

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LOS
ÁNGULOS DE GIRO DE LA MUÑECA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR

Brus Albert Rojas Cruz

ASESOR:

Dr. Dante Ángel Elías Giordano

Lima, agosto, 2022

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo para la medición de ángulos de giro de la muñeca. El diseño consta de una caja electrónica portátil en la cual se procesan los datos y se muestran los ángulos mediante una pantalla TFT de 2,8 pulgadas, así como de 2 cajas donde se alojan los sensores IMU. Adicionalmente, cuenta con un ajustador de velcro y elásticos para sujetar los sensores al cuerpo del paciente.

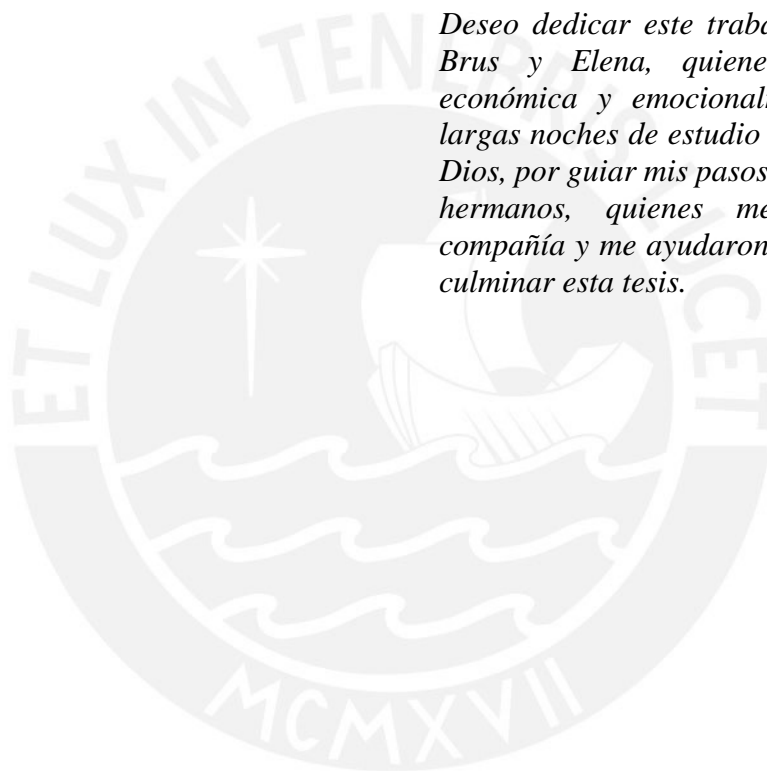
Con respecto al funcionamiento, los datos se obtienen a partir de 2 sensores IMU ubicados paralelamente a los ejes de la muñeca y fijados mediante velcro y elásticos. El algoritmo para procesar extrae la orientación absoluta de los sensores y luego calcula el ángulo entre estos. Con la finalidad de comprobar la exactitud y validez de las medidas del dispositivo se diseñó una prueba controlada en la cual se compararon los ángulos entre el IMU y un método gráfico de manera transversal y longitudinal. Los resultados fueron los esperados: un error absoluto menor a 3° en ambos ejes y una validez concurrente de 0.99 utilizando el indicador ICC (*intraclass correlation coefficient*).

Finalmente, cabe mencionar que el costo de diseño estimado es de S/.18880. En este se incluye el trabajo del diseñador y la asesoría de un ingeniero senior. En cuanto a la manufactura del producto, el costo unitario de fabricación es de S/. 604. Este costo contempla los costos de importación, materiales, ensamble y procesos de manufactura¹.

¹ En estos costos no fueron considerados los costos de integración ni de pruebas. Parte de estos costos están incluidos, por ejemplo, dentro de costos de ensamble y el trabajo del diseñador. Se asume que el diseñador se encargó de ejecutar las pruebas.

DEDICATORIA

Deseo dedicar este trabajo a mis padres, Brus y Elena, quienes me apoyaron económica y emocionalmente a superar largas noches de estudio e investigación, a Dios, por guiar mis pasos con éxito, y a mis hermanos, quienes me brindaron su compañía y me ayudaron indirectamente a culminar esta tesis.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por acompañarme y alentarme durante el desarrollo y culminación de la carrera, al Dr. Dante Elías, por motivarme a terminar este trabajo y brindarme consejos sumamente útiles, sin su ayuda nada de esto sería posible, y a los jurados, la Dra. Elizabeth Villota y el Mg. Carlos Vargas, quienes se tomaron parte de su tiempo para revisar este trabajo.

De manera especial, también quisiera agradecer a la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la PUCP, por brindarme sus instalaciones, actividades recreativas y el capital humano necesarios para vivir la carrera plenamente.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

RESUMEN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
INTRODUCCIÓN	1
1 ANTECEDENTES	4
1.1 Anatomía funcional de la muñeca y codo.....	4
1.2 Biomecánica de la muñeca	4
1.3 Goniometría en la medicina.....	7
1.3.1 Métodos de medición.....	8
1.3.2 Proceso de medición de los 6 ángulos de la muñeca.....	9
1.4 Estado de la técnica y la tecnología.....	10
1.4.1 Investigación y Desarrollo	11
1.4.2 Productos comerciales.....	13
1.4.3 Métodos de cálculo	15
2 DISEÑO CONCEPTUAL	16
2.1 Necesidades de usuario.....	16
2.2 Requerimientos de diseño.....	17
2.3 Estructura de funciones	22
2.3.1 Caja negra	22
2.3.2 Diseño de la estructura de funciones.....	22
2.4 Alternativas de solución	25
2.4.1 Conceptos de solución	25
2.4.2 Evaluación técnico- económica.....	29
2.5 Proyecto preliminar	32
2.5.1 Mejora de la solución óptima.....	32
2.5.2 Arquitectura del sistema eléctrico/electrónico	33
2.5.3 Diagrama de operaciones	35
3 DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO.....	36
3.1 Selección de componentes.....	36
3.1.1 Pantalla.....	36
3.1.2 Sensores	38
3.1.3 Módulo para tarjeta SD	39
3.1.4 Placa de microcontrolador.....	40
3.1.5 Batería y acondicionadores	42
3.2 Modelo simplificado de las conexiones en el sistema eléctrico - electrónico.....	45
3.3 Diagrama de protocolos de comunicación.....	46
3.4 Diseño de la tarjeta electrónica.....	47
3.4.1 Diseño del diagrama esquemático.....	47
3.4.2 Diseño del PCB	51
3.4.3 Modelado de la tarjeta electrónica	52
3.4.4 Consideraciones previas al ensamblado electrónico	53

4	DISEÑO MECÁNICO	54
4.1	Dimensiones de la muñeca y brazo	54
4.2	Selección de materiales y componentes mecánicos.....	56
4.2.1	Materiales de los elásticos y el velcro	57
4.2.2	Material para las cajas.....	58
4.2.3	Selección de cables y elementos de conexión	58
4.3	Modelado 3D de las partes mecánicas.....	60
4.3.1	Caja electrónica.....	60
4.3.2	Caja de sensor	62
4.3.3	Vista explosiva del dispositivo.....	63
4.4	Dimensionamiento de los elásticos y el velcro.....	63
5	ALGORITMO Y PROGRAMACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	65
5.1	Consideraciones previas	65
5.2	Diagrama de flujo del programa.....	66
5.3	Algoritmos y lógica de control	68
5.3.1	Método de obtención de los cuaterniones	68
5.3.2	Método de cálculo de un ángulo con 2 cuaterniones.....	70
5.3.3	Diseño del programa de interfaz con el usuario	72
5.3.4	Diseño del programa para la calibración de los sensores	74
5.3.5	Explicación del código.....	75
6	INTEGRACIÓN MECATRÓNICA.....	76
6.1	Modo de uso	76
6.2	Implementación y resultados	81
6.2.1	Implementación de la interfaz gráfica.....	81
6.2.2	Implementación del algoritmo de cálculo del ángulo	82
6.2.3	Componentes mecánicos.....	83
6.2.4	Experimentación y resultados	84
6.3	Lista de verificación	86
7	PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	88
7.1	Planos	88
7.2	Estimación de costos	89
7.2.1	Costo de manufactura.....	89
7.2.2	Costo de ensamble	93
7.2.3	Costo total de manufactura.....	93
7.2.4	Costo de diseño	94
	OBSERVACIONES	95
	CONCLUSIONES.....	98
	RECOMENDACIONES.....	99
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXOS 1	
	Anexo A: Anatomía funcional de la muñeca y codo.....	1
	Anexo B: Sensores 3	
	B.1. Sensores de medición directa.....	3
	B.2. Sensores de medición indirecta.....	5
	B.3. Características de un elemento de medición	9
	Anexo C: Estructura de funciones	10
	C.1. Sistema mecánico	10
	C.2. Sistema de energía	11

C.3. Sistema de sensado	12
C.4. Sistema de interfaz con el usuario	13
C.4. Sistema de control.....	14
Anexo D: Matriz morfológica.....	15
Anexo E: Cuaterniones	20
Anexo F: Cotizaciones	21
Anexo G: Código	25
Anexo H: Mediciones	43
Anexo I: Planos	44



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla comparativa en términos de AROM, planos y ejes de los 6 principales movimientos de la muñeca. (Clarkson, 2012).....	7
Tabla 2.1 Posicionamiento de los brazos del goniómetro.....	18
Tabla 2.2 Resumen de los requerimientos de diseño.....	21
Tabla 2.3 Posibles soluciones del sistema mecánico.....	25
Tabla 2.4 Soluciones para el sistema de interfaz con el usuario.....	25
Tabla 2.5 Posibles soluciones del sistema de sensado y control.....	26
Tabla 2.6 Posibles soluciones del sistema de energía.....	26
Tabla 2.7 Justificación del valor técnico asignado.....	30
Tabla 2.8 Justificación del valor económico asignado.....	31
Tabla 2.9 Evaluación del valor técnico y económico.....	31
Tabla 3.1 Comparativa de característica de distintas pantallas táctiles.....	37
Tabla 3.2 Comparativa de 4 diferentes unidades inerciales de 9 GDL.....	38
Tabla 3.3 Tamaño y precio de los módulos de lectura y escritura para memorias microSD.....	39
Tabla 3.4 Características relevantes para la selección del microcontrolador.....	40
Tabla 3.5 Principales placas de microcontroladores de 3.3V.....	41
Tabla 3.6 Comparación de características entre baterías Li-ion y Li-Po.....	42
Tabla 3.7 Baterías de Li-Po de 3.7 V disponibles en el mercado.....	43
Tabla 3.8 Conversores de con salida de 3.3V voltaje.....	44
Tabla 3.9 Gasto de corriente de los componentes del dispositivo.....	45
Tabla 4.1 Características de los materiales para impresión por extrusión 3D.....	58
Tabla 5.1 Orientación de los IMU con respecto a los ejes de la muñeca y el codo durante los diferentes tipos de movimiento.....	66
Tabla 5.2 Explicación de las principales funciones del programa.....	75
Tabla 6.1 Comparación de resultados con respecto al eje vertical y transversal.....	85
Tabla 6.2 Tabla de validez concurrente intraclase para las mediciones verticales (ICC).....	86
Tabla 6.3 Tabla de validez concurrente para las mediciones transversales (ICC).....	86
Tabla 6.4 Lista de verificación de los requerimientos de diseño.....	87
Tabla 7.1 Listado de planos.....	88

Tabla 7.2 Estimación de costos para componentes y materiales.....	90
Tabla 7.3 Cálculo de pesos de componentes hechos de PETG.....	90
Tabla 7.4 Tamaño de telas y velcro para un dispositivo.....	91
Tabla 7.5 Estimación de costo de impresión 3D.....	91
Tabla 7.6 Estimación de costo de impresión 3D y soldadura.....	92
Tabla 7.7 Estimación de mano de obra para costura de telas y velcro.....	92
Tabla 7.8 Estimación de costo de ensamblado.....	93
Tabla 7.9 Estimación del costo total.....	94
Tabla 7.10 Estimación de costo de diseño.....	94
Tabla 7.11 Comparación con solución NEXTGEN.....	95



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Movimiento de la mano en supinación(A), posición neutra(B) y pronación(C) con el codo a 90°. 5	5
Figura 1.2 Eje del movimiento de pronosupinación (Viladot, 2001).....	5
Figura 1.3 Eje frontal de la muñeca: (4) flexión- extensión de la muñeca.....	6
Figura 1.4 Eje sagital de la muñeca: (5) aducción-abducción de la muñeca.....	6
Figura 1.5 Planos y ejes del cuerpo a) el plano sagital es cruzado perpendicularmente por el eje mediolateral; b) el plano frontal es cruzado perpendicularmente por el eje anteroposterior, y c) el plano transversal es cruzado perpendicularmente por el eje vertical.....	7
Figura 1.6 Goniómetro tradicional.....	8
Figura 1.7 Método de medición 180° -0° para la evaluación de la flexión- extensión del codo derecho. (Taboadela, 2007).....	8
Figura 1.8 Método del cero neutro para la evaluación de la flexión- extensión del codo derecho. (Taboadela, 2007).....	9
Figura 1.9 Pronación-supinación de antebrazo derecho a partir de la posición 0 (paciente con codo en 90° de flexión y pulgar hacia arriba). (Taboadela, 2007).....	9
Figura 1.10 Flexión-extensión de la muñeca a partir de la posición 0 con el antebrazo en pronación. (Taboadela, 2007).....	10
Figura 1.11 Desviación radial y cubital de la muñeca a partir de la posición 0. (Taboadela, 2007).....	10
Figura 1.12 Prototipo del dispositivo en uso (Mercado, 2020).....	11
Figura 1.13 Electrogoniómetro e-textile en uso. (Tognetti, 2015).....	11
Figura 1.14 Prototipo de goniómetro con 3 soft sensors (Vogt, 2014).....	12
Figura 1.15 Electrogoniómetro basado en IMU's y goniómetro modelo SG110 usados para medir el ángulo de flexión-extensión. (Ruiz, 2017).....	12
Figura 1.16 Prototipo del electrogoniómetro WHITE (Israel, 2017).....	13
Figura 1.17 Imagen demostrativa del uso del goniómetro.....	13
Figura 1.18 Demostración de uso de la serie de goniómetros SG.....	14
Figura 1.19 Imagen referencial del uso del goniómetro Naroxon.....	14
Figura 1.20 Métodos de cálculo de ángulos en las articulaciones. (Seal, 2014).....	15
Figura 2.1 Caja negra del dispositivo de medición de ángulos.....	22
Figura 2.2 Estructura de funciones.....	24
Figura 2.3 Esquemático de la solución 1.....	27
Figura 2.4 Esquemático de la solución 2.....	28

Figura 2.5 Esquemático de la solución 3	28
Figura.2.6 Modelo conceptual de la solución óptima	32
Figura 2.7 Arquitectura del sistema eléctrico/electrónico.....	34
Figura 2.8 Diagrama de operaciones.....	35
Figura 3.1 Pantallas táctiles: a) Pantalla TFT de 2.4", b) TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0 capacitiva, c) TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0 resistiva	37
Figura 3.2 a) Sparkfun microSD transflash breakout, b) Adafruit MicroSD card breakout board y c) Módulo lector de memoria micro SDcard.....	39
Figura 3.3 Diagrama esquemático del <i>Sparkfun microSD transflash breakout</i>	40
Figura 3.4 Batería Li-ion en su empaquetado 18650 (izquierda) y batería Li-Po (derecha)	42
Figura 3.5 Módulo TP4056.....	43
Figura 3.6 Conversor a 3.3V S7V8F3	44
Figura 3.7 Modelo simplificado de las conexiones del sistema eléctrico-electrónico	46
Figura 3.8 Diagrama de protocolos de comunicación.....	46
Figura 3.9 Esquemático del módulo cargador	47
Figura 3.10 Esquemático del circuito de protección.....	48
Figura 3.11 Esquemático del circuito de regulación de voltaje a 3.3 V	48
Figura 3.12 Regulador de voltaje (circuito lector de nivel de batería).....	49
Figura 3.13 Esquemático del lector micro-SD.....	50
Figura 3.14 Esquemático de las conexiones con la pantalla TFT 2.8".....	50
Figura 3.15 Esquemático de las conexiones con los IMU's	50
Figura 3.16 Diagrama de diseño de la pantalla TFT de 2.8".....	51
Figura 3.17 Vista superior del PCB	52
Figura 3.18 Vista superior de modelo 3D de la placa electrónica.....	52
Figura 3.19 Ubicación de los pines IM de la pantalla TFT de 2.8".....	53
Figura 3.20 Esquemático del Arduino Pro Mini 3.3V	53
Figura 3.21 Ubicación de los puentes de soldadura de las resistencias opcionales para I2C.....	53
Figura 4.1. Gráfico de correlación entre amplitud de la mano (<i>hand breadth</i>) y altura (<i>height</i>). (Charmode, 2019).....	55
Figura 4.2. Gráfico que muestra la relación entre el IMC y la circunferencia media del brazo.....	56
Figura 4.3. Punto de medición para el arco del brazo.....	56

Figura 4.4 Cinta de velcro macho(inferior) y hembra(superior).....	57
Figura 4.5 Cinta de <i>spandex</i> de 1cm.....	57
Figura 4.6 Conector JST de 2mm	59
Figura 4.7 Especificaciones del cable UL2547.....	59
Figura 4.8 Tapa de la caja electrónica.....	60
Figura 4.9 Altura mínima y máxima posible del ensamble pantalla-tarjeta.....	60
Figura 4.10 Base de la caja electrónica (vista superior).....	61
Figura 4.11 Base de la caja electrónica (vista inferior).....	61
Figura 4.12 Tapa de la base inferior: vista superior(izquierda) y vista inferior(derecha).....	62
Figura 4.13 Caja del sensor: a) Base de la caja y b) Tapa de la caja.....	62
Figura 4.14 Ensamble total de la caja del sensor	62
Figura 4.15 Vista explosionada del dispositivo	63
Figura 4.16 Boceto del elástico y el velcro de ajuste.....	63
Figura 4.17 Sujetador del sensor ajustando la caja del sensor	64
Figura 5.1. Diagrama de flujo del programa.....	67
Figura 5.2 Código para obtención de un cuaternión del MPU-9250.....	69
Figura 5.3 Función “ <i>dmpGetQuaternion</i> ” en el archivo MPU9150_9Axis_MotionApps41.h.....	69
Figura 5.4 Diagrama de rotación (orientación de los sistemas locales aleatoria).....	70
Figura 5.5 Procedimiento de cálculo del ángulo partiendo de 2 cuaterniones	72
Figura 5.6 Ventana de calibración y ventana principal.....	72
Figura 5.7 Posicionamiento de los IMU durante la calibración	73
Figura 5.8 Ventana de selección del movimiento	73
Figura 5.9 Ventana de guardado	74
Figura 5.10 Código para la calibración de los <i>offset</i> de los sensores	74
Figura 6.1 Movimiento de la mano en pronación (A) y supinación (C) con el codo a 90° a partir de la posición 0 (B).	77
Figura 6.2 Vista inferior de la muñeca izquierda en supinación.....	77
Figura 6.3 Vista de perfil de la muñeca izquierda con el dispositivo en supinación (izquierda) y vista frontal de la muñeca en supinación (derecha).....	77
Figura 6.4 Vista superior de la muñeca izquierda con el dispositivo en pronación	78

Figura 6.5 Vista de perfil de la muñeca izquierda con el dispositivo en pronación(izquierda) y vista frontal de la muñeca en pronación(derecha)	78
Figura 6.6 Vista superior de la muñeca izquierda en flexión.....	78
Figura 6.7 Vista frontal de la muñeca en flexión	79
Figura 6.8 Vista superior de la muñeca izquierda en extensión	79
Figura 6.9 Vista frontal de la muñeca izquierda en extensión	79
Figura 6.10 Vista superior de la muñeca izquierda en aducción.....	80
Figura 6.11 Vista frontal de la muñeca izquierda en aducción	80
Figura 6.12 Vista superior de la muñeca izquierda en abducción.....	80
Figura 6.13 Vista frontal de la muñeca izquierda en abducción	80
Figura 6.14 Esquemático de prototipo de prueba de la interfaz en Fritzing (izquierda) e implementación del prototipo de la interfaz en físico(derecha)	81
Figura 6.15 Ventana de calibración(izquierda) y ventana principal(derecha).....	81
Figura 6.16 Ventana de selección de brazo(izquierda) y selección de movimiento(derecha).....	82
Figura 6.17 Ventana de almacenamiento de datos	82
Figura 6.18 Visualización de la orientación del sensor IMU	83
Figura 6.19 Caja del sensor fabricada: a) desensamblada y b) ensamblada.....	83
Figura 6.20 Caja electrónica fabricada: a) vista superior, b) vista inferior y c) encaje de pantalla.....	84
Figura 6.21 Medición de ángulo respecto del eje vertical (izquierda) y eje transversal (derecha)	85

INTRODUCCIÓN

Las lesiones de miembro superior son un problema recurrente tanto en el deporte como en el trabajo. De acuerdo al Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, las lesiones sufridas en los dedos, muñecas, manos, antebrazos y codos constituyeron el 26% de los accidentes de trabajo en diciembre del 2020². Asimismo, en el 2018, la Dirección Nacional de Servicios Biomédicos- DINASEB registró 41644 atenciones a deportistas federados, de los cuales el 40% se concentró en las especialidades de Fisioterapia y Rehabilitación física, y Cineantropometría³.

Estas lesiones son diagnosticadas por algún especialista: fisioterapeuta, ortopedista u otro. Algunas pueden requerir algún tipo de terapia de rehabilitación debido a una pérdida del rango de movimiento en alguna articulación comprometida. En este sentido, el *range of motion* (ROM) es uno de los indicadores que los especialistas usan para la evaluación médica del rango de movimiento de una articulación. Existen 3 tipos de ROM: el PROM (*pasive range of motion*), el AAROM (*active-assistive*) y el AROM (*active*). El primero mide el ROM mientras el paciente no utiliza sus músculos para mover la articulación; alguien o algo (un fisioterapeuta o una máquina) manualmente mueve la articulación mientras el paciente se relaja. El segundo se da cuando el paciente puede mover la articulación, pero otra persona lo asiste para limitar el esfuerzo en los músculos involucrados en el movimiento de la articulación. El tercero se da cuando el paciente no necesita de ayuda para mover la articulación; usualmente se usa en ejercicios de fortalecimiento de la articulación durante una rehabilitación. Un AROM disminuido puede deberse a un problema con la articulación, hinchazón en el tejido alrededor de la articulación, rigidez de los músculos o simplemente dolor (Magee, 2014). El dispositivo por excelencia que mide el AROM es el goniómetro. Sin embargo, estos actualmente presentan una serie de desventajas para el usuario común. Por ejemplo, solo sirven para la medición del ROM en una sola articulación, es decir, son muy poco versátiles, además de requerir de 2 personas para realizar la medición. Asimismo, se requiere de

² Extraído de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1657699/Bolet%C3%ADn%20Notificaciones%20diciembre%202020.pdf>

³ Extraído de https://sistemas.ipd.gob.pe/secgral/Transparencia/info_estadistica/compendios/comp_est_2018_v4.pdf . Última revisión: 30 de abril del 2021

conocimiento especializado, por lo cual no cualquiera puede usarlo. Si se desea evitar estas incomodidades, se puede optar por un electrogoniómetro, el cual es versátil, más fácil de usar y requiere de solo una persona para realizar las mediciones. Sin embargo, su precio suele ser elevado, llegando a costar alrededor de 900 USD, por lo cual su uso está limitado a clínicas y especialistas.

Por otro lado, cabe mencionar que el especialista (ortopedista, fisioterapeuta, ergónomo, etc.) es el encargado de realizar el diagnóstico y tratamiento posterior. Dado que estos especialistas suelen realizar seguimientos de problemas con la movilidad articular en sus pacientes, es necesario estimar el mercado para el producto que solucionará los problemas de los goniómetros disponibles en la actualidad. Por un lado, la Sociedad Peruana de Ortopedia y Traumatología cuenta con alrededor de 500 miembros entre titulares y asociados⁴. Asimismo, existen en el país alrededor de 5,500 fisioterapeutas registrados en la actualidad (Arrescurrenaga, 2019). Además, la Asociación de Clínicas Particulares, ACP, cuenta con más de 65 clínicas asociadas en todo el Perú⁵. Asumiendo que cada clínica cuenta con un promedio de 3 sedes, serían 175 establecimientos de la salud con algún área que use algún tipo de goniómetro. Por otro lado, de acuerdo al MINSA, en el Perú se cuentan con 1074 establecimiento de salud de primer nivel de atención y con 131 hospitales a nivel nacional⁶. Además de los establecimiento públicos o privados mencionados anteriormente, existen especialistas que trabajan en consultorios privados, los cuales también representan una cantidad significativa de potenciales compradores. Con base anterior, se concluye que el mercado es lo suficientemente significativo como para justificar el diseño del producto.

Como consecuencia de lo anterior y debido a la poca versatilidad de los dispositivos tradicionales y al precio tan elevado de los dispositivos electrónicos, en este trabajo se propone el diseño de un dispositivo para la medición de los 6 ángulos de la muñeca: prona-supinación, flexo-extensión y aducción-abducción. Como se mencionó anteriormente, los goniómetros tradicionales son poco versátiles; por ello, este dispositivo medirá los 6 ángulos de la muñeca para evitar el tedioso uso de 3 goniómetros diferentes, uno para cada par de movimientos de la muñeca.

⁴ Recuperado de: <http://spotrauma.org/?q=node/277>

⁵ Información extraída de: <https://acp.org.pe/asociados/page/10/?a&c=33#038;c=33>

⁶ Información extraída de: <https://www.minsa.gob.pe/transparencia/index.asp?op=301#>

Con el fin de lograr esto, en primer lugar, se elaborará el estado del arte con énfasis en la anatomía y biomecánica de la muñeca. Además, se explicarán las técnicas y tecnologías utilizadas en la investigación académica de goniómetros, así como de dispositivos ofrecidos en el mercado. Asimismo, se describirán los métodos de cálculo y los sensores más comunes utilizados en dichas investigaciones. Luego, se establecerán los requerimientos de diseño usando la metodología para el desarrollo y diseño de sistemas técnicos y productos (Norma Alemana VDI 2221), para así elaborar la propuesta de diseño conceptual. Seguidamente, se realizarán el cálculo y selección de los componentes de los diferentes subsistemas del sistema mecatrónico con énfasis en el diseño mecánico y eléctrico. Finalmente, se presentará el resultado del dispositivo diseñado, se elaborarán los planos de ensamble y despiece, y se estimarán los costos de diseño y fabricación.

Cabe recalcar algunas limitaciones y alcances del proyecto. El diseño estará dirigido a pacientes en rehabilitación de la muñeca con una altura de entre 145.2 y 174.8 cm, y un IMC normal. Asimismo, el diseño estará limitado a cuestiones prácticas como poco consumo de energía, selección de materiales, dibujo de planos y elaboración de un prototipo. No se realizarán pruebas extensivas como fatiga o resistencia a la corrosión, pues el diseño no contempla condiciones extremas de uso. Adicionalmente, cabe recalcar que, debido a ser un dispositivo cuyo fallo no implica un inminente accidente o muerte, el diseño solo se basará en normas de diseño mecánico y eléctrico, más no necesariamente de normas sanitarias propias de cada país.

En un futuro no muy lejano, se espera que este dispositivo ayude a la automatización del seguimiento al proceso de rehabilitación del paciente. Además, tomando en cuenta los bajos costos de fabricación, se espera competir con dispositivos similares y, de esa manera, aumentar la oferta en el mercado. Adicionalmente, se espera que algunos especialistas adopten su uso como una medida de consulta además de los métodos tradicionales. Por último, se busca inspirar desarrollos similares de sistemas de diagnóstico de dolencias accesibles al público general.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En este capítulo se presentará, en primer lugar, la información relacionada a la anatomía funcional, y la biomecánica de la muñeca y el antebrazo en los movimientos de flexo-extensión, aducción-abducción y prona-supinación. Luego, se discutirán los trabajos de investigación como tesis, artículos, así como productos disponibles en el mercado sobre tecnología de medición angular. Además, se explicará los métodos estándar que los especialistas usan para medir el rango de movimiento de una articulación. Finalmente, se presentarán los componentes que se podría incluir en el diseño de este proyecto de tesis.

1.1 Anatomía funcional de la muñeca y codo

La anatomía funcional es una rama de la anatomía que estudia la estructura y los órganos que componen el cuerpo y cómo estos funcionan. En particular, el interés de este trabajo se enfoca en el subsistema musculoesquelético, del cual forman parte huesos, músculos, tendones, ligamentos y articulaciones. Estos brindan movimiento, cohesión y potencia a las estructuras que componen el cuerpo humano.

Una descripción más detallada de qué estructuras musculoesqueléticas están relacionadas con los movimientos de la muñeca se encuentra en el Anexo A.

1.2 Biomecánica de la muñeca

La biomecánica utiliza las aplicaciones de la mecánica clásica para el análisis de los sistemas biológicos y fisiológicos. En particular, en este apartado, se revisará la cinemática de la muñeca y el codo.

En consecuencia, se describen los movimientos involucrados en el movimiento de la muñeca y sobre qué ejes se aplican. Los movimientos en cuestión son flexión, extensión, aducción, abducción, pronación y supinación. Asimismo, se define el AROM para cada uno de estos movimientos. Este es una medida del rango de movimiento de una articulación sin una fuerza externa al individuo que los realiza.

i) Movimiento de prono-supinación:

Con el codo a 90° (Figura 1.1) se define el movimiento de pronación como el movimiento de rotación medial que sitúa el pulgar hacia dentro y la palma de la mano hacia abajo. La supinación es el movimiento que comporta llevar el pulgar hacia fuera y la palma de la mano mirando hacia arriba. El rango de movimiento de pronosupinación es de alrededor de $160-170^\circ$, repartidos entre la pronación (80°) y la supinación (85°). Cabe mencionar que este movimiento precisa de dos articulaciones, la radiocubital proximal y la distal. Como se aprecia en la Figura 1.2, el eje de este movimiento pasa aproximadamente por el dedo meñique (Viladot, 2001).

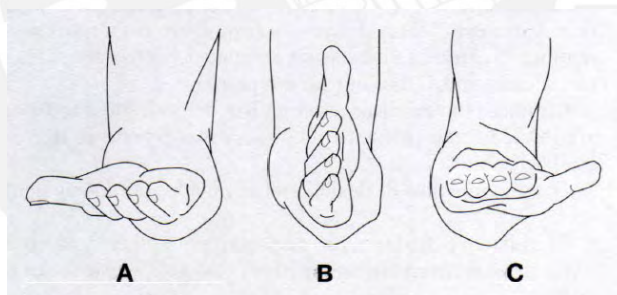


Figura 1.1 Movimiento de la mano en supinación(A), posición neutra(B) y pronación(C) con el codo a 90° .

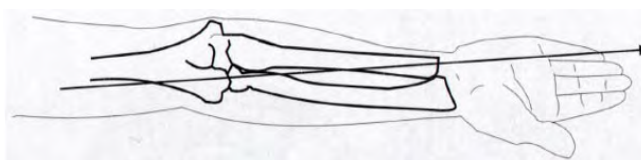


Figura 1.2 Eje del movimiento de pronosupinación (Viladot, 2001)

ii) Movimiento de flexo-extensión:

Se refiere al movimiento producido alrededor de un eje transversal que permite acercar la palma de la mano a la cara anterior del antebrazo o alejarse de ella. La flexión activa

de la muñeca con los dedos extendidos, raras veces supera los 90° , y es mucho menor con el puño cerrado (promedio 65°). Cabe mencionar que la extensión pasiva es máxima (promedio 95°) cuando hay una ligera inclinación radial; así mismo la combinación flexión-inclinación cubital pasiva con los dedos extendidos puede llegar a 125° (Villadot, 2001). Desde una posición anatómica, la extensión ocurre en el plano sagital (Figura 1.3) alrededor de un eje frontal (Clarkson, 2012).

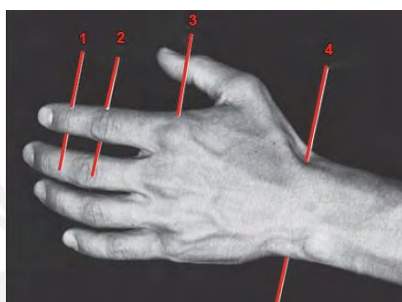


Figura 1.3 Eje frontal de la muñeca: (4) flexión- extensión de la muñeca.

iii) Movimiento de aducción-abducción:

Se trata de un movimiento que la muñeca realiza en torno a un eje anteroposterior según el cual, la mano, situada anatómicamente, se acerca o aleja respecto al eje del cuerpo. La inclinación cubital, o aducción, acerca la mano hacia el cuerpo, mientras que la inclinación radial, o abducción, la aleja de éste. El centro de rotación de los movimientos de inclinación lateral de la muñeca tampoco es fijo sino móvil, y se localiza alrededor del centro de la cabeza del hueso grande. La amplitud de la inclinación cubital presenta unos valores variables, según cuál sea el método utilizado para medirla. Si tomamos el tercer metacarpiano como referencia, la inclinación cubital llega con facilidad a 30 o 40° . La amplitud de la inclinación radial, en cambio, no sobrepasa los 15° (Viladot, 2001). Desde una posición anatómica, la extensión ocurre en el plano frontal (Figura 1.4) alrededor de un eje sagital. (Clarkson, 2012)



Figura 1.4 Eje sagital de la muñeca: (5) aducción-abducción de la muñeca.

A continuación, en la Tabla 1.1 se muestra un cuadro comparativo con el AROM (*active range of motion*) de los 6 movimientos que se estudia.

Tabla 1.1 Tabla comparativa en términos de AROM, planos y ejes de los 6 principales movimientos de la muñeca. (Clarkson, 2012)

Movimiento	AROM normal	Plano	Eje
Supinación	(0-80-90°)	Transverso	Longitudinal
Pronación	(0-80-90°)	Transverso	Longitudinal
Flexión	(0-80°)	Sagital	Frontal
Extensión	(0-70°)	Sagital	Frontal
Abducción (desviación radial)	(0-20°)	Frontal	Sagital
Aducción (desviación cubital)	(0-30°)	Frontal	Sagital

1.3 Goniometría en la medicina

La goniometría deriva del griego *gonion* (“ángulo”) y *metron* (“medición”), es decir, es la disciplina que se encarga de estudiar la medición de los ángulos. Desde tiempos antiguos fue usado para medir ángulos en la agricultura, la herrería, la carpintería, la matemática, la ingeniería, la física, entre otras. Sin embargo, esta sección se centrará en el estudio de la goniometría aplicada a las ciencias médicas y, en particular, a la medición en los miembros superiores.

En el ámbito médico, la goniometría tiene dos objetivos principales: evaluar la posición de una articulación en el espacio y evaluar el arco de movimiento de una articulación en cada uno de los tres planos del espacio. Además, la planimetría, como se muestra en la Figura 1.5, se encarga de describir los planos imaginarios que dividen al cuerpo en secciones para facilitar su estudio.

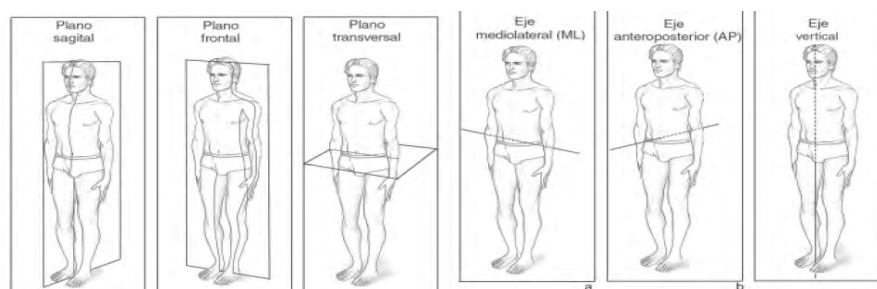


Figura 1.5 Planos y ejes del cuerpo a) el plano sagital es cruzado perpendicularmente por el eje mediolateral; b) el plano frontal es cruzado perpendicularmente por el eje anteroposterior, y c) el plano transversal es cruzado perpendicularmente por el eje vertical

Al caracterizar el arco de movimiento de un individuo, se debe tener en cuenta que este depende de muchos factores personales como la edad, el sexo, la cultura, el entrenamiento y la complejión física. Sin embargo, en ocasiones, algunas patologías también modifican el arco de movimiento natural como por ejemplo las cicatrices, rigideces, secuelas de quemaduras, contracturas, hipertonías, el dolor, la inflamación, la inmovilización prolongada y las enfermedades articulares.

1.3.1 Métodos de medición

Antes de la aparición de los electrogoniómetros e incluso en la actualidad, los especialistas han utilizado el tradicional goniómetro (ver Figura 1.6), que ha sido el instrumento por excelencia para medir los ángulos de las articulaciones.

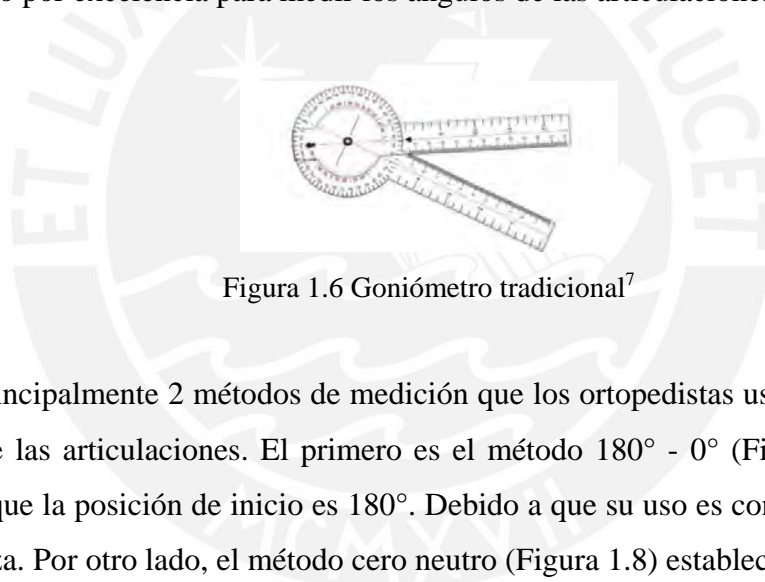


Figura 1.6 Goniómetro tradicional⁷

Existen principalmente 2 métodos de medición que los ortopedistas usan para medir los ángulos de las articulaciones. El primero es el método $180^\circ - 0^\circ$ (Figura 1.7), el cual establece que la posición de inicio es 180° . Debido a que su uso es confuso actualmente no se utiliza. Por otro lado, el método cero neutro (Figura 1.8) establece que la medición comienza en la posición 0, también conocida como posición neutral. Es considerado como el método estándar en la actualidad por ser más intuitivo. (Taboadela, 2007)

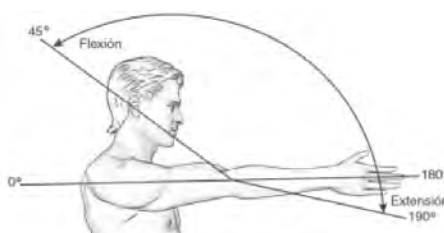


Figura 1.7 Método de medición $180^\circ - 0^\circ$ para la evaluación de la flexión- extensión del codo derecho. (Taboadela, 2007)

⁷ Imagen extraída de <https://www.materialdelaboratorio.top/goniometro/>

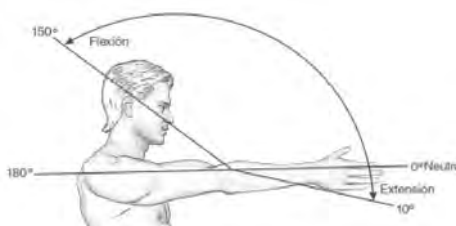


Figura 1.8 Método del cero neutro para la evaluación de la flexión- extensión del codo derecho. (Taboadela, 2007)

1.3.2 Proceso de medición de los 6 ángulos de la muñeca

Con la finalidad de medir correctamente los ángulos en cada uno de los movimientos de la muñeca se debe seguir un procedimiento estandarizado. A continuación, se presenta el proceso basado en el método del cero neutro.

El procedimiento para la medición del ángulo de pronación-supinación inicia al posicionar el hombro, antebrazo y muñeca en posición 0, y el codo flexionado en 90°. Luego, se alinea el brazo fijo del goniómetro paralelo a la línea longitudinal del húmero, por fuera para la pronación y por dentro para la supinación. Asimismo, el brazo móvil se alinea para la supinación con la cara palmar del antebrazo y con la cara dorsal para la pronación. En la Figura 1.9 se muestra la técnica de medición.

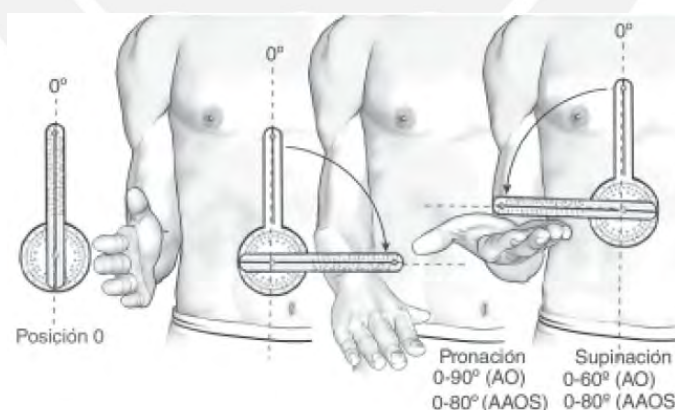


Figura 1.9 Pronación-supinación de antebrazo derecho a partir de la posición 0 (paciente con codo en 90° de flexión y pulgar hacia arriba). (Taboadela, 2007)

En el caso de la flexión-extensión de la muñeca, se inicia la medición con el paciente sentado y el antebrazo apoyado sobre una mesa. El brazo fijo del goniómetro se alinea con la línea longitudinal del cúbito, y el brazo móvil se alinea con la línea longitudinal

del quinto metacarpiano. En la Figura 1.10 se muestra la técnica de medición para la flexo-extensión de la muñeca.

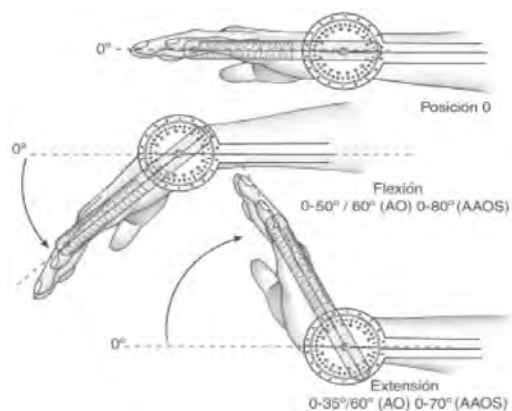


Figura 1.10 Flexión-extensión de la muñeca a partir de la posición 0 con el antebrazo en pronación. (Taboadela, 2007)

Finalmente, al medir la desviación radial-cubital de la muñeca, primero se coloca el antebrazo en pronación apoyado sobre una mesa (ver Figura 1.11). El brazo fijo del goniómetro se alinea con la línea media longitudinal del antebrazo tomando como reparo óseo el epicóndilo, y el brazo móvil se alinea con la línea media de la mano que corresponde a la línea media longitudinal del tercer metacarpiano (Taboadela, 2007).

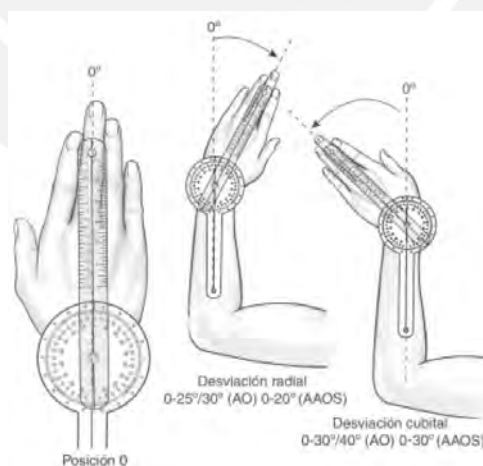


Figura 1.11 Desviación radial y cubital de la muñeca a partir de la posición 0. (Taboadela, 2007)

1.4 Estado de la técnica y la tecnología

En este apartado, se presentarán los principales desarrollos de electrogoniómetros, tanto en el ámbito académico como en el ámbito comercial.

1.4.1 Investigación y Desarrollo

En la Figura 1.12 se muestra un electrogoniómetro “wearable” implementado solo con unidades de medición inercial (IMU). Este electrogoniómetro consiste de cuatro acelerómetros, en pares y adyacentes que, mediante el método *Distributed Common Mode Rejection* (DCMR), calcula el ángulo entre dos miembros adyacentes. Este método sirve para corregir los errores al integrar la aceleración digitalmente. Una de sus limitaciones es que solo mide 1 ángulo con un error menor a 5% (Mercado, 2020).



Figura 1.12 Prototipo del dispositivo en uso (Mercado, 2020)

Por otra parte, en la Figura 1.13 se presenta un dispositivo que fusiona sensores embebidos en la ropa (*e-textile*) y sistemas de medición inercial (IMU) para el análisis del movimiento humano ambulatorio. El método de cálculo está basado en un filtro de Kalman que combina las salidas de los sensores textiles y los IMU. Una de sus ventajas es que el error cuadrático medio es menor a 1°; sin embargo, debe ser calibrado en cada uso (Tognetti, 2015).

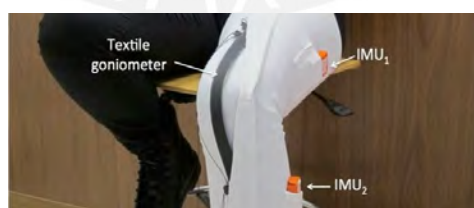


Figura 1.13 Electrogoniómetro e-textile en uso. (Tognetti, 2015)

Otro diseño de goniómetro es el mostrado en la Figura 1.14. Este usa 3 *soft sensors* insertados en una muñequera (Vogt, 2014). El método de cálculo es relativamente sencillo, pero requiere ser calibrado en cada uso. Este método linealiza las salidas de las señales acondicionadas de los sensores y, mediante una matriz de conversión, pasa de un vector de voltajes a uno de ángulos; la matriz es calibrada con cada usuario. El error

cuadrático medio en las pruebas varía dependiendo del movimiento que se analiza, 1.98° para F/E, 3.2° para R/U y 7.46° para P/S. Este electrogoniómetro presenta ventajas como el bajo peso y la sencillez de cálculo. Las desventajas principales son la complejidad en su fabricación y el error medio que presenta para ciertos movimientos.



Figura 1.14 Prototipo de goniómetro con 3 soft sensors (Vogt, 2014)

Otro prototipo de electrogoniómetro implementado con unidades de medida inercial se muestra en la Figura 1.15 (Ruiz, 2017). Este prototipo fusiona las señales del acelerómetro, el giroscopio y el magnetómetro mediante un algoritmo con un filtro Kalman; sus resultados los comparó con el electrogoniómetro SG110. Sus ventajas son su bajo costo, su portabilidad y su alta sensibilidad a campos magnéticos. Asimismo, muestra una correlación de 0.95 entre las medidas tomadas por este sistema y el dispositivo estándar SG110.



Figura 1.15 Electrogoniómetro basado en IMU's y goniómetro modelo SG110 usados para medir el ángulo de flexión-extensión. (Ruiz, 2017)

El siguiente electrogoniómetro llamado WHITE (Israel, 2017), presenta más componentes mecánicos que los anteriores (Figura 1.16) y mide el AROM en la rodilla y el talón. Esto se consigue mediante sensores de efecto Hall, que miden los ángulos y cuenta con la capacidad de filtrado del ruido. Las ventajas principales que presenta este

dispositivo son su bajo error (menor a 0.8%) y su bajo consumo de energía. Las posibles desventajas serían su falta de portabilidad, su volumen y su falta de adaptabilidad a personas más grandes o pequeñas.



Figura 1.16 Prototipo del electrogoniómetro WHITE (Israel, 2017)

1.4.2 Productos comerciales

En los siguientes apartados se presentan goniómetros comerciales para la medición de ángulos en las articulaciones de las extremidades.

- a) Twin axis goniometer: Este goniómetro, mostrado en la Figura 1.17, es fabricado por la empresa Biometrics, presenta dos ejes y permite medir múltiples articulaciones, es decir, puede medir dos ángulos. Por ejemplo, puede ser usado para medir los movimientos de la muñeca. Presenta una resolución de 0.1° dentro del rango de 180° , así como una precisión de $\pm 2^\circ$ y una repetibilidad de 1° medido sobre un rango de 90° . Puede durar hasta 12 horas.



Figura 1.17 Imagen demostrativa del uso del goniómetro⁸

⁸ Extraído de <https://www.biometricsltd.com/>. Fecha de última revisión: 11 de abril del 2021

- b) Twin Axis Goniometers SG series: La serie SG de goniómetros fabricado por la empresa NEXGEN Ergonomics, como el mostrado en la Figura 1.18, pueden medir ángulos hasta en dos planos de movimiento. Usa sensores tipo “strain gauge” y tiene una duración de aproximadamente 600000 ciclos. Presenta una precisión de $\pm 2^\circ$, con una repetibilidad de $\pm 1^\circ$ medidos sobre un rango de $\pm 90^\circ$. El precio del sistema completo de medición para los 6 movimientos es de 4700 USD.



Figura 1.18 Demostración de uso de la serie de goniómetros SG⁹

- c) Goniometer Naroxon electronic: El goniómetro flexible desarrollado por Biometrics UK LTD, mostrado en la Figura 1.19, puede ser usado en la mayoría de articulaciones del cuerpo. Puede medir entre $\pm 180^\circ$ y tiene una precisión de $\pm 2^\circ$. Asimismo, devuelve una salida entre +5 y -5V. El precio de todo el sistema para medición angular es de aproximadamente 5000 euros.



Figura 1.19 Imagen referencial del uso del goniómetro Naroxon¹⁰

⁹ Extraído de <http://www.nexgenergo.com/ergonomics/biosensors.html>. Fecha de última revisión: 11 de abril del 2021

¹⁰ Extraído de <https://www.fisaude.eu/goniometer-naroxon-electronic-p-37151.html>. Fecha de última revisión: 11 de abril de 2021

Los sensores utilizados por las investigaciones y productos descritos anteriormente, así como las características de cualquier elemento de medición se describen más detalladamente en el Anexo B.

1.4.3 Métodos de cálculo

Hay muchos métodos para el cálculo del ángulo de la muñeca. Estos dependen directamente del sensor o elemento de medición utilizado. Los métodos que hacen uso de las unidades inerciales se describen a continuación.

El primer método asume que se puede estimar la orientación de cada sensor de manera fiable. Se utilizan las 3 salidas de los sensores: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Estas salidas se fusionan mediante algún tipo de filtro. Con estas estimaciones se puede calcular la orientación de un sensor respecto de otro. Esto da como resultado el ángulo entre estos dos sistemas de referencia, el cual es el ángulo buscado.

El segundo método consiste en usar las salidas solo de los acelerómetros y giroscopios. Las velocidades angulares son integradas solamente respecto del eje de la articulación. Luego, los acelerómetros se usan para reducir la deriva que el cálculo anterior produce a lo largo del tiempo (*integration drift*). El procedimiento general de ambos métodos se ejemplifica en la Figura 1.20.

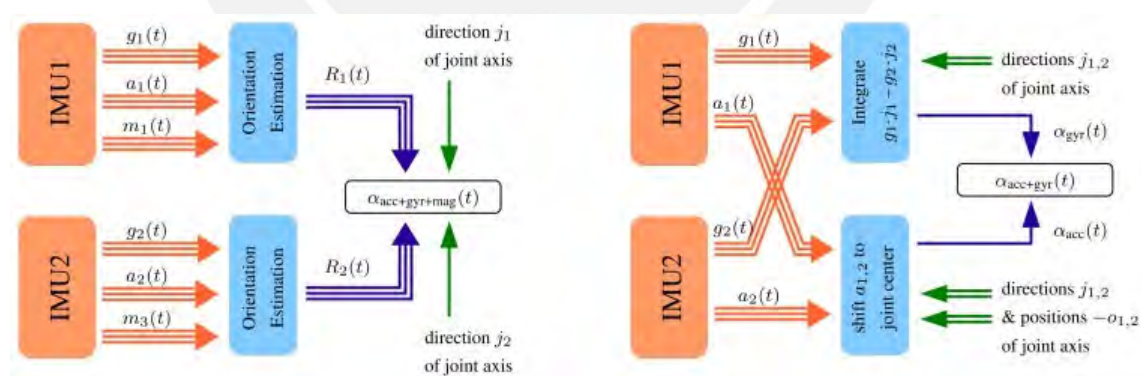


Figura 1.20 Métodos de cálculo de ángulos en las articulaciones. (Seal, 2014)

Otros métodos hacen uso de galgas extensiométricas para estimar el ángulo basándose en la deformación en el material. Estas deformaciones se usan para hallar pequeñas desviaciones de ángulos y luego son sumadas para hallar el ángulo de deformación total. En ocasiones, se utilizan capas sobre capas de este material. Su uso observa en la mayoría de electrogoniómetros comerciales como muestra en las Figuras 1.17, 1.18 y 1.19.

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se exponen las consideraciones necesarias para el diseño del dispositivo con base en la norma VDI 2221. Por ello, en primer lugar, se definirá el usuario y se listarán las necesidades de estos usuarios. Luego, se plantearán los requerimientos del dispositivo, basados en las necesidades de los usuarios y en la información del capítulo anterior. Adicionalmente, se determinarán la función principal y las funciones específicas, así como los medios que cumplan estas funciones. Además, se plantearán propuestas de solución y con ellas se elaborará la matriz morfológica, con la cual se evaluará la idoneidad de cada solución basada en los requerimientos planteados previamente.

2.1 Necesidades de usuario

En primer lugar, cabe mencionar que el comprador típico para el cual está dirigido este producto puede ser un especialista (ortopedista, fisioterapeutas, ergónomo, etc.) o una organización como una clínica u hospital. Dado que los especialistas privados o empleados de alguna clínica u hospital suelen realizar seguimientos de problemas con la movilidad articular en sus pacientes, es necesario estimar el mercado para el producto que se diseñará. Por un lado, la Sociedad Peruana de Ortopedia y Traumatología cuenta con alrededor de 500 miembros entre titulares y asociados.¹¹ Asimismo, existen en el país 5,500 fisioterapeutas registrados en la actualidad (Arrescurrenaga, 2019). Además, la

¹¹ Recuperado de: <http://spotrauma.org/?q=node/277>

Asociación de Clínicas Particulares, ACP, cuenta con más de 65 clínicas asociadas en todo el Perú.¹² Asumiendo que cada clínica cuenta con un promedio de 3 sedes, serían 175 establecimientos de la salud con algún área que podría solicitar el producto. Por otro lado, de acuerdo al MINSA, en el Perú se cuentan con 1074 establecimiento de salud de primer nivel de atención y 131 hospitales a nivel nacional.¹³ Además de los establecimiento públicos o privados, también trabajan especialistas en consultorios privados, los cuales también representan una cantidad significativa de potenciales compradores. Con base anterior, se estima que el mercado es de entre 6000 a 10000 entidades entre personas e instituciones.

Por lo tanto, debido a que este dispositivo estará dirigido a los especialistas mencionados anteriormente, se debe tener en cuenta las necesidades técnicas de estos, así como el perfil de sus pacientes con la finalidad de implementar un dispositivo que sea amigable con las distintas condiciones de estos. Principalmente, el especialista necesita que el dispositivo cumpla de manera adecuada con la función de medir los 6 ángulos de la muñeca con una precisión adecuada. Además, debido a las posibles lesiones que presentará el paciente en el complejo articular de la muñeca, este necesita que el dispositivo tenga un peso liviano.

Por otro lado, el especialista necesita un dispositivo fácil de usar. Esto involucra varios aspectos como la automatización, la interfaz usuario-máquina y el diseño mecánico. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el precio del dispositivo en el mercado internacional que el especialista estaría dispuesto a pagar. Por ello, este necesita que el dispositivo tenga un precio cómodo que se ajuste su bolsillo y no sea superior al precio internacional de sus posibles competidores. Esta necesidad va ligado a la confiabilidad del producto, pues en general, un producto barato no es muy confiable en su funcionamiento y viceversa; así que debe haber un balance entre precio y calidad.

2.2 Requerimientos de diseño

Habiendo definido el perfil del potencial usuario de este dispositivo en el apartado anterior, se pasará a definir los criterios para evaluar la idoneidad en el diseño del

¹² Información extraída de: <https://acp.org.pe/asociados/page/10/?a&c=33#038;c=33>

¹³ Información extraída de: <https://www.minsa.gob.pe/transparencia/index.asp?op=301#>

producto. A continuación, se explican cada uno de estos con base en la información sobre el método de medición, necesidades del usuario y criterios del autor.

Cinemática: Respecto de los requerimientos cinemáticos, como se mencionó en el capítulo anterior, los movimientos de la mano y muñeca tienen diferentes AROM. Estos se miden en determinadas posiciones de la muñeca y sobre ejes de huesos específicos. Por ello, y con la finalidad de abarcar algunos casos excepcionales, se requiere de un dispositivo que sea capaz de seguir estos movimientos a un rango un poco mayor al indicado en la Tabla 1.1. Asimismo, debido al método de medición cero neutro, se requerirá que el posicionamiento de los sensores sea de modo paralelo a las líneas longitudinales de ciertos huesos. En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de estos requerimientos cinemáticos.

Tabla 2.1 Posicionamiento de los brazos del goniómetro

Movimiento	Rango de movimiento mínimo	Brazo fijo	Brazo móvil
Supinación	0-100°	Línea longitudinal del húmero	Cara palmar del antebrazo
Pronación	0-100°	Línea longitudinal del húmero	Cara dorsal del antebrazo
Flexión	0-90°	Línea longitudinal del cúbito	Paralelo al quinto metacarpiano
Extensión	0-90°	Línea longitudinal del cúbito	Paralelo al quinto metacarpiano
Abducción (desviación radial)	0-30°	Línea media del antebrazo	Tercer metacarpiano
Aducción (desviación cubital)	0-50°	Línea media del antebrazo	Tercer metacarpiano

Exactitud: Otro importante requerimiento deriva de la medición y/o cálculo de los ángulos. Esto dependerá de la precisión del sensor y/o del método de cálculo de ángulo. Se tomará como referencia una exactitud de $\pm 2^\circ$, que es ligeramente superior a la que ofrecen los electrogoniómetros de uso comercial.

Confiabilidad: Contar con un dispositivo que cumpla de manera confiable su función principal es de suma importancia para el usuario. En ese sentido, solo se debe seleccionar sensores de marcas que cuenten con una hoja técnica que garantice las exactitudes esperadas de manera que las mediciones sean válidas. Adicionalmente, se requiere de un algoritmo de cálculo que incluya una calibración continua del dispositivo.

Facilidad de interacción: Además, para que el dispositivo tenga una interacción humano-máquina sencilla, se requiere que tenga pocas entradas y funcionalidades visibles al usuario. Por ello, se proponen las 7 funcionalidades básicas siguientes: prender, realizar medición, calibrar, establecer el cero, escoger medición, guardar medición y mostrar porcentaje de batería.

Materiales y peso: En cuanto a los materiales, debido a que se plantea un peso ligero, se debe usar, en la medida de lo posible, materiales con baja densidad como telas y plásticos. Asimismo, los materiales en contacto con la piel deberán ser hipoalergénicos y no tóxicos para no provocar ninguna reacción adversa. Además, estos deberán ser encontrados o, en su defecto, fabricados fácilmente en el mercado peruano. Como medida referencial, el dispositivo deberá tener un peso inferior a 1 kg.

Geometría: La geometría del dispositivo también tendrá un rol importante en el diseño del dispositivo, pues de esta dependerá el confort y la ergonomía. Por ello, el diseño mecánico del dispositivo estará basada en un individuo de 160 cm (estatura promedio del peruano adulto) con índice de masa corporal cercanos al normal¹⁴ (entre 16 y 27 kg/m²), entre 18.5 y 25 kg/m². Además, debido a que se plantea que este dispositivo pueda fabricarse y venderse en el mercado peruano, se requiere de adaptabilidad en el dispositivo, de modo que se abarquen estaturas que estén a dos desviaciones estándar de la media peruana tanto para varones como para mujeres. Asumiendo que la estatura de la población peruana se asemeja a una distribución normal de media 165.3 cm con una desviación estándar de 7.42 cm para varones, y una media de 152 cm con una desviación estándar de 7.11 cm para mujeres¹⁵; entonces se estaría abarcando al 98% de la población si el diseño es adaptable a personas con estaturas entre 137.8 y 180 cm.

Costo: Se deberá limitar el precio de los materiales y sensores sin menoscabar la funcionalidad del dispositivo. En ese sentido, como medida límite se plantea un costo de fabricación de no más de 400 USD, pues un dispositivo profesional cuesta alrededor de 960 USD.

¹⁴ Instituto Nacional de Salud. Extraído de https://bvs.ins.gob.pe/insprint/CENAN/Tabla_valor_nutricional_según_IMC_adultos.pdf
Última revisión: 30 de abril del 2021

¹⁵ Información extraída de: <https://tall.life/height-percentile-calculator-age-country/>

Visualización: Se deberá incluir algún medio para mostrar datos del dispositivo como el porcentaje de batería o los ángulos de la muñeca. Esto se puede lograr mediante la integración de un dispositivo de visualización de al menos 2.5 pulgadas. Con esto se mejora la visibilidad de los datos por mostrar y la comodidad del usuario. Asimismo, los ángulos deberán ser mostrados en grados sexagesimales.

Portabilidad: Debido a que el paciente puede no contar con una computadora para conectar el dispositivo, se requiere de independencia energética e informática, para lo cual se requiere de un elemento de almacenamiento de energía y un elemento de procesamiento. Asimismo, es necesario que se incluya algún medio de almacenamiento de datos. Este deberá ser no volátil y tener al menos 256 MB de capacidad.

Ergonomía: La comodidad del paciente y el especialista al realizar la medición es importante en el diseño del dispositivo. En ese sentido, se abarcarán ciertos requerimientos relacionados a la comodidad que son necesarios para un uso generalizado del dispositivo que no están incluidos en otros requerimientos. Asimismo, la estructura del dispositivo debe ser no invasiva, es decir no deberá restringir el movimiento ni ser incómodo.

Energía: El dispositivo requiere tener una autonomía similar a un dispositivo disponible en el mercado. Por ello, se tomará como referencia el electrogoniómetro de Biometrics Ltd, el cual posee una duración de batería de hasta 12h. En consecuencia, propone para este dispositivo medidor tenga una autonomía mínima de 8h de funcionamiento continuo.

Seguridad: El diseño contempla condiciones de presión, temperatura y humedad normales. En particular, el funcionamiento debe estar garantizado para temperaturas que varían entre 10 y 45 °C. Asimismo, debería tener cierta resistencia a agentes como el polvo o humedad ambiental. En este dispositivo se propone al menos una protección tipo IP 53, lo cual implica que el dispositivo permite la entrada mínima del polvo, pero esto no afecta su funcionamiento. Asimismo, el agua no deberá entrar si se arroja a razón de 10 l/min y a una presión de entre 80 y 100 kN/m². Esto evitará posibles cortos circuitos y/o explosiones. Por otro lado, se deberá incluir un circuito protector que impida posibles sobrecargas de la batería y un elemento de sensado de la batería para mostrar el porcentaje de carga de este.

Fabricación: La fabricación del dispositivo deberá basarse en estándares de diseño mecánico y por consecuencia usar piezas normalizadas.

Mantenimiento: Con respecto al mantenimiento, este deberá tener no más de 20 piezas removibles para facilitar el proceso.

A modo de síntesis, se presenta, en la Tabla 2.2, un resumen con los requerimientos planteados anteriormente.

Tabla 2.2 Resumen de los requerimientos de diseño

Requerimiento	Descripción
Cinemática	<ul style="list-style-type: none"> - Debe satisfacer los rangos mostrados en la Tabla 2.1. - Se deberá posicionar los sensores de modo que se puedan calcular los ángulos de acuerdo al método del cero neutro.
Exactitud	<ul style="list-style-type: none"> - Debe contar al menos con una exactitud de $\pm 2^\circ$.
Confiabilidad¹⁶	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe utilizar sensores con hoja técnica que garantice las exactitudes. - Se debe implementar algoritmo que incluya la calibración del dispositivo y garantice una validez alta respecto de un método verificado.
Facilidad de interacción	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe implementar 7 funcionalidades básicas.
Materiales y peso	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe usar materiales livianos como plásticos o telas en el diseño. - Estos deben ser fácilmente encontrados en el mercado. - Estos deberán ser hipoalergénicos. - El dispositivo debe tener un peso máximo de 1kg.
Geometría	<ul style="list-style-type: none"> - Debe ser basada en un individuo de 1.6m con un índice de masa corporal normal entre 16 a 27 kg/m². - Estructura adaptable para personas con una estatura entre 137.8 y 180 cm. Con esto se abarca al 98% de la población peruana. (considerando una distribución normal)
Costo	<ul style="list-style-type: none"> - Costo unitario menor a 400 USD.
Visualización	<ul style="list-style-type: none"> - Debe contar con un medio de salida de información de al menos 2.5 pulgadas.
Portabilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Debe contar con un elemento de almacenamiento de energía. - Debe contar con un elemento de procesamiento. - Debe contar con un dispositivo para almacenamiento de datos no volátil de al menos 256 MB.
Ergonomía	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño debe ser no invasivo. - El diseño mecánico debe contemplar una estructura no rígida.
Energía	<ul style="list-style-type: none"> - Debe tener una autonomía energética de al menos 8h. - Debe cargarse mediante un voltaje continuo de 5V.
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> - Debe tener al menos un grado de protección IP53 - Debe incluir un sistema de medición de energía.
Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño debe usar piezas normalizadas.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño debe tener menos de 20 piezas removibles.

¹⁶ El requerimiento de confiabilidad hace referencia a qué tan bien el dispositivo es capaz de desempeñar su función principal de medir ángulo.

2.3 Estructura de funciones

De acuerdo a la norma VDI 2221, se debe construir la estructura de funciones como paso posterior a la realización de la lista de requerimientos. Así, en esta sección, se presentan, primero, la caja negra en la que se definen funciones externas (vistas por el usuario) y luego, las funciones internas al sistema.

2.3.1 Caja negra

Es una abstracción de un sistema que permite relacionar las entradas y las salidas sin conocimiento previo del funcionamiento interno del dispositivo. En este caso, las entradas y salidas pueden ser información, materiales y energía. Como se muestra en la Figura 2.1, la caja negra se representa mediante un diagrama de flujo de información.

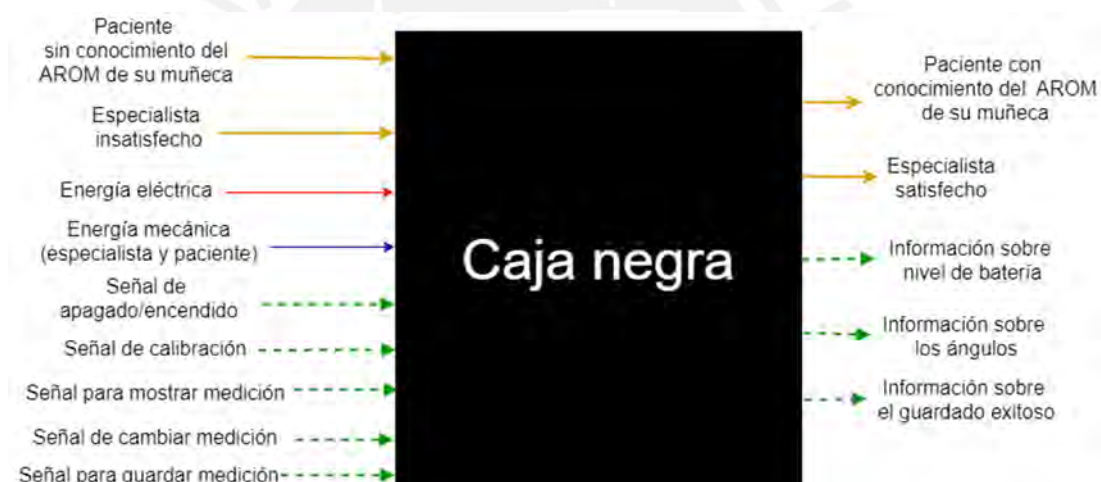


Figura 2.1 Caja negra del dispositivo de medición de ángulos

2.3.2 Diseño de la estructura de funciones

En esta sección, se diseñará una estructura de funciones que sea coherente con las entradas y salidas de la caja negra. Esta incluye todas las subfunciones que deberá tener el dispositivo para cumplir la función principal y los requerimientos. En este trabajo, se clasificarán dichas subfunciones en sistemas. La explicación detallada del significado y acción de cada subfunción se encuentra en el Anexo C.

Sistema mecánico

En este sistema se encuentran las funciones concernientes al movimiento de la muñeca del usuario (permitida por la estructura del dispositivo) y la colocación física del dispositivo por parte del especialista al paciente.

Sistema de energía

Este sistema se encarga de administrar, distribuir y recargar la energía del dispositivo. Son seis las funciones que componen el sistema de energía, las cuales se explican con mayor detalle en el Anexo C. Adicionalmente, un sensor se encargará de medir el voltaje del elemento de almacenamiento de energía para su posterior visualización.

Sistema de sensado

Este sistema se encarga de sensar las cantidades físicas necesarias para el correcto funcionamiento, las cuales serán procesadas posteriormente por el sistema de control. Además, este sistema es sustentado energéticamente por el sistema de energía luego del acondicionamiento de energía.

Sistema de interfaz con el usuario

Este sistema se encarga de recibir las señales de entrada del usuario y mostrar información sobre los ángulos, nivel de energía y el almacenamiento de las mediciones. mediante un elemento de visualización. Asimismo, es energizado mediante un acondicionamiento desde el elemento de almacenamiento de energía:

Sistema de control

Por un lado, el sistema de control se encarga de procesar información proveniente del sistema de sensado. Por otro lado, también procesa las señales de entrada recibidas por el sistema de interfaz, y calcula la información sobre los ángulos y el nivel de energía que son mostrados por el sistema de interfaz.

A modo de síntesis, la Figura 2.2 se muestra la estructura de funciones integrada. En ella, se muestra la interrelación entre los sistemas físico, de energía, de sensado y de control. Asimismo, el diagrama de funciones completo sirve para observar todas las entradas y salidas del dispositivo, las cuales fueron previamente propuestas en la caja negra.

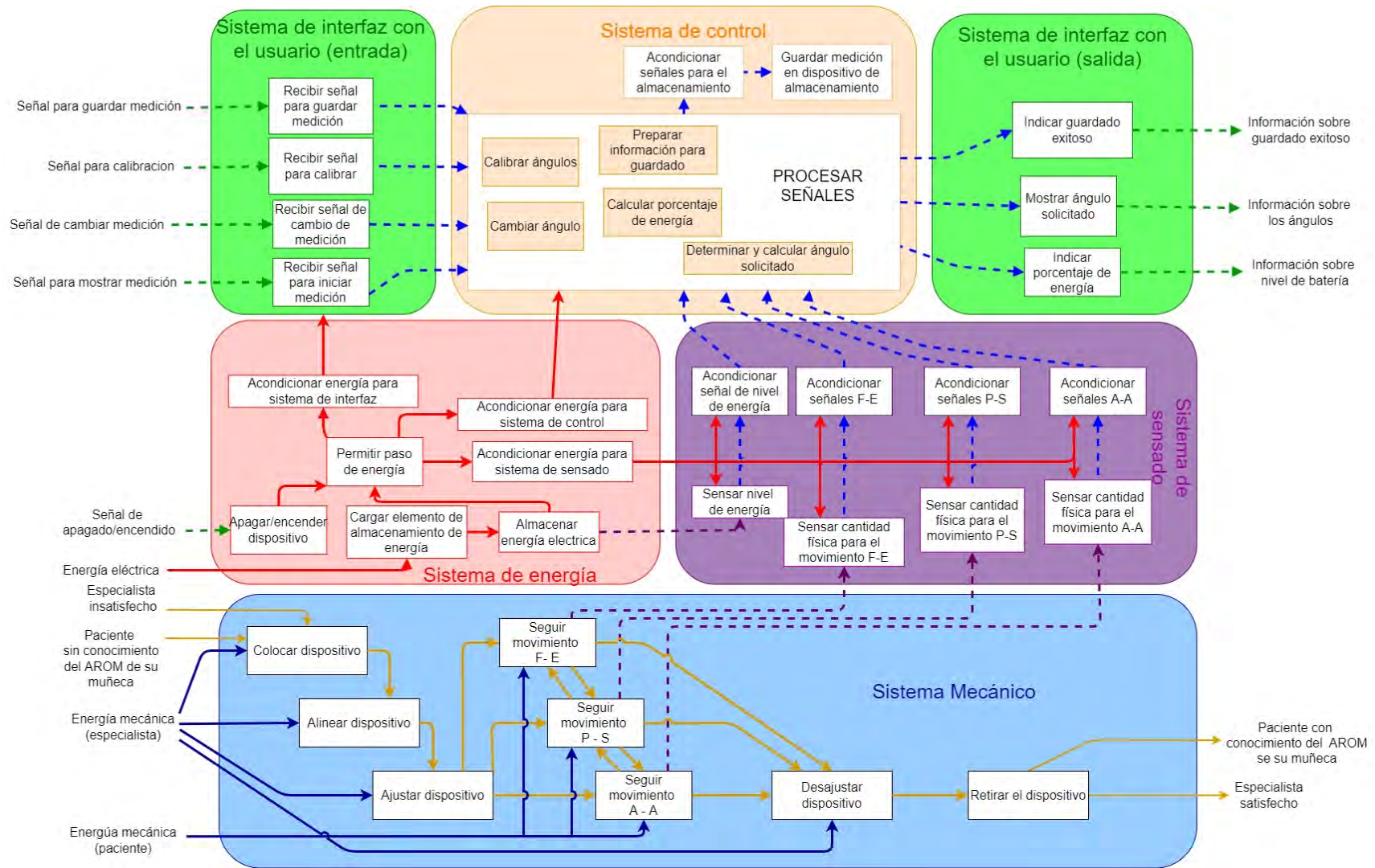


Figura 2.2 Estructura de funciones

2.4 Alternativas de solución

En esta sección, se propondrán tres conceptos de solución, los cuales estarán basado en la matriz morfológica detallada en el Anexo D. Asimismo, mediante una evaluación técnico-económica, se define el concepto de solución óptima a diseñar.

2.4.1 Conceptos de solución

En esta sección se presentarán tres conceptos de solución integrados, las cuales parten de la fusión de las soluciones por sistema. Estas soluciones parciales se muestran en las Tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6, las cuales corresponden a los sistemas físico, de interfaz con el usuario, de sensado y control, y de energía. Las matrices del sistema de sensado y control se muestran juntas debido a la alta interacción entre estos dos sistemas.

Tabla 2.3 Posibles soluciones del sistema mecánico

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Colocar dispositivo	Codera y muñequera	Estructura flexible	Estructura polimérica con grados de libertad
Alinear dispositivo	Velcro	Estructura flexible	Estructura polimérica con grados de libertad
Ajustar dispositivo	Velcro	Correa de goma	Velcro
Seguir movimiento X- X	Codera y muñequera	Cables piezoresistivos flexibles	Sistema de bielas
Desajustar dispositivo	Velcro	Correa de goma	Velcro
Retirar dispositivo	Codera y muñequera	Estructura flexible	Estructura polimérica con grados de libertad

Tabla 2.4 Soluciones para el sistema de interfaz con el usuario

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Recibir información del usuario (almacenar, cambiar, realizar medición o calibrar)	Pulsadores	Pulsadores	Pulsadores
Mostrar ángulo solicitado	Pantalla táctil	Pantalla LCD	Pantalla táctil
Indicar guardado exitoso	Pantalla táctil	Luces LED	Luces LED
Indicar porcentaje de batería	LED multicolor	Pantalla LCD	LED multicolor

Tabla 2.5 Posibles soluciones del sistema de sensado y control

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Sensar cantidad física para el movimiento X-X	IMU	Sensor KPF	Encoder
Sensar de nivel de energía	Circuito divisor de tensión	Circuito divisor de tensión	Circuito medidor con MOSFET
PROCESAR SEÑALES	Microcontrolador	Ordenador de placa plana	Microcontrolador
Acondicionar señales F- E, P- S o A- A	Pines analógicos del uC compatibles con el sensor	Circuito integrado de acondicionamiento	Pines analógicos del uC compatibles con el sensor
Acondicionar señales para el almacenamiento	Módulo lector de tarjeta SD	Interfaz directa (no hay necesidad de driver)	Modulo lector de USB
Guardar medición En dispositivo de almacenamiento	Módulo para tarjeta EEPROM (SD)	Módulo de lectura/escritura USB	Módulo de lectura/escritura USB

Tabla 2.6 Posibles soluciones del sistema de energía

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Cargar elemento de almacenamiento de energía	Módulo cargador	Cargador externo	Módulo cargador
Almacenar energía	Batería Li-ion	Batería Ni- Cd	Batería Li-ion
Permitir paso de energía	Switch	switch	switch
Acondicionar energía	Regulador conmutado	Regulador lineal	Regulador conmutado
Apagar/encender dispositivo	Switch	Pulsador	Switch

Cada una de estas soluciones parciales se integran en tres soluciones generales. Cada solución integrada es la fusión sus respectivas soluciones parciales; por ejemplo, la solución 1 integrada es la fusión de la solución 1 parcial de los sistemas de control, sensado, interfaz con el usuario, energía y mecánico. Estas soluciones generales o integradas se describen a continuación.

En primer lugar, en la Figura 2.3, se muestra la solución 1 integrada, la cual se compone de las soluciones 1 de cada sistema. Esta solución consta de una estructura de un material flexible que permite el movimiento de la muñeca con libertad. El ajuste de esta se da

mediante velcro. Asimismo, se usa un microcontrolador como controlador del sistema y una pantalla como elemento de visualización, en la cual se muestra, además del ángulo, información sobre el guardado de las mediciones. Las unidades de medición inercial (IMU) se ubican paralelos a huesos específicos de manera que su ubicación sea compatible con el método de medición “Cero neutro”. Se observa también en el esquemático que la entrada del lector SD se ubica casi externamente para poder tener contacto con una tarjeta SD externa. A excepción de los sensores y la estructura flexible, todo se ubica en una caja. El led multicolor que indica el porcentaje de batería se ubica al costado de la pantalla táctil.

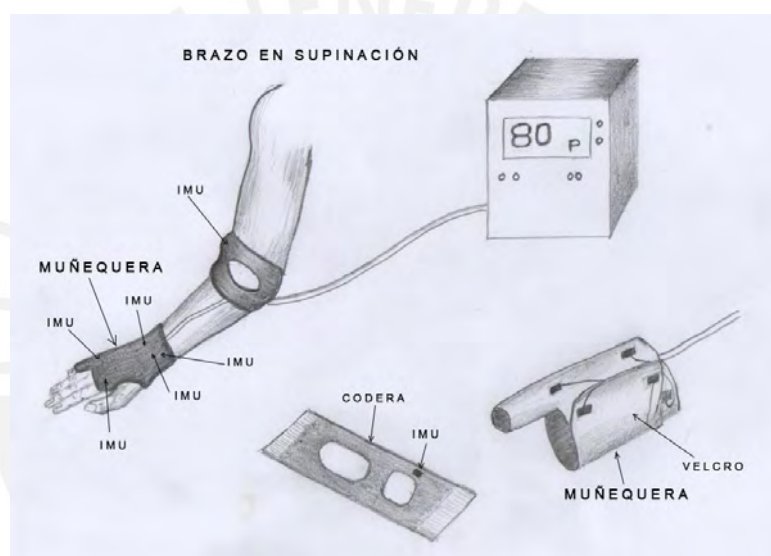


Figura 2.3 Esquemático de la solución 1

En segundo lugar, se muestra en la Figura 2.4 el esquemático de la solución 2. En esta solución se hace uso de sensores KPF distribuidos estratégicamente a lo largo de la muñeca y el brazo. Todos los elementos de control y energía se ubican en una pequeña caja. En la parte superior de esta, se ubica la pantalla LCD, que muestra tanto el porcentaje de batería como la medición del ángulo. El led de guardado exitoso se ubica al costado de la pantalla táctil. En este caso, no es necesario un driver para el USB, pues el ordenador de placa plana viene con uno integrado. Este ordenador necesita de un circuito acondicionador para las señales de los sensores. Además, la batería de Ni-Cd se carga mediante un cargador externo.

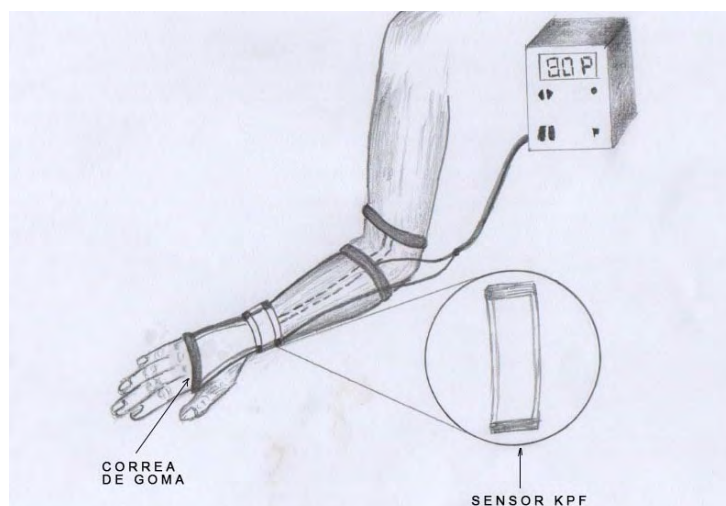


Figura 2.4 Esquemático de la solución 2

Finalmente, en la Figura 2.5, se muestra el esquemático de la Solución 3. En esta la estructura mecánica la componen 3 pares de bielas de polímero, los cuales se sujetan mediante correas de velcro al brazo y la muñeca del paciente. En cada eje de rotación relativo a cada par de bielas se ubica un encoder, el cual mide los ángulos de manera discreta. Como en las soluciones 1 y 2, todo el sistema de control, energía e interfaz con el usuario se ubica dentro de una caja. La pantalla táctil se ubica en la parte central superior de la caja. Los leds se ubican al costado de esta; uno indica el porcentaje de batería y el otro, si el guardado fue de la medición fue exitoso. A diferencia de la primera solución, en esta se usa un módulo driver para USB.

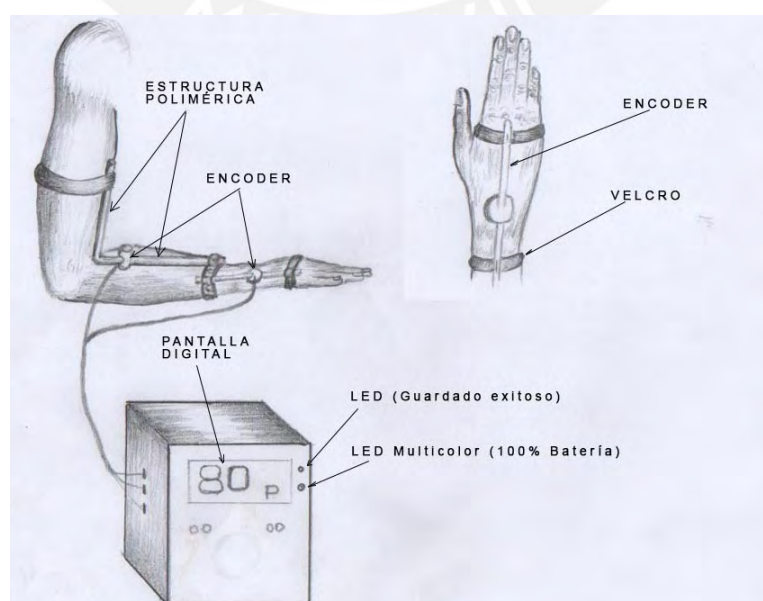


Figura 2.5 Esquemático de la solución 3

2.4.2 Evaluación técnico- económica

En esta sección se evaluará la factibilidad e idoneidad de cada propuesta de solución respecto de ciertos criterios propuestos con la finalidad de compararlos y determinar cuál de todas implementar. Los criterios se dividen en criterios técnicos y criterios económicos. A cada criterio se le asignará un valor dependiendo de la importancia de esta en el cumplimiento de los requerimientos de diseño. Asimismo, cada solución tendrá un puntaje para cada criterio. Luego, los puntajes correspondientes a cada solución se ponderarán y compararán entre ellas. Por último, se escogerá la solución que tenga el puntaje más alto en el valor hiperbólico entre en el aspecto técnico y el económico.

Los criterios se justifican para cada solución en las Tablas 2.7 y 2.8. Estos criterios y el peso relativo que se considerará para la evaluación son los siguientes:

- Facilidad de colocación (T): Se evaluará la facilidad con la que el especialista coloca la solución sobre el paciente. Tiene un peso relativo de 2, pues no es tan importante al momento de desempeñar su función principal, pero lo suficiente para que sea deseable su consideración en el diseño.
- Facilidad de uso (T): Se estimará cuán fácil es el uso de cada solución. Se le asigna un peso relativo de 2. La justificación es similar al criterio anterior.
- Peso: Debe tomarse en cuenta el peso de cada solución. Su peso relativo es de 3, pues es importante para el paciente no aumentar mucho la carga mecánica sobre su brazo.
- Eficiencia energética (T): Se comparará la eficiencia energética estimada. Su peso relativo es de 3, la eficiencia energética impacta directamente sobre la autonomía, la cual es un requerimiento de diseño.
- Potencia (T): Se estimará cuanta potencia eléctrica consumiría cada solución. A este criterio se le asigna un valor de 3. La justificación es similar al anterior criterio.
- Adaptabilidad (T): Cada solución tiene un nivel de adaptabilidad a distintas personas. A este criterio se le asigna un valor de 3, pues el producto debe poder funcionar para personas de distintas estaturas y contexturas.
- Exactitud (T): La exactitud dependerá de tipo de sensores y el algoritmo a utilizar. Este criterio tendrá un valor relativo de 4, pues de esta dependerá la calidad de la medición y, en consecuencia, del cumplimiento de la función principal.
- Costo de fabricación (E): Se estimará el costo de fabricación las piezas que deban ser manufacturadas. El valor que se asigna a este criterio es de 3, pues el costo de fabricación es de vital importancia para estimar el precio al que se venderá el producto. Esto es de gran

consideración por el comprador. Cabe mencionar que, debido al tipo de dispositivo, no habrá muchas piezas que manufacturar para cualquiera de las soluciones.

- Costo de diseño (E): Se estimará el costo del diseño electrónico y mecánico de cada solución. A este criterio se le asigna 4, debido a que este criterio es algo más significativo al anterior.
- Costo de tecnología (E): Se estimará el costo de tecnología. Esto hace referencia a los sensores, microcontroladores y demás componentes similares que no sean parte del proceso de manufactura. A este criterio se le asignará también 4, pues los componentes que se incluirán en este rubro son la mayoría.

Tabla 2.7 Justificación del valor técnico asignado

Criterio	Valor asignado	Justificación
Facilidad de colocación	S1: 4	La solución 1 consta de solo 2 piezas por poner: una muñequera y una codera.
	S2: 2	Se necesitan colocar 4 correas de goma.
	S3: 3	Esta solución necesita colocar y ajustar 3 correas de velcro.
Facilidad de uso	S1: 3	El contar con una pantalla táctil facilita su uso.
	S2: 2	La pantalla LCD puede ser complicada. La cantidad de cables desde los sensores no es menor.
	S3: 3	El contar con una pantalla táctil facilita su uso.
Peso	S1: 3	Las tres soluciones tienen en promedio lo mismo, pues cuentan con elementos livianos en estructura de sensado y en dispositivo de visualización.
	S2: 3	
	S3: 3	
Eficiencia energética	S1: 3	Esta cuenta con circuito MOSFET (solo gasta energía al sensor) y con un acondicionador de energía conmutado (es más eficiente que el lineal).
	S2: 2	Esta usa un circuito divisor de tensión, lo cual siempre drena corriente. Asimismo, un convertidor lineal no es tan eficiente como uno conmutado.
	S3: 3	Misma justificación de la primera solución.
Potencia	S1: 3	Los elementos que consumen más energía son la pantalla táctil y el microcontrolador.
	S2: 2	En este caso, los mayores gastos de energía se dan en el ordenador y la pantalla LCD. El ordenador de pantalla plana gasta tanta energía que suele necesitar un ventilador para no calentarse demasiado.
	S3: 3	Misma justificación que la primera solución.
Adaptabilidad	S1: 4	Esta solución es mejor pues cuenta con coderas y muñequeras con velcro, lo cual permite mayor adaptabilidad.
	S2: 2	Esta solución es la menos adaptable, pues la resistencia de los sensores KPF puede variar si se estiran demasiado.
	S3: 4	Bastante adaptable pues cuenta con velcro. Asimismo, los pares de bielas tienen una configuración similar a los goniómetros tradicionales.
Exactitud	S1: 4	Se estiman ángulos; sin embargo, por la fusión de sensores y a la posibilidad de ajuste del eje, se logran buenos resultados en exactitud.
	S2: 3	Su exactitud no es muy buena, pues en esta solución se usan matrices para la calibración, pero los efectos de variación de resistencia no son realmente lineales.
	S3: 4	Esta solución es regularmente exacta, pues usa sensores directos, por lo cual no se tiene que estimar nada.

Tabla 2.8 Justificación del valor económico asignado

Criterio	Valor asignado	Justificación
Costo de fabricación	S1: 3	El costo de manufactura consiste en la confección de la muñequera y la codera. Estos sumados al velcro no suponen un costo muy alto.
	S2: 2	El costo de los sensores KPF y las correas de goma son relativamente altos, pues se debe considerar también el costo de aprender la metodología del proceso de fabricación de los sensores KPF, los cuales
	S3: 3	La manufactura del sistema de bielas es relativamente sencilla y tiene un costo bajo dado que el material es un polímero.
Costo de diseño	S1: 3	El diseño mecánico contempla la muñequera y la codera. Para las tres soluciones, el costo de diseño electrónico es similar.
	S2: 4	En este caso el diseño mecánico se concentra en la estructura de sensores KPF. Asimismo, la programación de una pantalla LCD es más directa que una pantalla táctil.
	S3: 2	En este caso, el diseño mecánico se complica, pues se debe diseñar prácticamente un goniómetro tradicional por cada grado de libertad (3).
Costo de tecnología	S1: 3	La pantalla táctil tiene un precio considerable, pero aun así el costo total de tecnología no supera a la solución 2.
	S2: 2	Los ordenadores de placa plana son mucho más costosos que los microcontroladores.
	S3: 3	La pantalla táctil tiene un precio considerable, pero aun así el costo total de tecnología no supera a la solución 2.

La Tabla 2.9 muestra la evaluación técnico-económica teniendo en cuenta los valores asignados anteriormente a cada solución.

Tabla 2.9 Evaluación del valor técnico y económico

Criterio de diseño	W_r	Solución 1		Solución 2		Solución 3		Óptimo	
		W_{s1}	$W_{s1} \cdot W_r$	W_{s2}	$W_{s2} \cdot W_r$	W_{s3}	$W_{s3} \cdot W_r$	W_o	$W_o \cdot W_r$
Análisis técnico									
Facilidad de colocación	2	4	8	2	4	3	6	4	8
Facilidad de uso	2	3	6	2	4	3	6	4	8
Peso	3	3	9	3	9	3	9	4	12
Eficiencia energética	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Potencia	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Adaptabilidad	3	4	12	2	6	4	12	4	12
Exactitud	4	4	16	3	12	4	16	4	16
Valor técnico total	T_{t1}	69	T_{t2}	47	T_{t3}	67	T_{to}	80	
Valor técnico relativo	R_{t1}	0.86	R_{t2}	0.59	R_{t3}	0.84	R_{to}	1.00	
Análisis económico									
Costo de fabricación	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Costo de diseño	4	3	12	4	16	2	8	4	16
Costo de tecnología	4	3	12	2	8	3	12	4	16
Valor económico total	T_{e1}	33	T_{e2}	30	T_{e3}	29	T_{eo}	44	
Valor económico relativo	R_{e1}	0.75	R_{e2}	0.68	R_{e3}	0.66	R_{eo}	1.00	
Calificación hiperbólica	H_{r1}	0.80	H_{r2}	0.63	H_{r3}	0.74	H_{ro}	1.00	

La calificación hiperbólica es un parámetro que se usa para medir la idoneidad de una solución y se calcula como la media geométrica del valor técnico y el valor económico. Se concluye, por lo tanto, que la mejor solución es la primera, pues presenta una

calificación hiperbólica mayor que las otras dos opciones. Sin embargo, esta puede ser mejorada con respecto a ciertos criterios. En el siguiente apartado se plantearán algunas de esas mejoras manteniendo las ventajas del diseño escogido.

2.5 Proyecto preliminar

Luego de haber seleccionado el concepto de solución más idóneo, se procede a realizar la arquitectura del sistema eléctrico/electrónico, un diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo y, finalmente, un modelado en 3D aproximado de este.

2.5.1 Mejora de la solución óptima

Se procede a plantear algunas mejoras para el diseño seleccionado con anterioridad. Estas se presentan como modelo conceptual en la Figura 2.6.

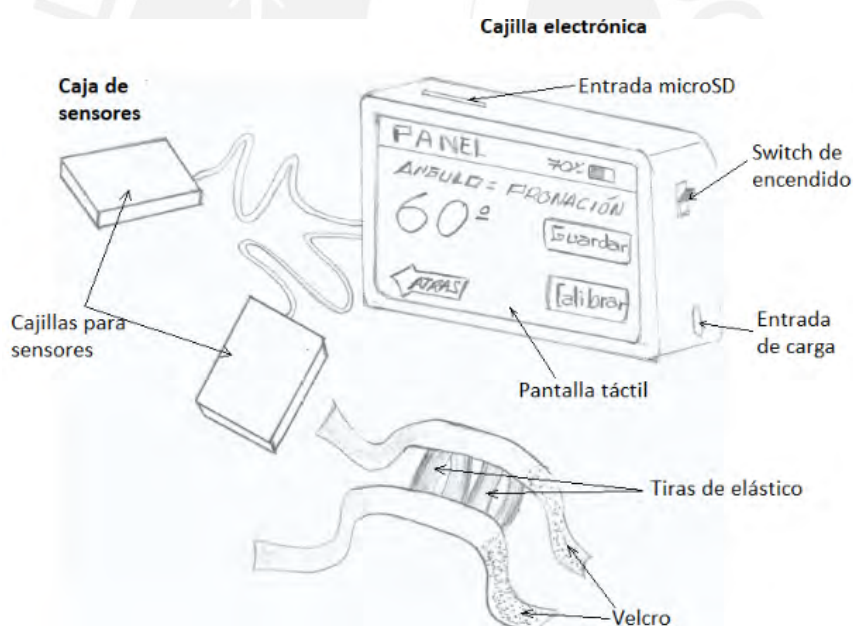


Figura.2.6 Modelo conceptual de la solución óptima

Entre las mejoras se incluyen la disminución de sensores a solo 2 IMU. Esto reducirá el costo, el consumo de energía y la dificultad en la implementación. Por otro lado, los botones serán eliminados. Estas funciones pueden ser perfectamente realizadas por la pantalla táctil. Asimismo, con la finalidad de ajustar y alinear los sensores, se proponen dos tiras de elásticos cosidos a dos fajillas de velcro. Finalmente, el guardado de datos será realizado por un módulo de tarjeta microSD.

2.5.2 Arquitectura del sistema eléctrico/electrónico

En esta sección, se explicará el funcionamiento general del sistema eléctrico/electrónico y se mostrará la arquitectura (Figura 2.7). Como se determinó, el dispositivo se cargará con un voltaje de 5V de corriente directa. Este voltaje debe transformarse en un voltaje compatible con la batería. Por ello, se carga la batería mediante un módulo cargador, el cual proporciona la corriente en un modo tal que la batería no se sobrecargue o entre en cortocircuito. Asimismo, las entradas serán recibidas por la pantalla táctil y un *switch*. La pantalla táctil recibe las señales relacionadas a la medición y al guardado de las mediciones, y el *switch* sirve para prender o apagar el dispositivo, pero no corta la carga de la batería. La información de la pantalla va directamente al microcontrolador, el cual se encargará de procesarlos y enviar información para visualizar.

Una vez encendido el dispositivo, el especialista deberá calibrar el dispositivo. Para ello se requiere que el especialista coloque los sensores en un plano horizontal sin moverlos, y pulse el botón de calibración. Una vez calibrado, el paciente debe proceder a realizar el movimiento, y el dispositivo comenzará a mostrar las mediciones.

Cuando se realice un movimiento de la muñeca, cada sensor extraerá información sobre la velocidad angular, aceleración y campo magnético, los cuales serán procesados por el microcontrolador para conocer el ángulo entre dichos sensores. Asimismo, un circuito se encargará de medir el voltaje en la batería constantemente, cuya información también se enviará al microcontrolador.

Finalmente, luego de procesar las señales, el microcontrolador enviará la información a la pantalla táctil para su visualización. También, si es requerido, se puede guardar la última medición en una tarjeta microSD mediante un lector microSD. Asimismo, el porcentaje de batería se visualizará en la pantalla. Cuando llegue a un nivel bajo, el dispositivo se apagará automáticamente.

Arquitectura de sistema eléctrico/electrónico

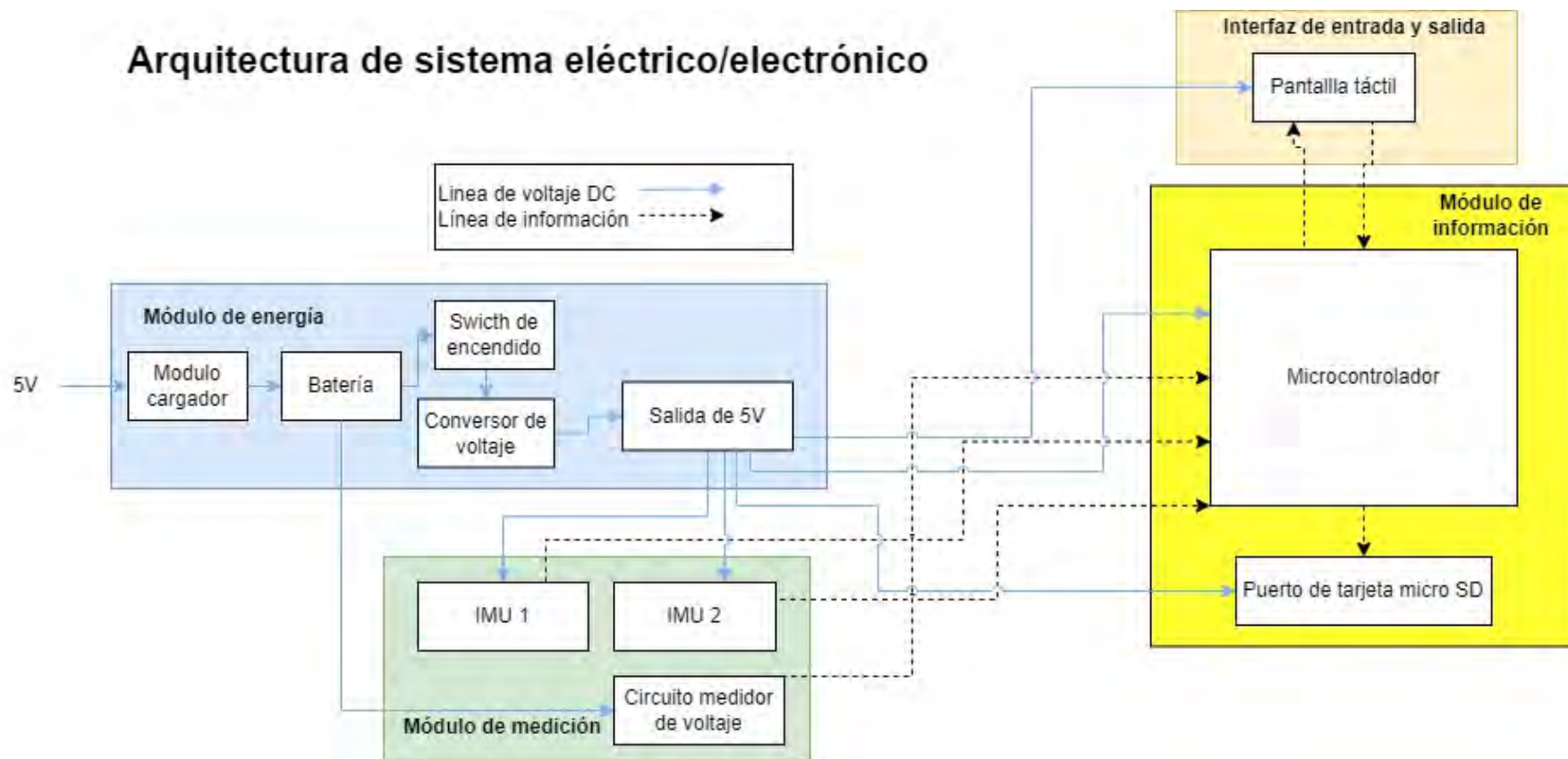


Figura 2.7 Arquitectura del sistema eléctrico/electrónico

2.5.3 Diagrama de operaciones

En la Figura 2.8, se muestran las operaciones que los usuarios secuencialmente deben realizar con la finalidad de interactuar de manera correcta con el dispositivo.

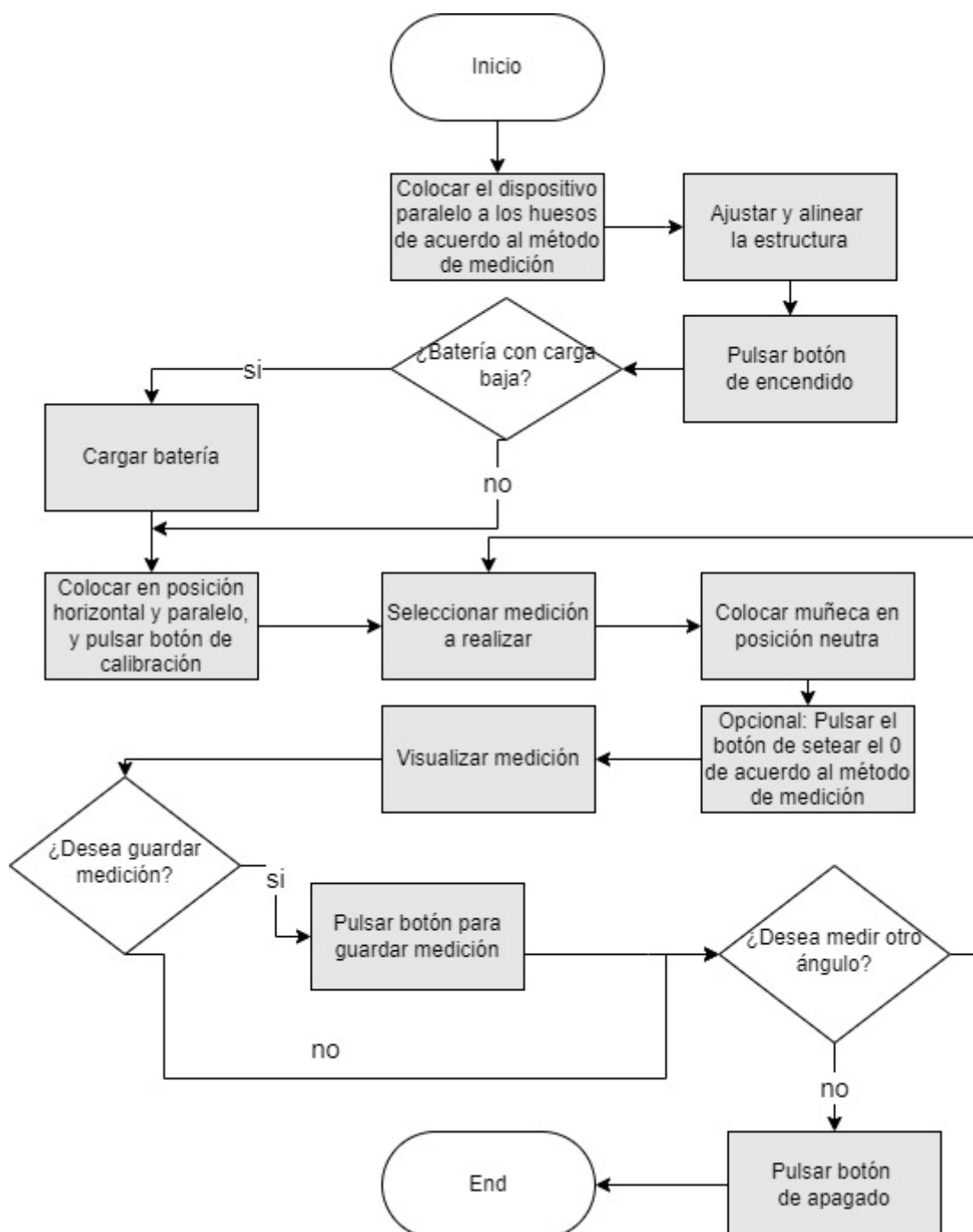


Figura 2.8 Diagrama de operaciones

CAPÍTULO 3

DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

Una vez concluido el diseño de la estructura mecánica del dispositivo se procede a definir los componentes electrónicos. En ese sentido, en este capítulo se presentarán los componentes electrónicos encargados de cumplir con las funciones de energía, sensado y procesamiento, así como los componentes eléctricos para el control y seguridad de la batería. Adicionalmente, se presentará el PCB donde interactuarán los componentes y un modelo 3D de este.

3.1 Selección de componentes

A continuación, se mostrará el proceso de selección de cada componente con su respectiva justificación tanto técnica como económica. En primer lugar, se seleccionarán los elementos electrónicos (pantalla, microcontrolador, interfaz con tarjeta, entre otros) y luego del sistema eléctrico (batería y acondicionadores para los otros sistemas).

3.1.1 Pantalla

Como se determinó en el Capítulo 2, la pantalla será el único elemento de salida de información. Con esta se informará al usuario sobre el estado de la batería, el cambio de ángulo, la selección del movimiento a medir, la posibilidad de calibración, entre otros. Por otro lado, cabe mencionar que la pantalla debería ser capaz de mostrar un teclado tipo QWERTY, que es el teclado más común. En un celular inteligente estándar con pantalla de 10 u 11 pulgadas, este ocupa un espacio de 35 x 68 mm², por lo cual la pantalla deberá

ser al menos un 10% más grande. Entre las características técnicas y económicas más importantes para esta selección se encuentran el tamaño (ergonomía para la visualización), el consumo de energía y la cantidad de pines que lo conectan al microcontrolador, en ese orden de prioridad. La cantidad de pines debe ser la menor posible, pues generalmente, mientras menos pines se requiera del microcontrolador menos costo tendrá este. Asimismo, se asume que una pantalla con menor tamaño requerirá menos energía para funcionar, pero su visualización será menos cómoda. En la Figura 3.1 se presentan las 3 opciones que se consideraron, todas compatibles con niveles de 5 V y 3.3 V. A modo de resumen, en la Tabla 3.1 se muestra la comparación de las características más importantes de estas pantallas.

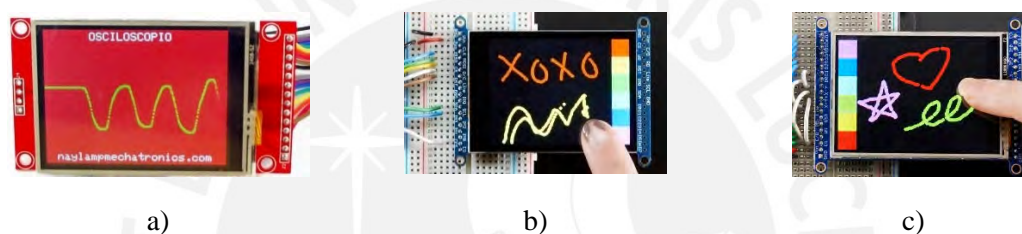


Figura 3.1 Pantallas táctiles: a) Pantalla TFT de 2.4", b) TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0 capacitiva, c) TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0 resistiva

Tabla 3.1 Comparativa de característica de distintas pantallas táctiles

Pantalla	Corriente (mA)	Tamaño (mm ²)	Precio (PEN)	Pines de conexión con el microcontrolador	Extras
Pantalla TFT 2.4"	Menor a 150	42,7x56,9	40 ¹⁷	12	- No controlador
TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0	Max 300	67x52(aprox)	160 ¹⁸ (capacitivo)	12-13(digitales para lectura y escritura) 7 (SPI + I2C)	- Controlador integrado -2 modos: SPI+I2C y 8 bits
TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0	Max 150	67x52(aprox)	120 ¹⁹ (resistivo)	12-13 (digitales para lectura y escritura) 9 (SPI)	- Controlador integrado -2 modos: SPI y 8 bits

Se concluye, por lo tanto, que la opción más viable técnicamente es la pantalla TFT LCD 2.8" de Adafruit v2.0, posee un tamaño que viabiliza el uso de un teclado, consume como máximo 150 mA y requiere 12 pines del microcontrolador para su funcionamiento.

¹⁷ Precios obtenidos de <https://naylampmechatronics.com/>. Fecha de consulta: 04/08/21





¹⁸ Precios obtenidos de <https://www.adafruit.com/product/1770>. Fecha de consulta: 04/08/21

¹⁹ Precios obtenidos de <https://www.adafruit.com/product/1770>. Fecha de consulta: 04/08/21

3.1.2 Sensores

Los sensores son parte esencial del dispositivo, por lo cual deben ser seleccionados minuciosamente. Para la selección de estos, se tendrán en cuenta ciertos parámetros como costo, tamaño, tipo de interfaz con el microcontrolador, peso, corriente, resolución y capacidad de procesamiento. Esta última característica es muy importante debido a que mientras más capacidad de procesamiento tenga el IMU, menos deberá procesar el microcontrolador. En la Tabla 3.2, se muestran los IMU de nueve grados de libertad que se encuentran en el mercado se muestran. Se puede notar que la corriente oscila entre 4 y 5 mA; asimismo, todos cuentan con la interfaz I2C para la comunicación con el microcontrolador. Las principales diferencias se aprecian en el precio y el tamaño.

Tabla 3.2 Comparativa de 4 diferentes unidades inerciales de 9 GDL

Nombre	IMU Tinyshield	GY-9250	Adafruit Fusion breakout BNO055	MiniIMU v5
Figura				
Sensores	Giróscopo, acelerómetro y magnetómetro			
Tamaño (mm)	20x20	15x25	20x27	20x13
Corriente (mA)	4.6	> 6	NI	5
Peso (g)	1	3	3	0.7
Tipo de interfaz	SPI o I2C	SPI o I2C	I2C/100 Hz	I2C
Precio (PEN)	100 ²⁰	20 ²¹	58 ²²	100 ²³
Resolución (bits)	16	16	No info	16
Capacidad de procesamiento	No	DMP (digital motion processor)	Algoritmo de fusión	No

Finalmente, teniendo en cuenta el precio, se opta que la opción más rentable y pequeña: el GY-9250 ofrecido por la empresa china Okystar Technology Co.

²⁰ Precio obtenido de <https://tinycircuits.com/products/9-axis-imu-tinyshield>. Fecha de consulta: 05/08/2021

²¹ Precio obtenido de https://spanish.alibaba.com/p-detail/2020-62370833384.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.778a4e130G3GUC&s=p. Fecha de consulta: 05/08/2021

²² Precio obtenido de https://spanish.alibaba.com/product-detail/gy-bno055-9dof-9-axis-bno055-absolute-orientation-imu-ahrs-breakout-sensor-accelerometer-gyroscope-triaxial-geomagnetic-60712314973.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.450ec279xBNiQR&s=p. Fecha de consulta: 05/08/2021

²³ Precio obtenido de <https://www.pololu.com/product/2738>. Fecha de consulta: 05/08/2021

3.1.3 Módulo para tarjeta SD

Este módulo es la interfaz entre el microcontrolador y la tarjeta SD donde se guardarán las mediciones. Se usarán tarjetas microSD, debido a que ocuparán menos espacio en la caja electrónica. En la Figura 3.2 se muestran los 3 modelos revisados. Para su selección se tendrá en cuenta el precio y el tamaño, en ese orden de prioridad. Los 3 admiten voltajes de 3.3V, aunque solo las opciones b) y c) toleran también 5V. Asimismo, los tres transmiten la información por el protocolo SPI y tienen tamaños muy similares. Estas características se resumen en la Tabla 3.3.

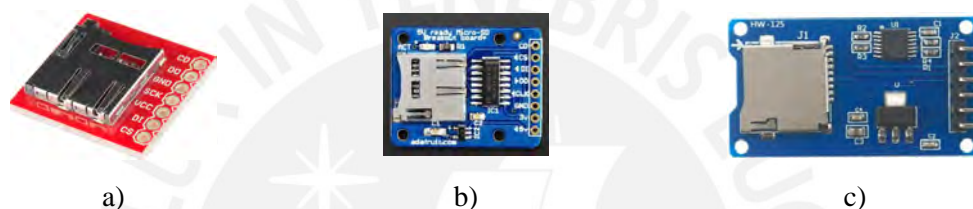


Figura 3.2 a) Sparkfun microSD transflash breakout, b) Adafruit MicroSD card breakout board y c) Módulo lector de memoria micro SDcard

Tabla 3.3 Tamaño y precio de los módulos de lectura y escritura para memorias microSD

Nombre	Tamaño (mm)	Precio
Sparkfun microSD transflash breakout ²⁴	No info	\$ 4.35
MicroSD card breakout board ²⁵	35x24	\$ 7.5
Módulo lector de memoria micro SDcard ²⁶	42x24	S/. 12

Basados en las características mostradas en la Tabla 3.3, se concluye que la opción más viable económicamente es el módulo lector de memoria micro SDcard. Una opción adicional sería fabricarlo como parte de una tarjeta electrónica, debido a la sencillez en su diseño. Como prueba de ello, se muestra en la Figura 3.3 el esquemático del *Sparkfun microSD transflash breakout*.

²⁴ Extraído de <https://www.sparkfun.com/products/544>. Fecha de consulta: 19/9/2021

²⁵ Extraído de <https://www.adafruit.com/product/254>. Fecha de consulta: 19/9/2021

²⁶ Extraído de <https://naylampmechatronics.com/104-modulo-lector-de-memoria-micro-sd-card.html>

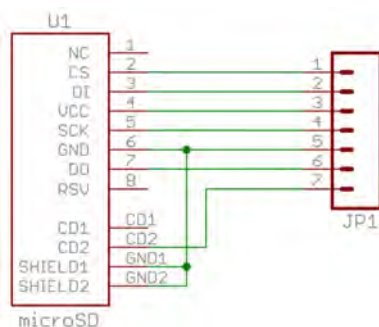


Figura 3.3 Diagrama esquemático del *Sparkfun microSD transflash breakout*

3.1.4 Placa de microcontrolador

En la selección del microcontrolador es necesario tener en cuenta los pines tanto digitales como analógicos, debido a que todos los componentes electrónicos están conectados mediante ciertos pines al microcontrolador. Otro factor importante es la frecuencia de reloj y capacidad de operar con números de punto flotante, debido a que se requiere procesar datos y mostrarlos en una pantalla. Asimismo, es importante que el tamaño sea pequeño para que ocupe menos espacio dentro de la caja electrónica. El voltaje de alimentación también se considerará, pues este influirá directamente en el gasto de energía. Se prefiere menor voltaje. En suma, se considerarán los aspectos técnicos más que los económicos para la selección de este componente.

En primer lugar, se muestra en la Tabla 3.4 la cantidad de pines que cada componente conectado al microcontrolador requiere usar. Por cuestiones prácticas, se omitirán los pines de alimentación. De esta tabla se concluye que el microcontrolador deberá tener una capacidad de 20 pines digitales como mínimo.

Tabla 3.4 Características relevantes para la selección del microcontrolador




Componente	Pines conectados al microcontrolador	Número de componentes	Número total de pines
Pantalla	12 digital	1	12 digitales
Sensor IMU	3 digitales	2	4 digitales (I2C)
Driver de tarjeta de almacenamiento	4 digitales	1	4 digitales
Total			20 digitales

En segundo lugar, se describirá de manera general 3 tecnologías de placas microcontroladores. Se tendrán en cuenta 4 factores para su selección, que en orden de

prioridad son precio, energía, número de bits, tamaño, frecuencia de reloj, capacidad de interfaz I2C (sensores) y SPI (módulo de tarjeta micro SD).

Entre las placas de microcontrolador que funcionan con 3.3V más comunes se encuentra el Arduino Pro Mini, el cual cuenta con el microcontrolador Atmega328P. Destaca por ser de código abierto, por lo cual la documentación para los drivers compatibles con Arduino está disponible. Este opera con una frecuencia de reloj de 8 MHz. Otra placa conocida es el Tiva C Series, el cual cuenta con el microcontrolador TM4c123gh6pm de la marca ARM. Entre sus ventajas se encuentran su relativamente alta frecuencia de reloj de 80MHz y su alta cantidad de pines. Adicionalmente, se tiene la placa Teensy 3.2, la cual usa el microcontrolador MK20DX256. Entre sus características destaca su alta frecuencia de reloj, 72MHz y su compatibilidad con el IDE de Arduino. Además, su voltaje de operación es de 3.3V. Las características de estas 3 placas se detallan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Principales placas de microcontroladores de 3.3V²⁷

Placa	Arduino Pro Mini 3.3V	Tiva C Series	Teensy 3.2
Ilustración			
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia de reloj de 8 MHz. - Punto flotante (32 bits) - 14 pines digitales y 6 analógicos. - Dimensiones: 33x18 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia de reloj de 80 MHz. - Punto flotante (32-64 bits) - 64 pines en total - No compatible Arduino - Dimensiones: 51x67 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia de reloj de 72MHz. - Punto flotante (32-64 bits) - 34 pines digitales y 21 analógicos - Compatible con Arduino - Dimensiones: 17,8x36,3 mm
Precio	S/. 25	S/. 103	S/. 97

Se concluye que la mejor opción es la placa Arduino Pro Mini 3.3V, debido a que cuenta con el número de pines necesarios, tiene un costo de 25 soles, gasta menor energía por ser de 3.3V y tiene dimensiones pequeñas. Respecto a la frecuencia de reloj, debido a que los sensores MPU 9250 cuenta con un procesador incluido y la pantalla TFT de 2.8'' no se requiere de mucho procesamiento.

²⁷ Precios extraídos de <https://www.amazon.com/-/es/>

3.1.5 Batería y acondicionadores

La batería se encargará de brindar la autonomía y portabilidad al dispositivo. En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de batería, las cuales funcionan bajo diferentes principios. Estos pueden ser los de Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion y Li-Po. Cada uno presenta ventajas y desventajas, pero en la actualidad se suelen preferir los de Li-ion y los de Li-Po por ser más duraderos y livianos. A modo de ilustración, en la Figura 3.4 se muestran los empaquetados más comunes para ambos tipos de baterías y en la Tabla 3.6 se hace una comparación de algunas de sus características.

Tabla 3.6 Comparación de características entre baterías Li-ion y Li-Po

Parámetro	Li-ion	Li-Po
Flexibilidad	Baja	Alta
Peso	Relativamente pesado	Más liviano
Seguridad	Más volátil	Menor riesgo de explosión
Duración de cargado	Largo	Corto
Costo	Barato	Algo más caro
Capacidad	Baja	Alrededor del doble de capacidad por el mismo volumen
Vida	Pierde carga con el tiempo	Retiene mejor la carga que la batería de Li-ion



Figura 3.4 Batería Li-ion en su empaquetado 18650 (izquierda) y batería Li-Po (derecha)²⁸

Cabe mencionar que las dimensiones para el modelo 18650 de baterías de Li-ion son 18 mm de diámetro y 65mm de alto, y usualmente no incluyen protección eléctrica. En el caso de las baterías de Li-Po las dimensiones varían directamente con respecto de su capacidad; por ejemplo, las medidas de la batería de 1000 mAh son 40x30x8 mm, las de 2000 mAh, 50x60x5 mm y las de 5000 mAh, 60x100x6 mm³.

²⁸ Extraído de <https://blog.330ohms.com/2020/06/22/que-diferencias-hay-entre-una-li-po-y-una-li-ion/>

Debido a que brinda mayor seguridad, un costo similar y una forma más compacta, se escogerá una batería Li-Po. Estas baterías suelen venir en múltiplos de 3.7 V. Debido a que los componentes operarán con un voltaje de 3.3 V, se seleccionará una batería de Li-Po de 3.7 V. En ese sentido, en la Tabla 3.7 se resumen las capacidades y precios de algunas de esas baterías disponibles en el mercado.

Tabla 3.7 Baterías de Li-Po de 3.7 V disponibles en el mercado

Li-Po		
Voltaje	Modelo/Forma	Precio
3.7V 300mAh	General/ tipo cuadrangular	S/. 19 ²⁹
3.7V 720mAh	General/tipo cuadrangular	S/. 30 ³⁰
3.7V 1000mAh	General/tipo cuadrangular	S/. 25 ³¹
3.7V 2000mAh	YCDC/ tipo cuadrangular	S/. 35 ³²
3.7V 5000mAh	YCDC/ tipo cuadrangular	S/. 70 ³³

En general, las baterías de Li-Po se suele cargar con un módulo TP4056 como se muestra en la Figura 4.4. Este cuenta con protección por sobrecarga, subcarga y cortocircuito.



Figura 3.5 Módulo TP4056

Por otro lado, el conversor de voltaje se encargará de disminuir el voltaje de la batería para que sea compatible con los sensores y el microcontrolador. Existen dos tipos: los conmutados y los lineales. Entre los conmutados se tienen los convertidores step-down, step-up y los mixtos. Los conversores lineales solo tienen la capacidad de reducir el

²⁹ Precio extraído de https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-441940126-bateria-recagable-de-litio-lipo-37v-300mah-battery-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=ad0e8140-7498-426c-8229-19545149fb5c

³⁰ Precio extraído de https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-441940190-bateria-recagable-de-litio-lipo-37v-720mah-battery-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=65cadb70-3714-4d5e-80b7-e10829eeab49

³¹ Precio extraído de https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-434693644-bateria-lipo-li-polimero-37-v-1000-mah-recargable-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=0812e7c1-324e-4db1-a69b-e256e2249455

³² Precio extraído de <https://www.siarperu.com/store/#view=00414>

³³ Precio extraído de <https://www.siarperu.com/store/#view=00414>

voltaje a la salida. La salida de voltaje del conversor dependerá de la entrada de voltaje en el microcontrolador y en los otros componentes; por ello, este conversor deberá tener una salida estable en 3.3 V. La principal característica del conversor debe ser la capacidad de recibir un voltaje de entrada de entre 2.6 V y 4.2 V (salida de la batería). Asimismo, se seleccionará en base al precio y a la calidad que ofrece el producto. Dentro de la calidad se considerará la documentación y la marca. En la Tabla 3.8 se muestran los productos comerciales que cumplen con dichos requisitos.

Tabla 3.8 Conversores de con salida de 3.3V voltaje

Nombre	Entrada	Precio	Calidad
S7V8F3	Conversor a 3.3 V	\$ 9.95	Documentación/Pololu
S7V8A	Conversor a 2.5 - 8 V	\$ 9.95	Documentación/Pololu
DD0603B_3V3	Conversor a 3.3 V	\$ 9.59	Sin documentación/NI

No se consideró un regulador lineal, pues la salida de la batería estará entre 4.2 y 2.6 V como voltajes máximo y mínimo respectivamente. Debido a que un regulador lineal solo puede disminuir el voltaje, no podría trabajar con baterías de 3.7V. Por lo tanto, se seleccionará el conversor S7V8F3, debido a que ofrece mejor calidad el cual se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Conversor a 3.3V S7V8F334

Finalmente, se realizará el cálculo de la capacidad de la batería. Para ello, se tendrá en cuenta las corrientes promedio que cada componente drenará de la batería, así como las eficiencias de conversión de la batería. Estas son mostradas en la Tabla 3.9. Cabe mencionar que el diseño contempla el uso prolongado del dispositivo por al menos 8 horas seguidas.

³⁴ Imagen extraída de <https://www.pololu.com/product/212>

Tabla 3.9 Gasto de corriente de los componentes del dispositivo

Componente	Cant.	Corriente (por unidad)	Corriente (por componente)
Placa de microcontrolador Atmega328	1	6 mA	6 mA (estimado)
MPU- 9250	2	10 mA	20 mA
Pantalla TFT resistiva de 2.8''	1	150 mA	150 mA
Convertor a 3.3V S7V8F3	1	NI	2 mA (estimado)
Módulo TP4056	1	NI	1 mA (estimado)
Total			180 mA

La eficiencia del convertor S7V8F3 a voltajes entre 3V y 4.2V es de 90% aproximadamente de acuerdo a la ficha técnica. Se igualará la potencia de la batería con la potencia consumida considerando la eficiencia y un factor de seguridad de 1,5. Asimismo, se considerará que la curva de descarga tiene en promedio un voltaje de 3.7V. El cálculo de la autonomía se muestra a continuación.

$$\text{Potencia de entrada} * \text{eficiencia} = \text{Potencia de salida} * \text{FS}$$

$$3.7V * \text{Autonomía} * 0.9 = 3.3V * 180mA * 8h * 1.5$$

Por lo tanto, la batería necesita de 2140 mAh para una autonomía de 8 horas continuas de uso. Entonces, se seleccionará una batería de 2000 mAh, de menor capacidad, debido a que se ajustará el brillo de la pantalla mediante modulación por ancho de pulso, lo cual reducirá considerablemente el gasto de energía y aumentará la autonomía real del sistema a más de 8h.

3.2 Modelo simplificado de las conexiones en el sistema eléctrico - electrónico

En la Figura 3.7 se observan las conexiones para cada componente electrónico, así como los pines a los cuales están conectados a modo de una simplificación ilustrativa del diagrama esquemático del dispositivo realizado con el software *Fritzing*. Cabe mencionar que algunos componentes que se muestran no son exactamente los que se usarán, como el módulo de tarjeta SD (se usará microSD) o la batería de 1300 mAh (se usará una de 2000 mAh), debido a que sus modelos 3D en este *software* no estaban disponibles. Sin embargo, los pines a utilizar y las conexiones son idénticos en los componentes

originalmente seleccionados. El diagrama esquemático detallado se presenta en el Capítulo 6.

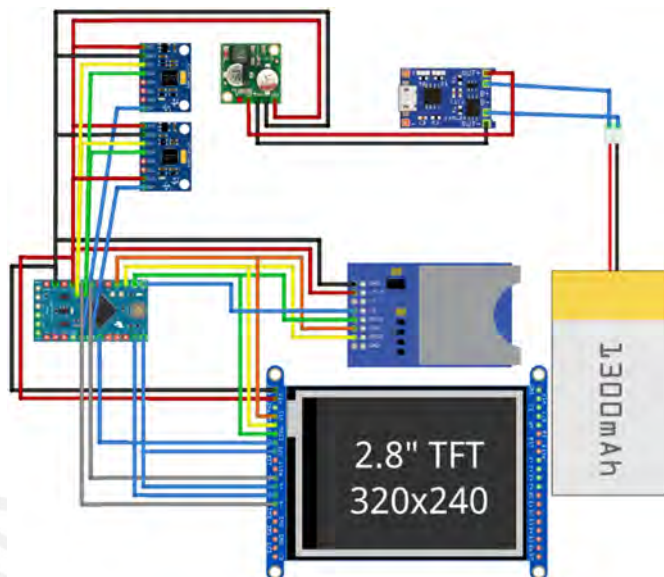


Figura 3.7 Modelo simplificado de las conexiones del sistema eléctrico-electrónico

3.3 Diagrama de protocolos de comunicación

En la Figura 3.8 se muestra los protocolos de comunicación con los cuales los periféricos se comunican con el microcontrolador. Ambos IMU's se comunican mediante el protocolo I2C. De manera similar, el lector micro-SD y la pantalla táctil transferirán información a través del protocolo SPI. Finalmente, el circuito divisor de voltaje transfiere la información sobre el nivel batería mediante un pin analógico.

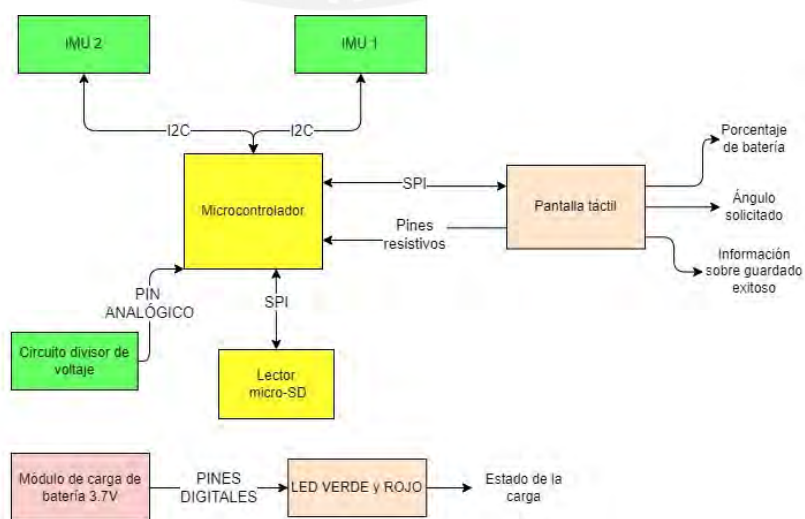


Figura 3.8 Diagrama de protocolos de comunicación

De manera separada, el cargador enciende un pin rojo y uno verde. El rojo significa que está en proceso de carga y el verde, que está cargado totalmente.

3.4 Diseño de la tarjeta electrónica

En esta sección se diseñará el PCB que contendrá los periféricos. En primer lugar, se planteará el diagrama esquemático. Luego, se pasará al diseño de la tarjeta PCB. Esta se verá afectada con las dimensiones de la pantalla TFT de 2.8'' y se planteará como un *shield* para la pantalla con la finalidad de ahorrar espacio y cables. Asimismo, se mostrará el modelo 3D de la tarjeta electrónica. Sus medidas servirán de base para el diseño de la caja electrónica, la cual se mostrará en el siguiente capítulo. Cabe mencionar que todos los modelos esquemáticos se diseñaron con el software EasyEDA.

3.4.1 Diseño del diagrama esquemático

En primer lugar, en la Figura 3.9 se tiene el esquemático del módulo cargador. El cual recibe 5V de voltaje desde una entrada micro-USB. Esta es inicialmente filtrada mediante una serie de condensadores. El integrado IP2312U, el cual necesita un inductor de 1.5 uH de acuerdo a su hoja técnica, regula la corriente entrante a la batería. Las etiquetas LED_RED y LED_GREEN sirven para indicar las conexiones con los respectivos ledes. La etiqueta +BATT indica la conexión positiva de la batería y resistencia de 133K conectada al nodo CHRG regula la corriente de carga a 1 A según la Ecuación 3.1.

$$I_{CHRG} = 135000 / R_{CHRG} \quad (3.1)$$

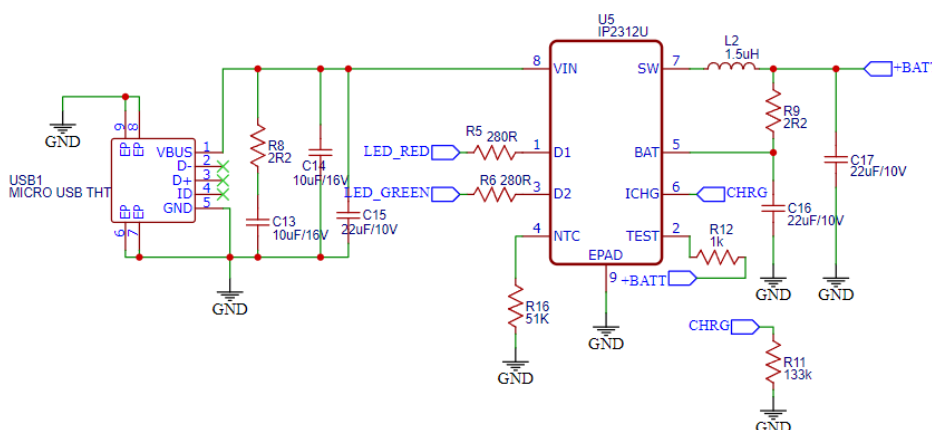


Figura 3.9 Esquemático del módulo cargador

Luego, en la Figura 3.10 se presenta el esquemático del módulo de protección, el cual impide que la batería se sobrecargue, se subcargue o entre en cortocircuito. Esto se logra con el integrado FS312F-G, el cual cierra automáticamente la salida de corriente de la batería cuando se detecta el voltaje de sobredescarga de 2.9 V, y detiene la carga de la batería cuando se detecta el voltaje de sobrecarga de 4.145 V, de acuerdo a la hoja técnica. Asimismo, el MOSFET de canal N doble (FS8205) añade la protección ante cortocircuito.

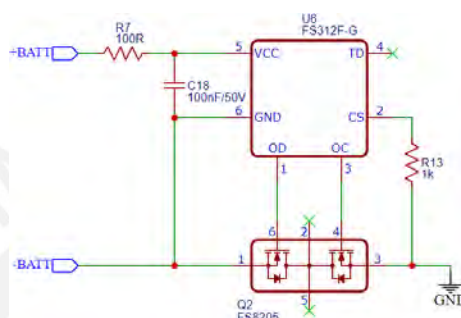


Figura 3.10 Esquemático del circuito de protección

A continuación, en la Figura 3.11 se presenta el circuito de regulación de voltaje. Este consta de una fase de estabilización con 3 condensadores (C1, C2, y C3). Luego, mediante el conversor *buck-boost* TP63060, se regula la entrada de voltaje de la batería, la cual varía entre 2.9 V y 4.15 V, a un valor estable de 3.3V. De acuerdo a la ficha técnica, el voltaje es regulado mediante las resistencias R3 y R4. El voltaje en el pin FB es de aproximadamente 0.5V y VOUT se rige mediante la Ecuación 3.2.

$$V_{OUT} = V_{FB} * (1 + R3/R4) \quad (3.2)$$

Con los valores mostrados para R3 y R4, se logra un voltaje estable a la salida de 3.3V.

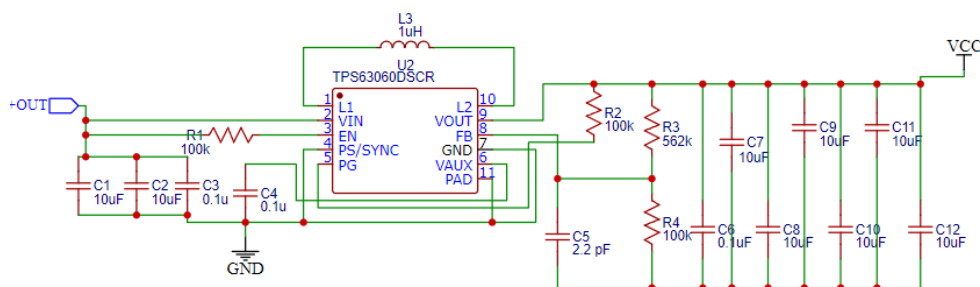


Figura 3.11 Esquemático del circuito de regulación de voltaje a 3.3 V

Por otro lado, en la Figura 3.12 se muestra el circuito divisor de voltaje, el cual se encontrará entre el nodo +OUT, el cual está conectado mediante el switch de encendido al nodo +BATT. Esta es la salida de la batería cuando no está en proceso de carga, por lo cual varía entre 4.15 y 2.9V. Debido a que el máximo voltaje que debe pasar a uno de los pines analógicos del Arduino Pro Mini es de 3.3V, el circuito divisor de voltaje es requerido. Con las resistencias R18 y R19 se divide el voltaje de +OUT máximo, 4.15V, hasta 3.29V, que es un valor aceptable para una entrada analógica. Asimismo, se consideró la impedancia máxima de entrada, que, de acuerdo a la hoja técnica debe ser menor a 10 kOhm. En este caso se utilizaron las Ecuaciones 3.3 y 3.4.

$$3.3 \text{ V} = 4.15 \text{ V} * \left(\frac{R19}{R18 + R19} \right) \quad (3.3)$$

$$R18 // R19 < 10 \text{ K} \quad (3.4)$$

Mediante estas dos ecuaciones se llegaron a valores de 9.09K y 34.8K para las resistencias R18 y R19, respectivamente.

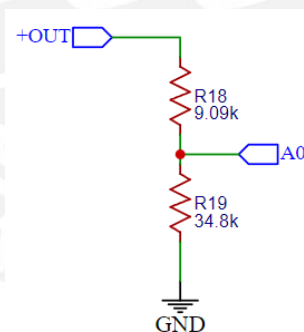


Figura 3.12 Regulador de voltaje (circuito lector de nivel de batería)

Otro periférico que se encontrará en el PCB es el lector micro-SD, el cual se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo SPI, el cual requiere 5 pines. En la parte izquierda de la Figura 3.13 se muestran las conexiones entre el lector y los pines del microcontrolador. Cabe mencionar que los pines MISO, MOSI y SCK corresponden a los pines del Pro Mini 12, 11 y 13 respectivamente.

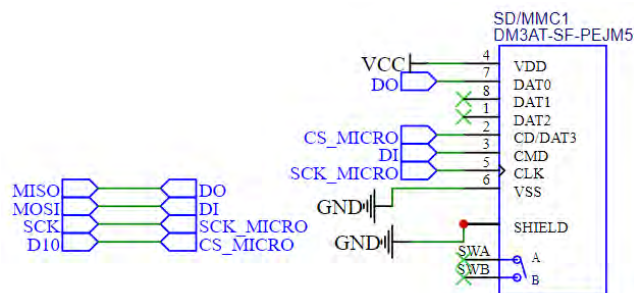


Figura 3.13 Esquemático del lector micro-SD

Por otro lado, en la Figura 3.14 se muestran las conexiones para la comunicación con la parte SPI de la pantalla TFT 2.8'' de Adafruit, con la cual se podrán mostrar caracteres. Asimismo, se muestran los pines para la comunicación con la parte táctil de la pantalla TFT: LCD_Y+, LCD_X+, LCD_Y- y LCD_X-. Estos pines se deben conectar al menos con 2 pines analógicos; en este caso se usaron A2 y A3, así como D8 y D9 como pines digitales adicionales.

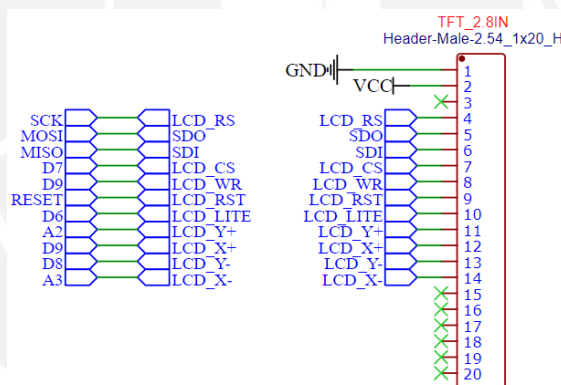


Figura 3.14 Esquemático de las conexiones con la pantalla TFT 2.8''

Finalmente, en la Figura 3.15 se muestran las conexiones para la comunicación I2C con los IMU's. Este protocolo requiere VCC, GND, SDA, SCL más un pin para la interrupción del DMP (*digital motion processor*).

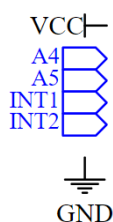


Figura 3.15 Esquemático de las conexiones con los IMU's

3.4.2 Diseño del PCB

A partir de las dimensiones de la pantalla TFT de 2.8'' (ver Figura 3.16) y los diagramas esquemáticos anteriormente descritos, se elaboró la tarjeta PCB (ver Figura 3.17).

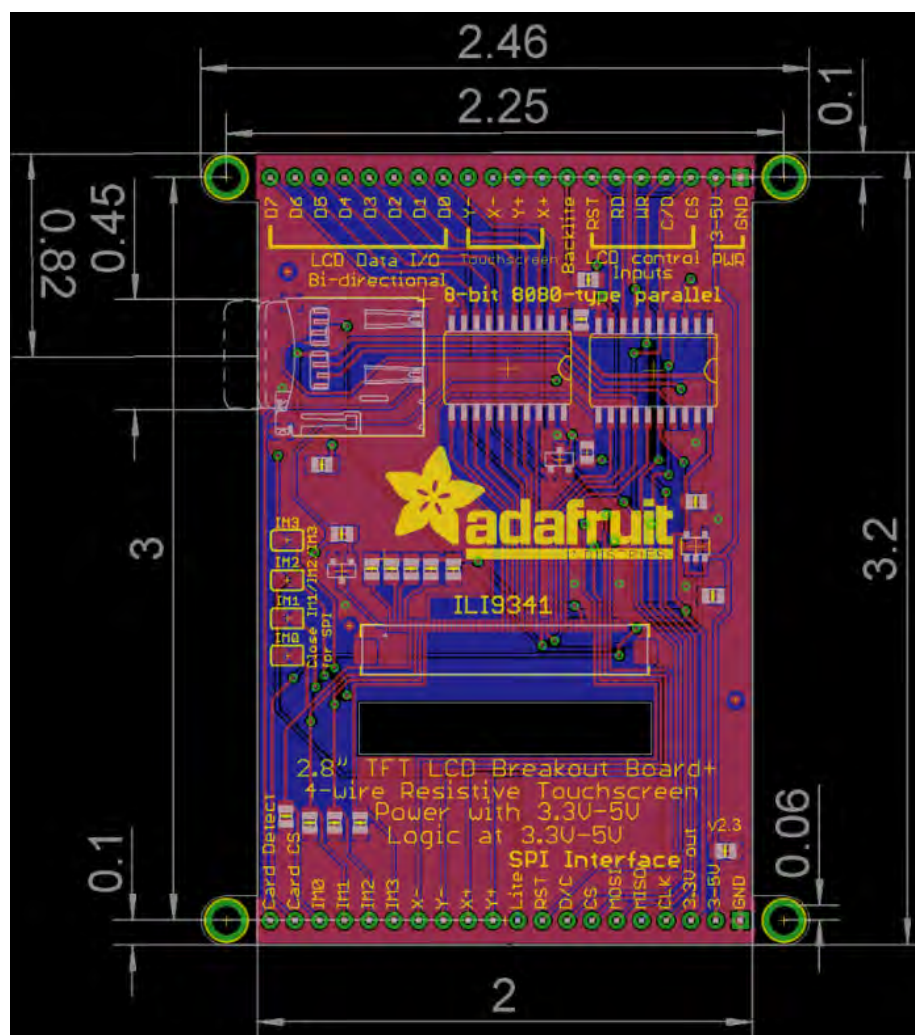


Figura 3.16 Diagrama de diseño de la pantalla TFT de 2.8''³⁵

Las dimensiones de la tarjeta son de 50.8 mm de ancho por 81.3 mm de largo. Este tamaño coincide con la base de la pantalla de 2 pulgadas de ancho y 3.2 pulgadas de largo. Se hicieron cortes a los costado para ahorrar materia y disminuir el peso. Las dimensiones de estos detalles tambien se muestran en la Figura 3.17. Asimismo, se muestran las ubicaciones de todos los elementos planteados en los diagramas esquemáticos. Estas medidas servirán de base para el diseño de la caja electrónica.

³⁵ Extraído de <https://learn.adafruit.com/assets/15461>

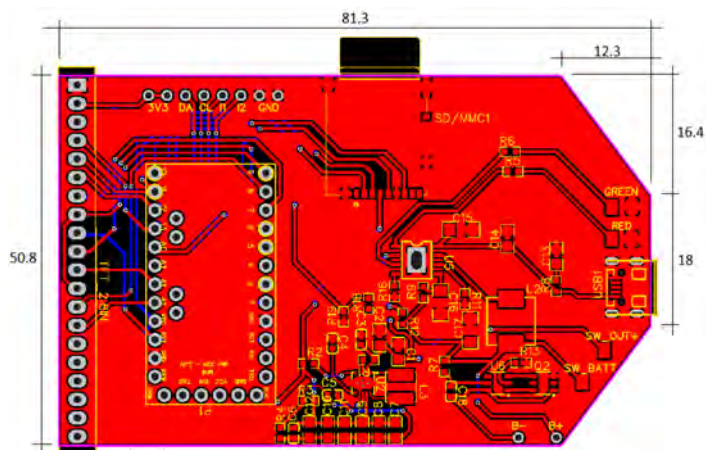


Figura 3.17 Vista superior del PCB

3.4.3 Modelado de la tarjeta electrónica

En la Figura 3.18 se muestra el modelo 3D de la tarjeta PCB propuesta. Dicha tarjeta está diseñada para contener los elementos planteados en los esquemáticos, es decir, el regulador de tensión, el cargador, el circuito protector, el lector microSD, entre otros, así como distintos *pads* que servirán de interfaz para elementos que se encontrarán exteriores a la caja electrónica. Como *pads* se encuentran las conexiones a la batería en la parte inferior derecha. Más a la derecha se tienen los *pads* para el *switch* de encendido. Las conexiones para el USB tipo C del cargador y los *pads* para dos ledes se muestran en el extremo derecho. En la parte superior izquierda, se tienen también los *pads* para la conexión a los IMU's. La hilera de conectores machos de la izquierda empalma directamente con los conectores hembra de la pantalla TFT 2.8".

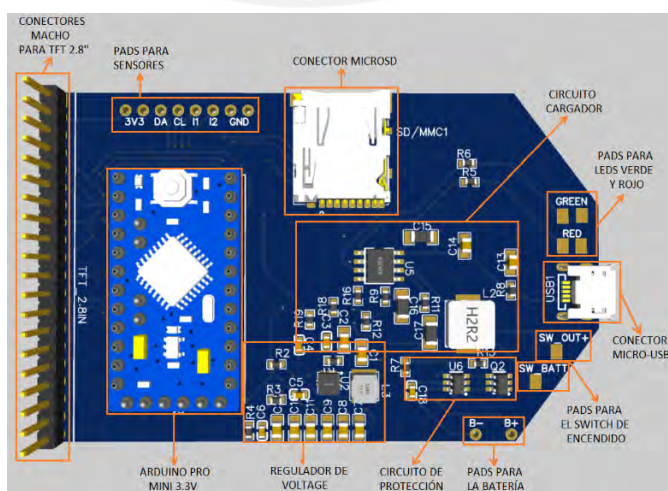


Figura 3.18 Vista superior de modelo 3D de la placa electrónica

3.4.4 Consideraciones previas al ensamblado electrónico

Se deben tener en cuenta 2 consideraciones antes de ensamblar el sistema electrónico en el PCB. En primer lugar, se deben soldar los puentes IM1, IM2 e IM3 a 3.3V. Esto se debe a que al soldar estos la pantalla cambia del modo 8 bits al modo SPI, con lo cual queda configurado para recibir señales de estos pines del modo SPI.



Figura 3.19 Ubicación de los pines IM de la pantalla TFT de 2.8"

En segundo lugar, como se muestra en la Figura 3.20, el esquemático del Arduino Pro Mini no viene con las 2 resistencias que se requiere en los canales SDA y SCL para el funcionamiento correcto del protocolo SPI. Sin embargo, sí cuenta con los puentes necesarios para soldar dichas resistencias. Estas están colocadas en la parte trasera de la tarjeta Pro Mini como se muestra en la Figura 3.21.

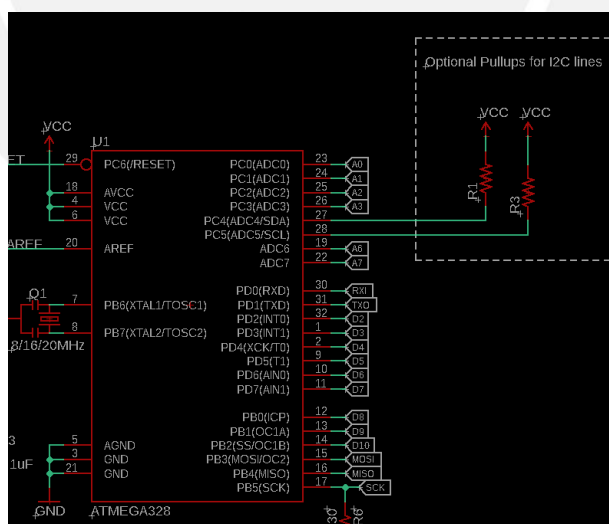


Figura 3.20 Esquemático del Arduino Pro Mini 3.3V

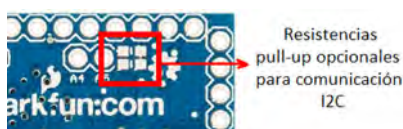


Figura 3.21 Ubicación de los puentes de soldadura de las resistencias opcionales para I2C

CAPÍTULO 4

DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se describirá el proceso de diseño mecánico. Primero se recolecta información sobre las medidas de las muñecas y brazos del público objetivo, es decir, individuos de entre 137.8 y 180 cm de altura con un Índice de Masa Corporal (IMC) normal. Con esto se pretende abarcar al 98% de la población peruana. Los materiales deberán cumplir con ser livianos, fácilmente encontrados en el mercado e hipoalergénicos. Asimismo, en conjunto, el dispositivo no deberá pesar más de 1 kg. Finalmente, se presentará un modelo en 3D que cumplan con los requerimientos planteados en el capítulo anterior.

4.1 Dimensiones de la muñeca y brazo

En este apartado se brindará información acerca de las medidas de la muñeca y brazo para el público objetivo, especialmente de las zonas de apoyo físico para los sensores.

En primer lugar, se muestra la Ecuación 4.1 que relaciona la amplitud de la mano y la estatura) para una población joven de la India (Patel, 2012). Debido a las similitudes en estatura entre dicha población y la peruana, se considera que la Ecuación 4.1 es suficiente para estimar la amplitud de manos en la población peruana. La amplitud de la mano es una medida importante, pues de esta dependerá la longitud del velcro en los sensores.

$$\text{Estatura} = 121.69 + 5.4188 * \text{Amplitud de la mano} \quad (4.1)$$

Sin embargo, la Ecuación 4.1 tiene un coeficiente de correlación R de 0.467. Por ello, en la Figura 4.1 se muestra la recta de correlación de otra muestra tomada también en India (Charmode, 2019). En esta se observa la gran dispersión alrededor de la recta, por lo que deberá ser considerada al hacer suposiciones acerca de la amplitud de la mano en la población peruana.

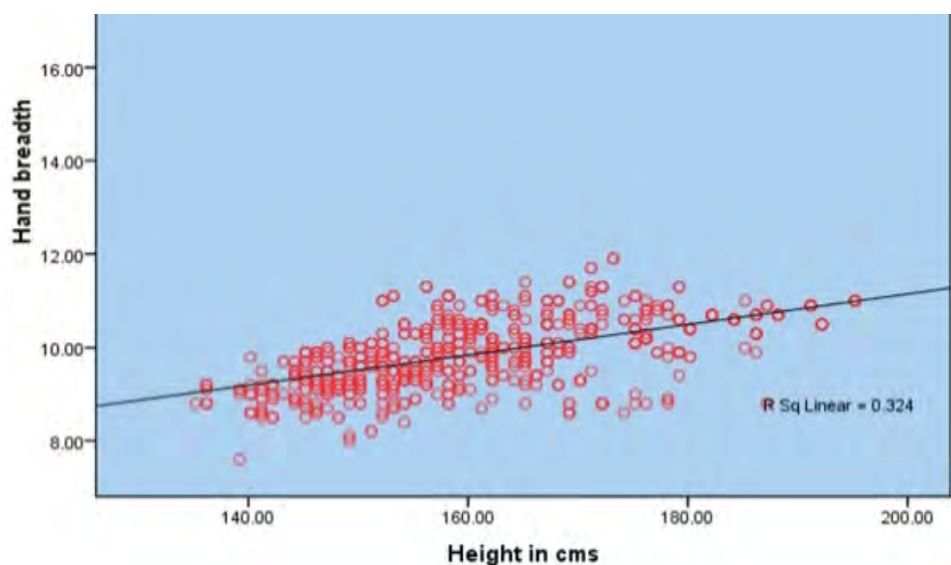


Figura 4.1. Gráfico de correlación entre amplitud de la mano (*hand breadth*) y altura (*height*). (Charmode, 2019)

En el Capítulo 2 se determinó que el dispositivo se diseñará para individuos de estatura entre 138 cm y 180 cm. En este sentido, la amplitud de mano que corresponde a ese intervalo varía entre 8 cm y 11 cm, es decir, lo que significa que hay una variación de 37.5% entre la longitud mínima y máxima.

En segundo lugar, en la Figura 4.2 se muestra la relación entre el IMC y la longitud de la circunferencia del brazo. Como se delimitó en el Capítulo 2, se considerará a individuos con un IMC entre 16 y 27 kg/m². A partir de esta figura, se deduce que la circunferencia del brazo para este grupo de individuos tendrá una longitud entre 17 y 35 cm. A modo de ilustrar cómo se realiza esta medición, en la Figura 4.3 se muestra el lugar donde se ubica la circunferencia, en el intermedio entre el acromion (punta del hombro) y el olécranon (saliente del codo).

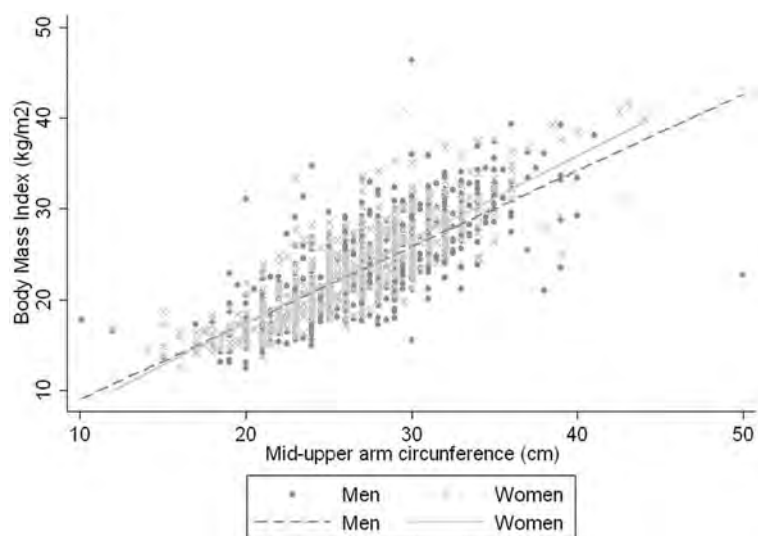


Figura 4.2. Gráfico que muestra la relación entre el IMC y la circunferencia media del brazo³⁶

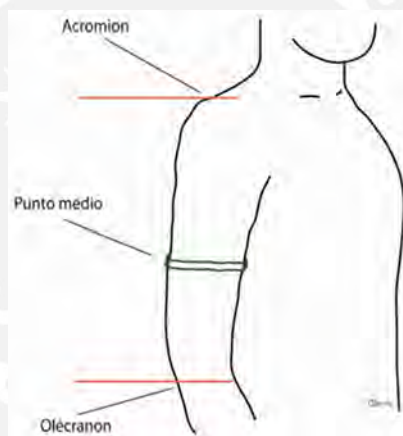


Figura 4.3. Punto de medición para el arco del brazo³⁷

4.2 Selección de materiales y componentes mecánicos

En este apartado se presentarán los materiales que se usarán para el elástico, el velcro, la estructura de la caja electrónica y la estructura de la caja de los sensores. Asimismo, se seleccionará el cable saliente de los sensores y los conectores. Los materiales en contacto con la piel deben cumplir con ser hipoalérgicos. Por otro lado, el material de la caja electrónica debe cumplir con ser liviano, poco costoso y debe poder ser adquirido en el mercado peruano.

³⁶ Extraído de <https://journals.plos.org/plosone/article/figure?id=10.1371/journal.pone.0160480.g002>

³⁷ Extraído de <https://www.endocrinologiapediatrica.gal/Auxologiaextremidades/3.3.html>

4.2.1 Materiales de los elásticos y el velcro

El velcro es un material que se compone de dos lados: los ganchillos(macho) y los bucles enroscados(hembra). Estos se venden por metro y de anchos variables. Entre las variantes del velcro se encuentran los adhesivos, elásticos, enganches, troquelado, cosidos, ambos lados, etc. En la Figura 4.4 se observa el velcro cosido, el cual se propone para la aplicación presente, pues este puede unirse mediante costura de máquina con el elástico o con otras cintas de velcro. El ancho que se propone es de 1 cm cortado, por lo cual debería adquirirse en cintas de 5 o 10 cm.



Figura 4.4 Cinta de velcro macho(inferior) y hembra(superior)³⁸

Por otro lado, hay una gran variedad de tipos de elástico; entre ellos se encuentra el elástico crochet, el redondo, *spandex*, picot, etc. De estos, se propone usar el *spandex*, pues presenta gran capacidad de estiramiento de hasta 300%. Como se muestra en la Figura 4.5, el *spandex* también se puede adquirir en cintas de diferente ancho. En Perú, este es más conocido como licra. En la elaboración del ajuste para la estructura del sensor se utilizará una cinta de 1cm de este material.



Figura 4.5 Cinta de *spandex* de 1cm

³⁸ Extraído de <https://amimu.es/goma-y-velcro/460-cinta-de-cierre-coser-tipo-velcro-machohembra.html>

4.2.2 Material para las cajas

De acuerdo a los requerimientos para las cajas, estas deben ser livianas, por lo cual se plantea usar polímeros termoplásticos. Debido a que su función será principalmente protectora ante la humedad y el polvo, y su funcionalidad no incluye resistencia a grandes cargas, es una opción recomendable para la estructura de las cajas. Uno de los procesos más comunes para su fabricación es la extrusión. Esta es más ventajosa como impresión 3D para cantidades pequeñas. En ese sentido, en la Tabla 4.1 se muestran los materiales para impresión 3D más comunes en el mercado peruano.

Tabla 4.1 Características de los materiales para impresión por extrusión 3D

Característica	PLA ³⁹	ABS ⁴⁰	PETG	Nylon ⁴¹
Costo (PEN/cm ³) ⁴²	1.87	-	1.87	-
Densidad (g/cm ³) ⁴³	1.24	1.05	1.27	1.52
Esfuerzo de fluencia (MPa)	40-50	18.5-51	47.9-52.9	66
Dureza (HV)	17-27	5.6 - 15.3	14.4-15.9	
Temperatura de servicio(°C)	45-55	62-77	51-54	
Características adicionales	Biodegradable, Inflamable, Aislante, Usado para prototipos	Rígido, Excelente resistencia al impacto, química y a la abrasión, Aislante, Reciclable	Usado para botellas de agua, Buena resistencia química, Reciclable, Menos rígido que el PLA y el ABS	Usado para engranajes, sprockets y otras piezas mecánicas similares; Alta resistencia al impacto

Basado en las características revisadas en la Tabla 4.1, se optará por usar PETG, debido al costo de 1.87 PEN/cm³, su alta resistencia química a agentes externos y su reciclabilidad como material.

4.2.3 Selección de cables y elementos de conexión

En los cables de conexión de la batería se usarán los conectores JST de 2 mm de separación de pines. Este es el estándar en la mayoría de las baterías de Li-Po de 3.7V. En la Figura 4.6 se muestra un modelo referencial de este conector.

³⁹ Extraído de <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-1%C3%A1ctico/propiedades-del-pla>

⁴⁰ Extraído de <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/>

⁴¹ Extraído de <https://www.makebot.com/stories/design/nylon-3d-printing/>

⁴² Precios consultados con la empresa Pinkoyo 3D

⁴³ Información extraída de <https://bitfab.io/es/blog/densidades-materiales-3d/>




Figura 4.6 Conector JST de 2mm

En el caso de los sensores, los cables que conecten deben ser delgados de 5 núcleos (para el transporte de las 5 señales). De acuerdo a la Tabla 4.2, se requiere cables de un calibre menor a 34 AWG, pues se considera que los sensores no consumirán más de 50 mA, considerando un factor de seguridad de 2.5.

Tabla 4.2 Características de los calibres según la norma AWG y SWG

AWG	Dia mm	SWG	Dia mm	Max Amps	Ohms / 100 m
11	2.30	13	2.34	12	0.47
12	2.05	14	2.03	9.3	0.67
13	1.83	15	1.83	7.4	0.85
14	1.63	16	1.63	5.9	1.07
15	1.45	17	1.42	4.7	1.35
16	1.29	18	1.219	3.7	1.48
18	1.024	19	1.016	2.3	2.04
19	0.912	20	0.914	1.8	2.6
20	0.812	21	0.813	1.5	3.5
21	0.723	22	0.711	1.2	4.3
22	0.644	23	0.640	0.92	5.6
23	0.573	24	0.559	0.729	7.0
24	0.511	25	0.508	0.577	8.7
25	0.455	26	0.457	0.457	10.5
26	0.405	27	0.417	0.361	13.0
27	0.361	28	0.376	0.288	15.5
28	0.321	30	0.315	0.226	22.1
29	0.286	32	0.274	0.182	29.2
30	0.255	33	0.254	0.142	34.7
31	0.226	34	0.234	0.113	40.2
32	0.203	36	0.193	0.091	58.9
33	0.180	37	0.173	0.072	76.7
34	0.160	38	0.152	0.056	94.5
35	0.142	39	0.132	0.044	121.2

Como referencia, se tiene el cable aislado UL2547 a un precio entre 5 y 13 USD por un lote de 5m. Como se muestra en la Figura 4.7, este cable tiene un diámetro externo de 3.5 mm para la versión de 5 núcleos.



Size	Core	Conductor	Shielding No.	Outer Diameter	Packing/Roll
28AWG	2C	7/0.12TS	40/0.10TS	2.8mm	300M
28AWG	3C	7/0.12TS	45/0.10TS	3.0mm	300M
28AWG	4C	7/0.12TS	50/0.10TS	3.2mm	300M
28AWG	5C	7/0.12TS	55/0.10TS	3.5mm	300M

Figura 4.7 Especificaciones del cable UL2547⁴⁴

⁴⁴ Extraído de <https://es.aliexpress.com/item/4000716036730.html>

4.3 Modelado 3D de las partes mecánicas

En esta sección se presentarán los modelos 3D tanto de la caja electrónica como de la caja para los sensores. Estas principalmente tienen la función de proteger los componentes contra el polvo y la humedad, así como de proporcionar soporte y estabilidad.

4.3.1 Caja electrónica

La caja electrónica se encargará de dar soporte y protección a los elementos internos como la pantalla o la tarjeta electrónica, así como permitir la interfaz con las múltiples entradas (microSD y micro USB). En ese sentido se diseñará de modo que ocupe el mínimo espacio posible.

En primer lugar, en la Figura 4.8 se observa la tapa de la caja que protegerá los pines de la pantalla ante elementos externos. Esta tiene 4 ranuras circulares dentro de las cuales se podrá ajustar a la estructura con tornillos M2x8.

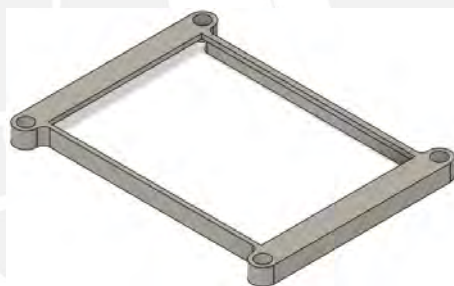


Figura 4.8 Tapa de la caja electrónica

Respecto de la tarjeta electrónica y la pantalla, se deberá tener en cuenta la altura total de estas dos para iniciar con el diseño de la base de la caja. Como se muestra en la Figura 4.9, la separación en ensamble pantalla-tarjeta varía entre 6.25 mm y 8.75 mm.

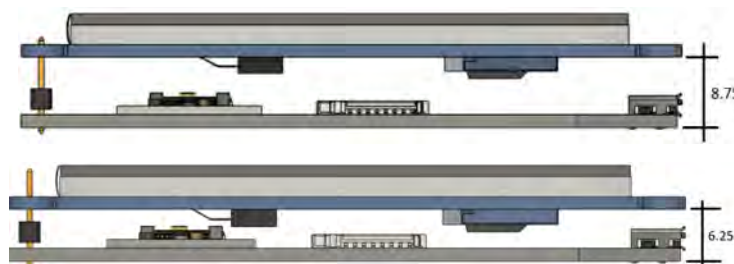


Figura 4.9 Altura mínima y máxima posible del ensamble pantalla-tarjeta

En base a estas dimensiones, y con la finalidad de tener espacio suficiente para los periféricos, como los leds y el interruptor de encendido, se elige la altura mayor para el diseño de la base de la caja electrónica. Continuando con el diseño, en la Figura 4.10 se muestra la base de la caja electrónica con los agujeros para la salida del lector de tarjeta micro SD, la alimentación (micro USB), el interruptor de encendido, los leds (rojo y verde) y las salidas de los cables de 3.5mm de diámetro para los sensores.



Figura 4.10 Base de la caja electrónica (vista superior)

Por otro lado, es importante tener un compartimento para guardar la batería. Las dimensiones de esta, según el fabricante, son de 34x50x10 mm. Por ello, como se muestra en la Figura 4.11, debajo del compartimento para la tarjeta, se diseñará un espacio amplio para la batería, sus cables y un adicional para el mecanismo de cierre.



Figura 4.11 Base de la caja electrónica (vista inferior)

Asimismo, el mecanismo de cierre es similar a las tapas de otros aparatos electrónicos, debido a que usa un par de salientes inferiores y un agujero para un tornillo M2x5 de la norma DIN 7985 (ver Figura 4.12).

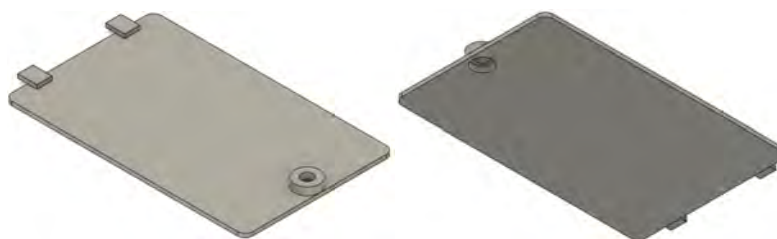


Figura 4.12 Tapa de la base inferior: vista superior(izquierda) y vista inferior(derecha)

4.3.2 Caja de sensor

El modelo de la caja del sensor se muestra en la Figura 4.13a. Esta estructura está basada en las dimensiones de la tarjeta GY-9250, las cuales son de 15x25x1.5 mm. El mecanismo de colocación será por deslizamiento, es decir, el módulo se desplazará por dentro de la caja y se fijará por presión, como se muestra en la Figura 4.14. Luego, esta será tapada por la tapa mostrada en la Figura 4.13 b. Esta cuenta con un agujero para los cables salientes del sensor y se adherirá mediante pegamento de cianocrilato aplicado a la base. Asimismo, en la Figura 4.14 se muestra la vista superior del ensamble de la caja del sensor; en esta se encuentra la inscripción de un triángulo, la cual será usada para indicar la orientación del sensor.

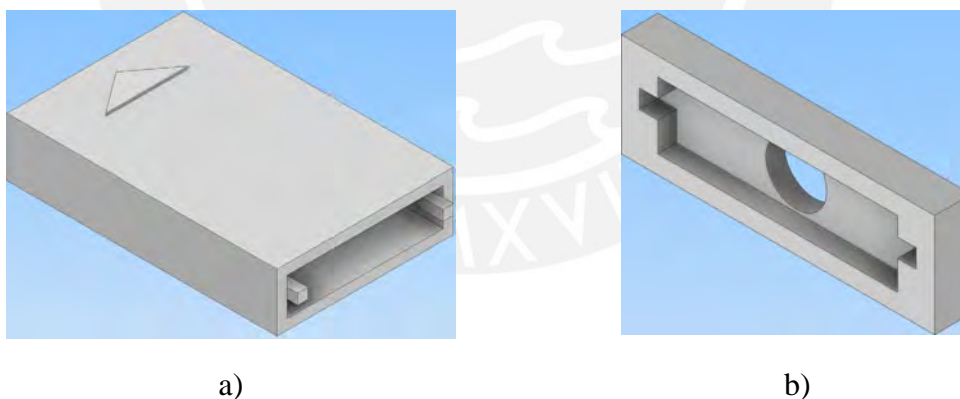


Figura 4.13 Caja del sensor: a) Base de la caja y b) Tapa de la caja

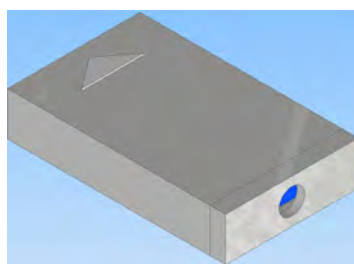


Figura 4.14 Ensamble total de la caja del sensor

4.3.3 Vista explosiva del dispositivo

Finalmente, en la Figura 4.15 se muestra la vista explosionada con todos los componentes de la caja electrónica. En esta figura se pueden apreciar los insertos para tuercas redondas M2x8 de la norma GB 809, las cuales se usan para roscar las tuercas M2x8 y de la norma DIN 7985.

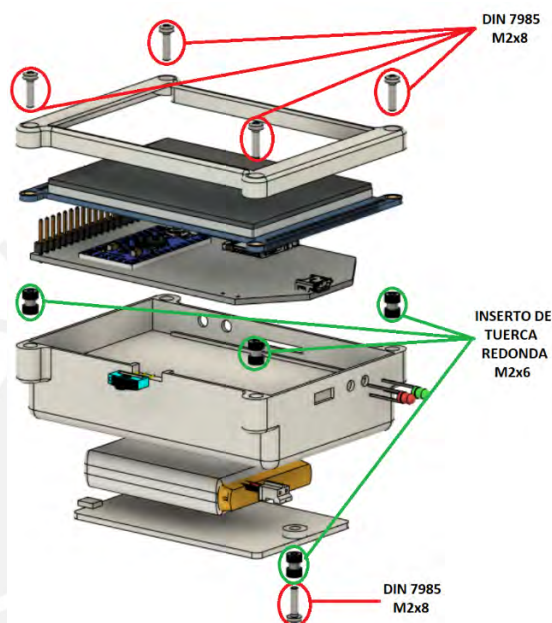


Figura 4.15 Vista explosionada del dispositivo

4.4 Dimensionamiento de los elásticos y el velcro

A partir de la información presentada en el apartado anterior, se procede a dimensionar el sujetador y ajustador para el sensor. Su función es impedir que el sensor se deslice por la muñeca y mantenerlo alineado.

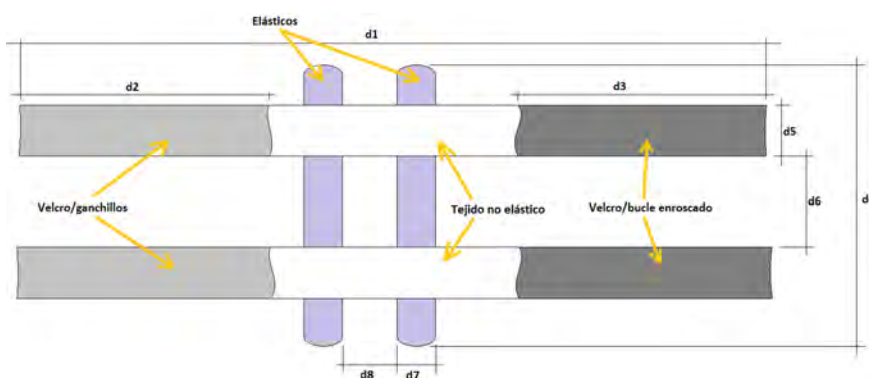


Figura 4.16 Boceto del elástico y el velcro de ajuste

En la Figura 4.16, se muestra un boceto de la estructura sujetadora del sensor. Las Ecuaciones 4.2 a 4.9 muestran las relaciones entre las dimensiones del elástico y el velcro con las cuales se hallan las distancias d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , d_6 , d_7 y d_8 en base a las medidas antropométricas expuestas en la Sección 4.1.

$$d_8 + 2d_7 \leq 17, \text{ entonces } d_8 = 3 \text{ (separación del elástico)} \quad (4.2)$$

$$d_7 = 7 \text{ (ancho del elástico)} \quad (4.3)$$

$$d_6 + 2d_5 \leq 27, \text{ entonces } d_6 = 5 \text{ (separación del velcro)} \quad (4.4)$$

$$d_5 = 10 \text{ (ancho del velcro)} \quad (4.5)$$

$$d_4 = (31 + 6) / 1.5 = 25 \text{ (se considerará que el } \textit{spandex} \text{ estará estirado)} \quad (4.6)$$

$$350 < d_1, \text{ entonces } d_1 = 380 \quad (4.7)$$

$$d_2 = d_3 \text{ (por conveniencia)} \quad (4.8)$$

$$d_1 - d_2 - d_3 < 160, \text{ entonces } d_2 = d_3 = 140 \quad (4.9)$$

Finalmente, en la Figura 4.17 se muestra el sujetador calculado puesto sobre la caja del sensor. Además, se observa el tamaño relativo de la caja del sensor respecto del sujetador y el cable de 5 núcleos.

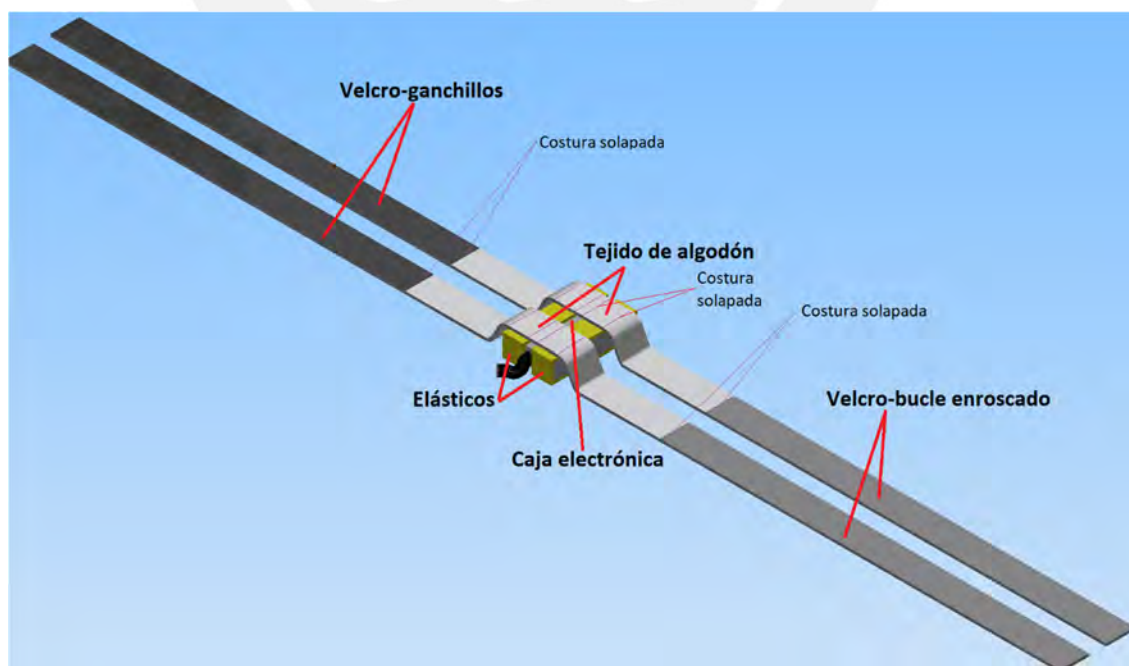


Figura 4.17 Sujetador del sensor ajustando la caja del sensor

CAPÍTULO 5

ALGORITMO Y PROGRAMACIÓN DEL DISPOSITIVO

En este capítulo se describirán las consideraciones previas que se asumieron para la programación del dispositivo. Luego, se detallará el algoritmo de cálculo de los ángulos de la muñeca. Adicionalmente, se mostrará el método de calibración para el giroscopio y el acelerómetro. Finalmente se mostrarán las ventanas de las que está compuesta la interfaz con el usuario y las opciones disponibles al usuario.

5.1 Consideraciones previas

Debido a que el dispositivo tiene como objetivo medir los 6 ángulos en ambas muñecas, se describen a continuación ciertas consideraciones que se tendrán en cuenta para la programación de dicho dispositivo.

En primer lugar, la ubicación de los IMU para cada movimiento difiere. En particular, en el movimiento de pronación y supinación, los ejes de los IMU sobre los cuales se realiza la medición del ángulo varían con respecto a los otros cuatro movimientos. Esto se debe a la orientación del MPU-9250 dentro de la caja del sensor, al diseño del sistema de ajuste para este y a la orientación de los ejes del giroscopio, acelerómetro y magnetómetro en la placa MPU-9250. En general, el eje anatómico sobre el cual se posiciona el IMU y el eje del IMU deberán ser siempre paralelos. En cambio, el eje sobre el cual se realiza la medición del ángulo podrá variar de acuerdo al movimiento y al brazo (izquierdo o

derecho). En la Tabla 5.1 se observan mejor estas diferencias. Se puede notar también que el IMU1 toma el rol de brazo fijo, en tanto el IMU2 cumple la función de brazo móvil.

Tabla 5.1 Orientación de los IMU con respecto a los ejes de la muñeca y el codo durante los diferentes tipos de movimiento

Lado	Izquierdo		Derecho	
IMU	IMU1	IMU2	IMU1	IMU2
Supinación	Eje Y positivo // línea longitudinal del húmero	Eje Y positivo // cara palmar del antebrazo	Eje Y positivo // línea longitudinal del húmero	Eje Y positivo // cara palmar del antebrazo
Eje de medición	+Y	-X	+Y	+X
Pronación	Eje Y positivo // línea longitudinal del húmero	Eje Y positivo // cara dorsal del antebrazo	Eje Y positivo // línea longitudinal del húmero	Eje Y positivo // cara dorsal del antebrazo
Eje de medición	+Y	+X	+Y	-X
Flexión/ Extensión	Eje Y positivo // a línea longitudinal del cúbito	Eje Y positivo // quinto metacarpiano	Eje Y positivo // línea longitudinal del cúbito	Eje Y positivo // quinto metacarpiano
Eje de medición	+Y	+Y	+Y	+Y
Abducción/ Aducción	Eje Y positivo // línea media del antebrazo	Eje Y positivo // tercer metacarpiano	Eje Y positivo // línea media del antebrazo	Eje Y positivo // al tercer metacarpiano
Eje de medición	+Y	+Y	+Y	+Y

Se observa que el eje de medición del IMU 1 siempre corresponde al eje +Y; en cambio el eje de medición para el IMU2 puede variar entre -X, +X y +Y dependiendo de la medición.

5.2 Diagrama de flujo del programa

A continuación, se describirá el flujo del programa a utilizar para la programación del microcontrolador. Como se muestra en la Figura 5.1, se comienza configurando los periféricos y realizando la calibración inicial. Luego de la calibración se pasa a la pantalla principal, en la que se preguntará por la opción que se desea mediante botones (S: selección movimiento, Z: configurar el cero, C: calibrar o G: guardar medición). Si se presiona S, se pasa a la pantalla de selección de brazo, en la cual elegirá en qué brazo se realizará la medición; luego se pasa a la pantalla de selección de movimiento, en la cual se selecciona uno de los 6 movimientos. Si se presiona C, se pasará a la pantalla de calibración, en donde se tendrá que presionar el botón INICIO para comenzar con la calibración. Si se presiona Z, se capturará el valor actual del ángulo. El ángulo mostrado en pantalla se obtendrá restando el ángulo capturado del ángulo medido.

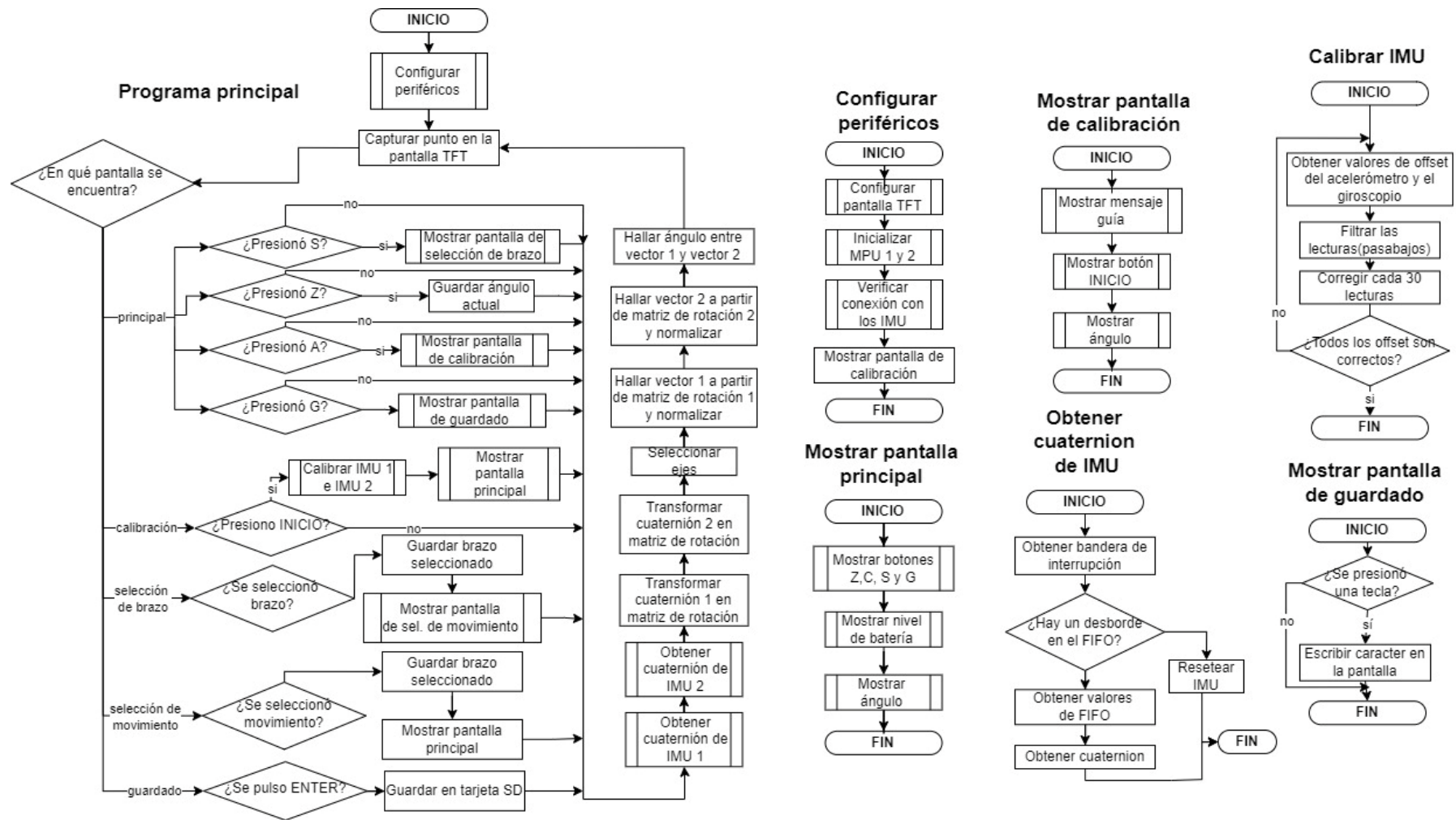


Figura 5.1. Diagrama de flujo del programa

Finalmente, si se presiona G, se procederá a guardar la medición. Asimismo, en la Figura 5.1 también se muestra el diagrama de flujo para los subprogramas más importantes como “Configurar periféricos”, “Mostrar pantalla principal”, “Mostrar pantalla de calibración”, “Obtener cuaternión del IMU” y “Calibrar IMU”.

5.3 Algoritmos y lógica de control

En este apartado se presentará el algoritmo de programación de los IMU9250. El principal problema a resolver será la disminución de los errores y la calibración de ambos sensores. Estos errores incluyen, por ejemplo, la deriva de integración del giroscopio⁴⁵, ruido electromagnético, sensibilidad térmica, desalineación, errores de fabricación y otros desconocidos. Algunos métodos usados para reducir estos errores van desde la aplicación de un filtro digital básico hasta la fusión de sensores con un filtro de Kalman. En este proyecto se usará indirectamente uno de estos métodos para estimar la orientación absoluta de los sensores IMU. Luego, conociendo dichas orientaciones, se podrán calcular los ángulos de cada movimiento de la muñeca para instantes discretos de medición.

5.3.1 Método de obtención de los cuaterniones

El algoritmo que se ejecuta al interior del IMU-9250 es propietario, por lo cual su funcionamiento no es conocido. El DMP (*digital motion processor*) se encarga de ejecutar este algoritmo y puede enviar directamente los cuaterniones por la interfaz I2C. La ventaja de tener este DMP radica en que reduce la carga de cálculo en el procesador (ATmega328). La librería usada para acceder al DMP se llama MPU9150 y fue desarrollada por Jeff Rowberg⁴⁶. El código para la obtención de los cuaterniones se muestra en la Figura 5.2 y fue extraído de un ejemplo llamado MPU9150_DMP9, el cual viene incorporado en la librería. Dada la similitud entre el MPU9250 y el MPU9150, se puede usar esta librería sin problemas.

⁴⁵ Todas las unidades de medición inerciales sufren del fenómeno de deriva por integración. Este consiste en la variación de la orientación por integrar velocidades angulares con un *offset* erróneo. Esto se debe a que el proceso de fabricación no es perfecto, por lo cual el giroscopio mide, en reposo, valores pequeños de velocidad angular, que con el tiempo van desviando la medición de la orientación.

⁴⁶ Ver <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/MPU9150>

```

while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();

// read a packet from FIFO
mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);

// track FIFO count here in case there is > 1 packet available
// (this lets us immediately read more without waiting for an interrupt)
fifoCount -= packetSize;

#ifdef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
  // display quaternion values in easy matrix form: w x y z
  mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
  Serial.print("quat\t");
  Serial.print(q.w);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(q.x);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(q.y);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(q.z);
#endif

```

Figura 5.2 Código para obtención de un cuaternión del MPU-9250

El DMP trabaja en conjunto con un FIFO de 1024 bytes dentro del MPU-9250. Los resultados del DMP se guardan en dicho FIFO y son leídos en bloques por el microcontrolador mediante la instrucción “*mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize)*”. Esta instrucción almacena, en un arreglo llamado “*fifoBuffer*”, un número de bytes igual a “*packetSize*”. Luego, como se muestra en la Figura 5.3, se seleccionan ciertos bytes del FIFO mediante la función “*mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer)*”. Estos *bytes* son reacomodados y escalados para obtener un cuaternión.. Esta última función se observa en la Figura 5.3, la cual fue tomada de la librería mencionada. Cabe mencionar que dicha función hace uso de la información del acelerómetro y el giroscopio; sin embargo, el fabricante da la posibilidad de adicionar el magnetómetro mediante su software propietario

```

uint8_t MPU9150::dmpGetQuaternion(int16_t *data, const uint8_t* packet) {
  // TODO: accommodate different arrangements of sent data (ONLY default)
  if (packet == 0) packet = dmpPacketBuffer;
  data[0] = ((packet[0] << 8) + packet[1]);
  data[1] = ((packet[4] << 8) + packet[5]);
  data[2] = ((packet[8] << 8) + packet[9]);
  data[3] = ((packet[12] << 8) + packet[13]);
  return 0;
}

uint8_t MPU9150::dmpGetQuaternion(Quaternion *q, const uint8_t* packet) {
  // TODO: accommodate different arrangements of sent data (ONLY default)
  int16_t qI[4];
  uint8_t status = dmpGetQuaternion(qI, packet);
  if (status == 0) {
    q -> w = (float)qI[0] / 16384.0f;
    q -> x = (float)qI[1] / 16384.0f;
    q -> y = (float)qI[2] / 16384.0f;
    q -> z = (float)qI[3] / 16384.0f;
  }
  return 0;
}

```

Figura 5.3 Función “*dmpGetQuaternion*” en el archivo MPU9150_9Axis_MotionApps41.h

5.3.2 Método de cálculo de un ángulo con 2 cuaterniones

Se sabe que un cuaternión representa la rotación de un sistema de referencia con respecto a otro. En la Figura 5.4 se muestra el diagrama de rotaciones para ambos IMU. Estas rotaciones están pueden estar representadas tanto como matrices de rotación como por giros alrededor de cierto eje.

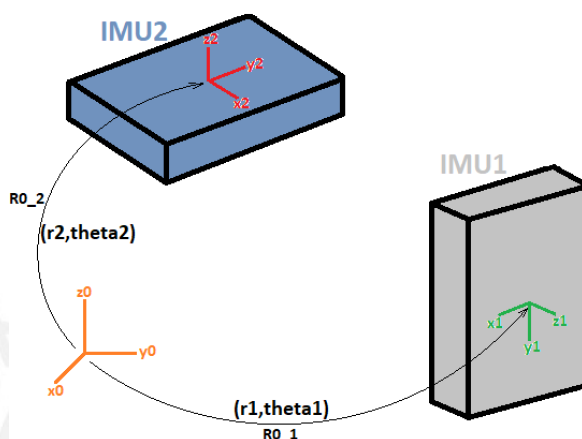


Figura 5.4 Diagrama de rotación (orientación de los sistemas locales aleatoria)

La matriz de rotación representa, en una matriz de 3x3, los vectores unitarios del sistema final en función de los vectores unitarios del sistema inicial. Como se observa en la Ecuación 5.1, las columnas de la matriz de transformación corresponden a los vectores unitarios del sistema 1 con respecto al sistema 0; por ejemplo, el vector unitario \$x_{0_1}\$ representa al vector unitario \$x_1\$ en función de \$x_0, y_0\$ y \$z_0\$.⁴⁷

$$RO_{1_0} = \begin{bmatrix} x_0 * x_1 & x_0 * y_1 & x_0 * z_1 \\ y_0 * x_1 & y_0 * y_1 & y_0 * z_1 \\ z_0 * x_1 & z_0 * y_1 & z_0 * z_1 \end{bmatrix} = [x_{0_1} \quad y_{0_1} \quad z_{0_1}] \quad (5.1)$$

$${}^0_1\hat{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4] = \left[\cos \frac{\theta_1}{2} \quad r_{1_x} \sin \frac{\theta_1}{2} \quad r_{1_y} \sin \frac{\theta_1}{2} \quad r_{1_z} \sin \frac{\theta_1}{2} \right] \quad (5.2)$$

Adicionalmente, esta rotación también puede representarse mediante una rotación de \$\theta_1^\circ\$ alrededor de un eje unitario \$r_1\$ según la Ecuación 5.2. A esta representación con 4 parámetros se le llama cuaternión.

⁴⁷ La operación “*” hace referencia a la multiplicación escalar de vectores.

Este cuaternión se puede dividir en 2 partes según la Ecuación 5.3, donde $\underline{r1}$ es el vector unitario del eje del cuaternion, equivalente a $[r1_x \ r1_y \ r1_z]$.

$$q_0 = \cos \frac{\theta_1}{2} \text{ y } \underline{q} = \sin \frac{\theta_1}{2} \underline{r1}, \text{ es decir } {}^0_1\hat{q} = [q_0 \ \underline{q}] \quad (5.3)$$

Asimismo, se conoce que una rotación alrededor de un eje es equivalente a una matriz de transformación mediante las Ecuaciones 5.4 y 5.5.

$$Rot(r1, \theta_1) = I + 2 [q_0 \underline{\tilde{q}} + \underline{\tilde{q}}^2] \quad (5.4)$$

$$\text{Donde}^{48}, \text{ para el vector } v, \underline{\tilde{v}} = \begin{bmatrix} 0 & -v_z & v_y \\ v_z & 0 & -v_x \\ -v_y & v_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Sabemos que ambas representaciones deben dar la misma rotación y el mismo sistema final. Entonces, al igualar las Ecuaciones 5.4 y 5.1 se obtiene la Ecuación 5.6.

$$Rot(r1, \theta_1) = R_{0_1} = [x_{0_1} \ y_{0_1} \ z_{0_1}] \quad (5.6)$$

De esta manera, es posible hallar los vectores unitarios de los ejes del sistema 1 con respecto al sistema 0. Conociéndose $Rot(r2, \theta_2)$, este mismo procedimiento se aplica al sistema 2 y se obtiene $[x_{0_2} \ y_{0_2} \ z_{0_2}]$ de acuerdo a la Ecuación 5.7.

$$Rot(r2, \theta_2) = R_{0_2} = [x_{0_2} \ y_{0_2} \ z_{0_2}] \quad (5.7)$$

Teniendo ambos sistemas representados con respecto al mismo sistema fijo, se puede hallar el ángulo entre 2 vectores; por ejemplo, la Ecuación 5.8 ejemplifica la manera de hallar el ángulo entre los vectores unitarios y_{0_1} e y_{0_2} . Como ambos son vectores unitarios, el ángulo entre ambos se halla mediante el arcocoseno del producto escalar de ambos vectores.

$$\text{Ángulo}_{1_2} = \arccos(y_{0_1} * y_{0_2}) \quad (5.8)$$

⁴⁸ La representación con tilde (~) es usada en la conversión un vector a su forma de matriz antisimétrica para facilitar las operaciones matriciales.

En conclusión, en la Figura 5.5 se resume el procedimiento para hallar el ángulo, el cual representaría el ángulo de la muñeca.

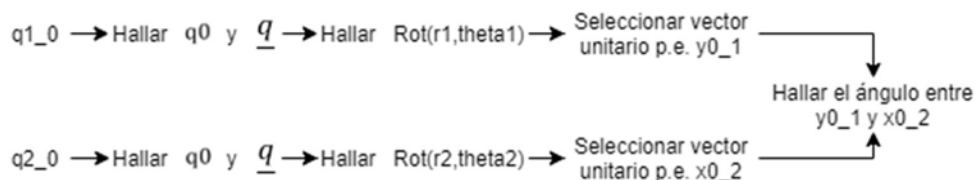


Figura 5.5 Procedimiento de cálculo del ángulo partiendo de 2 cuaterniones

5.3.3 Diseño del programa de interfaz con el usuario

Habiendo definido el algoritmo a usar, se continúa con la programación de la interfaz con el usuario. Como se mencionó con anterioridad, la pantalla resistiva TFT de 2.8'' de Adafruit será usada para brindar información al usuario. Cabe mencionar que el funcionamiento de la pantalla será simulado en Proteus; sin embargo, esto no impedirá depurar el código eficazmente.

La interfaz con el usuario constará de 5 ventanas que se mostrarán de acuerdo a las acciones que tomé el usuario. En primer lugar, como se muestra en la Figura 5.6, al activar el dispositivo, se mostrará la ventana de calibración en la pantalla. El usuario deberá seguir las instrucciones que se muestran en pantalla y pulsar en INICIO para proceder con la autocalibración, la cual dura aproximadamente 20 s. Durante este periodo, el usuario deberá colocar los sensores en un plano horizontal no inclinado y de manera paralela como se muestra en la Figura 5.7. Luego de esto, se pasará a la pantalla principal, en la cual se mostrarán 4 opciones, las cuales son “Seleccionar movimiento”, “Setear el cero”, “Autocalibración” y “Guardar medición”.

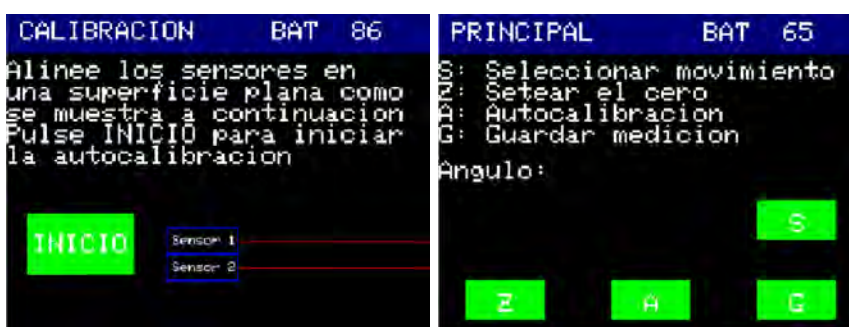


Figura 5.6 Ventana de calibración y ventana principal



Figura 5.7 Posicionamiento de los IMU durante la calibración

Por un lado, en la Figura 5.8 se muestra la pantalla de selección de movimiento. En esta se escogerá el tipo de movimiento y se configurarán los ejes de medición en el MPU-9250. Se puede notar que para los movimientos de pronación y supinación es importante saber en qué brazo se planea hacer la medición; en cambio, para los otros 4 movimientos es indiferente.



Figura 5.8 Ventana de selección del movimiento

Por otro lado, la opción “Setear el cero” permitirá al especialista configurar el ángulo inicial como 0 en la posición que desee y tomarlo como punto de inicio. La siguiente opción, “Autocalibración”, llevará al especialista a la ventana de calibración y se repetirá el proceso ya mencionado.

Finalmente, la opción “Guardar medición” hará que se muestre la ventana de guardado (Figura 5.9). Esta incluirá un teclado tipo *qwerty* para ingresar el nombre del paciente. Luego, cuando se pulse “Enter” se almacenará el nombre y la medición en un archivo de texto. Cabe mencionar que, si no se cuenta con la tarjeta SD, no se mostrará esta ventana.

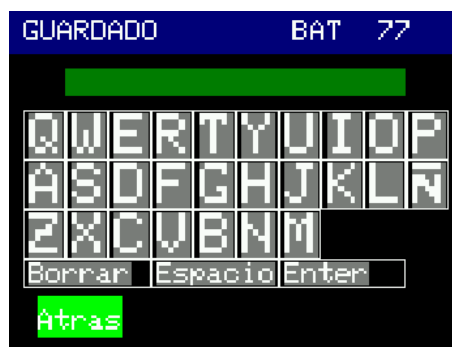


Figura 5.9 Ventana de guardado

Adicionalmente, se mostrará el porcentaje de batería en el dispositivo en todas las ventanas. Esto significa que, a medida que se use la batería, el porcentaje mostrado disminuirá gradualmente.

5.3.4 Diseño del programa para la calibración de los sensores

En esta sección se explicará el algoritmo y el código utilizado para hallar los *offset* que permitan calibrar el MPU. Este algoritmo consiste en filtrar las medidas ruidosas de las salidas del acelerómetro y giroscopio. Luego, modificar los *offset* paulatinamente dependiendo de si dichas medidas filtradas son superiores o inferiores a los valores que deberían tomar en estado de reposo. En el caso del giroscopio, la velocidad angular debería ser 0 en las 3 direcciones, en tanto el acelerómetro solo debería sentir +1g o una salida de 16384 en la dirección +z y 0g en las otras dos direcciones. El código para la calibración se muestra en la Figura 5.10.

```
void loop() {
  // Leer las aceleraciones y velocidades
  sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
  sensor.getRotation(&gx, &gy, &gz);

  // Filtrar las lecturas
  f_ax = f_ax - (f_ax >> 5) + ax;
  p_ax = f_ax >> 5;

  f_ay = f_ay - (f_ay >> 5) + ay;
  p_ay = f_ay >> 5;

  f_az = f_az - (f_az >> 5) + az;
  p_az = f_az >> 5;

  f_gx = f_gx - (f_gx >> 3) + gx;
  p_gx = f_gx >> 3;

  f_gy = f_gy - (f_gy >> 3) + gy;
  p_gy = f_gy >> 3;

  f_gz = f_gz - (f_gz >> 3) + gz;
  p_gz = f_gz >> 3;

  //Cada 30 lecturas corregir el offset
  if (counter==30){
    //Mostrar las lecturas separadas por un [tab]
    Serial.print("promedio:"); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_ax); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_ay); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_az); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_gx); Serial.print("\t");
    Serial.print(p_gy); Serial.print("\t");
    Serial.println(p_gz);

    //Calibrar el acelerómetro a 1g en el eje z (a
    if (p_ax>0) ax_o--;
    else {ax_o++;}
    if (p_ay>0) ay_o--;
    else {ay_o++;}
    if (p_az-16384>0) az_o--;
    else {az_o++;}

    sensor.setXAccelOffset(ax_o);
    sensor.setYAccelOffset(ay_o);
    sensor.setZAccelOffset(az_o);

    //Calibrar el giroscopio a 0°/s
    if (p_gx>0) gx_o--;
    else {gx_o++;}
    if (p_gy>0) gy_o--;
    else {gy_o++;}
    if (p_gz>0) gz_o--;
    else {gz_o++;}

    sensor.setXGyroOffset(gx_o);
    sensor.setYGyroOffset(gy_o);
    sensor.setZGyroOffset(gz_o);

    counter=0;
  }
  counter++;
}
```

Figura 5.10 Código para la calibración de los *offset* de los sensores

Cabe mencionar que el código mostrado en la Figura 5.10 en conjunto con el código de seteo de ángulo (ver Anexo H) permite mejorar la exactitud de las mediciones.

5.3.5 Explicación del código

Las funciones principales de las que se compone es programa se muestran en la Tabla 5.2 y se explican en comentarios juntos con el código en el Anexo G.

Tabla 5.2 Explicación de las principales funciones del programa

Función	Explicación
<i>void PantallaCalibracion()</i>	Se encarga de mostrar la ventana de calibración, en esta se puede presionar el botón INICIAR para dar comienzo a la calibración.
<i>void PantallaPrincipal()</i>	Se encarga de mostrar la ventana de principal desde donde se puede seleccionar las opciones de autocalibración, seteo del cero, selección del movimiento y guardado.
<i>void PantallaSeleccionBrazo()</i>	Se encarga de mostrar la ventana de selección de brazo izquierdo o derecho.
<i>void PantallaSeleccionMovimiento()</i>	Se encarga de mostrar la ventana de selección del movimiento a realizar (pronación, supinación, flexión, etc.)
<i>void PantallaGuardado()</i>	Se encarga de mostrar el teclado QWERTY y guardar el valor en una tarjeta SD:
<i>void MostrarNivelBateriaTFT()</i>	Esta función calcula el nivel de batería en base a su voltaje, y devuelve un valor entre 0 y 100.
<i>void MostrarAnguloTFT()</i>	Esta función muestra el ángulo medido en la pantalla TFT.
<i>void hallarMatrizHomogenea(Quaternion *q, float H[3][3])</i>	Esta función calcula la matriz de rotación en base a un cuaternion dado y la guarda en el arreglo H.
<i>void CalibrarMPU9150(MPU9150 *sensor)</i>	Esta función calibra los <i>offset</i> de un MPU9250 0 9150 paulatinamente durante aproximadamente 30 s.

CAPÍTULO 6

INTEGRACIÓN MECATRÓNICA

En este capítulo se integrará el resultado del desarrollo en los capítulos de mecánica, electrónica y software. En primer lugar, se mostrará el uso del dispositivo para cada movimiento. Luego, se mostrarán los resultados de las pruebas y simulaciones realizadas en un prototipo. Finalmente, se brindará una lista de verificación de los requerimientos planteados en el diseño conceptual.

6.1 Modo de uso

En esta sección se presentará el modo de uso del dispositivo en cada movimiento que se desee medir. Se usará para ello un modelo de brazo bastante similar a uno humano; con este se mostrarán las posiciones de ambos sensores para cada movimiento de la muñeca. Cabe mencionar que la ubicación del sensor 2 es diferente para medir pronación y supinación. Asimismo, se omite mostrar el uso en la muñeca derecha por ser análogo al uso en la muñeca izquierda. Se observa que en la cara superior de la caja del sensor hay una inscripción con un triángulo; este hace referencia a la orientación de los ejes de los sensores y sirve como indicador de que dicha cara deben colocarse hacia afuera. Con respecto al movimiento de supinación y pronación, la Figura 6.1 muestra la ubicación relativa de los sensores con respecto a la muñeca y antebrazo. Este se muestra para aclarar las Figuras 6.2 y 6.3.

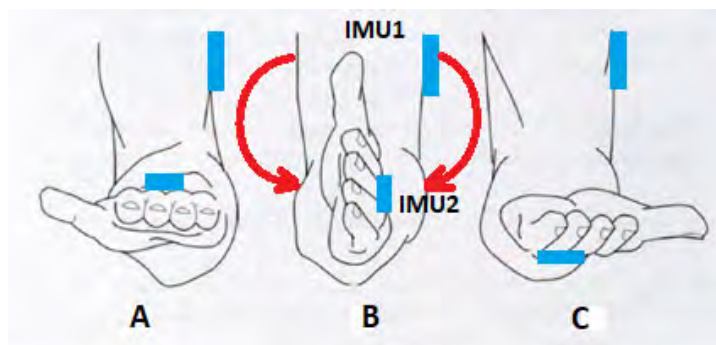


Figura 6.1 Movimiento de la mano en pronación (A) y supinación (C) con el codo a 90° a partir de la posición 0 (B).

a) Medición angular de la muñeca en supinación

En las Figura 6.2 y 6.3 se muestra el uso del dispositivo para la medición angular de la muñeca en supinación. La cara negra de la mano y antebrazo representa la cara dorsal de estos, mientras que la cara blanca hace referencia a la cara palmar. En ambas figuras se muestra la ubicación de los sensores. Con el codo a 90° el primer sensor se ubica a un costado del brazo paralelo al eje del húmero y el segundo se coloca en la cara dorsal del antebrazo paralelo al eje del antebrazo.

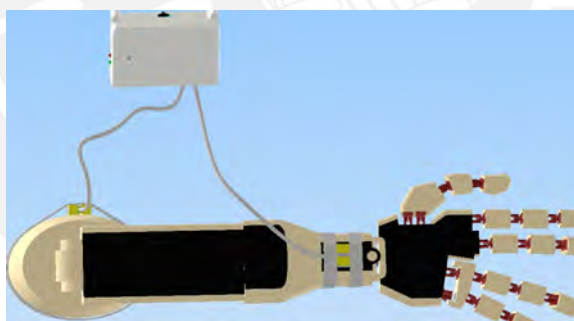


Figura 6.2 Vista inferior de la muñeca izquierda en supinación



Figura 6.3 Vista de perfil de la muñeca izquierda con el dispositivo en supinación (izquierda) y vista frontal de la muñeca en supinación (derecha)

b) Medición angular de la muñeca en pronación

Al igual que en supinación, en las Figuras 6.4 y 6.5 se muestra el uso del dispositivo para la medición angular de la muñeca en pronación. El posicionamiento de los sensores es el mismo al posicionamiento en supinación

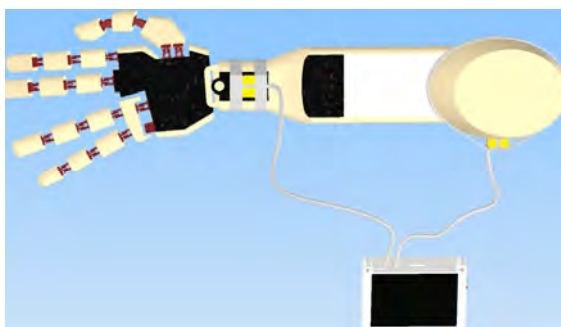


Figura 6.4 Vista superior de la muñeca izquierda con el dispositivo en pronación

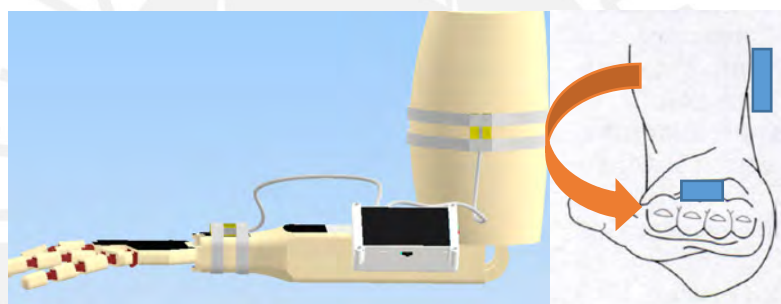


Figura 6.5 Vista de perfil de la muñeca izquierda con el dispositivo en pronación(izquierda) y vista frontal de la muñeca en pronación(derecha)

c) Medición angular de la muñeca en flexión

Por otra parte, en las Figuras 6.6 y 6.7 se muestra el uso del dispositivo para la medición angular de la muñeca izquierda en flexión. El primer sensor se ubica paralelo al eje del cúbito, por ello se nota movido hacia el exterior. El segundo sensor se ubica paralelo al quinto metacarpiano. Ambos se ubican en la cara dorsal de la mano y del antebrazo.

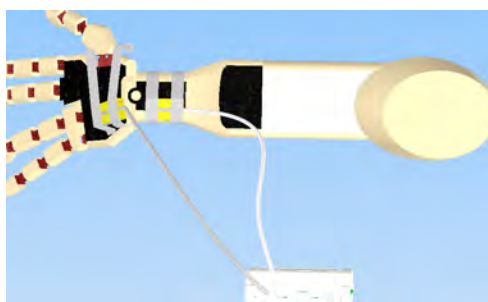


Figura 6.6 Vista superior de la muñeca izquierda en flexión

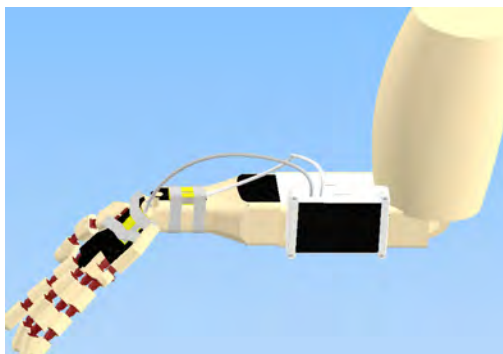


Figura 6.7 Vista frontal de la muñeca en flexión

d) Medición angular de la muñeca en extensión

Análogamente, en las Figuras 6.8 y 6.9 se muestra el uso del dispositivo para la medición angular de la muñeca izquierda en extensión. Respecto de la ubicación, los sensores se ubican de manera similar al caso de flexión. Asimismo, estos están ubicados en la cara dorsal de la mano y el antebrazo (representado por la cara negra).

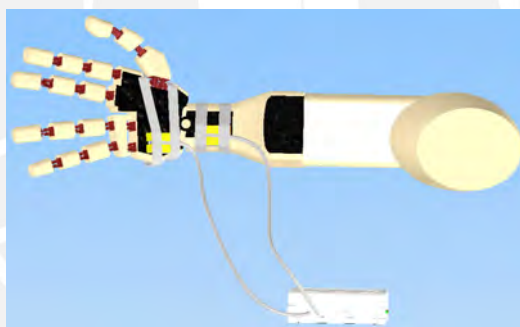


Figura 6.8 Vista superior de la muñeca izquierda en extensión

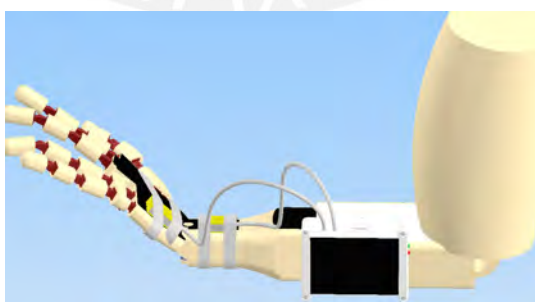


Figura 6.9 Vista frontal de la muñeca izquierda en extensión

e) Medición angular de la muñeca en aducción y abducción

Finalmente, se muestran en la Figuras 6.10 y 6.11 las vistas de la muñeca izquierda en aducción y en las Figuras 6.12 y 6.13, la muñeca izquierda en abducción. En ambos casos,

un sensor se ubica paralelo al eje del antebrazo (centrado) y el otro paralelo al tercer metacarpiano de la mano. Ambos son colocados en la cara dorsal de la mano y el antebrazo (representado por las caras negras).

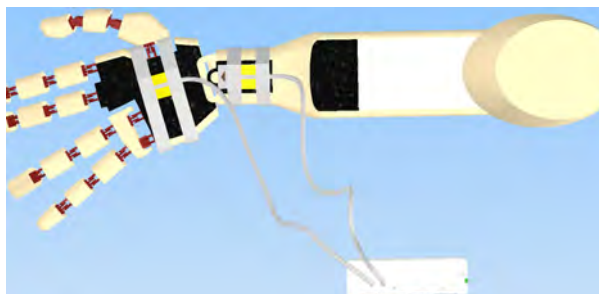


Figura 6.10 Vista superior de la muñeca izquierda en aducción

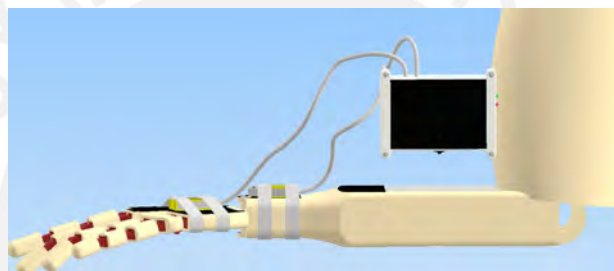


Figura 6.11 Vista frontal de la muñeca izquierda en aducción

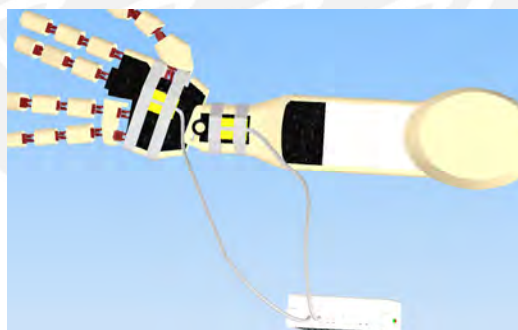


Figura 6.12 Vista superior de la muñeca izquierda en abducción

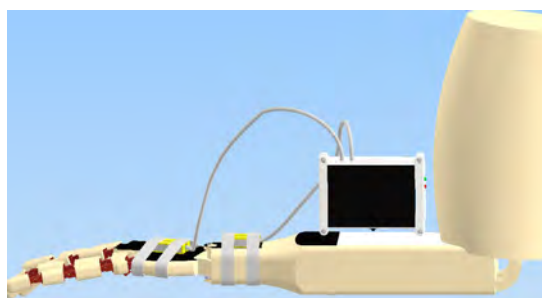


Figura 6.13 Vista frontal de la muñeca izquierda en abducción

6.2 Implementación y resultados

Respecto a la implementación, se adquirieron los módulos electrónicos necesarios para la verificación del funcionamiento del dispositivo. A continuación, se presentan las etapas de la implementación, así como los resultados de las pruebas.

6.2.1 Implementación de la interfaz gráfica

Como primer paso, se probó la interfaz gráfica y las funcionalidades de cada botón. Esta prueba incluye los componentes mostrados en la Figura 6.14. Las conexiones desde la pantalla hacia el microcontrolador son las siguientes: -X ->A3, -Y->9, +X->8, +Y->A2, D/C->9, CS->4, MOSI->11, MISO->12, CLK->13, Vin->VCC y GND->GND.

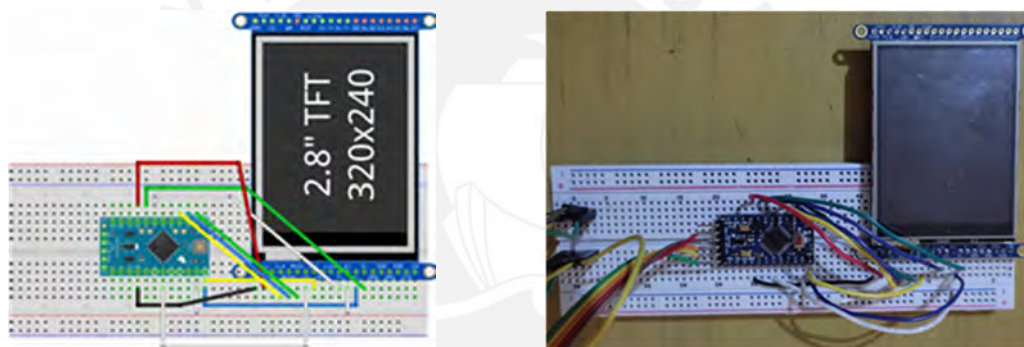


Figura 6.14 Esquemático de prototipo de prueba de la interfaz en Fritzing (izquierda) e implementación del prototipo de la interfaz en físico(derecha)

Asimismo, se probó el código en este prototipo omitiendo las partes de cálculo del ángulo. Las Figuras 6.15, 6.16 y 6.17 muestran las diversas ventanas de las que se compone la interfaz. Esta consta de 5 ventanas a las cuales se accede mediante los botones en verde.



Figura 6.15 Ventana de calibración(izquierda) y ventana principal(derecha)

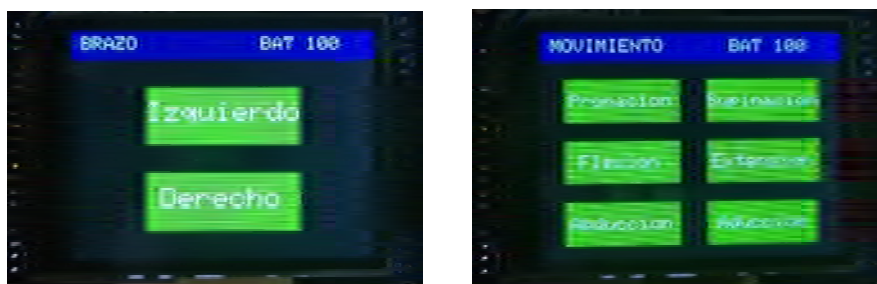


Figura 6.16 Ventana de selección de brazo(izquierda) y selección de movimiento(derecha)



Figura 6.17 Ventana de almacenamiento de datos

Finalmente, se verificó el correcto funcionamiento de cada ventana. Se probaron que todos los botones condujeran a la ventana correcta. Todo resultado en orden, con excepción del teclado QUERTY, en el que las letras se escribían varias veces cuando se mantenía presionado la tecla. Esto fue solucionado guardando la última letra y verificando que no se repitiera con excepción de la tecla de borrado y guardado.

6.2.2 Implementación del algoritmo de cálculo del ángulo

En segundo lugar, se escribió un código en el programa *Processing* para visualizar la orientación del IMU en un sistema de referencia inercial a partir de un cuaternión. Mediante comunicación serial, se pasa un *array* de *bytes* desde el Arduino Pro Mini al espacio de trabajo de *Processing*. Este ordena los bytes para formar un cuaternión y grafica la orientación del IMU mediante un “avión”. Las conexiones entre el Pro Mini y el MPU 9250 son las siguientes: VCC->VCC, GND->GND, SCL->A5, SDA->A4, AD0->GND e INT->2. Las Figura 6.18 muestra el resultado de graficar la orientación del IMU (representada por un avión) en 4 orientaciones diferentes. Cabe mencionar que la diferencia en orientación aparente entre el “avión” y el IMU se debe a la orientación de

la pantalla al momento de tomar las fotografías. Asimismo, se muestra la caja del sensor, en cuyo interior se encuentra el módulo MPU9250.

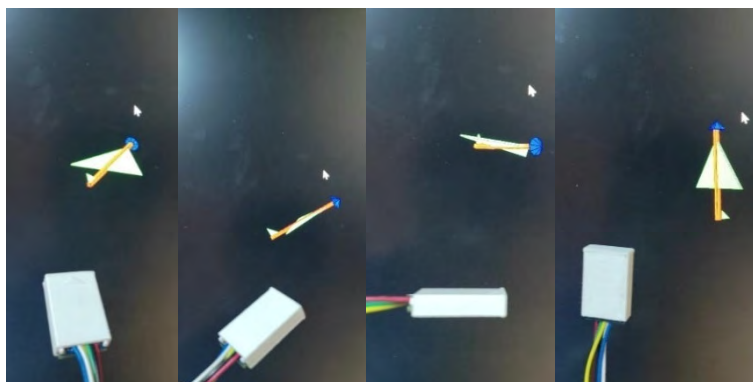


Figura 6.18 Visualización de la orientación del sensor IMU

6.2.3 Componentes mecánicos

Luego de imprimir en PLA un prototipo de la caja del sensor⁴⁹, se pudo constatar la falta de espacio para colocar el sensor a presión, así como los cables internos. También se observó que el agujero para el paso del cable era demasiado pequeño, por lo cual se hicieron mejoras en sus dimensiones. Estas dimensiones finales están indicadas en los planos correspondientes, que se encuentran en el Anexo H. En la Figura 6.19 se visualiza la caja del sensor (ensamblado y desensamblado).



Figura 6.19 Caja del sensor fabricada: a) desensamblada y b) ensamblada

⁴⁹ Con “caja del sensor” se hace referencia al ensamblado de la caja y a la tapa de PETG que protege al sensor. Esta referencia se usa a lo largo de todo este trabajo,

Por otro lado, con respecto a la caja electrónica⁵⁰ (Figura 6.20), se pudo verificar que no había juego entre las dimensiones de la tapa y la pantalla por lo cual se modificaron las dimensiones pertinentes para su correcto montaje. Luego de ello, se ensambló la pantalla y se verificó que la pantalla se pueda ingresar de manera holgada, como se muestra en la Figura 6.20c.

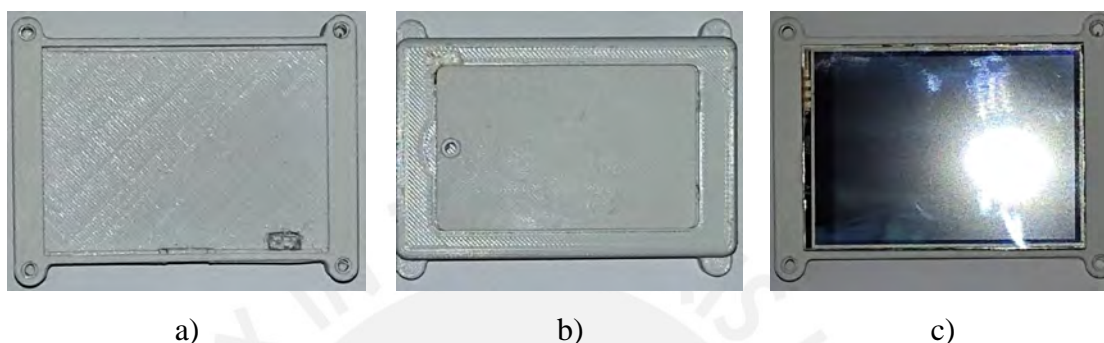


Figura 6.20 Caja electrónica fabricada: a) vista superior, b) vista inferior y c) encaje de pantalla

6.2.4 Experimentación y resultados

Se verificó la exactitud del dispositivo y el algoritmo diseñado, y para ello se implementó una prueba comparativa. Esta consiste en tomar fotos en distintas orientaciones de los sensores, hallar el ángulo entre dichos sensores y compararlos con el ángulo que resulta de usar el algoritmo. La configuración de la prueba consiste en lo siguiente: Se fijan los sensores con reglas de plástico de 20 cm de manera paralela para facilitar la medición gráfica⁵¹. Seguidamente, las reglas se ubican en una superficie plana horizontal, y la cámara (Huawei Y7) se ubica por encima y paralela a dicha superficie con ayuda de un trípode. Luego de la configuración se procede a capturar los valores de ángulos procesados por el algoritmo y a tomar las fotos respectivas. El ángulo se halla gráficamente utilizando el software libre *Kinovea*. Los resultados se dividen en 2; en una se medirá el ángulo respecto del eje transversal y en el otro, respecto de un eje vertical, como se muestra en la Figura 6.21. Las mediciones se pueden revisar con más detalle en el Anexo H.

⁵⁰ Con “caja electrónica” se hace referencia a la estructura de PETG diseñada para proteger y agrupar la pantalla TFT, la placa electrónica y demás componentes electrónicos con excepción de los sensores. Esta denominación se usa extensivamente en todo este trabajo.

⁵¹ La deformación de la regla, debido a su peso y los pesos del sensor y la caja del sensor, es casi despreciable



Figura 6.21 Medición de ángulo respecto del eje vertical (izquierda) y eje transversal (derecha)

En la Tabla 6.1 se comparan con los resultados del algoritmo tomados durante el experimento, y se hallan los errores absolutos y relativos.

Tabla 6.1 Comparación de resultados con respecto al eje vertical y transversal

	Resultado gráfico	Resultado del algoritmo	Error absoluto	Error relativo
VERTICAL	0,0	0,07	-0,07	-
	12,9	12,31	0,59	4,57 %
	31,5	30,31	1,19	3,81 %
	51,4	49,03	2,37	4,61 %
	70,8	67,83	2,97	4,19 %
	89,2	86,21	2,99	3,35 %
TRANSVERSAL	0,0	0,56	-0,56	-
	11,2	10,32	0,88	7,85 %
	25,1	23,92	1,18	4,70 %
	44,7	43,6	1,1	2,46 %
	60,3	59,67	0,63	1,04 %
	90,6	87,79	2,81	3,10 %

Los resultados muestran que el ángulo medido por el algoritmo es inferior al ángulo medido gráficamente por un error absoluto menor a 3° en ambas pruebas (vertical y transversal). Estos resultados muestran un error relativo máximo de 4,57 % en el ángulo que se mide de manera vertical y un máximo de 7,9% en el ángulo medido de forma transversal. Esto se puede deber a una pequeña desalineación de la caja electrónica respecto de la regla, así como de errores de medición en el ángulo gráfico. Sin embargo, la desalineación forma parte del error intrínseco del dispositivo, por lo cual este es inseparable. Se concluye que la exactitud del método de medición, en las condiciones de los ensayos realizados, es menor a 3° .

Otro parámetro importante que se extrae de las medidas tomadas es la validez concurrente. Esta puede ser medida con diferentes métodos estadísticos. En particular, en este trabajo se considerará el coeficiente de correlación intraclase (ICC), el cual mide qué

tan fuertemente relacionadas están las unidades entre sí en un mismo grupo. Esto debido a que el conjunto de datos extraídos en la experimentación cumple con los requisitos⁵² para aplicarlo. El modelo en específico es el ICC (3,1), en el cual los dos medidores (*raters*) son los únicos de interés y la validez es calculada a partir de las mediciones individuales. Con la finalidad de hallar este indicador, se usó el software SPSS. Como se muestran en las Tablas 6.2 y 6.3, la el coeficiente ICC hallado fue de 0.999, el cual es adecuado para mediciones clínicas. (P&W, 2009)

Tabla 6.2 Tabla de validez concurrente para las mediciones verticales (ICC)

	Intraclass Correlation ^b	95% Confidence Interval		Value	F Test with True Value 0		
		Lower Bound	Upper Bound		df1	df2	Sig.
Single Measures	.999 ^a	.995	1.000	2707.896	5	5	<.001
Average Measures	1.000 ^c	.997	1.000	2707.896	5	5	<.001

Two-way mixed effects model where people effects are random and measures effects are fixed.

a. The estimator is the same, whether the interaction effect is present or not.

b. Type C intraclass correlation coefficients using a consistency definition. The between-measure variance is excluded from the denominator variance.

c. This estimate is computed assuming the interaction effect is absent, because it is not estimable otherwise.

Tabla 6.3 Tabla de validez concurrente para las mediciones transversales (ICC)

	Intraclass Correlation ^b	95% Confidence Interval		Value	F Test with True Value 0		
		Lower Bound	Upper Bound		df1	df2	Sig.
Single Measures	.999 ^a	.996	1.000	3719.217	5	5	<.001
Average Measures	1.000 ^c	.998	1.000	3719.217	5	5	<.001

Two-way mixed effects model where people effects are random and measures effects are fixed.

a. The estimator is the same, whether the interaction effect is present or not.

b. Type C intraclass correlation coefficients using a consistency definition. The between-measure variance is excluded from the denominator variance.

c. This estimate is computed assuming the interaction effect is absent, because it is not estimable otherwise.

6.3 Lista de verificación

Finalmente, en la Tabla 6.4 se brindará un resumen acerca de cada requerimiento de diseño y se justificará su cumplimiento de acuerdo a lo planteado en el Capítulo 2. Se califica como PARCIALMENTE si su cumplimiento estuvo cerca de cumplirse o puede fácilmente obviarse. Asimismo, se califica como NO INFO, si el requerimiento no puede verificarse sin causar algún daño material al dispositivo.

⁵² Los requisitos para aplicar este método estadístico son que el conjunto de datos sea normalmente distribuido, continuo e independiente.

Tabla 6.4 Lista de verificación de los requerimientos de diseño

Requerimiento	Descripción	Justificación de cumplimiento
Cinemática	- Debe satisfacer los rangos mostrados en la Tabla 2.1.	- Los rangos corresponden a los indicados en la Tabla 2.1
	- Se deberá posicionar los sensores de modo que se puedan calcular los ángulos de acuerdo al método del cero neutro.	- Como se describió en el apartado 6.1, los sensores se ubican siguiendo dicho método. Asimismo, la función de configurar condiciones iniciales, pone en 0° el ángulo.
Exactitud	- Debe contar al menos con una exactitud de +/- 2°.	- PARCIALMENTE: Si bien el error es de 3°, no está muy lejos de la meta.
Confiabilidad	- Se debe utilizar sensores con hoja técnica que garantice las exactitudes.	- Las hojas técnicas pertenecen a la empresa INVENSENSE, proveedor de sistemas de <i>MotionTracking</i> .
	- Se debe implementar algoritmo que incluya la calibración del dispositivo y que garantice una validez alta con respecto de un método verificado.	- Se implementó algoritmo de calibración. Adicionalmente se calculó el CCI, el cual resultó bastante cercano a 1 dándole una validez alta.
Facilidad de interacción	- Se debe implementar 7 funcionalidades básicas.	- Cuenta con 7 funcionalidades básicas: prender, realizar medición, calibrar, establecer el cero, escoger medición, guardar medición y mostrar porcentaje de batería.
Materiales y peso	- Se debe usar materiales livianos como plásticos o telas en el diseño.	- Los materiales usados son velcro, <i>spandex</i> y PETG.
	- Estos deben ser fácilmente encontrados en el mercado.	- Los materiales como velcro, neopreno y PETG se encuentran en el mercado
	- Estos deberán ser hipoalergénicos.	- Los materiales son hipoalergénicos
	- Debe tener un peso máximo de 1 kg.	- El peso del dispositivo más la caja externa de PETG es inferior a 1 kg
Geometría	- Debe ser basada en un individuo de 1.6m con un índice de masa corporal normal entre 16 a 27 kg/m ² .	- PARCIALMENTE: En el apartado 4.1 se encuentran las dimensiones del brazo para personas con un IMC entre 16 y 27 kg/m ² .
	- Estructura adaptable para personas con una estatura entre 137.8 y 180 cm. Con esto se abarca al 98% de la población peruana. (considerando una distribución normal)	- La banda elástica y el velcro permiten adaptar el dispositivo a personas con diferentes alturas e IMC.
Costo	- Costo unitario menor a 400 USD.	- En el Capítulo 7 se concluye que el costo unitario es de S/. 604, inferior a 400 USD.
Visualización	- Debe contar con un medio de salida de información de al menos 2.5 pulgadas.	- La pantalla es de 2.8 pulgadas.
Portabilidad	- Debe contar con un elemento de almacenamiento de energía.	- Cuenta con una batería
	- Debe contar con un elemento de procesamiento.	- Cuenta con un microprocesador
	- Debe contar con un dispositivo para almacenamiento de datos no volátil de al menos 256 MB.	- PARCIALMENTE: Si bien no cuenta con un dispositivo de almacenamiento, cuenta con un puerto de lectura para tarjetas microSD.
Ergonomía	- El diseño debe ser no invasivo.	- El diseño no es invasivo.
	- El diseño mecánico debe contemplar una estructura no rígida.	- Si bien el dispositivo es rígido, la el velcro más los elásticos brindan flexibilidad en su uso.
Energía	- Debe tener una autonomía energética de al menos 8h.	- Se calculó que la autonomía de la batería era mayor a 8h.
	- Debe cargarse mediante un voltaje continuo de 5V.	- El circuito cargador recibirá voltaje de 5V a través de una entrada tipo USB C.
Seguridad	- Debe tener al menos un grado de protección IP53	- NO INFO: Para realizar las pruebas habría que someter el dispositivo a chorros de agua y polvo.
	- Debe incluir un sistema de medición de energía.	- Existe un circuito medidor de voltaje de la batería.

CAPÍTULO 7

PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS

En este capítulo se presentan los planos para la fabricación del dispositivo de medición. Asimismo, se brindará un estimado de los costos de diseño, los costos de manufactura, los costos de ensamble, el costo unitario de un dispositivo y su precio final (tentativo).

7.1 Planos

El dispositivo que se diseñó en el presente trabajo cuenta con 10 planos en total: 2 de ensamble, 2 explosionados, 5 de despiece y 1 electrónico. Estos se encuentran en el Anexo H y se nombran de la siguiente manera CX-DY-AZ. Al respecto, CX significa caja electrónica (CE), caja del sensor (CS) o ajustador (J); D representa el tipo de plano (EN: ensamble, EX: explosionado, DE: despiece, EL: electrónico); Y el número de plano y AZ el formato de tamaño del plano.

Tabla 7.1 Listado de planos

Nombre	Descripción
CE-EN1-A3	Ensamble de la caja electrónica
CS-EN2-A3	Ensamble de la caja del sensor
CE-EX1-A2	Vista explosionada de la caja electrónica
CS-EX2-A3	Vista explosionada de la caja del sensor
CE-DE1-A2	Base
CE-DE2-A3	Tapa superior
CE-DE3-A3	Tapa inferior
CS-DE4-A3	Despiece de la caja del sensor
J-DE5-A3	Ajustador
CE-EL-A3	Diagrama esquemático del sistema electrónico

En la Tabla 7.1 se listan los planos y se brinda su respectiva nomenclatura. Los planos se encuentran en el Anexo I.

7.2 Estimación de costos

Entre los costos del proyecto, se contemplarán los costos de materiales (componentes e importación de ser el caso), los costos de manufactura, los costos de ensamble y los costos de diseño. Cabe mencionar que para pedidos que no puedan ser unitarios, los costos serán prorrateados. Esto sucede con las telas, las cuales se venden de determinadas dimensiones o con componentes electrónicos, que, debido a no poder solicitar una cotización físicamente o encontrarlos mucho más barato en el extranjero, se venden en cantidades mínimas. Se asume en adelante el tipo de cambio actual USD/PEN en 4,00.

7.2.1 Costo de manufactura

En primer lugar, esta estimación incluye los costos de los componentes electrónicos, mecánicos y las telas. Asimismo, se incluyen los costos de importación en caso sean componentes importados. Cabe mencionar que todas las cotizaciones se detallan en el Anexo F.

La empresa JLCPCB⁵³ ofrece el servicio de manufactura de PCB y de ensamblado de componentes electrónicos; por ello, se cotizaron tanto el PCB, componentes electrónicos y el ensamblado de estos en esta empresa. Algunos componentes no estaban disponibles, por lo cual deben ser adquiridos de otros proveedores. Estos se cotizaron en la empresa Aliexpress⁵⁴, empresa para importación de productos desde China.

A modo de resumen, en la Tabla 7.2 se muestran los resultados de las cotizaciones. Estas incluyen también el costo de importación. Se observa que el costo total de materiales asciende a S/. 436 para un dispositivo antes de los impuestos cobrados en la aduana.

⁵³ Sitio web: <https://jlcpcb.com/>

⁵⁴ Sitio web: <https://es.aliexpress.com/>

Tabla 7.2 Estimación de costos para componentes y materiales

Nombre	Proveedor	Cantidad	Subtotal (USD)	Subtotal unitario(S/.)
Pantalla TFT	Adafruit	1	60	240,000
Tela de algodón	Mercado Libre	190 cm x 90 cm	8,30	0,039
Cinta de velcro (ganchos y bucle)	Mercado Libre	2m x 5cm	2,50	0,280
Elástico de neopreno	Aliexpress	135 cm x 45 cm	9,24	0,043
PCB, componentes y ensamblado	JLCPCB	Cantidad mínima para 30 dispositivos	127,89	17,052
Filamento de PETG	Mercado Libre	2 kg	30,00	2,760
DM3AT-SF-PEJM5	Aliexpress	30 unidades	17,24	2,299
TPS65060DSCR	Aliexpress	30 unidades	28,32	3,776
FS312F-G	Aliexpress	50 unidades	4,30	0,344
Arduino Pro Mini 3,3V	Naylamp Mechatronics	1 unidad	6.25	25,000
Cable de 6 núcleos 28AWG	AliExpress	2 m	3.25	13,000
Sensor GY-9250	AliExpress	60 unidades	524,96	69,995
Inserto M2x6 GB 809	AliExpress	150 unidades	9,82	1,309
M2x8 DIN 7985 (ISO 7045)	AliExpress	120 unidades	14.76	2,460
Conectores JST 1.25mm macho y hembra	SIARP	1 par	0,375	1,5
Batería 3.7V 2000 mAh	SIARP	30 unidades	97,39	56.300
			Total	436,167

Como muestra la Tabla 7.3, se calculó el volumen de cada pieza y se multiplicó por la densidad del PETG ($1,23\text{g/cm}^3$) para hallar el número de kilos de filamento necesario. Asumiendo una pérdida del 20% en cada impresión (excedentes de impresión), se concluye que se necesitará de 46 g por cada dispositivo.

Tabla 7.3 Cálculo de pesos de componentes hechos de PETG

Parte	Volumen(mm^3)	Peso (g)
Base	18029,7	22,180
Tapa superior	5173,3	6,363
Tapa inferior	5312,1	6,533
Caja del sensor	2 x 2403,6	5,912
Tapa de la caja del sensor	2 x 311,3	0,766
Total		38,410

Asimismo, la Tabla 7.4 muestra la cantidad de velcro, tela de algodón y elástico necesarios para fabricar 2 ajustadores para las cajas de sensor.

Tabla 7.4 Tamaño de telas y velcro para un dispositivo

Material	Cantidad(mm ²)
Velcro (ganchillo)	2x(140x10)
Velcro (bucle enroscado)	2x(140x10)
Elástico	2(50x7)
Tela de algodón	2 x (100 x10)

En segundo lugar, se deben incluir los costos por el uso de una impresora 3D para fabricación de las cajas mediante manufactura aditiva de PETG, así como los costos de soldadura de pines. La Tabla 7.5 muestra el modelo con el que se realizó la estimación del cálculo del coste de impresión 3D. Este modelo considera los costes de electricidad, de materiales y de operario, así como la duración y la cantidad de material por pieza a imprimir. Debido a que el coste de material ya fue considerado previamente, se considerará el coste de impresión de 1 caja electrónica y 2 cajas de sensor como S/. 32,87 (restando el costo del PETG).

Tabla 7.5 Estimación de costo de impresión 3D

Datos del modelo		Coste de fabricacion de piezas impresas	
Coste plástico [S/./kg]	60.00	Masa de la pieza [kg]	0.046
Coste luz [S/./kWh]	0.52	Tiempo impresión [h]	5
Consumo medio [kW]	0.50		
Coste por hora de luz [S/./h]	0.26		
Coste de impresora (S/.)	3000.00	Coste material (S/.)	
Tiempo amortización [años]	1.50	- Plástico	2.76
Días activa al año	250.00	- Electricidad	1.30
Horas por día [h]	12.00	Coste operario (S/.)	
Coste de amortización	0.67	- Preparación	12.5
		- Postproducción	12.5
Tasa de fallos	0.10	Coste amortización (S/.)	3.33
Coste por hora del operador	25.00	Coste fallos (S/.)	3.24
Tiempo preparación [h]	0.50	Coste pieza(S/.)	35.63
Tiempo postproducción [h]	0.50		
Plástico	2.76		
Electricidad	1.30		
Coste operario	25.00		
Coste amortización	3.33		

Los componentes de montaje superficial restantes que requieren de soldadura son el TP63060, el FS312F y el DM3AT-SF-PEJM5. Una regla práctica para la esta estimación del costo de soldadura de componentes es 1/300 USD por cada *pad* o terminación SMD (de acuerdo a empresas chinas). Entonces, para el cálculo de coste por componente soldado, se consideró la cantidad de pines. El resumen de estos costos se observa en la

Tabla 7.6. Se concluye que el costo de impresión y soldadura de pines es de S/. 34, 07 por unidad.

Tabla 7.6 Estimación de costo de impresión 3D y soldadura

Concepto	Pines	Costo unitario	Subtotal (S/.)
Impresión 3D	-	32,87 PEN	32,87
Soldadura componentes sobrantes	22	0,073 USD	0,293
Soldadura de pines de conexión 20x1de la pantalla.	20	0,067 USD	0,267
Soldadura de pines del Arduino Pro Mini	30	0,100 USD	0,400
Soldadura de conector de batería	2	0,007 USD	0,027
Soldadura de ledes	4	0,013 USD	0,053
Soldadura de conector de switch	2	0,007 USD	0,027
Soldadura de pines MPU 9250	10	0,033 USD	0,133
Total			34,07

Finalmente, se debe calcular el costo del corte y costura de las telas. De manera práctica este costo se estima como el triple del costo de materiales (telas, botones, hilos, etc...). Como se mostró en la Tabla 6,4, las cantidades de cada material son muy inferiores a los pedidos en las cotizaciones; esto se debe a que estos materiales se venden usualmente en rollos o de cierto ancho por largo. En la Tabla 7.7, se muestra el costo de mano de obra como 4 veces el costo de material. En este cálculo, se realizó una regla de 3 simple con la cantidad de material utilizado respecto de la cantidad de material cotizado. En este cálculo se considerará también que se generan un 30% de desperdicios durante la costura y cortado de los materiales.

Tabla 7.7 Estimación de mano de obra para costura de telas y velcro

Concepto	Costo del material (USD)	Costo mano de obra (S/.)
Algodón	0,0126	0,151
Cinta de velcro	0,0910	1,092
Elástico de neopreno	0,0138	0,166
Total		1,41

7.2.2 Costo de ensamble

En esta estimación se incluye la disposición de los componentes mecánicos de acuerdo a los planos de ensamble. Este puede calcularse de acuerdo a la ecuación 6.1⁵⁵.

$$C_{ma} = C_l * (F + H) \quad (6.1)$$

Donde:

C_{ma} : Costo de ensamblado manual

C_l : Costo de laburo (en S/. por s)

F: Índice de colocación de componente (en s)

H: Índice de manejo de componentes (en s)

Se considerará C_{ma} igual a 0.54 centavos de sol⁵⁶, así como $F = 2s$ y $H = 3s$ por cada componente. Son en total 5 insertos y 5 tornillos. Adicionalmente, se debe colocar la pantalla, los ledes, el *switch*, los cables de los sensores y las tapas (en total 19 elementos). Como lo muestra la Tabla 7.8, resulta un costo de ensamble de S/. 0,513 por unidad, lo que implica un costo de S/. 15.39 para las 30 unidades.

Tabla 7.8 Estimación de costo de ensamblado

Concepto	Costo por unidad
Ensamblado manual	S/. 0,513

7.2.3 Costo total de manufactura

Como resumen, en la Tabla 7.9 se listan los costos de manufactura y de ensamblado calculados anteriormente, adicionando los impuestos y costos imprevisto. A partir de esta, se halla el costo unitario de producir el medidor de ángulos de la muñeca presentado en este trabajo. Respecto de los impuestos, como el precio de todos los componentes

⁵⁵ Extraído de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/assembly-cost>

⁵⁶ El costo de laburo, C_l , es calculado basados en un salario anual $\leq 30,000$ soles (más 30% de gastos generales para un obrero medianamente calificado en Perú, 2021), por un año de trabajo de 250 días (5 días a la semana menos días festivos) y una jornada laboral de 8 horas. Esto nos da un costo de trabajo manual de $C_l = 0.54$ centavos por segundo.

importados al llegar a Perú es menor a 2,000 USD y mayor a 200U SD, estos pueden ser importados considerando 3 impuestos: derechos arancelarios, el IPM⁵⁷ y el IGV⁵⁸.

Tabla 7.9 Estimación del costo total

Concepto		Costo (S/.)
Costo de materiales y componentes importados		350,28
Costo de materiales y componentes nacionales		85,89
Costo de procesos de manufactura (impresión aditiva, costura y soldadura de componentes)		35,48
Costo de ensamblado		0,52
Impuestos	Derechos arancelarios (4%)	14,01
	IGV (16%)	56,04
	IPM (2%)	7,01
Total, sin costos imprevistos		549,23
Costos imprevistos (10% del costo total)		54,92
Total		604,16

De la Tabla 7.9, se concluye que el costo total de manufactura de una unidad del dispositivo es de S/. 604,2. Este valor resulta inferior a los USD 400 que se mencionó en los requerimientos para el diseño.

7.2.4 Costo de diseño

Los costos de diseño se determinan en base al tiempo dedicado al diseño del dispositivo, así como al costo por hora del diseñador de acuerdo a la Tabla 7.10. El costo por hora del diseñador incluye el uso de la laptop, costos de electricidad y el costo por el tiempo de diseño. El costo por hora de las asesorías incluye corrección de estilo, asesoría técnica y recomendaciones. Se considera que este trabajo se desarrolló en un plazo de 8 semanas trabajando 8 horas por día y 5 días a la semana. Durante este periodo, se estiman las asesorías en 3 horas por semana durante 8 semanas. Se concluye que el costo total de diseño es de S/. 18,880.

Tabla 7.10 Estimación de costo de diseño

Concepto	Costo por hora (S/.)	Duración (h)	Costo total (S/.)
Diseñador	50	320	16,000
Asesor	120	24	2,880

⁵⁷ Impuesto de Promoción Municipal

⁵⁸ Impuesto General a las Ventas

7.3 Comparativa con respecto a otras tecnologías

Dado que ya se tienen todas las características principales del dispositivo diseñado, se procede a realizar una comparativa con otras tecnologías presentadas en el estado del arte. En la Tabla 7.11 se muestran las características más resaltantes de ambos. Cabe mencionar que el precio que se muestra en el dispositivo NEXTGEN corresponde al costo de un SG75 (goniómetro), un Q150 (torsiómetro) y un K800 (dispositivo de recepción y alimentación)

Tabla 7.11 Comparación con solución NEXTGEN⁵⁹

Característica	Dispositivo diseñado	NEXTGEN ⁶⁰
Resolución	1°	0.1°
Exactitud	+/-3°	+/-2°
Duración de batería	8h	12 h
Costo	150 USD	>4700 USD
Conexión directa a computadora	No	Sí
Wireless	Sí	Sí/No (dependiendo del dispositivo de análisis escogido)

Se observa que las especificaciones de la solución Naroxon en cuanto a resolución, exactitud y duración de batería son ligeramente superiores a las del dispositivo diseñado. Sin embargo, en cuanto a costo se refiere, la solución Naroxon equivale a 30 veces el costo de un dispositivo diseñado.

⁵⁹ Se hace la comparación con una solución, pues las especificaciones de las otras expuestas en el estado del arte son muy similares.

⁶⁰ El precio se refiere a toda la solución, en la cual se consideran goniómetros, dispositivos de salida, conectores y software. Asimismo, dado Naroxon utiliza 2 goniómetros para medir los 6 movimientos, se tendrán en cuenta 2 goniómetros. Dependiendo de los dispositivos de instrumentación extra, el precio puede ser superior e incluso llegar hasta los 7500 USD.

OBSERVACIONES

A continuación, se procederá a describir algunas observaciones presentadas durante la realización del presente trabajo y la implementación del prototipo.

Inicialmente, se propuso un diseño basado en una muñequera y una codera con 6 IMU distribuidas en ambas con la finalidad de aplicar el método del cero neutro para la medición de los ángulos. Sin embargo, este diseño presentó 2 problemas. El primer problema fue la calibración de 6 sensores para una medición simultánea. Esta sería complicada para el usuario, debido a que tendría que retirar los 6 IMU de sus compartimentos, llevarlos a un plano horizontal y esperar cierto tiempo. El segundo problema es la comunicación con los IMU mediante un microcontrolador. Estos usualmente tienen 1 o 2 direcciones para comunicación con el microcontrolador. Esto se soluciona rápidamente con un multiplexor haciendo que se conecten 2 al mismo tiempo 3 veces. Asimismo, este proceso requiere más poder computacional, lo que se traduce en un costo más alto. Por ello, finalmente, se planteó un dispositivo que use solo 2 IMU's. De esta manera es fácil hallar una rotación relativa entre ambas para alinear sus ejes y, de esta manera, calibrarlos.

Por otro lado, el elástico usado para sujetar las cajas de los sensores (neopreno) es usado para fabricar trajes de buceo, es decir, son impermeables. Se procuró trabajar con materiales hipoalergénicos como se había planteado inicialmente. Esto se cumple, pues todo tejido que hace contacto con la piel del usuario (neopreno, algodón, velcro) no produce ningún tipo de alergia.

Debido a que este diseño es portable, es importante disminuir tanto como se pueda el consumo de energía, ya sea por métodos electrónicos o de *software*, pues de este dependerá la duración de la batería. En este trabajo, se utilizó este principio rediseñando el módulo de carga lineal TP4056, el cual tiene una eficiencia de carga de alrededor de 50-60 %. Se incluyó en su diseño el integrado IP2312, el cual lo convierte en un dispositivo conmutado aumentando su eficiencia hasta 85% aproximadamente. Esto no necesariamente alarga el tiempo de duración de la batería, pero sí evita que se gaste más energía al cargarlo. Por otro lado, se usó una onda PWM para regular el brillo de la

pantalla, con lo cual su consumo disminuiría considerablemente a valores por debajo de 150 mA.

Con respecto a los sensores IMU9250, estos no cuentan con una librería que brinde las funcionalidades del DMP (*digital motion processor*) para ambas direcciones de uso del sensor en I2C, por lo cual el código tuvo que modificarse para intercambiar la dirección en tiempo de ejecución. Esto fue beneficioso, dado que se evitó crear funciones adicionales que hubiesen aumentado las líneas de código.

Cabe notar que el ahorro obtenido de importar productos de proveedores chinos es considerable, sobre todo si se piden en grandes cantidades. Esto se demuestra en que el costo de la tarjeta electrónica, componentes SMD y soldadura de componentes SMD fue de tan solo 128 USD para 30 dispositivos con envío incluido. Asimismo, otros componentes que desde Europa o América del Norte se adquieren por mayor costo, se consiguieron a un costo menor.

Adicionalmente, si bien el diseño se optimizó para un gasto de energía bajo, hay maneras de disminuirlo aún más. Esto se podría implementar mediante el diseño del microcontrolador solo con los periféricos necesarios (I2C, SPI, ADC y un Timer) o deshabilitando los periféricos no usados en el Arduino Pro Mini mediante software.

Finalmente, debido a las razones expuestas anteriormente, puede verificarse que el dispositivo es mucho más barato que otros dispositivos disponibles en el mercado. Por ejemplo, comparado con el goniómetro Naroxon, que cuesta alrededor de 4700 USD, este dispositivo es 30 veces más barato. Esto se debe a que, adicionalmente, se requiere de 2 goniómetros Naroxon para medir los ángulos en las 6 posiciones; además, estos tienen conexión directa a la computadora, lo cual requiere de otros periféricos.

CONCLUSIONES

Siguiendo la metodología de diseño (VDI 2221), se logró diseñar un dispositivo de medición angular poco costoso, liviano y versátil capaz de medir los 6 ángulos de la muñeca. Con esta finalidad, se tomaron en cuenta las necesidades y requerimiento tanto del paciente como del especialista y, simultáneamente se consideraron las características propias necesarias en un dispositivo de medición.

Por otro lado, se pudo mantener el costo de fabricación en S/. 604,2, por debajo de los 400 USD planteados inicialmente. Esto se debe principalmente a la selección de materiales, componentes electrónicos y al diseño compacto de la placa electrónica.

Con respecto al ajustador, se logró un diseño hipoalergénico y versátil capaz de adaptarse a las 3 posiciones para la medición de los 6 ángulos. Sin embargo, aún habría que evaluar si realmente sujeta y alinea la caja del sensor como debería. La verificación de este punto podría plantearse en un futuro trabajo.

Aunque inicialmente se planteaba utilizar componentes nacionales, esto fue interrumpido debido al rediseño electrónico, con lo cual todos los módulos se dispusieron en una sola placa electrónica para ahorrar espacio y disminuir los costos. Sin embargo, respecto de los materiales como las telas y el velcro, estos sí están disponibles en el mercado peruano, aunque muchos fabricantes nacionales no cuentan con una página web u opción de compra virtual.

Finalmente, se logró desarrollar e implementar el algoritmo para determinar los ángulos de la muñeca en dos direcciones. Las mediciones obtenidas por el algoritmo se compararon con las obtenidas mediante un método video-gráfico con ayuda del software *Kinovea*. Asimismo, el software SPSS se usó para evaluar la validez concurrente del dispositivo comparado con el método gráfico. Con ello, se concluyó que el dispositivo es capaz de tomar mediciones con un error de medición angular menor a 3° y una validez de 0.99 del índice ICC (*intraclass correlation coefficient*).

RECOMENDACIONES

Las dificultades presentadas durante la realización del presente trabajo pueden servir como ayuda para futuros desarrollos; por ello, es necesario hacer hincapié y brindar recomendaciones pertinentes para diseños similares.

Es importante revisar las recomendaciones del fabricante sobre el funcionamiento de los componentes. En este caso, se tuvo que indagar en la página del fabricante sobre la comunicación de la pantalla TFT de 2.8". Por ejemplo, ciertos pines de la pantalla deben ser soldados o conectados a 3.3V para que este pueda funcionar con comunicación serial SPI. Asimismo, algunas versiones del Arduino Pro Mini incluyen la resistencia *pull-up* para comunicación I2C y otros no, lo cual debe ser verificado en el modelo que se tenga.

La implementación del prototipo no funcionó como se esperaba. Esto se debió a una falta de memoria en el microcontrolador, por lo cual se tuvo que dividir el programa en 2 (un programa para la interfaz y otro para el cálculo de ángulos). Asimismo, al usar la librería de tarjetas SD, un programa simple de lectura y escritura ocupa hasta el 50% de la memoria dinámica (RAM) del microcontrolador. Se recomienda, por ende, implementarlo con un microcontrolador con al menos 6KB de RAM y 100 KB de memoria FLASH.

Otro problema con el prototipo surgió al comunicar los sensores IMU al microcontrolador. Debido a la longitud de los cables y a la baja velocidad de reloj, la comunicación I2C se interrumpía por momentos. Esto se solucionaba reiniciando manualmente el microcontrolador. Una solución permanente podría incluir otro microcontrolador y un mejoramiento de los cables. Adicionalmente, cabe mencionar que la interfaz gráfica funcionó tal como se planeaba. Esta responde a cada pulsación del usuario. El único problema que se presentó al respecto fue la implementación del teclado, pues este repetía los caracteres cuando se dejaban presionados. Esto se solucionó al retener el último carácter y verificar que no se presione nuevamente.

Finalmente, con respecto al diseño mecánico, las medidas oficiales de los componentes sirvieron para brindar una idea inicial para las medidas de las cajas electrónica y del sensor. Sin embargo, estas deben ser modificadas para encajar con holgura a los distintos componentes.

BIBLIOGRAFÍA

- (Arrescurrenaga, 2019) Arrescurrenaga, Gabriela Mallma. (2019). La fisioterapia en el Perú. *Fisioterapia e Pesquisa*, 26(4), 337-338. Epub December 02, 2019. <https://doi.org/10.1590/1809-2950/00000026042019>
- (Bravo, 2020) Bravo L. (2020). “Desarrollo de un sistema wearable para medición de fuerzas verticales de contacto pie-piso con aplicaciones en el voleibol”. Tesis para optar el título de Ingeniero Eléctrico, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- (Cailliet, 2005) Cailliet R. (2005). Anatomía funcional, biomecánica. Editorial Marbán.
- (Charmode,2019) Charmode SH, Kadlimatti HS, Pujari D (2019) Correlation of Human Height with Hand Dimentions: A Study in Young Population of Central India. *International Journal of Human Anatomy* – 1(3):36 - 44
- (De la Haye, 2014) G. I. de la Haye Chamorro, I. M. Mercado Aguirre and S. H. Contreras-Ortiz, "Design of an electrogoniometer based on accelerometers for the evaluation of sports gesture in weight lifting," 2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/CIIMA.2014.6983436.
- (Eltahan, 2016) Eman Eltahan, “Effect of Lycra Percentages and Loop Length on the Physical and Mechanical Properties of Single Jersey Knitted Fabrics”, *Journal of Composites*, vol. 2016, Article ID 3846936,7 pages,2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3846936>
- (Gil, 2013) Gil L., Alfonso J., Barrios C. (2013). Lesiones deportivas de la muñeca y mano. Instituto de Investigación de Enfermedades Músculo-Esqueléticas, Facultad de Medicina, Universidad de Valencia San Vicente Mártir
- (Israel, 2017) L. Israel, B. Pérez, B. Rivera, C. Cano & D. Elías (2017). Design and implementation of an electrogoniometer system for ankle and knee motion assessment in health care. *In Proceedings of the 9th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Technology (ICBBT '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 76–79. DOI:https://doi.org/10.1145/3093293.3093306*
- (Kapandji, 2006) Kapandji A. (2006). Fisiología Articular. Tomo 1. Panamericana, Madrid. 6ª Edición.
- (Madgwick, 2010) Sebastian O. H. Madgwick, “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays”. Reporte para la Universidad de Bristol. Recuperado el 14 de setiembre del 2021 de https://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick_internal_report.pdf
- (Medina, 2016) Medina Gonzalez, Carlos, Benet Rodríguez, Mikhail, & Marco Martínez, Fernando. (2016). El complejo articular de la muñeca: aspectos anatófisiológicos y biomecánicos, características, clasificación y tratamiento de la fractura distal del radio. *MediSur*, 14(4), 430-446. Recuperado el 04 de abril de 2021 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2016000400011&lng=es&tln=es.
- (Mercado, 2016) Mercado I. (2016). “Diseño y construcción de un electrogoniómetro inalámbrico vestible para el deporte”. Tesis para optar el título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Tecnológica de Bolívar.
- (Magee, 2014) Magee D. (2014). *Orthopedic Physical Assessment. 6th ed.* St Louis, MO: Elsevier Saunders.

- (Manon, 2017) Manon Kok, Jeroen D. Hol and Thomas B. Schön (2017), "Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation", *Foundations and Trends in Signal Processing*: Vol. 11: No. 1-2, pp 1-153. <http://dx.doi.org/10.1561/20000000094>
- (Nordin, 2004) Nordin M. (2004). *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. McGraw-Hill Interamericana, Brasil
- (Patel, 2012) Patel P N, Tanna J A, Kalele S D. (2012) Correlation between Hand Length and various Anthropometric parameters. , *International Journal of Medical Toxicology and Forensic Medicine.*; 2(2), 61-63.
- (P&W, 2009) Portney LG, Watkins MP. *Foundations of Clinical Research Applications to Practice*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall; 2009.
- (Ruiz, 2017) Ruiz A., Callejas M. y Lara C. (2017) *Wearable low-cost inertial sensor-based electrogoniometer for measuring joint range of motion*. Montevideo: Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). Facultad de Minas., 2017-04-01. [Fecha de consulta: 9 de abril 2021].
- (Seal, 2014) Seal T., Raisch J., Schauer T. (2014) *IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis*. MDPI, 6891-6909. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/s140406891>
- (Taboadela, 2007) Taboadela Claudio H. (2007) *GONIOMETRÍA: Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*. - 1^a ed. Buenos Aires: Asociacion ART
- (Tognetti, 2015) Tognetti A., Lorussi F., Carbonaro N. (2015). *Wearable goniometer and accelerometer sensory fusion for knee joint angle measurement in daily life*. MDPI, 1-21. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/28435/htm>
- (Tognetti, 2014) Tognetti A., De Rossi F., Carbonaro N., Dalle G., Pacelli M., De Rossi (2014). *New generation of wearable goniometers for motion capture systems*. BMC. Recuperado de <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-0003-11-56>
- (Viladot, 2001) Viladot A. (2001). *Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor*. Editorial Springer
- (Vogt, 2014) D. M. Vogt and R. J. Wood, "Wrist angle measurements using soft sensors," *SENSORS*, 2014 IEEE, Valencia, Spain, 2014, pp. 1631-1634, doi: 10.1109/ICSENS.2014.6985332.

ANEXOS

Anexo A: Anatomía funcional de la muñeca y codo

La anatomía funcional es una rama de la anatomía que estudia la estructura y los órganos que componen el cuerpo y cómo estos funcionan. En particular, el interés de este trabajo se enfoca en el subsistema músculo-esquelético, del cual forman parte huesos, músculos, tendones, ligamentos y articulaciones. Estos brindan movimiento, cohesión y potencia a las estructuras que componen el cuerpo humano.

El codo cuenta con 3 principales articulaciones: el húmero cubital, que permite la flexión-extensión; la radio humeral, que permite la pronación; y la radio cubital, que permite la supinación. Asimismo, dos ligamentos, uno anterior y otro posterior, que mejoran la estabilidad y limitan los movimientos del codo. Por último, los músculos que mueven los huesos en la articulación del codo son: el braquial, encargado de la flexión del codo; el bíceps, el cual ayuda con la flexión y se encarga de la supinación; y el tríceps, el cual sirve de extensor. (Cailliet, 2005)

Por otro lado, la muñeca se encuentra localizada entre el antebrazo y la mano, y está compuesto de 8 pequeños huesos divididos en dos hileras. La hilera proximal la componen el escafoides, semilunar, pisiforme y el piramidal, y la hilera distal, el trapecoide, el hueso grande y el ganchoso. La Ilustración 1 muestra la posición de estos huesos. (Clarkson, 2012)

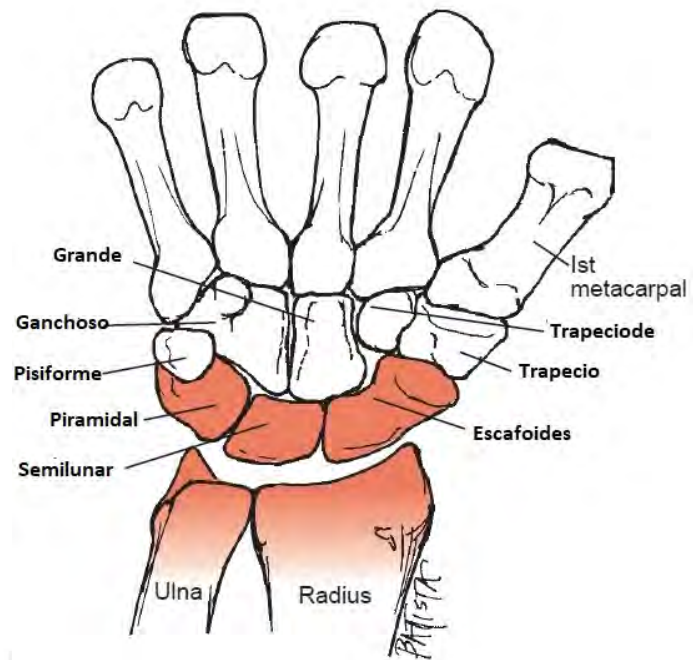
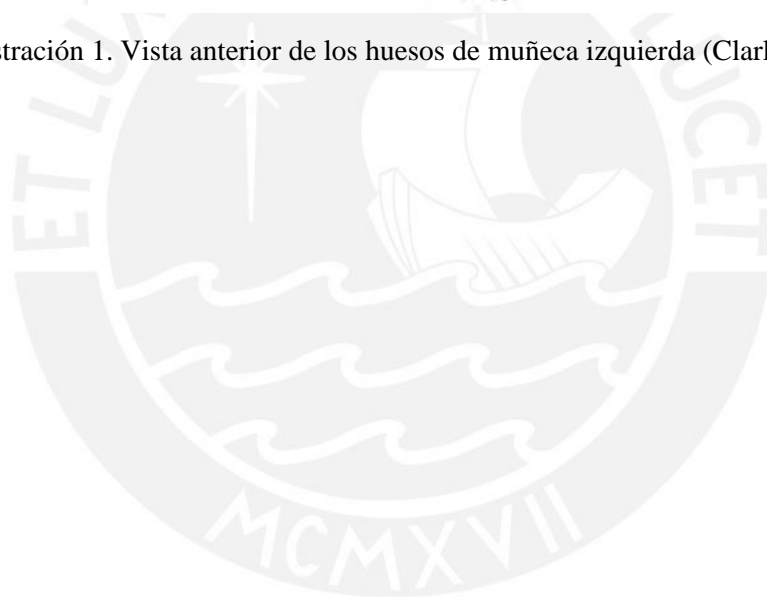


Ilustración 1. Vista anterior de los huesos de muñeca izquierda (Clarkson, 2012)



Anexo B: Sensores

En esta sección se describirán los sensores más comunes usados en las investigaciones y productos comerciales vistos anteriormente. Estos están divididos en 2 grupos: sensores de medición directa y de medición indirecta. Adicionalmente, se describirán las principales características que debe tener un elemento de medición para medir correctamente el mensurando.

B.1. Sensores de medición directa

En este grupo se describen los sensores que miden directamente el parámetro de interés (ángulo) o se pueden derivar inmediatamente de las mediciones.

El *encoder* magnético, como el mostrado en la Ilustración 2, utiliza matrices magnéticas distribuidas en fase con un patrón que encaja en una rueda magnética, así como sensores de efecto Hall que detectan cambios en el campo magnético. Entonces, cuando el rotor gira se producen señales cuadradas cada cierto tiempo, de esta manera, si se conoce el tiempo entre ondas producidas y cada cuántos grados se produce un pulso, se puede calcular el ángulo e incluso la velocidad angular. Para determinar la dirección de giro, solo hace falta comparar las señales desfasadas de dos sensores de efecto Hall y observar cuál está adelantado.

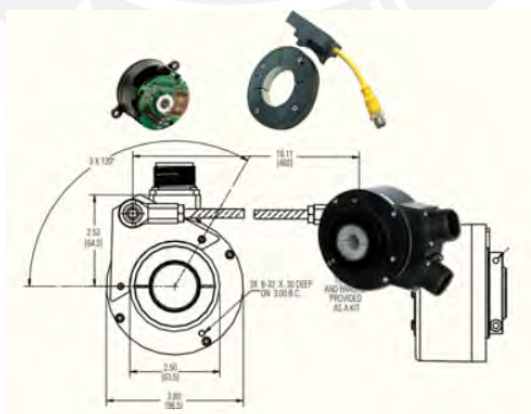


Ilustración 2. *Encoder* magnético⁶¹

⁶¹ Imagen extraída de https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/hall_effect_encoders/

En el caso de un *encoder* óptico, una fuente emite luz directamente a través de un disco óptico ahuecado, de manera que el haz pasa o queda bloqueado (ver Ilustración 3). Un detector óptico, o cabeza de lectura, detecta el paso de la luz y genera la señal eléctrica correspondiente. Rejillas ópticas están dispuestas en serie, por lo cual pueden utilizarse para medir un ángulo o una velocidad si se conoce el periodo entre pulsos. La escala de las marcas puede ser muy fina, hasta de micrones, lo que permite que muchos *encoders* ópticos puedan medir con altos niveles de precisión.

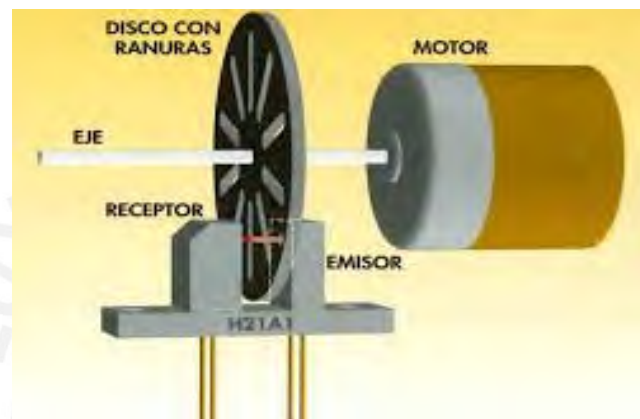


Ilustración 3. Principio de funcionamiento de un encoder óptico⁶²

Otro sensor que se puede usar para medición angular es el potenciómetro angular, como el de la Ilustración 4. Este sensor consiste en una resistencia que cambia al girar su eje. Si se conoce la relación resistencia/giro, puede calcularse el ángulo de rotación de su eje conociendo la resistencia nominal del potenciómetro.



Ilustración 4. Potenciómetro circular⁶³

⁶² Imagen extraída de <https://carolina-sp.blogspot.com/2014/11/contador-de-pulsos-de-encoder-con.html>

⁶³ Imagen extraída de <http://www.geekbotelectronics.com/producto/potenciometro-de-5-kohm/>

B.2. Sensores de medición indirecta

En este grupo se describen los sensores que no miden el ángulo, sino otros parámetros relacionados como la aceleración, la velocidad angular o las deformaciones para luego, mediante relaciones físicas o dinámicas, calcular el ángulo.

Por un lado, los sensores MEMS (*microelectromechanical systems*) son mecanismos con componentes cuyo tamaño se encuentra en el dominio de los micrómetros. Usualmente estos sensores incluyen microactuadores mecánicos, microsensores y microestructuras que, en conjunto, constituyen un microsistema. Los MEMS son sensores inerciales que tienen la ventaja de ser de bajo costo y alta precisión. Asimismo, los hay de diferentes tipos y para distintas aplicaciones.

El acelerómetro MEMS, como el mostrado en la Ilustración 5, es usado en donde se necesite medir la aceleración lineal sin una referencia fija. Usualmente lo miden en múltiplos de la gravedad. Su funcionamiento es similar a un resorte unido a una masa, es decir, cuando hay una aceleración la masa se desplaza y el resorte varía sus dimensiones. Esta variación corresponde a la aceleración aplicada. Luego, debido al efecto piezoeléctrico se produce un potencial variable que será proporcional a la aceleración.

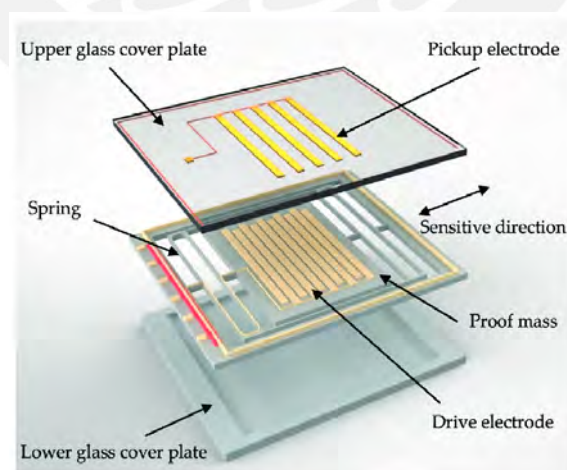


Ilustración 5. Acelerómetro MEMS⁶⁴

⁶⁴ Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-proposed-MEMS-accelerometer_fig1_335227294 .Fecha de última revisión: 14 de abril del 2021

El método más común para calcular un ángulo con 4 acelerómetros es el DCMR (*distributed common mode rejection*), el cual emplea 2 acelerómetros en cada segmento (ver Ilustración 6) tanto para crear 2 acelerómetros “virtuales” en la articulación, así como para disminuir el error de medición y tener más libertad de posicionamiento. El ángulo es estimado mediante la resta de los arcotangentes de cada uno de las 2 aceleraciones virtuales.

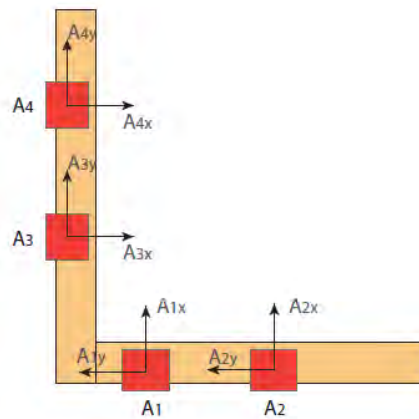


Ilustración 6. Electrogoniómetro implementado con 4 acelerómetros. (De la Haye, 2014)

Por otro lado, el giroscopio MEMS, es un tipo de sensor que mide la velocidad angular por efecto de la aceleración de Coriolis. Utiliza la vibración o rotación de sistemas micromecánicos y microsensores para detectar en qué dirección se producen las vibraciones. Cuando el sensor rota, se produce la fuerza de Coriolis, la cual afecta la dirección de vibración del mecanismo. La fuerza necesaria para mantenerla vibrando sobre su eje principal es proporcional a la velocidad angular. En la Ilustración 7, se presenta un modelo mecánico de un giroscopio MEMS.

Este sensor, para determinar un ángulo determinado, se integra con un magnetómetro y un acelerómetro. Al sensor resultante de esta integración se le denomina unidad de medición inercial, IMU. El método consiste en recolectar las 3 mediciones de estos 3 sensores (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro) en las dos direcciones que forma el ángulo a medir y procesarlas mediante un algoritmo de fusión basado en un filtro Kalman, el cual proporciona la orientación absoluta respecto de un sistema de referencia formado por el vector gravedad y el vector del polo norte de la tierra. Finalmente, cuando se tiene la orientación absoluta de cada IMU, el ángulo entre estos 2 es fácilmente hallado.

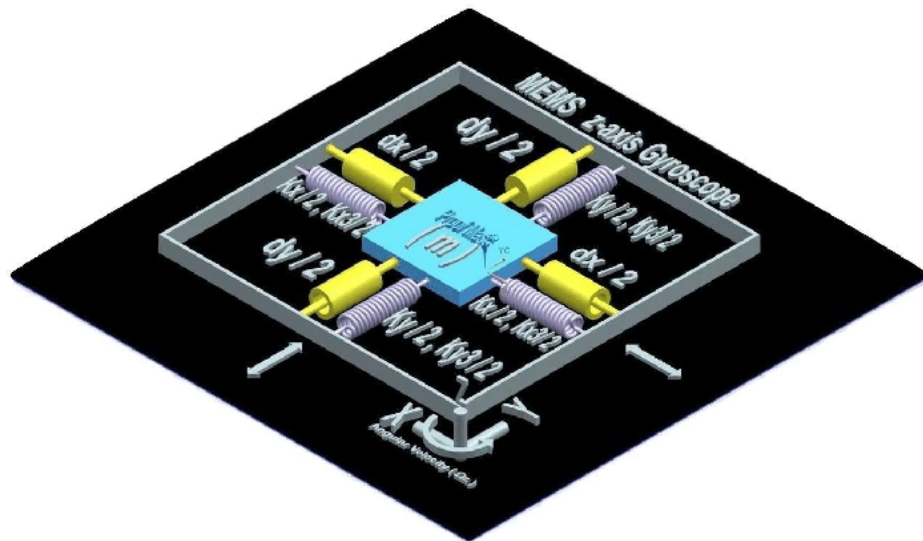


Ilustración 7. Modelo esquemático de un giroscopio⁶⁵

Similarmente los magnetómetros MEMS son utilizados para detectar campos magnéticos cercanos a un cuerpo. Cuando un campo magnético pasa a través de una superficie por donde circula corriente, tiende a generarse un voltaje proporcional a dicho campo magnético, esto se conoce como efecto Hall. (ver Ilustración 8) Luego, este voltaje puede ser convertido en información digital y ser procesado por un computador. Cabe recalcar que este tipo de sensor es muy sensible a cualquier campo magnético, no solo al terrestre.

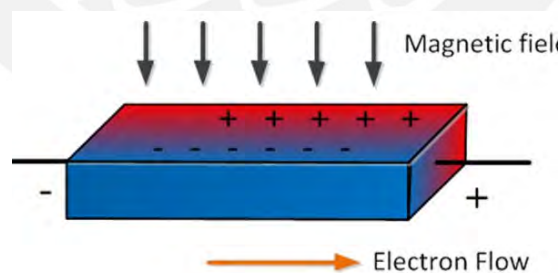


Ilustración 8. Principio de funcionamiento del efecto Hall⁶⁶

Por otro lado, ciertas investigaciones también utilizaron fibras extensibles, con las cuales medían pequeñas deformaciones a lo largo de la fibra. Su funcionamiento se asemeja a las galgas extensiométricas.

⁶⁵ Imagen extraída de https://www.researchgate.net/figure/Schematic-showing-MEMS-gyroscope-model_fig1_328974758

⁶⁶ Imagen extraída de <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/when-to-use-a-magnetometer-and-when-you-shouldnt/>

Este es el caso del sensor angular basado en fibras textiles. Estos sensores son producidos utilizando KPF (*knitted piezoresistive fabrics*), los cuales están constituidos en 75% por hilos conductivos y 25 % por licra, como se muestra en la Ilustración 9. Estos sensores piezoresistivos cambian su resistencia al ser sometidos a una fuerza, esto se debe a la modificación de la geometría dentro de la estructura de los hilos. Existen 2 tipos, los de una capa y los de doble capa. En el cálculo de la curvatura de este tipo de sensores se asumen ciertos supuestos, como que la longitud de la capa media es constante y la resistividad no cambia. En particular, en una flexión, la resistencia de cada capa difiere, pues estas se extienden en diferentes proporciones. Sin embargo, en tracción, estas permanecen iguales, pues la deformación lineal es igual en las capas superior e inferior. Cabe mencionar que la diferencia de estas resistencias es proporcional a la curvatura del sensor. Esto se puede observar en una prueba de extensión y flexión, como se muestra en la Ilustración 10. Finalmente, conociendo la curvatura, se puede hallar el ángulo en una articulación, pues este es el suplemento de la curvatura. (Togneti, 2014)

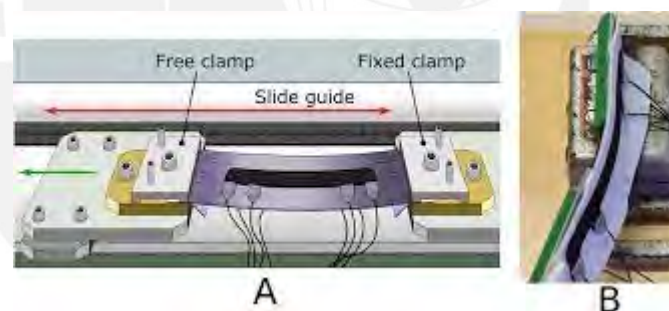


Ilustración 9. Prueba de extensión del sensor basado en fibras textiles (Togneti, 2014)



Ilustración 10. Detalle de una capa de un KPF sensor de doble capa centrada en la conexión entre sensores y cables conductores. (Togneti, 2014)

B.3. Características de un elemento de medición

Es importante tener en cuenta la calidad del sensado, en particular, para un dispositivo cuya función principalmente sea esa: sensar ángulos de la muñeca. En general, para cualquier elemento de medición, ya sea mecánico o eléctrico, se tienen que considerar las siguientes características en su diseño: la precisión, el rango, la exactitud, resolución, sensibilidad, etc. Además de ello, los sensores electrónicos, debido a su naturaleza, tiene características adicionales como la velocidad de medición, la potencia, la complejidad computacional, desviación por efectos magnéticos. Por otro lado, algunos sensores presentan desventajas al momento de realizar una integración del mensurando para hallar otra cantidad física; por ejemplo, si se deseara integrar la velocidad para hallar el desplazamiento. A esto se le llama deriva de integración y es una de las desventajas de las unidades de medición inercial o IMU.

Existen algunas soluciones a estas desventajas. Por ejemplo, se pueden usar filtros digitales o realizar una fusión con sensores adicionales de manera que se corrija en cada momento el error de integración. Todo ello requiere mayor potencia y velocidad computacional, por lo cual se necesitaría una computadora con la velocidad de procesamiento necesario para realizar todos los cálculos.

Anexo C: Estructura de funciones

C.1. Sistema mecánico

En este sistema se encuentran las funciones concernientes al movimiento de la muñeca del usuario (permitida por la estructura del dispositivo) y la colocación física del dispositivo por parte del especialista al paciente. A continuación, se explicará las seis funciones que componen este sistema.

- Colocar dispositivo: El especialista utiliza energía mecánica para colocar la estructura de sensado en la muñeca y antebrazo del paciente.
- Alinear dispositivo: El especialista alinea los sensores de manera que estén paralelos a ejes de los huesos correspondientes.
- Ajustar dispositivo: El especialista ajusta la estructura de sensado al paciente de manera que los sensores no puedan moverse relativos a la muñeca.
- Realizar movimiento F- E: Parte de la estructura mecánica del sistema de sensado gira a la par con el antebrazo del paciente en el movimiento de flexión- extensión.
- Realizar movimiento P- S: Parte de la estructura mecánica del sistema de sensado rota a la par con la muñeca del paciente en el movimiento de pronación- supinación.
- Realizar movimiento A- A: La estructura mecánica del sistema de sensado gira a la par con la muñeca del paciente en el movimiento de aducción- abducción.
- Desajustar dispositivo: Luego de realizar toda la medición, el especialista desajusta la estructura de sensado para su posterior remoción.
- Retirar el dispositivo: El especialista quita el dispositivo del brazo del paciente.

Además, al realizar los movimientos de la muñeca, el sistema de sensado recolectará y medirá ciertas cantidades físicas que luego serán usadas para calcular el ángulo correspondiente. A continuación, la Ilustración 11 muestra las funciones que componen este sistema mecánico.

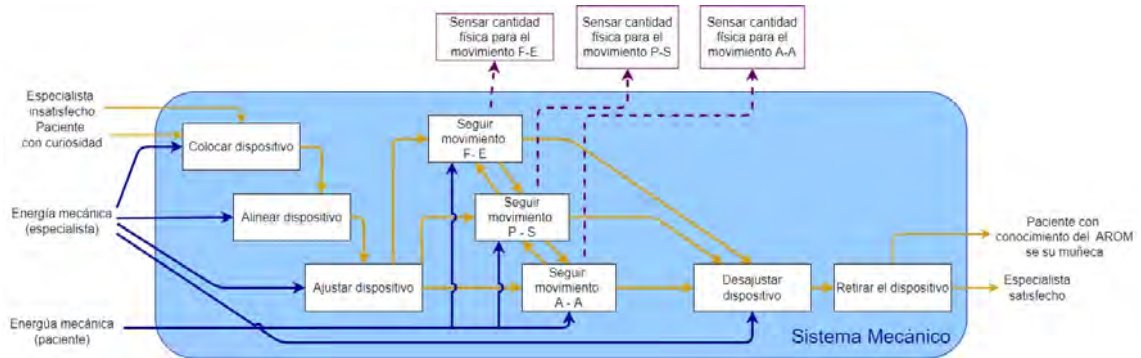


Ilustración 11. Sistema mecánico

C.2. Sistema de energía

Este sistema se encarga de administrar y distribuir la energía del dispositivo. Como se muestra en la Ilustración 12, son seis las funciones que componen el sistema de energía, las cuales se explican con mayor detalle a continuación.

- Cargar elemento de almacenamiento de energía: Esta función se encarga de regular y acondicionar la corriente doméstica para poder cargar la batería. Debido a que este producto estará dirigido al público peruano, se necesitará realizar la carga mediante un voltaje doméstico de 220 V en corriente alterna de 60 Hz.
- Almacenar energía eléctrica: La batería recibe energía eléctrica y la almacena. Esta carga puede ser medida por un sensor.
- Permitir paso de energía: Se impide o permite el paso de energía proveniente de la batería. Este es como un filtro, pues a partir de esta función también se puede apagar o prender el dispositivo.
- Apagar/encender dispositivo: Se recibe la señal física para prender o apagar el dispositivo.
- Acondicionar energía: Se adecúa el voltaje de salida proveniente del medio donde se almacena la energía de manera que sea compatible con los diferentes sistemas.

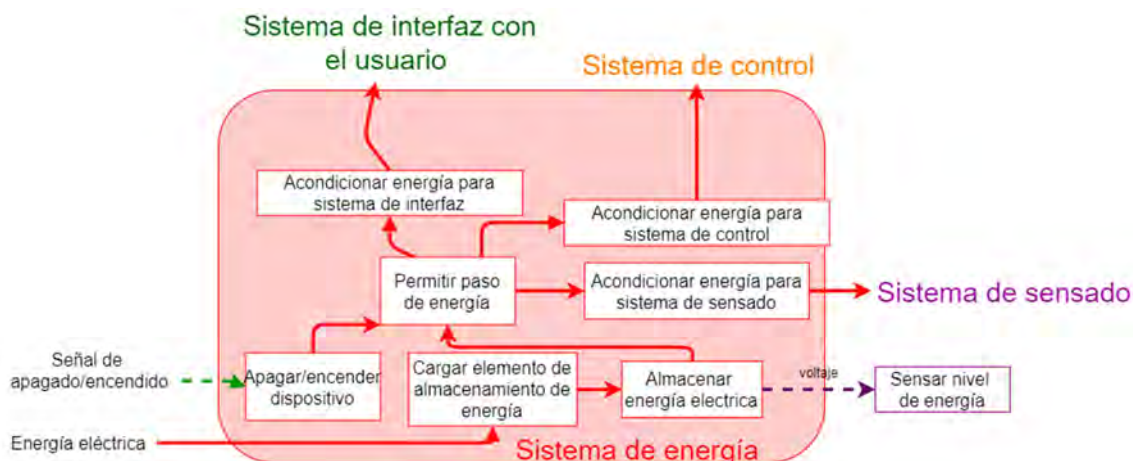


Ilustración 12. Sistema de energía

Adicionalmente, un sensor se encargará de medir el voltaje del elemento de almacenamiento de energía para su posterior visualización.

C.3. Sistema de sensado

Este sistema se encarga de sensar las cantidades físicas necesarias para el correcto funcionamiento, las cuales serán procesadas posteriormente por el sistema de control. Además, este sistema es alimentado por el sistema de energía luego del acondicionamiento de la energía como se muestra en la Ilustración 13. A continuación, se presentan las funciones que componen el sistema de sensado.

- Sensar nivel de energía: Se convierte el voltaje del elemento de almacenamiento de energía en información disponible al sistema de control.
- Sensar cantidad física para el movimiento X- X67: El sensor mide las cantidades físicas (aceleración lineal, cambio de campo magnético, etc.) necesarias para el movimiento solicitado. Estas mediciones pasarán al sistema de control para su próximo procesamiento.
- Acondicionar señales: Se regula el voltaje de salida de los sensores a un nivel adecuado para el sistema de control.

67 X-X puede ser P-S, F-E o AA, los cuales significan pronación-supinación, flexión-extensión o aducción-abducción respectivamente.

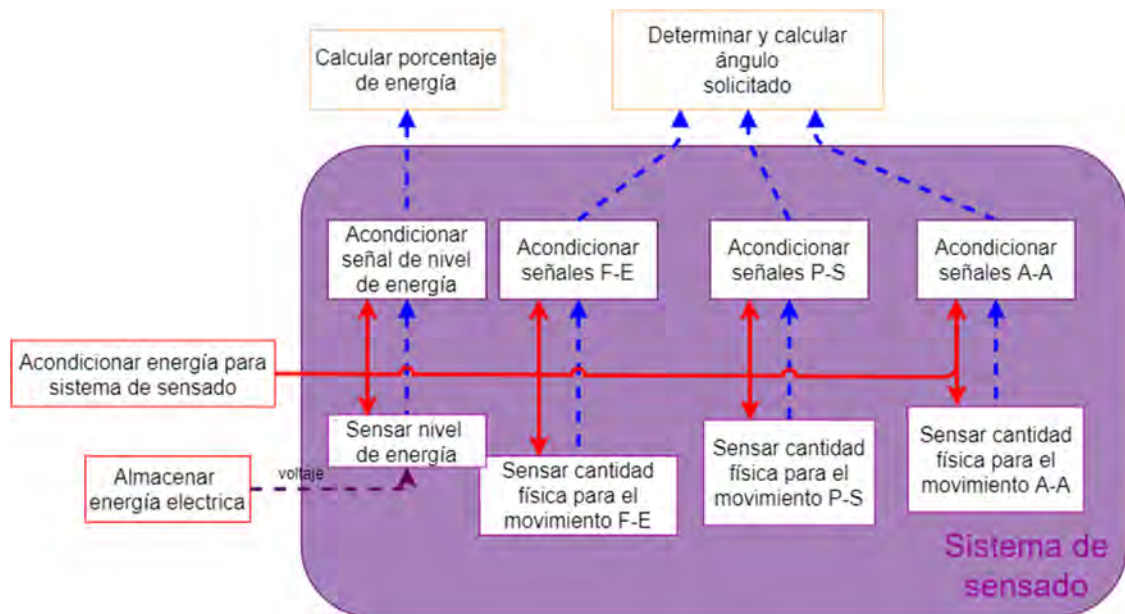


Ilustración 13. Sistema de sensado

C.4. Sistema de interfaz con el usuario

Este sistema se encarga de recibir señales de entrada y mostrar información sobre los ángulos, nivel de energía y el almacenamiento de las mediciones. mediante un elemento de visualización. Asimismo, es energizado a través del elemento de almacenamiento de energía. Como se muestra en la Ilustración 14, las funciones que componen son las siguientes:

- Recibir señal de cambio de medición: Se recibe la señal para elegir el movimiento correspondiente al ángulo que desea medir.
- Recibir señal para iniciar medición: Se recibe la señal que indica que el usuario desea que se inicie la medición y visualización del ángulo solicitado.
- Recibir señal para guardar medición: Se recibe la señal que solicita que se almacene la última medición.
- Mostrar ángulo solicitado: El elemento de visualización muestra la información relacionada al ángulo que solicita el usuario. Esto se debe realizar periódicamente.
- Indicar guardado exitoso: Se indica que el elemento de almacenamiento ha guardado la última medición.
- Indicar porcentaje de energía: Se indica qué porcentaje de energía queda en el elemento de almacenamiento de energía.

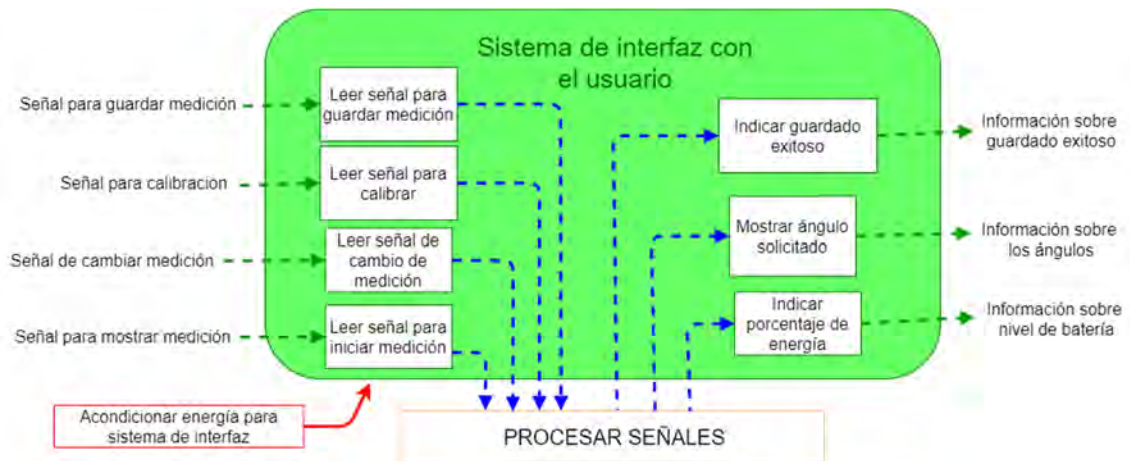


Ilustración 14. Sistema de interfaz con el usuario

C.4. Sistema de control

Por un lado, el sistema de control se encarga de procesar información proveniente del sistema de sensado. Por otro lado, también procesa las señales de entrada recibidas por el sistema de interfaz, y calcula la información sobre los ángulos y el nivel de energía que son mostrados por el sistema de interfaz con el usuario. A continuación, se describe cada subfunción que compone dicho sistema.

- Calibrar ángulos: Se recibe la señal para “setear” el cero en alguno de los ángulos.
- Cambiar ángulo: El sistema de control cambia las cantidades físicas sensadas a las que elija el usuario.
- Determinar y calcular ángulo solicitado: Se determina que ángulo el usuario desea medir a través de la señal correspondiente. Luego, se calcula o estima el ángulo del movimiento solicitado por el usuario mediante el uso de un algoritmo y/o relaciones físicas.
- Calcular porcentaje de energía: Se calcula el porcentaje de energía mediante una relación física entre la energía eléctrica en la batería y el voltaje de esta.
- Acondicionar señales para el almacenamiento: Las señales del controlador necesitan ser acondicionadas para ser escritas en el elemento de almacenamiento.
- Guardar medición en dispositivo de almacenamiento: Se guarda la última medición en el dispositivo de almacenamiento.

En la Ilustración 15 se muestran los bloques que representan las funciones del sistema de control.

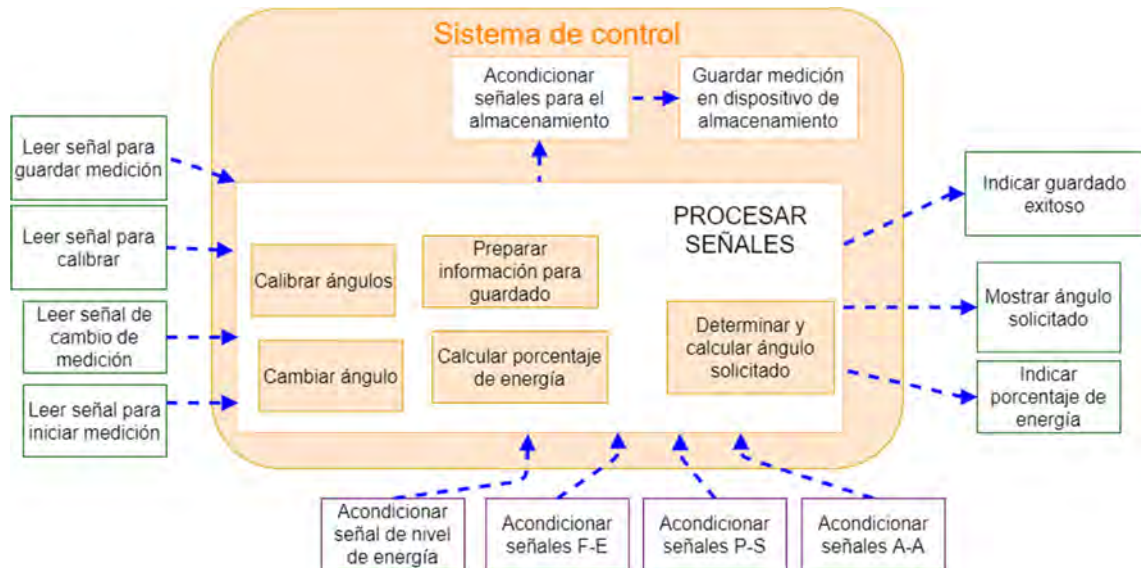


Ilustración 15. Sistema de control

Anexo D: Matriz morfológica

En las Tablas 1, 2.y 3 de este Anexo se plantean las matrices morfológicas para los sistemas mecánico, de sensado y de control, de interfaz con el usuario y de energía respectivamente.

Tabla1 Matriz morfológica del sistema mecánico

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Colocar dispositivo			
	Cadera y muñequera	Estructura flexible	Estructura polimérica
Alinear dispositivo			
	Velcro	Estructura flexible	Estructura polimérica
Ajustar dispositivo			
	Velcro	Correa de goma	Clip ajustable
Realizar movimiento X- X			
	Cadera y muñequera	Cables piezoresistivos flexibles	Sistema de bielas
Desajustar dispositivo			
	Velcro	Correa de goma	Clip ajustable
Retirar dispositivo			
	Cadera y muñequera	Estructura flexible	Estructura polimérica

Tabla 2 Matriz morfológica del sistema de sensado y control

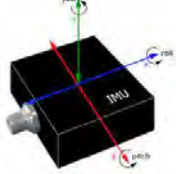
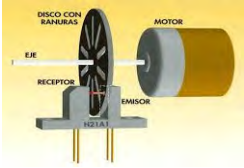

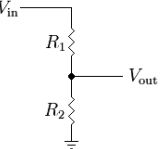
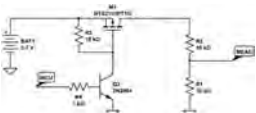
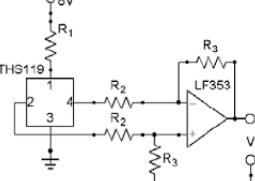
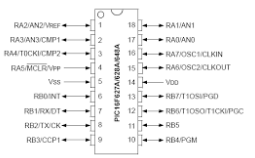







Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sensar cantidad física para el movimiento X-X	 <p>IMU</p>	 <p>Encoder</p>	 <p>Sensor KPF (knitted piezoresistive fabric)</p>
Sensar nivel de energía	 <p>Circuito divisor de tensión</p>	 <p>Circuito medidor con MOSFET</p>	
Acondicionar señales	 <p>Circuito integrado de acondicionamiento</p>	 <p>Pines analógicos del uC compatibles con el sensor</p>	
Acondicionar señales para el almacenamiento	 <p>Módulo lector de tarjeta SD</p>	<p>Interfaz directa (no hay necesidad de driver)</p>	 <p>Modulo lector USB</p>
Guardar medición En dispositivo de almacenamiento	 <p>USB</p>	 <p>EEPROM (SD)</p>	
PROCESAR SEÑALES	 <p>Microcontrolador</p>	 <p>FPGA</p>	 <p>Ordenador de placa reducida</p>

Tabla 3 Matriz morfológica del sistema de interfaz del usuario


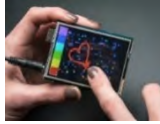

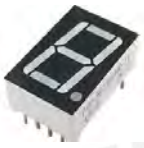
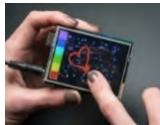
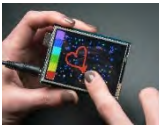

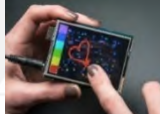


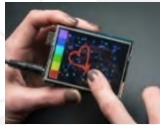
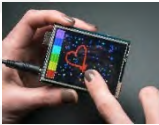
Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Leer señales relacionadas a la medición (guardar, cambiar, realizar medición o calibrar)	 Pulsadores	 Pantalla táctil	 Switch
Mostrar ángulo solicitado	 Display de 7 segmentos	 Pantalla táctil	 Pantalla táctil
Indicar guardado exitoso	 Luces LED	 Pantalla táctil	 Pantalla táctil
Indicar porcentaje de batería	 LED multicolor	 Pantalla táctil	 Pantalla táctil

Tabla 4 Matriz morfológica del sistema de energía

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Cargar elemento de almacenamiento de energía	 Cargador externo	 Módulo cargador + cargador	
Almacenar energía	 Batería Li-ion	 Batería NiCd	 Batería NiMH
Permitir paso de energía	 Circuito “latching”	 Switch	
Acondicionar energía	 Regulador lineal	 Regulador conmutado	
Apagar/encender dispositivo	 Pulsador	 Switch	

Anexo E: Cuaterniones

Los cuaterniones son parámetros que representan rotaciones de sistemas de referencia en el espacio. Como se muestra en la Ilustración 16, al girar θ grados alrededor del eje ${}^A\hat{r}$ el sistema A puede alinearse con el sistema B (ángulo entre ambos sistemas de referencia). Los cuaterniones están compuestos por 4 números imaginarios q_1, q_2, q_3 y q_4 . El cuaternión que describe la orientación del sistema de referencia B con respecto al sistema A, ${}^A_{\hat{B}}\hat{q}$ se muestra en la ecuación (i), donde r_x, r_y, r_z definen los componentes del vector unitario ${}^A\hat{r}$ en las coordenadas de A.

$${}^A_{\hat{B}}\hat{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4] = \left[\cos \frac{\theta}{2} \ r_x \sin \frac{\theta}{2} \ r_y \sin \frac{\theta}{2} \ r_z \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (i)$$

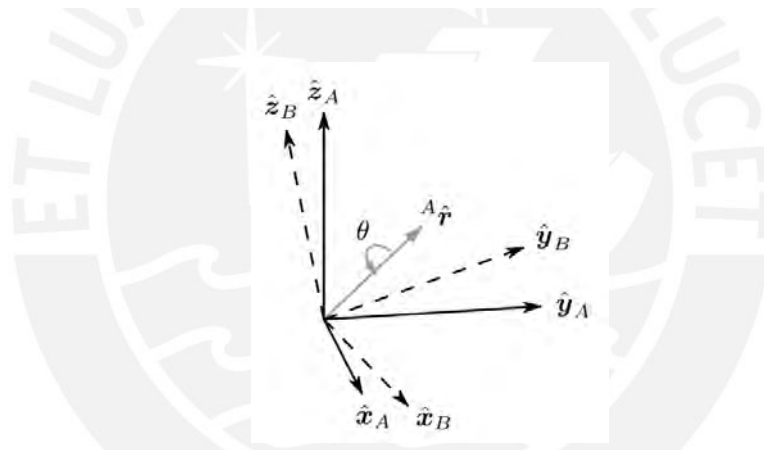


Ilustración 16. Sistemas de referencias A y B

Como se muestra en la ecuación (ii), el producto de dos cuaterniones \mathbf{a} y \mathbf{b} se representa mediante la operación no conmutativa \otimes y puede calcularse de acuerdo a la regla de Hamilton.

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \otimes \mathbf{b} &= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \otimes [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4] \\ &= \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 \\ a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 + a_4 b_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (ii)$$

Anexo F: Cotizaciones

En este anexo se muestran las proformas y/o cotizaciones en las páginas web de los distintos proveedores o intermediarios.

Designator	Name	Footprint	Matched Part Detail	Qty	Source	Total Cost	Select
R16	51K	R0603	0603WAF5102T5E ±1% 51kΩ ±100ppm/°C 0.1W 0603 Chip R...	36	JLPCPB	\$0.0828	<input checked="" type="checkbox"/>
C15,C16,C1...	22uF/10V	C0805	CL21A226MAQNNNE X5R 25V ±20% 22uF 0805 Multilayer C...	95	JLPCPB	\$3.2490	<input checked="" type="checkbox"/>
U2	TPS63060DSCR	WSON-10_L3.0-W3...	TPS63060DSCR 2A (Switch) 12V SON-10_3X3X05P DC-D...	30	LCSC	\$231.1680	Inventory shortage
C3,C4	0.1u	C0603	CL10B104JB8NNNC X7R 100nF ±5% 50V 0603 Multilayer C...	66	JLPCPB	\$0.7062	<input checked="" type="checkbox"/>
L2	1.5uH	IND-SMD_L6.6-W6...	MCW-0630-1R5-S1 SMD Power Inductors ROHS	31	LCSC	\$3.1372	<input checked="" type="checkbox"/>
R18	9.09k	R0603	0603WAF9091T5E ±1% ±100ppm/°C 0.1W 9.09kΩ 0603 Chip...	36	JLPCPB	\$0.0864	<input checked="" type="checkbox"/>
TFT_2.8IN	Header-Male-2.5...	HEADER-MALE-2.5...	B-2100S05P-A110 5 2.54mm Straight 1 Header, Breakawa...	30	LCSC	\$1.0350	<input checked="" type="checkbox"/>
C1,C2,C7,C...	10uF	C0805	CL21A106KAYNNNE X5R 25V ±10% 10uF 0805 Multilayer C...	245	JLPCPB	\$2.0335	<input checked="" type="checkbox"/>
R12,R13	1k	R0603	0603WAF1001T5E ±1% ±100ppm/°C 1kΩ 0.1W 0603 Chip Re...	66	JLPCPB	\$0.1518	<input checked="" type="checkbox"/>
C6	0.1uF	C0603	CL10B104JB8NNNC X7R 100nF ±5% 50V 0603 Multilayer C...	36	JLPCPB	\$0.3852	<input checked="" type="checkbox"/>
U5	IP2312U	ESOP-S_L4.9-W3...	IP2312U_VSET ESOP-8L Battery Management ICs ROHS	30	LCSC	\$6.7530	<input checked="" type="checkbox"/>
L3	1uH	IND-SMD_L4.0-W4...	SMNR4020-1UH SMD 4x4x2mm Power Inductors ROHS	32	LCSC	\$1.9008	<input checked="" type="checkbox"/>
R11	133k	R0603	0603WAF1333T5E ±1% 133kΩ ±100ppm/°C 0.1W 0603 Chip ...	36	JLPCPB	\$0.0900	<input checked="" type="checkbox"/>
R7	100R	R0603	0603WAF1000T5E ±1% ±200ppm/°C 100Ω 0.1W 0603 Chip R...	36	JLPCPB	\$0.0828	<input checked="" type="checkbox"/>
R8,R9	2R2	R0603	0603WAF220KT5E 2.2Ω ±1% ±400ppm/°C 0.1W 0603 Chip R...	66	JLPCPB	\$0.1914	<input checked="" type="checkbox"/>
R19	34.8k	R0603	0603WAF3482T5E ±1% 34.8kΩ ±100ppm/°C 0.1W 0603 Chip...	36	JLPCPB	\$0.0936	<input checked="" type="checkbox"/>
R3	562k	R0603	0603WAF5623T5E ±1% 562kΩ ±100ppm/°C 0.1W 0603 Chip ...	36	JLPCPB	\$0.1044	<input checked="" type="checkbox"/>
U6	FS312F-G	SOT-23-6_L2.9-W...	FS312F-G SOT-23-6 Battery Management ICs ROH...	34	LCSC	\$4.6274	Inventory shortage
C13,C14	10uF/16V	C0805	CL21A106KAYNNNE X5R 25V ±10% 10uF 0805 Multilayer C...	65	JLPCPB	\$1.1700	<input checked="" type="checkbox"/>
Q2	F88205	SOT-23-6_L2.9-W...	F88205A SOT23-6 MOSFETS ROHS	34	LCSC	\$1.8292	<input checked="" type="checkbox"/>
USB1	MICRO USB THT	MICRO-USB-SMD_U...	U254-051N-4BH806 Receptacle USB - Micro B 5 USB 2.0 ...	30	LCSC	\$1.6140	<input checked="" type="checkbox"/>
C18	100nF/50V	C0603	0603B104K250CT X7R 100nF 25V ±10% 0603 Multilayer ...	50	LCSC	\$0.2400	<input checked="" type="checkbox"/>
R1,R2,R4	100k	R0603	0603WAF1003T5E ±1% 100kΩ ±100ppm/°C 0.1W 0603 Chip ...	96	JLPCPB	\$0.2208	<input checked="" type="checkbox"/>
R5,R6	280R	R0603	0603WAF2800T5E ±1% 280Ω ±100ppm/°C 0.1W 0603 Chip R...	66	JLPCPB	\$0.1650	<input checked="" type="checkbox"/>
C5	2.2 pF	C0603	CL10C2R2CB8NNNC COG ±0.25PF 50V 2.2PF 0603 MULTILAY...	36	JLPCPB	\$0.2628	<input checked="" type="checkbox"/>
SD/MMC1	DM3AT-SF-PEJM5	*HRS_DM3AT-SF-P...	No part selected	Search	Pre-order		
P1	Mini 328 - 3.3V	MINI 328 - 3.3V	No part selected	Search	Pre-order		

Ilustración 17. Componentes cotizados en JLPCPB

Charge Details	
PCB Price ^	
Engineering fee	\$4.00
Board	\$10.30
SMT Price ^	
Setup fee	\$7.00
Stencil	\$1.50
Panel	\$0.00
Large Size	\$0.00
Components	\$24.85
Extended components fee ?	\$39.00
SMT Assembly ?	\$4.76
Hand-soldering labor fee	\$3.50
Manual Assembly ?	\$3.00
Build Time ?	
PCB: 3 days	\$0.00
SMT: 144 hours ?	
Total Price	\$97.91
Weight ?	502.86g

Ilustración 18. Cotización de costos de manufactura de PCB, componentes y ensamblado en JLCPCB


SSL SECURED CHECKOUT
Your Information is Protected

1. Shipping Address	SUMMARY Merchandise Total \$97.91 Shipping \$29.98 Grand Total: \$127.89
2. Shipping Method	
3. Submit Order	

Ilustración 19. Costo total de componentes cotizados en JLCPCB incluyendo costo de envío

Ilustración 20. Cotización de 1Kg de filamento PETG

Ilustración 21. Costos individuales de componentes cotizados en Alibaba

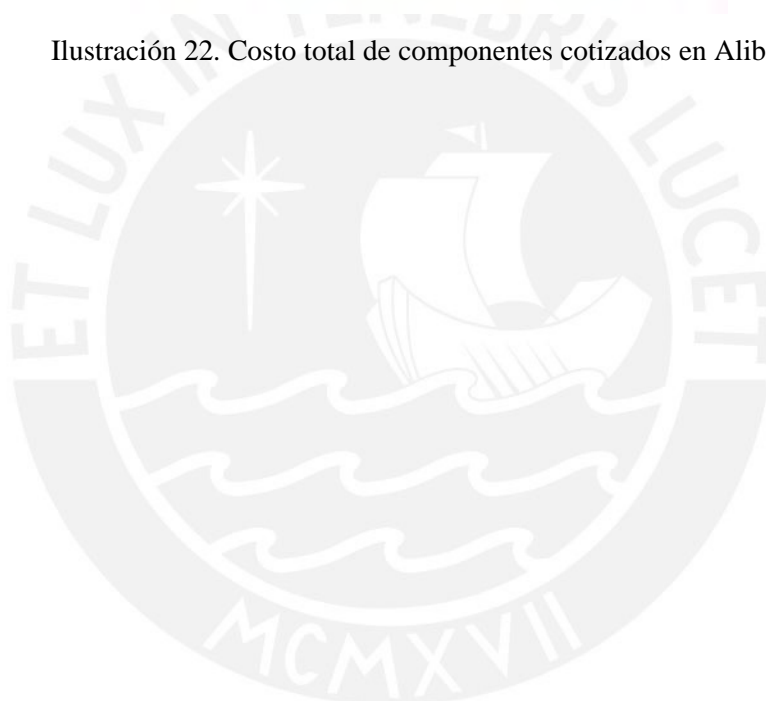
Resumen del pedido

Subtotal	US \$802.22
▶ Ahorras	- US \$34.15
Envío	US \$74.96

Total **US \$843.03**

COMPRAR (12)

Ilustración 22. Costo total de componentes cotizados en Alibaba



Anexo G: Código

En este anexo se presentan el código usado para la programación del prototipo de medición de los 6 ángulos. Este se divide en 2 códigos: uno para la interfaz y otro para el cálculo de los ángulos.

En ese sentido, el código que se muestra a continuación se usó para la programación de la interfaz del usuario.

```

/*
  Autor: Brus A. Rojas Cruz
  Fecha: 20/02/2021
  Descripción: Este programa se encargará de mostrar la interfaz con el
  usuario mediante una pantalla táctil
  resistiva TFT de 2.8'' de Adafruit y el guardado de los ángulos en una
  tarjeta SD.
  Hardware:
  Pantalla TFT 2.8'' -> Se usará una pantalla TFT de 2.8'' resistiva. Esta se
  comunicará con
  el Arduino Pro Mini mediante el protocolo SPI. Se usarán 5 pines
  de datos y 4 para
  la pantalla táctil.
  CLK->13, MISO->12, MOSI->11, CS-> 4, D/C-> 9, Y+>A2, X+>9, Y--
>8 X-->A3
  Modulo microSD -> Este se comunica con el Arduino Pro Mini mediante SPI,
  por lo cual comparte
  algunos pines con la pantalla TFT.
  SCK->13, MISO->12, MOSI->11, CS-> 10
*/

#include "Wire.h"
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_ILI9341.h>
#include <stdint.h>
#include "TouchScreen.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

#define pin_bateria A0
// Pines para la interacción vía SPI con la pantalla LCD
#define ancho_TFT 320
#define alto_TFT 240
#define TFT_DC 9
#define TFT_CS 4

File dataFile;
#define micro_CS 10
// Se usa los siguientes pines (#13, #12, #11) y los de arriba para CS/DC
// Adafruit_ILI9341 tft = Adafruit_ILI9341(TFT_CS, TFT_DC);
// Adafruit_ILI9341 tft = Adafruit_ILI9341(TFT_CS, TFT_DC, TFT_MOSI, TFT_CLK,
TFT_RST, TFT_MISO);
Adafruit_ILI9341 tft = Adafruit_ILI9341(TFT_CS, TFT_DC);

// Se definen los pines para la pantalla táctil
#define YP A2
#define XM A3
#define YM 9
#define XP 8

```

```

// Para mejor precisión en la presión, se necesita conocer la resistencia
// entre X+ y X-. En mi pantalla es de 340 Ohm
TouchScreen ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 340);

// Datos de calibración para los datos de la pantalla táctil
#define TS_MINX 165
#define TS_MINY 870
#define TS_MAXX 850
#define TS_MAXY 115

// variables del programa y la pantalla TFT
int temp;
char letra_actual;
char letra_anterior;
int nivel_bateria = 100;
double angulo = 100.0;
double angulo_zero = 0.0;
char movimiento = '0';
String mov = String("");
bool brazo = true;
String bra = String("");
String medida;
int16_t posx;
int16_t posy;
String nombre = String("");
char pagina_actual;
bool pasar = false;

// constantes del programa
const char qwerty[] =
{'Q', 'W', 'E', 'R', 'T', 'Y', 'U', 'I', 'O', 'P', 'A', 'S', 'D', 'F', 'G', 'H', 'J', 'K', 'L', '0',
xA5, 'Z', 'X', 'C', 'V', 'B', 'N', 'M', 0xA7};

// =====
// ===          Rutina de detección de interrupción          ===
// =====

void setup() {
  // join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically)
  // Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  tft.begin();
  tft.setRotation(3);
  tft.setTextColor(ILI9341_WHITE);
  PantallaCalibracion();
  pagina_actual='1';
}

void loop() {
  // Se capturan las coordenadas que se han presionado, así como
  // la presión(z)
  TSPoint p = ts.getPoint();

  // No aseguramos de que se haya presionado.
  // Presión de 0 (z=0) significa no presionado
  if (p.z > 10 && p.z < 1000){

    temp = map(p.x, TS_MINX, TS_MAXX, 0, tft.height());
    p.x = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, tft.width());
    p.y = temp;

    Serial.print("p.x = ");
    Serial.print(p.x);
    Serial.print("  p.y = ");
    Serial.println(p.y);
    switch (pagina_actual){

```

```

case '0': // '0' Representa la ventana principal

    if(p.x>240 && p.x<300 && p.y>140 && p.y<170){
        PantallaSeleccionBrazo();
        pagina_actual='2';
    }
    if(p.x>20 && p.x<80 && p.y>200 && p.y<230){
        // Se deben setear el ángulo en 0
        angulo_zero=angulo;
    }
    if(p.x>130 && p.x<190 && p.y>200 && p.y<230){
        PantallaCalibracion();
        pagina_actual='1';
    }
    if(p.x>240 && p.x<300 && p.y>200 && p.y<230){
        PantallaGuardado();
        pagina_actual='4';
    }

    break;
case '1': // '1' Representa la ventana de calibración
    if(p.x>16 && p.x<96 && p.y>150 && p.y<195){
        // Se presiono INICIO
        // Escribir "Calibrando..." y calibrar
        tft.setCursor(230,230);
        tft.setTextSize(1);
        tft.println("Calibrando...");
        // CalibrarMPU9150(&mpu1);
        // CalibrarMPU9150(&mpu2);
        delay(1000);
        // Mostrar ("Listo") y pasar a la siguiente ventana principal
        tft.fillRect(230,230,60,15,ILI9341_BLACK);
        tft.setCursor(260,230);
        tft.println("Listo");
        delay(1000);
        PantallaPrincipal();
        pagina_actual='0';
    }
    break;
case '2': // '2' Representa la ventana de selección de brazo
    if(p.x>80 && p.x<240 && p.y>60 && p.y<120){
        Pasar();
        brazo = false; // Se selecciona el brazo izquierdo
        bra = "Izq";
    }
    if(p.x>80 && p.x<240 && p.y>150 && p.y<210){
        Pasar();
        brazo = true; // Se selecciona el brazo derecho
        bra = "Der";
    }
    if(pasar){
        pasar = false;
        PantallaSeleccionMovimiento();
        pagina_actual='3';
    }
    break;
case '3': // '3' Representa la ventana de selección de
movimiento
    if(p.x>25 && p.x<145){
        if(p.y>50 && p.y<95){
            movimiento = '0'; // Se selecciona pronacion
            mov= "Pron";
            Pasar();
        }else if(p.y>115 && p.y<160){
            movimiento = '2'; // Se selecciona flexion
            mov= "Flex";

```

```

        Pasar();
    }else if(p.y>180 && p.y<225){
        movimiento = '4'; // Se selecciona abduccion
        mov= "Abdu";
        Pasar();
    }
}
if(p.x>175 && p.x<295){
    if(p.y>50 && p.y<95){
        movimiento = '1'; // Se selecciona supinación
        mov= "Supi";
        Pasar();
    }else if(p.y>115 && p.y<160){
        movimiento = '3'; // Se selecciona extension
        mov= "Exte";
        Pasar();
    }else if(p.y>180 && p.y<225){
        movimiento = '5'; // Se selecciona aduccion
        mov= "Aduc";
        Pasar();
    }
}
if(pasar){
    pasar = false;
    PantallaPrincipal();
    pagina_actual='0';
}
break;
case '4': // '4' Representa la ventana de guardado
    posX = (p.x-10)/30;
    posY = (p.y-70)/35;
    tft.setTextSize(2);
    if(p.x>20 && p.x<80 && p.y>200 && p.y<230){
        PantallaPrincipal();
        pagina_actual='0';
    }
    if(10*posy + posX < 27 && posX >= 0 && posX <= 9 && posy >= 0 &&
posy <= 2){
        letra_actual=qwerty[10*posy + posX];
        if(letra_actual!=letra_anterior){
            nombre+=letra_actual;
            letra_anterior=letra_actual;
        }
        tft.setCursor(45,40);
        tft.println(nombre);
    }
    else if(p.x>220 && p.x<310 && p.y>140 && p.y<175){
        tft.fillRect(40,40,240,20,ILI9341_DARKGREEN);
        nombre.remove(nombre.length()-1,1);
        tft.setCursor(45,40);
        tft.println(nombre);
    }else if(p.x>130 && p.x<220 && p.y>175 && p.y<210){
        letra_actual=' ';
        if(letra_actual!=letra_anterior){
            nombre+=letra_actual;
            letra_anterior=letra_actual;
        }
        tft.setCursor(45,40);
        tft.println(nombre);
    }else if((p.x>220 && p.x<310 && p.y>175 && p.y<210)){
//        GuardarMedicion();
        PantallaPrincipal();
        pagina_actual='0';
    }
}
break;
}
}
}

```

```

    if(pagina_actual=='0') MostrarAnguloTFT();
    MostrarNivelBateriaTFT();
    // if programming failed, don't try to do anything
    // Se recolectan los cuaterniones del IMU 1
    // Se recolectan los cuaterniones del IMU 2
    // Se halla q0=cos  $\theta/2$  y q_= sin  $\theta/2$  r1_ para cada cuaternion
    // Se convierte los cuaterniones en matrices homogéneas
    // hallarMatrizHomogenea(&q1, H1);
    // hallarMatrizHomogenea(&q2, H2);
    // Se seleccionan los ejes dependiendo del movimiento

    delay(10);
    // Se halla el ángulo dependiendo de los ejes.

}
void PantallaCalibracion(){
    tft.fillScreen(ILI9341_BLACK);
    tft.fillRect(0,0,ancho_TFT,30,ILI9341_NAVY);
    tft.setTextSize(2);
    tft.setCursor(10,6);
    tft.println("CALIBRACION");
    tft.setCursor(0,35);
    tft.println("Alinee los sensores en");
    tft.println("una superficie plana como");
    tft.println("se muestra a continuacion");
    tft.println("Pulse INICIO para iniciar");
    tft.println("la autocalibracion");

    tft.fillRect(16,150,80,45,ILI9341_GREEN);
    tft.setCursor(20,165);
    tft.println("INICIO");
    tft.setTextSize(1);

    tft.drawRect(120,160,55,20,ILI9341_BLUE);
    tft.setCursor(125,166);
    tft.println("Sensor 1");
    tft.drawLine(175,170,ancho_TFT,170,ILI9341_RED);

    tft.drawRect(120,180,55,20,ILI9341_BLUE);
    tft.setCursor(125,186);
    tft.println("Sensor 2");
    tft.drawLine(175,190,ancho_TFT,190,ILI9341_RED);

}
void PantallaPrincipal(){
    tft.fillScreen(ILI9341_BLACK);
    tft.fillRect(0,0,ancho_TFT,30,ILI9341_NAVY);

    tft.setTextSize(2);
    tft.setCursor(10,6);
    tft.println("PRINCIPAL");
    tft.setCursor(0,35);
    tft.println("S: Seleccionar movimiento");
    tft.println("Z: Setear el cero");
    tft.println("C: Calibracion");
    tft.println("G: Guardar medicion");
    tft.setCursor(0,110);
    tft.println("Angulo:");

    tft.fillRect(240,140,60,30,ILI9341_GREEN);
    tft.setCursor(265,150);
    tft.println("S");

    tft.fillRect(20,200,60,30,ILI9341_GREEN);

```



```

tft.setCursor(45,210);
tft.println("Z");

tft.fillRect(130,200,60,30,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(155,210);
tft.println("C");

tft.fillRect(240,200,60,30,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(265,210);
tft.println("G");

tft.setTextColor(ILI9341_WHITE,ILI9341_BLACK);
tft.setCursor(0,135);
tft.println(bra);
tft.println(mov);
}
void PantallaSeleccionBrazo(){
tft.fillRect(ILI9341_BLACK);
tft.fillRect(0,0,ancho_TFT,30,ILI9341_NAVY);

tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(10,6);
tft.println("BRAZO");

tft.setTextSize(3);
tft.fillRect(80,60,160,60,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(80,75);
tft.println("Izquierdo");

tft.fillRect(80,150,160,60,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(95,165);
tft.println("Derecho");
}
void PantallaSeleccionMovimiento(){

tft.fillRect(ILI9341_BLACK);
tft.fillRect(0,0,ancho_TFT,30,ILI9341_NAVY);
tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(10,6);
tft.println("MOVIMIENTO");

tft.fillRect(25,50,120,45,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(30,65);
tft.println("Pronacion");

tft.fillRect(175,50,120,45,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(175,65);
tft.println("Supinacion");

tft.fillRect(25,115,120,45,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(40,130);
tft.println("Flexion");

tft.fillRect(175,115,120,45,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(180,130);
tft.println("Extension");

tft.fillRect(25,180,120,45,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(30,195);
tft.println("Abduccion");

tft.fillRect(175,180,115,45,ILI9341_GREEN);
tft.setCursor(185,195);
tft.println("Aduccion");
}

```

```

}
void PantallaGuardado(){
  tft.fillScreen(ILI9341_BLACK);
  tft.fillRect(0,0,ancho_TFT,30,ILI9341_NAVY);
  tft.setTextSize(2);
  tft.setCursor(10,6);
  tft.println("GUARDADO");
  tft.fillRect(40,40,240,20,ILI9341_DARKGREEN);
  tft.setTextSize(4);
  tft.setTextColor(ILI9341_WHITE,ILI9341_BLACK);
  for(byte j=0; j<3; ++j){
    for(byte i=0; i<10; ++i){
      if(i+10*j>26) break;
      tft.setCursor(14+30*i,72 + 35*j);
      tft.println(qwerty[i+10*j]);
      tft.drawRect(10+30*i, 70 + 35*j, 30, 35, ILI9341_WHITE);
    }
  }
  tft.setTextSize(2);

  tft.setCursor(19+30*7,80 + 35*2);
  tft.println("Borrar");
  tft.drawRect(10+30*7, 70 + 35*2, 90, 35, ILI9341_WHITE);

  tft.setCursor(14+30*4,80 + 35*3);
  tft.println("Espacio");
  tft.drawRect(10+30*4, 70 + 35*3, 90, 35, ILI9341_WHITE);

  tft.setCursor(19+30*7,80 + 35*3);
  tft.println("Grabar");
  tft.drawRect(10+30*7, 70 + 35*3, 90, 35, ILI9341_WHITE);

  tft.setTextColor(ILI9341_WHITE);
  tft.fillRect(20,200,60,30,ILI9341_GREEN);
  tft.setCursor(20,210);
  tft.println("Atras");
}
void MostrarNivelBateriaTFT(){
  // 4.1V => 100%, 2.8V => 0% y considerando el divisor de tensión
  nivel_bateria = map(analogRead(pin_bateria), 688,1007,0,100);
  tft.setTextSize(2);
  tft.setTextColor(ILI9341_WHITE,ILI9341_NAVY);
  tft.setCursor(200,6);
  tft.print("BAT ");
  if(nivel_bateria<100){
    tft.print(" ");
    if(nivel_bateria<10){
      if(nivel_bateria<0){nivel_bateria=0;}
      tft.print(" ");
    }
  }else{
    nivel_bateria = 100;
  }
  tft.println(nivel_bateria);
  tft.setTextColor(ILI9341_WHITE);
}
void MostrarAnguloTFT(){
  char grado = 0xA7;
  tft.setTextSize(3);
  tft.setTextColor(ILI9341_WHITE,ILI9341_BLACK);
  int angulo_mostrar = static_cast<int>(fabs(angulo-angulo_zero));
  tft.setCursor(60,135);
  if(angulo_mostrar<100) tft.print(" ");
  if(angulo_mostrar<10) tft.print(" ");
  tft.print(angulo_mostrar);
}

```

```

    tft.println(grado);
    tft.setTextColor(ILI9341_WHITE);
}
void GuardarMedicion(){
    tft.setCursor(175,215);
    tft.setTextColor(ILI9341_WHITE,ILI9341_BLACK);
    tft.println("Guardando...");
    tft.setCursor(130,215);
    if(!SD.begin(micro_CS)){
        tft.println("Falla de inicio");
        return;
    }
    dataFile = SD.open("Medidas_goniometro.txt", FILE_WRITE);
    if(dataFile){
        String dataString = '\n' + nombre + ' ' + mov + ' ' + bra + ' ' +
medida;
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.close();
        tft.println("Carga correcta");
    }else{
        tft.println("Falla carga txt");
    }
}
void Pasar(){
    pasar = true;
}

```

En segundo lugar, se muestra el código para el cálculo de los ángulos. Este código parte de un ejemplo desarrollado por Jeff Rowberg. Sin embargo, se editó y agregó las partes para la visualización y la conversión de cuaterniones a matrices de rotación.

```

/* =====
I2Cdev device library code is placed under the MIT license
Copyright (c) 2012 Jeff Rowberg

Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy
of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal
in the Software without restriction, including without limitation the rights
to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell
copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is
furnished to do so, subject to the following conditions:

The above copyright notice and this permission notice shall be included in
all copies or substantial portions of the Software.

THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR
IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY,
FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE
AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER
LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM,
OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN
THE SOFTWARE.
=====

Autor: Brus A. Rojas Cruz
Fecha: 20/02/2021
Descripción: Este programa se encargará de hallar el ángulo entre los ejes
de 2 IMU 9250 y mostrarlos
en el monitor serial.
Hardware:
1 MPU9250 -> Se usarán 6 pines del primer IMU.
VCC->VCC, GND->GND, SCL->A5, SDA-> A4, AD0-> 5, INT->2

```

```

    2 MPU9250 -> Se usarán 6 pines del segundo IMU.
    VCC->VCC, GND->GND, SCL->A5, SDA-> A4, AD0-> 6, INT->3
*/

// I2Cdev and MPU6050 must be installed as libraries, or else the .cpp/.h
files
// for both classes must be in the include path of your project
#include "I2Cdev.h"

#include "MPU9150_9Axis_MotionApps41.h"

// Arduino Wire library is required if I2Cdev I2CDEV_ARDUINO_WIRE
implementation
// is used in I2Cdev.h
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    #include "Wire.h"
#endif

// class default I2C address is 0x68
// specific I2C addresses may be passed as a parameter here
// AD0 low = 0x68 (default for SparkFun breakout and InvenSense evaluation
board)
// AD0 high = 0x69
MPU9150 mpu;
//MPU9150 mpu(0x69); // <-- use for AD0 high
#define address1 5
#define address2 6
/* =====
NOTE: In addition to connection 3.3v, GND, SDA, and SCL, this sketch
depends on the MPU-6050's INT pin being connected to the Arduino's
external interrupt #0 pin. On the Arduino Uno and Mega 2560, this is
digital I/O pin 2.
* =====
*/

/* =====
NOTE: Arduino v1.0.1 with the Leonardo board generates a compile error
when using Serial.write(buf, len). The Teapot output uses this method.
The solution requires a modification to the Arduino USBAPI.h file, which
is fortunately simple, but annoying. This will be fixed in the next IDE
release. For more info, see these links:

http://arduino.cc/forum/index.php/topic,109987.0.html
http://code.google.com/p/arduino/issues/detail?id=958
* =====
*/

// uncomment "OUTPUT_READABLE_QUATERNION" if you want to see the actual
// quaternion components in a [w, x, y, z] format (not best for parsing
// on a remote host such as Processing or something though)
#define OUTPUT_READABLE_QUATERNION

// uncomment "OUTPUT_TEAPOT" if you want output that matches the
// format used for the InvenSense teapot demo
// #define OUTPUT_TEAPOT

#define LED_PIN 13 // (Arduino is 13, Teensy is 11, Teensy++ is 6)
bool blinkState = false;

// MPU control/status vars
bool dmpReady = false; // set true if DMP init was successful
uint8_t mpuIntStatus; // holds actual interrupt status byte from MPU
uint8_t devStatus; // return status after each device operation (0 =
success, !0 = error)
uint16_t packetSize; // expected DMP packet size (default is 42 bytes)

```

```

uint16_t fifoCount; // count of all bytes currently in FIFO
uint8_t fifoBuffer[64]; // FIFO storage buffer

bool dmpReady2 = false; // set true if DMP init was successful
uint8_t mpuIntStatus2; // holds actual interrupt status byte from MPU
uint8_t devStatus2; // return status after each device operation (0 =
success, !0 = error)
uint16_t packetSize2; // expected DMP packet size (default is 42 bytes)
uint16_t fifoCount2; // count of all bytes currently in FIFO
uint8_t fifoBuffer2[64]; // FIFO storage buffer
// orientation/motion vars
Quaternion q; // [w, x, y, z] quaternion container
Quaternion q2;
Quaternion q_rel(1.0f,0.0f,0.0f,0.0f);
double angulo = 100.0;

char eje2='y';
float vector1[3];
float vector2[3];
double sqr;
float H1[3][3];
float H2[3][3];

byte done = 0;

unsigned long tiempo;
// packet structure for InvenSense teapot demo
uint8_t teapotPacket[22] = { '$', 0x02, 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 0x00,
0x00, '\r', '\n' };

// =====
// === INTERRUPT DETECTION ROUTINE ===
// =====

volatile bool mpuInterrupt = false; // indicates whether MPU interrupt pin
has gone high
volatile bool mpuInterrupt2 = false; // indicates whether MPU interrupt
pin has gone high

void dmpDataReady() {
    mpuInterrupt = true;
}
void dmpDataReady2() {
    mpuInterrupt2 = true;
}

// =====
// === INITIAL SETUP ===
// =====

void setup() {
    // join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically)
    pinMode(address1,OUTPUT);
    pinMode(address2,OUTPUT);

    #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
        Wire.begin();
        //TWBR = 24; // 400kHz I2C clock (200kHz if CPU is 8MHz)
        TWBR=32;
    #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
        Fastwire::setup(400, true);
    #endif

    // initialize serial communication

```

```

// (115200 chosen because it is required for Teapot Demo output, but it's
// really up to you depending on your project)
Serial.begin(19200); // con 9600 hya FIFO overflow y se reinicia muy
seguido, pero
// no se detiene.
while (!Serial); // wait for Leonardo enumeration, others continue
immediately

// NOTE: 8MHz or slower host processors, like the Teensy @ 3.3v or Arduinio
// Pro Mini running at 3.3v, cannot handle this baud rate reliably due to
// the baud timing being too misaligned with processor ticks. You must use
// 38400 or slower in these cases, or use some kind of external separate
// crystal solution for the UART timer.

// Se inicializa el primer IMU
escribirIMU1();

Serial.println(F("Initializing I2C device 1..."));
mpu.initialize();

// verify connection
Serial.println(F("Testing device connections..."));
Serial.println(mpu.getDeviceID(), HEX);
Serial.println(mpu.testConnection() ? F("MPU9150 1 connection successful")
: F("MPU9150 connection failed"));

// wait for ready
Serial.println(F("\nSend any character to begin DMP programming and demo:
"));
while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer
while (!Serial.available()); // wait for data
while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer again

// load and configure the DMP
Serial.println(F("Initializing DMP 1..."));
//CalibrarMPU9150();
devStatus = mpu.dmpInitialize();

Serial.println(devStatus);

// supply your own gyro offsets here, scaled for min sensitivity
// mpu.setXGyroOffset(220);
// mpu.setYGyroOffset(76);
// mpu.setZGyroOffset(-85);
// mpu.setZAccelOffset(1788); // 1688 factory default for my test chip

// make sure it worked (returns 0 if so)
if (devStatus == 0) {
// turn on the DMP, now that it's ready
//Serial.println(F("Enabling DMP..."));
mpu.setDMPEnabled(true);

// enable Arduino interrupt detection
//Serial.println(F("Enabling interrupt detection (Arduino external
interrupt 0)..."));
attachInterrupt(0, dmpDataReady, RISING);

mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

// set our DMP Ready flag so the main loop() function knows it's okay
to use it

```

```

//Serial.println(F("DMP ready! Waiting for first interrupt..."));
dmpReady = true;

// get expected DMP packet size for later comparison
packetSize = mpu.dmpGetFIFOpacketSize();

} else {
  // ERROR!
  // 1 = initial memory load failed
  // 2 = DMP configuration updates failed
  // (if it's going to break, usually the code will be 1)
  Serial.print(F("DMP 1 Initialization failed (code "));
  Serial.print(devStatus);
  Serial.println(F(")"));
}

// Se inicializa el segundo IMU
escribirIMU2();

Serial.println(F("Initializing I2C device 2..."));
mpu.initialize();

// verify connection
Serial.println(F("Testing device 2 connections..."));
Serial.println(mpu.getDeviceID(),HEX);
Serial.println(mpu.testConnection() ? F("MPU9150 2 connection successful")
: F("MPU9150 connection failed"));

// wait for ready
Serial.println(F("\nSend any character to begin DMP programming and demo:
"));
while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer
while (!Serial.available()); // wait for data
while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer again
//CalibrarMPU9150();
// load and configure the DMP
//Serial.println(F("Initializing DMP..."));
devStatus2 = mpu.dmpInitialize();

Serial.println(devStatus2);

// supply your own gyro offsets here, scaled for min sensitivity
// mpu.setXGyroOffset(220);
// mpu.setYGyroOffset(76);
// mpu.setZGyroOffset(-85);
// mpu.setZAccelOffset(1788); // 1688 factory default for my test chip
//

// make sure it worked (returns 0 if so)
if (devStatus2 == 0) {
  // turn on the DMP, now that it's ready
  //Serial.println(F("Enabling DMP..."));
  mpu.setDMPEntered(true);

  // enable Arduino interrupt detection
  //Serial.println(F("Enabling interrupt detection (Arduino external
interrupt 0)..."));
  attachInterrupt(1, dmpDataReady2, RISING);

  mpuIntStatus2 = mpu.getIntStatus();

  // set our DMP Ready flag so the main loop() function knows it's okay
to use it

```



```

//Serial.println(F("DMP ready! Waiting for first interrupt..."));
dmpReady2 = true;

// get expected DMP packet size for later comparison
packetSize2 = mpu.dmpGetFIFOpacketSize();

} else {
  // ERROR!
  // 1 = initial memory load failed
  // 2 = DMP configuration updates failed
  // (if it's going to break, usually the code will be 1)
  Serial.print(F("DMP 2 Initialization failed (code "));
  Serial.print(devStatus2);
  Serial.println(F(")"));
}

// configure LED for output
pinMode(LED_PIN, OUTPUT);

escribirIMU1();
mpu.resetFIFO();
escribirIMU2();
mpu.resetFIFO();
tiempo = millis();
}

// =====
// ===                               MAIN PROGRAM LOOP                               ===
// =====

void loop() {
  // if programming failed, don't try to do anything
  //Serial.println(millis());
  if( millis()-tiempo > 15000 && done == 0){
    q_rel = q.getProduct(q2.getConjugate());
    done = 1;
  }
  escribirIMU1();
  if (!dmpReady) return;

  // wait for MPU interrupt or extra packet(s) available
  // while (!mpuInterrupt && fifoCount < packetSize) {
  //   // other program behavior stuff here
  //   // .
  //   // .
  //   // .
  //   // if you are really paranoid you can frequently test in between
  other
  //   // stuff to see if mpuInterrupt is true, and if so, "break;" from
  the
  //   // while() loop to immediately process the MPU data
  //   // .
  //   // .
  //   // .
  // }
  // reset interrupt flag and get INT_STATUS byte
  fifoCount = mpu.getFIFOCount();
  if(mpuInterrupt || fifoCount >= packetSize){
    mpuInterrupt = false;
    mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();
    // get current FIFO count

```

```

    // check for overflow (this should never happen unless our code is too
inefficient)
    if ((mpuIntStatus & 0x10) || fifoCount == 1024) {
        // reset so we can continue cleanly
        mpu.resetFIFO();
        Serial.println(F("FIFO 1 overflow!"));

        // otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should happen
frequently)
    } else if (mpuIntStatus & 0x02) {
        // wait for correct available data length, should be a VERY short
wait
        while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();

        // read a packet from FIFO
        mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);

        // track FIFO count here in case there is > 1 packet available
        // (this lets us immediately read more without waiting for an
interrupt)
        fifoCount -= packetSize;

#ifdef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
        // display quaternion values in easy matrix form: w x y z
        mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
        q.normalize();
        //
        Serial.print("quat1\t");
        //
        Serial.print(q.w);
        //
        Serial.print("\t");
        //
        Serial.print(q.x);
        //
        Serial.print("\t");
        //
        Serial.print(q.y);
        //
        Serial.print("\t");
        //
        Serial.print(q.z);
        //
        hallarMatrizHomogenea(&q, H1);
#endif

#ifdef OUTPUT_TEAPOT
        // display quaternion values in InvenSense Teapot demo format:
        teapotPacket[2] = fifoBuffer[0];
        teapotPacket[3] = fifoBuffer[1];
        teapotPacket[4] = fifoBuffer[4];
        teapotPacket[5] = fifoBuffer[5];
        teapotPacket[6] = fifoBuffer[8];
        teapotPacket[7] = fifoBuffer[9];
        teapotPacket[8] = fifoBuffer[12];
        teapotPacket[9] = fifoBuffer[13];

        //
        Serial.write(teapotPacket, 14);
        //
        teapotPacket[19]++; // packetCount, loops at 0xFF on purpose
#endif

        // blink LED to indicate activity
        blinkState = !blinkState;
        digitalWrite(LED_PIN, blinkState);
    }
}
escribirIMU2();
if (!dmpReady2) return;

// wait for MPU interrupt or extra packet(s) available
// while (!mpuInterrupt2 && fifoCount2 < packetSize2) {
//     // other program behavior stuff here
//     // .
//     // .
//     // .
}

```

```

//          // if you are really paranoid you can frequently test in between
other
//          // stuff to see if mpuInterrupt is true, and if so, "break;" from
the
//          // while() loop to immediately process the MPU data
//          // .
//          // .
//          // .
//      }

    fifoCount2 = mpu.getFIFOCount();
    if(mpuInterrupt2 || fifoCount2 >= packetSize2){
        // reset interrupt flag and get INT_STATUS byte
        mpuInterrupt2 = false;
        mpuIntStatus2 = mpu.getIntStatus();
        // get current FIFO count
        // check for overflow (this should never happen unless our code is too
inefficient)
        if ((mpuIntStatus2 & 0x10) || fifoCount2 == 1024) {
            // reset so we can continue cleanly
            mpu.resetFIFO();
            Serial.println(F("FIFO 2 overflow!"));

            // otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should happen
frequently)
        } else if (mpuIntStatus2 & 0x02) {
            // wait for correct available data length, should be a VERY short
wait
            while (fifoCount2 < packetSize2) fifoCount2 = mpu.getFIFOCount();

            // read a packet from FIFO
            mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer2, packetSize2);

            // track FIFO count here in case there is > 1 packet available
            // (this lets us immediately read more without waiting for an
interrupt)
            fifoCount2 -= packetSize2;

            #ifdef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
                // display quaternion values in easy matrix form: w x y z
                mpu.dmpGetQuaternion(&q2, fifoBuffer2);
                q2.normalize();
                q2 = q_rel.getProduct(q2);
                //      Serial.print(" quat2\t");
                //      Serial.print(q2.w);
                //      Serial.print("\t");
                //      Serial.print(q2.x);
                //      Serial.print("\t");
                //      Serial.print(q2.y);
                //      Serial.print("\t");
                //      Serial.println(q2.z);
                hallarMatrizHomogenea(&q2, H2);
            #endif

            #ifdef OUTPUT_TEAPOT
                // display quaternion values in InvenSense Teapot demo format:
                teapotPacket[10] = fifoBuffer2[0];
                teapotPacket[11] = fifoBuffer2[1];
                teapotPacket[12] = fifoBuffer2[4];
                teapotPacket[13] = fifoBuffer2[5];
                teapotPacket[14] = fifoBuffer2[8];
                teapotPacket[15] = fifoBuffer2[9];
                teapotPacket[16] = fifoBuffer2[12];
                teapotPacket[17] = fifoBuffer2[13];
                Serial.write(teapotPacket, 22);
                teapotPacket[19]++; // packetCount, loops at 0xFF on purpose
            #endif

```

```

        // blink LED to indicate activity
        blinkState = !blinkState;
        digitalWrite(LED_PIN, blinkState);
    }
}

// Se seleccionan los ejes dependiendo del movimiento
#ifdef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
vector1[0]=H1[0][1];
vector1[1]=H1[1][1];
vector1[2]=H1[2][1];
sqr = sqrt(vector1[0]*vector1[0] + vector1[1]*vector1[1] +
vector1[2]*vector1[2]);
vector1[0]=H1[0][1]/sqr;
vector1[1]=H1[1][1]/sqr;
vector1[2]=H1[2][1]/sqr;
Serial.print("Vector1: ");
Serial.print(vector1[0]);
Serial.print(" ");
Serial.print(vector1[1]);
Serial.print(" ");

Serial.print(vector1[2]);

if(eje2 == 'y'){ // eje y positivo:abduccion, aduccion, flexion y extension
vector2[0]=H2[0][1];
vector2[1]=H2[1][1];
vector2[2]=H2[2][1];
}else if(eje2 == 'x'){ // eje x positivo: pronacion o supinacion izquierda
vector2[0]=H2[0][0];
vector2[1]=H2[1][0];
vector2[2]=H2[2][0];
}else{ // eje x negativo: pronacion o supinacion derecha
vector2[0]=-H2[0][0];
vector2[1]=-H2[1][0];
vector2[2]=-H2[2][0];
}
sqr = sqrt(vector2[0]*vector2[0] + vector2[1]*vector2[1] +
vector2[2]*vector2[2]);
vector2[0]=H2[0][1]/sqr;
vector2[1]=H2[1][1]/sqr;
vector2[2]=H2[2][1]/sqr;
Serial.print(" Vector2: ");
Serial.print(vector2[0]);
Serial.print(" ");
Serial.print(vector2[1]);
Serial.print(" ");
Serial.print(vector2[2]);
// Se halla el ángulo entre vector1 y vector2.(ambos son unitarios)
angulo= RAD_TO_DEG *acos(vector1[0]*vector2[0] + vector1[1]*vector2[1] +
vector1[2]*vector2[2]);
Serial.print(" Angulo: ");
Serial.println(angulo);
#endif
}

void CalibrarMPU9150(){
    // Valores RAW (sin procesar) del acelerómetro y giroscopio en los ejes
    x,y,z
    int ax, ay, az;
    int gx, gy, gz;

    unsigned long time;
    //Variables usadas por el filtro pasa bajos

```

```

long f_ax,f_ay, f_az;
int p_ax, p_ay, p_az;
long f_gx,f_gy, f_gz;
int p_gx, p_gy, p_gz;
int counter=0;

// byte byte1=0;
// byte byte2=0;
// byte byte3=0;
// byte byte4=0;
// byte byte5=0;
// byte byte6=0;

//Valor de los offsets
int ax_o,ay_o,az_o;
int gx_o,gy_o,gz_o;

ax_o=mpu.getXAccelOffset();
ay_o=mpu.getYAccelOffset();
az_o=mpu.getZAccelOffset();
gx_o=mpu.getXGyroOffset();
gy_o=mpu.getYGyroOffset();
gz_o=mpu.getZGyroOffset();
time = millis();
Serial.println("Comenzando calibración");
while(millis() - time < 10000){
// Leer las aceleraciones y velocidades angulares
mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
mpu.getRotation(&gx, &gy, &gz);

// Filtrar las lecturas
f_ax = f_ax-(f_ax>>5)+ ax;
p_ax = f_ax>>5;

f_ay = f_ay-(f_ay>>5)+ ay;
p_ay = f_ay>>5;

f_az = f_az-(f_az>>5)+ az;
p_az = f_az>>5;

f_gx = f_gx-(f_gx>>3)+ gx;
p_gx = f_gx>>3;

f_gy = f_gy-(f_gy>>3)+ gy;
p_gy = f_gy>>3;

f_gz = f_gz-(f_gz>>3)+ gz;
p_gz = f_gz>>3;

//Cada 30 lecturas corregir el offset
if (counter==30){
//Calibrar el acelerómetro a 1g en el eje z (ajustar el offset)
if (p_ax>0) ax_o--;
else {ax_o++;}
if (p_ay>0) ay_o--;
else {ay_o++;}
if (p_az-16384>0) az_o--;
else {az_o++;}

// if(abs(p_ax)<10) byte1 = 1;
// if(abs(p_ay)<10) byte2 = 1;
// if(abs(p_ay-16384)<10) byte3 = 1;

mpu.setXAccelOffset(ax_o);
mpu.setYAccelOffset(ay_o);
mpu.setZAccelOffset(az_o);

```

```

//Calibrar el giroscopio a 0°/s en todos los ejes (ajustar el offset)
if (p_gx>0) gx_o--;
else {gx_o++;}
if (p_gy>0) gy_o--;
else {gy_o++;}
if (p_gz>0) gz_o--;
else {gz_o++;}

//      if(abs(p_gx)<10) byte4 = 1;
//      if(abs(p_gy)<10) byte5 = 1;
//      if(abs(p_gz)<10) byte6 = 1;

mpu.setXGyroOffset(gx_o);
mpu.setYGyroOffset(gy_o);
mpu.setZGyroOffset(gz_o);
counter=0;
}
counter++;
}
Serial.println("Calibración finalizada");
}
void escribirIMU1(){
digitalWrite(address1,LOW);
digitalWrite(address2,HIGH);
}
void escribirIMU2(){
digitalWrite(address1,HIGH);
digitalWrite(address2,LOW);
}
void hallarMatrizHomogenea(Quaternion* q, float H[3][3]){
float q0 = (*q).w;
float Q[3] ={(*q).x,(*q).y,(*q).z};
H[0][0] = 1 - 2*Q[1]*Q[1]-2*Q[2]*Q[2];
H[0][1] = 2*Q[0]*Q[1] - 2*q0*Q[2];
H[0][2] = 2*Q[0]*Q[2] + 2*q0*Q[1];
H[1][0] = 2*Q[0]*Q[1] + 2*q0*Q[2];
H[1][1] = 1 - 2*Q[0]*Q[0]-2*Q[2]*Q[2];
H[1][2] = 2*Q[1]*Q[2] - 2*q0*Q[0];
H[2][0] = 2*Q[0]*Q[2] - 2*q0*Q[1];
H[2][1] = 2*Q[1]*Q[2] + 2*q0*Q[0];
H[2][2] = 1 - 2*Q[0]*Q[0]-2*Q[1]*Q[1];
}

```

Anexo H: Mediciones

En este anexo se presentan los resultados de las mediciones realizadas comparando dos métodos: el método gráfico y el método algorítmico con los sensores IMU.

A continuación, en la Ilustración 23 se muestran los resultados del experimento de medición del ángulo respecto de un eje transversal. Estos fueron tomados para 6 ángulos distintos y en orden creciente entre 0° y 90° .

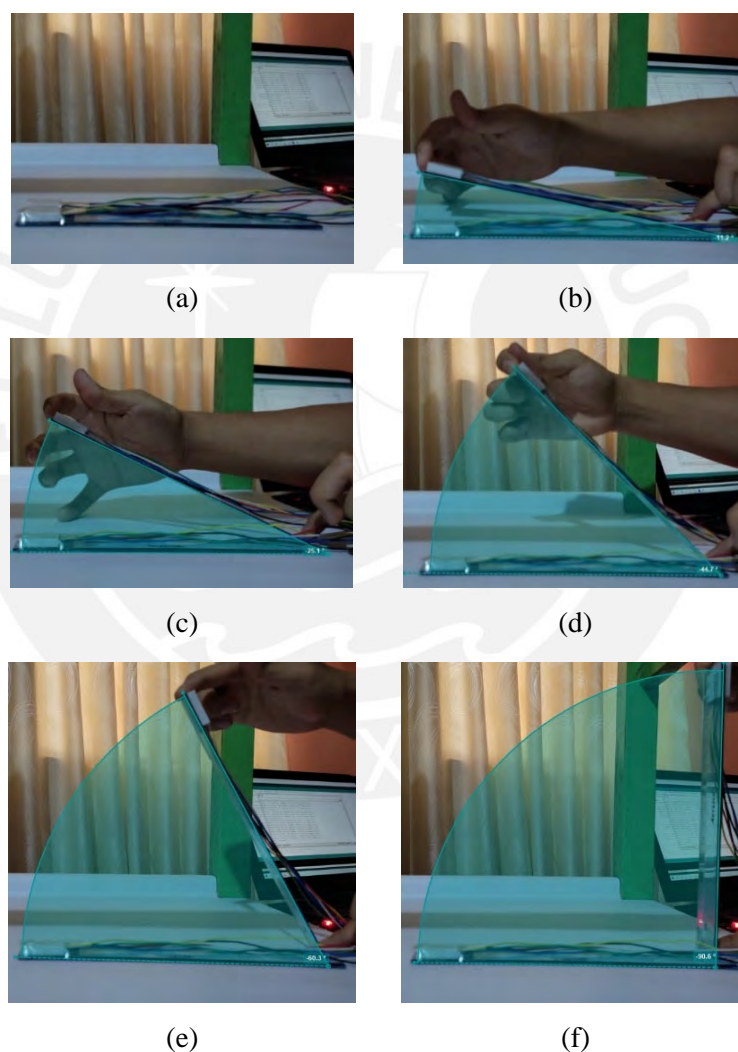


Ilustración 23. Resultado de la medición gráfica del ángulo respecto de un eje transversal

Asimismo, en la Ilustración 24 se presentan las 6 muestras tomadas para el ángulo respecto de un eje vertical. Estas también corresponden a 6 ángulos entre 0° y 90° .

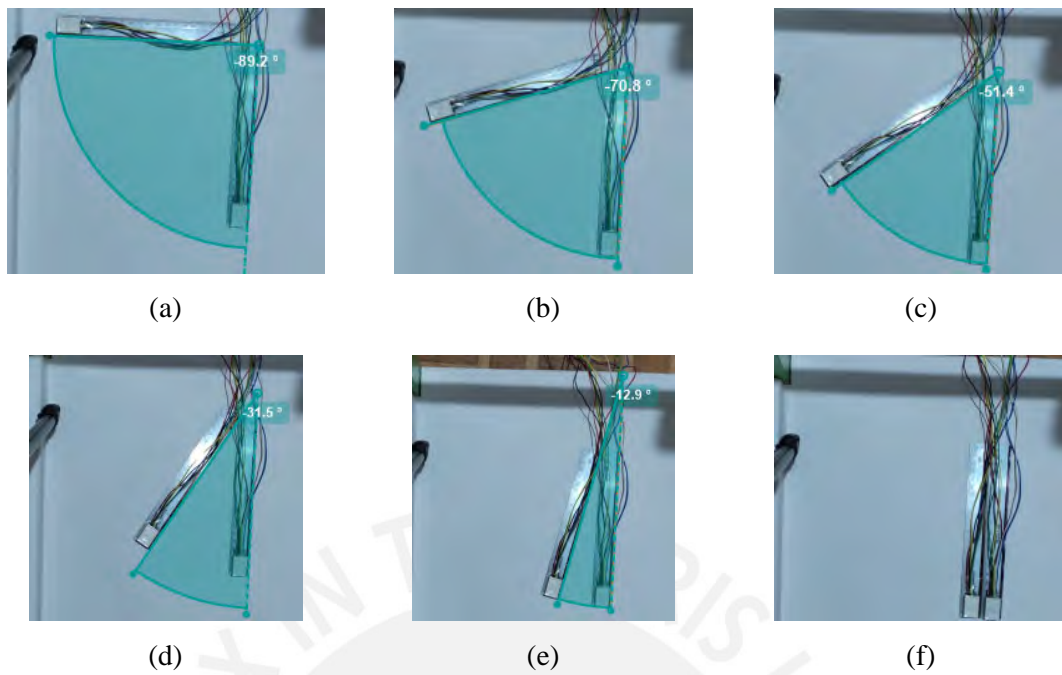
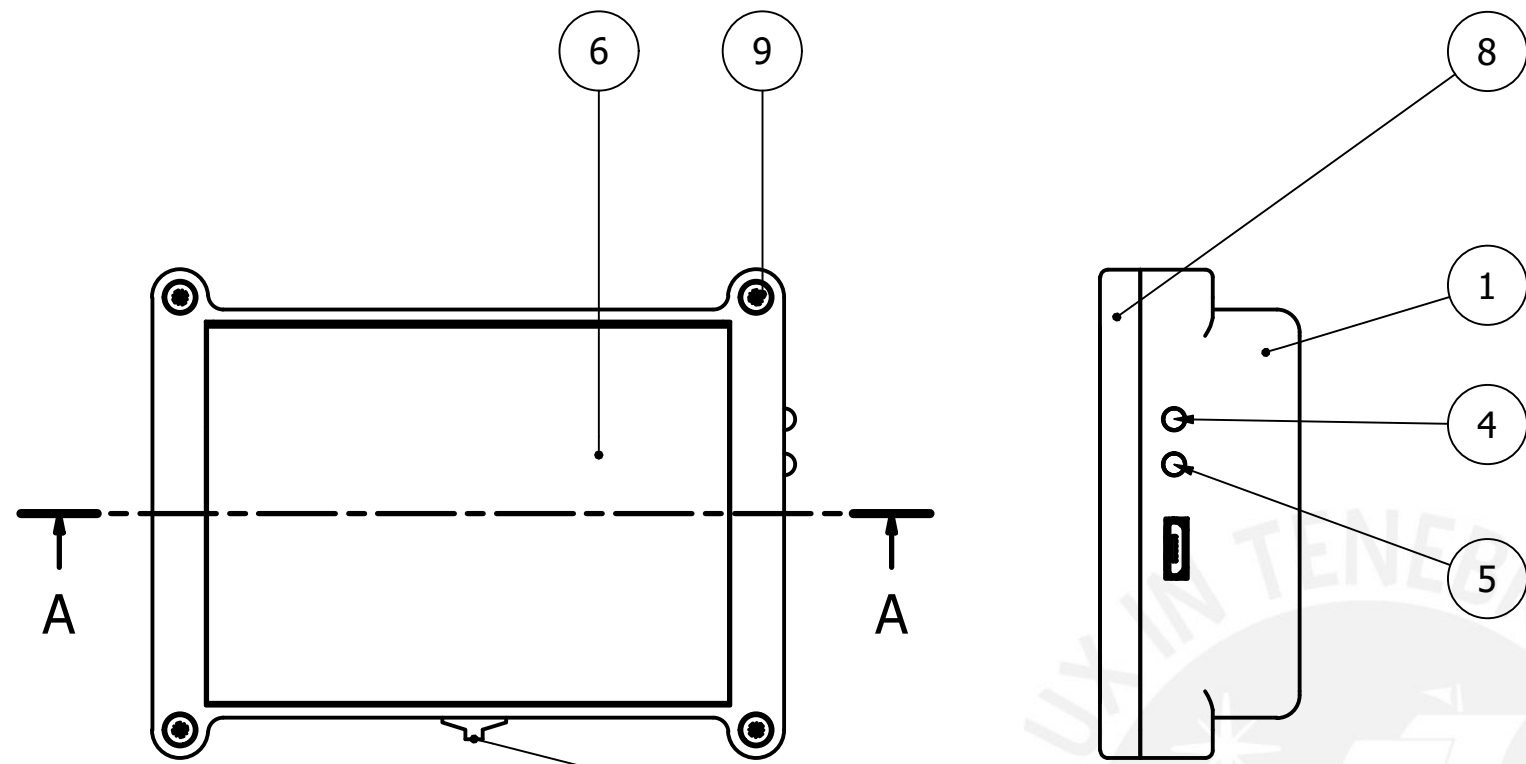


Ilustración 24. Resultado de la medición gráfica del ángulo respecto de un eje vertical

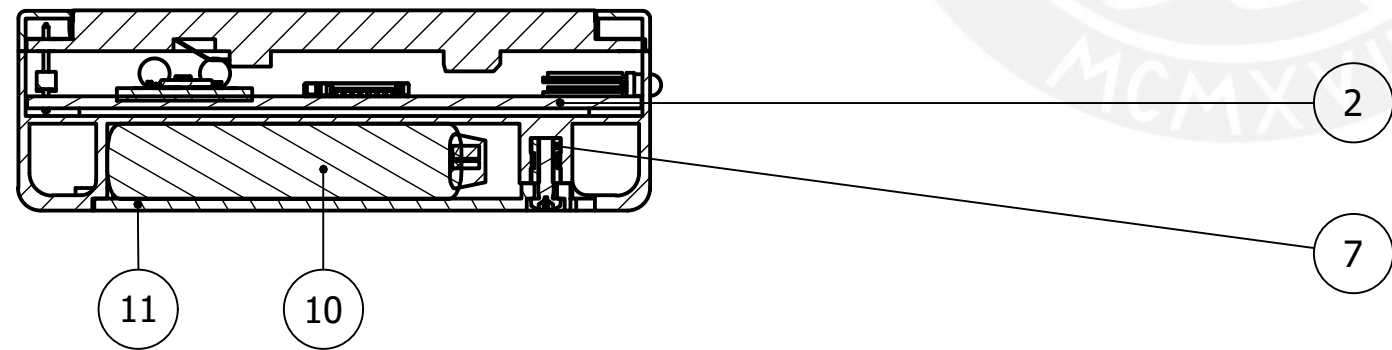
Anexo I: Planos

Planos En este anexo se presentan los diversos planos del dispositivo, tanto de la caja electrónica como de la caja del sensor. Estos se nombran de acuerdo a las reglas planteadas en la Tabla 7.1.



Observación 1: Los 10 cables de los sensores deben ser soldados antes de soldar la pantalla TFT.
 Observación 2: Se debe aplicar una pasada con adhesivo de cianocrilato en el borde entre la pantalla y la tapa superior.

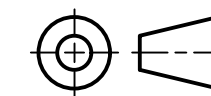
SECCIÓN A-A
 ESCALA (1 : 1)



11	1	Tapa inferior	DIN 7985	Acero zincado	
10	1	Batería		PETG	
9	5	Tornillo con cabeza alomada M2x8	DIN 7985	Acero zincado	
8	1	Tapa superior		PETG	
7	5	Inserto de tuerca redonda M2x6			
6	1	Pantalla TFT 2.8"	GB 809	Bronce	
5	1	LED rojo			Diámetro: 3 mm
4	1	LED verde			Diámetro: 3 mm
3	1	Interruptor corredizo			CUI Devices MSS-102545-28A-D
2	1	Placa de circuito electrónico			
1	1	Base		PETG	
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN



DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA

ENSAMBLE DE LA CAJA ELECTRÓNICA

ESCALA

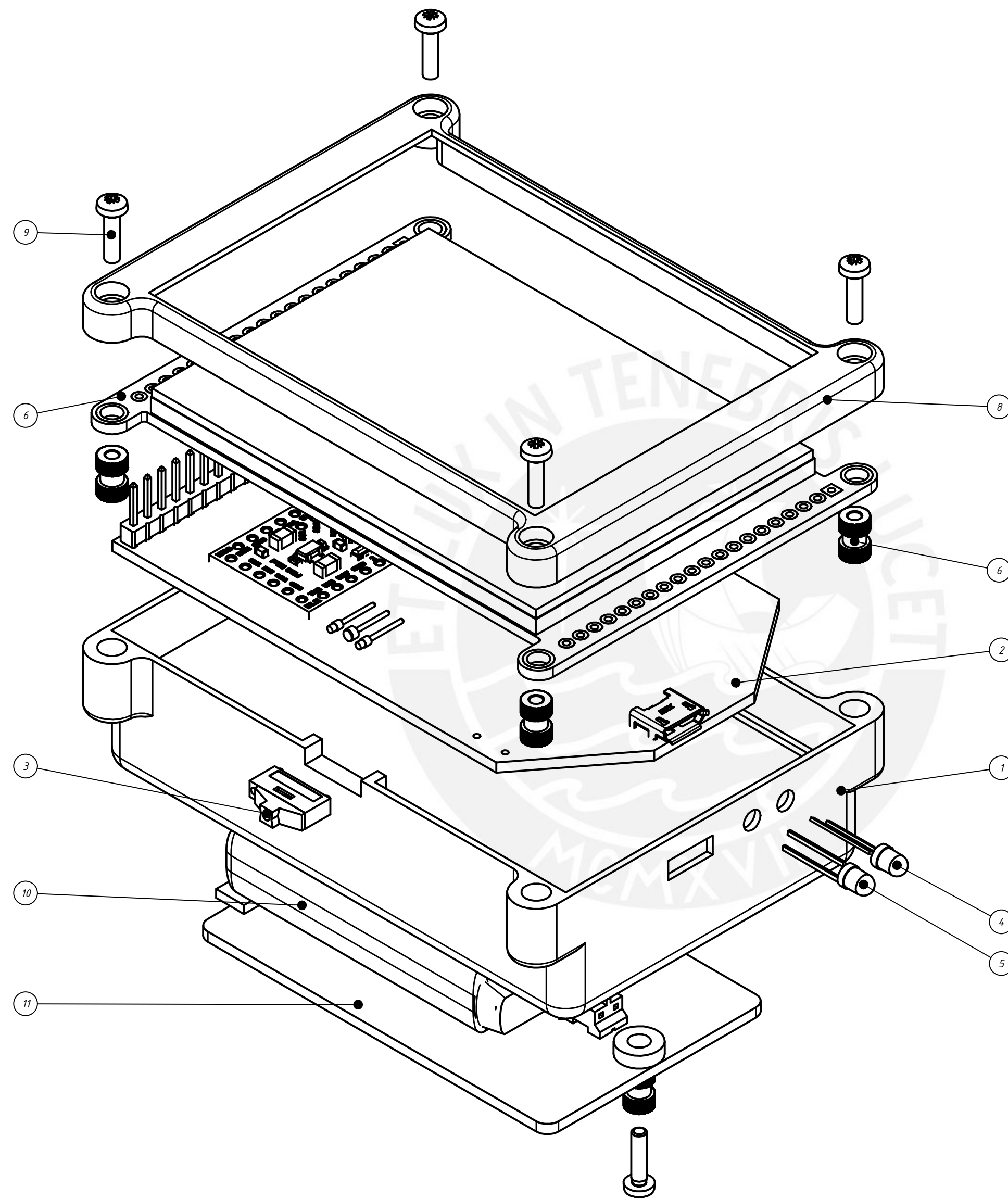
1:1

FECHA:
2021.11.11

20153023

ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT

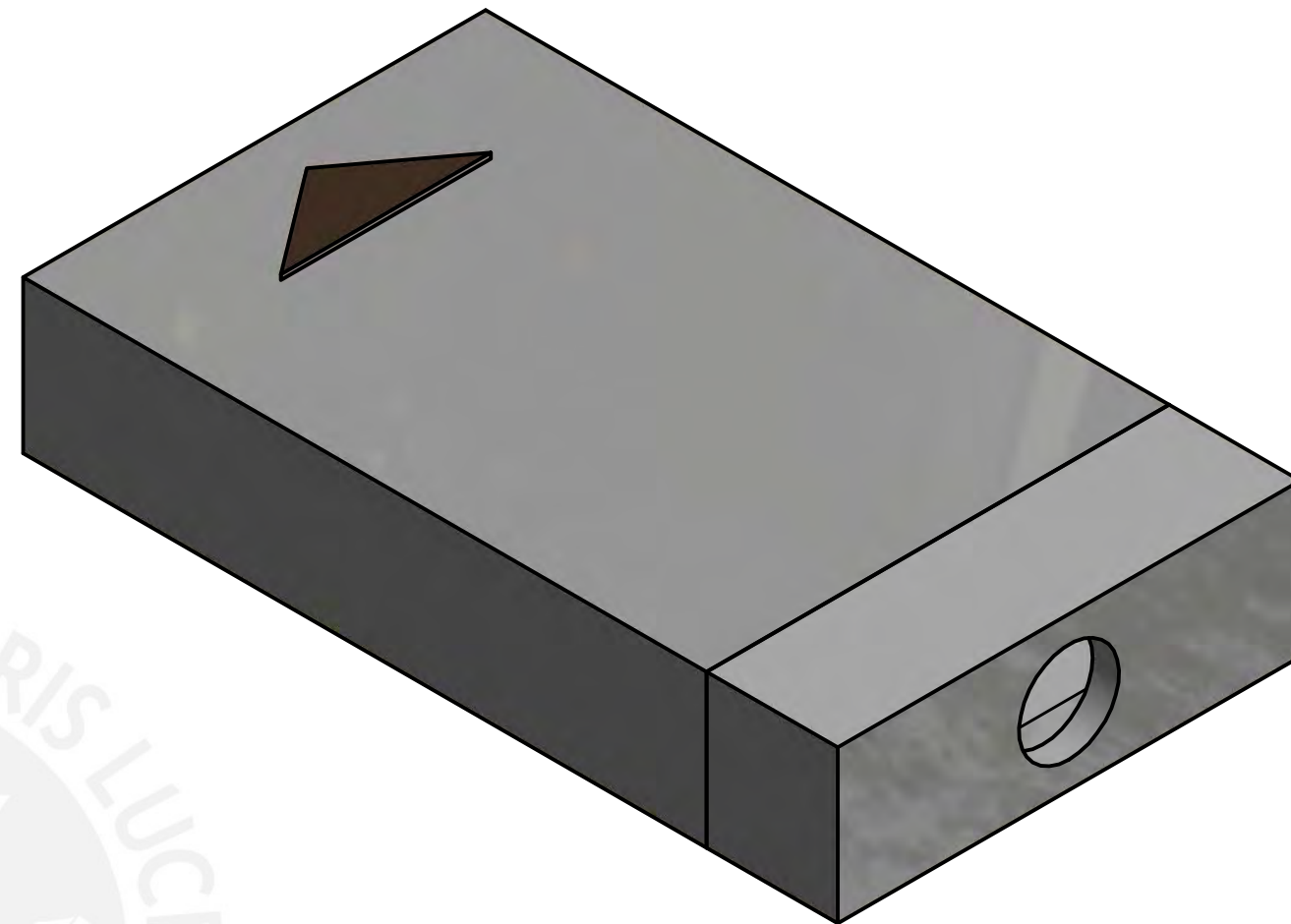
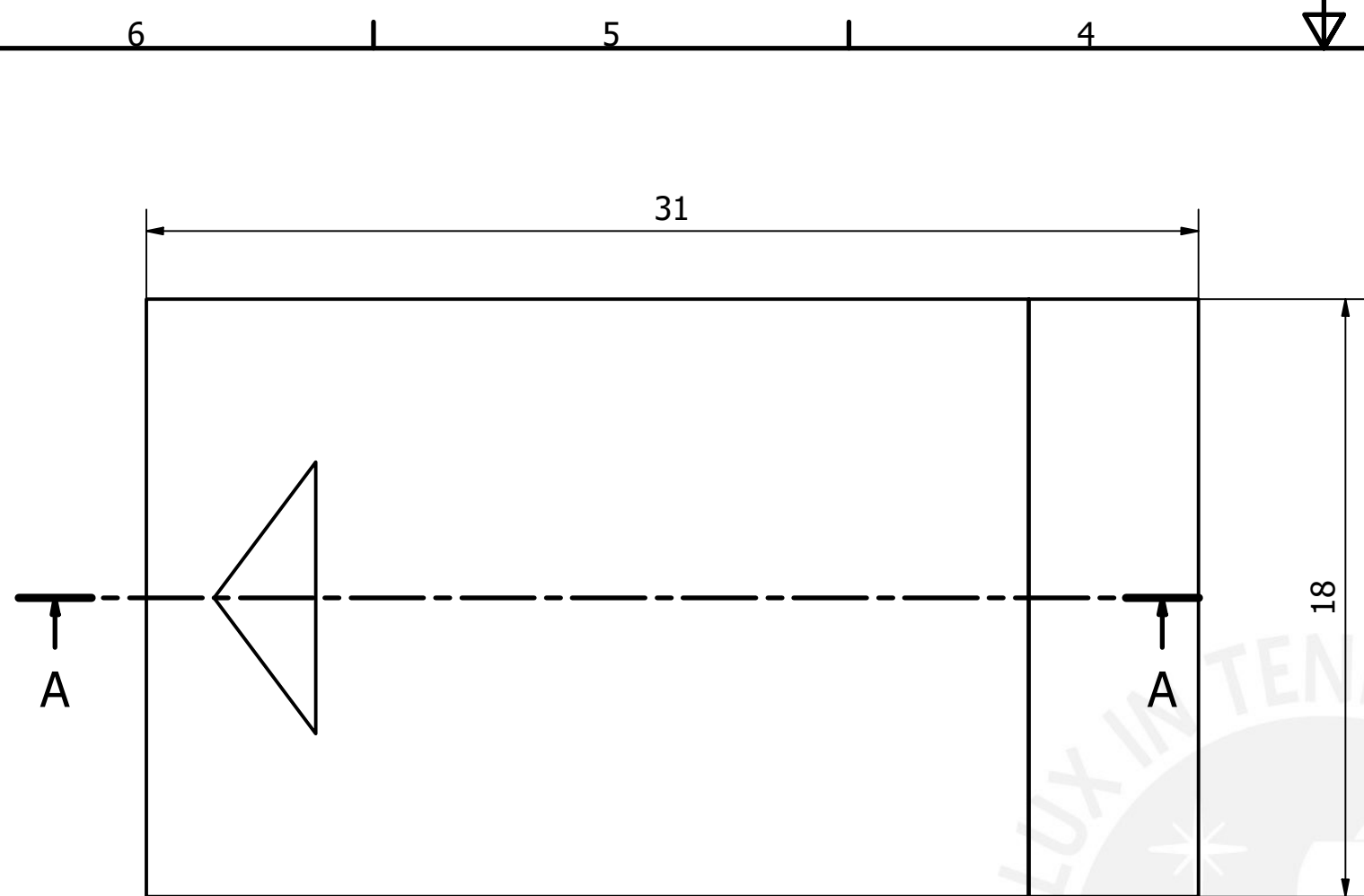
PLANO:
CE-EN1-A3



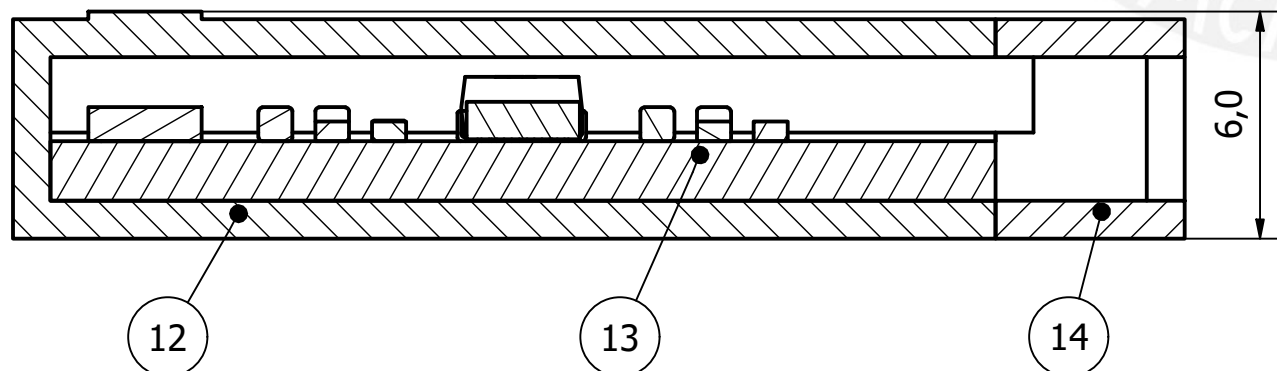
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
11	1	Tapa inferior		PETG	
10	1	Batería		PETG	
9	5	Tornillo con cabeza alomada M2x8	DIN 7985	Acero zincado	
8	1	Tapa superior		PETG	
7	5	Inserto de tuerca redonda M2x6	GB 809	Bronce	
6	1	Pantalla TFT 2.8"			
5	1	LED rojo			Diámetro: 3 mm
4	1	LED verde			Diámetro: 3 mm
3	1	Interruptor corredizo			CUI Devices MSS-102545-28A-D
2	1	Placa de circuito electrónico			
1	1	Base		PETG	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA	ESCALA
	VISTA EXPLOSIVA Y ENSAMBLE CAJA ELECTRÓNICA	2:1
20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	FECHA: 2021.11.11
		PLANO: CE-EX1-A2



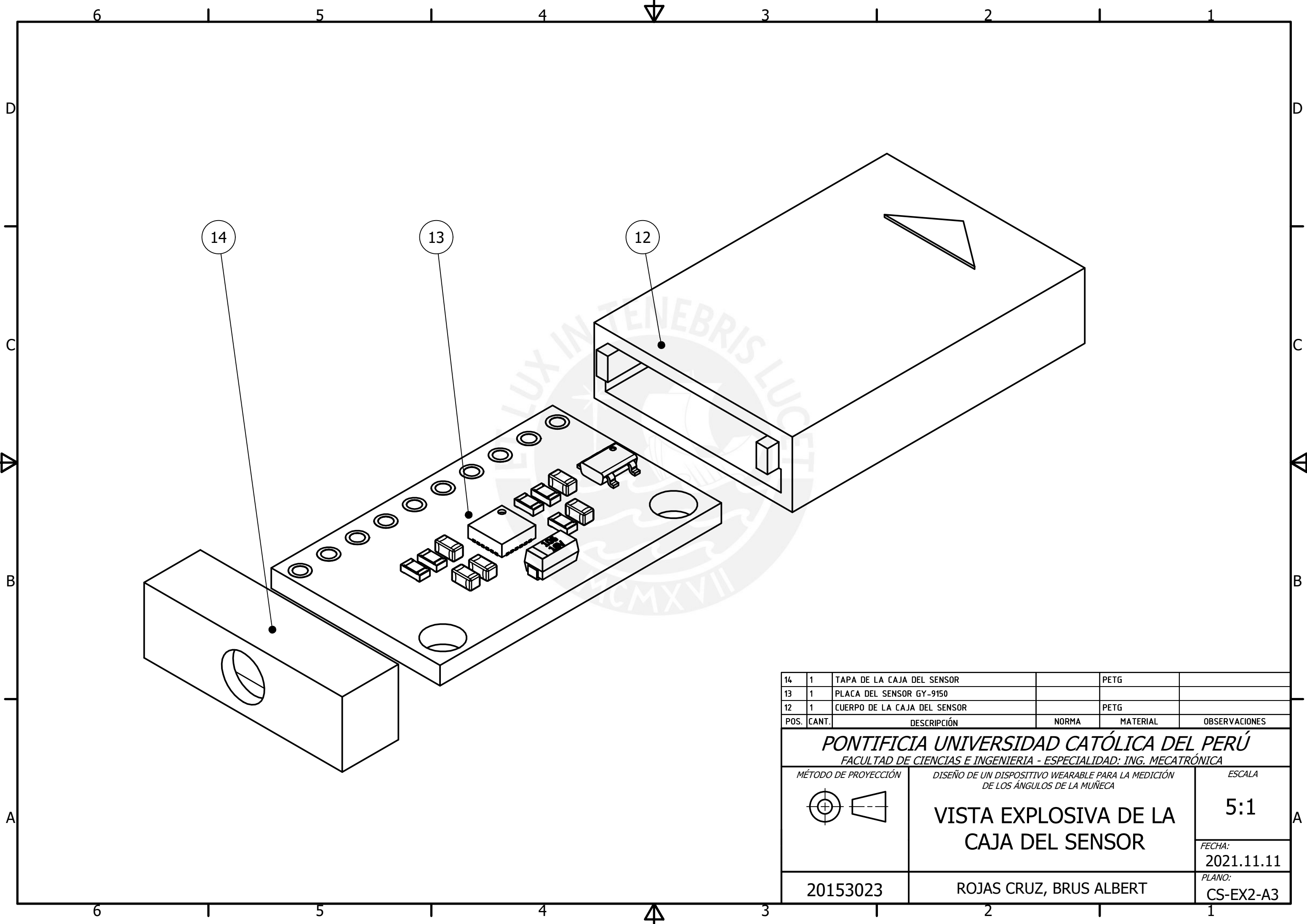
SECCIÓN A-A
ESCALA (5 : 1)



Observación 1: El sensor debe encajar aplicando una leve presión.
Observación 2: La tapa se une al cuerpo mediante adhesivo de cianocrilato

POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
14	1	TAPA DE LA CAJA DEL SENSOR		PETG	
13	1	PLACA DEL SENSOR GY-9150			
12	1	CUERPO DE LA CAJA DEL SENSOR		PETG	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA	ESCALA
	ENSAMBLE DE LA CAJA DEL SENSOR	5:1
		FECHA: 2021.11.11
20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	PLANO: CS-EN2-A3

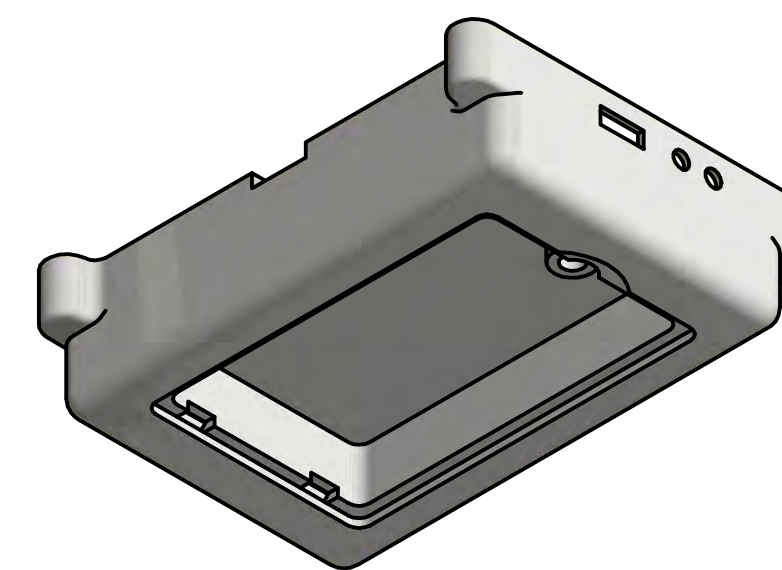
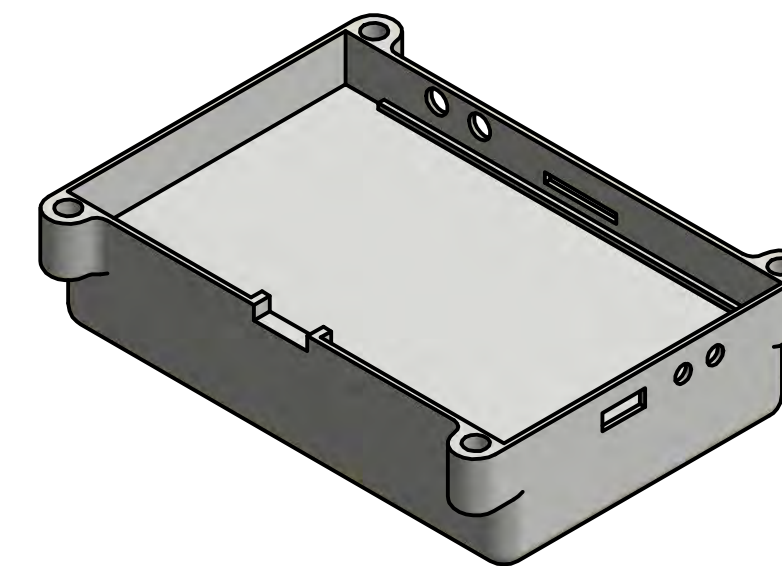
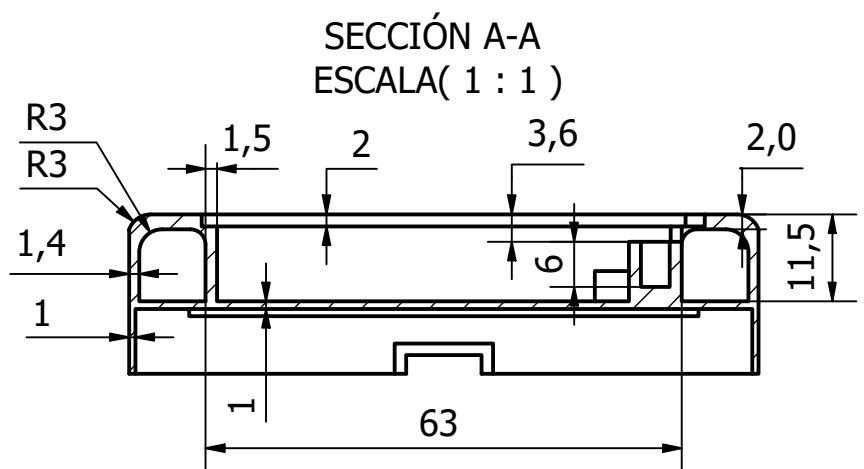
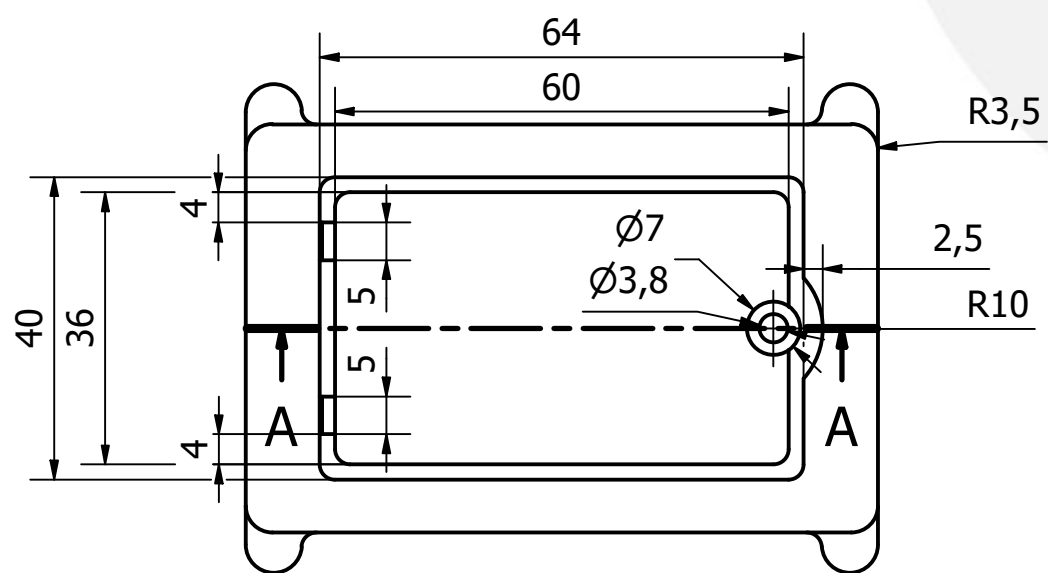
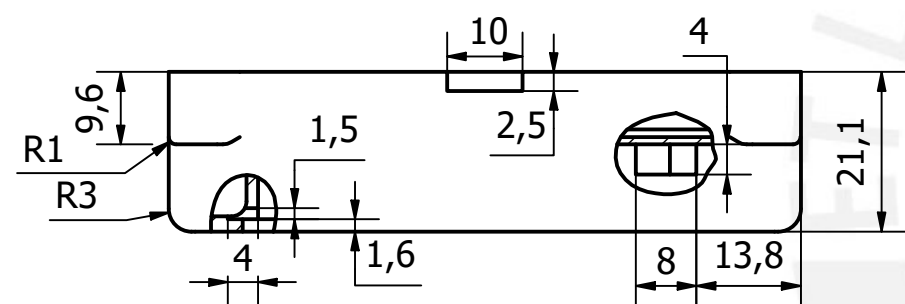
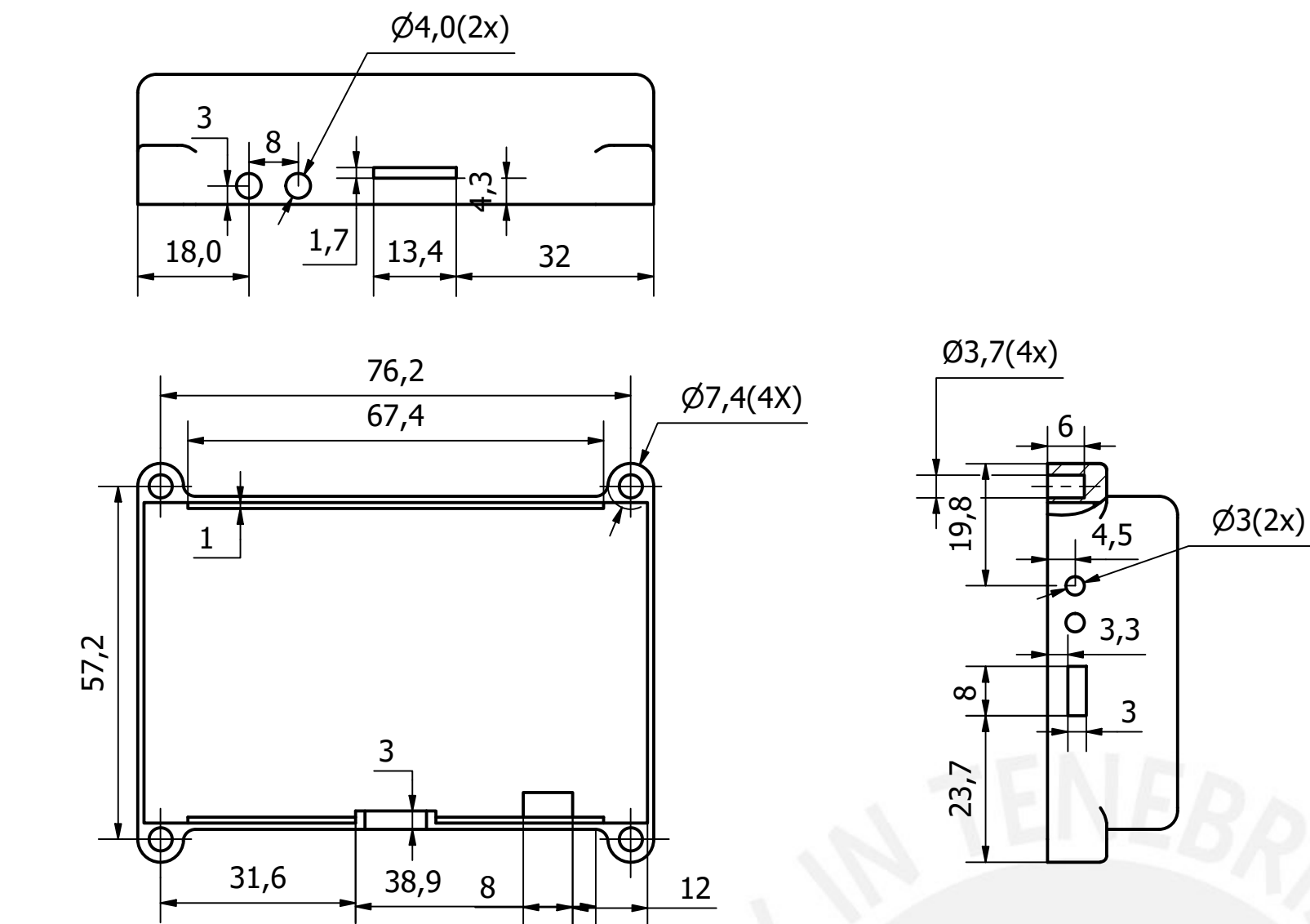


14	1	TAPA DE LA CAJA DEL SENSOR		PETG	
13	1	PLACA DEL SENSOR GY-9150			
12	1	CUERPO DE LA CAJA DEL SENSOR		PETG	
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

<i>MÉTODO DE PROYECCIÓN</i>	<i>DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA</i>	<i>ESCALA</i>
	VISTA EXPLOSIVA DE LA CAJA DEL SENSOR	5:1
		<i>FECHA:</i> 2021.11.11
		<i>PLANO:</i> CS-EX2-A3

20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	
----------	-------------------------	--

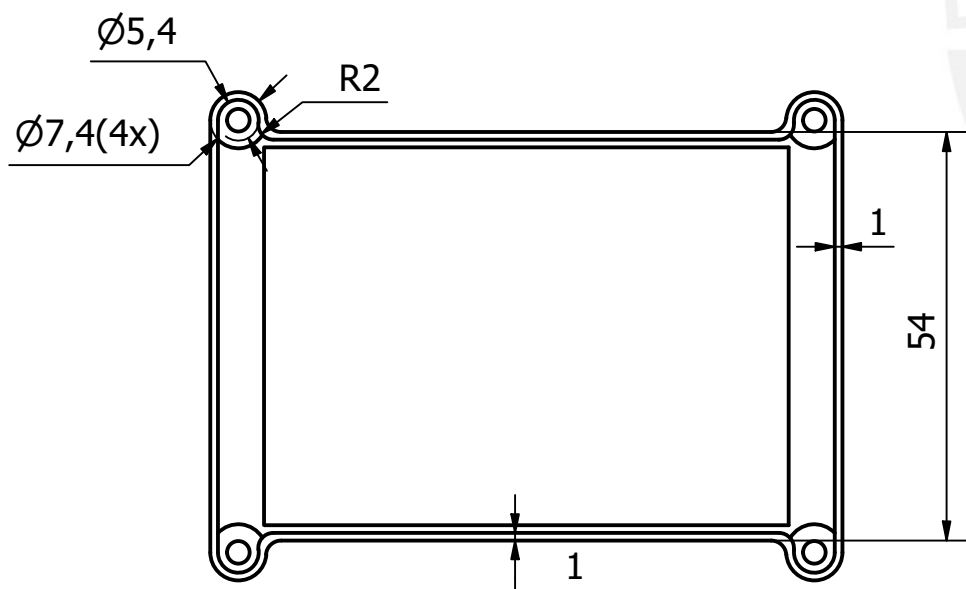
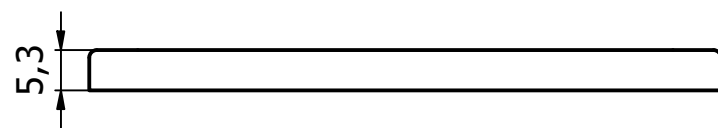
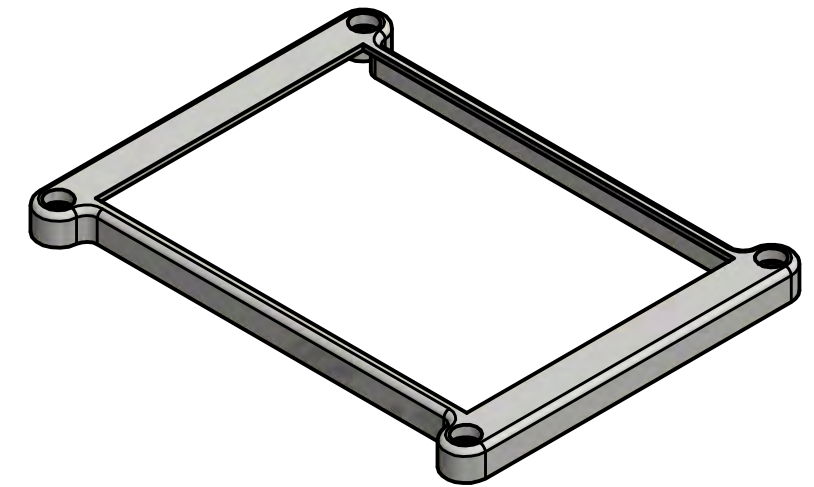
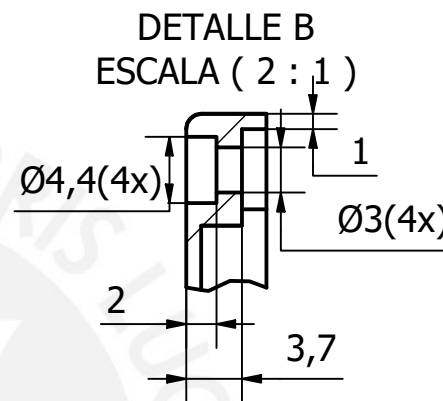
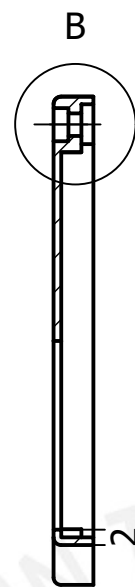
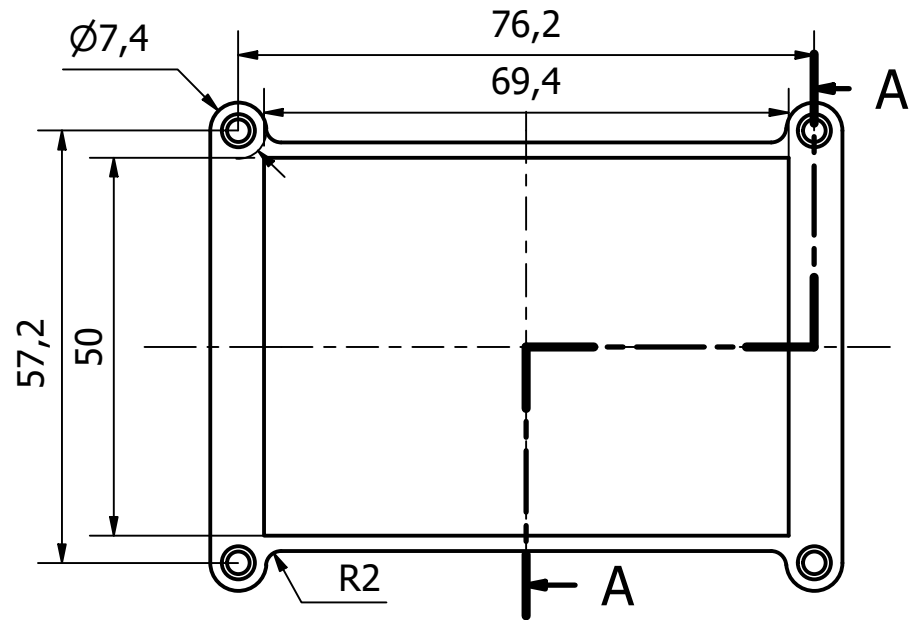


Pieza fabricada por manufactura aditiva
 Densidad: 100%
 Altura de capa: 0.2mm
 Velocidad de impresión: 80mm/s

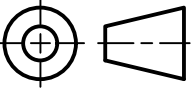
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
 SEGUN DIN ISO 2768 - 1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL PETG
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA	ESCALA 1:1
	BASE	FECHA: 2021.11.11
20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	PLANO: CE-DE1-A2



Pieza fabricada por manufactura aditiva
 Densidad: 100%
 Altura de capa: 0.2mm
 Velocidad de impresión: 80mm/s
 Redondeos no especificados R1

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL PETG
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA	ESCALA 1:1
TAPA SUPERIOR		FECHA: 2021.11.11
20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	PLANO: CE-DE2-A3

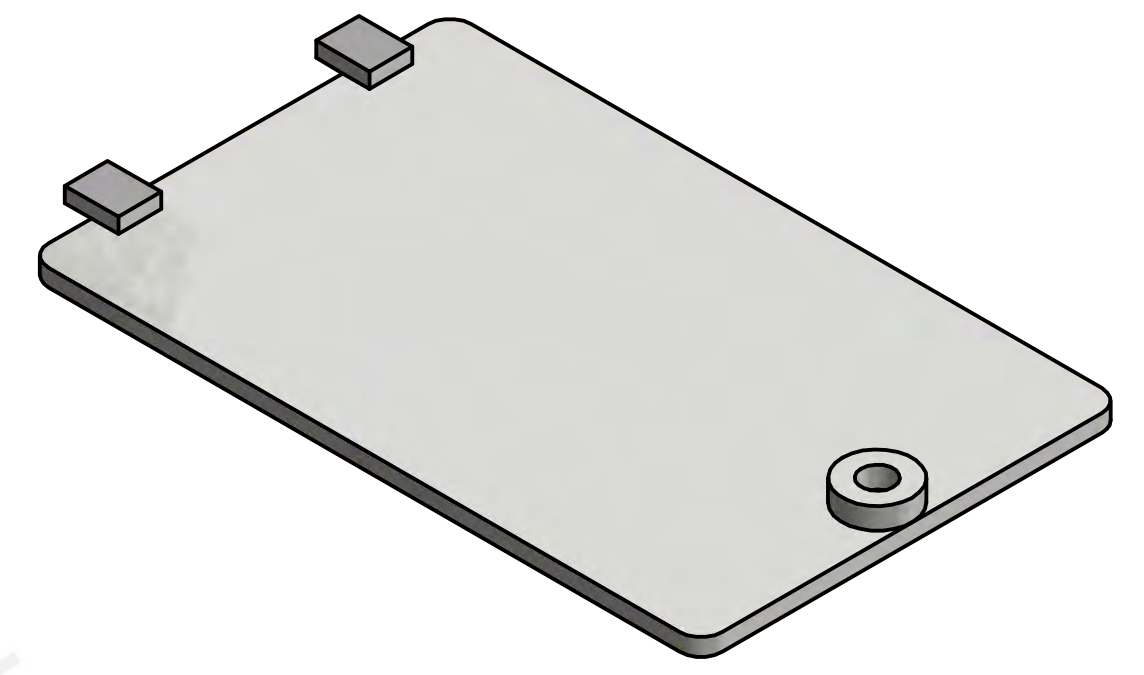
TOLERANCIAS DIMENSIONALES

SEGUN DIN ISO 2768 - 1

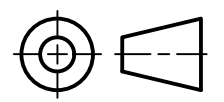
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



SECCIÓN A-A
ESCALA(2 : 1)



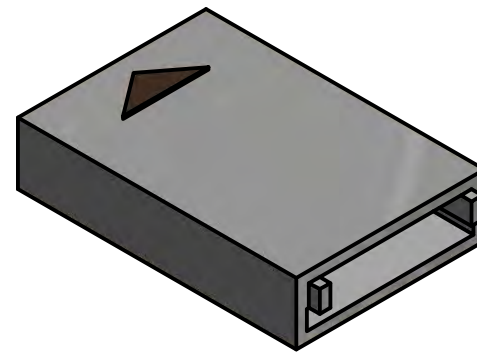
Pieza fabricada por manufactura aditiva
 Densidad: 100%
 Altura de capa: 0.2mm
 Velocidad de impresión: 80mm/s

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL PETG
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA	ESCALA 2:1
20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	FECHA: 2021.11.11
		PLANO: CE-DE3-A3

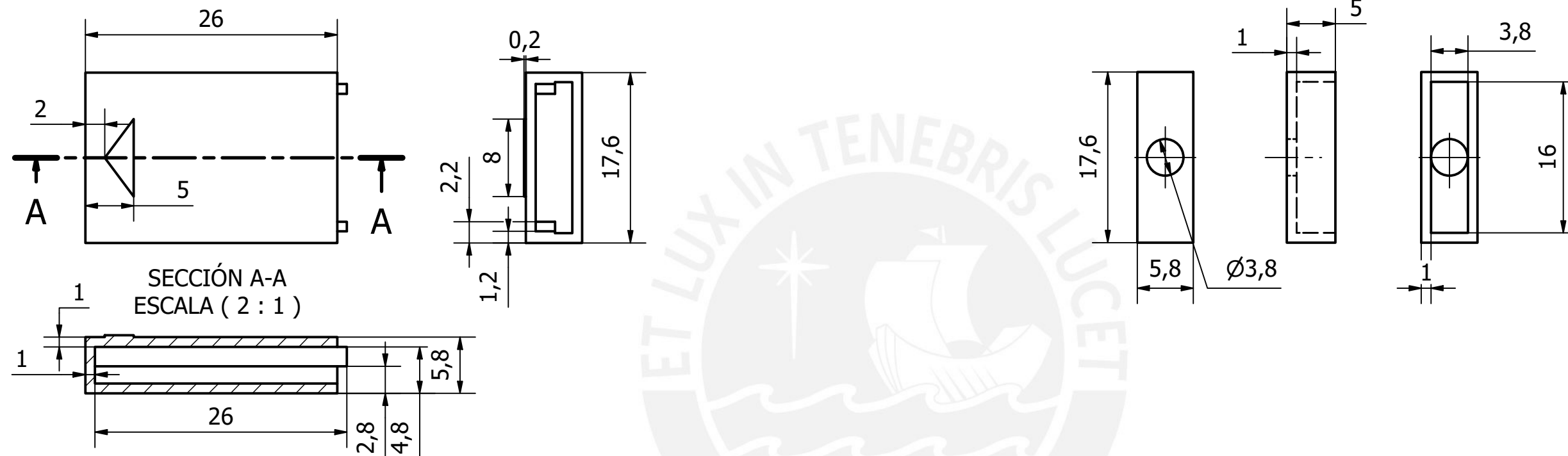
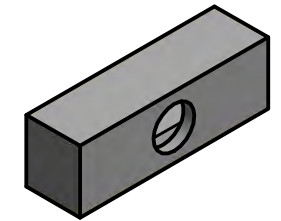
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGUN DIN ISO 2768 - 1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

NOMBRE: BASE DE LA CAJA DEL SENSOR
 POSICIÓN: 12
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 2:1
 MATERIAL: PETG



NOMBRE: TAPA DE LA CAJA DEL SENSOR
 POSICIÓN: 14
 CANTIDAD: 1
 ESCALA: 2:1
 MATERIAL: PETG

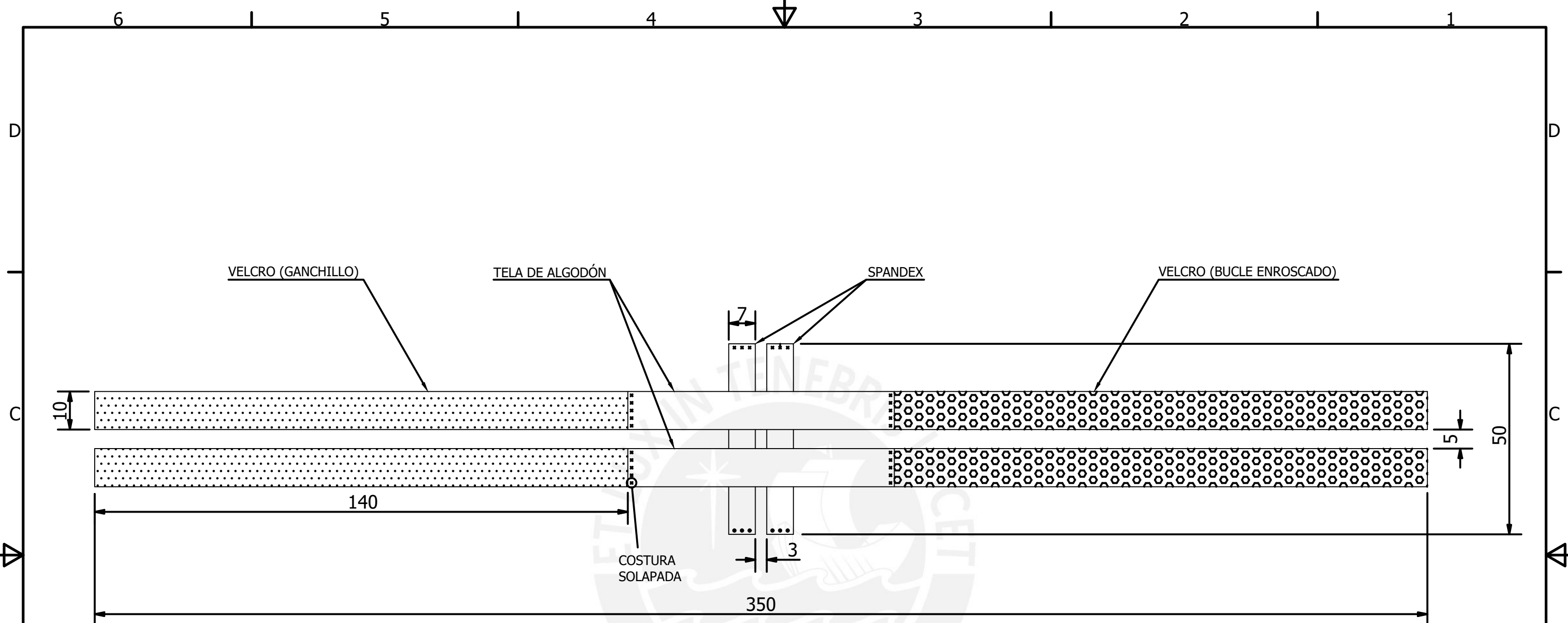


Piezas fabricadas por manufactura aditiva
 Densidad: 100 %
 Altura de capa: 0.2mm
 Velocidad de impresión: 80mm/s

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DIN ISO 2768 - MEDIO	MATERIAL PETG
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA DESPIECE DE LA CAJA DEL SENSOR	ESCALA INDICADA
20153023	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	FECHA: 2021.11.11
		PLANO: CS-DE4-A3

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGUN DIN ISO 2768 - 1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



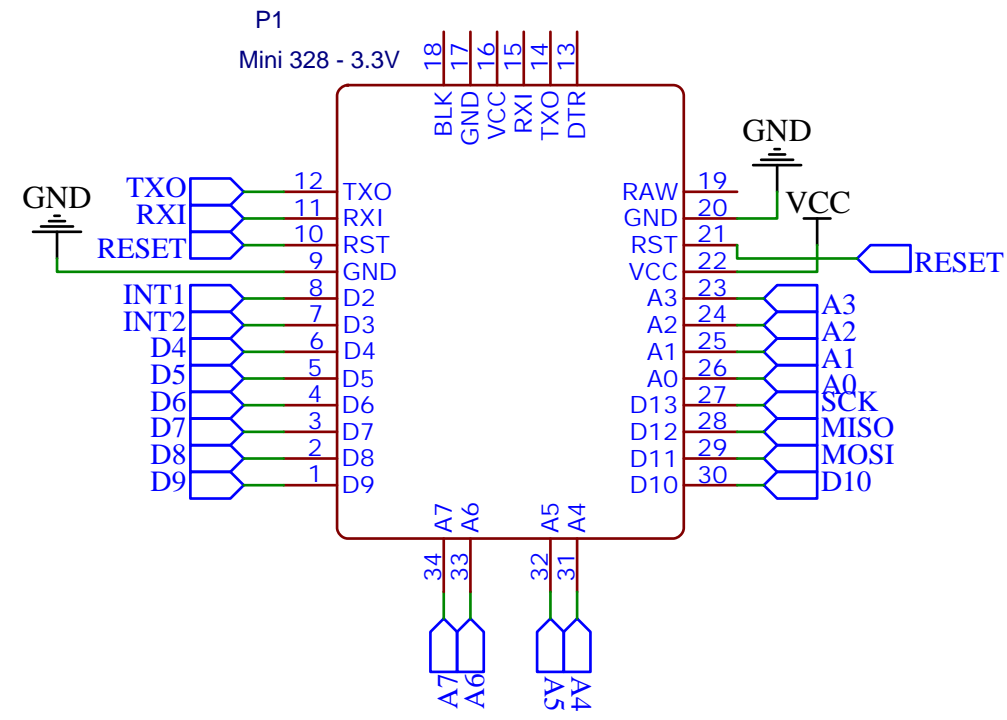
Observación 1: El velcro-ganchillo debe coserse con los ganchillos orientados hacia la parte superior.
 Observación 2: El velcro-bucle debe complementar a los ganchillos orientándose hacia la parte inferior.
 Observación 3: Los extremos de cada tira de spandex también se cosen por costura solapada.

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
 SEGUN DIN ISO 2768 - 1

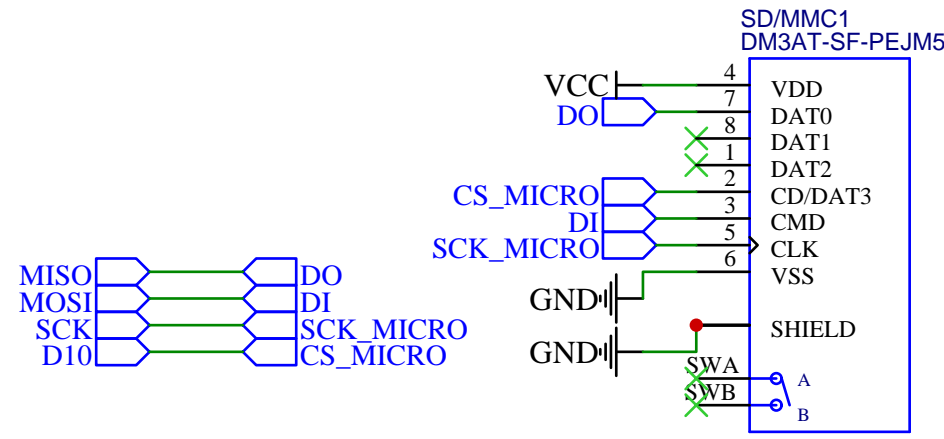
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO							

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO WEARABLE PARA LA MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MUÑECA	ESCALA 1:1
AJUSTADOR		ECHA:A 2022.06.25
20153033	ROJAS CRUZ, BRUS ALBERT	PLANO: J-D5-A3

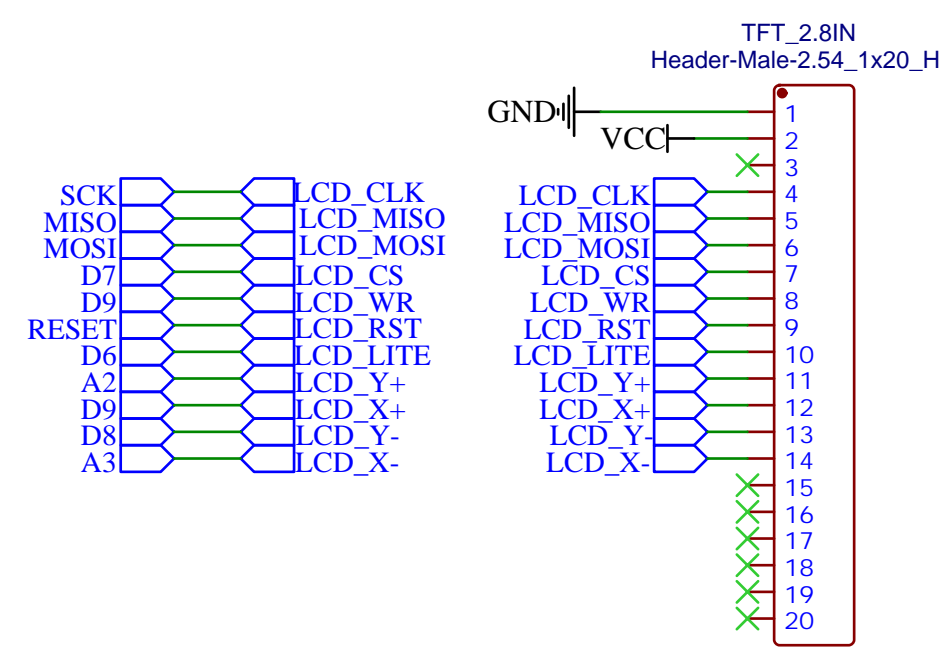
Arduino Pro Mini



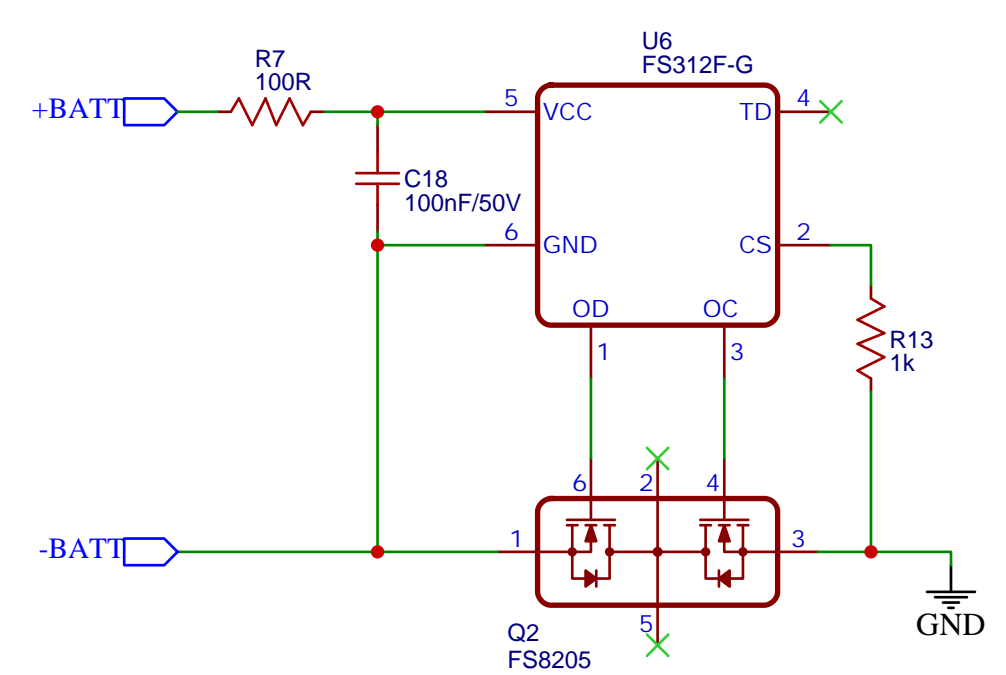
Módulo microSD



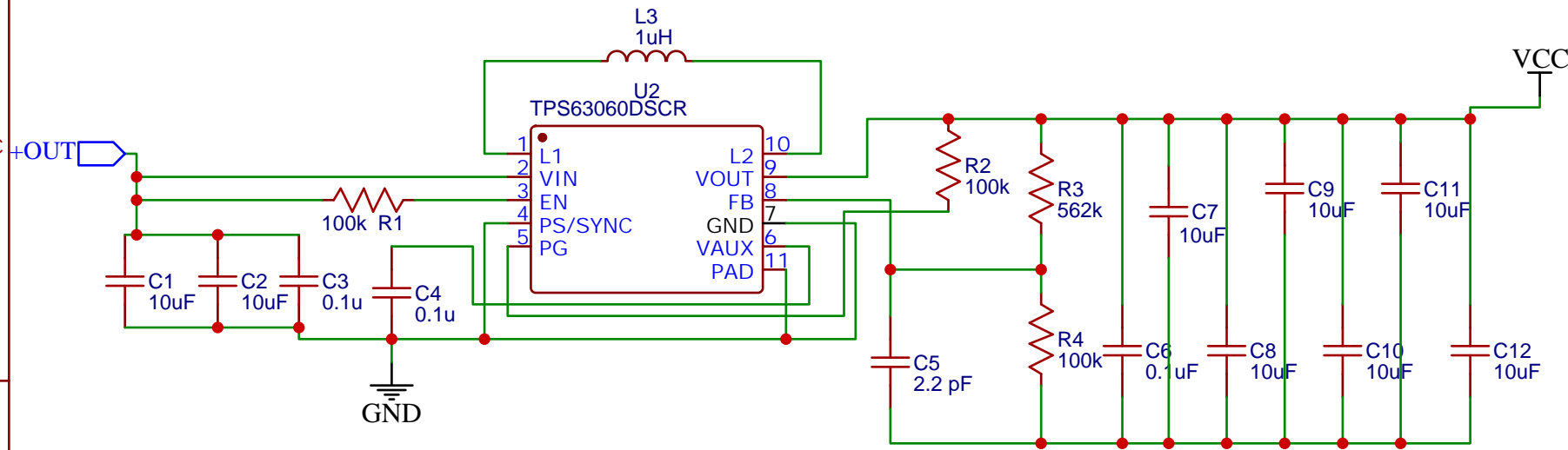
Conectores TFT 2.8"



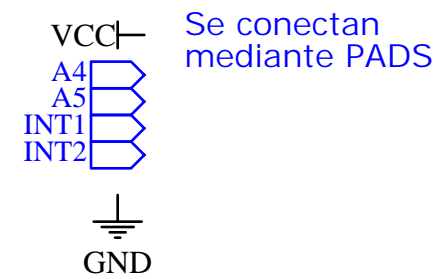
Módulo de protección



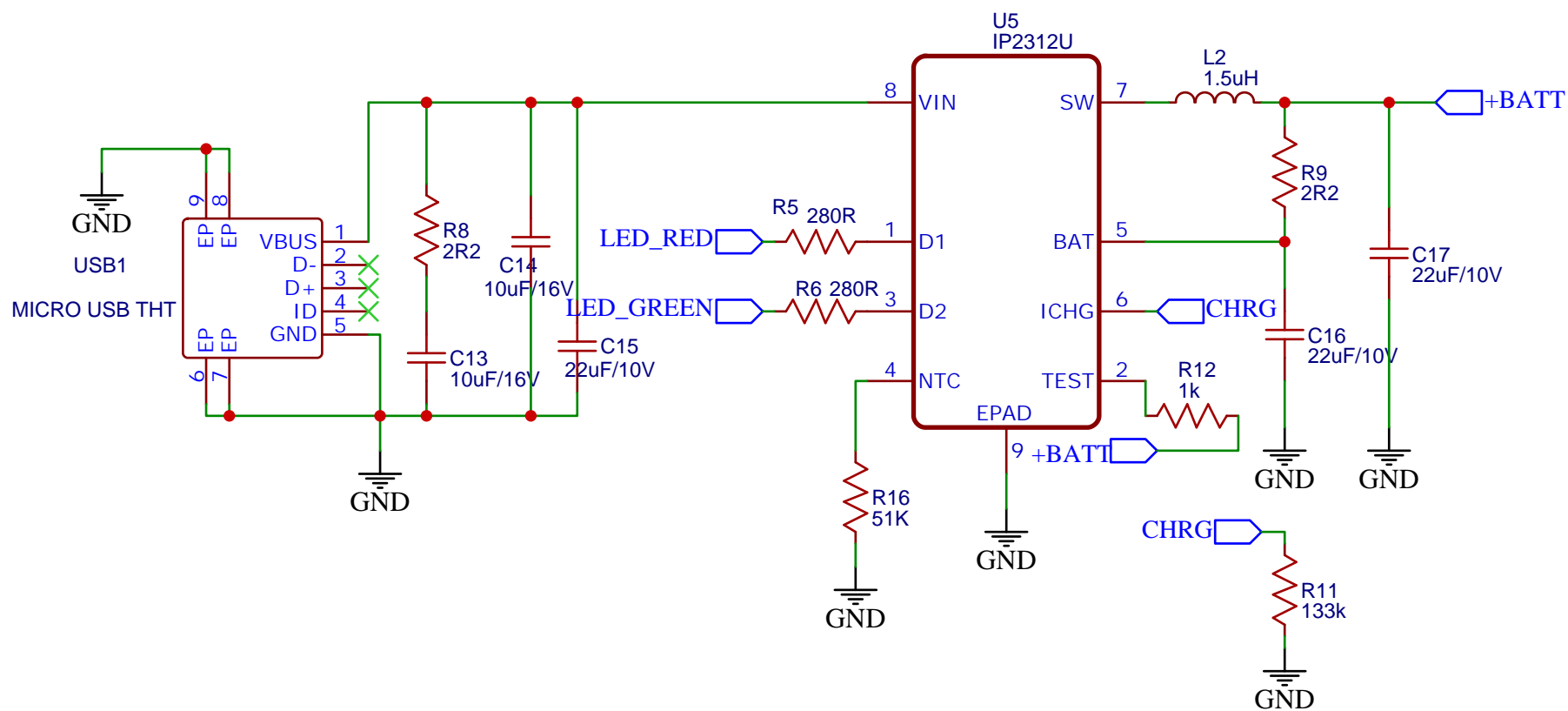
Regulador de voltaje



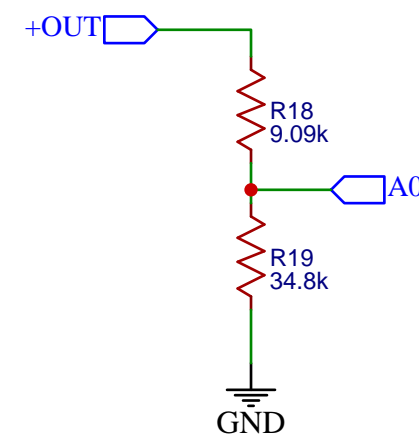
Conexiones MPU9150



Módulo cargador



Sensor de nivel de batería



	Arduino Pro Mini		P1
1	DM3AT-SF-PEJM5		SD/MMC1
1	FS8205	SOT23	Q2
1	Espadines macho 1X20		2.54mm
1	FS312F-G	SOT23	U6
1	TPS63060DSCR	WS0N-10	U2
1	IP2312U	ESOP-8	U5
1	MICRO USB THT		USB1
3	Resistencia 100K	R0603	R1,R2,R4
1	Resistencia 562K	R0603	R3
1	Resistencia 9.09K	R0603	R18
1	Resistencia 34.8K	R0603	R19
2	Resistencia 1K	R0603	R12,R13
1	Resistencia 51K	R0603	R16
2	Resistencia 2R2	R0603	R8,R9
1	Resistencia 133K	R0603	R11
1	Resistencia 100	R0603	R7
2	Resistencia 280	R0603	R5,R6
3	Condensador 0.1uF	C0603	C3,C4,C6
10	Condensador 10 uF	C0805	C1,C2,C7,...,C14
1	Condensador 2,2 pF	C0603	C5
1	Condensador 100 nF	C0603	C18
3	Condensador 22 uF	C0805	C15,C16,C17
1	Inductor 1 uH	L4.0-W4.0	L3
1	Inductor 1,5 uH	L6.6-W6.6	L2
CANT.	COMPONENTE	ENCAPSULADO	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

ESCALA:
1:1

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO "WEARABLE" PARA LA MEDICIÓN DE ÁNGULOS DE LA MUÑECA

FECHA:
24.02.2022

ESQUEMÁTICO ELECTRÓNICO

PLANO:
CE-DEL-A3

DISEÑADO POR: BRUS ALBERT ROJAS CRUZ CÓDIGO: 2022-02-24