOS.xls',PromeE,'PrAAPP','B3');
284 -     xlswrite('PROMEDIOS.xls',Diferencial,'PrDiferAPP','B3');
285 -     xlswrite('PROMEDIOS.xls',Diferencial2,'PrDiferAPP','B3');
286 -     end
287

```

Figura 6.10 Impresión de datos y etiquetas

6.4 Software Excel

El software Excel es una hoja de cálculo que permite manipular datos numéricos y de texto, analizar información, generar reportes, etc. Para el presente proyecto se utilizó el software Excel para el análisis de los datos obtenidos de los dos softwares explicados anteriormente, además de ser la herramienta con la cual obtendremos las gráficas de los resultados.

Gracias al software Matlab se obtienen los ángulos de las diferentes posiciones angulares, de igual forma crea archivos de Excel con los datos filtrados del código, estos datos se muestran en hojas de cálculo, se creó un libro de cálculo por cada paciente y por una hoja por cada ejercicio.

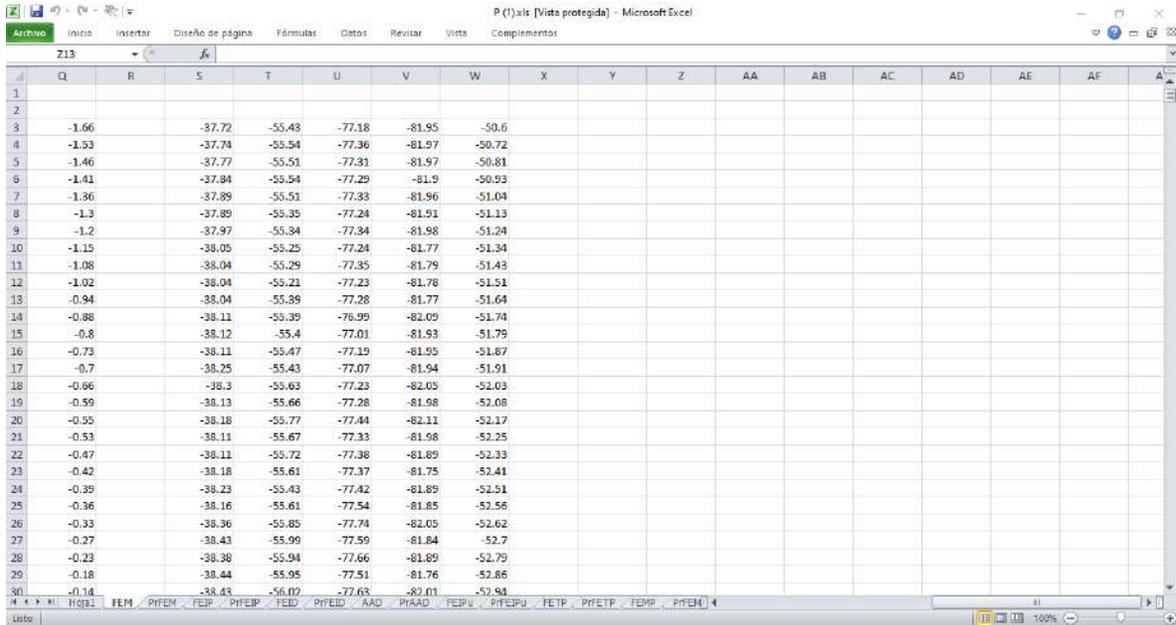


Figura 6.11 Datos numéricos filtrados del software Matlab

Con los datos numéricos filtrados se realiza la operación matemática “Promedio”, para poder obtener el promedio de cada uno de los movimientos, a partir del promedio de obtiene la apertura del ángulo de la posición total, por lo tanto, se obtienen 3 promedios: 1) Promedio de extensión, 2) Promedio de Flexión y 3) Promedio de abertura total. Se repite el procedimiento con cada uno de los ejercicios con todos los pacientes.

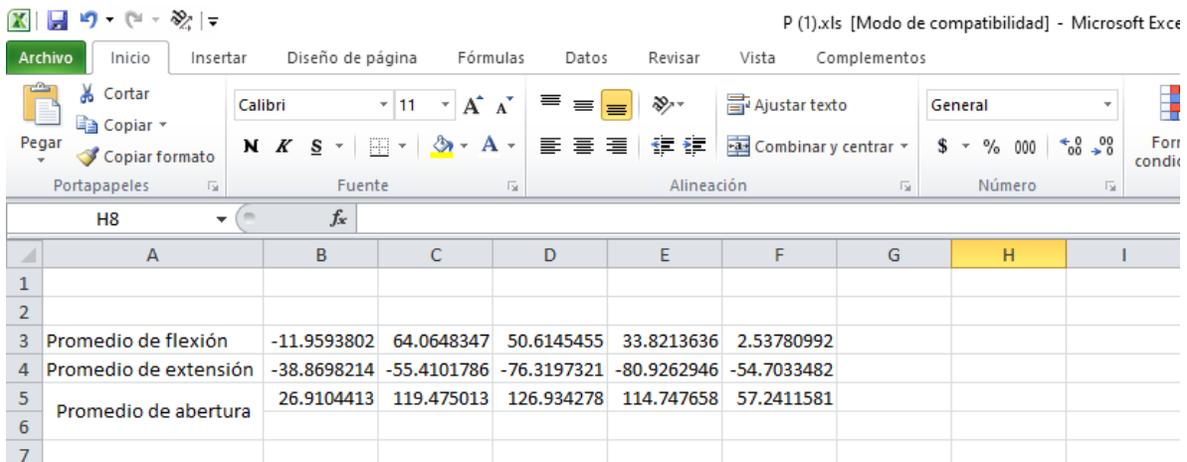


Figura 6.12 Promedios de flexión, extensión y abertura por cada dedo.

*“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía.
Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia”
- Anónimo.*

Capítulo 7

Resultados y conclusiones

En el presente capítulo se describen las pruebas y resultados que comprueban la funcionalidad del prototipo utilizando cada uno de los algoritmos explicados anteriormente. Además, se realizó el análisis de estos a través de gráficas comparándolos con la literatura.

La población con la que se realizó la investigación fueron en total 30 personas de ambos sexos de edad de 20 a 40 años, se tomó como criterio que no presentaran lesiones en la mano, ni que hayan presentado lesiones a lo largo de su vida.

7.1 Resultados

Se realizaron 7 movimientos típicos de la mano para obtener los ángulos de las articulaciones, gracias al dispositivo realizado en este proyecto se logró obtener los resultados de los sujetos, así como el promedio, desviación de estándar y la diferencia con los valores descritos en la literatura.

En la etapa de la adquisición el dispositivo fue diseñado en la parte del software de mostrar los valores de los ángulos de las articulaciones según el movimiento especificado, primeramente, se realizó la calibración de los sensores MPU-6050 por un rango de 250 datos, posteriormente se realizaba el movimiento (flexión, extensión, abducción o aducción), se mantiene la posición durante 200 datos, después se regresa a la posición original durante otros 200 datos. Entre cada una de las pausas se utilizó un led como indicador visual con el cual se lograba tener un control entre las posiciones.

a) Flexión-Extensión Metacarpofalángica (FEM)

Este movimiento se efectúa alrededor de un eje transversal, se colocó el miembro superior del paciente sobre una superficie plana, en donde los dedos de la mano sobresalían de ella, se realizó el movimiento constantemente como anteriormente se mencionó para la adquisición de datos, pero no se incluyó el dedo pulgar debido a que no tiene la posibilidad de realizar este movimiento por sus propiedades físicas.

Las dificultades que se presentaron al realizar este movimiento fueron que la mano debía estar en una superficie plana, pero con altura debido a que se impedía la flexión de los dedos, posteriormente se observó que también se involucraba el término de la sobre extensión, es decir aquellos sujetos que anatómicamente presentan sobre extensión en sus dedos mostraban valores aún mayores en este campo.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la figura 7.1 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo índice(I), medio (M), anular (A) y meñique(E). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 40° a 130°.

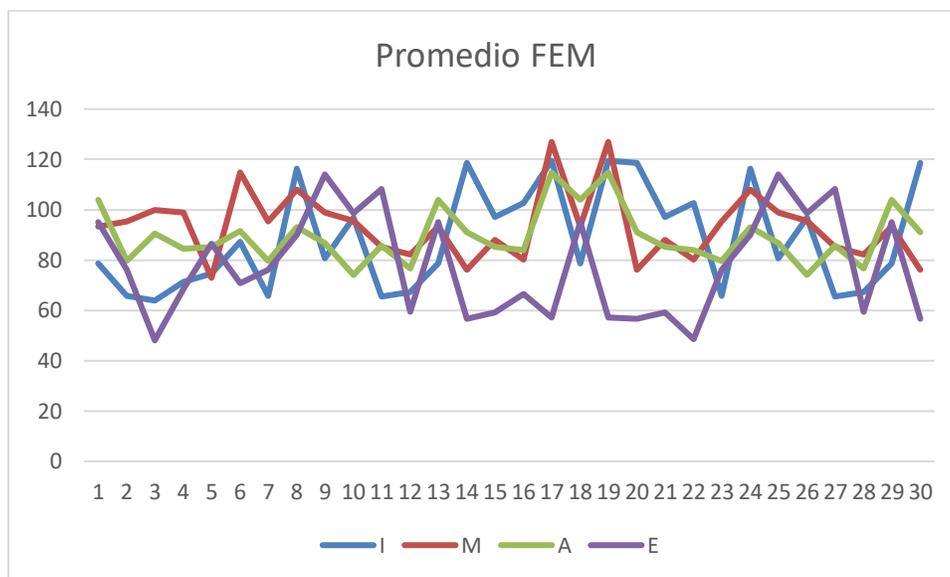


Figura 7.1 Representación gráfica del promedio FEM

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.1 Desviación estándar FEM

Desviación estándar			
I	M	A	E
20.3696369	13.6670149	10.8941357	20.7563929

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 3. Error absoluto y promedio del error absoluto.

En la Tabla 7.2, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo de los dedos índice, medio, anular y meñique, se muestra que existe un error promedio de 26.56394927 a 41.9538718, existe un error absoluto de 71.9497399 y un error absoluto mínimo de 0.52498, estos datos se obtuvieron comparando con el valor de la literatura que en el caso de este movimiento es de 120°.

Tabla 7.2 Promedios Error Absoluto FEM.

	Dedo índice	Dedo medio	Dedo anular	Dedo meñique
Promedio Error Absoluto	31.49318087°	26.56394927°	30.65665361°	41.9538718°
Error Absoluto Máximo	56.12848546°	47.09956907°	45.93768189°	71.9497399°
Error Absoluto Mínimo	0.524986718°	5.153002509°	5.252341721°	5.99778704°

b) Flexión-Extensión Interfalángica proximal

Este movimiento se efectúa alrededor de un eje transversal, se colocó el miembro superior del paciente sobre una superficie plana, en donde los dedos de la mano sobresalían de ella, se realizó el movimiento constantemente como anteriormente se mencionó para la adquisición de datos, pero no se incluyó el dedo pulgar debido a que no tiene la posibilidad de realizar este movimiento debido a sus propiedades físicas.

Las dificultades que se presentaron al realizar este movimiento fueron que la mano debía estar en una superficie plana, pero con altura debido a que se impedía la flexión de los dedos, posteriormente se observó que también se involucraba el término de la sobre extensión, es decir aquellos sujetos que anatómicamente presentan sobre extensión en sus dedos mostraban valores aún mayores en este campo.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la Figura 7.4 muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo índice(I), medio (M), anular (A) y meñique(E). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados

centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 27.6358766° a 122.752716°.

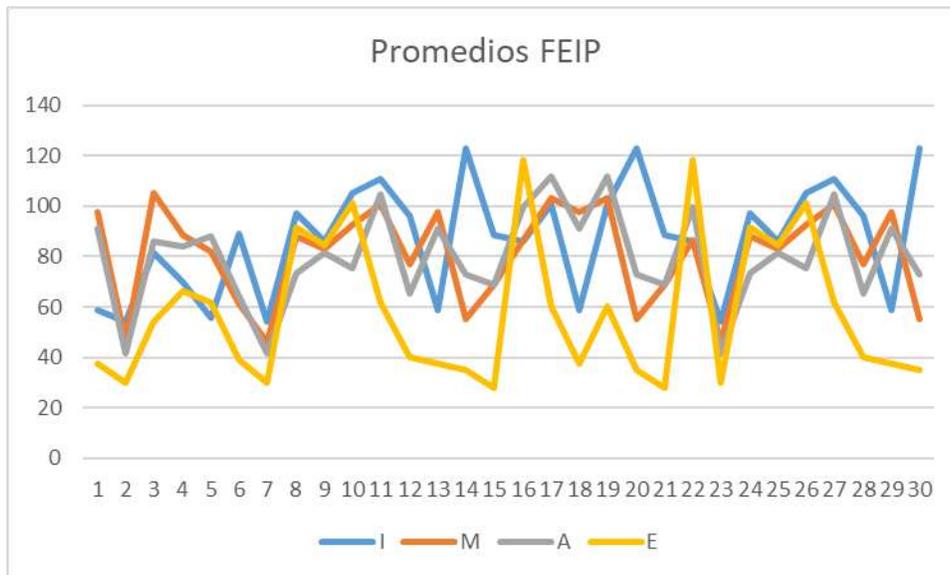


Figura 7.4 Representación gráfica del promedio FEIPr

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.3 Desviación estándar FEIPr.

Desviación estándar			
I	M	A	E
22.0211305	18.8919765	18.8976087	28.3589139

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 4. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.4, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo y el error absoluto mínimo de los dedos índice, medio, anular y meñique, se muestra que existe un error promedio de 26.56394927 a 41.9538718, existe un error absoluto de 72.3641234 y

un error absoluto mínimo de 0.31521178, estos datos se obtuvieron comparando con el valor de la literatura que en el caso de este movimiento es de 120°.

Tabla 7.4 Promedios Error Absoluto FEIPr.

	Dedo índice	Dedo medio	Dedo anular	Dedo meñique
Promedio Error Absoluto	0.66593951°	0.66330349°	0.74867844°	1.48996144°
Error Absoluto Máximo	45.6616558°	53.9286722°	58.5488913°	72.3641234°
Error Absoluto Mínimo	0.75049329°	0.76972366°	0.31521178°	1.16804678°

c) Flexión-Extensión Interfalángica distal

Este movimiento se efectúa alrededor de un eje transversal, se colocó el miembro superior del paciente sobre una superficie plana, en donde los dedos de la mano sobresalían de ella, se realizó el movimiento constantemente como anteriormente se mencionó para la adquisición de datos, pero no se incluyó el dedo pulgar debido a que no tiene la posibilidad de realizar este movimiento por sus propiedades físicas.

Las dificultades que se presentaron al realizar este movimiento fueron que la mano debía estar en una superficie plana, pero con altura debido a que se impedía la flexión de los dedos, posteriormente se observó que también se involucraba el término de la sobre extensión, es decir aquellos sujetos que anatómicamente presentan sobre extensión en sus dedos mostraban valores aún mayores en este campo.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la figura Figura 7.6 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo índice(I), medio (M), anular (A) y meñique(E). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 30.74003136 a 112.6902992.

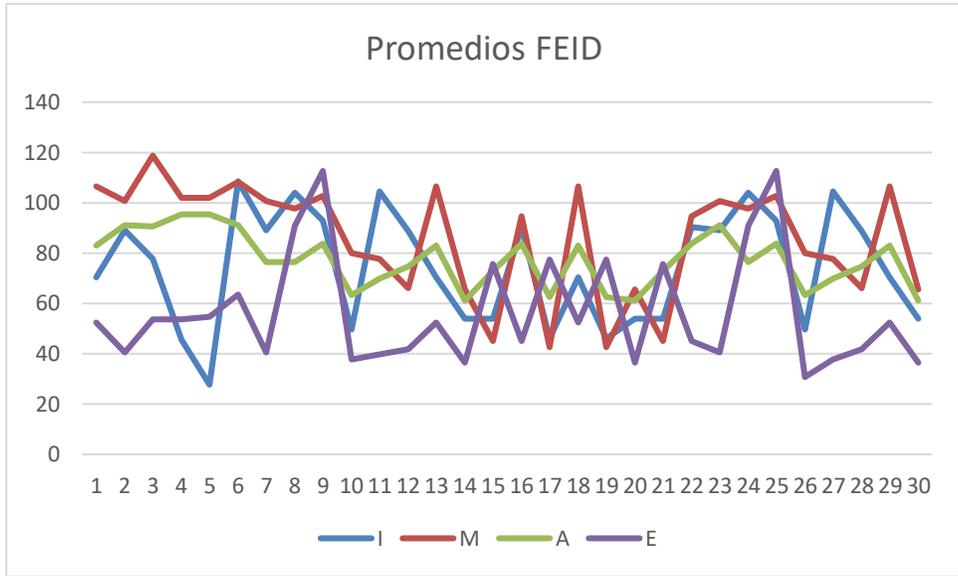


Figura 7.6 Representación gráfica del promedio FEID

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.5 Desviación estándar FEID

Desviación estándar			
I	M	A	E
22.7677535	22.5793966	10.948986	22.5452643

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 5. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.6, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo de los dedos índice, medio, anular y meñique, se muestra que existe un error promedio de 24.9442295 a 53.7152186, existe un error absoluto de 82.2701192 y un error absoluto mínimo de 1.44432003, estos datos se obtuvieron comparando con el valor de la literatura que en el caso de este movimiento es de 110°.

Tabla 7.6 Promedios Error Absoluto FEID.

	Dedo índice	Dedo medio	Dedo anular	Dedo meñique
Promedio Error Absoluto	35.6195202°	24.9442295°	32.6274651°	53.7152186°
Error Absoluto Máximo	82.2701992°	67.3746934°	48.8730501°	79.2599686°
Error Absoluto Mínimo	1.44432003°	1.6468584°	14.5780564°	2.69029922°

d) Abducción-aducción de los dedos

La abducción de los dedos se mide a partir de la línea axial de la mano, en donde todos los dedos forman arcos de aproximadamente 20°, mientras que en la aducción se juntan y tocan entre sí. Para este movimiento se omitió el dedo pulgar debido a que se realizó de forma individual en un ejercicio posterior.

Las dificultades que se presentaron al realizar este movimiento fueron que el eje axial no siempre se regresaba al mismo punto, por lo que se señaló con cinta de color el eje, permaneciendo en la misma posición en las repeticiones de la prueba. De igual forma, el dedo anular fue el eje que no se movió durante la prueba, por lo que se obtuvieron únicamente datos de los dedos índice, anular y meñique.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la Figura 7.8 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo índice(I), anular (A) y meñique(E). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 7.690316189 a 51.864422186.

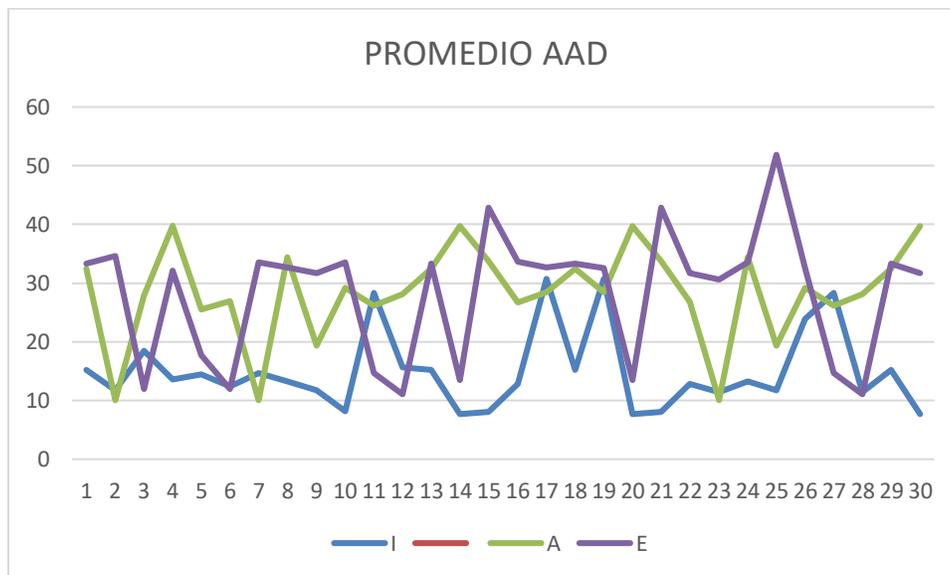


Figura 7.8 Representación gráfica del promedio AAD

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.7 Desviación estándar AAD

Desviación estándar		
I	A	E
6.76592849	8.11430478	10.841177

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 6. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.8, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo de los dedos índice, medio, anular y meñique, se muestra que existe un error promedio de 4.8090179 a 8.8862206, existe un error absoluto de 23.9300063 y un error absoluto mínimo de 0.18613784, estos datos se obtuvieron comparando con el valor de la literatura para el dedo índice es de 15°, el dedo anular es 26° y el dedo meñique 35°.

Tabla 7.8 Promedios Error Absoluto AAD.

	Dedo índice	Dedo anular	Dedo meñique
Promedio Error Absoluto	4.8090179°	6.49760869°	8.8862206°
Error Absoluto Máximo	15.7276387°	15.946108°	23.9300063°
Error Absoluto Mínimo	0.18613784°	0.19556486°	0.3704329°

e) Flexión-extensión total del pulgar

El movimiento flexión y extensión total del pulgar es capaz de que se toque la punta del meñique con la del pulgar si ambos están flexionados, se compone del ángulo de extensión de 0° a 70° y el ángulo de flexión de 0° a 50°.

Las dificultades que se presentaron al realizar el movimiento fueron que existía una hiperextensión ya que se utilizaba el eje X y el eje Y, por lo que se distorsionaron los datos al realizar el recorrido, además este movimiento nunca se realizaba igual, ya que el eje del dedo cambiaba conforme realizaban la prueba.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la Figura 7.10 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo pulgar (P). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 90.74363673 a 147.3943296.

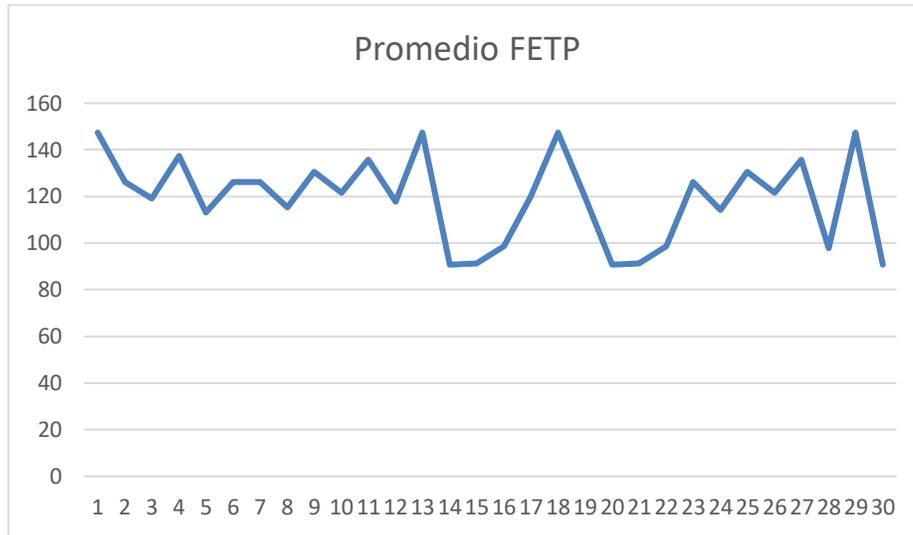


Figura 10 Representación gráfica del promedio FETP

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.9 Desviación estándar FETP

Desviación estándar
Pulgar
18.4523578

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 7. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.10, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo del dedo pulgar, se muestra que existe un error promedio de 14.5944243, existe un error absoluto máximo de 29.2563633 y un error absoluto mínimo de 0.13235058.

Tabla 7.10 Promedios Error Absoluto FETP.

	Dedo pulgar
Promedio Error Absoluto	14.5944243°
Error Absoluto Máximo	29.2563633°
Error Absoluto Mínimo	0.13235058°

f) Flexión-extensión Metacarpofalángica del pulgar

La flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalángicas se producen en los planos sagitales, en oposición a estos movimientos en otras articulaciones. Describe un arco de 50° en flexión sin haber ángulo de extensión.

Las dificultades que se presentaron al realizar el movimiento fueron la posición de la mano sobre la superficie plana, ya que existía inclinación hacia atrás y adelante lo que generaba un error dentro de las mediciones.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la Figura 7.12 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo pulgar (P). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 25.26786157 a 65.27215024.

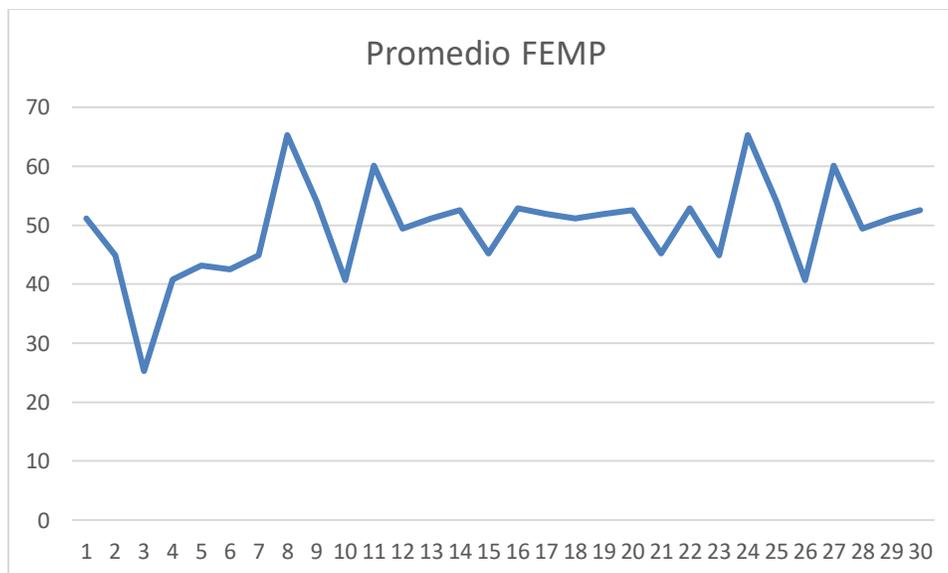


Figura 7.12 Representación gráfica del promedio FEMP

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.11 Desviación estándar FEMP

Desviación estándar
Pulgar
7.976953552

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 8. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.12, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo del dedo pulgar, se muestra que existe un error promedio de 5.78941932, existe un error absoluto máximo de 24.7321384 y un error absoluto mínimo de 0.57768263,

Tabla 7.12 Promedios Error Absoluto FEMP.

	Dedo pulgar
Promedio Error Absoluto	5.78941932°
Error Absoluto Máximo	24.7321384°
Error Absoluto Mínimo	0.57768263°

g) Flexión-extensión Interfalángica del pulgar

La flexión y extensión de las articulaciones interfalángicas se producen en los planos sagitales, en oposición a estos movimientos en otras articulaciones. Tiene un arco total de movimiento de 90° a 110° de movimiento, dividiéndose en 90° para flexión y 0° a 20° para la extensión.

Las dificultades que se presentaron al realizar el movimiento fueron la posición de la mano sobre la superficie plana, ya que existía inclinación hacia atrás y adelante lo que generaba un error dentro de las mediciones.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la Figura 7.14 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica

en la cual se muestra el promedio del dedo pulgar (P). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 25.26786157 a 65.27215024.

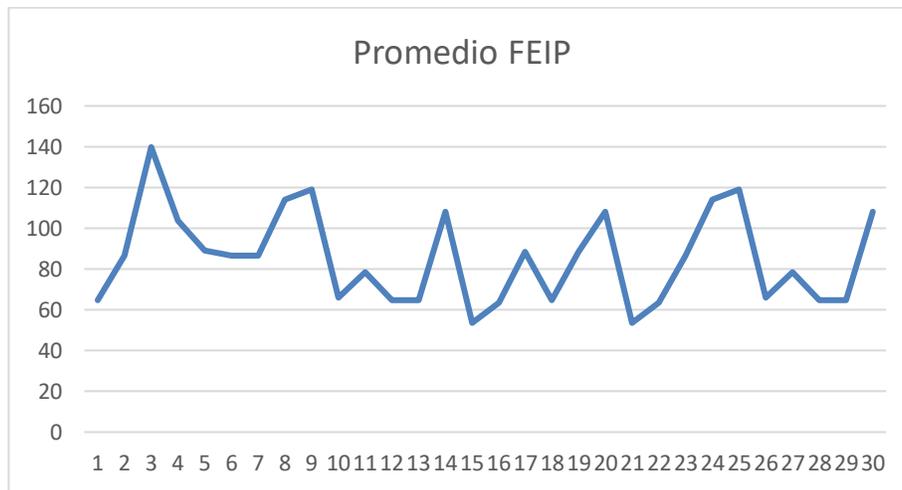


Figura 7.14 Representación gráfica del promedio FEIP

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.13 Desviación estándar AAD

Desviación estándar
Pulgar
22.91500788

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 9. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.14, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo del dedo pulgar, se muestra que existe un error promedio de 5.78941932, existe un error absoluto máximo de 24.7321384 y un error absoluto mínimo de 0.57768263,

Tabla 7.14 Promedios Error Absoluto FEIP.

	Dedo pulgar
--	-------------

Promedio Error Absoluto	28.5007364°
Error Absoluto Máximo	56.4232991°
Error Absoluto Mínimo	1.94823901°

h) Abducción-aducción palmar del pulgar

La abducción-aducción palmar del pulgar se producen en el plano frontal. El movimiento tiene un rango total de movimiento de 70° solo en la flexión.

Las dificultades que se presentaron al realizar el movimiento fueron la posición de la mano sobre la superficie plana, ya que existía inclinación hacia atrás y adelante lo que generaba un error dentro de las mediciones.

Se obtuvieron los datos de los 30 sujetos con los cuales se realizó la operación matemática promedio siendo el representante de todos los valores obtenidos, en la Figura 7.16 se muestra el promedio de los datos obtenidos en del movimiento, representado en una gráfica en la cual se muestra el promedio del dedo pulgar (P). En el gráfico se observa los valores del promedio de los 30 sujetos, los valores están en grados centígrados, se puede observar que el rango de los promedios entre 40.70701705 a 90.36597587.

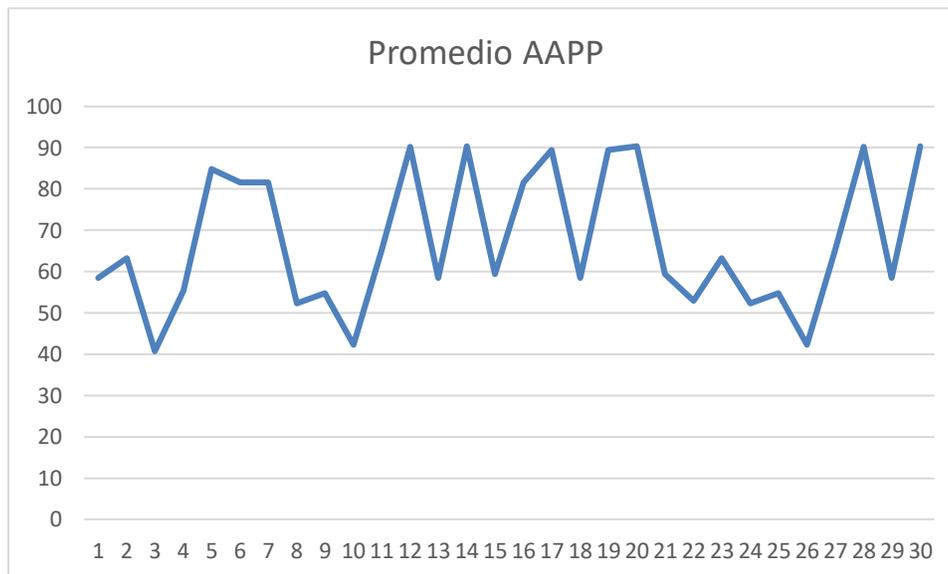


Figura 7.16 Representación gráfica del promedio AAPP.

Se realizó la operación estadística llamada desviación estándar, la cual permite cuantificar la variación entre los valores obtenidos del dispositivo y los valores reales, por lo que se realizó la desviación estándar de los 30 sujetos de prueba por cada dedo, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7.15 Desviación estándar AAPP

Desviación estándar
Pulgar
16.7045326

Se obtiene el promedio del error absoluto, primeramente, se adquiere el error absoluto individual de cada uno de los dedos de los 30 sujetos, el procedimiento para calcular los valores descritos se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error Absoluto} = (|\text{Valor Real} - \text{Valor obtenido por paciente}|)$$

$$\text{Promedio del error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de pruebas}}$$

Ecuación 10. Error absoluto y promedio del error absoluto

En la Tabla 7.16, se muestra el promedio del error absoluto, el error absoluto máximo, el error absoluto mínimo del dedo pulgar, se muestra que existe un error promedio de 5.78941932, existe un error absoluto máximo de 24.7321384 y un error absoluto mínimo de 0.57768263,

Tabla 7.16 Promedios Error Absoluto AAPP.

	Dedo pulgar
Promedio Error Absoluto	15.4281874°
Error Absoluto Máximo	29.292983°
Error Absoluto Mínimo	4.89356958°

Error Absoluto Total

De las pruebas de los movimientos que se realizaron a los 30 sujetos de prueba se calculó el promedio error absoluto de cada una de ellas, el resultado del promedio del Error Absoluto Total fue de 19.2446098°.

Tabla 7.17 Promedios de Error Absoluto Total

Nombre de movimiento	Promedio Error Absoluto	Grados
a) Flexión-Extensión Metacarpofalángica (FEM)	Promedio Error Absoluto dedo índice	31.49318087
	Promedio Error Absoluto dedo medio	26.56394927
	Promedio Error Absoluto dedo anular	30.65665361
	Promedio Error Absoluto dedo meñique	41.9538718
b) Flexión-Extensión Interfalángica proximal	Promedio Error Absoluto dedo índice	0.66593951
	Promedio Error Absoluto dedo medio	0.66330349
	Promedio Error Absoluto	0.74867844

	dedo anular	
	Promedio Error Absoluto dedo meñique	1.48996144
c) Flexión-Extensión Interfalángica distal	Promedio Error Absoluto dedo índice	35.6195202
	Promedio Error Absoluto dedo medio	24.9442295
	Promedio Error Absoluto dedo anular	32.6274651
	Promedio Error Absoluto dedo meñique	53.7152186
d) Abducción-aducción de los dedos	Promedio Error Absoluto dedo índice	4.8090179
	Promedio Error Absoluto dedo anular	6.49760869
	Promedio Error Absoluto dedo meñique	8.8862206
e) Flexión-extensión total del pulgar	Promedio Error Absoluto dedo pulgar	14.5944243
f) Flexión-extensión Metacarpofalángica del pulgar	Promedio Error Absoluto dedo pulgar	5.78941932
g) Flexión-extensión Interfalángica del pulgar	Promedio Error Absoluto dedo pulgar	28.5007364
h) Abducción-aducción palmar del pulgar	Promedio Error Absoluto dedo pulgar	15.4281874
Total de Promedios Error Absoluto		19.2446098

7.2 Conclusiones

Las conclusiones presentes fueron elaboradas de acuerdo con las experiencias, las pruebas realizadas a los sujetos, y los resultados obtenidos del proyecto,

Mediante los sensores MPU-6050 y la conexión con el multiplexor, así como la aplicación de la programación para la adquisición de datos se puede determinar los ángulos de flexión, extensión, abducción y aducción de las articulaciones, con el cual se establecieron un rango angular dependiendo de cada movimiento, por lo que se obtuvo un promedio de error absoluto total de 19.2446098°, es decir que existió una variación entre los valores originales a los valores obtenidos del dispositivo de aproximadamente 19°, los ejercicios de las diferentes posiciones fueron enfocados en repeticiones, por lo que la variación entre ellos fue debido a que no se regresaba al mismo punto de inicio o de partida, logrando resultados diferentes aunque se realizara el mismo ejercicio.

Mediante la integración del software Matlab se logró obtener los datos de los ángulos de los movimientos gracias a las herramientas que este software ofrece, el comportamiento de las

señales de las pruebas se mejoró debido a que no se tomó en cuenta los valores de calibración de los sensores de MPU-6050.

7.3 Recomendaciones

- En el diseño del dispositivo se recomienda utilizar tela tipo conductiva con el cual se eliminará el uso de cable electrónico.
- Se recomienda la aplicación de filtros de forma que se eliminen aquellos datos que se encuentran a los extremos fuera del rango.
- Se recomienda la integración de sensores para medir la fuerza de los dedos de la mano, con el cual se complementará el dispositivo.

Referencias

Angulo M., Álvarez A. y Fuentes Y. (2011). *Biomecánica clínica: Biomecánica de la Extremidad Superior Exploración de la Mano*, Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Arenas, M. (2012). *Diseño y construcción de un guante de datos mediante sensores de flexibilidad y acelerómetro*, Sitio Web: https://www.researchgate.net/publication/263353011_DISENO_Y_CONSTRUCCION_DE_UN_GUANTE_DE_DATOS_MEDIANTE_SENSORES_DE_FLEXIBILIDAD_Y_ACCELEROMETRO

Baraona T. y Ramos E. (2017). *Tratamiento fisioterapéutico en fracturas de metacarpianos y falanges*, Lima: Universidad Inca Garcilaso De La Vega.

Burget, S. (2010). *Comparación de dos tipos de tratamiento ortopédico en las fracturas del cuello del 5º metacarpiano*, Valencia: Hospital Universitario I Politecnico La Fe.

Castruita M. (2013), *Guante mioeléctrico para rehabilitación de extremidad superior con potencial aplicación a pacientes hemipléjicos*, Sitio Web: <http://erecursos.uacj.mx/handle/20.500.11961/4256>

Chang, V. (2006) *Fundamentos de Medicina de Rehabilitación*, San José, C.R, Editorial UCR.

Guantes multipropósito Yantong Guantes antiartríticos para la presión de la salud, Sitio web: https://www.marpiomarket.com/index.php?main_page=product_info&products_id=506385

García, M. (2018). *Diseñan guante robótico*, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Sitio web: <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=5302>

Gil, L. (2014). *Lesiones deportivas de la muñeca y mano*, Instituto de Investigación en Enfermedades Músculo-Esqueléticas

González, J. (2012). *FISIOTERAPIA*, España, Editorial Bubok Publishing S.L.

H. Rouviere and A. De Imas, "Anatomía Humana descriptiva, topográfica y funcional", 10th ed.: Masson, vol. 3.

Irisarri C. (2005). *Lesiones de la muñeca y la mano*, Barcelona: Editorial Paidotribo.

Lady Ada (2018) "*Force Sensitive Resistor (FSR)*", Adafruit Learning System, datasheet.

Latarjet M. y Ruiz A. (2011). *Anatomía humana (4ª ed. 9 reimp)*, Buenos Aires: Médica Panamericana.

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003). *Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor*, Madrid: Médica Panamericana

MC Mutual. (2012). *Fracturas de Metacarpianos y Falanges de la mano*. Sitio web: https://www.mcmutual.com/documents/20143/94596/04_fractura_es/6c9a963b-e4e8-1f81-5769-897e97e4f3ef

Pérez, A. (2014). *SISTEMA LÚDICO PARA EJERCICIOS DE TERAPIA DE LA ZONA CARPIANA Y FALANGES*, México: Universidad Autónoma de México

Quinayás C. (2020). *Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres*, Popoyán, Universidad de Cauca.

Quiroz F. (2002). *ANATOMÍA HUMANA TOMO I (38ª ed.)*, México, Editorial Porrúa México

Villeda, M. (2018). *Mexicano crea guante de alta precisión para realidad virtual*. Sitio web: <https://nacionfarma.com/mexicano-crea-guante-alta-precisi>

Referencias de Imágenes

Latarjet M. y Ruiz A. (2011). *Huesos de la mano (imagen)*, Buenos Aires: Médica Panamericana.

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003). *Movimiento de flexión y movimiento de extensión de la mano*, Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor, Madrid: Médica Panamericana

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003) *Abducción radial y cubital de la mano*, Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor, Madrid: Médica Panamericana

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003). *Movimiento de supinación y pronación*, Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor, Madrid: Médica Panamericana

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003). *Movimiento de flexión-extensión de los dedos sobre el hueso metacarpiano*, Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor, Madrid: Médica Panamericana

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003). *Movimiento de abducción y aducción de los dedos trifalángicos*, Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor, Madrid: Médica Panamericana

Llusá M., Merí Á. y Ruano D. (2003). *Movimiento del dedo pulgar*, Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor, Madrid: Médica Panamericana.

Carletti J. (2020) *Articulaciones del dedo* [imagen] http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm.

Londoño A. (2015) *Las falanges con su articulación en forma de polea* [Imagen] <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-ortopedia-traumatologia-380-articulo-ruptura-polea-a2-luego-una-S0120884515000073>

Londoño A. (2015) *Posiciones de la mano* [Imagen] <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-ortopedia-traumatologia-380-articulo-ruptura-polea-a2-luego-una-S0120884515000073>

Londoño A. (2015) *Clasificación de los agarres de la mano según la forma y los elementos involucrados* [Imagen] <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-ortopedia-traumatologia-380-articulo-ruptura-polea-a2-luego-una-S0120884515000073>

Génot C. (2019) *Posición 0, abducción y aducción de articulación carpometacarpiana* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Génot C. (2019) *Movimiento de oposición de articulación carpometacarpiana.* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Génot C. (2019) *Flexión del pulgar a partir de la posición 0* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Génot C. (2019) *Flexión de la articulación interfalángica a partir de la posición 0* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Génot C. (2019) *Extensión interfalángica a partir de la posición 0* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Génot C. (2019) *Flexión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Génot C. (2019) *Extensión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0.* [Imagen]<https://academia.utp.edu.co/alejandrogomezrodas/files/2016/08/ResumenGoniometr%C3%ADa.pdf>

Google, (s.f) [Imagen sensor MPU5060]. Recuperado el 10 de diciembre de 2021 de https://www.google.com/search?q=mpu+6050&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969&sxsrf=APqWBttPK0IzI3gBDAnmqI1RnJWtwH7w:1644454001705&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwjvp_vE9PP1AhVJTBoKHR2xDp0Q_AUoAXoECAIQAw&biw=1280&bih=569&dpr=1.5#imgrc=L61k7mpAUIByUM

Google, (s.f) *Configuración de pies del Multiplexor CD74HC4051* Recuperado el 10 de diciembre de 2021 de https://www.google.com/search?q=multiplexor&tbm=isch&ved=2ahUKEwjm0K7H9PP1AhWDpWoFhb1yDiEQ2cCegQIABAA&oq=multiplexor&gs_lcp=CgNpbWcQA1D3BViaEmDXE2gAcAB4AIABYIgb1AeSAQIxMpgBAKABAoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&client=img&ei=dmAEYua9LIPLqtsPveW5iAI&bih=569&biw=1280&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969#imgrc=fwQ3KsPV6HxihM

Google, (s.f) *Arduino Uno y sus partes* Recuperado el 20 de septiembre de 2021 de https://www.google.com/search?q=arduino+uno&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969&sxsrf

[=APqWBvYBJZK8RBdb3m3u_ZXtdaEGeM_vg:1644454245016&source=lnms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwj0_f249fP1AhXyz4UKHcUvD50Q_AUoAXoECAIQAw&biw=1280&bih=569&dpr=1.5#imgcr=zK8m6nk3xcpVWM](https://www.google.com/search?q=imagen+del+mpu+6050&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969&sxsrf=APqWBtfmGOldClMDGW8htvMDCEvHB0Ngw:1644454404926&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj0_f249fP1AhXyz4UKHcUvD50Q_AUoAXoECAIQAw&biw=1280&bih=569&dpr=1.5#imgcr=zK8m6nk3xcpVWM)

Google(s.f)*Diseñomultiplexor*https://www.google.com/search?q=imagen+del+mpu+6050&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969&sxsrf=APqWBtfmGOldClMDGW8htvMDCEvHB0Ngw:1644454404926&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjX7J2F9vP1AhUOm moFHd5aCIYQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1280&bih=569&dpr=1.5#imgcr=ipG9W2kV Vb4K

Google (s.f) *Pines multiplexor*
https://www.google.com/search?q=distribucion+de+pine+mpu+6050&tbn=isch&ved=2ahUKEwj3_qyH9vP1AhX8g2oFHU4DBfYQ2cCegQIABAA&oq=distribucion+de+pine+mpu+6050&gs_lcp=CgNpbWcQA1DNBljGIWDBJGgAcAB4AIABaogBzA2SAQQxOS4ym AEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=CWIEYrfWfyyHqtsPzoaUs A8&bih=569&biw=1280&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969#imgcr=GIavMcAUPRdLtM

Google (s.f) *Distribución de pines arduino uno*
https://www.google.com/search?q=distribucion+de+arduino+uno&tbn=isch&ved=2ahUKEwj2zNm99vP1AhUIAJ0JHZUECT8Q2cCegQIABAA&oq=distribucion+de+arduino+uno&gs_lcp=CgNpbWcQA1CwDliGH2DIIIGgAcAB4AIAB5gGIAZQKkgEGMTMuMC4xm AEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=e2IEYrajFliA9PwPIYmkAM &bih=569&biw=1280&rlz=1C1UEAD_esMX969MX969#imgcr=RXSqXcDXRrBoTM