



Diseño y construcción de un dispositivo para la toma de datos de la flexión interfalángica proximal de los dedos de la mano mediante sensores IMU

Wilson Javier Serrano Puerto

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2021

Diseño y construcción de un dispositivo para la toma de datos de la flexión interfalángica proximal de los dedos de la mano mediante sensores IMU

Wilson Javier Serrano Puerto

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Maestría en instrumentación y automatización

Director:

Ph.D. Sergio Alejandro Orjuela Vargas

Línea de Investigación:

Bioingeniería

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2021

Solo un ciego puede definir fácilmente qué es la luz. Cuando no sabes, eres atrevido. La ignorancia siempre es atrevida; el conocimiento duda. Y cuanto más sabes, más sientes que se disuelve el suelo bajo tus pies.

Osho

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a aquellas personas que compartieron sus conocimientos conmigo e hicieron posible la realización de este logro.

Gracias a mi hermano P. Martín María, por sus oraciones desde la distancia y el apoyo espiritual dado en cada momento que lo he requerido, gracias por guiar mis conocimientos y acciones a la tranquilidad y felicidad de quienes nos rodean.

Gracias a mis padres, por su apoyo constante en mi educación y proyectos, por ser guía de persistencia y humildad aún en los momentos más difíciles.

Gracias a mi pareja por su amor y paciencia incondicional dados estos años, por hacerme participe en su vida y ser mi estabilizador emocional.

Gracias a todas aquellas personas, colegas y amigos que me brindaron su valioso tiempo, apoyo y confianza para lograr mis objetivos; finalmente, gracias a la Universidad Antonio Nariño y su equipo de trabajo por el tiempo y la disposición entregados.

Gracias a todos.

Resumen

En el presente documento se exponen los resultados obtenidos en el proyecto presentado como trabajo de fin de Máster en instrumentación y automatización de la Universidad Antonio Nariño. En este proyecto se propone un prototipo para medir la flexión interfalángica de los dedos de la mano mediante el ángulo de intersección de dos sensores inerciales, dando una alternativa a la medición convencional realizada por goniómetros para dedos. Dicho proyecto consistió en cuantificar el grado de movilidad presente en las articulaciones interfalángicas en los dedos de la mano, y para lograrlo se diseñó y desarrolló un equipo con sensores inerciales ubicados en cada una de las falanges del dedo a valorar. La interfaz gráfica fue creada para sistemas operativos Android y le permite al operador registrarse en el sistema y administrar la información de los usuarios a ser valorados para posteriormente ser almacenada en una base de datos en la nube.

Al ser un equipo de medición fue necesario realizar una validación metrológica de acuerdo con las recomendaciones normativas actuales de Colombia, obteniendo una incertidumbre expandida de $\pm 1.02^\circ$ con un factor de incertidumbre de 2 en un rango de entre -30° a 135° obteniendo una resolución de $0.06^\circ \pm 0.017^\circ$; estos datos fueron obtenidos validando el eje Z mediolateral del plano sin inclinación u orientación en el eje X o Y. Los resultados obtenidos en la validación metrológica indican una incertidumbre menor a la incertidumbre de los goniómetros comerciales con resoluciones de 5° el cual no es menor a $\pm 2.5^\circ$. Las mediciones obtenidas de la flexión interfalángica proximal del dedo índice de dos usuarios, fueron comparados con los valores considerados normales por la Academia Estadounidense de Cirujanos Ortopédicos y por el Ministerio del Trabajo de Colombia en el Decreto 1507 de 2014.

Palabras clave: Sensor Inercial, Falanges, Validación, Metrología, Interfalángica, Goniometría.

Abstract

This document presents the results obtained in the project presented as the Master's thesis in instrumentation and automation at the Antonio Nariño University. In this project a prototype is proposed to measure the interphalangeal flexion of the fingers of the hand by means of the intersection angle of two inertial sensors, giving a more precise alternative, a conventional measurement performed by finger goniometers. This project consisted of quantifying the degree of mobility of the interphalangeal joints present in the fingers of the hand, and to achieve this, a device with inertial sensors located in each of the phalanges of the finger to be assessed was designed and developed. The graphical interface was created for Android operating systems and allows the operator to register in the system and manage the information of the users to be evaluated to later be stored in a database in the cloud.

As it is a measuring equipment, it was necessary to perform a metrological validation in accordance with the current normative recommendations of Colombia, obtaining an expanded uncertainty of $\pm 1.02^\circ$ with an uncertainty factor of 2 in a range from -30° to 135° obtaining a resolution of $0.06^\circ \pm 0.017^\circ$; These data were obtained by validating the mediolateral Z axis of the plane without inclination or orientation in the X or Y axis. The values obtained by the team of two users were compared with the values considered normal by the American Academy of Orthopedic Surgeons and by the Ministry of Orthopedic Surgeons. of Labor of Colombia in Decree 1507 of 2014.

Keywords: Inertial Sensor, Phalanges, Validation, Metrology, Interphalangeal, Goniometry.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Alcance	2
Metodología	3
Capítulo 1. Goniometría	5
La goniometría en la ciencia médica	5
Aplicaciones de la goniometría en medicina	6
Instrumentos de medición	7
Goniómetro	7
Electrogoniómetro	7
R500 de Biometrics	8
Sensores IMU	8
Validez	9
Validez de criterio	9
Fiabilidad	10
Goniometría de los dedos de la mano	10
Arco de movimiento	12
Rango útil	12
Planimetría	12
Capítulo 2. Ámbito médico	13
Normativa y riesgos laborales	13
Rehabilitación	14
Patologías	14
Pérdida de movilidad articular	15
Pérdida de capacidad laboral	15
Capítulo 3. hardware	19
Componentes electrónicos	19
Sensores	19
Microprocesador ESP32	24
Alimentación	24
Componentes mecánicos	25

Encapsulado del microprocesador	25
Encapsulado de sensores	26
Ensamble	27
Planos y listado de partes	30
Resultado	33
Capítulo 4. Software	35
Transmisión de datos	38
Interfaz gráfica	39
Registro e ingreso del operador	39
Registro o actualización de usuarios	41
Toma de datos	42
Registro dinámico	45
Calibración	46
Almacenamiento de datos	48
Autenticación	49
Base de datos - usuarios	50
Base de datos - reportes de calibración	50
Capítulo 5. Confirmación metrológica	52
Características metrológicas	52
Método de calibración	53
Instrumento patrón	54
Perfiles patrón	55
Equipos y materiales auxiliares	56
Condiciones de calibración	56
Procedimiento de calibración	57
Resultados de calibración	57
Capítulo 6. Toma y comparación de datos	62
Toma de datos	62
Prueba dinámica	64
Comparación de datos	67
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones	69
Conclusiones	69
Recomendaciones	72
Bibliografía	74
Anexo: Certificado de calibración goniómetro analógico	77
Anexo: Consentimiento de pruebas	79
Anexo: Data sheet BNO055	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Ángulo formado por los ejes longitudinales de la falange proximal (a) y la falange media (b).	6
Figura 1-2: Articulaciones de los dedos de la mano a) MCF, b) IFP, c) IFD	11
Figura 1-3: Flexión IFP del dedo índice	12
Figura 1-4: Extensión MCF del dedo índice	12
Figura 3-1: Confirmación de recepción ACK	22
Figura 3-2: Confirmación de no recepción NACK	23
Figura 3-3: Protocolo de comunicación M-E I2C	23
Figura 3-4: Protocolo de comunicación E-M I2C	24
Figura 3-5: Protocolo de comunicación M-E-M I2C	24
Figura 3-6: Modelado de la base del equipo	27
Figura 3-7: Modelado de la tapa del equipo	27
Figura 3-8: Modelado de la base para los sensores	28
Figura 3-9: Modelado de la tapa para los sensores.	28
Figura 3-10: Ensamble del microprocesador y la batería	29
Figura 3-11: Ensamble del grupo 1 del equipo.	29
Figura 3-12: Ensamble del grupo 2 y 3 del equipo.	30
Figura 3-13: Vista explosionada del equipo.	30
Figura 3-14: Conjunto completo ensamblado.	31
Figura 3-15: Plano con lista de piezas.	32
Figura 3-16: Plano con dimensiones externas de las piezas.	33
Figura 3-17: Vista final de la carcasa del microprocesador.	34
Figura 3-18: Vista final de la carcasa de los sensores.	34
Figura 4-1: Diagrama de flujo general programación del ESP32	35
Figura 4-2: Diagrama de flujo general programación de la aplicación	36
Figura 4-3: Diagrama de flujo de conversión cuaterniones a Euler	37
Figura 4-4: Sección de código del ESP32	38
Figura 4-5: Panel de ingreso en la aplicación.	39
Figura 4-6: Mensajes de error en la aplicación.	40
Figura 4-7: Menú principal en la aplicación.	41
Figura 4-8: Panel de ingreso o modificación de usuarios en la aplicación.	41
Figura 4-9: Panel para la conexión del dispositivo por bluetooth en la aplicación.	42
Figura 4-10: Indicación de los ángulos medidos por el equipo en la aplicación.	42
Figura 4-11: Confirmación para el almacenamiento de datos en la nube.	43
Figura 4-12: Visualización de los datos del usuario almacenados en la nube.	43
Figura 4-13: Gráfica de registros de la articulación en extensión del usuario.	44

Figura 4-14: Gráfica de registros de la articulación en flexión del usuario.	44
Figura 4-15: Gráfica generada del movimiento en el eje z en una prueba dinámica.	45
Figura 4-16: Informe de calibración en la aplicación.	46
Figura 4-17: Inicio de calibración en la aplicación.	46
Figura 4-18: Ingreso del número de puntos de medida para la calibración.	47
Figura 4-19: Ingreso del valor real del patrón de medida.	47
Figura 4-20: Reporte de calibración.	47
Figura 4-21: Autenticación de usuarios en la nube.	49
Figura 4-22: Datos almacenados en la nube.	49
Figura 4-23: Reportes de calibración almacenados en la nube.	50
Figura 5-1: Goniómetro analógico certificado E21-031	53
Figura 5-2: Perfiles de aluminio cortados en ángulos.	54
Figura 5-3: Curva de corrección del equipo.	60
Figura 5-4: Respuesta lineal del equipo.	60
Figura 6-1: Ubicación de sensores en la falange proximal y media.	62
Figura 6-2: Mediciones realizadas al usuario 1.	63
Figura 6-3: Mediciones realizadas al usuario 2.	63
Figura 6-4: Ubicación de los sensores para la prueba dinámica.	64
Figura 6-5: Análisis dinámico del sistema con el software Kinovea	64
Figura 6-6: Respuesta dinámica generada de la prueba en el eje Z	65
Figura 6-7: Respuesta dinámica del eje Z con error	66
Figura 6-8: Error de medición del eje Z en la prueba dinámica	69
Figura 6-9: Gráfica generada de la prueba dinámica en el eje y.	70
Figura 6-10: Gráfica generada de la prueba dinámica en el eje x.	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Deficiencia global por disminución de rango de movilidad de la articulación IFD de los dedos de la mano.	17
Tabla 2-2: Deficiencia global por disminución de rango de movilidad de la articulación IFP de los dedos de la mano.	17
Tabla 2-3: Deficiencia global por disminución de rango de movilidad de la articulación MCF de los dedos de la mano.	18
Tabla 5-1: Resultados de medición del goniómetro analógico certificado.	54
Tabla 5-2: Resultados de medición de los perfiles de aluminio tomados con el goniómetro analógico certificado.	55
Tabla 5-3: Resultados del procedimiento de repetibilidad.	57
Tabla 5-4: Incertidumbre de medición.	58
Tabla 5-5: Error de medición.	59
Tabla 6-1: Comparación de los datos del usuario 1 frente a los valores normales según el Decreto 1507 de 2014.	56
Tabla 6-2: Comparación de los datos del usuario 2 frente a los valores normales según el Decreto 1507 de 2014.	56

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Amperio	A	$A = \frac{C}{s}$
A_{pi}	Incertidumbre del perfil patrón	1	E.c 5
Cc	Corrección de calibración	1	E.c 1
C_E	Corrección de media nula	1	E.c 4
E	División de escala del equipo	1	E.c 4
Hz	Hercio	Hz	$H = \frac{1}{s}$
S	Desviación estándar experimental	1	E.c 3
u	Incertidumbre de repetibilidad	1	E.c 2

Subíndices

Subíndice	Término
i	Punto de medición
j	Número de puntos a medir
p	Patrón

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AAOS	<i>American Academy of Orthopaedic Surgeons</i>
ACK	Ccknowledge
ADC	Conversión Analógica Digital
BD_ADDR	Dirección del dispositivo Bluetooth
BPA	Bloque Patrón Angular
CEM	Centro Español de Metrología
CPU	Unidad Central de Procesamiento
DAC	Conversión Digital Analógica
DG	Deficiencia Global
I2C	<i>Inter-integrated Circuit</i>
IFD	Interfalángica Distal
IFP	Interfalángica Proximal
IMU	Unidad de Medición Inercial
IoT	Internet de las Cosas
ISO	Organización Internacional de Normalización
MCF	Metacarpofalángica
NACK	<i>No-acknowledge</i>
NTC	Norma Técnica Colombiana
OISS	Organización Iberoamericana de Seguridad Social
RAE	Real Academia Española
RAM	Memoria de solo lectura
ROM	Grado de movilidad
SCL	<i>Serial CLock line</i>
SDA	<i>Serial DAta Line</i>
VIM	Vocabulario Internacional de Metrología

Introducción

Uno de los problemas con los que se puede enfrentar un profesional de la salud en la valoración de la movilidad del sistema esquelético, es el de poder entregar una valoración exacta y confiable para poder determinar el déficit funcional (Ojeda Gil, 2010).

Como lo indica el Dr. Osvaldo Patiño, una parte fundamental en cualquier valoración física que se realiza a las extremidades, es la correspondiente con la medición del movimiento articular, esto le puede ayudar a los profesionales de la salud con la identificación de incapacidades, valorar la movilidad de la articulación y ser una guía y ayuda en distintas fases de la rehabilitación (Taboadela, 2007); sin embargo, existe una limitación en los equipos tecnológicos o en la portabilidad del dispositivo con las alternativas actuales, si bien los goniómetros para dedos son económicos y portables, no están integrados en sistemas digitalizados directamente para su procesamiento y análisis; por lo que es necesario dar una alternativa a estos procedimientos de medición.

Algunas propuestas desarrolladas para medir la flexión articular en diferentes zonas del cuerpo, integran los sensores IMU como una alternativa a la medición por goniómetro; estos equipos requieren de un eje de referencia para la medición del ángulo, por lo que pueden generar mediciones erróneas si el usuario modifica el eje de referencia.

La integración de tecnologías consideradas en la cuarta revolución industrial, permite mejorar las características técnicas y operativas de los dispositivos que salen al mercado; la rama de la medicina no es ajena a esta mejora continua, sin embargo, esto puede incrementar el costo de los equipos, impidiendo que los profesionales de la salud puedan usar los equipos; por lo tanto, surge la pregunta: ¿Cuáles son las características metrológicas que se pueden obtener de un goniómetro digital basado en la intersección de dos sensores inerciales para medir la flexión articular de los dedos de la mano?

El equipo que se propuso integra tecnologías de sensorización para medir el ángulo y elementos de telemática lo que permite ayudar a los profesionales de la salud a

estudiar el ROM de la articulación IFP sin atender a las fuerzas creadas por tal movimiento. El equipo puede ser utilizado en especialidades como la ortopedia, traumatología, reumatología, rehabilitación, fisioterapia y medicina legal. Para verificar si el equipo es apto o no para ser usado en la aplicación descrita, fue necesario realizar un procedimiento experimental de validación metrológica diseñado para transportadores de ángulos comparando los datos entregados por el equipo con un patrón de medida.

Aunque los resultados aportan confiabilidad al usuario para medir la FIP de los dedos índice de la mano, es necesario validar su funcionamiento en diferentes orientaciones y realizar mejoras en términos de tamaño.

Objetivo general

Diseñar y validar un goniómetro digital basado en sensores IMU por el método de comparación, a fin de medir la flexión interfalángica proximal de los dedos de la mano.

Objetivos específicos

- Diseñar y fabricar un dispositivo que mida el ángulo producido entre dos ejes utilizando unidades de medición inercial BNO055.
- Diseñar una interfaz gráfica para la visualización de los dispositivos.
- Determinar las características metrológicas del dispositivo, basándose en el procedimiento de calibración DI-003 del Centro Español de Metrología.
- Registrar el ángulo de la flexión interfalángica proximal de usuarios.
- Comparar los datos obtenidos por el dispositivo con los valores medios normativos de la AAOS.

Alcance

Debido a que la medición se realiza en la articulación IFP se limita el rango de medición entre -30° a 130° , lo cual corresponde a los rangos que se encuentran en el

mercado (Aytéc, s.f.). La resolución mínima permitida es de 1° , con un error no mayor a 2 % en plena escala.

Cabe resaltar que el sector salud no es ajeno a la revolución de la industria 4.0, de tal modo que el equipo podrá conectarse a una base de datos en la nube, con el propósito de almacenar los valores obtenidos de los usuarios y los reportes de calibración. La visualización de los datos se podrá realizar desde un celular o computador con las aplicaciones requeridas.

Metodología

El proceso de desarrollo del proyecto se divide en cuatro fases:

Fase 1. Diseñar y fabricar un dispositivo que mida el ángulo producido entre dos ejes utilizando unidades de medición inercial BNO055. En esta fase se estableció el protocolo de comunicación que utilizan los sensores BNO055 y el microprocesador ESP32. El programa para el procesamiento de la información y la comunicación será realizado con un lenguaje de programación basado en C++. Por otro lado, para determinar la posición angular de cada uno de los dos sensores se utilizan los datos en cuaterniones.

Fase 2. Diseñar una interfaz gráfica para visualizar los datos de los dispositivos. En esta fase los datos del sensor se almacenan en la nube mediante un protocolo de comunicación por WiFi. Se desarrolla una interfaz gráfica donde se podrán visualizar los datos de la medición en un dispositivo o página web.

Fase 3. Determinar las características metrológicas del dispositivo, basándose en el procedimiento de calibración DI-003 del Centro Español de Metrología. En esta fase se realiza el procedimiento de verificación metrológica del dispositivo, con base en el procedimiento de calibración DI-003 del Centro Español de Metrología del año 2019, se determinan las características metrológicas del dispositivos, tales como repetibilidad de medida, error de medición e incertidumbre de medición.

Fase 4. Registrar el ángulo de la flexión interfalángica proximal de usuarios. En esta fase se pone a prueba el dispositivo con dos usuarios con previa autorización;

también se registra el ángulo de la flexión interfalángica proximal de alguno de los dedos de cada usuario y se almacena la información en la base de datos.

Fase 5. Comparar los datos obtenidos por el dispositivo con los valores medios normativos de la AAOS. En esta fase los valores obtenidos por el dispositivo se comparan con los valores normales para la amplitud de movimiento de la articulación interfalángica proximal, según la AAOS y el Decreto 1507 de 2014.

El equipo desarrollado usa los sensores inerciales para determinar el ángulo relativo formado por la intersección de los ejes de cada falange permitiendo medir la flexión de la articulación IFP, IFD y MCF de los dedos de la mano y de otras grandes articulaciones.

La investigación y el desarrollo de dispositivos IOT en el campo de la medicina pueden ser un desafío por todas las variables y opciones que se deben tener en cuenta; sin embargo, este proyecto proporciona una oportunidad de incluir un equipo de medición en un procedimiento tradicional, como es la medición de ángulos con goniómetros.

Capítulo 1. Goniometría en la medicina

La palabra goniometría se deriva por una parte del griego *gonion* el cual significa ángulo y por otro lado, de la palabra *metron* la cual significa medición; de esta forma, es posible definirlo como la especialidad cuyo objetivo es estudiar la medición de los ángulos. Nació en el momento en que el hombre aprendió a dividir los ángulos en grados. Inicialmente, estos instrumentos fueron utilizados para la navegación y para determinar latitudes de acuerdo con la medición y orientación de los ángulos de las estrellas. En la rama de la medicina, esta técnica es utilizada para determinar los ángulos que se forman en los diferentes segmentos óseos de un cuerpo; por otro lado, puede ser usado para establecer los grados de incapacidad laboral, por lo que, en la actualidad, es inadmisibles prescindir de estas herramientas para realizar valoraciones de forma precisa y confiable (Norkin y White, 2019; Taboadela, 2007).

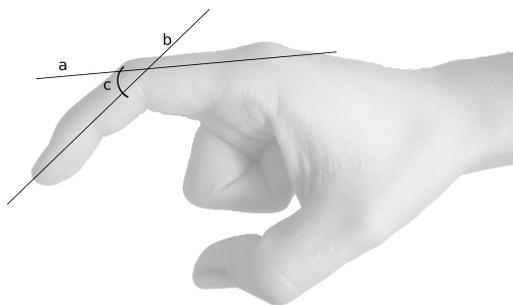
1.1 La goniometría en la ciencia médica

Como indica Taboadela (2007), en el área médica la goniometría mide los ángulos formados por la intersección de los ejes formados por las falanges a nivel de las articulaciones. Esta tiene dos grandes objetivos:

- Determinar la posición estática de una articulación en el espacio. En este procedimiento, se realiza una medición estática de la articulación, con el fin de cuantificar la ausencia de movimiento. Este procedimiento puede ser utilizado en casos de anquilosis.
- Valorar el arco de movimiento de forma activa o pasiva de la articulación del usuario en los diferentes planos del espacio. En este procedimiento, es posible realizar una medición dinámica del movimiento de la articulación para así determinar el rango de movimiento.

En la Figura 1-1 se puede observar la intersección entre la falange proximal (a) y la falange media (b) del dedo índice formando el ángulo relativo entre las falanges.

Figura 1-1: Ángulo formado por los ejes longitudinales de la falange proximal (a) y la falange media (b)



1.1.1 Aplicaciones de la goniometría en medicina

En diferentes especialidades que se encuentran como la ortopedia, traumatología, reumatología, rehabilitación, fisioterapia y medicina legal, se mide el ángulo de las articulaciones para cuantificar la presencia de desalineación a nivel osteoarticular; con esto es posible realizar un dictamen, proponer metas para un posible tratamiento o terapia, pronosticar una posible mejoría o pérdida de movimiento de un usuario, realizar investigaciones o estudios del movimiento o con fines terapéuticos y de rehabilitación (Norkin y White, 2019; Taboadela, 2007).

La rama de la fisioterapia en la medicina tiene como objetivo mejorar y si es posible restaurar la capacidad funcional de una articulación, con ayuda de la rehabilitación para así lograr aumentar la calidad de vida de las personas con algún tipo de discapacidad o limitaciones físicas. En caso que se requiera la rehabilitación física, es indispensable determinar el punto de inicio con el que un usuario inicia el tratamiento, evaluar el progreso que el mismo tenga durante el tratamiento y finalmente determinar las secuelas.

Según el Decreto 1507 de 2014, el detrimento de la capacidad laboral que puede tener un usuario se puede determinar cuantificando la deficiencia global que presenta el usuario durante una valoración con personal especializado.

1.2 Instrumentos de medición

En la actualidad se encuentran diferentes tipos de instrumentos para la medición de ángulos, estos pueden variar por su tamaño, el material con el que fue construido, la resolución que disponga el elemento, el tipo de aplicación, si la lectura es digital o análoga, entre otras características (Norkin y White, 2019; Taboadela, 2007).

1.2.1 Goniómetro

De acuerdo con Taboadela (2007), el goniómetro es uno de los instrumentos principales el cual es utilizado para lograr la medición de los ángulos en los sistemas osteoarticulares. Esta herramienta suele ser fabricada en plástico o metal; consta de dos brazos, uno fijo y el otro móvil. Además, suele ser un instrumento portable, económico y de uso sencillo.

El cuerpo del instrumento consta de un transportador el cual puede variar dependiendo de la aplicación, puede tener unos pocos grados o llegar a los 360°. La escala de medición dependerá del tipo de goniómetro y este a su vez de la aplicación; en el caso de los goniómetros para dedos, la escala de medición puede oscilar entre los 0° y 180°, con una resolución de 5° (Taboadela, 2007). Se pueden encontrar goniómetros para dedos con resoluciones de 1°, sin embargo, debido al tamaño de la carátula, hace que este instrumento sea más difícil de leer debido al tamaño de los caracteres, disminuyendo su exactitud.

Aunque son equipos económicos, de fácil acceso, portabilidad y solo requieren de papel y lápiz para la toma de datos, principalmente, tiene como principales desventajas la falta de precisión y presentar una gran variabilidad en las mediciones, por lo que es posible indicar que no tiene buena reproducibilidad de medición (Nogareda y Álvarez, s.f.). Durante el procedimiento que se realiza para la medición, el profesional puede tener dificultades para estabilizar de forma adecuada el segmento proximal de la articulación que va a ser evaluada, debido a que debe

utilizar las dos manos para utilizar el goniómetro (Norkin y White, 2019; Taboadela, 2007).

1.2.2 Electrogoniómetro

Los electrogoniómetros constan de:

- Dos galgas, una fija y otra distal
- Un sensor, el cual mide la variación de la flexión realizada en uno o dos ejes
- Los cables requeridos para la transmisión de la señal eléctrica

Estos dispositivos requieren de un proceso de calibración antes de ser usados (Nogareda y Álvarez, s.f.).

Los goniómetros flexibles precisan de complejos procedimientos de instalación, dado que requieren una alineación precisa; las unidades de medición inercial (IMU) pueden tener una configuración más sencilla y, dependiendo del montaje, puede tener una mínima interferencia con el movimiento (Wong et al., 2015).

Se encuentra que Biopac ha desarrollado un Electrogoniómetro para pequeñas articulaciones; este dispositivo mide la flexión en el eje X, por lo que no es posible medir rotación en el eje Y o Z. Para utilizar este instrumento se necesita un equipo y software para procesar la señal, lo cual aumenta el tamaño y costo del equipo (Biopac, s.f.).

1.2.3 R500 de Biometrics

R500 consiste en un sensor de ángulo electromecánico y un software gráfico para la visualización con una resolución de 1°. El equipo requiere de un controlador conectado a un computador con un software para su funcionamiento, la información queda almacenada en la computadora por lo que no tiene la posibilidad de conectarse de forma directa, a una base de datos en la nube. El dispositivo solo puede realizar mediciones en un eje (Biometrics, 2014).

1.2.4 Sensores IMU

Se han realizado diferentes estudios para desarrollar goniómetros digitales, en el caso de Bakhshi et al. (2011), desarrollaron un prototipo para medir el ángulo de flexión de una articulación de la rodilla mediante el uso de sensores IMU; los datos son enviados a un computador en el que se calcula el ángulo de flexión. Este dispositivo se ve afectado por la posición del paciente, por lo que precisa de un protocolo para la toma de datos.

El dispositivo propuesto por Jongprasithporn et al. (2018) utiliza un sensor IMU para determinar el ángulo de flexión de una articulación, por lo que no es posible determinar el ángulo relativo de dos articulaciones sin que la posición o movimiento del paciente afecten la medida.

El cálculo de la flexión se puede determinar por medio de los ángulos de Euler, obtenidos con el sensor. Esta técnica usa la rotación de los tres ejes en el espacio (x, y, z) no obstante, se puede presentar el bloqueo de cardán, el cual consiste en la pérdida de uno de los tres grados de libertad que tiene el sensor. El uso de cuaternios mejora la lectura del ángulo ya que no depende de un sistema de coordenadas (Ramos y Caraguay, 2014; Chen et al., 2016).

1.3 Validez

La validez en una medida se describe como la confianza que se puede tener de que la medida entregada por un equipo, corresponde al valor real del fenómeno que mide (Norkin y White, 2019). Validar un equipo permite verificar que los requisitos especificados por este, son adecuados para el uso previsto (Centro Español de Metrología - CEM, 2012).

Al realizar cualquier medición, se pueden generar diferentes tipos de errores de medición, como lo señala Jiménez (2007), los cuales, dependiendo del error, pueden ser pequeñas variaciones en la lectura, debido a imperfecciones mecánicas o variaciones en las medidas del equipo, del método utilizado para la medición, de las condiciones ambientales, entre otras posibles causas. Algunos de los errores en la medición son: errores presentados por el equipo de medición, por el método, por condiciones ambientales, etc. Con el uso también se pueden presentar desajustes en

las partes mecánicas, imperfecciones en las dimensiones, desgastes en la carátula en caso que sea analógico, deformaciones, entre otras posibles desajustes (Jiménez, 2007). Debido a esto, es necesario e imprescindible asegurar que cualquier equipo de medición es confiable para su uso, esto se logra con una confirmación metrológica.

1.3.1 Validez de criterio

Este tipo de validez compara las mediciones del equipo con un patrón de medida certificado; de igual forma, es posible validarlo usando métodos estadísticos como la correlación (Norkin y White, 2019). El equipo propuesto fue validado bajo un procedimiento certificado por el procedimiento de calibración del CEM (2019).

1.4 Fiabilidad

Un equipo no solo debe entregar una medida validada, sino que esta debe ser igual cuando se repita la medición en las mismas condiciones. En caso de que las mediciones no sean uniformes, el operador no tendrá la confianza de que el equipo le entregue datos válidos; en el caso contrario, es posible obtener datos uniformes, pero los valores entregados pueden tener errores respecto al valor real, como lo indican Norkin y White (2019).

En el VIM se define la repetibilidad de medida como la precisión que tiene un número determinado de medidas bajo un conjunto de condiciones similares (CEM, 2012, p. 33). Estas condiciones deben incluir las mismas condiciones para efectuar la medición (CEM, 2012).

El equipo propuesto pasó por una prueba de repetibilidad en uno de los puntos de medidas, el cual es explicado en el capítulo 5.

1.5 Procedimiento DI-003

Este procedimiento fue desarrollado por el centro español de metrología para la calibración de transportadores de ángulo y es adoptado por diferentes entidades metrológicas internacionales entre las que se encuentra el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia.

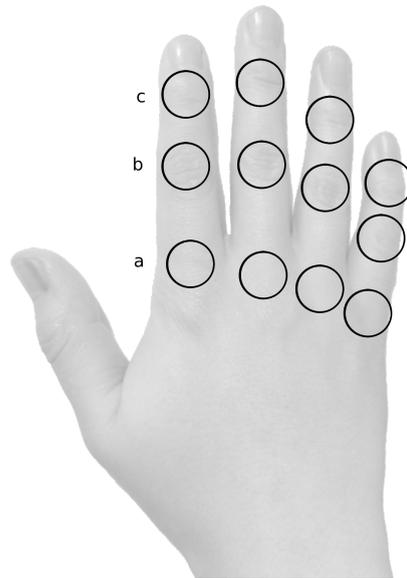
El método expuesto consta de asegurar un espacio de trabajo con temperatura y humedad controladas para previamente identificar los equipos de medición y patrones a utilizar. Cada elemento debe de poder ser identificado adecuadamente con fines de trazabilidad.

El proceso de calibración consta en la comparación de un elemento patrón cuyo valor puede ser medido con ayuda del equipo a ser calibrado y de esta forma, determinar la incertidumbre típica de medición, la desviación media, de las pruebas de repetibilidad, reproducibilidad y exactitud.

1.6 Goniometría de los dedos de la mano

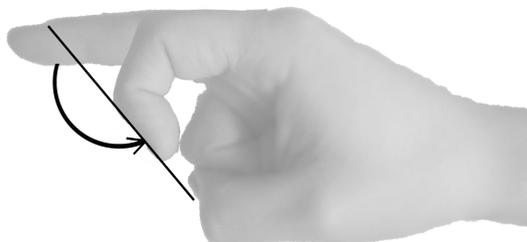
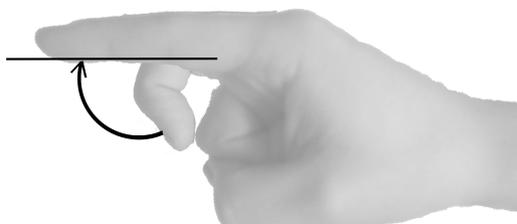
La goniometría de la mano consta de los siguientes dedos: índice, mayor, anular, meñique. A su vez, los dedos de la mano cuentan con tres articulaciones, que son: la interfalángica proximal (IFP), la metacarpofalángica (MCF) y finalmente la interfalángica distal (IFD) [ver Figura 1-2]. La MCF es un tipo de articulación sinovial llamada condiloartrosis; y las IFP e IFD son articulaciones sinoviales denominadas trocleartrosis (Norkin y White, 2019; Decreto 1507 de 2014; Taboadela, 2007).

Figura 1-2. Articulaciones de los dedos de la mano: a) MCF, b) IFP y c) IFD



Por su parte, las articulaciones del pulgar son: trapeciometacarpiana, con un tipo de articulación sinovial llamada encaje recíproco; la articulación metacarpofalángica, cuenta con un tipo de articulación sinovial llamada condiloartrosis y finalmente la interfalángica, con un tipo de articulación sinovial llamada trocleartrrosis. Debido a que los tipos de articulación varían entre los dedos de la mano y el pulgar (Norkin y White, 2019), el Decreto 1507 de 2014 y Taboadela (2007) describen la goniometría del pulgar en un grupo diferente de los dedos de la mano.

Los dedos de la mano pueden tener dos tipos de movimientos: flexión, que hace referencia al movimiento giratorio que desplaza una falange del dedo hacia la palma (Figura 1-3); y extensión, que se refiere al movimiento giratorio que desplaza una falange del dedo alejándose de la palma (Figura 1-4).

Figura 1-3. Flexión IFP del dedo índice**Figura 1-4.** Extensión MCF del dedo índice

Según la AAOS, los valores medios en grados para la IFP en flexión son de 100° , y en extensión oscila los 0° . En el caso de la medición de la flexión articular de los dedos de la mano, es necesario posicionar el equipo de medición en 0° y proceder a medir la flexión y extensión (Norkin y White, 2019; Taboadela, 2007).

La medición del arco se realiza de forma relativa, por lo que se tiene en cuenta las dos falanges de la articulación.

1.7 Arco de movimiento

Según define Taboadela (2007), el arco de movimiento es el rango de movimiento que puede presentar una articulación de forma asistida o no asistida, este valor puede ser expresado en grados y se obtiene en los tres planos del espacio X, Y y Z.

1.8 Rango útil

El rango útil se obtiene con la lectura del punto inicial de una articulación hasta el punto final de la misma, por lo tanto, es la resta del valor en grados registrado del punto de inicio de la medición, del valor en grados del punto final (Taboadela, 2007).

1.9 Planimetría

Se definen como los planos imaginarios que sirven como referencia para dividir el cuerpo humano, en tres planos: sagital, frontal y transversal. En este caso, la mano tiene un movimiento de flexión-extensión alrededor del eje mediolateral en el plano sagital si la palma de la mano está orientada al suelo. (Taboadela, 2007).

Capítulo 2. Ámbito médico

Es posible determinar los ángulos sobre radiografías o sobre pantallas de radioscopia, lo que permite obtener resultados más confiables que la medición sobre la superficie corporal; sin embargo, debido a los costos, procesos logísticos, limitaciones de espacio y a la exposición de radiación X, se reserva para casos puntuales (Decreto 1507 de 2014; Taboadela, 2007). En los casos que no es requerida la valoración sobre radiografías, se realiza con equipos que midan la movilidad articular. Estas valoraciones pueden deberse a estudios normativos obligatorios, con el fin de determinar la deficiencia en la movilidad de una articulación.

2.1 Normativa y riesgos laborales

Según el informe presentado por la Organización Iberoamericana de Seguridad Social (OISS) y el Ministerio de Trabajo de Colombia sobre las condiciones de seguridad y salud en el trabajo, elaborado, una incapacidad laboral puede ser ocasionada por accidentes propios del trabajo, los cuales llegan a un 93.3 %. No obstante, como se indica en el informe, las enfermedades ocasionadas por actividades laborales también pueden llevar a este tipo de incapacidades; por ejemplo, las lesiones musculoesqueléticas por exposición a riesgos ergonómicos en el trabajo hacen parte de los problemas de salud más frecuentes, oscilando entre el 65 % y 90 % de las enfermedades laborales de Colombia (Ministerio del Trabajo, 2013).

De acuerdo con el informe, las manos hacen parte del segmento corporal que ha sido afectado con mayor frecuencia en accidentes de trabajo, con un 26.1 %, superando las cifras reportadas de otros segmentos corporales, como son los miembros inferiores, tronco, miembros superiores o la piel, con reportes de 13.3 %, 11.5 %, 9.7 % y 10.3 %, respectivamente (Ministerio del Trabajo, 2013).

2.1.1 Rehabilitación

Es un conjunto de acciones que le permite a un usuario con discapacidad adaptarse, recuperar la máxima autonomía, calidad de vida, inclusión social, entre otros aspectos de la vida (Decreto 1507 de 2014; Norkin y White, 2019). Cuanto más tarde se inicie la terapia, más difícil será recuperar el movimiento de la articulación del paciente (Granados, 2020). Durante la rehabilitación se determina el punto de inicio del procedimiento, se determinan los objetivos, se procede a valorar el progreso de la terapia y, al terminar el periodo de la rehabilitación, se evalúan las secuelas (Centro de Terapia Física de Tijuana, 2020; Norkin y White, 2019).

Las articulaciones de los dedos de la mano pueden verse afectadas por lesiones, patologías o enfermedades, las cuales pueden tener una curación larga y difícil. Frecuentemente, las lesiones dejan secuelas como deformidad y limitación en el movimiento, debido a la inmovilización de la articulación, permitiendo la recuperación más rápida tras una lesión o a una posible intervención quirúrgica (Ojeda, 2010; Centro de Terapia Física de Tijuana, 2020).

En el momento de crear la nueva articulación en el sistema, el operador puede ingresar los objetivos que desea alcanzar. El sistema almacena el ROM de flexión y extensión de la articulación valorada en cada sesión, a fin de visualizar el avance con los valores máximos, mínimos, iniciales, finales y los objetivos propuestos.

2.1.2 Patologías

Algunas patologías pueden disminuir el arco de movimiento de una articulación. Estas pueden ser: secuelas de quemaduras; hipertonías, la cual es la resistencia que tiene una articulación para realizar un movimiento; inmovilizaciones prolongadas; enfermedades articulares; dolor; anquilosis, el cual consta en la reducción del movimiento articular debido a la unión de los huesos dentro de una articulación; entre otras.

Otras patologías pueden aumentar el arco de movimiento de una articulación, en este caso se pueden encontrar la hipotonía, el cual consiste en la elasticidad excesiva del músculo, como consecuencia, las articulaciones no se encuentran fijas adecuadamente y permite un movimiento más amplio; el síndrome de Marfan, es un

trastorno el cual afecta el tejido conectivo que conforman diferentes órganos provocando una mayor flexibilidad en las articulaciones; el síndrome de Ehlers Danlos hace parte de un grupo de trastornos el cual se caracteriza por afectar las articulaciones y dejar sueltas o laxas; entre otras. (Taboadela, 2007; Norkin y White, 2019; Decreto 1507 de 2014).

2.1.3 Pérdida de movilidad articular

Esta pérdida puede deberse a dos causas principales: la anquilosis o la artrodesis. En el caso de la primera, es una patología que provoca la pérdida total de la movilidad articular, puede ser a causa de la presencia de tejido fibroso dentro de la articulación, a la fusión total de sus partes o traumatismos. Por su parte, la artrodesis es una técnica quirúrgica que tiene como objetivo inducir la anquilosis para inmovilizar cierta articulación (Norkin y White, 2019; Taboadela, 2007; Decreto 1507 de 2014).

2.1.4 Pérdida de capacidad laboral

En el Manual Único para la Calificación de la Invalidez (Decreto 1507 de 2014; capítulo 1; numeral 1.1) se menciona que la pérdida de la función motora puede deberse a las limitaciones en la movilidad producida por lesiones, dolor, anquilosis, deformidades o amputaciones, produciendo una calificación con la que se podrá establecer la pérdida de la capacidad laboral del individuo. Como se indica en el numeral 9°, es un “método uniforme, de uso obligatorio”.

Para calcular cuál es la restricción del movimiento del usuario, se calcula la deficiencia de cada articulación, se suman y se ponderan hasta determinar la deficiencia global. Los dedos hacen parte de un segmento evaluado por los criterios de valoración osteoarticular, presentada en el capítulo 1, numeral 1.1, del Decreto 1507 de 2014.

En el Decreto 1507 de 2014; capítulo XIV, numeral 14.3., el único factor para determinar los valores de DG es mediante el rango de movimiento de cada articulación. En la Tabla 2-1, la Tabla 2-2 y la Tabla 2-3 se relaciona la DG de acuerdo con la pérdida de movilidad de la articulación IFD, IFP y MCF, respectivamente, según la información de dicho decreto.

Tabla 2-1. Deficiencia global por disminución de rango de movilidad de la articulación IFD de los dedos de la mano.

Clase funcional		0	1	2	3	4		
Grado		Normal	Leve	Moderado	Severo	Muy severo (anquilosis)		
Articulación		IFD						
Flexión (DG)	° ROM	≥ 70°	40° a 60°	10° a 30°	≤ 10°	-20°	10° a -10°	≥ 20°
							-30° a -50°	≤ -60°
	%DG índice o medio	0,0 %	1,5 %	2,5 %	5,0 %	6,5 %	4,0 %	5,0 %
	%DG anular o meñique	0,0 %	1,0 %	1,5 %	2,5 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
Extensión (DG)	° ROM	≥ 0°	40° a 60°	10° a 30°	≤ 10°			
	%DG índice o medio	0,0 %	0,5 %	1,5 %	3,5 %			
	%DG anular o meñique	0,0 %	0,5 %	1,0 %	1,5 %			

Nota: los datos de esta tabla fueron obtenidos de MinTrabajo (2014).

Tabla 2-2: Deficiencia global por disminución de rango de movilidad de la articulación IFP de los dedos de la mano.

Grado		Normal	Leve	Moderado	Severo	Muy severo (anquilosis)		
Articulación		IFP						
Flexión (DG)	° ROM	≥ 90°	50° a 80°	20° a 40°	≤ 10°	-40°	10° a -10°	≥ 20°
							-50° a -70°	≤ -80°
	%DG índice o	0,0 %	2,0 %	0,5 %	1,0 %	5,0 %	7,0 %	8,0 %

	medio							
	%DG anular o meñique	0,0 %	1,0 %	0,5 %	1,0 %	2,5 %	3,5 %	4,0 %
Extensión (DG)	° ROM	≥ 0°	40° a 60°	10° a 30°	≤ 10°			
	%DG índice o medio	0,0 %	0,5 %	1,5 %	6,5 %			
	%DG anular o meñique	0,0 %	0,5 %	1,0 %	3,5 %			

Nota: los datos de esta tabla fueron obtenidos del Manual expedido en el Decreto 1508 de 2014.

Tabla 2-3. Deficiencia global por disminución de rango de movilidad de la articulación MCF de los dedos de la mano.

Grado		Normal	Leve	Moderado	Severo	Muy severo (anquilosis)		
Articulación		MCF						
Flexión (DG)	° ROM	≥ 80°	40° a 70°	20° a 30°	≤ 10°	-20°	10° a -10°	≥ 20°
							-30° a -50°	≤ -60°
	%DG índice o medio	0,0 %	1,5 %	2,5 %	5,0 %	6,5 %	4,0 %	5,0 %
	%DG anular o meñique	0,0 %	1,0 %	1,5 %	2,5 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
Extensión (DG)	° ROM	≥ 0°	40° a 60°	10° a 30°	≤ 10°			
	%DG índice o medio	0,0 %	0,5 %	1,5 %	3,5 %			
	%DG anular o meñique	0,0 %	0,5 %	1,0 %	1,5 %			

Nota: los datos de esta tabla fueron obtenidos del Manual expedido en el Decreto 1508 de 2014.

El dispositivo propuesto mide el ROM de la articulación en flexión y extensión, permitiendo determinar la DG y, así, ayudar a determinar la pérdida de capacidad laboral del usuario. La información obtenida por este dispositivo, puede ser almacenada en la base de datos de Firebase, de esta forma, la información permanecerá almacenada en la nube para futuras consultas.

Además, el sistema permite seleccionar la articulación que será medida, haciendo posible elegir la articulación a valorar y estableciendo si hace parte del miembro superior derecho o izquierdo. El sistema le muestra al operador cuáles articulaciones están creadas en el sistema, permitiéndole agregar nuevas articulaciones.

Capítulo 3. Diseño e integración de hardware

Como se indica en De Visser, H. (2020) el IoT o también llamado internet de las cosas, consiste en conectar a internet cualquier elemento de uso cotidiano bajo tres elementos clave: captura de datos, tratamiento de los datos y la transformación del negocio o la aplicación. Los dispositivos de medición en el área médica no son ajenos al cambio o a la adaptación de sus tecnologías y por consiguiente, a la mejora continua de sus procesos.

El dispositivo debe abarcar y cumplir con tres aspectos principales, los cuales son: incluir elementos de campo, los cuales son elementos del mundo físico tales como actuadores, sensores, procesadores, entre otros; incluir un software para el tratamiento de la información y finalmente la aplicación que muestre la información y pueda ser manejada por los usuarios. (De Visser, 2020).

En este capítulo se abordará el diseño y la integración de diferentes tecnologías para capturar el ángulo relativo de las falanges de los dedos mediante sensores IMU y microprocesadores, para proceder con el tratamiento y almacenamiento de la información en una base de datos. Se explica la última versión desarrollada del dispositivo el cual fue basado con el microprocesador ESP32 de espressif, el cual permite la conexión inalámbrica con el software instalado en un equipo con sistema operativo Android.

La integración de los diferente componentes seleccionados deben cumplir con las siguientes especificaciones:

Medir el desplazamiento angular de dos ejes.

Permitir la conectividad inalámbrica del prototipo con un dispositivo móvil.

Medir el desplazamiento angular de dos ejes.

Bajo consumo de energía.

Posibilidad de calibración.

Costo reducido.

3.1 Componentes electrónicos

3.1.1 Sensores

Según la RAE, un sensor es un dispositivo con la capacidad de detectar una determinada variable y es capaz de transmitirla adecuadamente (RAE, 2021). En el caso del prototipo, la variable a detectar es la variación del ángulo formado por la intersección de las falanges de los dedos..

La detección del movimiento articular de los dedos, puede ser registrado con los sensores MEMS, los cuales integran tecnología electromecánica en dispositivos microscópicos, de esta forma, se obtienen sensores de movimiento compactos y potencias bajas. Dentro de la familia de los sensores MEMS, se encuentran los acelerómetros, giroscopios y magnetómetros (BOSCH, 2021).

Los acelerómetros de tres ejes, miden el cambio del movimiento lineal en el eje X, Y y Z utilizando el principio de detección capacitiva, esto permite registrar el cambio de aceleración de un objeto viéndose afectado por la atracción de la gravedad. El giroscopio de tres ejes, permite medir bajas velocidades angulares. El magnetómetro digital de tres ejes, es un sensor que permite registrar las fuerzas magnéticas, al detectar el polo norte magnético de la tierra, permite la orientación permite la orientación de un objeto (BOSCH, 2021).

Los sensores de medición inercial, integran el giroscopio y el acelerómetro para la detección del movimiento en tiempo real, lo cual permite al programador realizar aplicaciones de navegación, reconocimiento de gestos, entre otras. Para aplicaciones de orientación absoluta, es posible integrar el magnetómetro a los sensores de medición inercial, aportando mayores características en el momento de la detección de movimiento u orientación (BOSCH, 2021).

Bosch Sensortec cuenta con diferentes familias de sensores MEMS, de los cuales, se encuentra el sensor inteligente BNO055. Este tipo de sensor combina acelerómetro, giroscopio, magnetómetro y software de orientación en un encapsulado de 1.13 mm * 3.8 mm * 5.2 mm siendo significativamente más pequeño que otros sensores en el mercado con mayores prestaciones operativas (BOSCH, 2021).

El sensor NHI260AP de la familia Bosch Sensortec, integra un software de IA, permitiendo el análisis de aprendizaje automático y la estimación de la orientación, este sensor no fue considerado debido a que no estaba disponible en el momento de la verificación de sensores, sin embargo, es una alternativa que podrá ser valorada en trabajos futuros.

Para el proyecto se integró el sensor BNO055 desarrollado por *Bosch Sensortec*, implementado en la placa de *Adafruit*, el cual integra acelerómetro triaxial de 14 bits, giroscopio triaxial de 16 bits, sensor geomagnético triaxial y un microcontrolador de 32 bits.

El sensor permite obtener datos en los 3 ejes, con una frecuencia de lectura de hasta 100 Hz con un protocolo de comunicación I2C y con una dimensión de 20 mm * 17 mm * 4 mm, lo hace ideal para implementarlo en zonas de áreas reducidas.

El puerto y protocolo I2C, también conocido como circuito inter-integrado, es un protocolo de comunicación serial, desarrollado a principios de los ochenta por Philips. Su objetivo fue el de controlar varios chips de manera sencilla; con el tiempo, se estandarizó y es utilizado por diferentes dispositivos de los principales fabricantes de circuitos (i2c, 2021).

Utiliza dos puertos de comunicación: SDA, utilizado para la transmisión de datos y el SCL, utilizado para transmitir los pulsos de reloj y sincronizar la comunicación, es por esto, que este protocolo de comunicación es síncrono (i2c, 2021).

Para la transmisión de información entre dos dispositivos, se define una trama de datos y una conexión física. El protocolo permite la conexión con más de un maestro. Cada esclavo debe tener una dirección única usualmente de 7 bits, la cual es utilizada para realizar la comunicación entre maestro - esclavo. El paquete de datos

en la transmisión es de 8 bits con una velocidad máxima de 5 MHz, sin embargo, la calidad del cable y distancia pueden afectar la comunicación (i2c, 2021).

El protocolo sigue diferentes pasos para la transmisión y recepción de información, todos desarrollados entre un inicio y parada de comunicación por parte del dispositivo maestro. Cada paquete de información es seguido por una confirmación definida como ACK (Figura 3-1), o no confirmación definida como NACK (Figura 3-2), por parte del dispositivo receptor (i2c, 2021).

Figura 3-1. Confirmación de recepción ACK

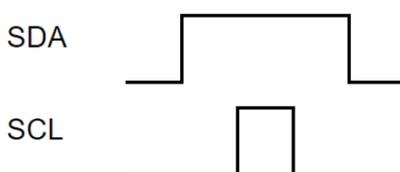
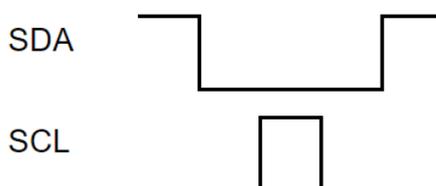
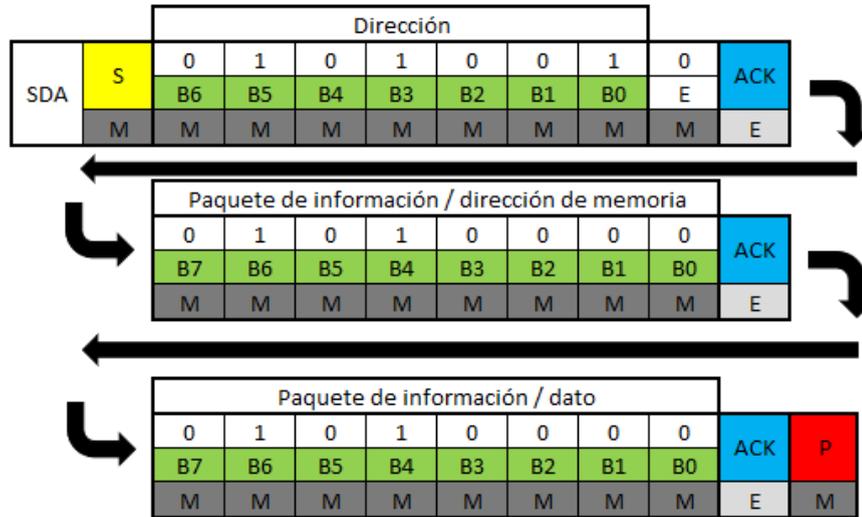


Figura 3-2. Confirmación de no recepción NACK



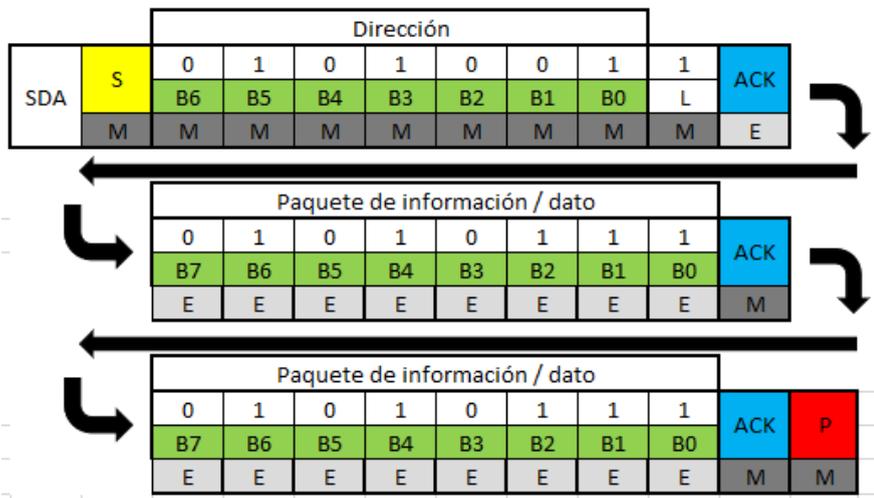
El dispositivo maestro, puede enviar o recibir paquetes de información al dispositivo esclavo, lo que permite la comunicación entre los dispositivos. En la Figura 3-3 se observa los bits de información que un dispositivo maestro puede enviar al dispositivo esclavo; en la Figura 3-4 se observa la recepción de información por parte del maestro y en la Figura 3-5 la transmisión y recepción de información, este último caso es utilizado cuando la información requerida por el dispositivo maestro, está alojada en una memoria específica del dispositivo esclavo.

Figura 3-3. Protocolo de comunicación M-E I2C

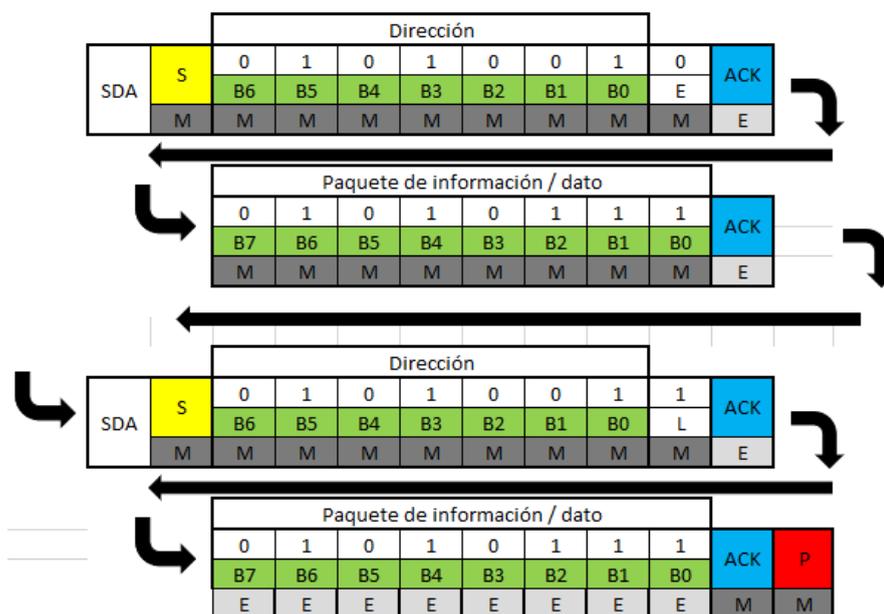


Nota. Elaboración propia

Figura 3-4. Protocolo de comunicación E-M I2C



Nota. Elaboración propia

Figura 3-4. Protocolo de comunicación M-E-M I2C

Nota. Elaboración propia

El sensor BNO055 tiene dos identificaciones, 0x28 y 0x29 permitiendo utilizar dos dispositivos en el mismo bus I2C. Para cambiar de identificación es necesario poner en alto el pin COM3 (BOSCH, 2021). Las características técnicas del sensor BNO055 tales como: tamaño del dispositivo, protocolo de comunicación empleado y la capacidad de procesamiento de datos, hacen que el sensor BNO055 sea adecuado para ser usado en el prototipo.

3.1.2 Microprocesador ESP32

Para el procesamiento y la transmisión de datos fue necesario escoger un equipo que integre los componentes de comunicación que integran los componentes IoT, tales como conexión WiFi y conexión Bluetooth (De Visser, 2020). El dispositivo debe ser pequeño para facilitar la portabilidad y contar con el protocolo de comunicación I2C requerido para la recepción de datos de los sensores.

Espressif se ha posicionado en el mercado como una empresa multinacional enfocada en el desarrollo de soluciones robustas, seguras y energéticamente eficientes en el área de IoT (Espressif, 2021).

Espressif tiene diferentes modelos disponibles en el mercado, dando solución a diferentes necesidades del mercado, para la selección de la placa se utilizó la página web de selección de componentes, filtrando los requerimientos mínimos requeridos por la aplicación tales como: comunicación I2C, conexión bluetooth, conexión Wifi 2.4 GHz, doble procesador para el procesamiento de datos y la conexión bluetooth por separado y finalmente que se pueda encontrar en el mercado local. En la figura 3-5 se observa las alternativas disponibles para la aplicación junto con su ficha técnica. (ESP Product Selector, 2021).

Figura 3-5. Selección de producto ESP

The screenshot shows the ESP Product Selector interface. On the left, there are filters for Wi-Fi (2.4 GHz 802.11 b/g/n), Bluetooth (BR/EDR + Bluetooth LE v4.2, Bluetooth LE v5.0), Temperature (-40 ~ 85), and Products (Module). The main area displays a product card for ESP32-WROOM-32E, including a product brief, docs & certs, devkits, applications (e.g., Generic Low-power IoT Sensor Hub, Baby monitors, Speech Recognition), and a block diagram. Below the product card is a table listing 44 items, with the first few rows showing ESP32-WROOM-32 variants.

Index	Name	MPN	Marketing Status	Type	Wi-Fi	Bluetooth	Temp (°C)	GPIO
10	ESP32-WROOM-DA	ESP32-WROOM-...	Sample	Module	IEEE 802.11 b/g/n; 2.4 ...	BR/EDR ...	-40 ~ 85	24
11	ESP32-WROOM-32E	ESP32-WROOM-3...	Mass Production	Module	IEEE 802.11 b/g/n; 2.4 ...	BR/EDR ...	-40 ~ 85	26
12	ESP32-WROOM-32...	ESP32-WROOM-3...	Mass Production	Module	IEEE 802.11 b/g/n; 2.4 ...	BR/EDR ...	-40 ~ 85	26
13	ESP32-WROOM-32...	ESP32-WROOM-3...	Mass Production	Module	IEEE 802.11 b/g/n; 2.4 ...	BR/EDR ...	-40 ~ 105	26
14	ESP32-WROOM-32...	ESP32-WROOM-3...	Mass Production	Module	IEEE 802.11 b/g/n; 2.4 ...	BR/EDR ...	-40 ~ 85	26

Una de las características del prototipo, es la conexión inalámbrica con un dispositivo móvil y la posibilidad de conexión con una base de datos de forma directa. En el mercado se encuentran diferentes alternativas, sin embargo, se escogió la placa ESP32 WROOM 32 siendo la alternativa recomendada para lo requerido por la aplicación el cual está integrado en la placa de desarrollo DEVKITV1 de *espressif*. Es una alternativa económica y de tamaño reducido teniendo en cuenta los módulos que tiene integrados.

La CPU contiene dos microprocesadores Xtensa® 32-bit LX6 de baja potencia. Es compatible con protocolos de comunicación como: SPI, I2C. Integra módulos: Bluetooth®, Bluetooth LE, Wi-Fi, ADC, DAC, la memoria interna, a su vez, incluye:

- 4 448 kB de ROM para el arranque y las funciones principales.
- 5 520 kB de SRAM.

- 6 Cuenta con 8 kB de SRAM, la cual puede ser utilizada para almacenar los datos recolectados.
- 7 8 kB de SRAM en RTC, la denominada RTC SLOW Memory, la cual puede ser accedida por el coprocesador en el modo de sueño profundo.

El ESP32 integra el módulo de comunicación I2C requerido para comunicar los sensores BNO055, integra el módulo bluetooth necesario para la comunicación con el dispositivo móvil y así transmitir los datos de los sensores al profesional. El bajo consumo y la posibilidad de funcionar con tensiones de 3V ayudan a alargar la vida útil de la batería, lo que asegura mayor tiempo de uso. El tamaño compacto permite diseñar una carcasa portable y liviana.

7.1.1 Alimentación

El equipo integra una batería de lithium Cr2 de 3V, adecuada para el suministro de energía sin necesidad de un regulador de voltaje, permitiendo mayor eficiencia al evitar pérdidas de energía. La batería escogida tiene una capacidad de 1700 mAh, teniendo en cuenta que el consumo del ESP32 es de aproximadamente 130 mA en trabajo continuo; el equipo podría trabajar 11 horas, en promedio (valor corroborado en las pruebas), de forma ininterrumpida.

7.2 Componentes mecánicos

El encapsulado consta de 6 partes ensamblables en tres grupos: el primero es para el microprocesador, batería e interruptor; el segundo y el tercero son para los dos sensores BNO055. Se decidió utilizar la tecnología de fabricación por adición de capas o impresora 3D.

Para el diseño del encapsulado se utilizó el software Inventor y fue necesario tomar las dimensiones de los componentes que fueron utilizados; se consideró el espacio del cableado, se tuvieron en cuenta las tolerancias de la impresora 3D y el tipo de rosca de los tornillos para el ensamble. Posteriormente, se realizaron bocetos para determinar las posibles ubicaciones de los componentes, con el fin de disminuir el tamaño del encapsulado. Para el diseño de los componentes 3D, ensamble y planos, se utilizó el software "Inventor" de Autodesk.

Con los diseños 3D elaborados, se procedió a imprimir los componentes con el filamento ABS.

7.2.1 Encapsulado del microprocesador

El encapsulado del procesador consta de dos partes: la base y la tapa. La sujeción mecánica es por sujetadores roscados de 5X3/4", permitiendo una facilidad en el ensamble.

En la Figura 3-6 se observa el modelado de la base para el microprocesador y la batería; en la Figura 3-7, el modelado de la tapa.

Figura 3-6. Modelado de la base del equipo

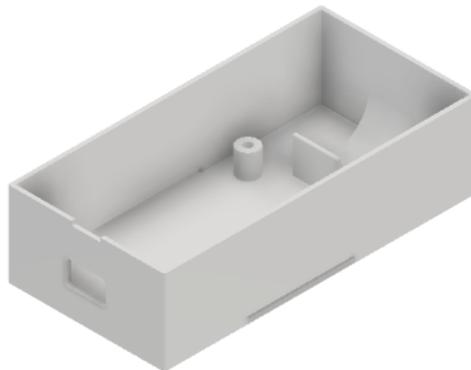


Figura 3-7. Modelado de la tapa del equipo



7.2.2 Encapsulado de sensores

El encapsulado de los sensores consta de dos partes: la base y la tapa. La sujeción mecánica es por sujetadores roscados de 3X1/2", permitiendo una facilidad en el ensamble. Se consideró un ensamble por acoplamiento de clips y ganchos, pero aumentaba el tamaño del encapsulado, por lo que se descartó.

En la Figura 3-8 se observa el modelado de la base del encapsulado para los sensores BNO055; y en la Figura 3-9, el modelado para la tapa.

Para el diseño de la carcasa de los sensores, se tuvo en cuenta el movimiento de los dedos de la mano, de tal forma que el cableado no interfiriera en el desplazamiento de la falange. Se utilizó un cable Ribbon de 5 colores calibre 26 AWG, adecuado para la carga de no más de 30 mA de los sensores. Las pruebas fueron experimentales.

Figura 3-8. Modelado de la base para los sensores

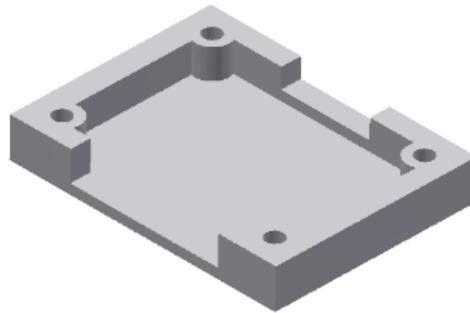
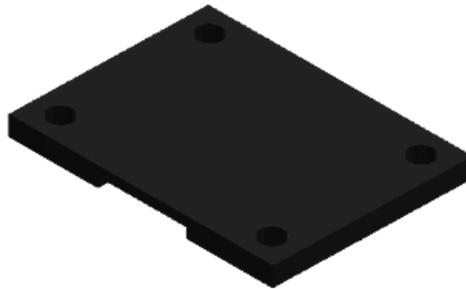


Figura 3-9. Modelado de la tapa para los sensores



7.2.3 Ensamble

Se procedió a realizar el ensamble y la verificación de medidas para aprobar el diseño e imprimir los prototipos. En la Figura 3-10 se observa el ensamble del microprocesador y la batería con la base; y en la Figura 3-11, el conjunto del grupo uno.

Figura 3-10. Ensamble del microprocesador y la batería

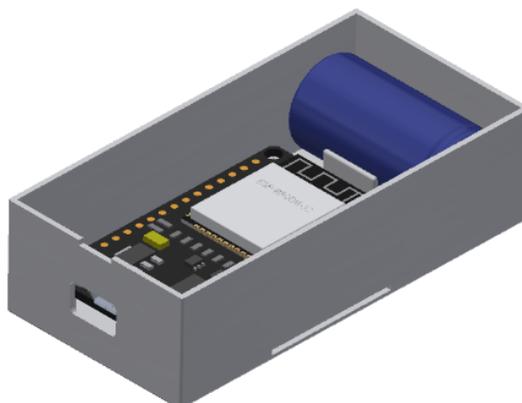
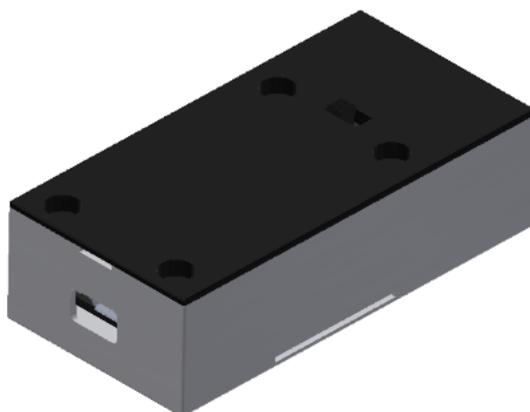
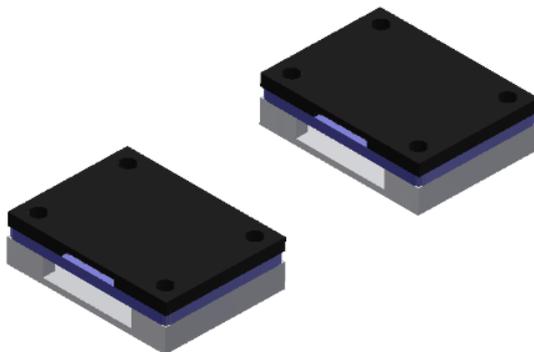


Figura 3-11. Ensamble del grupo 1 del equipo



En la Figura 3-12 se muestra el conjunto del grupo dos y tres, conformados por el sensor BNO055, base y tapa.

Figura 3-12. Ensamble del grupo 2 y 3 del equipo



En la Figura 3-13 se observa la vista explosionada de las partes del equipo; y en la Figura 3-14, el conjunto completo ensamblado.

Figura 3-13. Vista explosionada del equipo

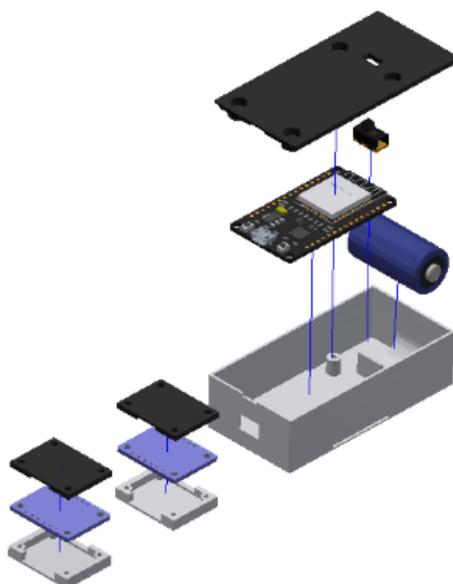
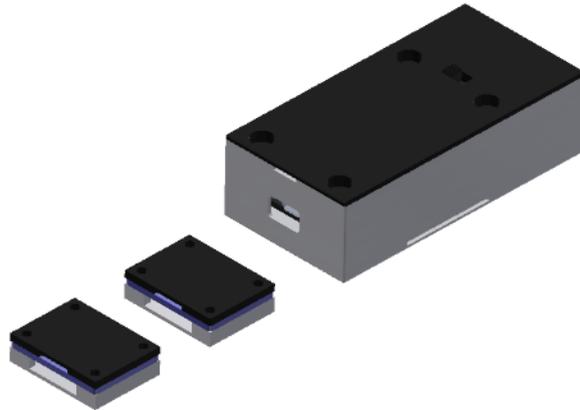


Figura 3-14. Conjunto completo ensamblado



7.2.4 Planos y listado de partes

Para el listado de piezas que fueron utilizadas se generó el plano de despiece con sus respectivas partes (Figura 3-15). Para la verificación de las medidas finales se realizó un plano con las dimensiones externas y de las perforaciones donde se sujetan los tornillos (Figura 3-16).

Figura 3-15. Plano con lista de piezas

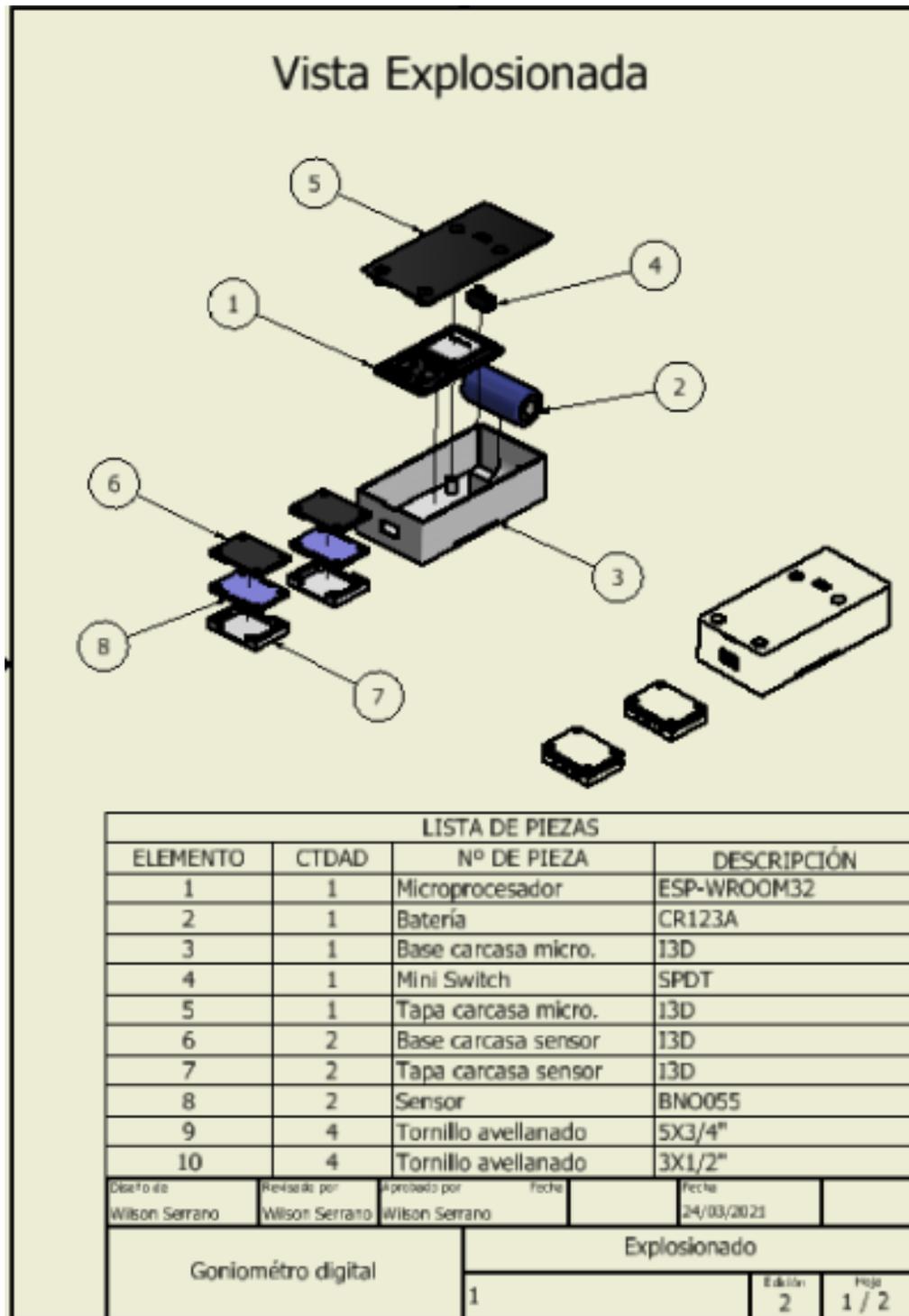
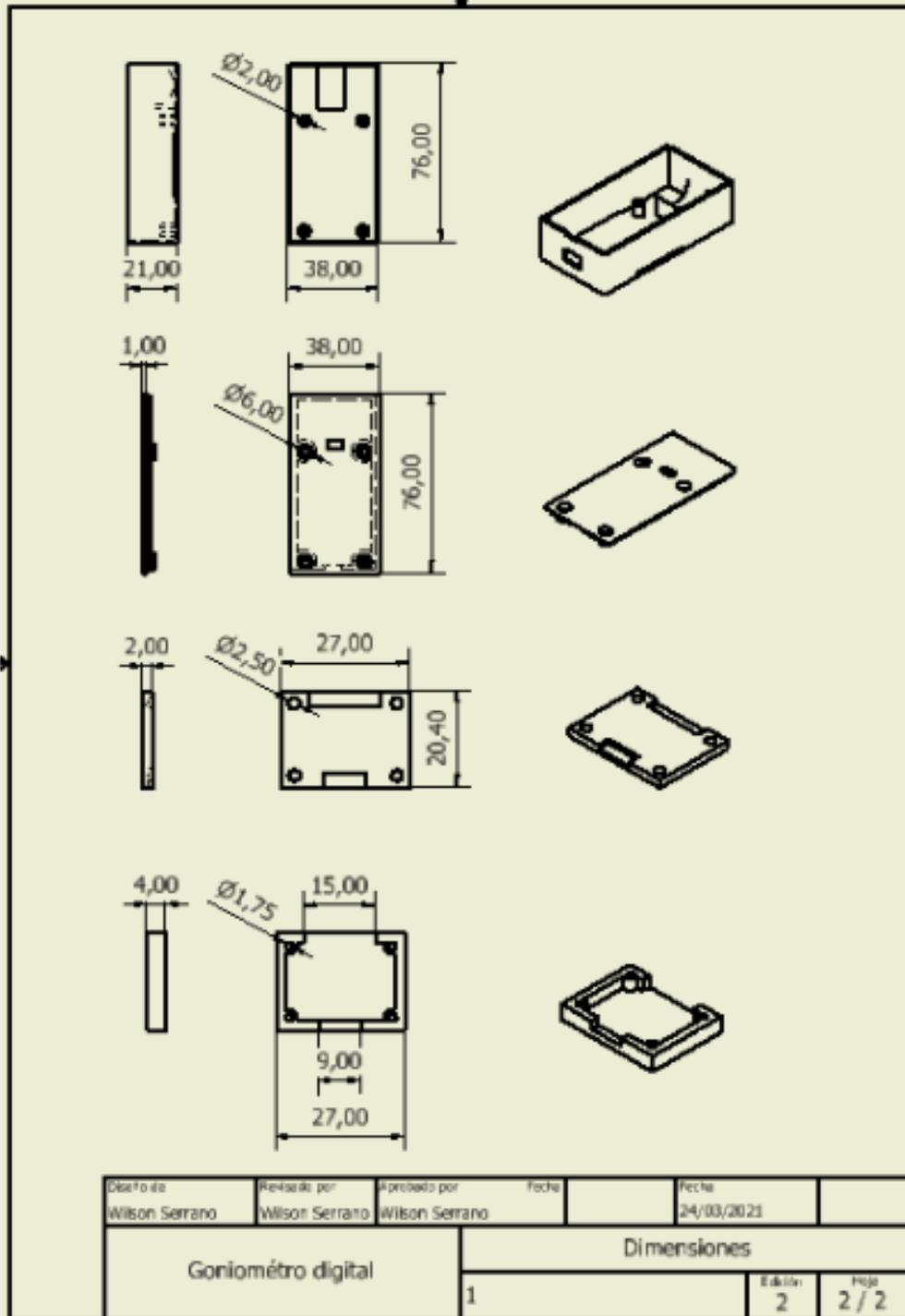


Figura 3-16. Plano con dimensiones externas de las piezas



7.2.5 Resultado

Después de imprimir los componentes en 3D, se procedió a ensamblarlos para su verificación. En la Figura 3-17 se observa el encapsulado del microprocesador; y en la Figura 3-18, el encapsulado de los sensores.

Figura 3-17. Vista final de la carcasa del microprocesador



Figura 3-18. Vista final de la carcasa de los sensores



Capítulo 4. Captura y procesamiento de datos

Como se indicó en el capítulo 3 De Visser, H. (2020) indica que la captura y el tratamiento de los datos es un aspecto importante en el IoT para posteriormente realizar la transformación del negocio o la aplicación. El dispositivo debe incluir un software para el tratamiento de la información que es capturada, de tal forma que permita obtener el ángulo relativo de la FIP.

Para el desarrollo de la programación del presente proyecto fue necesario considerar las diferentes características que eran necesarias cumplir, entre ellas se encontraron: software de licencia libre, posibilidad de comunicar la interfaz gráfica con el microprocesador por bluetooth, posibilidad de comunicar el equipo con una base de datos en la nube para almacenar las medidas y la autenticación de usuarios.

En la Figura 4-1, se observa el diagrama de bloques general utilizado para la recepción de datos por parte del ESP32 a los sensores. En la Figura 4-2, se observa el diagrama de bloques general utilizado para el envío y recepción de datos por parte de la aplicación.

Figura 4-1. Diagrama de flujo general programación del ESP32

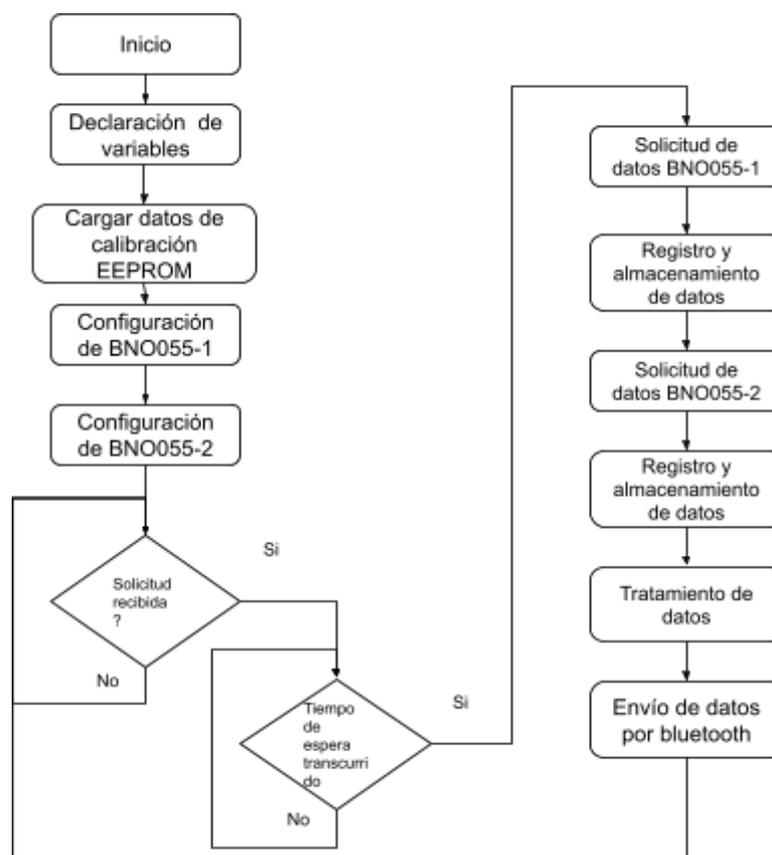
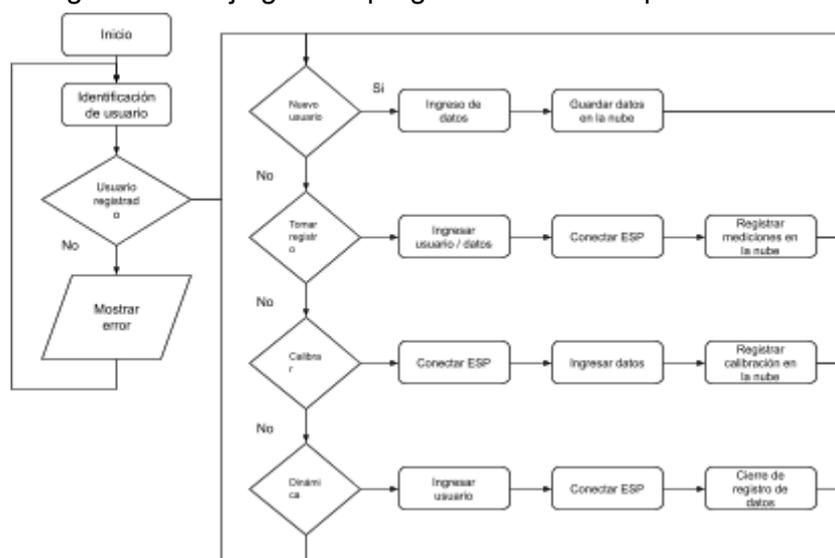


Figura 4-2. Diagrama de flujo general programación de la aplicación



El sensor BNO055 puede ser calibrado y los registros de su calibración pueden ser guardados en la memoria EEPROM para ser cargados al iniciar el dispositivo, de esta

forma, el equipo podrá mantener su ajuste hasta que requiera de una nueva verificación y calibración (i2c, 2021).

La visualización de la orientación puede ser realizada con ángulos Euler o con cuaterniones, en el primer caso, los datos dependen del giro del elemento alrededor de ejes perpendiculares X,Y y Z. Siempre y cuando los ejes permanezcan perpendiculares no se presentaron problemas, sin embargo, en el momento en el que dos ejes se alinean se produce el fenómeno de bloqueo de cardán describiendo la misma rotación.

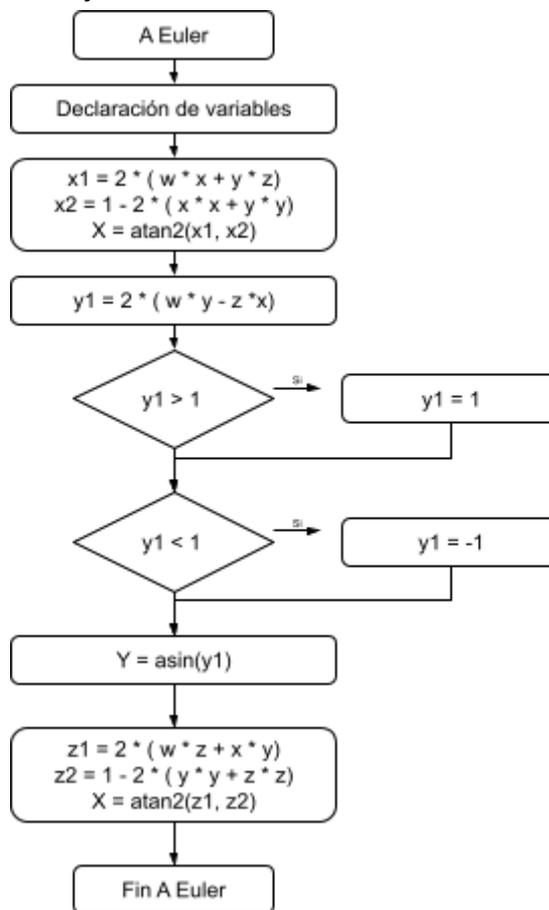
Aunque el BNO055 permite obtener la orientación en datos grados Euler, no es posible utilizarlos sin que se presente el fenómeno de bloqueo de cardan, por esta razón se obtienen los datos en cuaterniones el cual fue inventado por William Hamilton en 1843. La cuaternión consta de cuatro números, el cual uno es un escalar.

$$q = (w, x i, x j, x k) \quad (1)$$

Donde w, x, y y z son números reales, mientras que i, j y k son unidades en cuaterniones.

Los cuaterniones son números hipercomplejos con rango 4. El uso de cuaterniones permite recopilar información necesaria para determinar la orientación del objeto en el espacio, en el caso del proyecto, el ángulo en los tres ejes de los dos sensores (Cova, 2019)

Para determinar el ángulo en Euler de cada sensor se realizó el procedimiento descrito en el diagrama de la Figura 4-3.

Figura 4-3. Diagrama de flujo de conversión cuaterniones a Euler

Obtenido los grados Euler, se procede a determinar la diferencia de los grados en el eje X, Y y Z para posteriormente empaquetar la información y enviar al dispositivo móvil.

8.1 Transmisión de datos

Para la comunicación de los sensores BNO055 con el microprocesador ESP32 se utilizó el protocolo de comunicación I2C, el cual, al ser síncrono, requiere un pulso de reloj que es transmitido por el microprocesador.

La transmisión de datos entre el dispositivo y la aplicación es por Bluetooth, posibilitando la conexión del equipo con la mayoría de dispositivos móviles con sistema operativo Android que tengan la aplicación instalada. El equipo envía un

paquete de información con los datos de los sensores, al reconocer una conexión válida, por Bluetooth

En la Figura 4-4 se muestra parte del código final en la versión actualizada creada para el dispositivo.

Figura 4-4. Sección de código del ESP32

```

119 //Y12 = (Y10 & 0xFF);
120 z = (event.orientation.z);
121 //Z11 = (Z10 >> 8);
122 //Z12 = (Z10 & 0xFF);
123 //A[i]=Y;
124 delay(5);
125
126 x1 = 2 * ( w * x + y * z );
127 x2 = 1 - 2 * ( x * x + y * y );
128 X = atan2(x1, x2);
129 y1 = 2 * ( w * y - z * x );
130 if (y1 > 1){
131     y1=1
132 }
133 elseif (y1 < -1) {
134     y1 = -1
135 }
136 Y = asin(y1)
137 z1 = 2 * ( w * z + x * y )
138 z2 = 1 - 2 * ( y * y + z * z )
139 X = atan2(z1, z2)
140
141
142 }

```

8.2 Interfaz gráfica

La plataforma escogida para diseñar la interfaz gráfica fue “App Inventor”, ya que cuenta con desarrollo de código abierto, lo que disminuye el costo final del proyecto.

8.2.1 Registro e ingreso del operador

La aplicación permite ingresar, registrarse o cambiar la contraseña en caso de que haya sido olvidada. En la Figura 4-5 se observa el panel de ingreso.

Figura 4-5. Panel de ingreso en la aplicación

Bienvenido, para ingresar a la aplicación, por favor ingresar sus datos

Correo

Contraseña

[¿Olvidó la contraseña?](#)

Ingresar

[¿Es un nuevo usuario? Registrar](#)

Cuenta con las condiciones necesarias para verificar si el correo electrónico existe en la base de datos, si la contraseña fue escrita erróneamente, entre otras condiciones básicas para guiar al usuario en el ingreso a la aplicación (ver Figura 4-6).

Figura 4-6. Mensajes de error en la aplicación.

Bienvenido, para ingresar a la aplicación, por favor ingresar sus datos

Correo

Contraseña

[¿Olvidó la contraseña?](#)

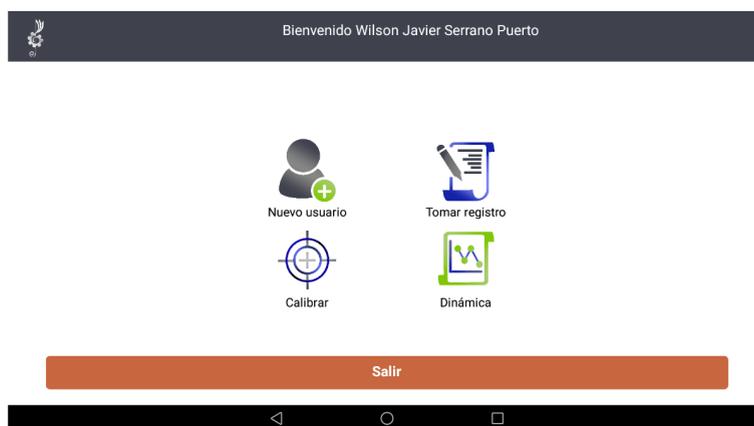
Correo no encontrado

Ingresar

[¿Es un nuevo usuario? Registrar](#)

En el momento en que el usuario se registra en la base de datos, se le asigna una UID para el ingreso seguro a la aplicación. En la actualidad, cuenta con 4 herramientas, que son: nuevo usuario, tomar registro, calibrar, dinámica; cada una le permitirá al operador realizar seguimientos del usuario y del equipo (ver Figura 4-7).

Figura 4-7. Menú principal en la aplicación



8.2.2 Registro o actualización de usuarios

En la zona de ingreso, el operador podrá ingresar nuevos usuarios o nuevas articulaciones valoradas por cada usuario. La información es almacenada en la base de datos Firebase (ver Figura 4-8).

Figura 4-8. Panel de ingreso o modificación de usuarios en la aplicación

The screenshot shows the 'Ingreso' (Registration) panel. It features a green header bar with a back arrow and the title 'Ingreso'. Below the header, there is a form with several input fields. The first field is 'Documento' with the value '123456'. Below this is a green 'Buscar' (Search) button. The next row contains 'Nombre' (usuario 1) and 'Apellido' (apellido). The following row contains 'Fecha de nacimiento' (1-enero-2000) and 'Género' (Hombre). Below these is a 'Dir.' (Direction) field with a dropdown arrow, currently showing 'Superior'. At the bottom, there are two more fields: 'Objetivo en flexión' and 'Objetivo en extensión'. The form is set against a white background with a black Android navigation bar at the bottom.

8.2.3 Toma de datos

En la toma de datos, el operador podrá registrar las mediciones realizadas en cada sesión, y así le será posible realizar un seguimiento al usuario. Para el ingreso de los datos, el equipo debe ser conectado al goniómetro digital por medio de la conexión Bluetooth (ver Figura 4-9).

Figura 4-9. Panel para la conexión del dispositivo por Bluetooth con la aplicación



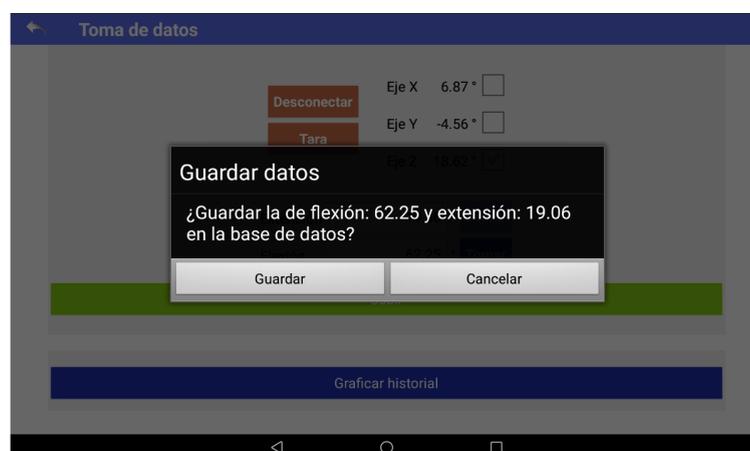
En el momento en que la aplicación se conecta con el dispositivo, el operador podrá poner los indicadores en 0° para obtener el punto de referencia y el registro del ángulo entregado por el dispositivo (ver Figura 4-10).

Figura 4-10. Indicación de los ángulos medidos por el equipo en la aplicación



Al guardar los valores obtenidos por el dispositivo, la aplicación le solicitará confirmación al operador para almacenar los datos en la nube (ver Figura 4-11).

Figura 4-11. Confirmación para el almacenamiento de datos en la nube



Al guardar el registro en la base de datos, se actualiza la información de la articulación, mostrando los siguientes datos: número de sesiones, extensión inicial, flexión inicial, extensión final, extensión objetivo y flexión objetivo (ver Figura 4-12).

Figura 4-12. Visualización de los datos del usuario almacenados en la nube



The screenshot shows a mobile application interface for data collection. At the top, there is a blue header with a back arrow and the text 'Toma de datos'. Below this is a form titled 'Información de la articulación'. The form contains several input fields with their respective values:

Field	Value
Número de sesiones:	1
Extensión Inicial:	19.06 °
Flexión Inicial:	62.25 °
Extensión Final:	19.06 °
Flexión Final:	62.25 °
Extensión Objetivo:	0 °
Flexión Objetivo:	90 °

At the bottom of the screen, there is a black navigation bar with three icons: a back arrow, a circle, and a square.

El registro puede continuar hasta que el operador lo considere necesario. Es posible graficar el historial de registros en extensión y flexión (ver Figura 4-13 y Figura 4-14).

Figura 4-13. Gráfica de registros de la articulación en extensión del usuario

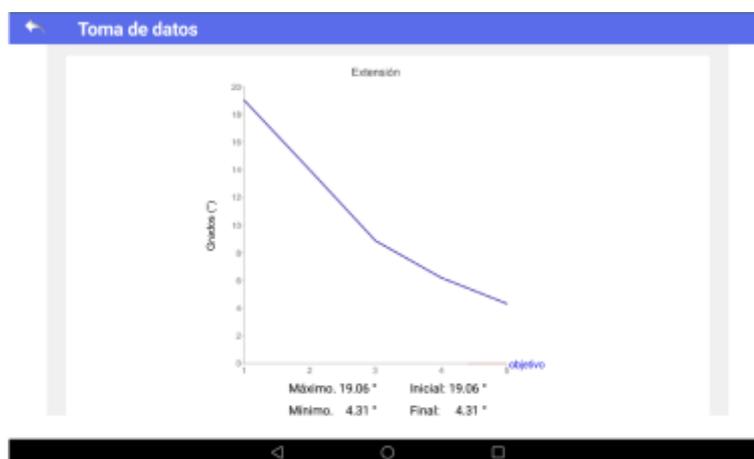
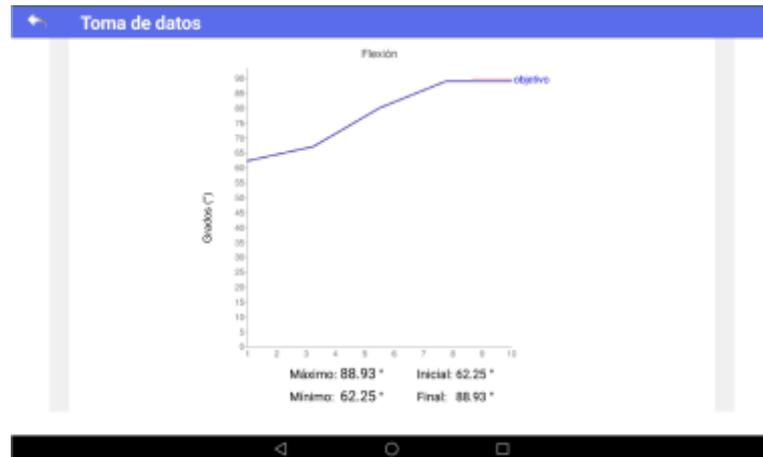


Figura 4-14. Gráfica de registros de la articulación en flexión del usuario

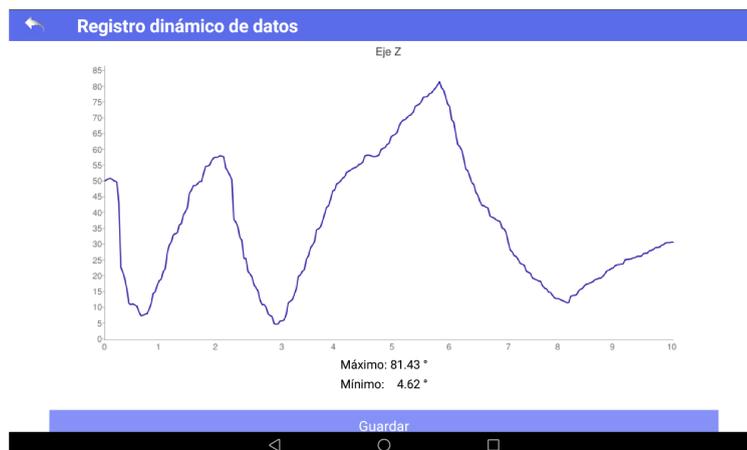


8.2.4 Registro dinámico

Otra de las herramientas disponibles es la llamada “registro dinámico”, la cual está destinada a realizar pruebas dinámicas de una articulación. Cuenta con dos variables modificables, que son: tiempo de muestreo y duración. Registra la variación del ángulo en los ejes X, Y y Z.

El tiempo de muestreo es una variable que determina el intervalo de tiempo en el que se registran dos muestras de cada uno de los ejes. Puede verse afectado por el procesamiento del dispositivo. Por su parte, la duración es una variable que determina el tiempo en que se registran las muestras de forma automática, aunque el proceso puede ser detenido manualmente. En la Figura 4-15 se muestra la gráfica generada a un movimiento en el eje Z de los sensores.

Figura 4-15. Gráfica generada del movimiento en el eje Z en una prueba dinámica

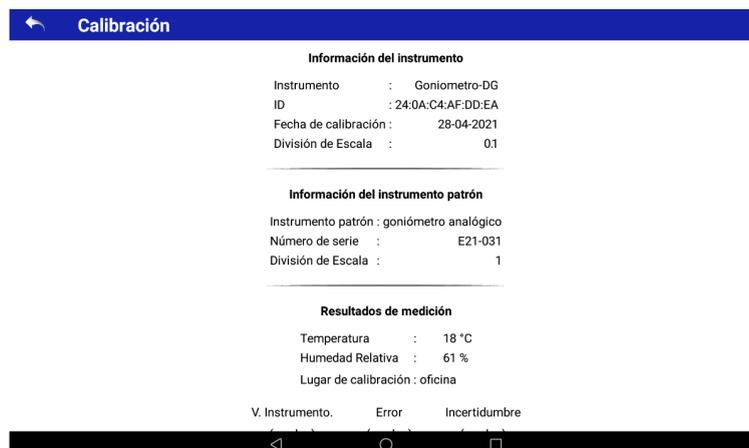


La aplicación permite almacenar las gráficas generadas en el dispositivo para su posterior análisis

8.2.5 Calibración

La interfaz permite al operador ver los resultados de la última calibración realizada del dispositivo; de igual forma, permite registrar una nueva calibración y almacenarla en la base de datos. Cada registro se guarda con un número de identificación que aumenta automáticamente (ver Figura 4-16).

Figura 4-16. Informe de calibración en la aplicación



La interfaz guía al usuario en el procedimiento de calibración: se solicita información al usuario sobre las condiciones ambientales, características del patrón, número de puntos de calibración, mediciones del dispositivo en cada punto y el valor del patrón en cada punto (ver Figura 4-17).

Figura 4-17. Inicio de calibración en la aplicación

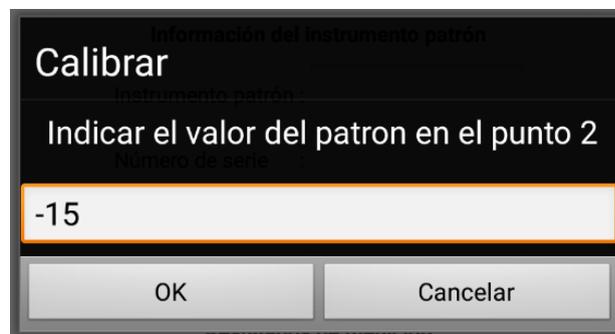


Para el procedimiento de calibración se requieren, al menos, 12 puntos de medida (CEM, 2019); sin embargo, se deja la posibilidad de indicar cuántos puntos serán utilizados para el procedimiento (ver Figura 4-18). La aplicación iniciará el procedimiento, solicitando el valor medido por el equipo y el valor real del patrón (ver Figura 4-19).

Figura 4-18. Ingreso del número de puntos de medida para la calibración



Figura 4-19. Ingreso del valor real del patrón de medida



Al finalizar la calibración se generará un reporte con los datos obtenidos, el cual contiene: valor del instrumento, error en grados respecto al patrón y la incertidumbre de medición (ver Figura 4-20).

Figura 4-20. Reporte de calibración

← Calibración		
V. Instrumento. (grados)	Error (grados)	Incertidumbre (grados)
-31.0	1	1.1
-15.31	0.31	1.1
-0.06	0.06	1.1
15.44	-0.44	1.1
29.19	0.81	1.1
60.19	-0.19	1.1
70.5	-0.5	1.1

8.3 Almacenamiento de datos

La elección de la base debía cumplir algunas características mínimas, entre ellas: permitir el registro y autenticación de usuarios en la nube, de forma segura, proporcionando un servicio de backend. Además, se debía garantizar la sincronización en tiempo real de los datos, la posibilidad de conectarse con diferentes plataformas, ser funcional aún sin conexión con internet, que en el momento en que se establezca la conexión se actualicen los datos automáticamente y la posibilidad de aumentar la capacidad de memoria.

La plataforma escogida para ser usada en la aplicación es “Firebase”, una herramienta online pensada para integrarse en el desarrollo de aplicaciones web y móviles, integra herramientas para el almacenamiento de datos en formato JSON. La base de datos en la modalidad gratuita, permite un almacenamiento de 1 GB con 100 conexiones simultáneas.

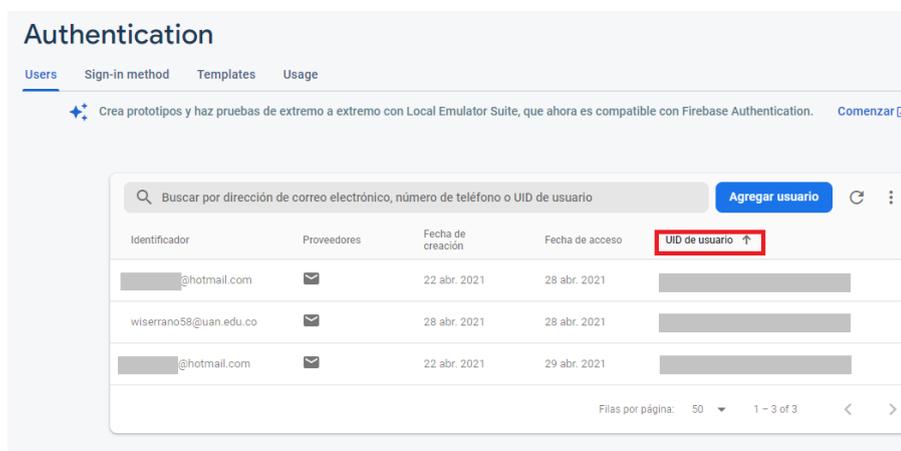
La base de datos tiene una dirección para la conexión de la aplicación y unos permisos para la lectura y escritura de los datos en el momento que un usuario se ha registrado.

El uso de la base de datos es complementario al proyecto y no se realizaron pruebas de rendimiento o seguridad.

8.3.1 Autenticación

La plataforma cuenta con la posibilidad de agregar nuevos usuarios y asignarles un identificador único (UID), manteniendo un registro central (ver Figura 4-21).

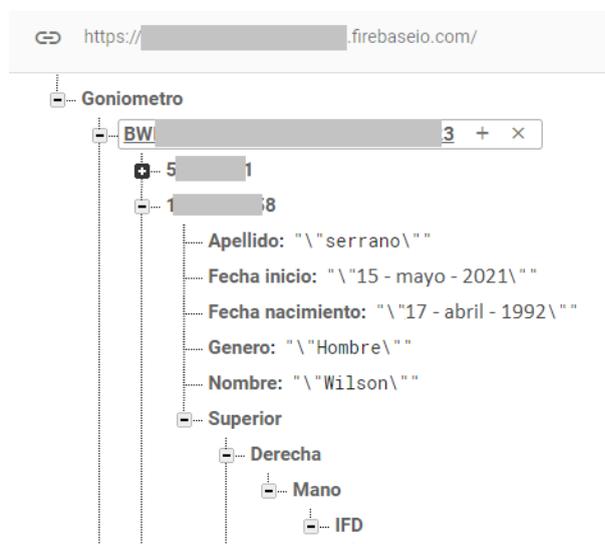
Figura 4-21. Autenticación de usuarios en la nube



8.3.2 Base de datos - usuarios

Los datos del operador y sus usuarios son almacenados en una base de datos en tiempo real y en la nube, con la posibilidad de funcionar sin conexión a internet. Esto es posible debido a que el kit de desarrollo de software (SDK) de Firebase permite que los datos persistan en el disco. En el momento que se establezca la conexión, el dispositivo y la base de datos se actualizarán. En la Figura 4-22 se muestran los datos almacenados en la base de datos, visualizados en formato tipo JSON.

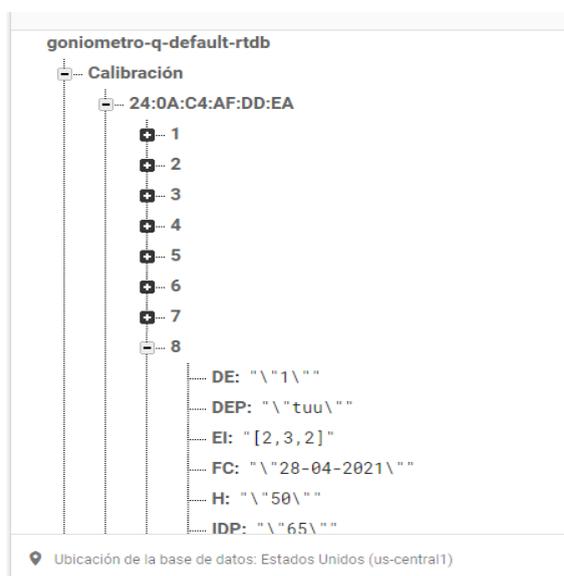
Figura 4-22. Datos almacenados en la nube



8.3.3 Base de datos - reportes de calibración

Los reportes de calibración quedan almacenados en la base de datos. Cada dispositivo cuenta con una identificación, la cual es solicitada para guardar y recuperar cada reporte realizado (ver Figura 4-23).

Figura 4-23. Reportes de calibración almacenados en la nube



Capítulo 5. Confirmación metrológica

En un sistema de confirmación metrológica es supremamente importante asegurar el cumplimiento de todos los requisitos que fueron establecidos para el uso de un equipo de medida que esté involucrado en el sistema de medición. Por tal motivo, diferentes organizaciones y organismos internacionales han establecido distintas normas, estándares o procedimientos para asegurar la calidad de los productos o servicios que se comercializan (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - Icontec, 2003; MetAs y Metrólogos Asociados, 2005).

Según la NTC-ISO 10012 de 2003, la confirmación metrológica es un conjunto de procedimientos que son requeridos para asegurar que un equipo o instrumento de medición cumple con los requisitos correspondientes a su aplicación. La confirmación metrológica está compuesta por la calibración y verificación del equipo; si se realiza algún cambio del software o hardware, es necesaria una recalibración del equipo (MetAs y Metrólogos Asociados, 2005). Así mismo, el operador debe poder tener acceso al informe o estado de confirmación metrológica de medición.

Teniendo en cuenta lo establecido en la confirmación metrológica, el equipo cuenta con una interfaz gráfica destinada a ver los resultados de la última calibración realizada en el equipo (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - Icontec, 2015).

9.1 Características metrológicas

Como se indica en la NTC – ISO 10012 de 2003 y la NTC – ISO 9000 de 2015, los equipos de medición usualmente tienen diferentes características metrológicas, las cuales pueden ser obtenidas con los resultados de una calibración y deben ser apropiadas al uso previsto. Estas son algunas de las características incluidas en el equipo:

- Rango de medición
- Sesgo
- Resolución
- Precisión

En el reporte de calibración el cual fue generado por la interfaz, se puede observar:

- Descripción del equipo
- Identificación del equipo
- Fecha de la última confirmación metrológica
- Resultados de la última confirmación metrológica

La metodología adoptada en el procedimiento de calibración hace parte del CEM (2019), el cual es utilizado por los laboratorios certificados por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC, 2021) para la calibración de transportadores de ángulo. La normativa utilizada involucra las recomendaciones de la ISO 9000 de 2015 y de la ISO 10012 de 2003, adoptadas en la Norma Técnica Colombiana (NTC).

El equipo propuesto fue validado metodológicamente, a fin de medir el ángulo creado por la intersección de dos ejes longitudinales creados por la flexión IFP de los dedos de la mano, obteniendo las características metrológicas de funcionamiento.

9.2 Método de calibración

La calibración del equipo se basa en el método de comparación, utilizando perfiles angulares para determinar el error de medición. Los perfiles angulares han sido previamente medidos con un goniómetro análogo certificado.

9.2.1 Instrumento patrón

El instrumento patrón escogido para tomar las medidas de los perfiles angulares es un goniómetro analógico (ver Figura 5-1), que tiene las siguientes características:

- Número de serie: E21-031
- División de escala de $1^{\circ}00'00''$
- Fabricante: Shinwa
- Intervalo de medición: 0° a 180°
- Fecha de calibración: 2021-03-30
- Incertidumbre: 0.6° en todo el rango

Figura 5-1. Goniómetro analógico certificado E21-031



El resultado de la calibración del equipo patrón se puede ver en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Resultados de medición del goniómetro analógico certificado

Valor instrumento	Corrección instrumento	K	Incertidumbre K=2
0°0'0	0,00	2	0,6
5°0'0	0,10	2	0,6
10°0'0	0,10	2	0,6
15°0'0	-0,10	2	0,6
20°0'0	-0,10	2	0,6
30°0'0	0,10	2	0,6
45°0'0	-0,10	2	0,6
60°0'0	-0,10	2	0,6
90°0'0	0,10	2	0,6
120°0'0	0,10	2	0,6
150°0'0	-0,10	2	0,6
180°0'0	0,00	2	0,6

Nota: Los datos de esta tabla fueron obtenidos del reporte de calibración del instrumento.

9.2.2 Perfiles patrón

Se utilizaron perfiles de aluminio, cortados en diferentes grados y, después, registrados los ángulos de corte con el goniómetro analógico certificado, para así poder compararlo con el equipo propuesto (ver Figura 5-2). Las medidas e incertidumbre se encuentran en la Tabla 5-2.

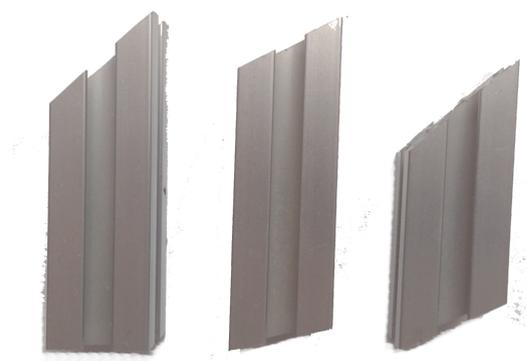
Figura 5-2. Perfiles de aluminio cortados en ángulos

Tabla 5-2. Resultados de medición de los perfiles de aluminio, tomados con el goniómetro analógico certificado.

Corte perfil (°)	Valor patrón (°)	Incertidumbre (°)	Incertidumbre patrón K=2 (°)	Incertidumbre total K=2 (°)
-30	-30	0	0,6	0,6
-15	-15	0	0,6	0,6
0	0	0	0,6	0,6
15	15	0	0,6	0,6
30	30	0	0,6	0,6
45	45	0	0,6	0,6
60	60	0	0,6	0,6
75	75	0	0,6	0,6
90	90	0	0,6	0,6
105	105	0	0,6	0,6
120	120	0	0,6	0,6
135	135	0	0,6	0,6

9.2.3 Equipos y materiales auxiliares

El equipo a ser calibrado debe tener un número de serie o identificación. En el caso del equipo propuesto, tiene una identificación alfanumérica única ligada a la BD_ADDR; esta dirección tiene una longitud de 48 bits. En el momento en que la aplicación reconoce la identificación, puede almacenar o solicitar información a la base de datos.

Antes de la calibración fue necesario tener alcohol, paños, guantes, con el propósito de desengrasar y limpiar los patrones a utilizar. Se debe tener un termómetro para monitorear la temperatura ambiente (CEM, 2019).

9.2.4 Condiciones de calibración

Aunque la influencia de la temperatura no afecta de manera importante la medición de ángulos, en el CEM (2019) recomiendan mantener una temperatura ambiente entre

15°C y 25°C. El lugar donde se realizó la última calibración se mantuvo en 17°C durante el procedimiento.

Se ubicaron los patrones en la zona de calibración junto con sus reportes de calibración; se procedió a realizar una inspección visual de los patrones y del equipo de medición, con el fin de comprobar las condiciones físicas de los elementos.

9.2.5 Procedimiento de calibración

Corrección de calibración

Hace referencia al error de medición en una calibración. En este procedimiento se determinó la diferencia entre el valor medido por el equipo y el valor verdadero de los perfiles patrón; de esta forma, fue posible determinar la exactitud de medida (CEM, 2012).

En la aplicación hay una sección destinada a la calibración, la cual es posible iniciar al ingresar y conectar el equipo. Como se recomienda en el CEM (2019), se realizó la medición de 12 puntos; y teniendo en cuenta el rango de medición del dispositivo, se eligieron los siguientes valores: -30°, -15°, 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°. Los valores medidos fueron registrados junto con los valores verdaderos.

Repetibilidad de medida

En este procedimiento se determinó la precisión de medida bajo condiciones iguales de medición, tales como: procedimiento, operador, sistema de medida, lugar de medición y mediciones repetidas del mismo perfil en un periodo corto de tiempo (CEM, 2012).

Además, se seleccionó el perfil con 75° para determinar la repetibilidad del equipo. Se procedió a tomar 10 mediciones en un periodo corto de tiempo, bajo las mismas condiciones, y los valores fueron registrados en el equipo.

9.2.6 Resultados de calibración

Corrección de la calibración

El error de medición del equipo está determinado por la diferencia entre el valor del patrón en el punto i y la medida del equipo en el punto i .

$$C_{ci} = \alpha_{pi} - \alpha_i \quad (2)$$

Repetibilidad de las mediciones

Hace parte de la incertidumbre definida por la desviación estándar de las 10 mediciones realizadas al perfil de 75° (ver Tabla 5-3). En la ecuación 2 se describe la desviación estándar.

Tabla 5-3. Resultados del procedimiento de repetibilidad

Perfil patrón angular (°)	Indicación del equipo (°)	Error de medición (°)
75	74,6	0,0784
75	74,1	0,6084
75	74,8	0,0064
75	75,2	0,1024
75	74,5	0,1444
75	74,4	0,2304
75	74,6	0,0784
75	75,4	0,2704
75	75,8	0,8464
75	74,2	0,4624

$$u(\bar{I}) = \frac{s(I)}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Donde:

La desviación estándar experimental del procedimiento está definida por la ecuación 3.

$$s(\bar{I}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2} \quad (3)$$

Resolución del equipo

La resolución del equipo contribuye a la incertidumbre de la medición; en este caso, es posible incluir la corrección de media nula, la cual, según CEM (2019), se obtiene de la hipótesis de distribución uniforme $\pm E/2$.

$$u(C_E) = \frac{E/2}{\sqrt{3}} = \frac{E}{\sqrt{12}} \quad (4)$$

Incertidumbre del perfil patrón

Para determinar la incertidumbre de los perfiles patrón se realizaron 10 mediciones en un periodo corto de tiempo; se calculó el promedio de las mediciones para, posteriormente, obtener la desviación estándar. Al resultado se le incrementó la incertidumbre de medición del goniómetro analógico patrón.

Estimación de la incertidumbre de medición

En este procedimiento se determinó la dispersión de los valores medidos, que son atribuidos a la magnitud. Se establece, a partir de la distribución estadística de los valores obtenidos de una serie de mediciones del perfil a medir, más los componentes de la incertidumbre calculadas con anterioridad, obteniendo la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Incertidumbre de medición

Magnitud de entrada	Incertidumbre estándar (')	Contribución a la incertidumbre	Contribución (%)
I	11,7	11,7	38 %
Api	36,0	18,0	59 %
CE	0,5	1	3 %
U	Incertidumbre combinada	30,7	100 %
U(K=2)	Incertidumbre expandida (') (K=2)	61	

U(K=2)	Incertidumbre expandida (°) (K=2)	1,02	
--------	---	-------------	--

Se pudo evidenciar que la incertidumbre expandida de medida es de 1.02°, donde el 59 % corresponde a la incertidumbre de los patrones. Esto se debe a que la resolución del patrón es de 1°, mientras que la del equipo es de 0.06°, diferencia que aumenta la incertidumbre de medición del equipo. Debido al presupuesto establecido para el proyecto, no fue posible utilizar un goniómetro digital con mayor resolución certificado para ser utilizado como patrón.

Error de medición

Al obtener la incertidumbre de medición, fue posible determinar el error de medición con su respectiva incertidumbre. Los resultados pueden observarse en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Error de medición

Perfil patrón angular (°)	Indicación del equipo (°)	Error de medición (°)
-30	-30,54	0,54
-15	-15,42	0,42
0	0	0
15	15,78	-0,78
30	30,84	-0,84
45	45,32	-0,32
60	59,42	0,58
75	74,38	0,62
90	89,12	0,88
105	103,96	1,04
120	119,12	0,88
135	135,84	-0,84
Incertidumbre de medición (°)		1,02

En la curva de corrección se muestra el error máximo del equipo. Teniendo en cuenta que la tolerancia para la aplicación es de $\pm 1.8^\circ$, Se puede evidenciar que el equipo cumple con lo estipulado para la aplicación (ver Figura 5-3) con la curva de corrección del equipo es posible realizar el procedimiento de regresión propuesto por Francis Galton, en el que se determina el grado de polinomio para obtener la ecuación de ajuste y de esta forma. reducir el error del equipo si este lo amerita (MetAs y Metrólogos Asociados, 2005). La linealidad del equipo se muestra en la Figura 5-4. Para disminuir la incertidumbre expandida de medición, es posible realizar una calibración con bloques patrón, con una incertidumbre de medición menor; sin embargo, por causa del presupuesto, se propone como trabajo futuro.

Figura 5-3. Curva de corrección del equipo

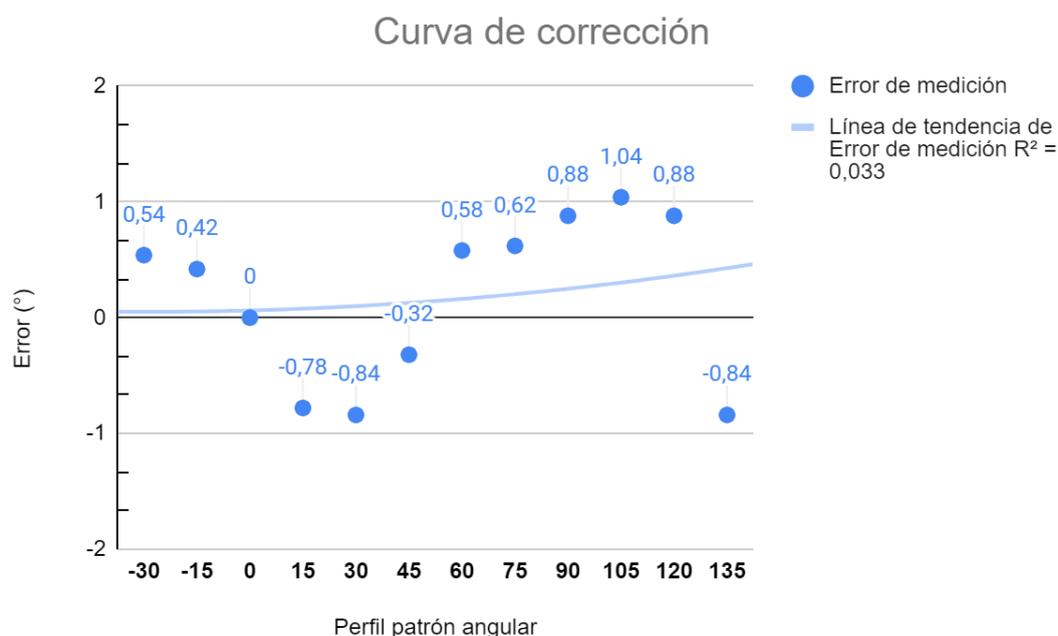
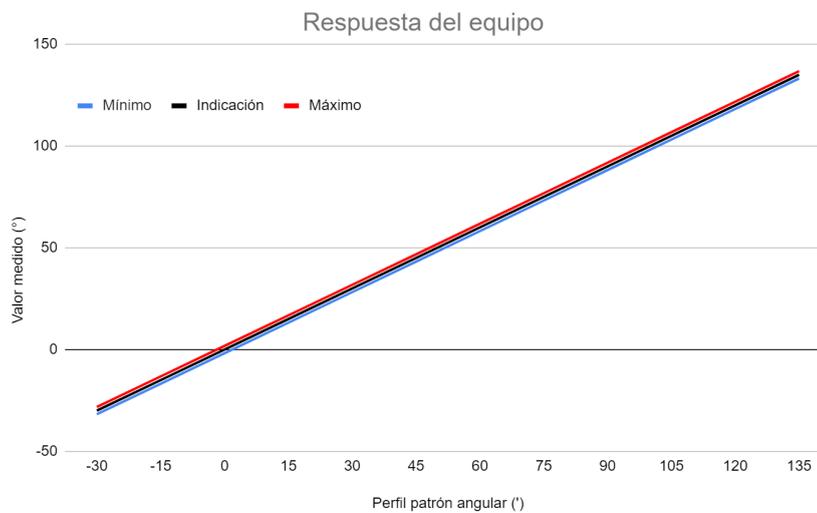


Figura 5-4. Respuesta lineal del equipo



En esta validación el equipo no tiene una respuesta

Capítulo 6. Toma y comparación de datos

10.1 Toma de datos

La técnica para la toma de datos es propuesta por Taboadela (2007), y fue ajustada a los requerimientos del equipo. Estos pasos constan de:

- Explicación del método a utilizar al usuario
- Posición del usuario de forma sentada, espalda recta con la mano a ser valorada al frente con la palma al piso
- Se estabiliza el dedo a medir con ayuda de las manos
- Palpación e identificación de las falanges a ser evaluadas
- Con ayuda de cinta doble faz, alinear los sensores con los reparos óseos
- Conexión del dispositivo móvil con el dispositivo
- Reset punto cero
- Medición y registro de ROM en el eje Z
- Comparación con valores normales

Se ingresaron los datos de 2 usuarios: un hombre de 59 años y una mujer de 23 años. Se ubican los sensores en cada falange como se observa en la Figura 6-1. A cada usuario se le realizó una medición en la articulación IFP por cinco días. Los datos obtenidos en las pruebas se muestran en la Figura 6-2 y la Figura 6-3.

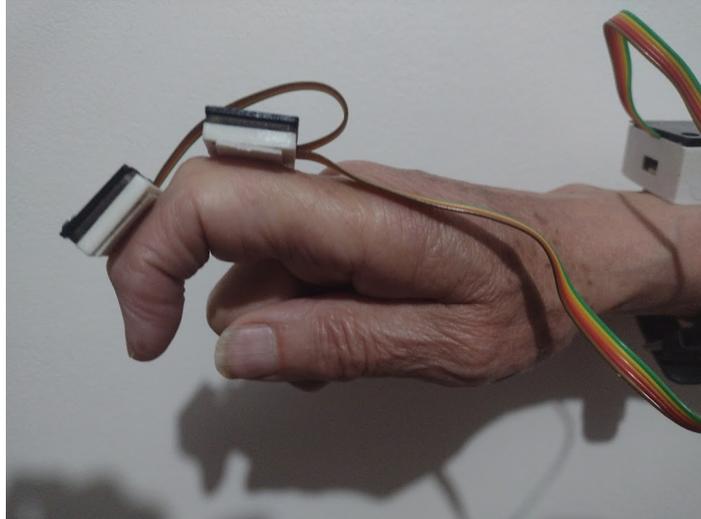
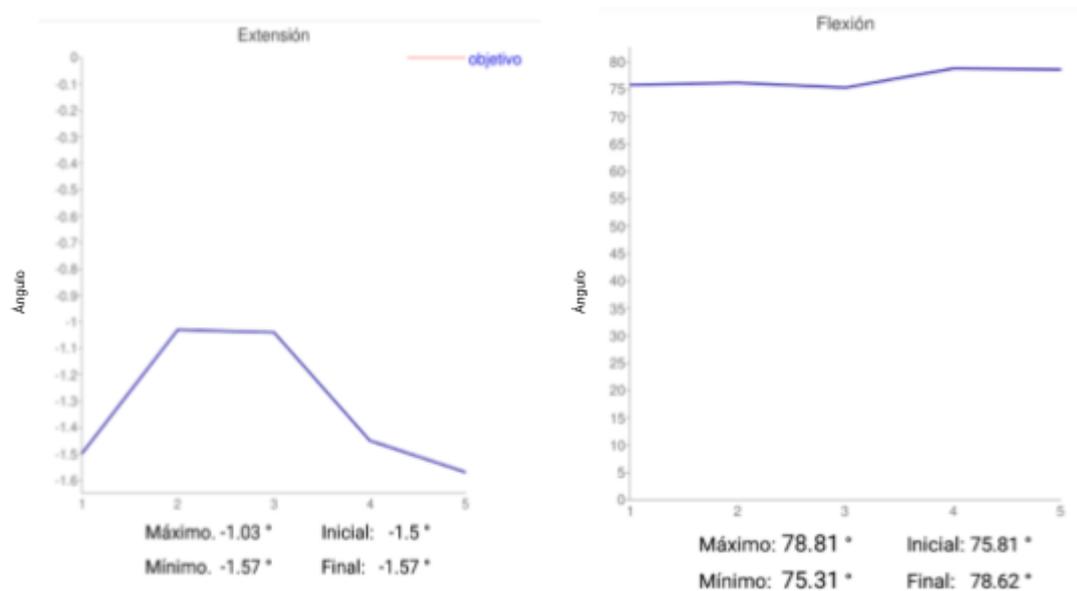
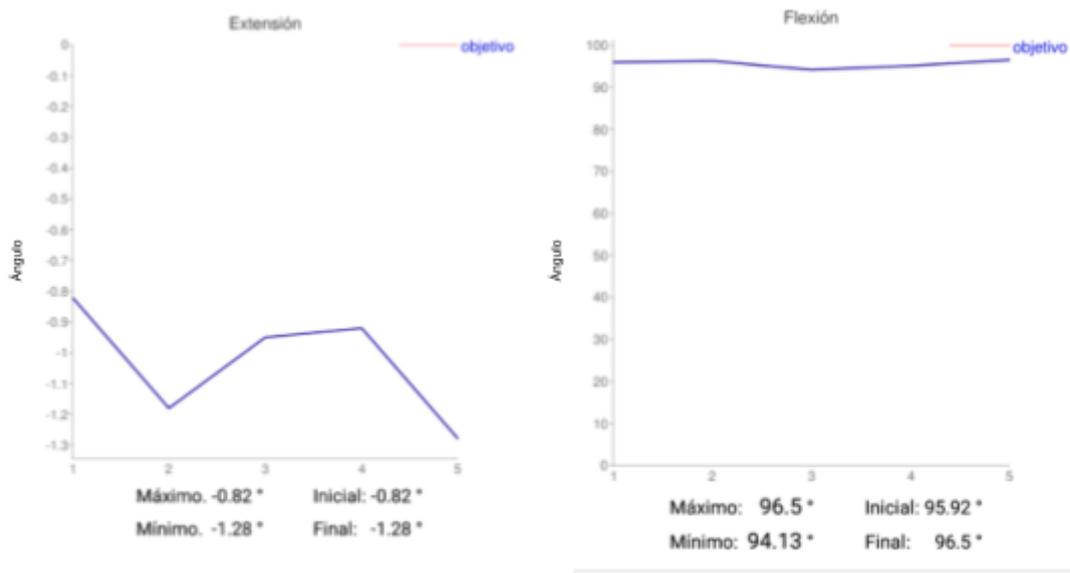
Figura 6-1. Ubicación de sensores en la falange proximal y media**Figura 6-2.** Mediciones realizadas al usuario 1

Figura 6-3. Mediciones realizadas al usuario 2

Las condiciones de medición que cambiaron en la toma de datos fueron lugar, temperatura y humedad. Las variaciones presentadas en cada una de las mediciones están dentro del rango de incertidumbre entregado por el equipo, por tal motivo, es posible afirmar que el equipo es reproducible; no obstante, es recomendable realizar más mediciones bajo otras condiciones de medición.

Las mediciones fueron realizadas con el equipo propuesto y no con el goniómetro patrón debido a que este equipo no está diseñado para la medición de pequeñas articulaciones; adicionalmente, este es utilizado en la validación metrológica según la normativa.

10.2 Prueba dinámica

Se realizó una prueba dinámica adicional, con el fin de evaluar la respuesta del equipo. Esta prueba consiste en registrar el cambio del ángulo relativo de dos ejes, uno fijo y otro con un movimiento giratorio automático. La aplicación se configuró con un tiempo de muestreo de 5 ms con una duración de 15000 ms sin embargo, debido a la velocidad de procesamiento del equipo la frecuencia de muestreo puede variar, esta variación no fue validada con algún equipo. En la Figura 6-4 se observa el montaje mecánico del sistema y en la Figura 6-5 el análisis del video con ayuda de la herramienta de seguimiento integrada en el análisis de ángulo .

La cámara utilizada fue la de una tableta Huawei BAH-W09 de 8 MP y 23 fotogramas por segundo.

Figura 6-4. Ubicación de los sensores para la prueba dinámica

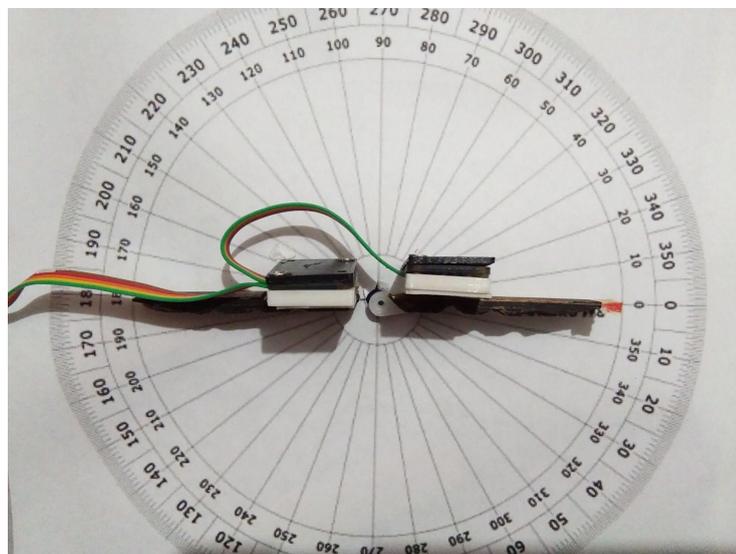
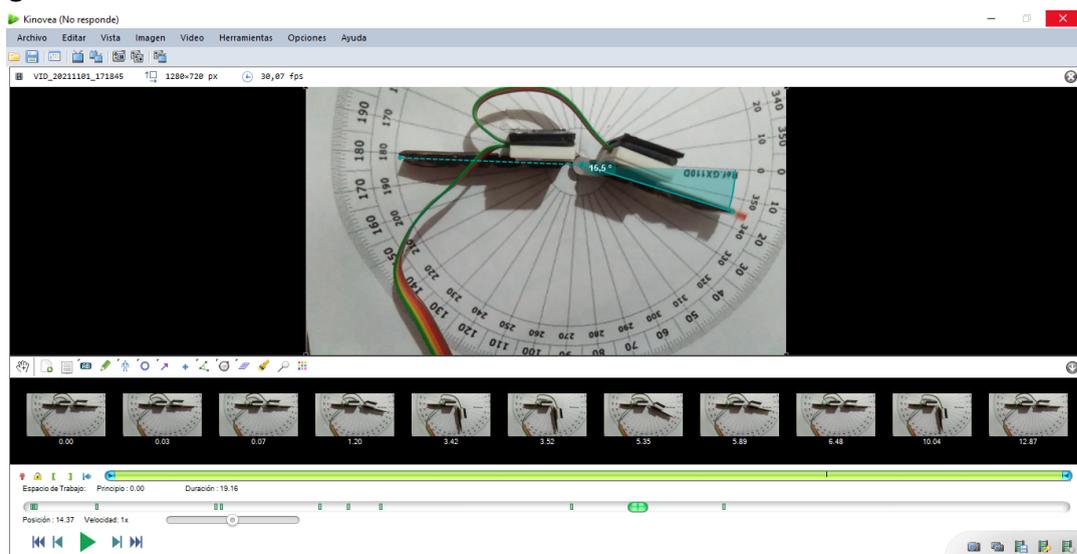
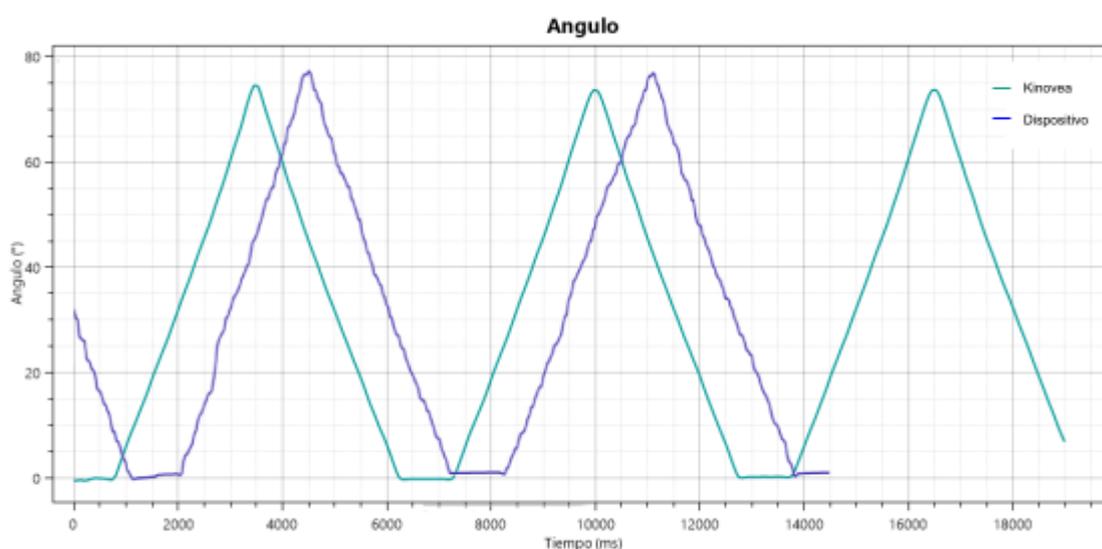


Figura 6-5. Análisis dinámico del sistema con el software Kinovea



Posterior al análisis se obtienen los datos procesados por el software indicando un ángulo máximo de 74° y un ángulo mínimo de 0° , en la aplicación el valor máximo registrado es de 77.62° y un mínimo de -0.94° . Esto indica un error de -3.62° en el valor máximo y 0.94° en el valor mínimo. En la figura 6-6 se observa la respuesta dinámica de ambos equipos con un desfase ocasionado en el momento del inicio de la prueba.

Figura 6-6. Respuesta dinámica generada de la prueba en el eje Z



Con la generación de la gráfica se descargaron los datos de la medición del dispositivo logrando generar la tabulación de los datos. Tabla 6-1. Se exportaron los datos del software Kinovea y se realizó el análisis de la respuesta dinámica del equipo. En la figura 6-7 se observa la respuesta dinámica con un error que incrementa a medida que el dispositivo llega al máximo del rango de medida.

El error dinámico de un equipo está condicionado por la inercia del dispositivo de medición, surge en casos en que la magnitud de medida varía de una manera rápida; en el caso de los sensores MEM, los datos entregados pueden verse afectados por el movimiento de los sensores generando un error en la medición dinámica. Como se puede observar en la figura 6-8 el error de medición es lineal, algo que difiere con la calibración del sensor de forma estática y presenta una oscilación coherente con el cambio de la posición el cual se especula que puede ser ocasionado por la vibración

del servomotor utilizado para la prueba. En el caso de la prueba dinámica, la ecuación de regresión puede ser lineal, sin embargo, el uso principal de la aplicación es para pruebas estáticas en la valoración de la FIP de los dedos de la mano.

Figura 6-7. Respuesta dinámica del eje Z con error

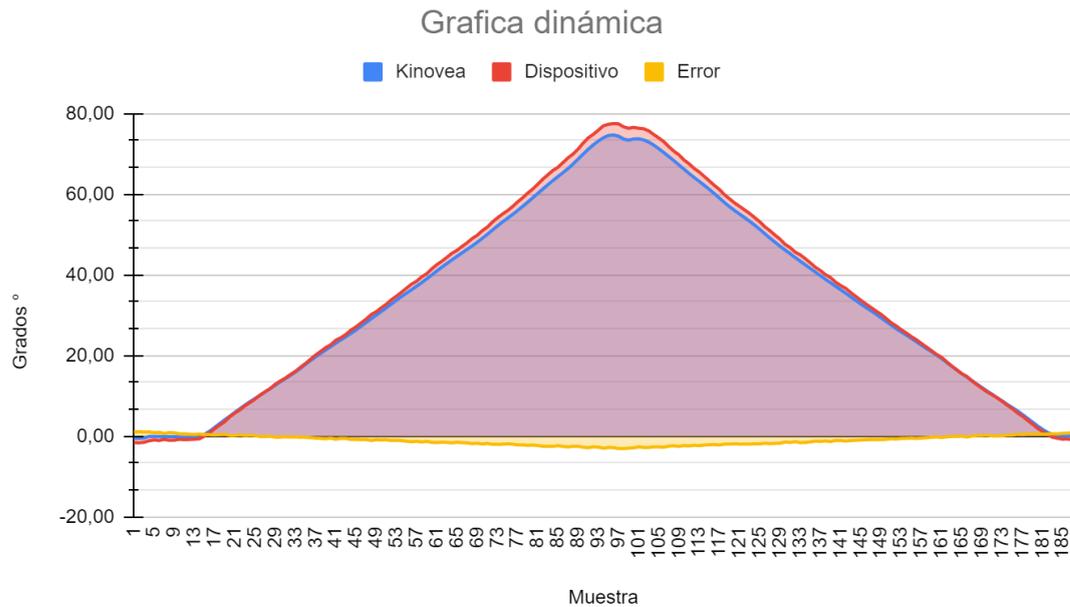
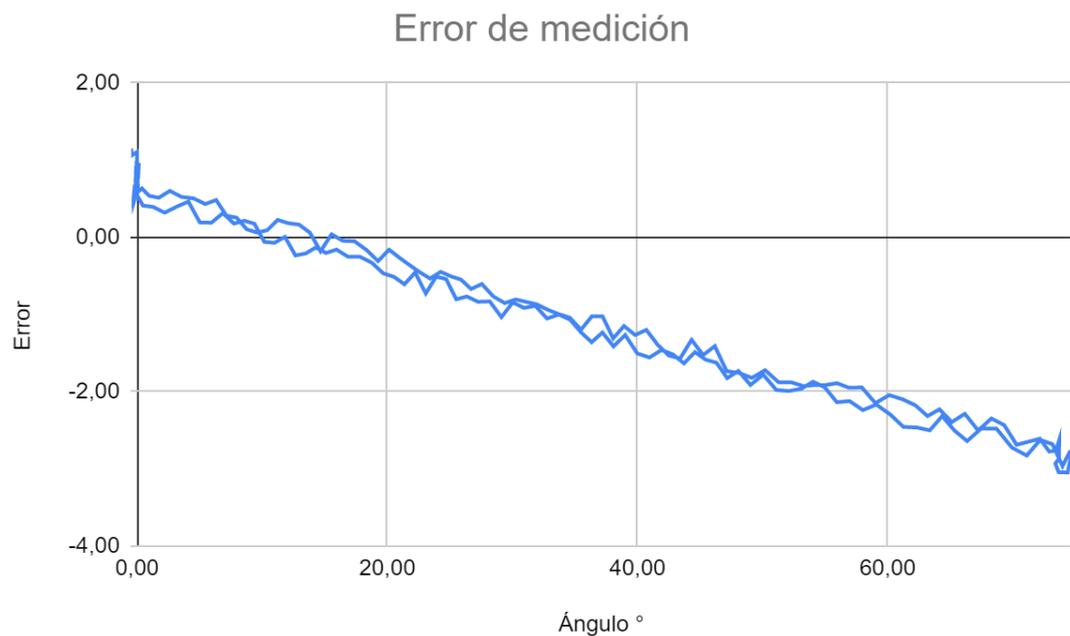


Figura 6-8. Error de medición del eje Z en la prueba dinámica



El análisis se realizó en el eje Z el cual fue validado metrológicamente. Los resultados generados en el eje Y y X se muestran en la Figura 6-7 y Figura 6-8 respectivamente.

Figura 6-9. Gráfica generada de la prueba dinámica en el eje Y

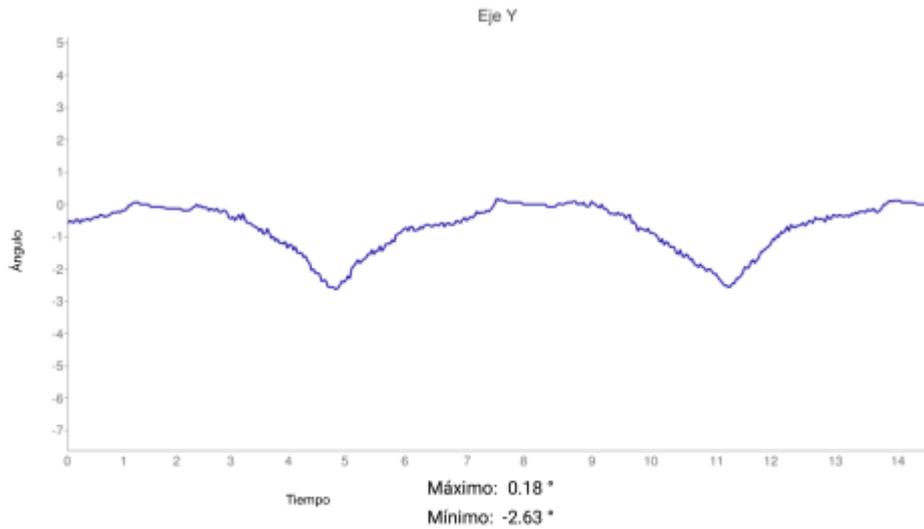
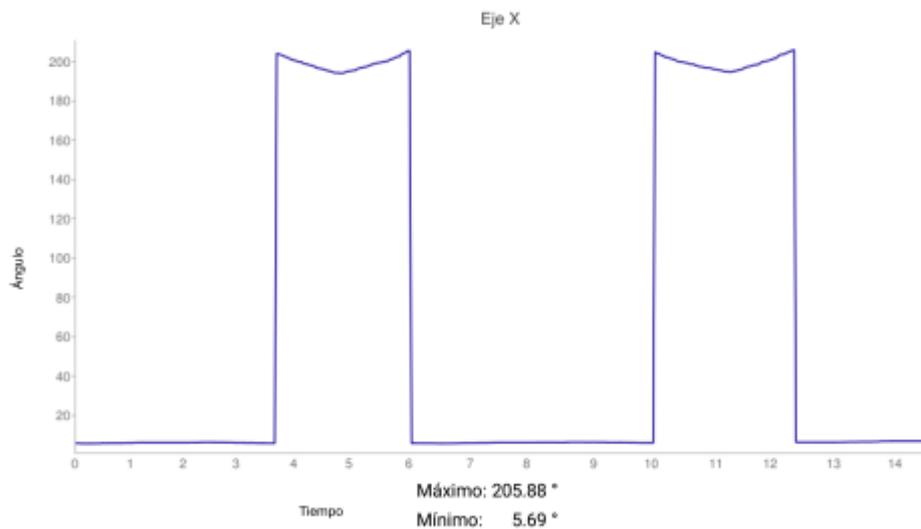


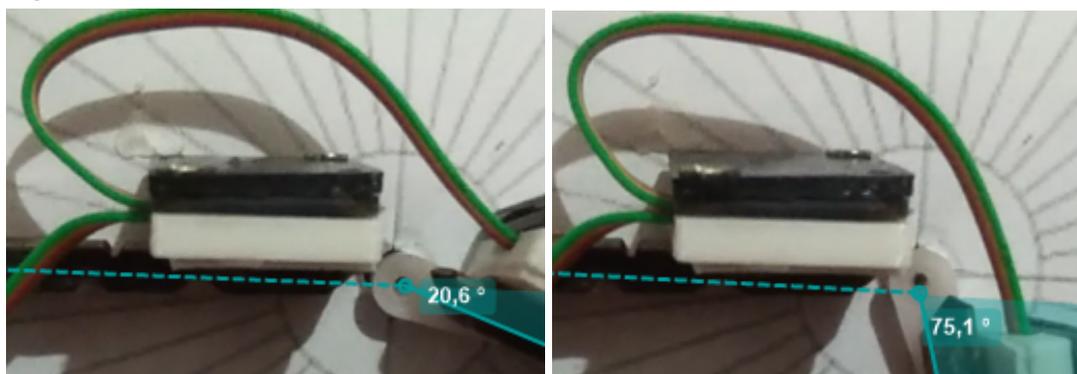
Figura 6-10. Gráfica generada de la prueba dinámica en el eje X



Se puede observar que hay una variación en los ejes Y y X; observando el video, se presume que es ocasionado por el desplazamiento del sensor debido a la tensión del

cable. (Figura 6-9) sin embargo, no es posible confirmarlo debido a la falta de una cámara en el eje Y y X y debido a que estos ejes no fueron contemplados en la validación metrológica no se puede garantizar sus datos..

Figura 6-11. Posible movimiento del sensor por tensión en el cable.



Se puede observar un resultado similar en los datos entregados por los equipos en el eje Z aportando confiabilidad en los resultados entregados por el dispositivo propuesto.

10.3 Comparación de datos

Los datos de los usuarios fueron comparados con la tabla de deficiencias globales del Decreto 1507 de 2014 para los dedos de la mano (exceptuando el pulgar). En la Tabla 6-1 se visualiza la comparación de los datos del usuario 1; y en la Tabla 6-2, la comparación de los datos del usuario 2.

Tabla 6-1. Comparación de los datos del usuario 1 frente a los valores normales según el Decreto 1507 de 2014

Usuario:	Cristobal Serrano	Edad:	59
Mano:	Derecha	Dedo:	índice
Articulación:	IFP		
	° ROM	% DG	
Promedio flexión:	77.1	0 %	
Promedio extensión:	-1.5	0 %	
Condición:	normal		

Tabla 6-2. Comparación de los datos del usuario 2 frente a los valores normales según el Decreto 1507 de 2014

Usuario:	Karen Cubides	Edad:	23
Mano:	derecha	Dedo:	índice
Articulación:	IFP		
	° ROM	% DG	
Promedio flexión:	95.3	0 %	
Promedio extensión:	-1,0	0 %	
Condición:	normal		

Es posible integrar a la aplicación la posibilidad de comparar el último valor de las mediciones con los valores de deficiencias globales del Decreto 1507 de 2014, con el propósito de ayudar al diagnóstico del usuario.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

La investigación y el desarrollo de dispositivos IOT en el campo de la medicina pueden ser un desafío por todas las variables y opciones que se deben tener en cuenta, pero vale la pena realizar estos estudios y poner a prueba nuevos conocimientos a disposición de la sociedad.

Es evidente que la tecnología es parte importante de la vida cotidiana, aunque muchas veces no se percibe hasta que hace falta o hasta que una actividad rutinaria se realiza de forma más eficiente o cómoda. Al hablar sobre la filosofía de la industria 4.0, no solo se debe relacionar con la industria, sino que puede ser aplicada a sectores no industriales como la medicina. Este proyecto proporciona una oportunidad de incluir un equipo de medición en un procedimiento tradicional, como es la medición de ángulos con goniómetros.

11.1 Conclusiones

El enfoque de este trabajo fue el desarrollo de un equipo IOT para establecer la viabilidad de ser usado, a fin de medir la flexión articular de los dedos de la mano. Para lograrlo, se integraron tecnologías de medición inercial, microprocesadores, impresión 3D, servicios de registro y autenticación segura de usuarios, almacenamiento de información en la nube, comunicación inalámbrica con dispositivos móviles, servicios offline, entre otras. Es posible indicar que estas características, en conjunto, hacen que el equipo tenga un valor agregado más alto de lo contemplado al iniciar el proyecto.

El uso de los sensores inerciales permite determinar el ángulo relativo formado por la intersección de los ejes de cada falange. El equipo desarrollado no solo permite medir

la flexión de la articulación IFP, también es posible medir la flexión de la articulación IFD y MCF de los dedos de la mano.

Fue posible desarrollar una aplicación para sistemas operativos Android, en la que el operador podrá:

- Registrarse
- Autenticarse
- Ingresar a un procedimiento para recuperación de cuenta por contraseña olvidada
- Ingresar nuevos usuarios
- Ingresar nuevas articulaciones para su evaluación
- Ver el historial de evaluaciones y progreso del usuario
- Conectar el equipo desarrollado por Bluetooth
- Evaluar la posición articular de forma estática
- Evaluar, de forma dinámica, el arco de movimiento de una articulación
- Almacenar las imágenes de las valoraciones dinámicas en el dispositivo
- Almacenar los datos recolectados del usuario en una base de datos en la nube
- Ingresar a la información de calibración del dispositivo
- Ingresar al procedimiento de calibración del dispositivo
- Almacenar los datos recolectados de la calibración en una base de datos en la nube

Fue posible integrar la interfaz gráfica de una aplicación móvil en la medición de la flexión articular del dispositivo. La base de datos fue implementada en la plataforma de Firebase y es posible trabajar la aplicación offline; en el momento que la aplicación se conecte a internet, la base de datos se actualizará.

Con el goniómetro certificado fue posible determinar los ángulos de los perfiles utilizados en el procedimiento de calibración y determinar la incertidumbre de cada uno. La confirmación metrológica fue fundamental para asegurar que el equipo cumple con los requisitos correspondientes para medir la flexión articular de los dedos de la mano. En la confirmación metrológica se determinaron las características metrológicas del dispositivo, utilizando un procedimiento de calibración certificado.

Es posible utilizar el procedimiento de calibración DI-003 para la calibración de sensores inerciales en aplicaciones de medición de ángulo. De esta forma, se establecieron las siguientes características metrológicas:

- Incertidumbre de repetibilidad expandida con un patrón de 75° de 0.2°
- Incertidumbre de resolución expandida $\pm 0.017^\circ$
- Incertidumbre combinada de 0.5°
- Incertidumbre expandida con $K=2$ de $\pm 1.02^\circ$

El equipo presenta una incertidumbre expandida de medida de 1.02° en un rango de entre -30° a 135° cumpliendo con la tolerancia de la aplicación de 1.8°. El equipo propuesto presenta menor incertidumbre de medición que los goniómetros para dedos con resoluciones de 5° que se encuentran en el mercado.

Con ayuda del equipo propuesto, fue posible medir la flexión articular IFP, IFD y MDF de los dedos de la mano con falanges mayores a 20 mm. El uso del equipo con falanges de menor medida puede generar errores de medida, debido a la interacción física entre los sensores mientras se realiza el movimiento de la articulación.

Durante la investigación de los valores medios normales, considerados por la AAOS para la amplitud de movimiento de las articulaciones de los dedos de las manos, se encontró el Decreto 1507 de 2014 de Colombia para determinar de la pérdida de la capacidad laboral y ocupacional, en el cual se describen los grados de movilidad de las articulaciones, los rangos que se consideran normales y su deficiencia global, estos valores se integraron en la comparación de datos de cada usuario.

El equipo dió buenos resultados en las pruebas con condiciones controladas, es necesario realizar verificaciones y calibraciones con otras condiciones de orientación en los tres ejes. El tamaño de los módulos de sensores aún son muy grandes para falanges de menos de 22 mm por lo que hay una oportunidad para el diseño de módulos más compactos con dos sensores.

Se requiere una prueba dinámica valorando los tres ejes previo procedimiento de validación metrológica para poder confirmar los valores entregados en el eje X y Y.

11.2 Recomendaciones

Aunque las pruebas en otras articulaciones, como la de la muñeca, fue exitosa, es necesario realizar algunas mejoras físicas, tales como:

- Alargar el cable de los sensores para poder medir grandes articulaciones
- Cambiar el tipo de cable para que sea más flexible y evite interferir en el movimiento de la articulación

Es posible reducir el tamaño de los módulos integrando la electrónica de los dos sensores en el dispositivo maestro, de esta forma, sería posible medir falanges aún más pequeñas sin interferencias por la carcasa.

Es posible desarrollar una página web para la visualización y actualización de los datos de los usuarios; de esta forma, el operador podría tener acceso a la información desde su computador.

Además, con el fin de disminuir la incertidumbre de medición, se propone realizar la calibración con perfiles angulares de patrones certificados con incertidumbres menores a 0.06° . Es recomendable realizar el procedimiento de calibración con diferentes operadores para evitar cualquier sesgo en la información.

Se propone integrar la tabla de deficiencias globales indicada en el Decreto 1507 de 2014 a la base de datos; de esta manera, el operador podrá obtener la deficiencia global generada por las articulaciones valoradas.

Para medir la FIP de los dedos de la mano, es necesario asegurar una referencia de cero grados antes de flexionar el dedo a evaluar, esto se puede realizar ubicando el dedo con los sensores en una mesa y tarando la medida, posteriormente, podrá obtener los valores de extensión y flexión del dedo. Antes de guardar un valor de extensión o flexión es necesario verificar que los valores se han estabilizado. Los valores pueden ser afectados debido a la rigidez del cable o al momento de tensar el cable si los sensores están ubicados muy lejos entre sí.

El equipo no fue validado metodológicamente bajo otras condiciones de orientación evitando adicionar información sobre cómo influye la orientación de los ejes X y Y en los valores finales.

Bibliografía

- Aytéc. (s.f.). *Goniómetro de Dedo*. Recuperado el 2021, de <https://aytec.org/D/product/goniometro-de-dedo-1/>
- Bakhshi, S., Mahoor, M. H., y Davidson, B. S. (2011). *Development of a body joint angle measurement system using IMU sensors*. 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS. <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091743>
- Biometrics. (2014). *Upper & Lower Extremity. Evaluation and exercise orthopedic & neurological applications*. Biometrics.
- BIOPAC. (s.f.). *Goniometers for life science research*. Obtenido de <https://www.biopac.com/product-category/research/transducers/goniometers/>
- Centro de Terapia Física de Tijuana. (2020). *Ejercicios para rehabilitar los dedos de la mano [video]*. <https://www.youtube.com/watch?v=j85VPxaA11w>
- Centro Español de Metrología - CEM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- Centro Español de Metrología - CEM. (2019). *Procedimiento DI-003 para la calibración de transportadores de ángulos*. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.
- Chen, Y., Zhang, G., Guo, J., Mehmood, R., y Liu, Y. (2016). *A Separable Digital Protractor Based on IMU for Angle Measurement*. International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things (IIKI). <https://doi.org/10.1109/IIKI.2016.4>

- Cova, W. J. (2019). CUATERNIONES VISUALIZACIÓN DE ROTACIONES DE CUERPOS RÍGIDOS (2.^a ed.). Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- De Visser, H. (2020, 2 abril). The anatomy of an IoT solution: Three layers to success. Enterprise CIO News. <https://enterprise-cio.com/news/2017/may/15/anatomy-iot-solution-three-layers-success/>
- Espressif, Wi-Fi & Bluetooth MCUs and AIoT Solutions | Espressif Systems. (2021). Espressif. <https://www.espressif.com/en>
- ESP Product Selector. (2021). ESP Product Selector. <https://products.espressif.com/#/product-selector?language=en&names=>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - Icontec. (2003). *NTC - ISO 10012. Sistemas de gestión de las mediciones - Requisitos para los procesos y los equipos de medición*. Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - Icontec. (2015). *NTC - ISO 9000 Sistemas de gestión de la calidad - fundamentos y vocabulario*. Icontec.
- Jiménez, L. A. (2007). *Metrología industrial, sistemas de medición y aseguramiento metrológico: conceptos fundamentales*. [Tesis de grado]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1227>
- Jongprasithporn, M., Yodpijit, N., Chanaroon, T., Paiboonrattanakorn, T., y Sittiwanchai, T. (2018). *Design and Development of a Prototype for Measuring Range of Motion*. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). <http://dx.doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607611>
- MetAs & Metrólogos Asociados. (2005). *Confirmación Metrológica Proceso en Laboratorios e Industria*. <http://www.metas.com.mx/guiamet/La-Guia-MetAs-05-03-Confirmacion-Metrolologica.pdf>

- Ministerio del Trabajo. (2013). *Informe ejecutivo II encuesta nacional de condiciones de seguridad y salud en el trabajo en el sistema general de riesgos*. Organización Iberoamericana de Seguridad Social.
- Nogareda, S., y Álvarez, A. (s.f.). *NTP 622: Carga postural: técnica goniométrica*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.
- Norkin, C. C., y White, D. J. (2019). *Manual de goniometría: evaluación de la movilidad articular*. Editorial Paidotribo.
- Ojeda, J. A. (2010). *Valoración de la incapacidad laboral*. Díaz de Santos.
- Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. (2021). *Directorio de Acreditación*.
<https://onac.org.co/directorio-de-acreditados/buscador-por-organismo>
- Presidencia de la República de Colombia. (2014). Decreto 1507 del 12 de agosto de 2014. Diario oficial No. 49 241. [Por el cual se expide el Manual Único para la Calificación de la Pérdida de la Capacidad Laboral y Ocupacional]. Bogotá, D. C., Colombia.
- Ramos, P., y Caraguay, W. (2014). Análisis de trayectorias y su simulación en Matlab utilizando diversas técnicas de interpolación lineal. *ESPOL-FCNM Journal*, 12(2), 28-37.
<http://www.revistas.espol.edu.ec/index.php/matematica/article/view/502>
- Taboadela, C. H. (2007). *Goniometría una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*. Asociart.
- Wong, C., Zhang, Z., Lo, B., y Yang, G. (2015). Wearable Sensing for Solid Biomechanics: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 15(5), 2747-2760.
<http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2015.2393883>

A. Anexo: Certificado de calibración goniómetro analógico

Equipos y Controles Industriales S.A.
Laboratorio de Metrología



Certificado de Calibración LML-0418-21

Pag. 1 de 2

Cliente	: WILSON JAVIER SERRANO PUERTO		
Dirección	: Calle 11 D No. 80 D - 07		
Ciudad	: Bogotá, D.C.		
Nombre de Contacto	: Jeison Osorio		
Contacto	: Coordinadortecnico@viaindustrial.com		
Número de Muestra	: MU-21/00482	Instrumento	: Goniómetro Analógico
Fabricante	: Shinwa	Número de Serie	: E21-031
Modelo	: No.19	Código Cliente	: No especificado
Intervalo de Medición	: (0 ° a 180°) (0 a 3,142) radianes	División de Escala	: 1°00'00" 0,017 radianes
Fecha de Recepción	: 2021-03-29		
Fecha de Calibración	: 2021-03-30		
Fecha de Emisión	: 2021-03-31		

TRAZABILIDAD METROLÓGICA

ECI SA, garantiza la cadena de trazabilidad metrológica ininterrumpida de los patrones usados a patrones internacionales al Sistema Internacional de Unidades con intervalos de calibración definidos; además cuenta con procedimientos para la estimación de la incertidumbre y desarrollo de los procesos de calibración, garantizando competencia técnica reconocida. En Equipos y Controles Industriales S.A. contamos con acreditación ONAC, vigente a la fecha, con código de acreditación 10-LAC-024, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017, vigente desde el 2019-04-18 hasta el 2024-04-17.

PATRONES USADOS

Bloques Angulares, 981-101 con Certificado de Calibración No. 914892 de Mitutoyo del 2017-10-25 trazados metrológicamente a NIST.
Bloques Angulares, 981-103 con Certificado de Calibración No. 914893 de Mitutoyo del 2017-10-25 trazados metrológicamente a NIST.
Proyector de Perfiles, 302-702A con Certificado de Calibración No. I-LML-0040-20 de ECI SA del 2020-03-02 trazado metrológicamente a INMETRO.
Superficie de referencia, 517-163 con Certificado de Calibración No. I-LML-0200-20 de ECI SA del 2020-11-06 trazada metrológicamente a INMETRO.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración del goniómetro se realizó por comparación directa contra bloques patrones angulares. Usando como referencia el procedimiento de calibración CEM DI-003 Calibración de Transportadores de ángulo Edición digital 1 de 2019, excepto No. 6.2.

NOTAS:

Los resultados reportados en este Certificado de Calibración son trazables metrológicamente al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través de patrones nacionales e internacionales.

Los resultados se relacionan con el instrumento mencionado bajo las condiciones recibidas por el laboratorio. La próxima calibración será de acuerdo con el programa establecido por el usuario.

Este Certificado de Calibración se encuentra firmado digitalmente. Toda reproducción en papel se considerará copia no controlada por Equipos y Controles Industriales SA.

Firmado digitalmente por:
Fabián Escobar Bermudez
Fecha de firma: 2021-04-05

Firma autorizada

Carol Gineth Bello Vanegas
Calibrado por

LM-F-43 V16

Este certificado de calibración no debe ser reproducido parcialmente sin la aprobación escrita del Laboratorio de Metrología de EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A. El certificado de calibración sin firma no es válido.

Tel (57-1) 327 5151 Ext. 305 y 308 / Cel 310 680 5413 - 322 305 0867
Calle 23 No. 116 - 31, Centro de Distribución y Servicios CDS Bodega 32 y 33
Parque Industrial Puerto Central
Bogotá - Colombia
Nit. 860.055.583 - 9
metrologia@eci.com.co - ocmetrologia@eci.com.co



www.eci.co

Equipos y Controles Industriales S.A.
Laboratorio de Metrología



Certificado de Calibración LML-0418-21

Pag. 2 de 2

RESULTADOS DE MEDICIÓN

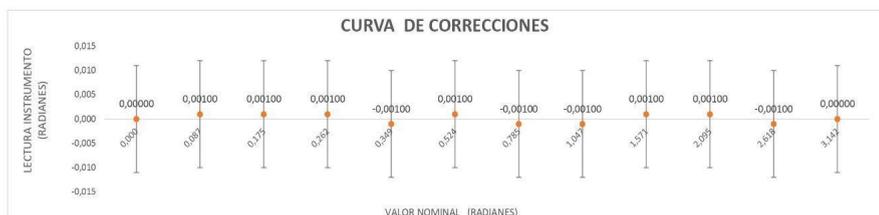
CONDICIONES AMBIENTALES		Mínima	Máxima	LUGAR DE CALIBRACIÓN	
Temperatura °C		20,1	20,3	Laboratorio de Metrología	
Humedad Relativa %HR		48,3	53,2	Equipos y Controles Industriales SA	

Longitud de la regla	Rectitud	Paralelismo
300 mm	0,008 mm	0,014 mm

Valor Instrumento (° ' ")	Corrección instrumento (grados)	k	Incertidumbre U* (grados)
0°'00"	0,00	2,0	0,60
5°'00"	0,10	2,0	0,60
10°'00"	0,10	2,0	0,60
15°'00"	0,10	2,0	0,60
20°'00"	-0,10	2,0	0,60
30°'00"	0,10	2,0	0,60
45°'00"	-0,10	2,0	0,60
60°'00"	-0,10	2,0	0,60
90°'00"	0,10	2,0	0,60
120°'00"	0,10	2,0	0,60
150°'00"	-0,10	2,0	0,60
180°'00"	0,00	2,0	0,60

Valor Instrumento (radianes)	Corrección instrumento (radianes)	k	Incertidumbre U* (radianes)
0,000 00	0,000	2,0	0,011
0,087 27	0,001	2,0	0,011
0,174 53	0,001	2,0	0,011
0,261 80	0,001	2,0	0,011
0,349 07	-0,001	2,0	0,011
0,523 60	0,001	2,0	0,011
0,785 40	-0,001	2,0	0,011
1,047 20	-0,001	2,0	0,011
1,570 80	0,001	2,0	0,011
2,094 40	0,001	2,0	0,011
2,617 99	-0,001	2,0	0,011
3,141 59	0,000	2,0	0,011

* La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura "k" y la probabilidad de cobertura, la cual debe ser aproximada al 95 % y no menor a este valor.



OBSERVACIONES

Las unidades de ángulo plano son expresados por conversión de unidades, utilizando el factor (multiplo o submultiplo), con base en la guía "Guide for the use of the international system of units (SI) del NIST. Publicación especial 811, Edición del 2008. 1 grado = (π/180) radianes.

Fin del Certificado

LM-F-43 V16

Este certificado de calibración no debe ser reproducido parcialmente sin la aprobación escrita del Laboratorio de Metrología de EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A. El certificado de calibración sin firma no es válido.

Tel (57-1) 327 5151 Ext. 305 y 308 / Cel 310 680 5413 - 322 305 0867
Calle 23 No. 116 - 31, Centro de Distribución y Servicios CDS Bodega 32 y 33
Parque Industrial Puerto Central
Bogotá - Colombia
Nit. 860.055.583 - 9
metrologia@eci.com.co - ocmetrologia@eci.com.co



www.eci.co

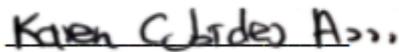
B. Anexo: Consentimiento de pruebas

Consentimiento informado de prueba biomecánica

Bogotá, 2 de Septiembre del 2021.

Yo, Karen Cubides Avila, identificada con C.C. 1018504061; declaro haber sido informado del tipo de prueba de medición que se me realizará. He recibido información también de que los resultados serán manejados estrictamente con fines educativos.

Las mediciones a realizar corresponden al dedo índice de la mano derecha el cual no presenta ningún dolor o alteración física.



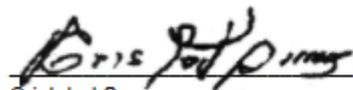
Karen Cubides Avila
1018504061

Consentimiento informado de prueba biomecánica

Bogotá, 10 de Septiembre del 2021.

Yo, Cristobal Serrano, identificado con C.C. 17135185; declaro haber sido informado del tipo de prueba de medición que se me realizará. He recibido información también de que los resultados serán manejados estrictamente con fines educativos.

Las mediciones a realizar corresponden al dedo índice de la mano derecha el cual no presenta ningún dolor o alteración física.



Cristobal Serrano
17135185

C. Anexo: Data sheet BNO055

 BOSCH	BNO055 Data sheet	Page 2
--	-----------------------------	--------

BNO055

INTELLIGENT ABSOLUTE ORIENTATION SENSOR, 9-AXIS SENSOR FUSION ALL-IN-ONE WINDOWS 8.x COMPLIANT SENSOR HUB

Basic Description

Key features:

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Outputs fused sensor data • 3 sensors in one device • Small package • Power Management • Common voltage supplies • Digital interface • Consumer electronics suite | Quaternion, Euler angles, Rotation vector,
Linear acceleration, Gravity, Heading
an advanced triaxial 16bit gyroscope, a versatile,
leading edge triaxial 14bit accelerometer and a
full performance geomagnetic sensor
LGA package 28 pins
Footprint 3.8 x 5.2 mm ² , height 1.13 mm ³
Intelligent Power Management: normal,
low power and suspend mode available
V _{DD} voltage range: 2.4V to 3.6V
HID-I2C (Windows 8 compatible), I ² C, UART
V _{DDIO} voltage range: 1.7V to 3.6V
MSL1, RoHS compliant, halogen-free
Operating temperature: -40° C ... +85° C |
|---|--|

Key features of integrated sensors:

Accelerometer features

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Programmable functionality • On-chip interrupt controller | Acceleration ranges $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
Low-pass filter bandwidths 1kHz - <8Hz
Operation modes: <ul style="list-style-type: none"> - Normal - Suspend - Low power - Standby - Deep suspend Motion-triggered interrupt-signal generation for <ul style="list-style-type: none"> - any-motion (slope) detection - slow or no motion recognition - high-g detection |
|--|---|

 BOSCH	BNO055 Data sheet	Page 3
--	------------------------------------	--------

Gyroscope features

- Programmable functionality
 - Ranges switchable from $\pm 125^\circ/\text{s}$ to $\pm 2000^\circ/\text{s}$
 - Low-pass filter bandwidths 523Hz - 12Hz
 - Operation modes:
 - Normal
 - Fast power up
 - Deep suspend
 - Suspend
 - Advanced power save
- On-chip interrupt controller
 - Motion-triggered interrupt-signal generation for
 - any-motion (slope) detection
 - high rate

Magnetometer features

- Flexible functionality
 - Magnetic field range typical $\pm 1300\mu\text{T}$ (x, y-axis); $\pm 2500\mu\text{T}$ (z-axis)
 - Magnetic field resolution of $\sim 0.3\mu\text{T}$
 - Operating modes:
 - Low power
 - Regular
 - Enhanced regular
 - High Accuracy
 - Power modes:
 - Normal
 - Sleep
 - Suspend
 - Force

Typical applications

- Navigation
- Robotics
- Fitness and well-being
- Augmented reality
- Context awareness
- Tablets and ultra-books