

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL
DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL
SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Ivan Alexis Rojas Carrasco

ASESORA:

Dra. Elizabeth Roxana Villota Cerna

Lima, Agosto, 2022

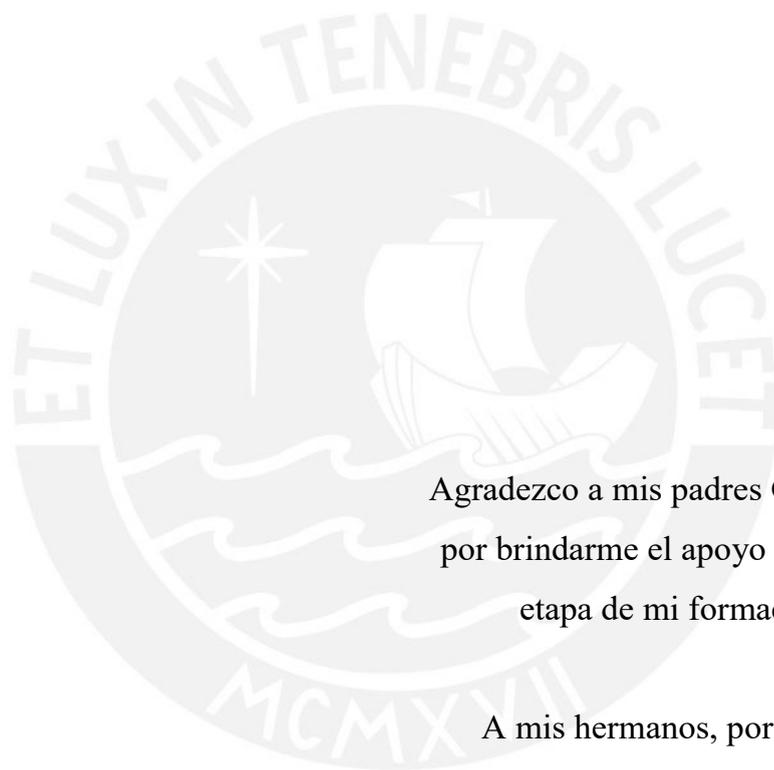
Resumen

Hoy en día, es evidente el crecimiento de la práctica deportiva en el Perú. De hecho, esta actividad se ve impulsada por la infraestructura y la moderna tecnología deportiva implementada con miras a los Juegos Panamericanos Lima 2019. Sin embargo, si bien estos complejos poseen la ventaja de beneficiar a la mayor cantidad de atletas por su capacidad, la tecnología no se proyecta de la misma manera debido a la aún limitada oferta existente. Ante este panorama, resulta importante identificar una oportunidad de mejora que pueda reducir la brecha tecnológica que existe en el deporte peruano. Por esto, se propone diseñar una solución tecnológica que optimice el proceso de control de la fatiga neuromuscular (FN) durante la preparación deportiva.

Sobre el control de la FN, existen alrededor de 6 métodos convencionales para medir el nivel de la fatiga. Algunos de estos, recientemente, han variado con el fin de reducir su complejidad. Prueba de ello es un nuevo estudio que ha demostrado que la altura máxima del centro de masa en el salto en contramovimiento (CMJ, por sus siglas en inglés) puede ser utilizado como una herramienta moderna y práctica para determinar el nivel de la FN. Entonces, con base en este método, se propone diseñar un sistema mecatrónico que obtenga el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima del CMJ, variable física directamente relacionada con la altura del centro de masa, para que se utilice como herramienta para medir el nivel relativo de la FN. Así mismo, el sistema a diseñar debe ser capaz de verificar la ejecución del CMJ.

El sistema mecatrónico se compone de un subsistema que utiliza 8 celdas de carga para medir las fuerzas pie-piso y un segundo subsistema compuesto de una cámara digital para la captura de imágenes que corresponden al desarrollo del CMJ. Luego, para el procesamiento de los algoritmos que culminan en el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima se emplea un microcontrolador; y para el procesamiento de las imágenes que culminan en la verificación del CMJ, un mini ordenador. Al respecto, el procesamiento de imágenes comprende, principalmente, la etapa de reconocimiento de articulaciones en el espacio 2D. Para esto, se utiliza el modelo *Open Pose* de tipo *open source*, que fue elegido por su precisión (79.7%), tiempo de detección (< 0.20 s) e implementación.

La presente inicia revisando el estado del arte, luego se define la lista de requerimientos, estructura de funciones, matriz morfológica y conceptos preliminares según la norma VDI 2221. También, se revisa el diseño del sistema dentro del ámbito mecánico, eléctrico y procesamiento. Al final, se revisa la parte de costos y conclusiones.



Agradezco a mis padres Gastón y Liliam,
por brindarme el apoyo absoluto en cada
etapa de mi formación profesional.

A mis hermanos, por ser mi fuente de
experiencia.

A mi asesora Elizabeth Villota, por
las sugerencias que recibía cada vez que
necesitaba ayuda en la elaboración del
trabajo de tesis.

A mis compañeros, por enseñarme el lado
divertido de la Ingeniería Mecatrónica.

Índice de contenido

Resumen	I
Índice de tablas	V
Índice de figuras	VI
1. Introducción	1
1.1. Problemática.....	1
1.1.1. Capacidad tecnológica en el deporte peruano	1
1.1.2. Tecnología deportiva en Perú: oportunidad de mejora.....	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.2.3. Alcances.....	5
1.3. Estado del arte	5
1.3.1. Medición de variables físicas en el salto	6
1.3.2. Captura de imágenes y reconocimiento de articulaciones.....	14
1.4. Requerimientos del sistema mecatrónico.....	18
1.4.1. Requerimiento general.....	19
1.4.2. Requerimientos mecánicos	19
1.4.3. Requerimientos electrónicos y de procesamiento	20
1.4.4. Requerimientos adicionales.....	21
2. Diseño conceptual	22
2.1. Estructura de funciones	22
2.2. Matriz morfológica.....	27
2.3. Conceptos de solución.....	31
2.3.1. Concepto de solución 1.....	32
2.3.2. Concepto de solución 2.....	32
2.3.3. Concepto de solución 3.....	33
2.4. Evaluación técnico-económica.....	35
2.4.1. Evaluación técnica.....	35
2.4.2. Evaluación económica.....	36
2.5. Selección del concepto de solución optimo	37
3. Diseño del sistema mecatrónico para medir el nivel de fatiga neuromuscular	38

3.1. Integración del sistema mecatrónico de medición	38
3.2. Diseño mecánico	41
3.2.1. Consideraciones previas	41
3.2.2. Plataforma.....	46
3.2.3. Unión estructura superior-concentrador de fuerza-estructura base	49
3.2.4. Trípode de captura de imágenes	56
3.2.5. Planos de ensamble.....	57
3.3. Diseño eléctrico – electrónico	64
3.3.1. Diagrama de bloques	65
3.3.2. Componentes eléctrico-electrónicos.....	66
3.3.3. Diagramas esquemáticos y PCB.....	79
3.4. Diseño del software.....	85
3.4.1. Diagramas de flujo.....	86
3.4.2. Algoritmos de procesamiento de fuerza	93
3.4.3. Algoritmos de validación del CMJ	96
4. Implementación de los algoritmos de procesamiento	99
4.1. Prueba de algoritmos de procesamiento de señales de fuerza.....	99
4.1.1. Filtración y almacenamiento de señales de fuerza	99
4.1.2. Análisis de regresión para señales discretas de fuerza	104
4.1.3. Cálculo de la potencia mecánica máxima.....	105
4.1.4. Cálculo del nivel de fatiga neuromuscular	106
4.2. Implementación de los algoritmos de validación del CMJ	106
4.2.1. Extracción de puntos clave	108
4.2.2. Verificación de perpendicularidad de rodilla	109
4.2.3. Verificación de verticalidad de tronco.....	110
4.2.4. Modelo de reconocimiento de articulaciones	111
5. Costos	113
5.1. Costo de componentes eléctrico – electrónicos	113
5.2. Costo de componentes mecánicos.....	114
5.3. Costo del sistema.....	115
Conclusiones y recomendaciones	117
Referencias bibliográficas	121

Índice de tablas

Tabla 1.1: Características principales de plataforma INFINI∞T.....	9
Tabla 1.2: Datos técnicos de sistema Optojump Next.....	10
Tabla 1.3: Valores de potencia obtenido por métodos directos e indirectos.	13
Tabla 1.4: Correlación entre variables metabólicas y propias del CMJ.	14
Tabla 2.1: Guías para clasificar conceptos de solución.....	27
Tabla 2.2: Matriz morfológica del módulo energía.....	28
Tabla 2.3: Matriz morfológica del módulo sensores.	28
Tabla 2.4: Matriz morfológica del módulo interfaz	29
Tabla 2.5: Matriz morfológica del módulo procesamiento.	30
Tabla 2.6: Matriz morfológica modulo mecánica	31
Tabla 2.7: Evaluación técnica.....	35
Tabla 2.8: Evaluación económica.....	36
Tabla 3.1: Distribución óptima de la presión plantar de una persona promedio.	43
Tabla 3.2: Selección de materiales para elementos de plataforma de fuerza	45
Tabla 3.3: Propiedades de los materiales de la estructura superior.	47
Tabla 3.4: Propiedad de los materiales de unión atornillada.....	55
Tabla 3.5: Criterios de selección modulo amplificador.....	69
Tabla 3.6: Opciones comerciales para módulo de amplificación y digitalización.	69
Tabla 3.7: Criterio de selección cámara digital.	70
Tabla 3.8: Opciones comerciales para cámara digital.	70
Tabla 3.9: Criterios de selección de pantalla digital.....	71
Tabla 3.10: Opciones comerciales para pantalla digital.....	71
Tabla 3.11: Criterios de selección modulo óptico.	72
Tabla 3.12: Opciones de selección para modulo óptico.	72
Tabla 3.13: Características del módulo SD.	73
Tabla 3.14: Características del módulo LED WS2812B.....	74
Tabla 3.15: Criterios de selección para MCU interfaz	74
Tabla 3.16: Opciones comerciales para MCU de interfaz.....	75
Tabla 3.17: Criterios de selección de MCU para procesamiento de fuerza	75
Tabla 3.18: Opciones para mini-PC del dominio de Procesamiento.	76
Tabla 3.19: Criterios de selección para interruptor a presión.....	77
Tabla 3.20: Consumo eléctrico para elementos eléctricos.	79
Tabla 4.1: Comparación entre celda de carga seleccionada y de prueba	99
Tabla 5.1: Costo de componentes eléctrico – electrónicos nacionales.	113
Tabla 5.2: Costo de componentes eléctrico – electrónicos importados.....	114
Tabla 5.3: Costo de componentes mecánicos.....	114
Tabla 5.4: Costo de componentes mecánicos de sujeción.....	115
Tabla 5.5: Costo total del sistema mecatrónico.....	116

Índice de figuras

Figura 1.1: (a) Wearable MyVert y aplicación y (b) montaje de dispositivo.....	7
Figura 1.2: (a) Plataforma y correa de Abalakov y (b) test con sistema PSV.....	7
Figura 1.3: (a) Integración de plataformas y (b) ejecución de salto sobre plataforma.....	8
Figura 1.4: Sistema de detección contacto pie-piso Optojump Next.....	9
Figura 1.5: (a) Vista de perfil de estructura y (b) arreglo de varillas pivotadas.....	11
Figura 1.6: Unidad de soporte.....	12
Figura 1.7: (a) Acoplamiento entre estructuras y (b) unión tipo bisagra.....	12
Figura 1.8: (a) Medición de ángulo de rodilla y (b) durante prueba de ciclismo.....	15
Figura 1.9: Cámara Kinect.....	16
Figura 1.10: (a) Imagen RGB e (b) imagen con profundidad tomadas por Kinect.....	16
Figura 1.11: (a) Mapas de confianza de regiones del cuerpo y (b) matriz de afinamiento predictivo.....	17
Figura 1.12: <i>Pipeline</i> de modelo de reconocimiento de posturas OpenPose.....	18
Figura 2.1: Caja negra del sistema mecatrónico de medición del nivel de fatiga.....	22
Figura 2.2: Diagrama de bloques del módulo interfaz.....	23
Figura 2.3: Diagrama de bloques del módulo energía.....	24
Figura 2.4: Diagrama de bloques del módulo procesamiento.....	25
Figura 2.5: Diagrama de bloques del módulo sensores.....	26
Figura 2.6: Diagrama de bloques del módulo mecánica.....	27
Figura 2.7: Concepto de solución 1.....	32
Figura 2.8: Concepto de solución 2.....	33
Figura 2.9: Concepto de solución 3.....	34
Figura 2.10: Grafica valor técnico Vs. Valor económico.....	37
Figura 3.1: Integración del sistema mecatrónico principal.....	39
Figura 3.2: Configuración de elementos de la estructura base.....	40
Figura 3.3: Configuración de elementos en caja electrónica.....	40
Figura 3.4: Desarrollo estándar de la fuerza vertical vs. tiempo durante CMJ.....	41
Figura 3.5: Modelo regular aproximado para desarrollo de fuerza vertical del CMJ.....	42
Figura 3.6: Ubicación de fuerzas sobre plataforma.....	43
Figura 3.7: Ubicación de concentradores de fuerza en estructura base.....	44
Figura 3.8: (a) Modelo 3D para análisis FEM (b) Unión estructura superior-platina.....	46
Figura 3.9: (a) Zona de esfuerzo máximo, (b) deflexión vertical de estructura.....	47
Figura 3.10: diagrama de cuerpo libre para zona de unión tubo cuadrado – platina.....	48
Figura 3.11: <i>Planar beam load cell assembly</i>	49
Figura 3.12: Diagrama de cuerpo libre contacto pie-piso.....	51
Figura 3.13: Fuerzas cortantes en uniones entre estructura superior y concentrador.....	52
Figura 3.14: Modelo 3D y elementos de unión atornillada.....	55
Figura 3.15: Deflexión horizontal de unión atornillada.....	55
Figura 3.16: Ubicación del trípode de captura de imágenes.....	57
Figura 3.17: Vista isométrica del sistema mecatrónico de medición.....	58
Figura 3.18: (a) Corte H-H y (b) unión entre estructura superior-concentrador.....	58
Figura 3.19: Vista isométrica de estructura superior.....	59
Figura 3.20: (a) Sección A-A y (b) vista horizontal plataforma superior.....	59
Figura 3.21: Elementos de unión en interfaz y (Vista C) en estructura superior.....	60
Figura 3.22: Vista isométrica estructura base.....	60
Figura 3.23: (a) Sección D-D y (b) vista horizontal de estructura base.....	61
Figura 3.24: (Vista F) Unión concentrador-tubo, (Vista N) interruptor ON-OFF.....	61
Figura 3.25: Vista isométrica de caja electrónica.....	62
Figura 3.26: (a) Sección G-G y (b) vista horizontal de caja electrónica.....	62

Figura 3.27: (Vista J) Unión fuente de poder-caja metálica, (Vista K) unión <i>case</i> de mini-PC y caja metálica y (Vista L) unión PCB con chapa doblada.....	63
Figura 3.28: Vista isométrica del subensamble trípode de captura de imágenes.	64
Figura 3.29: (a) Trípode y (Vista M) detalle de unión cabezal-adaptador de cámara	64
Figura 3.30: Diagrama de bloques del sistema principal.....	66
Figura 3.31: (a) Sensor de fuerza 50 kgf y (b) celda de carga en estructura base	68
Figura 3.32: Circuito integrador de sensores de fuerza	68
Figura 3.33: (a) Modulo amplificador ADC HX711 y (b) amplificador en PCB	70
Figura 3.34: (a) Cámara Logitech C270 y (b) Cámara en trípode.....	71
Figura 3.35: (a) Pantalla LCD 128x64 y (b) pantalla en estructura superior.	72
Figura 3.36: (a) Sensor óptico FC-51 y (b) Sensor IR en estructura superior	73
Figura 3.37: (a) Modulo SD y (b) Modulo SD en PCB.....	73
Figura 3.38: (a) Modulo LED WS2812B y (b) Modulo LED en interfaz	74
Figura 3.39: (a) Arduino Pro-mini y (b) Arduino Pro-mini en PCB	75
Figura 3.40: MCU de procesamiento Arduino Pro-mini sobre placa impresa	76
Figura 3.41: (a) mini-PC Raspberry Pi4 y (b) mini ordenador en caja electrónica	77
Figura 3.42: (a) Interruptor a presión APIELE e (b) interruptor en plataforma	78
Figura 3.43: (a) Fuente de poder conmutada de 5V y (b) Fuente en caja electrónica	79
Figura 3.44: Diagrama esquemático de MCU Arduino Mini Pro (Procesamiento).	80
Figura 3.45: Diagrama esquemático mini-PC	80
Figura 3.46: Diagrama esquemático modulo HX711.....	81
Figura 3.47: Diagrama esquemático de celdas de carga.....	81
Figura 3.48: Diagrama esquemático cámara digital	81
Figura 3.49: Diagrama esquemático MCU Arduino Mini Pro (Interfaz).	82
Figura 3.50: Diagrama esquemático pantalla LCD 128x64.	82
Figura 3.51: Diagrama esquemático modulo SD.....	83
Figura 3.52: Diagrama esquemático módulos ópticos IR.....	83
Figura 3.53: Diagrama esquemático del interruptor a presión.	84
Figura 3.54: Diagrama esquemático arreglo de módulos LED	84
Figura 3.55: Vista frontal de circuito impreso.....	85
Figura 3.56: Vista inferior de circuito impreso.	85
Figura 3.57: Diagrama UML interfaz.....	86
Figura 3.58: (a) Secuencias previas y (b) función de interrupción <i>callback</i>	87
Figura 3.59: Hilo de ejecución principal de la MCU Interfaz	88
Figura 3.60: Diagrama UML Procesamiento.	89
Figura 3.61: Hilo post ejecución de line master y (b) función <i>callback</i>	89
Figura 3.62: Hilo de ejecución principal de la MCU Procesamiento.	90
Figura 3.63: Diagrama UML mini-PC	91
Figura 3.64: Configuración de condiciones iniciales en mini-PC	91
Figura 3.65: Hilo de ejecución principal de la unidad mini-PC	92
Figura 3.66: Respuesta de filtro FIR en dominio de frecuencia.	93
Figura 3.67: Algoritmo de detección de fase concéntrica	94
Figura 3.68: Algoritmo de validación de perpendicularidad de rodilla.....	97
Figura 3.69: Representación análoga de la fase concéntrica del CMJ.	98
Figura 3.70: Algoritmo de validación de verticalidad de torso.	98
Figura 4.1: Configuración de componentes para prueba de atenuación de ruido.....	100
Figura 4.2: Pesas de calibración para prueba de atenuación de ruido.	100
Figura 4.3: Lectura de señales de fuerza: (a) 2gf, (b) 30gf, (c) 50gf y (d) 100gf.....	101
Figura 4.4: Señal de fuerza atenuada: (a) 2gf, (b) 30gf, (c) 50gf y (d) 100gf.	101
Figura 4.5: Generador de señales analógicas.....	102

Figura 4.6: Desarrollo de fuerza aproximada: (a) usuario de 50 y (b) 80 kgf.	103
Figura 4.7: Desarrollo de fuerza en fase concéntrica para usuario de 80 kg y 50kg....	104
Figura 4.8: Aproximación cuadrática de fase concéntrica para usuario de 50kg.	104
Figura 4.9: Aproximación cuadrática de fase concéntrica para usuario de 80kg.	105
Figura 4.10: (a) Trípode de captura de imágenes y (b) plataforma de salto.	107
Figura 4.11: <i>Frames</i> de video de fase concéntrica para usuario de 1.65 m de altura...	108
Figura 4.12: Configuración de carpetas para validación del CMJ dentro de mini-PC.	109
Figura 4.13: Resultado de validación de perpendicularidad de rodilla	110
Figura 4.14: Resultado de verticalidad de tronco durante CMJ.	111



1. Introducción

En el presente capítulo, se aborda la problemática del proyecto. Luego, se definen los objetivos generales y específicos; y, finalmente, se revisan los antecedentes técnicos y tecnológicos que permitan definir los requerimientos del sistema mecatrónico.

1.1. Problemática

A continuación, se revisa la evolución tanto de la práctica deportiva como de la tecnología e infraestructura que contribuyen al deporte en el Perú. Después, se identifica la oportunidad de inserción tecnología que defina el desarrollo del proyecto de tesis.

1.1.1. Capacidad tecnológica en el deporte peruano

Es cierto que, en la actualidad, el exceso de responsabilidades relacionadas al estudio, el trabajo y la vida agitada llegan a producir estrés y deficiencias que, con el tiempo, pueden ser un riesgo para la salud. Por ello, el deporte y la actividad física se presentan como una alternativa conocida que logra reducir las cargas y mejorar el estilo de vida de las personas. Prueba de esta evolución deportiva se pudo evidenciar en los años 2016 y 2019, cuando se produjo un incremento de personas que incorporaron el deporte en su vida, así como un aumento en el nivel de competitividad en la mayoría de las disciplinas. Por ejemplo, por primera vez, se logró la presencia de 29 deportistas peruanos en las Olimpiadas Río 2016, y de 39 medallistas en los últimos Juegos Panamericanos Lima 2019.

Los Juegos Panamericanos celebrados en el Perú trajeron consigo una serie de beneficios tanto en bienes sociales como culturales. En efecto, complejos como el nuevo velódromo de San Luis y el polideportivo del Callao reflejan las estructuras de primer nivel que potenciarán la preparación deportiva. Del mismo modo, el ámbito tecnológico no fue ajeno a este avance, ya que las delegaciones peruanas tuvieron el respaldo de los modernos laboratorios biomecánicos del IPD [1], que fueron implementados con

dispositivos de captura 3D, plataformas de fuerza y electromiógrafos para el análisis neuromuscular. No obstante, si bien un amplio grupo de deportistas se beneficiará por los recientes complejos, otro grupo no será afecto a los bienes tecnológicos, ya que estos sistemas se tornan insuficientes para favorecer a todos los deportistas y, sobre todo, a los potenciales atletas de elite que se encuentran alejados de estos centros tecnológicos. Por ello, se propone identificar una oportunidad de mejora que pueda reducir la brecha tecnológica que existe en el deporte peruano.

1.1.2. Tecnología deportiva en Perú: oportunidad de mejora

Para iniciar el camino para encontrar una oportunidad de mejora ante la problemática presentada, se deben revisar las etapas que conforman la preparación deportiva. Así, se logra identificar la fase de entrenamiento (físico, técnico y táctico), control del nivel de carga, rendimiento y nivel de fatiga [2], donde es preciso señalar que la etapa de control de la fatiga es la que menor difiere entre disciplinas y esto porque está orientada a evaluar la reducción inducida en la fuerza voluntaria máxima o en la potencia producida por un músculo o grupo muscular, mas no la técnica o táctica que son aspectos propios de cada disciplina [3]. Al respecto, hasta el momento se conoce que el método más fiable para determinar el nivel de la FN es aquel que mide la cantidad de ácido láctico en la sangre, ácido que se genera por la reacción lateral a la glucólisis en ausencia de O₂ [4]. Así mismo, también existen otros métodos como el de variabilidad de la frecuencia cardíaca, el método EPOC (*Oxygen consumption post exercise*), marcadores bioquímicos, método DMOS (dolor muscular de inicio de retardo), escala visual analógica (EVA), escala de bienestar y el test del salto en contramovimiento (CMJ) [5]. Aunque la mayoría de los métodos mencionados en el párrafo anterior estén bien respaldados, el test del salto en contramovimiento se perfila como una propuesta moderna que se enfoca en reducir la complejidad del proceso de medición del nivel de fatiga

(método no invasivo). Así, según Miras, la altura alcanzada durante el test del CMJ puede servir como herramienta para medir el nivel de la FN, ya que se pudo comprobar que el nivel de ácido láctico en la sangre y la altura alcanzada son sensibles al nivel de la fatiga, mas no son comparables de forma absoluta [6]. Entonces, situando la oportunidad de inserción tecnología sobre el estudio de Miras, se propone recurrir al test del CMJ como método para determinar el nivel de la FN considerando una nueva variable física de análisis que aporte mayor información y que se encuentre directamente relacionada a la altura del CMJ. Así, se recurre a la potencia mecánica máxima, la cual se integra de dos variables físicas: fuerza y velocidad. En otras palabras, la velocidad permite evaluar las capacidades motrices y fisiológicas; y la fuerza, la par del sistema neuromuscular. De igual manera, es importante resaltar la influencia de la ejecución del salto en los resultados del CMJ, donde el interés se centra en minimizar los movimientos corporales que afecten en el rendimiento tanto de altura como de la potencia del CMJ. Es decir, la técnica se restringe a mantener el tronco en posición vertical durante la fase concéntrica y a lograr la perpendicularidad de rodilla durante la fase isométrica del salto (revisar ejecución del CMJ en Anexo B.1).

Por ello, en esta tesis se propone diseñar un sistema mecatrónico integral que utilice el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima del test del CMJ para medir el nivel relativo de la fatiga neuromuscular y, además, verifique la ejecución del CMJ. Con lo anterior, se busca que el sistema propuesto complemente tanto el trabajo de futuras investigaciones que consideren al CMJ como alternativa para medir el nivel de la FN, como la preparación deportiva dentro del Perú.

12 Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general que se desea alcanzar y los objetivos parciales que forman parte del desarrollo del proyecto. Así mismo, se define el alcance

de la tesis cuyo cumplimiento define el resultado final.

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema mecatrónico para medir el nivel relativo de la FN y verificar la ejecución del CMJ. Para conseguirlo, se propone utilizar el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima del CMJ como métrica de análisis de la FN y un modelo de reconocimiento de articulaciones desarrollado por un tercero, este último como parte del proceso de verificación del CMJ. Además, el sistema mecatrónico debe ser portátil y de fácil adquisición dentro de Perú.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificar antecedentes técnicos sobre modelamiento corporal que utilicen algoritmos entrenados con base en *machine* y *deep learning*, y sobre sistemas empleados para medir el rendimiento deportivo.
- Identificar antecedentes tecnológicos sobre dispositivos estacionarios y portátiles utilizados en la evaluación deportiva y en la adquisición de parámetros biocinéticos del cuerpo.
- Definir, por un lado, los requerimientos del sistema dentro del dominio mecánico, electrónico y procesamiento; y, por otro, los requerimientos adicionales que abarquen el costo, la fabricación, mantenimiento, seguridad, operación.
- Evaluar el concepto de solución óptimo con el mejor balance técnico-económico que resulte del diseño de la estructura de funciones y posterior evaluación de la matriz morfológica.
- Diseñar el dominio mecánico mediante cálculos y simulaciones CAD/CAE y presentar los planos de ensamble de los componentes mecánicos que se integran

en el sistema mecatrónico.

- Diseñar el dominio eléctrico-electrónico que integra la parte de energía, sensores, interfaz y procesamiento (hardware) mediante cálculos eléctricos, selección de componentes, y elaboración tanto de los diagramas de bloques como esquemáticos.
- Diseñar el *software* de funcionamiento, mediante diagramas flujo, que abarque el proceso de transformación de las señales de fuerza que derivan en el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima y los diagramas de flujo para el proceso de verificación del CMJ.

1.2.3. Alcances

En el presente proyecto se propone desarrollar el diseño de un sistema mecatrónico que utilice un subsistema de medición de fuerza pie-piso para obtener el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima durante el CMJ. Además, este trabajo también abarca el diseño de un subsistema que verifique la ejecución del CMJ con la ayuda parcial de un modelo de reconocimiento de articulaciones y un dispositivo de captura de imágenes. Por otro lado, se debe indicar que la implementación y las pruebas experimentales para el funcionamiento integral del sistema no se efectuarán en este proyecto, más sí las pruebas independientes de los algoritmos de procesamiento de fuerza y verificación del CMJ.

13. Estado del arte

A continuación, se revisa, por un lado, el estado del arte que se relaciona con la medición de las variables biomecánicas como la fuerza, altura del salto y otras que permitan determinar el nivel de la FN; y, por otro lado, los antecedentes relacionados al modelamiento corporal utilizando tecnologías de reconocimiento de pose, este último como parte de la verificación del CMJ.

1.3.1. Medición de variables físicas en el salto

El desarrollo de la presente sección abarca, en primer lugar, la revisión de los componentes y las opciones comerciales disponibles en el mercado; luego, se revisa las patentes y, finalmente, los estudios académicos que permitan obtener variables físicas presentes en el desarrollo del CMJ.

1.3.1.1. Componentes / Dispositivos comerciales

MyVert [8]

MyVert es un dispositivo portátil que es empleado en distintos deportes como el básquetbol, voleibol, fútbol, etc. El principal objetivo del dispositivo es, por un lado, hacer seguimiento al nivel de carga del atleta durante la actividad física y, por otro, evaluar el rendimiento de este utilizando variables cinemáticas involucradas en el salto vertical como la velocidad y la aceleración. Así mismo, el monitoreo de dichas variables se puede realizar en simultáneo al desarrollo de la actividad física gracias a la comunicación inalámbrica que permite el envío y recepción de datos con la aplicación móvil del *wearable*. Además, el fabricante menciona que MyVert tiene la capacidad de obtener el desplazamiento del centro de masa (CM) del atleta durante cualquier actividad deportiva con un 96 % de exactitud. Esto último fue verificado en un estudio publicado en la revista *Biology of Sport*, donde se compara las medidas obtenidas por MyVert con otro dispositivo mecánico y semejante llamado Vertec. La conclusión fue que MyVert es un dispositivo práctico que puede medir el rendimiento de los atletas [9]. El *wearable* posee internamente un sistema inercial de medición (IMU) de alta precisión, que contiene un giroscopio, un acelerómetro y un magnetómetro capaces de hacer mediciones en tres dimensiones. Los algoritmos internos del *wearable* fueron diseñados con base en relaciones físicas directas que usan como argumentos los datos proporcionados por el módulo inercial (aceleración, tiempo y ángulos de giro). Actualmente, MyVert es

utilizado para medir el nivel de carga y rendimiento de los jugadores de la selección nacional masculina y femenina de voleibol en los Estados Unidos.



Figura 1.1: (a) Wearable MyVert y aplicación y (b) montaje de dispositivo.

Fuente: [8].

Plataforma para salto vertical (PSV) [10]

PSV es un sistema de medición que tiene la finalidad de medir el alcance máximo del centro de masa aplicado en el salto vertical. La configuración básica se compone de una plataforma apoyada en el piso con un sistema mecánico para la dosificación de una cuerda (ver Figura 1.2 (b)). Este último sirve para medir el desplazamiento vertical del usuario durante el salto. El segundo componente es una correa o cinturón de Abalakov que se sujeta en la cintura del atleta. Para el caso de la versión digital, se cuenta con una pantalla LCD al centro del cinturón con el fin de proyectar la altura del salto. El rango de medición para la mayoría de sistemas se encuentra entre los 5 y 99 cm. Finalmente, la plataforma y los accesorios son considerados portátiles y de fácil manipulación por los fabricantes; por eso, el dispositivo puede ser operado en interiores y exteriores.

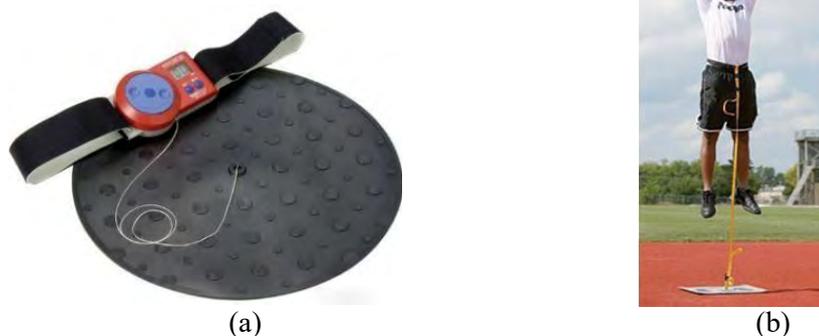


Figura 1.2: (a) Plataforma y correa de Abalakov y (b) test de Sargent con sistema PSV.

Fuente: (a) [10] y (b) [11].

INFINI ∞ T [12]

INFINI ∞ T es una plataforma para medir las fuerzas de reacción que se generan por el contacto entre el pie del usuario y la superficie del dispositivo. El sistema es fabricado por la empresa BTS Bioengineering y fue creado con fines deportivos, investigación, rehabilitación y para adaptaciones de prótesis. El sistema es capaz de calcular distintas variables involucradas en el salto vertical: potencia mecánica, velocidad inicial de despegue y alcance máximo del salto vertical (VJ, por sus siglas en inglés), a partir de medidas primarias como el tiempo de vuelo (*time of flying*) y las reacciones sobre la superficie. La plataforma está compuesta por 4 sensores esféricos patentados que garantizan la medición de las fuerzas sobre toda la superficie de la plataforma; además, destacar la resolución de los sensores (16 bits) y el diseño de la plataforma. Así mismo, respecto al diseño, este permite que el usuario pueda integrar varias plataformas con la finalidad de ampliar el campo de medición (ver Figura 1.3). Esto último, además, permite que el usuario pueda desplazarse sobre la plataforma de manera espontánea y libre sin ninguna restricción. El sistema aplicado al salto vertical empieza con el usuario de pie sobre la plataforma y con los pies separados a la altura de los hombros; luego, el usuario realiza el salto lo más alto posible hasta el aterrizaje para, posteriormente, con un *software* propio del dispositivo, realizar el análisis de los resultados (ver Figura 1.3 (b)). Algunas características importantes del dispositivo se detallan en la Tabla 1.1



Figura 1.3: (a) Integración modular de plataformas y (b) ejecución de salto sobre plataforma.
Fuente: (a) [12] y (b) [13]

Tabla 1.1: Características principales de plataforma INFINI∞T.

Características	Descripción
Dimensiones principales	60 x 40 x 6 cm
Interface	LAN(10/100 Ethernet)
Señal de salida	Digital
Fuente de alimentación	<i>Power over Ethernet</i>
Fuerza máxima de lectura de fuerza	Hasta 8000 N
Resolución de lectura	16 bits
Desviación de sensibilidad sobre superficie	< 1.0% de la escala total de salida
Histéresis	< 0.2% de la escala total de salida
Tipo de sensores	Galgas extensiométricas
Grado de protección	IP42

Fuente: [12]

Optojump Next [14]

Optojump Next es un sistema óptico de medición conformado por dos barras en comunicación constante: una de ellas funciona como emisor de luz infrarroja; la otra, como receptor. Además, cada barra está conformada por 96 emisores y receptores ópticos, respectivamente (separación de 1.041 cm). El sistema no detecta ninguna señal mientras el haz de luz no sea interrumpido. Caso contrario, el sistema empieza a medir el tiempo de interrupción. Esta última operación permite determinar el nivel de carga durante el entrenamiento, ya que al contabilizar las interrupciones que se generan, se puede determinar la frecuencia de trabajo durante la actividad física. Para el caso específico del salto vertical, basta con obtener el tiempo de vuelo para calcular la altura máxima alcanzada. Así mismo, una última ventaja que agregar es el diseño articulable de las barras que permite que estas se integren para modificar la región de medición. Es decir, pueden abarcar regiones lineales y poligonales (características en Tabla 1.2)

**Figura 1.4:** Sistema de detección contacto pie-piso Optojump Next.

Fuente: [14].

Tabla 1.2: Datos técnicos de sistema Optojump Next.

Características	Descripción
Fuente de alimentación interna	Rechargeable Li-ion battery 7.4V, 1800mAh
Fuente de alimentación externa	24VDC \pm 5%
Longitud de onda	890 nm
Numero de sensores ópticos	96 por metro
Resolución espacial	1.041 cm
Altura del sensor	3 mm
Frecuencia de muestreo	1 000 Hz
Distancia máxima entre emisor y receptor	6 m
Dimensión de emisor y receptor con interfaz	1 100 x 100 x 100 mm
Masa de emisor y receptor con interfaz	2 kg

Fuente: [14].

1.3.1.2. Patentes

A continuación, se presentan dos patentes. La primera diseñada para medir el alcance durante el salto vertical; la segunda, para medir la fuerza pie-piso gracias a una estructura modular registrada.

Jump measuring apparatus [15]

Inventor: James J. Perrine, Allen E. Scates.

Patente: US4208050A.

Fecha: 1980-06-17.

Esta patente describe una estructura que permite medir el alcance máximo del salto vertical con extensión de brazos en un rango de 1.83 a 3.6 metros. El diseño cuenta con partes móviles con el fin de facilitar los procesos de ensamblaje y medición. Particularmente, se cuenta con un segmento retráctil ubicado en la parte superior del ensamblaje general (ver objeto 20 en Figura 1.5), que se utiliza para regular la posición del rango de medición. Del mismo modo, el sistema también cuenta con un conjunto de varillas en el extremo superior del segmento retráctil, separadas a 2.54 cm entre ellas y pivotadas en un eje vertical (ver objeto 24 en Figura 1.5). El proceso de medición inicia con el usuario de pie al costado de la estructura; luego, este realiza el salto vertical extendiendo los brazos hasta lograr mover la varilla más alejada posible; y, al final, después del aterrizaje, se verifica la marca dejada en el arreglo de varillas. Por otro lado,

se debe indicar que las ventajas principales de la estructura es su portabilidad, esto permite que sea instalada en la mayoría de los ambientes con superficies planas.

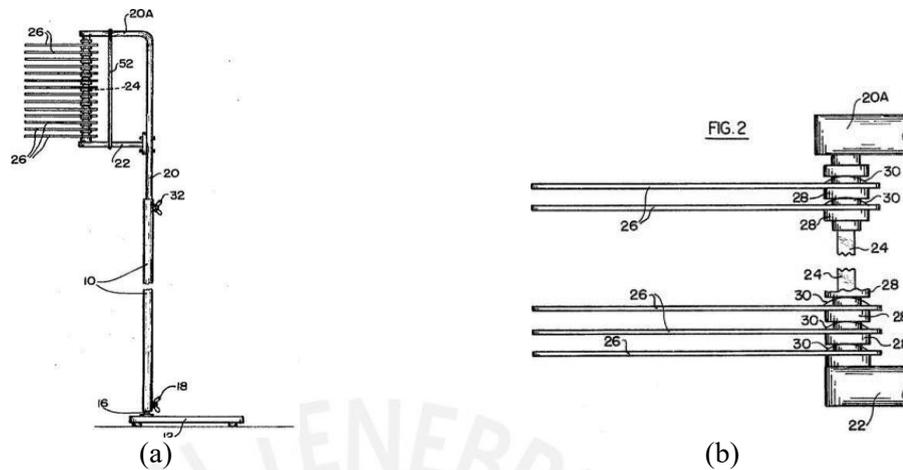


Figura 1.5: (a) Vista de perfil de estructura y (b) arreglo de varillas pivotadas.
Fuente: [15].

Portable jumping force measuring platform [17]

Inventor: Edgar Prof. Dr. Stüssi.

Patente: EP0882474A2.

Fecha: 1998-12-09.

Esta patente describe el diseño de una plataforma de fuerza que destaca por su diseño, ya que permite medir la fuerza sobre la superficie con únicamente tres unidades de soporte (ver Figura 1.6). Es decir, la plataforma debe ser triangular con una unidad de soporte en cada vértice. Este diseño facilita el acoplamiento entre plataformas para generar estructuras con distintas formas poligonales, como es el caso que se presenta en la Figura 1.7 (a), donde se muestra la unión de una estructura triangular con otra cuadrada. De igual manera, se debe, por un lado, resaltar los mecanismos de unión de tipo bisagra que se utilizan para el acoplamiento (objeto 11 en Figura 1.7 (b)); y, por otro, mencionar que los sensores de carga (objeto 6 en Figura 1.6) se encuentran dentro de las unidades de soporte entre un cilindro y la cabeza de un tornillo.

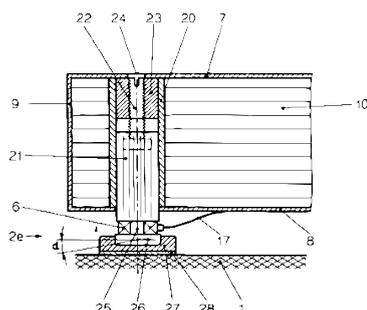


Figura 1.6: Unidad de soporte.

Fuente: [16]

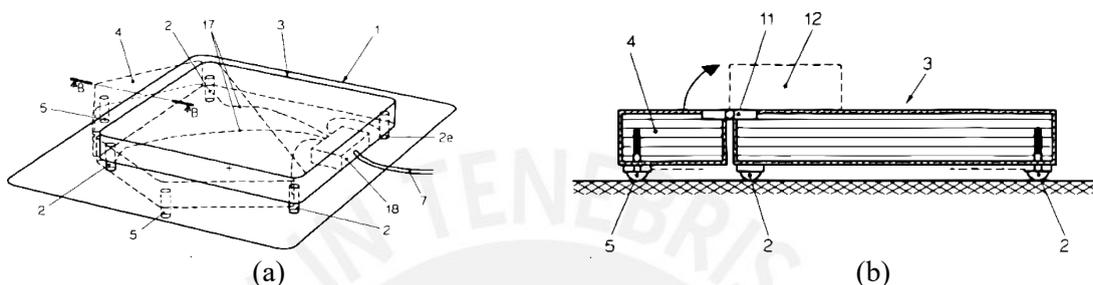


Figura 1.7: (a) Acoplamiento entre estructuras y (b) mecanismo de unión tipo bisagra.

Fuente: [16].

1.3.1.3. Estudios académicos

A continuación, se revisan dos estudios. En la primera, un método indirecto para el cálculo de la potencia mecánica generada por el tren inferior durante el salto vertical. En la segunda, un método alternativo para medir el nivel de fatiga.

Evaluación directa e indirecta de la potencia mecánica con test de salto [17]

El presente experimento se realizó en la Universidad de Castilla-La Mancha con el fin de evaluar los resultados que se obtienen de medir directa e indirectamente el valor de la potencia mecánica máxima durante el CMJ. Para la medición directa se utilizó la plataforma de fuerza Quattro Jump de la empresa KISTLER; y para la medición indirecta, ecuaciones empíricas como las relaciones de Lewis, Harman, Sayers y Shetty, relaciones que se alimentan de variables físicas como la masa y la estatura del usuario. El experimento consistió en medir la potencia mecánica luego de 2 ejecuciones del CMJ empleando los métodos directos e indirectos. Para esto, además, se contó con la participación de 13 voluntarios con valores de masa entre 52 y 74 kg. Los resultados del experimento se muestran en Tabla 1.3, donde se logra calcular la correlación ($r = 0.7842$)

entre la variable potencia y la altura del salto, así como destacar el buen ajuste ($R^2 = 0.915$) entre la potencia que se obtiene con la plataforma y la que se obtiene usando la relación de Sayers.

Tabla 1.3: Valores de potencia obtenido por métodos directos e indirectos.

Sujeto	Masa (kg)	CMJ				
		Altura salto(m)	Potencia plataforma(W)	Potencia Lewis(W)	Potencia Harman(W)	Potencia Sayers(W)
1	73.2	0.204	2721	729.26	2117.42	2687.5
2	59.8	0.439	3691	850.00	3020.35	3159.36
3	62.8	0.255	2329	674.70	1971.42	2325.17
4	70.9	0.421	4187	101.26	3383.38	3708.54
5	61.7	0.344	2735	804.45	2582.49	2867.28
6	69.3	0.377	3251	896.40	2823.21	3219.21
7	56	0.360	2714	731.56	2428.49	2607.34
8	61.4	0.316	2820	758.48	2372.07	2671.58
9	56.9	0.329	2663	713.24	2276.07	2500.69
10	58.8	0.355	2866	761.61	2494.34	2713.83
11	57.3	0.233	2307	618.89	1746.00	2089.38
12	57.8	0.251	2332	647.15	1872.21	2204.75
13	52.8	0.342	2513	678.51	2217.95	2380.46

Fuente: [17].

La altura del salto en contramovimiento como instrumento de control de la fatiga neuromuscular [6]

El artículo científico fue desarrollado en la Universidad de Granada, y tiene como finalidad probar que la altura máxima alcanzada en el salto en contramovimiento puede servir como herramienta para controlar el nivel de fatiga neuromuscular en atletas de diferentes disciplinas. El procedimiento de validación se basó en buscar, en dos bases de datos (*PubMed* y *WebOfScience*), información sobre variables metabólicas utilizadas para medir el nivel de la FN, como el nivel de cortisol en la saliva, el amonio y lactato en la sangre, que presenten alto grado de correlación con la altura máxima alcanzada en el CMJ. Así, se concluyó que, después de una revisión sistemática, la altura del CMJ es una variable fiable tanto para medir el nivel de fatiga a lo largo de una temporada como para medir la fatiga aguda luego de una sesión de entrenamiento, Sin embargo, aún se discute la fiabilidad del método cuando se aplica a deportes con varios periodos de

recuperación. Por esta razón, el artículo recomienda definir un protocolo adecuado para su aplicación. Adicionalmente, se presenta la Tabla 1.4, donde se resumen algunos datos obtenidos posterior a la revisión de las dos bases de datos: en la primera fila, el valor de la correlación inversa entre el CMJ, y el nivel de cortisol en la saliva es aceptable cuando el control de la FN se realiza luego de una temporada competitiva de intensidad media; igualmente, en la última fila, se puede verificar un valor de R^2 aceptable entre el CMJ y el nivel de lactato en la sangre en deportes de alta intensidad.

Tabla 1.4: Correlación entre variables metabólicas y propias del CMJ.

Correlación entre variables metabólicas y propias del CMJ									
ESTUDIO	POBLACIÓN		PROGRAMA				CORRELACIÓN CON CMJ		
	Nivel	Edad (años)	Duración	Intensidad	Días/Semanas	Tipo de sesión	Lactato en sangre	Amonio en sangre	Cortisol en saliva
Balsalobre-Fernandez et al. (2014)	Atletas media y larga distancia	26.3 ± 5	39 semanas	Media	1	Control fatiga poscompetición			r = -0.777
Balsalobre-Fernandez et al. (2014)	Atletas media y larga distancia	27.6 ± 5.1	4 semanas	Media	1	Control fatiga precompetición			r = -0.688
Gorostiaga et al. (2010)	Corredores 400m	23.6 ± 2.7	6 días	Muy alta	6	Alta intensidad intermitente	R ² = 0.68	R ² = 0.51	
Jimenez-Reyes et al. (2016)	Corredores de sprint	23.1 ± 4.4	1 día	Muy alta	1	Entrenamiento de sprint	R ² = 0.96	R ² = 0.95	

Fuente: [6].

1.3.2. Captura de imágenes y reconocimiento de articulaciones

A continuación, se revisa los antecedentes sobre modelamiento corporal. Es decir, en la primera parte se presentan las opciones comerciales disponibles en el mercado; y, en la segunda parte, algoritmos matemáticos aplicados al reconocimiento de pose.

1.3.2.1. Sistemas / Dispositivos comerciales

Kinovea [18]

Kinovea es un *software* que se utiliza para realizar el análisis de variables biomecánicas que se logran extraer de imágenes y videos que corresponden a actividades en el campo del deporte, la medicina y la investigación. Es decir, básicamente, el *software*

inicia con el modelado del cuerpo en el espacio 2D y, mediante algoritmos internos, calcula las magnitudes de las variables cinéticas como la velocidad de desplazamiento de las extremidades, ángulos de flexión de las articulaciones y trayectoria de regiones de interés. A todo esto, se describe las herramientas que componen Kinovea, las cuales permiten tanto optimizar el proceso de observación como realizar mediciones, apuntes capturas y exportación de datos y videos. Al respecto, se optimiza el proceso de observación mediante herramientas de rotación, escalamiento, superposición de video y movimiento lento (*slow motion*). Por un lado, las herramientas de anotación permiten colocar etiquetas textuales, figuras y flechas sobre los *frames* de video. Por otro lado, las herramientas de medición permiten determinar la magnitud de las distancias y ángulos, en el espacio 2D, que se encuentran presentes en los segmentos corporales o en los desplazamientos biomecánicos. De igual manera, las herramientas de adquisición de datos permiten realizar tanto el registro supervisado como programado utilizando una o dos cámaras en simultáneo. Por último, el *software* cuenta con herramientas que permiten la exportación de videos editados y la exportación de archivos en formato *.csv* (*comma-separated values*) con información sobre las mediciones realizadas.



Figura 1.8: (a) Medición ángulo de rodilla en rehabilitación y (b) durante prueba de ciclismo.
Fuente: [18].

Kinect [19]

Kinect es una cámara infrarroja (IRC, por sus siglas en inglés) creada por Microsoft para la consola de juegos Xbox con el objetivo de formar parte del sistema de control de

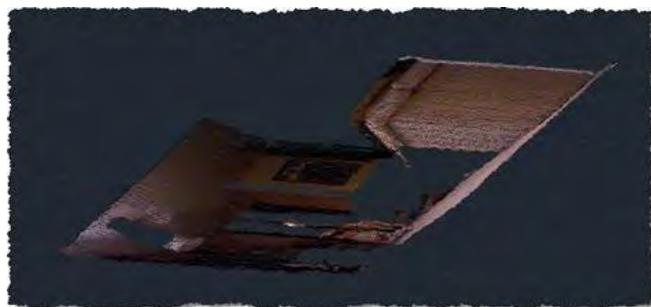
video juegos sin contacto físico. Dicho de otro modo, gracias a la tecnología de la cámara, se puede registrar todos los movimientos del jugador que deriven en las intenciones de control. La cámara se compone de dos elementos: una cámara digital y un módulo emisor-receptor de luz infrarroja (ver Figura 1.9), donde es este último elemento es el que permite reconstruir las figuras registradas por la cámara dentro de un espacio virtual tridimensional. Al respecto de este elemento óptico, el funcionamiento inicia con la emisión de luz infrarroja en la zona frontal a la cámara con el fin de crear un matriz de puntos; luego, el sensor receptivo IR de tipo CMOS espera el retorno de la luz infrarroja para, según el tiempo de retorno, calcular la distancia de separación entre la cámara y los objetos en frente. Así, con esta tecnología se logra reducir considerablemente el tiempo de procesamiento permitiendo el reconocimiento de gestos de manos, posturas del cuerpo del usuario (detección hasta 48 *keypoints* del cuerpo) e identificación de rostros. Finalmente, en la Figura 1.11 (a) y (b) se muestra el caso de una imagen en dos dimensiones y otra, a la derecha, con profundidad.



Figura 1.9: Cámara Kinect para control de Xbox.
Fuente: [19].



(a)



(b)

Figura 1.10: (a) Imagen RGB e (b) imagen con profundidad tomadas por Kinect.
Fuente: [20].

1.3.2.2. Estudios académicos

A continuación, se revisa dos modelos matemáticos entrenados con técnicas de *machine learning* para el reconocimiento de pose a partir de imágenes.

Articulated Pose Estimation via Inference Machines [21]

Este artículo científico describe una estructura de predicción secuencial con el objetivo principal de obtener la ubicación de los segmentos corporales dentro de una imagen. En cada una de las etapas de la secuencia, se intenta conseguir un mapa de confianza para cada parte del cuerpo (*body parts*) y, para ello, cada etapa de la secuencia utiliza como dato de entrada el dato de salida de la etapa anterior. Una de las ventajas de entrelazar salidas con entradas en cada etapa es que se puede evitar cometer el error de doble conteo (dificultad en diferenciar los hemisferios del cuerpo) en la predicción final, ya que al comparar las salidas de los predictores de menor nivel (*level 1* en Figura 1.11 (b)) con los de mayor en cada etapa, se puede eliminar los falsos positivos del estimador de menor nivel. Además, el reporte del modelo señala que este posee un 72 % de precisión luego de ser evaluado con el 50 % de los datos del repositorio LEEDS [21]. Finalmente, el autor garantiza que la construcción del modelo se puede realizar utilizando algoritmos de *machine learning* como las máquinas de soporte vectorial y los árboles de decisión.

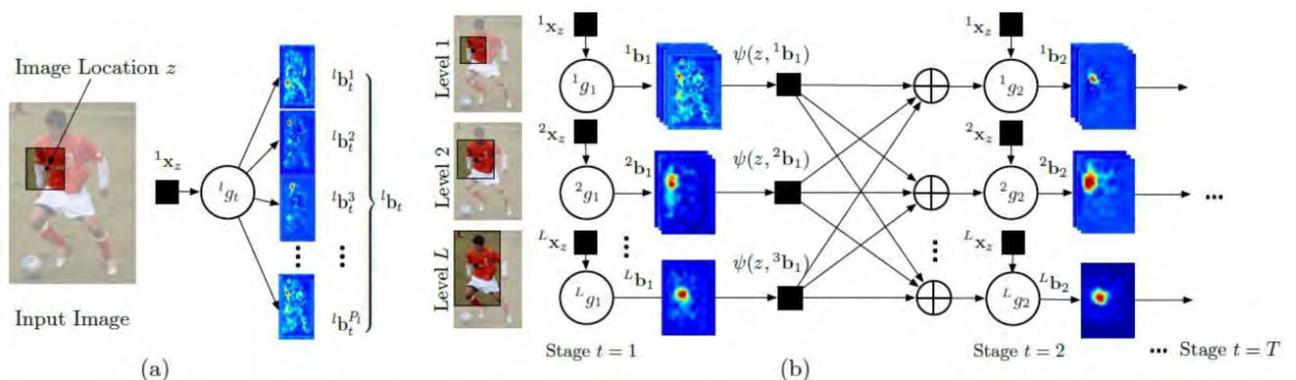


Figura 1.11: (a) Mapas de confianza de regiones del cuerpo y (b) matriz de afinamiento predictivo.
Fuente: [21].

OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields[22]

Open Pose hace referencia a un sistema de predicción de posturas de una o varias personas en tiempo real. El modelo es de código abierto y funciona con base en una representación no paramétrica, que se denomina como *Part Affinity Field* (PAF). Esta técnica busca asociar segmentos corporales directamente con personas o individuos en imágenes y videos. Como se aprecia en la Figura 1.12, el proceso o *pipeline* del modelo de reconocimiento empieza con la imagen entrada de la Figura 1.12 (a); luego, bajo el mismo principio que el apartado anterior, se estima el mapa de confianza para cada parte del cuerpo. Después, en dichas regiones de confianza se estima el PAF con el fin de identificar las direcciones y magnitudes de los segmentos corporales (ver Figura 1.12 (c)) para, posteriormente, emparejar dichos segmentos con sus semejantes y adyacentes. Finalmente, el último proceso se encarga de emparejar los segmentos que aparecen en toda la imagen con el fin de obtener la pose del individuo que se encuentre en la imagen, esto en la Figura 1.12 (e).

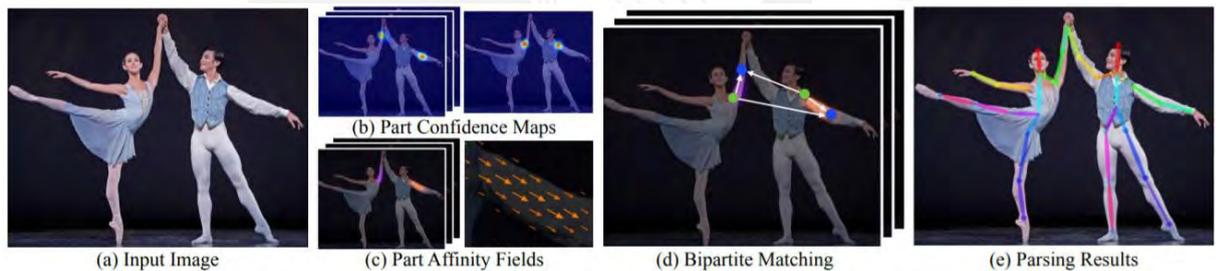


Figura 1.12: Pipeline de modelo de reconocimiento de posturas OpenPose.

Fuente: [22]

14. Requerimientos del sistema mecatrónico

En esta sección se define los requerimientos del sistema mecatrónico que están en función a los objetivos del proyecto, al alcance, al estado del arte y a las necesidades de los interesados. Así mismo, los requerimientos se definen dentro del dominio mecánico, electrónico, procesamiento (*software*) y otros (costo, seguridad, transporte, instalación y operación), y se encuentran acompañados por la terminación “E” o “D”, para indicar exigencia o deseo, respectivamente (ver lista completa de requerimientos en Anexo C).

1.4.1. Requerimiento general

El requerimiento principal debe satisfacer todo lo contemplado en el alcance del proyecto. Respecto al diseño, este debe estar alineado a la fácil accesibilidad de la presente tecnología. Es decir, se debe garantizar que el sistema posea tanto manufactura local disponible y de bajo costo como portabilidad en el diseño para su fácil manipulación.

1.4.2. Requerimientos mecánicos

Los requerimientos mecánicos se describen dentro de los aspectos de geometría, masa, cinemática, materiales, energía, fabricación y mantenimiento.

- Para el subsistema de medición de fuerza se establece que el área ocupada no debe superar los 70 cm²; y la altura, los 25 cm. De la misma manera, el subsistema de captura de imágenes y verificación del CMJ no debe superar los 50 cm² en área ocupada y 150 cm en altura. (E)
- La masa del subsistema de medición de fuerza no será mayor a los 15 kg. Por otro lado, la masa máxima del subsistema de captura de imágenes y verificación del CMJ no será mayor a 600 g. (E)
- El sistema mecatrónico no incluirá partes móviles durante el funcionamiento. (E) Pero sí incluirá para elementos de montaje y desmontaje como elementos retractiles. (D)
- Los materiales mecánicos deben ser rígidos o dúctiles según su aplicación como los materiales que se someten a cargas cíclicas. Además, la parte mecánica debe poder trabajar en condición no mayor a los 40 °C, y la parte electrónica, no mayor a 80 °C. (E)
- Ingreso de energía eléctrica (220 VAC, 60Hz) y presencia de energía mecánica en la entrada de señales físicas y salida de calor en los dispositivos de

procesamiento y proyección. (E)

- Materiales, mano de obra y manufactura disponible en el mercado local. (E)
- Mantenimiento correctivo para el sistema mecatrónico, además, se debe garantizar la obtención de repuestos en el mercado local. (E)

1.4.3. Requerimientos electrónicos y de procesamiento

Los requerimientos electrónicos y de procesamiento consideran los aspectos de energía a baja tensión, sensores, comunicación, señales, interfaz, componentes y software.

- Nivel de tensión no mayor a los 12 VDC dentro de todo el sistema y consumo eléctrico no mayor a 5A. (E)
- Arreglo de sensores de fuerza con capacidad mínima de lectura de 385 kgf y dispositivo de captura de imágenes en alta resolución (HD). (E)
- Comunicación analógica, por cables, entre sensores de fuerza y unidades de amplificación y digitalización, y comunicación digital entre unidades de procesamiento. (E)
- Señal de entrada para encender/apagar el sistema, para manejar un puntero dentro de una lista (subir/bajar) y para seleccionar/cancelar operaciones. Señal de salida para mostrar tanto resultados y etapas de funcionamiento como estados del sistema (ocupado/disponible). (E)
- Proyector visual para mostrar resultados, etapas de funcionamiento y opciones para interacción usuario-sistema, y dispositivo luminoso para indicar el estado del sistema. Además, interruptores ópticos y mecánicos para el ingreso de señales de control (interacción) y de encendido/apagado respectivamente. (E)
- Unidad de almacenamiento para guardar mediciones pasadas y configuraciones propias del sistema mecatrónico. (D)

- Unidad de procesamiento para administrar los estados y las señales de interacción que forman parte del sistema mecatrónico. Unidad de procesamiento para la lectura de las señales de fuerza y cálculo del nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima. Unidad de procesamiento para ejecutar el modelo de reconocimiento de articulaciones y el algoritmo de verificación del CMJ. (E)
- Algoritmo para verificación del CMJ que utilice datos proporcionados por un modelo de reconocimiento de articulaciones. Algoritmo para la transformación de las señales de fuerza que deriven en el cálculo del nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima. (E)

1.4.4. Requerimientos adicionales

Los requerimientos adicionales se definen dentro del aspecto de ergonomía, seguridad, instalación y costo.

- Elementos desmontables con diseño ergonómico que faciliten la manipulación del sistema durante la instalación, funcionamiento y desmontaje. Además, elementos para el ingreso de las señales de control al alcance del usuario y percepción de señales proyectadas a una distancia mínima de 1.5 m. (D)
- Materiales aislantes para reducir riesgo por electrocución. Además, materiales disipadores de calor para evitar riesgo por quemaduras. Para el sistema cumplir el grado de protección para el ingreso de objetos IP31 y extensiones para facilitar la manipulación del sistema. (D)
- Tiempo de instalación menor a 5 minutos. Además, montaje intuitivo y piezas desmontables para instalación. (D)
- El costo en materiales no debe superar los S/ 2500.00. Así mismo, el costo del diseño, fabricación y ensamble no mayor a S/ 5000.00. (E)

2. Diseño conceptual

En el presente capítulo, se realiza el diseño de la estructura de funciones. Luego, se plantea los conceptos de solución para, finalmente, evaluar cada uno dentro del ámbito técnico-económico con el fin de obtener la opción más óptima.

2.1. Estructura de funciones

Para la estructura de funciones, se utiliza bloques para representar las acciones y flechas para los tres tipos de conexión (datos, energía y física). Así mismo, los bloques se clasifican dentro de cinco módulos (interfaz, procesamiento, energía, sensores y mecánica) (estructura completa de funciones en Anexo D).

En la Figura 2.1, se presenta la caja negra (*black box*) con las señales de entrada al lado izquierdo de la figura. Así, se cuenta con la señal seleccionar/cancelar operaciones; subir-bajar, esta última para el manejo de un puntero dentro de una lista; y, el movimiento corporal en CMJ como señales de tipo datos. De igual manera, se cuenta la señal de encendido/apagado del sistema, la energía eléctrica y la fuerza producto del CMJ como señales de tipo energía. El cuerpo del usuario como única señal de tipo físico el cual requiere ingresar al sistema para formar parte del proceso de medición. Como señales de salida, se cuenta con los resultados y las opciones de selección, y el indicador de espera (disponible/ocupado), estas como señales de tipo datos. Finalmente, dentro de las señales de tipo energía se encuentran la luz y el calor; y, el cuerpo del usuario como señal física.



Figura 2.1: Caja negra del sistema mecatrónico de medición del nivel de fatiga.

Fuente: Elaboración propia.

Interfaz

El módulo interfaz permite la interacción entre el usuario y el sistema principal, ya que se encuentra conectado a sus semejantes de procesamiento y energía. Por el lado izquierdo de la Figura 2.2, se aprecia que la interacción con la interfaz se realiza mediante las dos únicas señales de entrada de tipo datos las cuales son detectadas por dos bloques del mismo tipo. Luego, las señales detectadas pasan por un proceso de interpretación con el fin de obtener instrucciones validas que, finalmente, son enviadas al bloque recibir/enviar datos, administrar etapas de funcionamiento. Respecto a este último bloque, es el que se encarga de administrar toda la parte lógica del proceso de medición del nivel de fatiga, esto último a partir de las señales de control transformadas en instrucciones validas; así mismo, es responsable de administrar la emisión de las señales de salida. También es necesario mencionar que se cuenta con una memoria para el almacenamiento de los resultados pasados y los parámetros iniciales que se necesitan para iniciar el funcionamiento del sistema. Finalmente, por el lado derecho se aprecia dos componentes para la proyección de los resultados y la señal de espera, estos últimos como emisores de energía luminosa.



Figura 2.2: Diagrama de bloques del módulo interfaz.

Fuente: Elaboración propia.

Energía

El módulo de energía se encarga de suministrar energía eléctrica a los módulos de interfaz, procesamiento y sensores. Al lado izquierdo de la Figura 2.3, se observa dos señales de entrada de tipo energía: la energía eléctrica y la señal mecánica de

encendido/apagado, donde la primera ingresa a un proceso de acondicionamiento de tensión con el fin de obtener la magnitud requerida por los dispositivos dependientes (para el proyecto se considera que la tensión de trabajo es de 5V DC). Luego, la energía acondicionada pasa por un componente de similar funcionamiento a una “válvula”; es decir, se encarga de permitir el paso de la energía hacia todo el sistema, para lo que se requiere de una señal de activación externa y voluntaria de tipo energía. Finalmente, tanto bloque de acondicionamiento como el de habilitación de energía se encuentran sujetos a un correspondiente bloque del dominio mecánica: el primero, al bloque encargado de proteger la parte electrónica del sistema; y, el segundo, al bloque encargado de proteger a todos los elementos del sistema de medición de fatiga (ver figura 2.3).

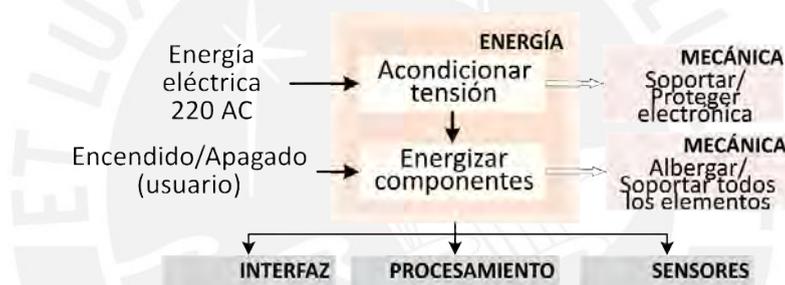


Figura 2.3: Diagrama de bloques del módulo energía.
Fuente: Elaboración propia

Procesamiento

El módulo de procesamiento de la Figura 2.4 se divide en dos etapas: por el lado izquierdo, se presentan los bloques que pertenecen al procesamiento de las señales de fuerza, que inicia con la lectura de las señales de fuerza y culmina en el cálculo del nivel de dispersión de la potencia mecánica; y, por el lado derecho, se encuentran los bloques que pertenecen a las etapas del procesamiento de imágenes, que inician con la lectura de los *frames* de video y culminan con la validación del CMJ. En detalle, las señales de fuerza entrantes pasan por un proceso de discretización; donde, esta última señal pasa por un proceso de atenuación de ruido producto de la adición de señales parasitas. Más adelante, la señal resultante ingresa al bloque convertir señales a fuerza con el propósito

de conseguir valores físicos que representen la fuerza en magnitud. Finalmente, la últimas señales se almacenan y posteriormente se utilizan para calcular la potencia mecánica máxima del CMJ y el nivel de dispersión de este último parámetro luego de una serie de saltos. Por el lado de las imágenes, este inicia con la lectura del video referente al CMJ y con la extracción de los *frames*, donde estos son almacenados dentro de una memoria digital. Una vez con los segmentos de video, se procede con la etapa de detección de las articulaciones del cuerpo dentro del espacio bidimensional. Por último, con la información anterior se procede a validar la ejecución del CMJ considerando dos criterios de aceptación: ángulo de rodilla a 90° y torso vertical, el primero para la fase isométrica y el segundo para la fase excéntrica y concéntrica del salto. Los resultados finales de las dos etapas de procesamiento (fuerza e imágenes) se integran en el bloque validar salto, que verifica la validez de los dos parámetros de entrada con el fin de comunicar al módulo interfaz si el salto es válido y si se debe proyectar y almacenar los resultados. Además, indicar que todo el módulo de procesamiento se encuentra físicamente dentro del bloque soportar/proteger electrónica del dominio mecánica.

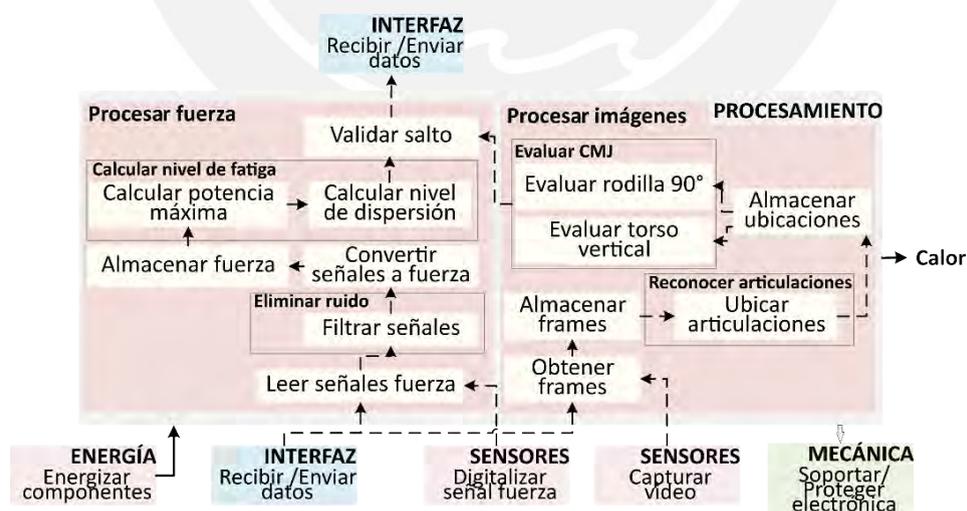


Figura 2.4: Diagrama de bloques del módulo procesamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Sensores

El módulo sensores, que se muestra en la Figura 2.5, se encarga de medir tanto la

fuerza producto del contacto pie-piso como de capturar los *frames* de video referente al CMJ. Para el primer caso, se cuenta con un arreglo de componentes para medir la fuerza pie-piso los cuales se integran al módulo mecánica por medio de sus correspondientes concentradores de fuerza (ver región **arreglo de sensores – concentradores** en Figura 2.5). Luego, cada una de las señales de salida del arreglo de sensores pasa por un proceso de transformación con el fin de obtener una sola señal resultante que represente la fuerza pie-piso captada por todos los componentes de medición. Después, dicha señal ingresa a un proceso de acondicionamiento conformado por una etapa de amplificación y digitalización, respectivamente. Para el caso de las imágenes, el bloque capturar video se encarga de tomar registro de todos los *frames* de video que corresponden al movimiento corporal del usuario durante la ejecución del CMJ, para luego enviar la información registrada hacia el dominio de procesamiento.



Figura 2.5: Diagrama de bloques del módulo sensores.

Fuente: Elaboración propia.

Mecánica

El módulo mecánica de la Figura 2.6 se encarga de soportar y proteger a 4 dominios del sistema principal: interfaz, procesamiento, sensores y energía. Así, dicho modulo se compone de un arreglo de concentradores de fuerza los cuales se encuentran protegidos al contacto con el usuario por un elemento mecánico (proteger arreglo de sensores en Figura 2.6). Además, la parte electrónica del sistema, la cual incluye a todos los dispositivos del módulo de procesamiento y, parcialmente, de la interfaz, energía y sensores, se encuentra sujeto al bloque albergar/soportar elementos del sistema

mecatrónico. Por último, mencionar que el subsistema mecánico que sujeta el dispositivo de captura se encuentra alejado e independiente al dominio mecánico que corresponde al proceso de medición de las señales de fuerza.

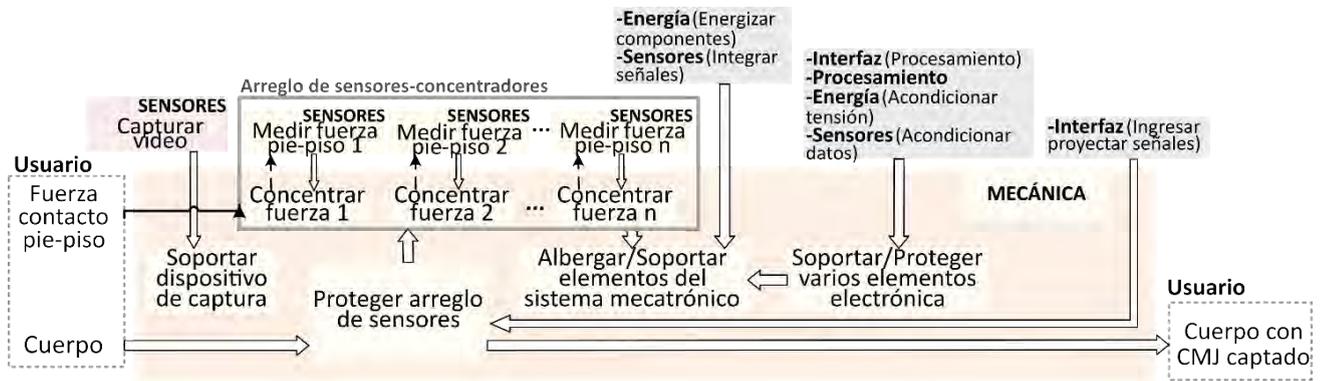


Figura 2.6: Diagrama de bloques del módulo mecánica.
Fuente: Elaboración propia.

22 Matriz morfológica

Luego de definir los cinco dominios en la sección anterior, se elabora la matriz morfológica con el fin de revisar y seleccionar hasta tres opciones disponibles para cada bloque que conforma la estructura completa de funciones (Revisar Anexo D). Después, se procede a integrar las opciones planteadas en tres grupos y, para ello, se procede a utilizar tres guías diferentes las cuales se muestran en la Tabla 2.1. La guía de color azul para la primera opción posible, la naranja y verde para la segunda y tercera respectivamente.

Tabla 2.1: Guías para clasificar conceptos de solución.

Solución	
Concepto de solución 1	
Concepto de solución 2	
Concepto de solución 3	

Fuente: Elaboración propia.

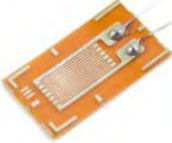
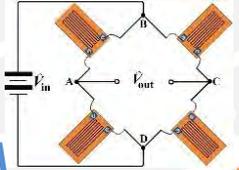
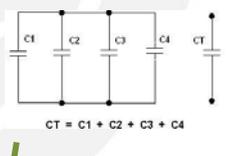
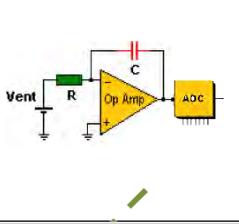
Finalmente, cada columna en la matriz morfológica (ver Tabla 2.2) lleva en el encabezado la abreviación del concepto de solución (CS) seguido del número de identificación.

Tabla 2.2: Matriz morfológica del módulo energía.

Módulo	Función	CS1	CS2	CS3
Energía	Acondicionar tensión	Fuente conmutada 	Transformador lineal AC-DC 	Fuente conmutada ATX 
	Energizar componentes	Interruptor de palanca 	Interruptor basculante 	Pulsador mecánico 

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.3: Matriz morfológica del módulo sensores.

Módulo	Función	CS1	CS2	CS3	
Sensores	Medir fuerza pie-piso	Strain gauge 	Sensor capacitivo 		
	Integrar señales	Puente Wheatstone 	Circuito en paralelo 		
	A condicionar datos	Amplificar señal	Módulo acondicionador 	Amplificador + ADC 	
		Digitalizar señal			
	Capturar video	Cámara infrarroja 	Cámara digital HD 		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4: Matriz morfológica del módulo interfaz.

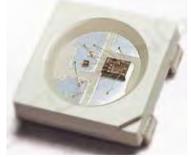
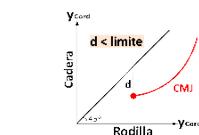
Módulo	Función		CS1	CS2	CS3		
Interfaz	Ingresar señales	Señal 1	Módulo laser 	Módulo ultrasonido 	Módulo IR 		
		Señal 2					
	Procesamiento	Hardware	Interpretar señales de control	Microcontrolador 	Mini ordenador 		
			Recibir/Enviar datos administrar procesos				
		Software	Interpretar señales de control	Lógica de lectura 1 Solo señal 1 (▲) (●) Solo señal 2 (▲) (●) Señal 1 -> Señal 2 (●) (▲) Señal 2 -> Señal 1 (●) (▲)	Lógica de lectura 2 Solo señal 1 (▲) (●) Solo señal 2 (▲) (●) Ambos (●) (▲) Ambos por 3 s (●) (▲)		
			Recibir/Enviar datos administrar procesos	Orientado a objetos Clase 1 Atributos Metodos Clase 2 Atributos Metodos			
	Almacenar resultados y configuraciones		Modulo lector SD 				
	Proyectar señales	Proyectar resultados y opciones	Display LCD 	Display LED 	Display OLED 		
		Proyectar señal de espera	Módulo LED 	Indicador luminoso 			

Tabla 2.5: Matriz morfológica del módulo procesamiento.

Módulo	Función		CS1	CS2	CS3	
Procesamiento	Procesar fuerza	Hardware	Almacenar fuerza	Microcontrolador	Mini ordenador	
			Calcular potencia máxima			
			Calcular nivel de dispersión			
			Validar salto			
		Leer señales de fuerza	Convertir señal a fuerza			Librerías
		Software	Filtrar señales	Filtro media móvil	Filtro FIR	Filtro IIR
			Calcular potencia máxima	Relaciones físicas		
			Calcular nivel de dispersión	Coefficiente de variación		
	Procesar imágenes	Hardware	Evaluar torso vertical	FPGA	Mini ordenador	
			Almacenar frames			
			Ubicar articulaciones			
			Almacenar articulaciones			
			Evaluar rodilla 90°			
Software	Obtener frames	Librerías				
Ubicar articulaciones	PoseNet Model	Open Pose Model				
Evaluar rodilla 90°	Condicion rodilla-cadera					



Módulo	Función		CS1	CS2	CS3	
Procesamiento	Procesar imágenes	Software	Evaluar torso vertical	Condición tobillo-hombro		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.6: Matriz morfológica modulo mecánica.

Módulo	Función	CS1	CS2	CS3
Mecánica	Concentrar fuerza	Reductor de fuerza 	Concentrador plano 	
	Proteger arreglo de sensores	Plataforma 		
	Albergar/Soportar elementos del sistema mecatrónico	Estructura como pirámide trunca 	Estructura cuadrada 	
	Soportar/Proteger varios elementos electrónica	Caja 	Chapa metálica 	
	Soportar dispositivo de captura	Trípode 		

Fuente: Elaboración propia.

23. Conceptos de solución

En el apartado anterior, se obtuvo tres conceptos de solución. A continuación, se procede con la descripción general de dichas opciones, y, de manera gráfica, se presenta un boceto a mano alzada que representa la integración de los elementos.

2.3.1. Concepto de solución 1

La parte mecánica del primer concepto de solución se compone, principalmente, de un conjunto de estructuras que juntas configuran una plataforma en forma de pirámide trunca y, también, de un trípode que sujeta la cámara infrarroja (ver Figura 2.7). Los componentes de interacción del dominio de la interfaz, como la pantalla LED y el indicador luminoso, se encuentran sobre la superficie de la plataforma. Adicionalmente, al costado de estos componentes de proyección se ubican los dos módulos lectores de ultrasonido con el fin de facilitar el ingreso de las señales de control mediante la detección del pie del usuario. Los componentes del dominio de energía y procesamiento se encuentran dentro de la plataforma y sujetos a una chapa metálica doblada. Así mismo, el interruptor de palanca que pertenece al módulo energía es el único componente que se ubica en una de las caras laterales externas de la plataforma y sirve para habilitar el ingreso de la energía acondicionada y, además, energizar a todos los componentes del sistema. Sobre los componentes del dominio de sensores, cada conjunto transductor-concentrador de fuerza se ubica entre la estructura superior que protege los sensores del contacto directo con los pies del usuario y la estructura trunca. Finalmente, la cámara infrarroja se encuentra sobre un trípode y sujeta al cabezal del mismo.

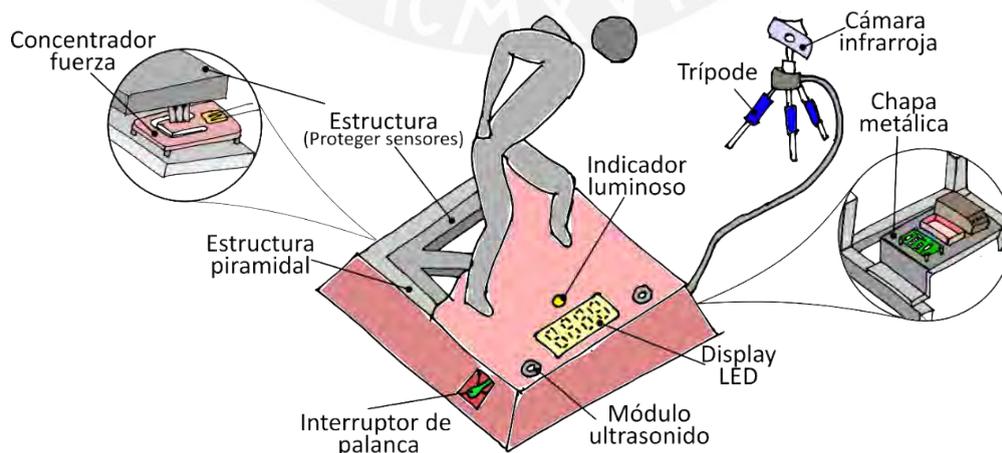


Figura 2.7: Concepto de solución 1.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Concepto de solución 2

La parte mecánica del segundo concepto de solución se compone de un trípode y de un conjunto de estructuras que juntas conforman una plataforma ortoédrica, como se muestra en la Figura 2.8. Los componentes de proyección (pantalla LCD) y lectura de señales de control (módulos infrarrojos) del dominio interfaz se ubican sobre la superficie de la plataforma superior, la ubicación de estos componentes de interfaz con el fin de controlar el sistema con los pies del usuario. Sobre el dominio de energía y procesamiento, todos los componentes de procesamiento y, únicamente, la fuente de poder del dominio energía dentro de la caja electrónica, esta última dentro de la plataforma. Los componentes del dominio sensores, como el arreglo de transductores y concentradores de fuerza de tipo plano, se encuentran debajo de una estructura cuadrada que protege, principalmente, a los concentradores de fuerza del contacto directo con el usuario durante el CMJ. Finalmente, la cámara digital se ubica sobre un trípode y sujeta al cabezal de este elemento.

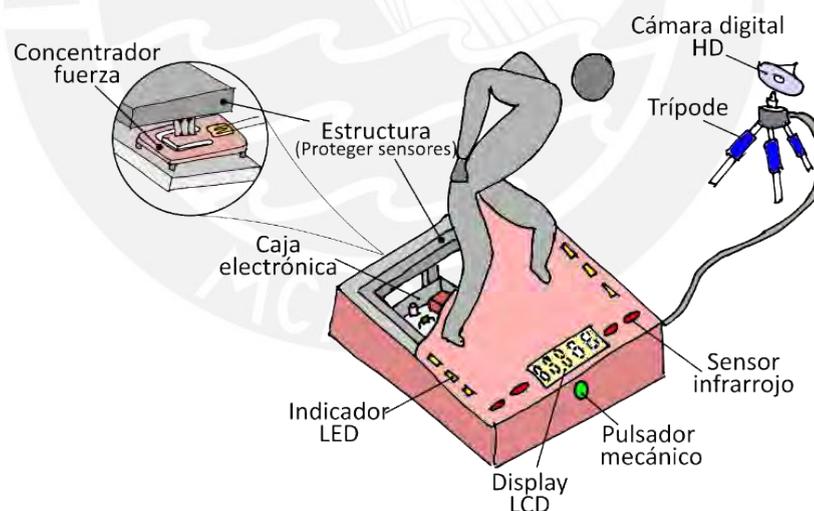


Figura 2.8: Concepto de solución 2.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Concepto de solución 3

La parte mecánica del concepto de solución 3 se compone de un trípode y de un conjunto de estructuras que juntas conforman una plataforma ortoédrica (ver Figura 2.9). Respecto al módulo interfaz, los componentes de proyección, como la pantalla OLED y

los módulos LED, se ubican sobre la estructura cuadrada. El primero está al centro y a un extremo de la plataforma; y el segundo, alrededor de la superficie. Así mismo, el módulo de lectura láser se ubica en los laterales de la superficie; el componente emisor, a un costado; y el receptor, a su otro extremo, con el fin de captar las señales de control mediante la interrupción del haz de luz láser con el pie del usuario. Los componentes del dominio energía y procesamiento se ubican tanto al interior de la plataforma como al exterior de esta. Por ejemplo, el interruptor basculante, que habilita el paso de la energía acondicionada al sistema, se ubica en la cara exterior frontal de la estructura cuadrada. De igual forma, la fuente de poder del dominio de energía y todos los elementos que forman parte del dominio de procesamiento se ubican sobre una chapa metálica que se encuentra sujeta internamente a la estructura de la plataforma. Sobre el dominio sensores, el arreglo de transductores y reductores de fuerza se encuentran debajo de una estructura cuadrada que los protege del contacto directo con el pie del usuario durante el desarrollo del CMJ. Además, se debe mencionar que los reductores de fuerza se encuentran pivotados en uno de sus extremos con el fin de dividir la fuerza captada durante el CMJ en mayor proporción en la zona pivotada y en menor proporción sobre los sensores capacitivos. Finalmente, la cámara digital se ubica encima de un trípode y sujeta al cabezal de este mismo elemento.

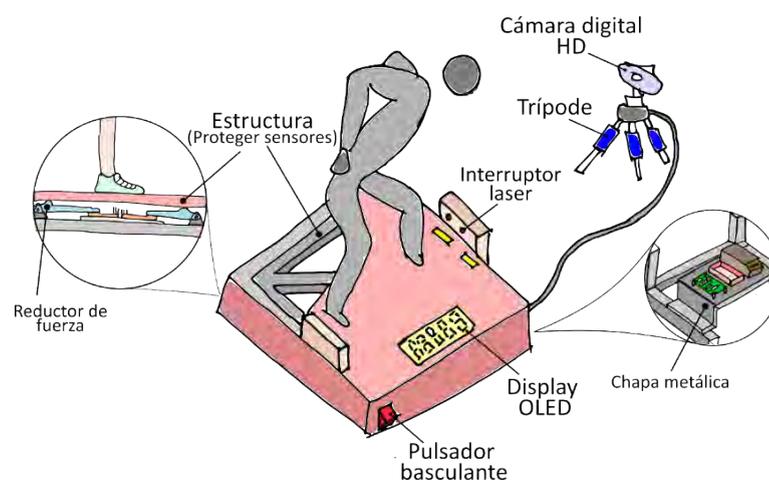


Figura 2.9: Concepto de solución 3.
Fuente: Elaboración propia.

24 Evaluación técnico-económica

Para cada concepto de solución se realiza la evaluación técnico-económica según la recomendación VDI2225. En la Tabla 2.7, se presenta la evaluación técnica de los tres conceptos de solución propuestos, por lo que se considera 8 criterios de evaluación con distintos pesos. Estos últimos valores están definidos, principalmente, en función a los requerimientos del proyecto (exigencia o deseo). De la misma manera, en la Tabla 2.2, se presenta la evaluación económica considerando 3 criterios de evaluación. El proceso de calificación se desarrolla asignando un puntaje para cada criterio en el rango de 0 a 4. Luego, se realiza la suma de todos los valores que se obtienen del producto entre puntaje asignado y el peso del criterio para definir la valoración del concepto de solución. Al final, se compara este último valor con el caso ideal: puntaje de 4 para todos los criterios.

2.4.1. Evaluación técnica.

En la Tabla 2.7, se muestra la evaluación técnica donde se puede observar que el valor técnico X_i del concepto de solución 2 es el que se aproxima más al ideal. Además, la asignación de pesos de los criterios de evaluación se define en función al nivel de exigencia que se indica en la lista de requerimientos. Es decir, los criterios de la función principal, geometría, fabricación y mantenimiento poseen un peso de 4 por ser requerimientos **obligatorios**. Por otro lado, respecto a los criterios que poseen un peso de 3, como el de ergonomía y estabilidad mecánica, se debe a que cada uno se encuentra conformado tanto por un requerimiento de nivel **obligatorio** como de **deseo**. Todos los criterios restantes se definen con un peso de 2 por ser de nivel **deseo**.

Tabla 2.7: Evaluación técnica.

Diseño mecatrónico - Evaluación Técnica Valor Técnico (X_i)
Proyecto: DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO
Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos

<p>p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225) 0 = No satisface, 1 = Apenas satisface, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Excelente (Ideal) g: peso ponderado según los requerimientos del proyecto 4 = Muy importante, 3 = Importante, 2 = Poco importante</p>											
Conceptos de Solución			CS1			CS2		CS3		CS Ideal	
N°	Criterio de Evaluación	g	p	p*g	p	p*g	p	p*g	p	p	
1	Función Principal	4	3	12	3	12	3	12	4	16	
2	Forma (geometría)	4	2	8	3	12	3	12	4	16	
3	Seguridad	2	3	6	3	6	2	4	4	8	
4	Ergonomía	3	3	9	3	9	3	9	4	12	
5	Estabilidad mecánica	3	3	9	3	9	2	6	4	12	
6	Fabricación	4	2	8	3	12	3	12	4	16	
7	Montaje	2	2	4	2	4	2	4	4	8	
8	Mantenimiento	4	3	12	3	12	2	8	4	16	
Puntaje Máximo $\Sigma p*g$				68		76		67		104	
Valor técnico Xi			0.65		0.73		0.64				
Orden			2		1		3				

Fuente: Elaboración propia

2.4.2. Evaluación económica

En la Tabla 2.8, se observa que el valor económico Y_i del concepto de solución 2 posee mayor puntaje. Además, los pesos de los criterios de evaluación se definen en función a los presupuestos fijados en la parte de costos de la lista de requerimientos. Por ejemplo, el peso de 3 para el costo de componentes se debe a que se asignó un mayor presupuesto a este criterio, lo que permite revisar elementos con distintos costos. Caso contrario sucede con el criterio de fabricación que posee un peso de 4, hecho que se debe al bajo presupuesto asignado. Por último, se asigna un peso de 2 al criterio de mantenimiento por ser un proceso correctivo, lo que permite una cierta holgura en los costos que involucren el proceso de mantenimiento.

Tabla 2.8: Evaluación económica.

Diseño mecatrónico - Evaluación Económica Valor Económico (Y_i)											
Proyecto: DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO											
Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos											
<p>p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225) 0 = No satisface, 1 = Apenas satisface, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Excelente (Ideal) g: peso ponderado según los requerimientos del proyecto 4 = Muy importante, 3 = Importante, 2 = Poco importante</p>											
Conceptos de Solución			CS1			CS2		CS3		CS Ideal	
N°	Criterio de Evaluación	g	p	p*g	p	p*g	p	p*g	p	p*g	
1	Costo de componentes	3	2	6	3	9	3	9	4	12	

2	Costo de mantenimiento	2	3	6	3	6	2	4	4	8
3	Costo de fabricación	4	2	8	3	12	2	8	4	16
Puntaje Máximo Σp^*g				23		27		21		36
Valor económico Y_i			0.6		0.75		0.6			
Orden			2		1		2			

Fuente: Elaboración propia.

25. Selección del concepto de solución óptimo

Con la información de la Tabla 2.7 y la Tabla 2.8, se obtiene la gráfica valor técnico Vs. valor económico tal como se muestra en la Figura 2.10.

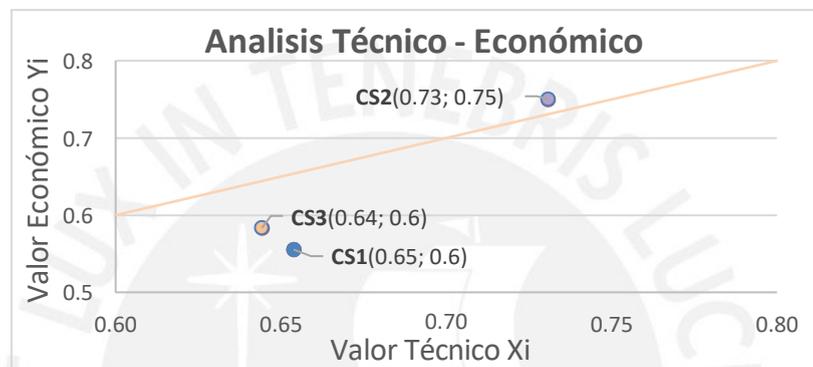


Figura 2.10: Gráfica valor técnico Vs. Valor económico.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los conceptos de solución que se encuentran más cerca al concepto ideal (pares sobre función identidad) son el segundo y el tercero. De estos dos últimos, el segundo se encuentra a una distancia 0.014 y el tercero a 0.028 respecto a la línea identidad. Entonces, se concluye que el diseño del sistema mecatrónico que se desarrolla en los capítulos posteriores será sobre la base del concepto de solución 2.

3. Diseño del sistema mecatrónico para medir el nivel de fatiga neuromuscular

En este capítulo se desarrolla el diseño del concepto de solución óptimo abordando el dominio mecánico, eléctrico, interfaz y de procesamiento. Inicialmente, se describe la integración general del sistema mecatrónico; luego, se revisa el diseño mecánico, que incluye algunos cálculos principales, simulaciones CAE y la descripción de los planos de ensamble y subensamble. Más adelante, se desarrolla el diseño eléctrico-electrónico mediante la elaboración del diagrama de bloques, selección de componentes y se concluye con los diagramas esquemáticos. Finalmente, se trata el diseño del *software* para el conjunto interfaz-procesamiento mediante diagramas de flujo, y se define tanto los algoritmos involucrados en el procesamiento de las señales de fuerza como los de verificación del CMJ.

3.1. Integración del sistema mecatrónico para medir el nivel de la fatiga neuromuscular

En la Figura 3.1, se muestra la vista externa del sistema mecatrónico integrado con los 3 componentes principales que forman parte del proceso de medición de la FN: **usuario, plataforma y trípode de captura de imágenes**. Al respecto, la **plataforma** forma parte del proceso de medición de la fuerza y también se encarga de albergar los componentes del dominio interfaz, procesamiento, energía, mecánica y, parcialmente, sensores. Para esto, la plataforma se compone de dos partes: **estructura superior** y **estructura base**. La primera de ellas, además de sujetar los componentes de interacción usuario-máquina que pertenecen al dominio de la interfaz, es la que entra en contacto con los pies del usuario durante el desarrollo del CMJ y, en efecto, transmite las reacciones hacia los concentradores. Sobre la estructura base, está sujeta el arreglo de celdas de carga y la caja electrónica, que alberga internamente todos los componentes que pertenecen al dominio de procesamiento, la unidad MCU (Microcontroller Unit) del dominio de

interfaz, el módulo acondicionador de amplificación y digitalización de señales analógicas de fuerza HX711 del dominio de sensores y la fuente de poder de 5V del dominio de energía. Finalmente, el **trípode de captura de imágenes** se compone de una cámara digital montada sobre el cabezal de un trípode, este último permite que la cámara se encuentre a 102 cm sobre el nivel del suelo.

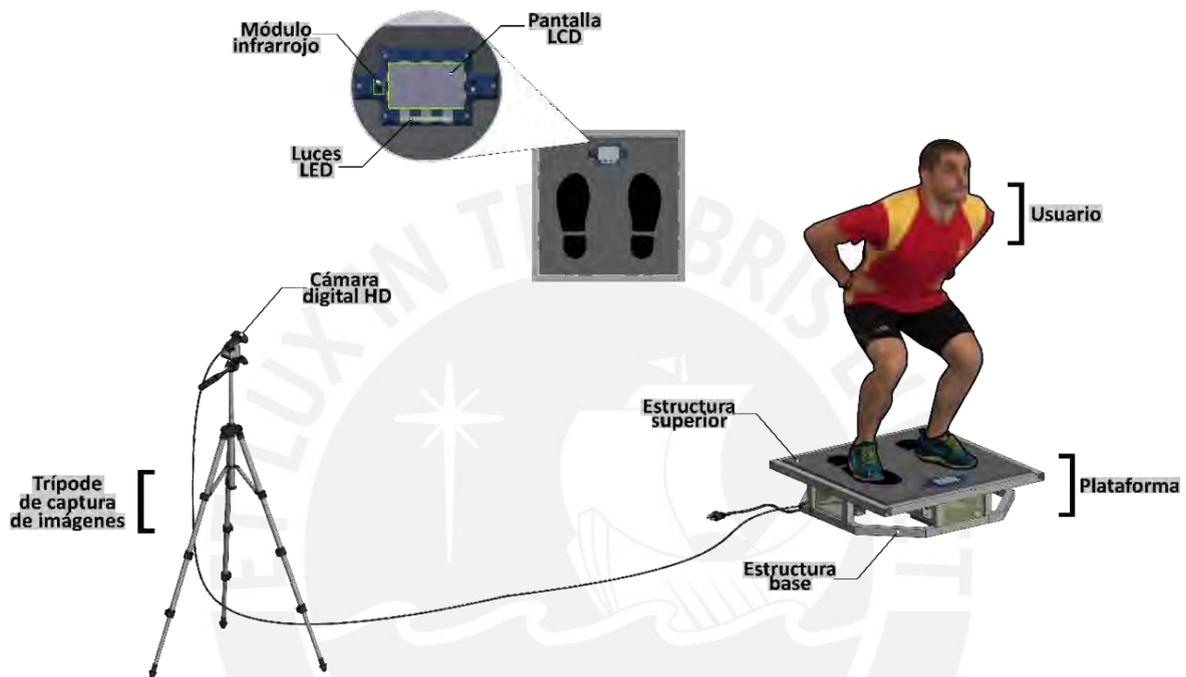


Figura 3.1: Integración del sistema mecatrónico principal.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.2, se muestra la configuración de los elementos sujetos a la estructura base. Por ejemplo, las celdas de carga se encuentran ubicadas simétricamente y de forma octogonal alrededor de la estructura en mención. Luego, la caja electrónica, la que se ubica a la altura y por debajo de la pantalla LCD, se encuentra sujeta a dos tubos cuadrados de $\frac{3}{4}$ " que forman parte de la estructura base, agregar que la chapa metálica es de 1 mm de espesor. Finalmente, el interruptor mecánico ON-OFF, para habilitar la energía hacia el sistema, se encuentra en uno de los vértices externos de la estructura base.

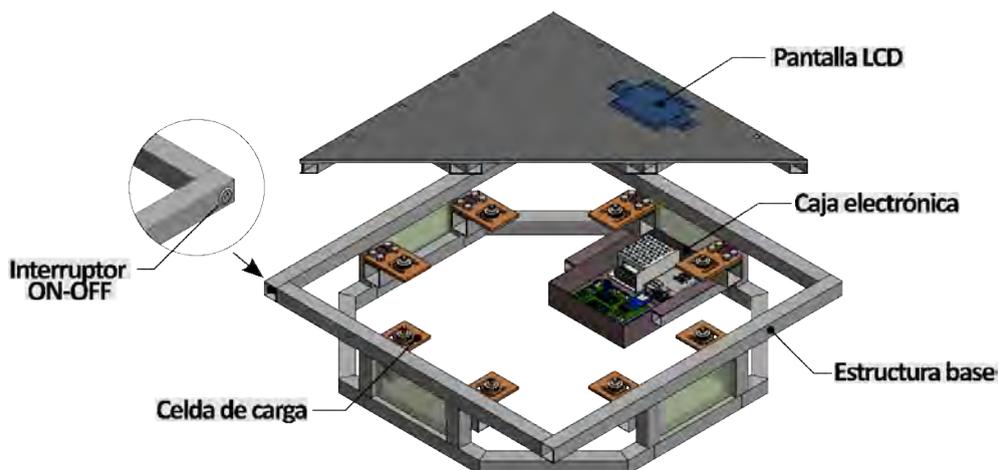


Figura 3.2: Configuración de elementos de la estructura base.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.3, se muestra detalladamente la ubicación de los elementos que pertenecen a la caja electrónica, la misma que es fabricada con chapas metálicas y se encuentra compuesta por tres partes: **fuelle de poder, placa impresa (PCB)** y **mini-PC**. La PCB sujeta tanto la unidad MCU del dominio procesamiento como el de la interfaz, el módulo acondicionador HX711 y el módulo lector de memoria SD. Sobre la mini-PC, se propone utilizar una Raspberry Pi 4, que incluye su propio *case* de fábrica. Por último, se encuentra la fuente de energía conmutada, que se sostiene a la caja electrónica por medio de la propia cubierta de aluminio.

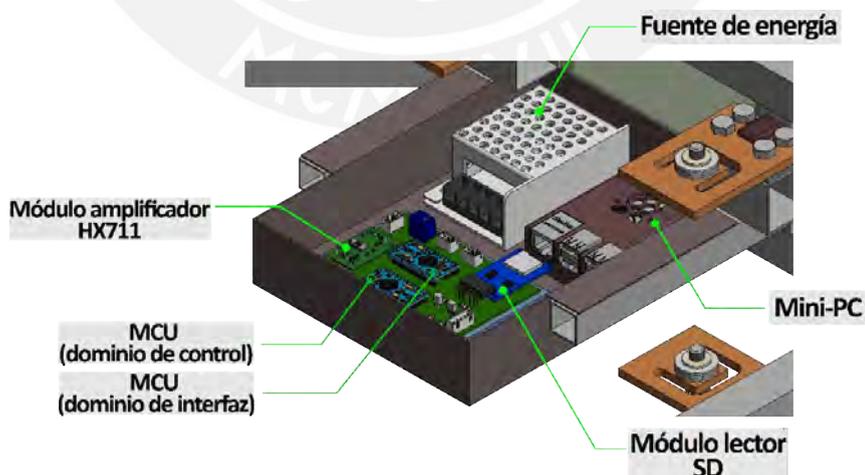


Figura 3.3: Configuración de elementos en caja electrónica.

Fuente: Elaboración propia.

A toda la etapa de integración abordada, se torna necesario agregar la descripción del funcionamiento del sistema el cual puede ser revisado en Anexo F.

32 Diseño mecánico

En la presente sección, se revisa el diseño mecánico para el sistema de medición del nivel de fatiga. Inicia definiendo los conceptos previos como la mecánica involucrada en el CMJ; luego, se revisa el diseño de la plataforma (zona de impacto); continua con el análisis mecánico del conjunto sensor-concentrador de fuerza. Finalmente, se procede con la selección del trípode y se presenta los planos de ensamble.

3.2.1. Consideraciones previas

Se logra revisar las condiciones iniciales para el diseño de la plataforma de fuerza. Luego, se analiza la capacidad de medición requerida por los sensores y se procede con la selección del dispositivo. Sigue, la revisión de materiales para la plataforma de fuerza.

Análisis del sistema ante cargas dinámicas

Al analizar el desarrollo de la fuerza vertical que se produce entre el pie del usuario y el piso durante en el CMJ (ver Figura 3.4), se observa que el comportamiento de la fuerza es dinámico, donde el máximo ocurre durante la fase concéntrica y el aterrizaje; y el mínimo, durante la fase excéntrica y el vuelo. Entonces, se concluye que las piezas intermedias que forman parte de la transmisión de cargas hacia los concentradores de fuerza deben ser analizadas ante fallas por cargas cíclicas pulsantes (fatiga).

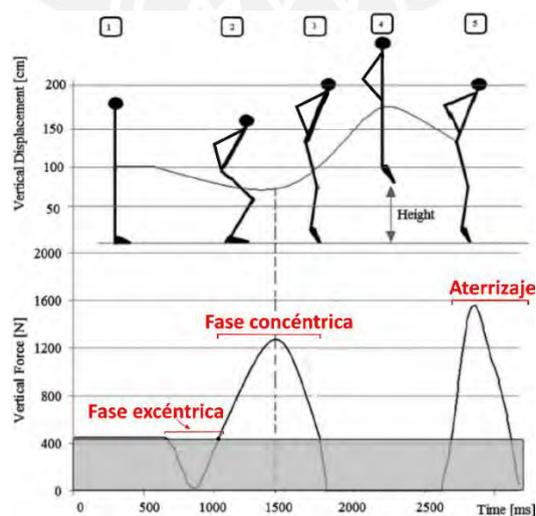


Figura 3.4: Desarrollo estándar de la fuerza vertical vs. tiempo durante CMJ.

Fuente: [23].

De igual manera, en la figura anterior, se puede evidenciar el desarrollo irregular de la fuerza vertical del CMJ, donde se corrobora que la fuerza máxima del aterrizaje supera al de la fase concéntrica. Entonces, para facilitar el análisis de las piezas mecánicas ante fallas por cargas oscilantes, resulta práctico aproximar un ciclo regular y, para ello, se propone un nuevo modelo donde la fuerza vertical oscile entre la fuerza máxima de aterrizaje y la mínima igual a 0 kgf. Así, con la ayuda del artículo [24], se define la fuerza relativa máxima durante el aterrizaje la cual es en promedio 4.5 veces el peso del usuario (85 kgf de peso máximo permitido sobre el sistema). Con lo anterior, se obtiene un modelo regular que oscila entre los 0 y 382.5 kgf (ver Figura 3.5).

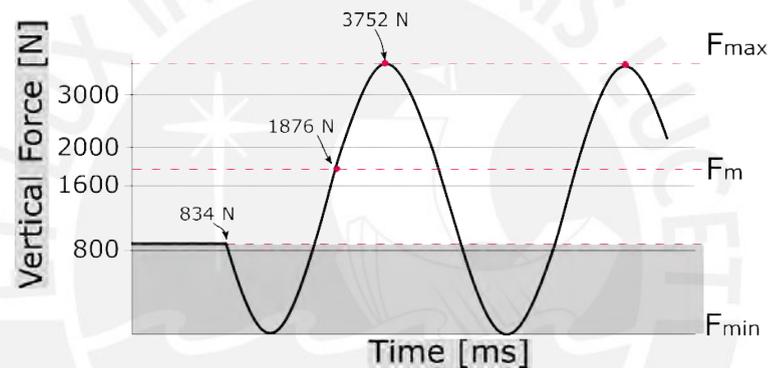


Figura 3.5: Modelo regular aproximado para desarrollo de fuerza vertical del CMJ.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez con el modelo regular, es necesario localizar la zona de aplicación de fuerzas sobre la plataforma. Así, inicialmente, se considera que estas se localizan idealmente en el punto de apoyo de cada pie y, para obtener la distancia de separación de estos puntos, se revisa la investigación [25] donde se concluye que la distancia estándar entre los pies que reduce las fuerzas horizontales sobre la superficie de contacto pie-piso debe encontrarse en el rango de 16.5 ± 3.8 cm. Luego, también es importante ubicar el centro de presión en la zona plantar (COP, por sus siglas en inglés) que permita obtener la distancia de cada punto de apoyo respecto al eje transversal horizontal de la plataforma. De esta manera, según la Tabla 3.1, la presión máxima se distribuye en mayor proporción entre el talón y el metatarso, donde la primera abarca la mayor región.

Tabla 3.1: Distribución óptima de la presión plantar de una persona promedio.

Región Anatómica	Distribución de presión(%)
Talón medio	29.99
Talón lateral	28.7
Zona central media	1.4
Zona lateral media	6.4
Primer metatarsal	5.6
Segundo metatarsal	8.4
Metatarsal lateral	15.91
TOTAL	96.4

Fuente: Adaptado de [27].

Con los datos anteriores, se obtiene la ubicación aproximada de las fuerzas verticales pie-piso que pertenecen al modelo regular de la Figura 3.5, donde la distancia de separación entre ellas es de 16.5 cm, y ambas están ubicadas a una distancia igual a 0.175 veces el largo del pie promedio (26.67 cm [28]) del eje transversal que pasa por el centro de la plataforma, como se muestra en la Figura 3.6.

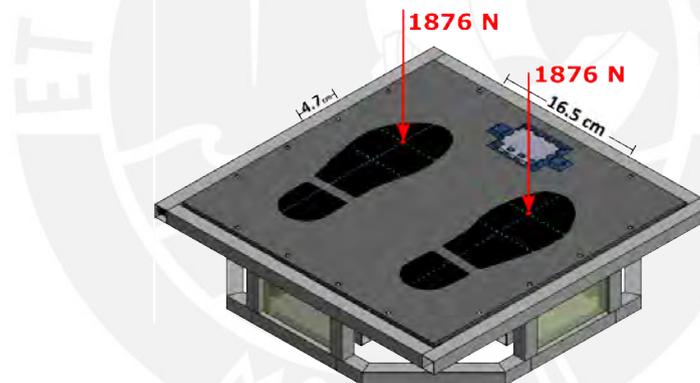


Figura 3.6: Ubicación de fuerzas sobre plataforma.
Fuente: Elaboración propia.

Capacidad de sensado para transductor de fuerza

Como se revisó en el estado del arte, de manera particular, la plataforma INFINI∞T cuenta con 4 sensores de fuerza. En ese sentido, para el presente proyecto resulta conveniente contar con un número igual o mayor a este donde, finalmente, el conjunto debe garantizar la lectura de todo el rango de fuerzas que se mencionan en la Figura 3.11. Es decir, valores de fuerza que van desde los 0 N hasta los 3752 N. Por ello, se propone contar con 8 sensores para el diseño de la plataforma donde la capacidad requerida de sensado para cada transductor (F_{sensor}) se define como la división entre la máxima

fuerza vertical producida durante el aterrizaje (**F_{Max}**) y el número de transductores (**N**). De igual manera, se considera un factor de seguridad de 1.04 para el diseño con el fin de garantizar las mediciones requeridas. Todo lo anterior se plasma en la ecuación 3.1.

$$F_{sensor} = 104\% \cdot \left(\frac{F_{Max}}{N} \right). \quad (3.1)$$

Entonces, el resultado, luego de evaluar los datos de diseño en la relación 3.1, indica que cada transductor debe ser capaz de medir magnitudes de fuerza que no superen los 490 N o 50 kgf, sin presentar signos de saturación.

Selección y ubicación de sensores de fuerza

El sensor de fuerza seleccionado forma parte de una celda de carga fabricada por la empresa *Vishay Precision Group* modelo 380 que, además, integra un concentrador de fuerza de tipo plano. La selección de esta celda se debe a la disposición de modelos con distintas capacidades de sensado y al tipo de concentrador que es ideal en aplicaciones como balanzas dentro del ámbito médico y deportivo. Otra de sus ventajas es su reducido volumen ($24.6 \pm 17.8 \text{ cm}^3$), geometría para un fácil ensamblaje y material de aluminio resistente a la corrosión. Finalmente, se propone que la distribución de las celdas de carga, dentro de la estructura base, siga un formato octogonal (ver Figura 3.7), donde la distancia de separación entre cada agujero adyacente de ensamblaje es de 181.6 mm.

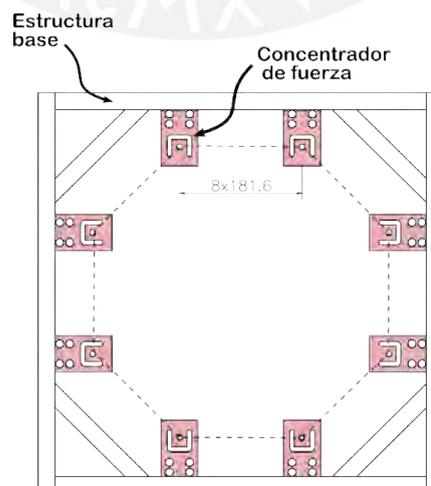


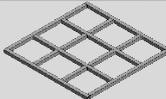
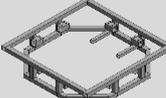
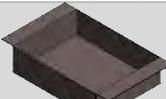
Figura 3.7: Ubicación de concentradores de fuerza en estructura base (vista horizontal).

Fuente: Elaboración propia.

Selección de materiales para elementos de la plataforma

Los elementos que componen la plataforma de fuerza se describen en la Tabla 3.2. Así mismo, se detalla los requerimientos para el tipo de material de cada elemento. Por ejemplo, la chapa que entra en contacto con los pies del usuario requiere que sea de un material rígido con la finalidad de que las fuerzas captadas producto del CMJ no sean disipadas por la deformación del material. También se requiere que sea de baja densidad con el fin de que el peso tara no influya considerablemente en las mediciones. Por otro lado, tanto la estructura superior como la base requieren adoptar geometrías que se adapten al criterio del diseñador, por ello, se propone utilizar perfiles de acero estructural, que son ideales por su capacidad de adaptarse entre ellos mediante la unión por soldadura y, además, destacan por ser fácilmente mecanizables mediante procesos como el taladrado, roscado, doblado, etc. Finalmente, todos los criterios de selección y los materiales que se tomarán en cuenta para el diseño, se pueden revisar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Selección de materiales para elementos de plataforma de fuerza.

Elemento		Requerimientos	Material seleccionado
Estructura superior		<ul style="list-style-type: none"> - Manufactura accesible - Adaptabilidad (fácil ensamblaje) - Tenacidad 	Acero ASTM A1008
Estructura base			
Chapa de contacto pie-piso		<ul style="list-style-type: none"> - Liviano (baja densidad) - Rígido (resistente a impactos) 	Polipropileno (PP)
Platina como tuerca		<ul style="list-style-type: none"> - Dúctil (resistente a vibraciones) - Fácil mecanizado - Alta resistencia a la tracción 	Acero ASTM A1008
Platina para sujetar concentrador de fuerza			
Mascara para interfaz		<ul style="list-style-type: none"> - Manufactura accesible - Dureza (resistente a ralladuras) - Rígido (resistente a impactos) 	Termoplástico ABS
Caja electrónica		<ul style="list-style-type: none"> - Conformado accesible - Adaptabilidad (fácil ensamblaje) 	Acero ASTM A1008

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Plataforma

En la presente sección, se analiza ante fallas las piezas mecánicas más importantes que se encuentran directamente relacionadas con las cargas verticales que se generan sobre la plataforma. Ejemplos de estos elementos son la chapa de contacto pie-piso y los que forman parte de la unión entre la estructura superior, el concentrador de fuerza y la estructura base. Además, se debe mencionar la ausencia del análisis de la estructura base por encontrarse en condiciones de hiperestaticidad.

3.2.2.1. Estructura superior

La presente sección abarca, únicamente, el análisis mecánico para el conjunto de elementos ubicados en la parte superior de la plataforma (zona de impacto): análisis de deflexión y esfuerzos para piezas mecánicas y cordones de soldadura.

Análisis a la deflexión

Para el análisis a la deflexión de la estructura superior, se emplea el método por elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), que utiliza el modelo 3D del ensamblaje de la estructura superior como argumento de entrada. Este ensamblaje debe incluir a la chapa de polipropileno, la estructura de acero ASTM A1008 y las 8 platinas del mismo material las cuales funcionan como tuercas en la unión roscada entre la estructura superior y los concentradores de fuerza (ver Figura 3.8 (b)). Luego, las dos fuerzas de 1876 N sobre la chapa pie-piso y las regiones roscadas de las platinas como áreas fijas forman parte de las condiciones de borde del método FEM.

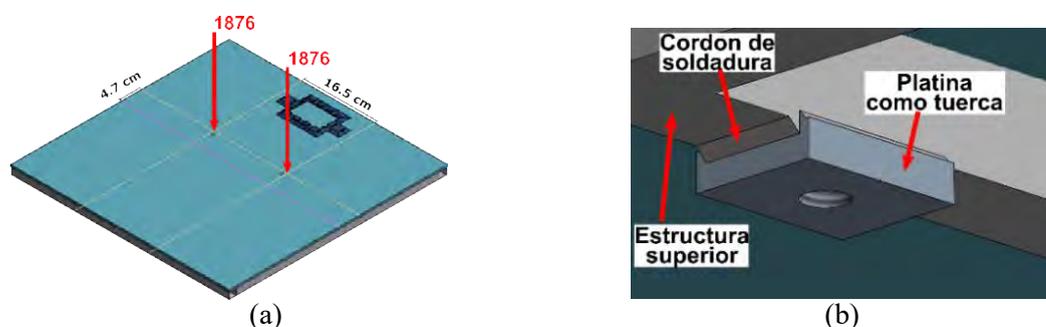


Figura 3.8: (a) Modelo 3D para análisis FEM (b) Unión estructura superior-platina.

Fuente: Elaboración propia.

La propiedad de los materiales de la estructura superior en la siguiente tabla.

Tabla 3.3: Propiedades de los materiales de la estructura superior.

	ASTM A1008	Polipropileno(PP)
Módulo de elasticidad (GPa)	205	1
Coefficiente de Poisson (ν)	0.28	0.45
Densidad (kg/m³)	7870	900

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 3.9, se muestran los resultados de la simulación que se ejecutó utilizando un mallado tetraédrico compuesto por 99900 elementos y 31900 nodos. Al lado izquierdo de cada simulación, se muestran los resultados tanto de esfuerzos como de deflexión, respectivamente.

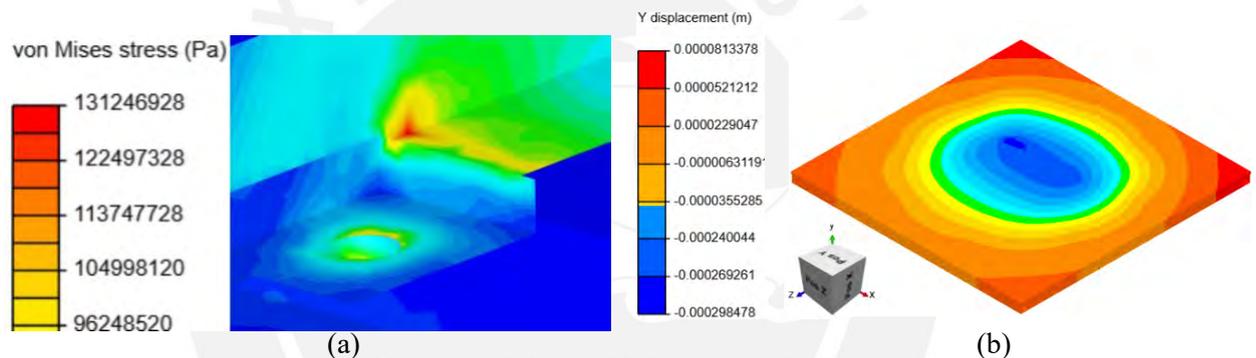


Figura 3.9: (a) Zona de esfuerzo máximo, (b) deflexión vertical de estructura superior.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, según los resultados, se concluye que la deflexión máxima de la estructura superior alcanza los 0.3 mm. De la misma manera, el esfuerzo máximo de Von Misses alcanza los 131.25 MPa en la zona de unión entre la platina como tuerca y la estructura de tubos, esfuerzo que permitirá el diseño del cordón de soldadura.

Cálculo de cordón de soldadura para unión estructura superior – platina como tuerca

El cálculo del cordón de soldadura se realiza para la junta tipo T entre la estructura superior de tubos cuadrados y la platina como tuerca (ver Figura 3.8 (b)). Con el objetivo de calcular la altura del cordón, se procede a hallar un momento equivalente M con dirección y sentido a la parte negativa del eje Y, tal como se muestra en la Figura 3.10.

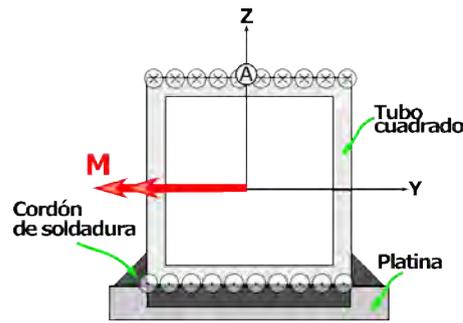


Figura 3.10: diagrama de cuerpo libre para zona de unión tubo cuadrado – platina.
Fuente: Elaboración propia.

Entonces, por medio de la ecuación 3.2 para el caso de flexión, se procede a calcular el momento equivalente M .

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3.2)$$

Si se reemplazan las variables de la ecuación 3.2 por el valor del esfuerzo máximo obtenido en la simulación FEM ($\sigma_{\max} = 132 \text{ MPa}$), la distancia de la zona más alejada al centroide del tubo cuadrado ($c = 9.6 \text{ mm}$) y el momento de inercia del mismo elemento ($I = 3932.6 \text{ mm}^4$), se obtiene que el valor del momento equivalente M es igual a 54.1 Nm . De la misma forma, mediante la relación 3.2 e incluyendo la información de la altura del cordón de soldadura (a) a las variables del momento de inercia (I) y la distancia más alejada al centroide del tubo (c) se logra calcular el esfuerzo cortante en la sección del cordón de soldadura a continuación:

$$\tau_{\text{cordon}} = \frac{54100 \cdot \left(\frac{19.05}{2} + \frac{a}{2} \right)}{\left(3932.6 + \frac{19.05 \cdot a^3}{12} + 19.05 \cdot a \cdot \left(\frac{19.05}{2} + \frac{a}{2} \right)^2 \right) \cdot \sqrt{2}}$$

Con el esfuerzo cortante anterior, se procede a calcular el esfuerzo de Von Misses en la garganta del cordón de soldadura mediante la siguiente relación 3.3; además, según la norma Eurocodigo-3, también se debe cumplir la relación 3.4:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{n1}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{cordon}}^2} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{VM} \leq \frac{\sigma_u}{\beta_w \cdot \gamma_{MW}} \quad (3.4)$$

Reemplazando las variables en 3.4 con la resistencia última del acero ($\sigma_u = 340$ MPa), coeficiente de correlación en función al tipo de acero ($\beta_w = 0.8$) y factor parcial de seguridad ($\gamma_{MW} = 1.25$), se obtiene que la altura del cordón debe ser menor e igual a -11.4. Así, bastara que la altura de garganta del cordón sea mayor a cero; por ello, se propone que la altura de interés sea igual al diámetro del electrodo más pequeño en el mercado; es decir, 2.4 mm según la ficha técnica en el Anexo E.

3.2.3. Unión estructura superior-concentrador de fuerza-estructura base.

La unión entre la estructura superior y la estructura base es por medio del concentrador de fuerza que se instala según una configuración patentada (US 20110127091A1) (ver Figura 3.11). Para esto, se indican 4 tornillos para fijar un extremo del concentrador plano (elementos **150** y **152**, respectivamente) a una zona de apoyo: estructura base para el presente proyecto. Luego, el extremo opuesto cuenta con un agujero pasante por donde se inserta un quinto tornillo (elemento **140**) que, además, atraviesa un tubo de **nylon** y un conjunto de arandelas Belleville pretensadas (elemento **130**). El tubo de nylon (elemento **135**) se encarga de restringir el desplazamiento horizontal de las arandelas con el fin de mantener la concentricidad de estos y, finalmente, se cuenta con una tuerca (elemento **145**) que se utiliza para ajustar el elemento **120** (estructura superior para el presente proyecto) al concentrador de fuerza.

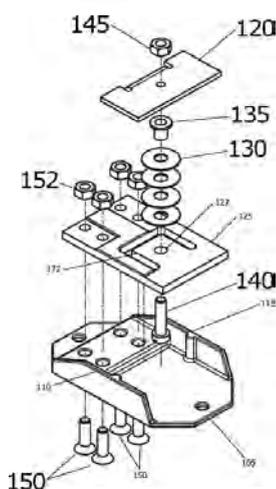


Figura 3.11: Planar beam load cell assembly.

Fuente: [29].

Cálculo de arandelas Belleville

Según la patente mencionada (US 20110127091A1), las arandelas Belleville deben encontrarse pretensadas a una magnitud de fuerza axial que se ubique entre la capacidad nominal de medición de la celda de carga y la capacidad de sobrecarga de este. Dicho de otro modo, según la ficha técnica de la celda en Anexo E, debe ubicarse entre los 50 y los 100 kgf. En ese sentido, se considera que la magnitud de precarga sea, aproximadamente, igual al peso máximo estático del usuario sobre la plataforma ($p_{\max} = 85 \text{ kgf}$) y, además, se propone utilizar arandelas Belleville DIN 2093 de clase B y de 11.2 mm de diámetro interno (ficha técnica en Anexo E). Luego, se procede a calcular la cantidad de arandelas (n) necesarias que cumplan con los requisitos de precarga mediante la ecuación 3.5 proporcionada en la ficha técnica del elemento, que relaciona la tensión de precarga del conjunto total de arandelas (p_{\max}) en función a los parámetros del material, geometría y deflexión (s) del mismo elemento.

$$\frac{p_{\max}}{n} = \frac{4 \cdot E \cdot t^4}{(1 - \mu^2) \cdot \alpha \cdot D^2} \cdot \frac{s}{t} \cdot \left[\left(\frac{h}{t} - \frac{s}{t} \right) \cdot \left(\frac{h}{t} - \frac{s}{2 \cdot t} \right) + 1 \right]. \quad (3.5)$$

Antes del cálculo, conviene indicar que se considera una deflexión de trabajo para el conjunto de arandelas igual 0.1 mm(s). Entonces, si se reemplazan los valores propios de la arandela en la ecuación 3.5 (constante de elasticidad (E) igual a 205 GPa, espesor de arandela (t) igual a 0.8 mm, coeficiente de poisson (μ) igual a 0.28, diámetro exterior (D) igual a 22.5 mm y altura del cono sin carga igual (h) a 0.65 mm), se obtiene lo siguiente:

$$\frac{833}{n} = \frac{4 \cdot 205000 \cdot 0.8^4}{(1 - 0.28^2) \cdot 0.69 \cdot 22.5^2} \cdot \frac{0.1}{0.8} \cdot \left[\left(\frac{0.65}{0.8} - \frac{0.1}{0.8} \right) \cdot \left(\frac{0.65}{0.8} - \frac{0.1}{2 \cdot 0.8} \right) + 1 \right],$$

$$n \approx 4.$$

Finalmente, se concluye que el ensamble de la unión atornillada requiere de 4 arandelas Belleville para el estado de precarga solicitado.

Análisis a la tracción de unión atornillada

Para analizar la resistencia a la tracción del tornillo 140 del ensamble de la Figura 3.11, se debe comprobar que la fuerza de precarga solicitada no supere la fuerza de tracción máxima del material. Es decir, se debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$F_{T,Ed} \leq \frac{0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (3.6)$$

Si se reemplazan las variables de la relación 3.6 por los valores propios del tornillo DIN 933 de grado 4: área resistente a la tracción (A_s) igual a 26.3 mm², resistencia última a la tracción (f_{ub}) igual a 500 MPa y factor de seguridad igual a 1.25 (γ_{Mb}), se logra comparar la desigualdad para la magnitud de precarga solicitada ($F_{T,Ed} = 85 \text{ kgf}$):

$$833.9 \leq \frac{0.7 \cdot 400 \cdot 26.3}{1.25},$$

$$833.9 \text{ N} \leq 5891.2 \text{ N}.$$

Entonces, se concluye que el tornillo seleccionado no falla a tracción con un factor de seguridad no menor a 1.25.

Análisis a la cortante de unión atornillada

Las fuerzas cortantes que experimentan las 8 uniones atornilladas que unen el concentrador de fuerza y la estructura superior se generan por el contacto entre el pie del usuario y la plataforma. Por esto, es conveniente revisar el diagrama de cuerpo libre de la zona de contacto durante el instante más crítico: el aterrizaje (ver Figura 3.12).

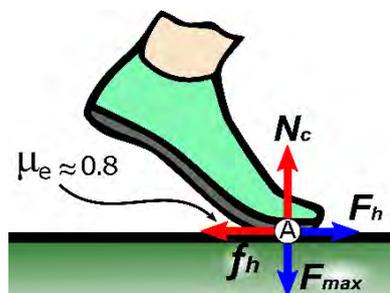


Figura 3.12: Diagrama de cuerpo libre contacto pie-piso.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior, la fuerza que evita el deslizamiento de los

pies del usuario es la fuerza de fricción estática (f_h) y, para calcularla, es necesario conocer el coeficiente de rozamiento estático (μ_e) entre los dos materiales de contacto. Sin embargo, debido a la gran variedad de materiales y diseños que se utilizan para fabricar la suela de los calzados deportivos, es conveniente obtener el coeficiente de fricción a partir de los estándares de manufactura. Así, los calzados deportivos deben garantizar un coeficiente de fricción estática no menor a 0.8 en la mayoría de las superficies ni deben ser considerablemente superiores a este valor con el fin de evitar lesiones en las articulaciones del pie [30]. Entonces, con el coeficiente de rozamiento igual a 0.8, se calcula la fuerza de fricción estática máxima mediante la relación 3.7.

$$f_h = \mu_e \cdot N_c. \quad (3.7)$$

Antes de hallar la fuerza de fricción estática de interés, se realiza el equilibrio de fuerzas en el eje vertical en el instante más crítico con el fin de obtener la fuerza normal ($N_c = 1876 \text{ N}$). Si se remplazan las variables de la ecuación 3.7 por los valores del coeficiente de fricción y la normal, se obtiene que la fuerza de fricción (f_h) en la zona pie-plataforma es igual a 1500 N. Después, se procede a trasladar la fuerza de fricción resultante (f_h) hacia los tornillos que unen al concentrador de fuerza y la estructura superior. Para esto, se utiliza el *software online* para el análisis estructural “skyciv” que obtiene los resultados que se muestran en la Figura 3.13.

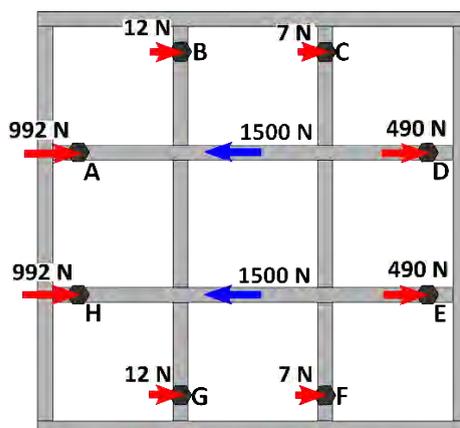


Figura 3.13: Fuerzas cortantes en uniones entre estructura superior y concentrador.
Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se verifica que los tornillos que experimentan la mayor fuerza cortante son los A y H. A esto último se deben agregar las condiciones de fatiga de cada elemento, ya que los esfuerzos cortantes en mención ocurren de manera cíclica durante el despegue y el aterrizaje. Entonces, para el análisis de los tornillos ante fallas, se inicia calculando el esfuerzo máximo a la cortante del material (σ_{Rd}) en condiciones estáticas mediante la relación 3.8.

$$\sigma_{Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \quad (3.8)$$

Reemplazando los mismos valores utilizados en el apartado anterior (análisis a la tracción) en la ecuación 3.8, se obtiene que el esfuerzo límite a la cortante es igual a 240 MPa (σ_{Rd}). Luego, para el análisis a la fatiga, se calcula la carga media y la amplitud mediante las siguientes relaciones:

$$f_m = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2} = 496 \text{ N,}$$

$$f_a = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2} = 496 \text{ N.}$$

Mediante el método de Gerber, y considerando un máximo de 10^6 ciclos para vida infinita, se calcula el límite de resistencia último a la fatiga por medio de la ecuación 3.9, donde la variable a_T es el área de la sección del tornillo.

$$0.5 \cdot S_u = \frac{\frac{f_a}{a_T}}{1 - \left(\frac{f_m}{S_u}\right)^2}, \quad (3.9)$$

$$S_u = 46 \text{ MPa.}$$

Entonces, se concluye que el tornillo no falla por fatiga ante fuerzas cortantes sobre el elemento, ya que la resistencia última calculada (S_u) no supera la teórica ($\sigma_{Rd} = 240$ MPa).

Análisis de unión tornillo - concentrador de fuerza por aplastamiento

En la Figura 3.11, la zona de contacto entre el tornillo 140 y el concentrador 125 debe ser analizada por aplastamiento. Se debe comprobar que el esfuerzo ($\sigma_{v,Ed}$) que se genera en el concentrador no supere el esfuerzo último resistente del material de este elemento ($\sigma_{b,Rd}$). Esta última condición se plasma en la desigualdad 3.11.

$$\sigma_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot f_u}{\gamma_{Mb}}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_{v,Ed} < \sigma_{b,Rd}. \quad (3.11)$$

Para obtener el esfuerzo último del material ($\sigma_{b,Rd}$) se recurre a la ecuación 3.10, donde f_u es la resistencia última del concentrador de aluminio igual a 125 MPa y γ_{Mb} es el factor de aminoramiento para uniones de acero estructural igual a 1.25. Con esto, la desigualdad 3.9 queda definida según la siguiente relación:

$$\sigma_{v,Ed} < 250 \text{ MPa}.$$

Luego, se procede con el análisis por fatiga hallando el esfuerzo medio y la amplitud ($\sigma_m = 13.4 \text{ MPa} \wedge \sigma_a = 13.4 \text{ MPa}$), que se generan producto de la fuerza horizontal de 992 N y el límite a la resistencia máxima de Gerber:

$$0.5 \cdot S_u = \frac{13.4}{1 - \left(\frac{13.4}{S_u}\right)^2}$$

$$S_u = 33 \text{ MPa}.$$

Finalmente, se concluye que el límite a resistencia ultimo S_u calculado no supera a la resistencia máxima teórica $\sigma_{v,Ed}$.

Deflexión horizontal de unión concentrador de fuerza - tornillo

El análisis a la deflexión se realiza a los tornillos A o H de la Figura 3.13, ya que son los que experimentan la mayor fuerza horizontal. Así mismo, se utiliza el método FEM y el modelo 3D (ver Figura 3.14) con los 5 elementos que componen el ensamble.

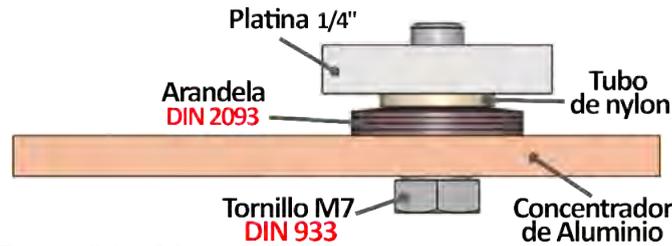


Figura 3.14: Modelo 3D y elementos de unión atornillada.
Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades mecánicas para los materiales del ensamble en la simulación FEM se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Propiedad de los materiales de unión atornillada.

	Acero	Nylon (PA)	Aluminio
Módulo de elasticidad (GPa)	205	0.8	70
Coefficiente de Poisson (ν)	0.28	0.39	0.34
Densidad (kg/m^3)	7870	1030	2700

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como condiciones iniciales se considera que la fuerza horizontal de 992 N se ubique a la altura de la platina de $\frac{1}{4}$ "", los cuatro agujeros de sujeción al extremo del concentrador de aluminio como regiones fijas y la fuerza axial (por la precarga de las arandelas) de 834 N en el eje longitudinal del tornillo. Luego, se ejecuta la simulación FEM considerando una configuración tetraédrica con 22151 elementos y 6387 nodos. Los resultados de la deflexión horizontal se plasman en la Figura 3.15.

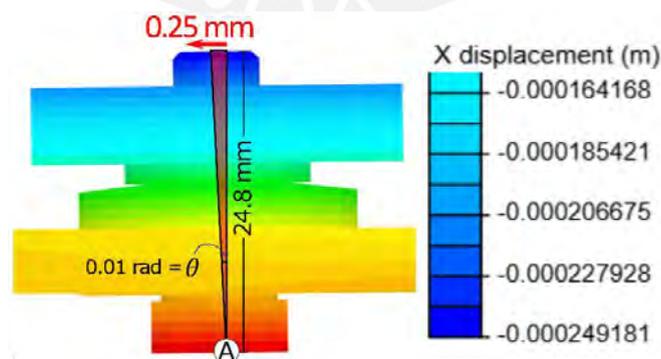


Figura 3.15: Deflexión horizontal de unión atornillada.
Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados, el desplazamiento que se obtiene en la parte más alta del tornillo es igual a 0.25 mm en dirección horizontal. Además, con la distancia desde el

punto A hasta dicha zona es posible calcular el ángulo de rotación θ , que es igual a 0.01 rad. Luego, con este ángulo se procede a calcular el desplazamiento horizontal de la parte más alta de la plataforma, que se encuentra a 48 mm (R_{sup}) desde el punto A. Entonces, mediante la ecuación 3.12, se calcula dicho desplazamiento.

$$l_{sup} = \theta \cdot R_{sup}, \quad (3.12)$$

$$l_{sup} = 0.01 \cdot 48,$$

$$l_{sup} = 0.48 \text{ mm.}$$

Entonces, se concluye que el desplazamiento horizontal máximo de la estructura superior es igual a 0.48 mm y, por ello, en el diseño se deja un espacio de 4 mm entre la estructura superior y el marco de la estructura base.

3.2.4. Trípode de captura de imágenes

A continuación, se realiza la selección del trípode que sostiene el dispositivo de captura. Para ello, previamente, se analiza los requerimientos para el campo de visión de la cámara HD.

Selección y ubicación del trípode de captura de imágenes

El trípode que se utiliza requiere estar ubicado a una distancia que facilite el registro de las imágenes que están involucradas en el CMJ, principalmente, durante la fase excéntrica y concéntrica del salto. Por ello, se propone que la región de captura abarque un área rectangular con altura igual de 2.13 m y ancho de 2.5 m, y a un ángulo diagonal de visión (**DFoV**, por sus siglas en inglés) igual a 60° de la cámara seleccionada en el apartado de diseño eléctrico-electrónico. Con estos datos, es posible calcular la distancia de separación entre el trípode (**f**) al centro de la plataforma y también la altura requerida de este elemento para sostener el dispositivo de captura. Todos los requerimientos mencionados se pueden observar en la Figura 3.16.

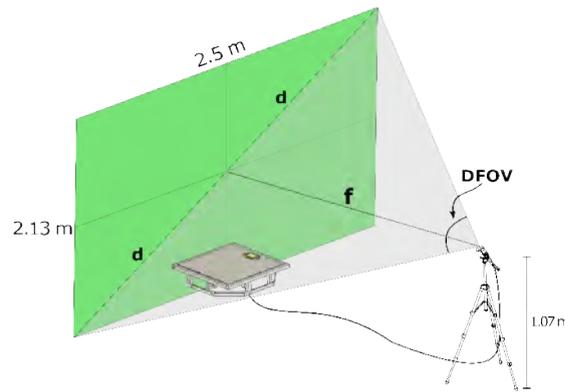


Figura 3.16: Ubicación del trípode de captura de imágenes.
Fuente: Elaboración propia.

Luego, con la ecuación 3.13 y los datos de la Figura 3.16, se calcula la distancia f :

$$DFoV = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d}{f} \right), \quad (3.13)$$

$$1.04 \text{ rad} = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{1.64}{f} \right),$$

$$f = 2.85 \text{ m.}$$

Finalmente, se selecciona el trípode de modelo TF-3120 que permite un alcance máximo de 1.02 m respecto al nivel del suelo (ver ficha técnica en Anexo E).

3.2.5. Planos de ensamble

En esta sección, se describen las principales dimensiones y las uniones que se presentan en los 4 subensambles que componen el sistema mecatrónico principal (estructura superior, estructura base, caja electrónica y trípode de captura de imágenes).

Ensamble principal

La parte mecánica del sistema mecatrónico principal se encuentra conformado por 4 subensambles, tal como se presenta en la Figura 3.17. El primero de ellos hace referencia a la **ESTRUCTURA SUPERIOR**: subensamble compuesto por los elementos que entran en contacto con el usuario durante el CMJ y por los elementos mecánicos que sujetan y protegen los dispositivos electrónicos de la interfaz. Por otro lado, el subensamble 2 (**ESTRUCTURA BASE**) se compone de una estructura de tubos cuadrados que sujeta tanto a los concentradores de fuerza como al subensamble 3 (**CAJA**

ELECTRÓNICA). Este tercer subensamble se encuentra conformado por chapas metálicas dobladas y ensambladas a la estructura base por medio de cordones de soldadura. Finalmente, el subensamble 4 (**TRÍPODE DE CAPTURA DE IMÁGENES**) se compone principalmente de un trípode y una cámara digital HD.

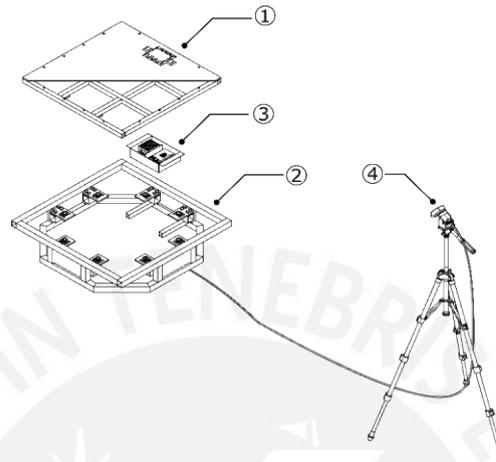


Figura 3.17: Vista isométrica del sistema mecatrónico de medición del nivel de fatiga.
Fuente: Elaboración propia.

Antes de revisar los planos de cada subensamble, es necesario observar la unión que existe entre el primero y el segundo de ellos. Para esto, se realiza el corte H-H transversal a la plataforma general y a la altura de la unión atornillada que une el subensamble 1 con el concentrador de fuerza (ver Figura 3.28 (a)). Por otro lado, en la figura 3.28 (b), se muestra la vista de detalle G de la unión atornillada donde se resalta la platina como tuerca (3), el tubo de nylon (11), el grupo de arandelas Belleville (10), el concentrador de fuerza (2) y el tornillo de cabeza hexagonal M7 DIN933 (9).

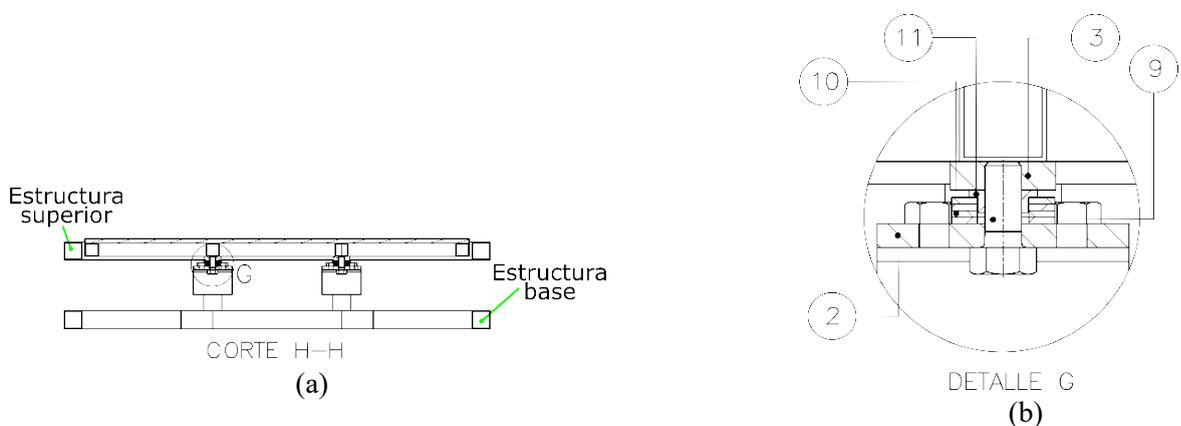


Figura 3.18: (a) Corte H-H y (b) vista de unión atornilla estructura superior-concentrador.
Fuente: Elaboración propia.

Ensamble estructura superior

La vista isométrica de la estructura superior se muestra en la Figura 3.19. Luego, en la Figura 3.20 (b), se enumeran los componentes principales de la estructura en mención como el marco de tubos cuadrados de $\frac{3}{4}$ " AISI1008 (1), la chapa de polipropileno de 6 mm de espesor (2) que se encuentra unida al marco de tubos mediante 14 remaches, la máscara de ABS que protege los componentes electrónicos de la interfaz (4) y la chapa de acrílico de 3 mm de espesor (5) que se utiliza para proteger la pantalla LCD contra golpes y ralladuras. Así mismo, en la Figura 3.20 (a), se muestra la sección A-A, donde se exponen las uniones que se utilizan para ensamblar las piezas mencionadas.

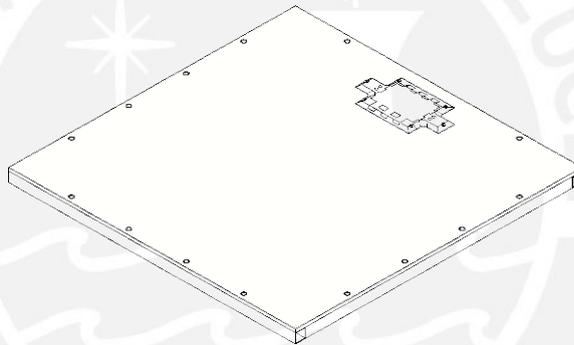


Figura 3.19: Vista isométrica de estructura superior.
Fuente: Elaboración propia.

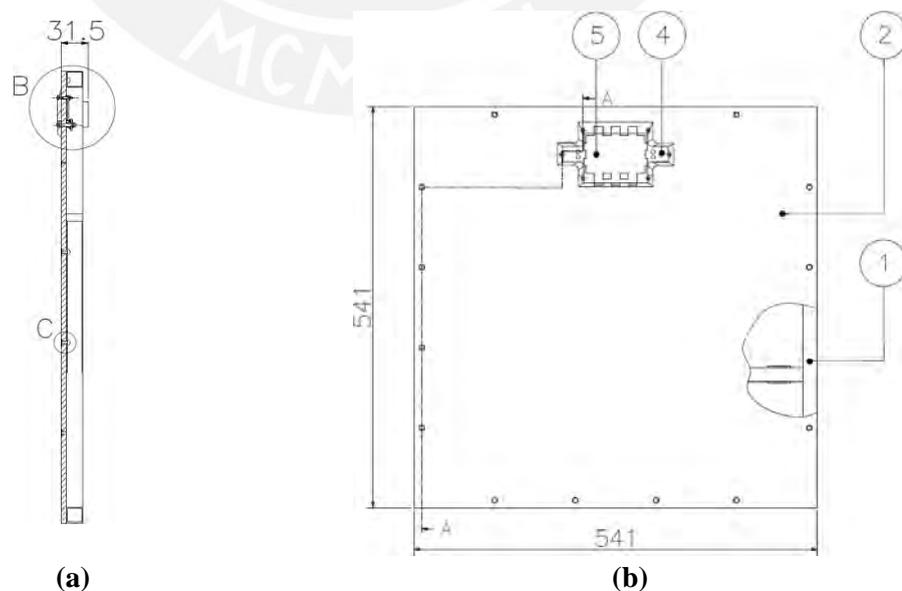


Figura 3.20: (a) Sección A-A y (b) vista horizontal plataforma superior.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.21, se muestra la vista de detalle B y C. La primera, aparte de incluir la platina como tuerca (3), muestra la región de ensamble de la interfaz donde se utilizan 4 tornillos DIN 7985 M3x16 (6) para sujetar la pantalla LCD y la máscara de ABS, y 2 tornillos DIN 7985 M3x20 (7) para sujetar los interruptores ópticos. La segunda vista de detalle muestra la unión entre la chapa de polipropileno y la estructura de tubos cuadrados, donde se utilizan 14 remaches DIN 7337 de 3 mm de diámetro (8).

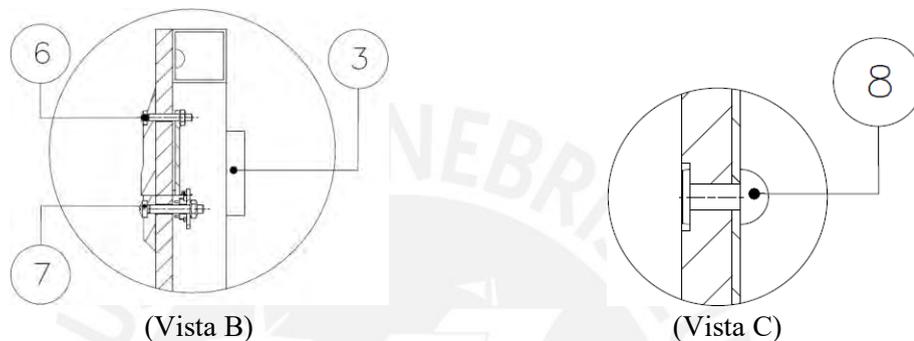


Figura 3.21: (Vista B) Elementos de unión en interfaz y (Vista C) en estructura superior.
Fuente: Elaboración propia.

Ensamble estructura base

En la Figura 3.22, se muestra la vista isométrica de la **ESTRUCTURA BASE**. En la Figura 3.23 (b), se indican algunos elementos que forman parte de este subensamble, como la estructura de tubos cuadrados AISI 1008 de 1 pulgada de lado (12), los 8 concentradores de fuerza (2) distribuidos simétricamente alrededor de toda la estructura base y el subensamble de la caja electrónica (13). Luego, en la Figura 3.23 (a), se muestra la sección D-D, donde destaca la configuración atornillada que se utiliza para unir el concentrador de fuerza con los tubos de la estructura base.

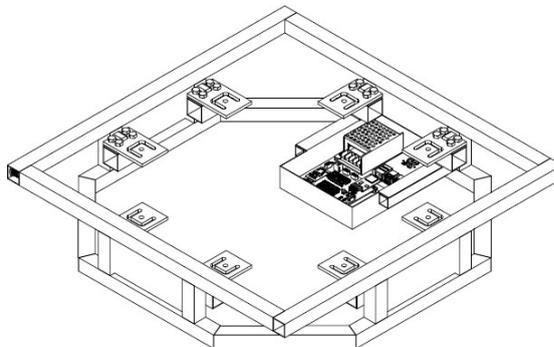


Figura 3.22: Vista isométrica estructura base.
Fuente: Elaboración propia.

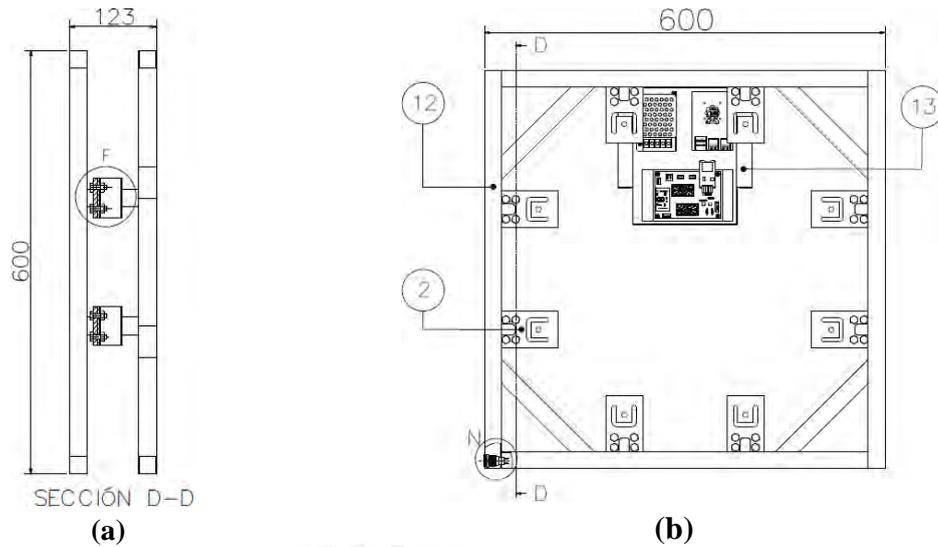


Figura 3.23: (a) Sección D-D y (b) vista horizontal de estructura base.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.24, se muestra a detalle la Vista F y N, en la primera (unión entre el concentrador de fuerza y la estructura de tubos cuadrados) se presenta 4 tornillos ANSI de cabeza hexagonal de $\frac{1}{4}$ " de diámetro (16), una platina de acero (15) AISI 1008 de $\frac{1}{8}$ " de espesor que se ubica entre el concentrador y el tubo cuadrado de $1\frac{1}{4}$ " de lado (14). En la segunda, se muestra el ensamble del interruptor ON-OFF. Finalmente, en la Figura 3.24 (G), se muestra el tipo de unión entre las galgas extensiométricas y el concentrador de aluminio el cual utiliza silicona vulcanizada a temperatura ambiente.

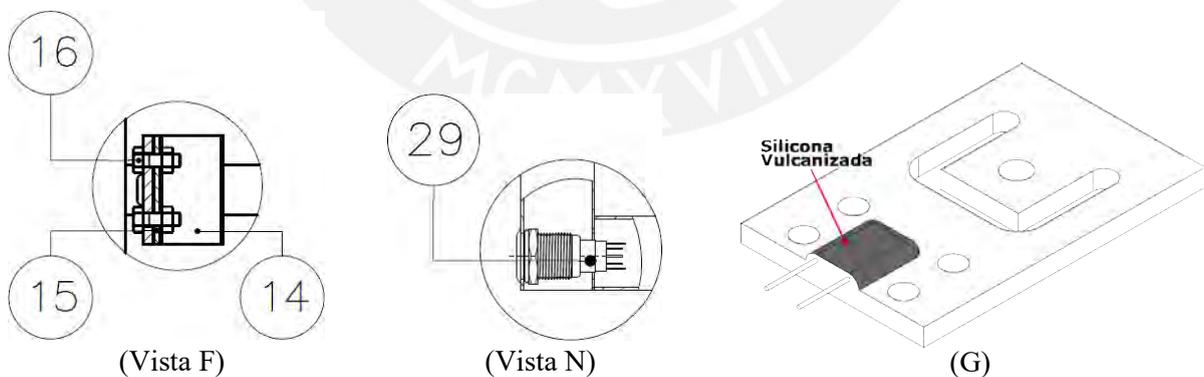


Figura 3.24: (Vista F) Unión concentrador-tubo, (Vista N) interruptor ON-OFF.
Fuente: Elaboración propia.

Ensamble caja electrónica

En la Figura 3.25, se muestra la vista isometría de la **CAJA ELECTRÓNICA**, que alberga, principalmente, 3 elementos: fuente de poder, mini-PC Raspberry Pi y tarjeta

impresa PCB. Luego, en la Figura 3.26 (b) se enumeran los elementos mecánicos que pertenecen al ensamble de la Figura 3.25, como la caja compuesta por una chapa metálica doblada (17), la estructura de aluminio de la fuente de poder (18), el *case* impreso en material PLA (19) [31] que protege y sujeta la tarjeta mini-PC Raspberry pi 4, la chapa doblada que se encuentra por debajo de la tarjeta impresa (20) y la PCB compuesta por materiales de conducción y aislantes (21). En la Figura 3.26 (a), se muestra la vista de sección de la caja electrónica con el fin de visualizar las uniones que se utilizan para sujetar los elementos mecánicos mencionados a la caja metálica.

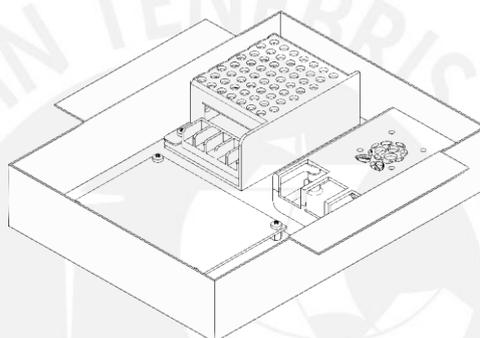


Figura 3.25: Vista isométrica de caja electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

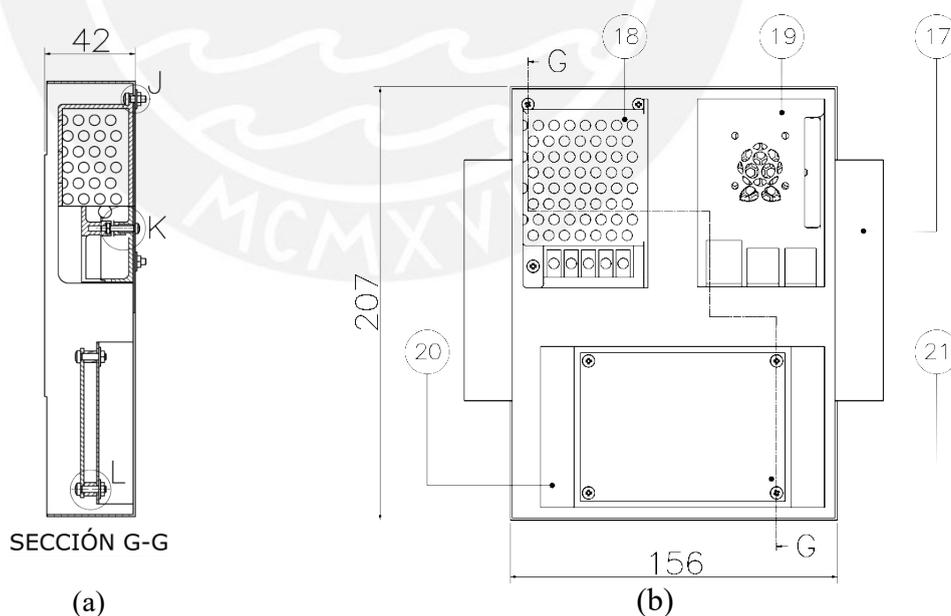


Figura 3.26: (a) Sección G-G y (b) vista horizontal de caja electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.27, se muestran las 3 vistas de detalle que se indican en la Figura 3.26 (a). Así, en la vista J, se puede apreciar la unión atornillada que está compuesta por

un tornillo M3x8 DIN 7985 (22), una arandela DIN 9021 y una tuerca DIN 4036. En la vista K, se observa la unión atornillada que une el *case* de la mini-PC (elemento conformado por dos piezas) hacia la caja metálica. Este ensamble se compone de un tornillo M2.5x14 DIN 7985 (23) y una tuerca DIN 4036 insertada por interferencia a un agujero que pertenece a la pieza superior del *case*. Finalmente, en la vista L, se muestra la unión atornillada que se utiliza para unir la PCB hacia la chapa doblada la cual cuenta con 4 tornillos M3x12 DIN 7985 (24), un espaciador hexagonal M3x06 (25), una arandela DIN 9021 y una tuerca DIN 4036.

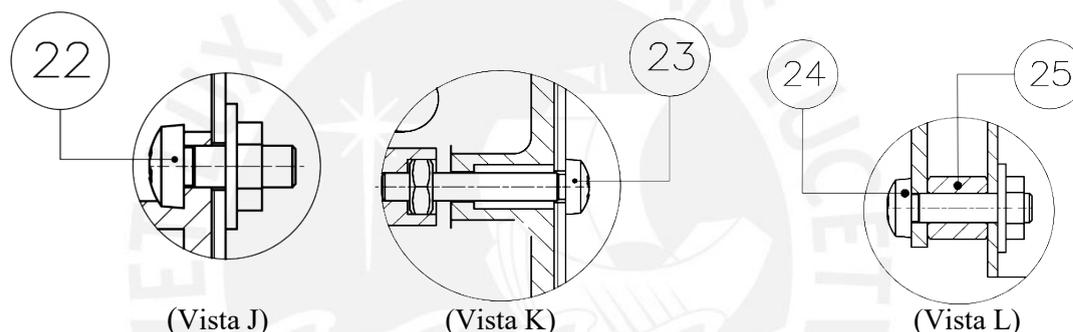


Figura 3.27: (Vista J) Unión fuente de poder-caja metálica, (Vista K) unión *case* de mini-PC y caja metálica y (Vista L) unión PCB con chapa doblada.

Fuente: Elaboración propia.

Ensamble trípode de captura de imágenes

En la Figura 3.28, se muestra la vista isométrica del subensamble trípode de captura de imágenes y en la figura 3.29 (a) se muestra la vista de perfil de este subensamble. Así mismo, en esta última, se describe las medidas principales en condiciones de operación, como la altura máxima y la distancia de separación entre las patas. Luego, en la vista de detalle M se muestra los elementos que se encargan de sujetar la cámara digital como el cabezal del trípode (28), que cuenta con un agujero pasante de 6.5 mm de diámetro en el centro, un adaptador (26) (ver planos en Anexo H) impreso en material ABS para sujetar la cámara digital hacia el cabezal del trípode y un tornillo de norma ANSI de 1/4" de diámetro (27).

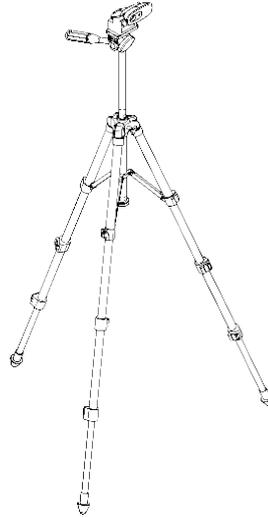


Figura 3.28: Vista isométrica del subensamble trípode de captura de imágenes.
Fuente: Elaboración propia.

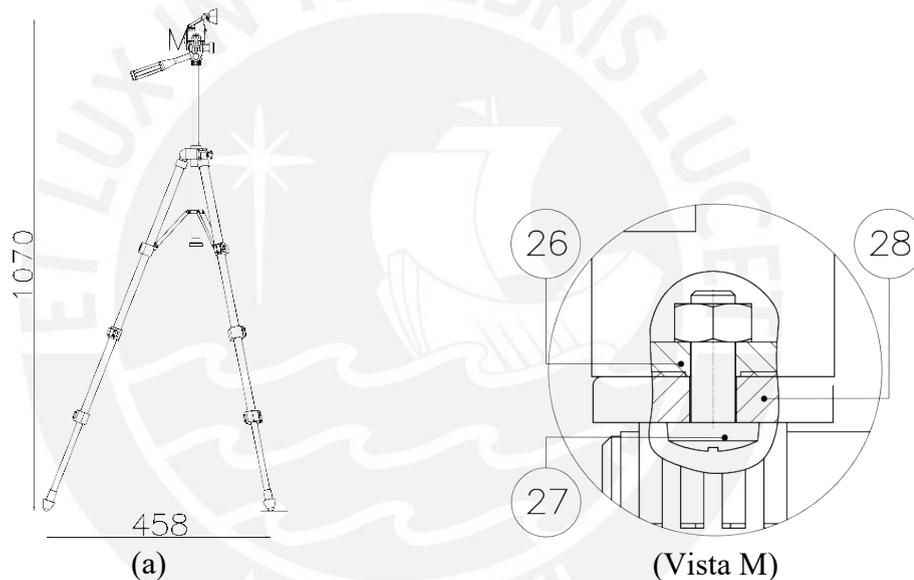


Figura 3.29: (a) Perfil de trípode y (Vista M) detalle de unión cabezal-adaptador de cámara.
Fuente: Elaboración propia.

33. Diseño eléctrico – electrónico

En el presente apartado, se revisa el diseño eléctrico-electrónico el cual inicia con la integración del *hardware* del módulo interfaz, procesamiento, energía y sensores derivando en la estructura de funciones. Finalmente, se elabora el diagrama esquemático de todo el sistema y el circuito impreso (PCB) que integra los componentes de la parte electrónica.

3.3.1. Diagrama de bloques

En la Figura 3.30, se muestra el diagrama completo de bloques de todo el sistema. La clasificación de los bloques se realiza según al dominio al que pertenecen, y según a su localización física. Así, se puede observar que el dominio sensores cuenta con 8 transductores de fuerza que están conectados en paralelo al módulo amplificador ADC HX711, configuración justificada en la sección 3.3.2. Además, dentro del mismo dominio se encuentra una cámara digital HD conectada hacia la unidad de procesamiento por un bus serial USB 2.0. El dominio procesamiento cuenta con una mini-PC Raspberry pi 4 y un microcontrolador Arduino Mini-Pro. El primero para ejecutar el modelo de reconocimiento de articulaciones y validar la ejecución del CMJ; y el segundo, para el procesamiento de las señales de la fuerza, desde la lectura de las señales digitales de fuerza hasta el cálculo del nivel de dispersión de la potencia mecánica (todos los bloques del dominio procesamiento dentro de la caja electrónica). El dominio interfaz cuenta con un microcontrolador Arduino Mini-Pro, que se encarga de administrar las señales de entrada y salida del sistema. Es decir, las señales que ingresan por los dos interruptores ópticos (2 puertos GPIO en Arduino para lectura de señales) y las dos señales de salida de tipo SPI y PWM para controlar la pantalla LCD (comunicación *simplex* de solo escritura para pantalla) y la tira de luces LED, respectivamente. Además, también se cuenta con una memoria electrónica la cual se comunica con la unidad de procesamiento de la interfaz por el protocolo SPI en modo *half-duplex*. Finalmente, el dominio de energía se compone de dos elementos: una fuente de poder conmutada y un interruptor eléctrico. El primero sirve para regular la energía proveniente de la red pública; y el segundo, para habilitar el ingreso de la energía acondicionada de 5V hacia el sistema.

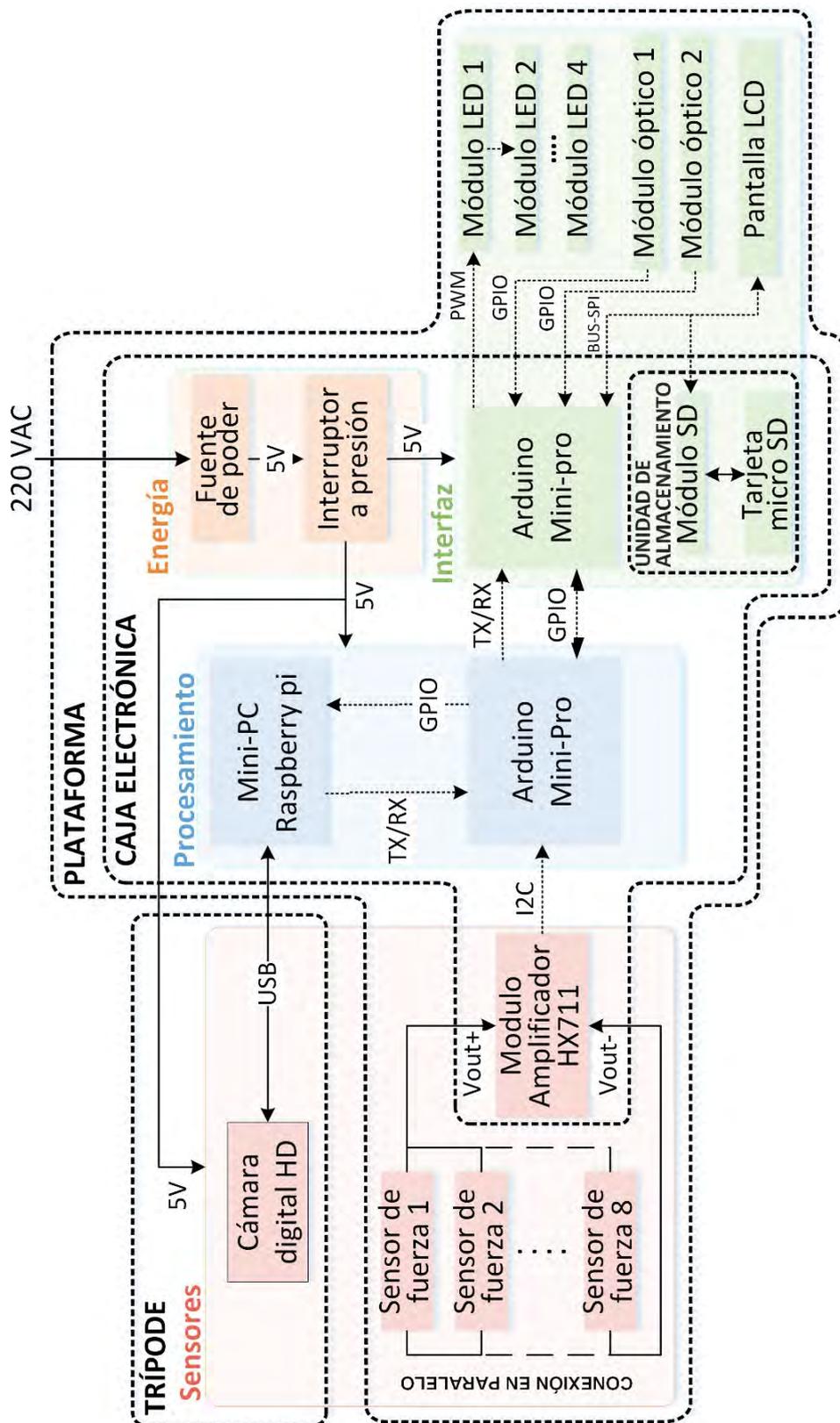


Figura 3.30: Diagrama de bloques del sistema principal.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Componentes eléctrico-electrónicos

En el presente apartado, se procede con la selección de los componentes eléctricos y electrónicos que forman parte del sistema principal. Para ello, se procede a listar los requerimientos para cada componente que se encuentra en el diagrama de la Figura 3.30; luego, se presentan las opciones comerciales y, finalmente, se procede con la selección del componente para cada caso. Es necesario indicar que la selección de algunos elementos se realiza de manera directa por la poca diferencia con sus semejantes y por la accesibilidad comercial.

3.3.2.1. Sensores

A continuación, se procede con la selección de los componentes electrónicos que forman parte del dominio sensores.

a. Sensor de fuerza

En el apartado mecánico se definió la cantidad y el tipo de concentrador de fuerza a utilizar, elemento que integra de fábrica su propio conjunto de galgas extensiométricas en configuración *Wheatstone bridge*. Así mismo, se mencionó que la capacidad requerida de medición por el conjunto de celdas de carga (concentrador más transductor) es 4.5 veces el peso máximo estático permisible sobre el sistema (85 kgf de peso máximo del usuario según lista de requerimientos). Por ello, se propuso contar con 8 celdas de carga (capacidad nominal de 50kgf para cada una de ellas) que abarquen en conjunto el margen de medición requerido.

Además, revisando las características de la celda de carga en Anexo E, se verifica que llega a ser segura hasta por lo menos el doble de su capacidad nominal cuando se aplica una carga perpendicular al eje longitudinal del concentrador. Esto garantiza que, durante el caso más desfavorable, el usuario pueda apoyar todo su peso sobre una de ellas siempre y cuando se respete la carga máxima permisible sobre la plataforma. En la Figura 3.31 (b), se presenta el ensamble del sensor de fuerza sobre el concentrador de tipo plano.

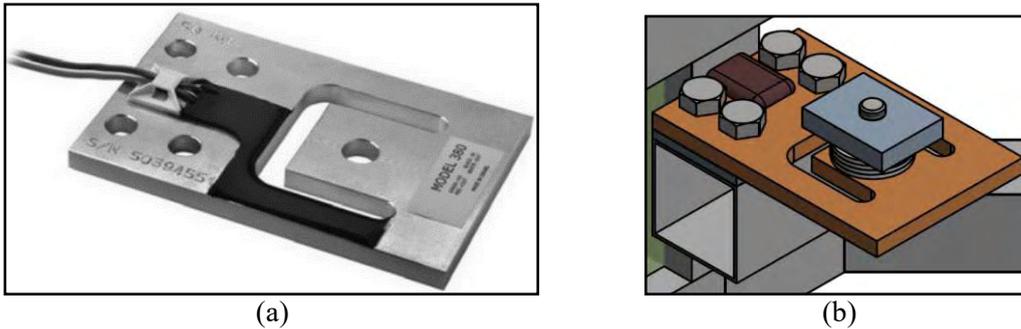


Figura 3.31: (a) Sensor de fuerza 50 kgf y (b) celda de carga en estructura base.
Fuente:[32].

Circuito integrador de sensores de fuerza

Como se mencionó, se utilizan 8 celdas de carga, donde cada una de estas sujeta 4 galgas extensiométricas en configuración *Wheatstone bridge*. Con el fin de obtener el voltaje de salida (**Vsal o voltaje equivalente**) del conjunto de sensores, se revisa el circuito en paralelo de la Figura 3.32.

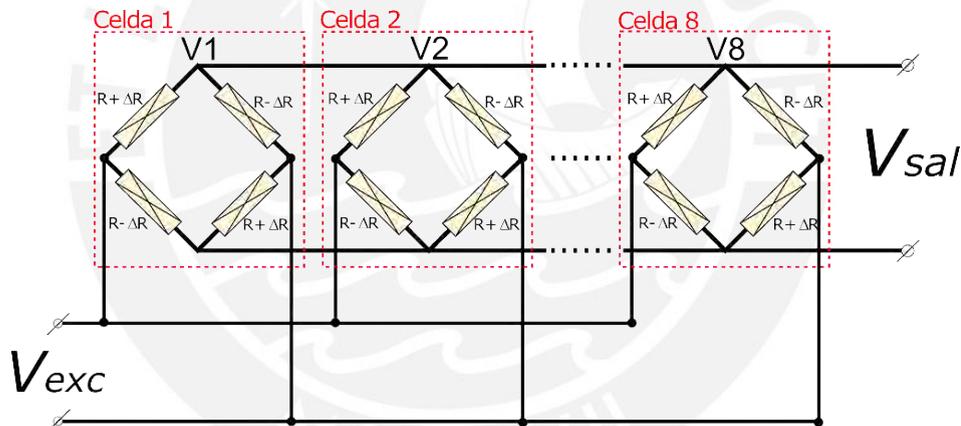


Figura 3.32: Circuito integrador de sensores de fuerza.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso consta en analizar el circuito en paralelo cuando se excita el conjunto con una tensión constante (V_{exc}). Luego, se procede hallar el circuito equivalente de Thevenin para cada de celda de carga: resistencia (R_{TH}) y voltaje (V_{TH}) de Thevenin mediante las siguientes relaciones.

$$R_{TH} = \frac{(R^2 - \Delta R^2)}{R},$$

$$V_{TH} = V_{exc} \cdot \frac{\Delta R}{R}.$$

Finalmente, si se considera un ΔR muy pequeño y se resuelven las ecuaciones de

mallas para el circuito de la Figura 3.32, se obtiene que el voltaje de salida (V_{sal}) es igual a la media aritmética del conjunto de voltajes de salida de cada celda de carga y se representa mediante la relación 3.14. Es decir, la magnitud de V_{sal} multiplicada por 8 llega a representar la fuerza resultante captada sobre la plataforma de fuerza.

$$V_{sal} = \frac{V_1 + V_2 \cdots V_8}{8}. \quad (3.14)$$

b. Módulo amplificador y digitalizador

Para la etapa de amplificación y digitalización de la señal de salida del sensor de fuerza, se propone utilizar un módulo programable que amplifique linealmente la señal entrante que se encuentra en el orden de los milivoltios y digitalice con alta resolución la señal amplificada. Los criterios de selección se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Criterios de selección modulo amplificador.

Criterio	Valor
Resolución ADC	24 bits
Ganancia programable	SI
Voltaje de lectura	± 12 mV
Voltaje de funcionamiento	5 V
Frecuencia de lectura	80 Hz
Salida lineal	SÍ

Fuente: Elaboración propia.

Revisando las opciones disponibles dentro del mercado, se listan dos opciones en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6: Opciones comerciales para módulo de amplificación y digitalización.

OPCIONES PARA MODULO AMPLIFICADOR-DIGITALIZADOR						
Modelo	Resolución ADC (bits)	Ganancia programable	Voltaje lectura (V)	Voltaje de trabajo (V)	Frecuencia de lectura (Hz)	Salida lineal
HX711	24	SI	± 40	5	10 v 80	SI
HX760	24	NO	± 20	24	80	SI

Fuente: Elaboración propia.

Las características de la primera opción se ajustan mejor a los criterios de selección para el módulo requerido, ya que este cumple con el criterio de ganancia programable y se ajusta al voltaje de trabajo de todo el sistema. En la Figura 3.33, se muestra el montaje del módulo HX711 sobre la tarjeta impresa PCB.

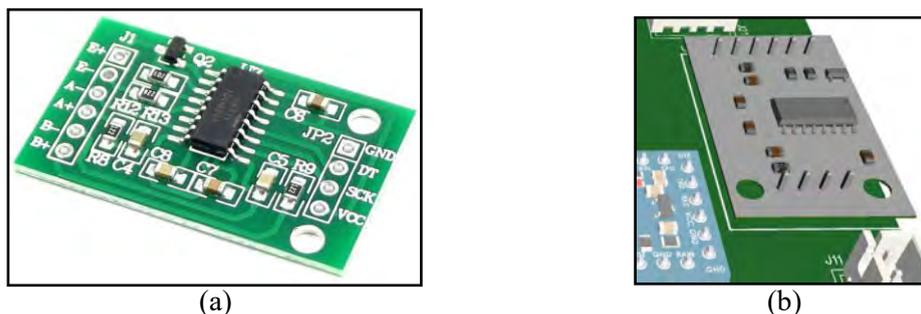


Figura 3.33: (a) Módulo amplificador ADC HX711 y (b) Módulo amplificador en PCB.
Fuente: [33].

c. Cámara digital

La cámara digital requiere de un ángulo de visión de 60° , ya que se consideró este criterio durante el proceso de selección del trípode de captura de imágenes. Además, requiere de un canal de comunicación de tipo USB por el cual se pueda transmitir las capturas en HD realizadas con un *frame rate* mayor igual a 30 FPS (ver Tabla 3.7).

Tabla 3.7: Criterio de selección cámara digital.

Criterio	Valor
Resolución	> 720 px
Tasa de captura	> 30 FPS
Tipo de conexión	USB
Angulo de visión	60°

Fuente: Elaboración propia.

Revisando las opciones disponibles y comerciales, se listan dos componentes en la

Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Opciones comerciales para cámara digital.

OPCIONES PARA CÁMARA DIGITAL				
Modelo	Resolución (pxs)	Tasa de captura (FPS)	Tipos de conexión	Angulo diagonal de visión ($^\circ$)
Logitech C270	1280x720	30	USB 2.0	60
Genius 1000X	1280x720	30	USB 2.0	110

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior, ambas opciones difieren únicamente por el ángulo de visión. Es decir, la primera de ellas permite realizar capturas de regiones rectangulares y la otra, de regiones cuadradas. Entonces, se procede con la selección de la cámara de modelo Logitech C270 para el presente proyecto. En la Figura 3.34 (b), se muestra el ensamble de la cámara seleccionada y el cabezal del trípode.



Figura 3.34: (a) Cámara Logitech C270 y (b) Cámara en trípode.
Fuente: [34].

3.3.2.2. Interfaz

A continuación, se procede con la selección de los componentes que pertenecen al dominio interfaz.

a. Pantalla digital

Los criterios de selección de la pantalla digital se definen en base a los requerimientos del proyecto; es decir, según ergonomía, para un usuario con capacidad de visión promedio, las señales proyectadas deben ser percibidas en un rango de visión de por lo menos $\pm 60^\circ$ respecto al eje perpendicular de la pantalla; después, el dispositivo debe poseer resolución para proyectar figuras complejas; y, finalmente, conexión SPI para la transmisión de datos (ver Tabla 3.9).

Tabla 3.9: Criterios de selección de pantalla digital.

Criterio	Valor
Resolución	128X64 pxs
Angulo de visión	$> 60^\circ$
Tipo de conexión	SPI
Voltaje de operación	5 V

Fuente: Elaboración propia.

Revisando las opciones comerciales, se listan dos componentes en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Opciones comerciales para pantalla digital.

OPCIONES PARA PANTALLA DIGITAL						
Modelo	Resolución (pxs)	Angulo de visión ($^\circ$)	Tipo de conexión	Voltaje de operación (V)	Área visible (cm^2)	Tecnología
YB12864ZB	128x64	60	SPI	5	28.8	LCD
SSD1306	128x64	80	SPI	5	2.64	OLED

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior, ambas opciones se ajustan a los criterios de selección; sin embargo, la primera posee un área de visibilidad mayor. Por ello, se selecciona la pantalla digital YB12864ZB con ensamble en el sistema presente en la Figura 3.35 (b).

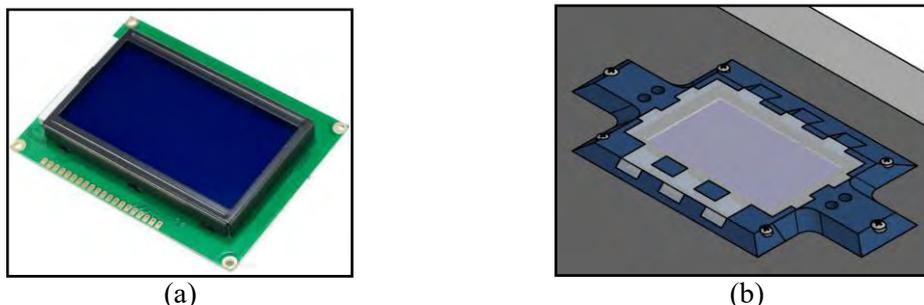


Figura 3.35: (a) Pantalla LCD 128x64 y (b) pantalla en estructura superior.
Fuente: [35].

b. Módulo óptico para ingreso de señales de control

Como se puede ver en el diagrama de bloques de la Figura 3.30, se utilizan dos módulos ópticos para ingresar las señales de control o interacción del sistema. Así, se requiere que estos dispositivos emitan una señal digital en alta cuando exista presencia de un objeto físico frente a los sensores. Los criterios de selección en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Criterios de selección modulo óptico.

Criterio	Valor
Distancia de detección	< 5 cm
Tipo de salida	Digital
Lectura ajustable	SI
Voltaje de operación	5 V

Fuente: Elaboración propia.

Revisando las opciones comerciales, se listan tres componentes en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Opciones de selección para modulo óptico.

OPCIONES PARA MÓDULO ÓPTICO				
Modelo	Distancia de detección (mm)	Tipo de salida	Lectura ajustable	Voltaje de operación (V)
TCRT5000	1-12	Digital	SI	4.5-5
FC-51	20-300	Digital	SI	3.3-5
2Y0A21	100-800	Analógico	NO	4.5-5

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se verifica que las características de la segunda opción son las que se ajustan al criterio de selección. El ensamble se presenta en la Figura 3.36 (b).



Figura 3.36: (a) Sensor óptico FC-51 y (b) Sensor IR en estructura superior.
Fuente:[36].

c. Módulo SD

Para almacenar los resultados y las configuraciones del sistema, se requiere de un componente que permita leer y escribir sobre una memoria micro SD. Por esto, se propone utilizar el módulo SD de la Figura 3.37 (a) (ver característica en Tabla 3.13).

Tabla 3.13: Características del módulo SD.

Parámetro	Valor
Compatibilidad	Micro SD
Tipo de conexión	SPI
Voltaje de operación	3.3-5 V
Consumo máximo	200 mA

Fuente: [37].

En la Figura 3.37 (b), se presenta el ensamble del módulo SD en la PCB.



Figura 3.37: (a) Módulo SD y (b) Módulo SD en PCB.
Fuente:[37].

d. Módulo LED

Para la proyección de la señal de espera, se propone utilizar un arreglo de 4 módulos LED conectados en serie y controlados por una sola señal en común (PWM) emitida por la MCU de la interfaz. El módulo LED seleccionado se muestra en la Figura 3.38 (a), que internamente se compone de dos elementos: un diodo de luz RGB y un *driver* WS2812B. El *driver* permite variar tanto el color del diodo LED (RGB) como la intensidad luminosa. Para ello, la MCU de la interfaz cambia los valores del registro de 24 bits del *driver*

mediante la señal PWM, donde los primeros 8 bits (0-255) corresponden al color rojo, verde y azul, sucesivamente. Características del módulo LED en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: Características del módulo LED WS2812B.

Parámetro	Valor
Señal de control	PWM
Resolución	24 bits
Voltaje de alimentación	5 V
Consumo máximo	50 mA x Led

Fuente: [38]

En la Figura 3.38 (b), se muestra el ensamble de los módulos LED. Estos se ubican debajo del acrílico que protege la pantalla digital y en la ranura de la máscara ABS.



Figura 3.38: (a) Modulo LED WS2812B y (b) Modulo LED en interfaz.

Fuente: [38].

e. Microcontrolador interfaz

La unidad de procesamiento (MCU) del dominio interfaz requiere conectarse a los módulos LED mediante una sola señal PWM, leer las dos señales digitales que se envían de los módulos ópticos, enviar señales hacia la pantalla digital mediante el protocolo de comunicación SPI, leer y escribir datos hacia la unidad de almacenamiento mediante el mismo bus de comunicación SPI utilizado en la pantalla y recibir datos mediante el protocolo UART desde la MCU del dominio procesamiento. Los requerimientos se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Criterios de selección para MCU interfaz.

Criterio	Valor
Puertos GPIO	3
Puertos PWM	1
Puertos SPI	1
Puertos UART	1
Voltaje de operación	5V
Volumen	Mínimo

Fuente: elaboración propia.

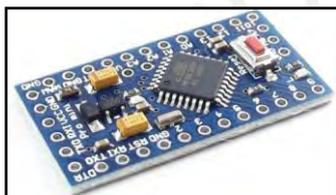
Revisando las opciones comerciales, se listan tres componentes en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16: Opciones comerciales para MCU de interfaz.

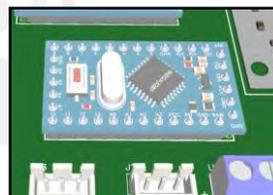
OPCIONES MCU DE INTERFAZ						
Modelo	Voltaje de operación (V)	Puertos GPIO	Puertos PWM	Puertos SPI	Puertos UART	Área (mm ²)
Arduino pro mini	5	14	6	1	1	594
Arduino nano	5	22	6	1	1	810
Arduino micro	5	20	7	1	1	864

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior, todas las opciones se ajustan a la tensión eléctrica y a la cantidad de puertos solicitados. Sin embargo, se considera la primera opción por ser de menor tamaño. El ensamble de la MCU en el sistema se muestra en la Figura 3.39 (b).



(a)



(b)

Figura 3.39: (a) Arduino Pro-mini y (b) Arduino Pro-mini en PCB.
Fuente:[39].

3.3.2.3. Procesamiento

A continuación, se procede con la selección de los componentes que pertenecen al dominio de procesamiento.

a. Microcontrolador procesamiento

Los criterios de selección de la MCU procesamiento deben ajustarse a todas las solicitudes que se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 3.30. Se requiere un microcontrolador con 4 puertos: dos de propósito general (GPIO), uno de tipo I2C y uno de tipo UART. En la Tabla 3.17 se presenta los criterios de selección.

Tabla 3.17: Criterios de selección de MCU para procesamiento de fuerza.

Criterio	Valor
Puertos GPIO	2
Puertos SPI	1
Puertos UART	1
Voltaje de operación	5V
Volumen	Mínimo

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior, se verifica que el microcontrolador Arduino Pro-mini es el que se ajusta a los criterios de selección de la Tabla 3.17. Se muestra el ensamble de la unidad MCU seleccionada en la figura 3.40.

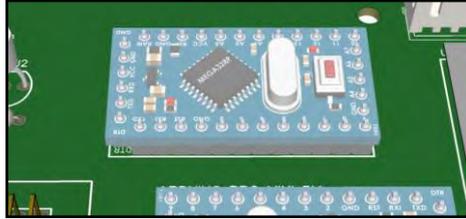


Figura 3.40: MCU de procesamiento Arduino Pro-mini sobre placa impresa.
Fuente: Elaboración propia.

b. Mini-PC

Para la mini-PC, se requiere de las mejores características tanto en procesamiento como en memoria que permitan estimar la posición de las articulaciones, en el menor tiempo posible, mediante un modelo de reconocimiento de articulaciones basado en técnicas de *deep learning*. Por ello, se propone que la mini PC cuente con un procesador de 4 núcleos, almacenamiento solido de 1GB y memoria RAM de 4GB. Se debe indicar, además, que los valores mencionados son requerimientos mínimos aceptables. Naturalmente, el modelo puede funcionar con mejores o menores características de procesamiento y memoria donde finalmente el tiempo de estimación será el que variará en función a la capacidad del dispositivo (requerimientos en Tabla 3.18).

Tabla 3.18: Opciones para mini-PC del dominio de Procesamiento.

OPCIONES PARA MINI-PC						
Modelo	Memoria RAM (GB)	Almacenamiento	Núcleos	Entradas USB 2.0	Conexión UART	Voltaje de alimentación
Raspberry Pi 4	4	Hasta 32GB	4	2	SI	5V
Orange Pi	1	hasta 32GB	4	2	SI	5V
Banana Pi	1	Hasta 64GB	2	2	SI	5V
UDOO Bolt V3	4	hasta 32GB	4	2	SI	19V

Fuente: Elaboración propia.

Revisando la Tabla 3.18, se observa que la primera y cuarta opción se ajusta al requerimiento de memoria RAM. También se aprecia que, de estas dos últimas, la primera se alimenta con una tensión eléctrica de 5V. Finalmente, se presenta la mini-PC

seleccionada en la Figura 3.41 (a); y el ensamble en el sistema, en la Figura 3.41 (b).

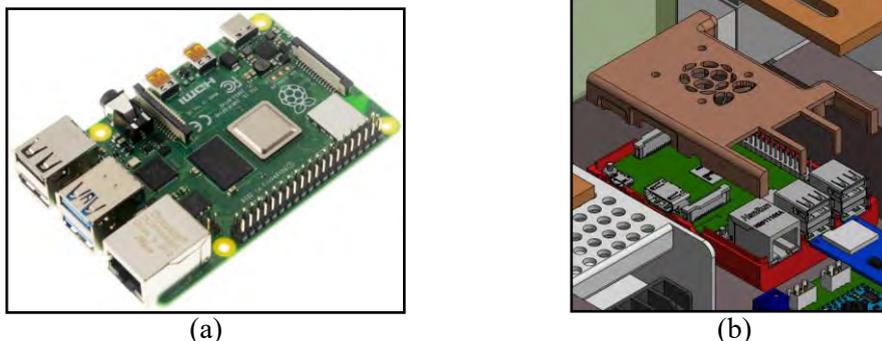


Figura 3.41: (a) mini-PC Raspberry Pi4 y (b) mini ordenador en caja electrónica.
Fuente: [40].

3.3.2.4. Energía

A continuación, se procede con la selección de los componentes que pertenecen al dominio de energía.

a. Interruptor a presión

Se requiere que el interruptor ON-OFF habilite el paso de la energía acondicionada cuando el usuario presione el botón del dispositivo mecánico y, posteriormente, entre a un estado de enganche (*latching state*) cuando el usuario lo abandone. Bajo la misma secuencia, se podrá deshabilitar el paso de la energía. También se requiere que el dispositivo resista a la corrosión, golpes y al accionar frecuente, ya que estará ensamblado en la parte externa de la estructura base. Los requerimientos se resumen en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19: Criterios de selección para interruptor a presión.

Criterio	Valor
Voltaje de alimentación	5V
Corriente	< 5A
Material	Resistente a golpes y corrosión

Fuente: Elaboración propia.

Según los requerimientos, se selecciona el interruptor a presión de la marca APIELE (Figura 3.42 (a)), que está construido de acero inoxidable. Además, según la ficha técnica del dispositivo en Anexo E, este es capaz de operar con una potencia eléctrica máxima de 60W, y contar con un diodo LED para indicar el estado de operación.

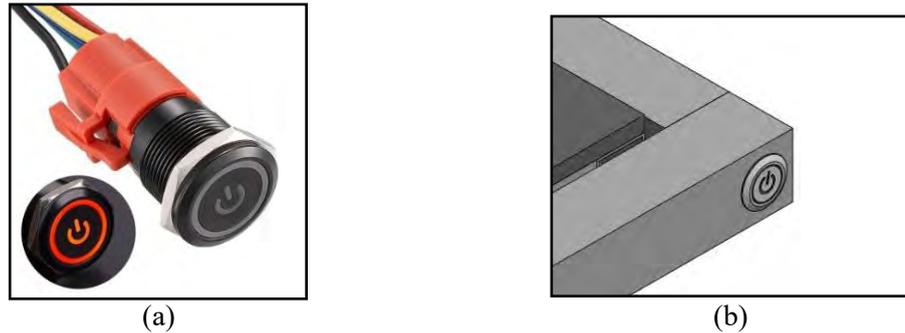


Figura 3.42: (a) Interruptor a presión APIELE e (b) interruptor en plataforma.
Fuente: [42].

b. Fuente de poder

La fuente de poder que se propone utilizar debe tener la capacidad de suministrar la suficiente potencia eléctrica para que el sistema pueda operar en su estado óptimo; es decir, se requiere una fuente de 5 V (parámetro que se tomó en cuenta durante el diseño eléctrico-electrónico del sistema). Luego, es necesario determinar la capacidad de corriente eléctrica requerida por el sistema. Para esto, primero se revisa la ficha técnica de cada componente. Además, dado que la información del consumo eléctrico para las celdas de carga se encuentra ausente en la ficha técnica, se propone analizar el circuito de la Figura 3.32 comenzando por hallar la resistencia equivalente para cada celda de carga (R_{TH}) mediante la relación 3.13.

$$R_{TH} = \frac{(R^2 - \Delta R^2)}{R}. \quad (3.13)$$

Considerando un $\Delta R \ll R$ en (3.13), se obtiene un R_{TH} igual a R ($1000 \pm 10 \Omega$). Con R_{TH} conocido, se procede a calcular la resistencia equivalente (R_{equ}) del circuito en paralelo conformado por las 8 celdas de carga mediante la siguiente relación:

$$\frac{1}{R_{equ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_8}.$$

Si se reemplazan las variables de la relación anterior por valores numéricos, se obtiene que R_{equ} es igual a 125Ω . Finalmente, con R_{equ} y el voltaje de operación del sistema mecatrónico aplicados en la ley de Ohm, se obtiene que el consumo de las 8 celdas de carga es igual a 40 mA. En la Tabla 3.20, el resumen del consumo eléctrico del sistema.

Tabla 3.20: Consumo eléctrico para elementos eléctricos.

Consumo para componentes eléctrico-electrónicos			
Dominio	Componente	Cantidad	Consumo (mA)
Interfaz	Módulo óptico	2	86
	Pantalla digital	1	360
	Módulo WS2812B	4	300
	Modulo SD	1	200
	MCU (Arduino)	1	10
	Celda de carga	8	40
Sensores	Cámara digital C270	1	500
	Módulo ADC HX-711	1	10
	MCU (Arduino)	1	10
Procesamiento	Mini-PC (Raspberry Pi4)	1	1280
	Interrupción a presión	1	15
Energía	Interrupción a presión	1	15
Consumo total			2.81 A

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior, se requiere una fuente de poder con capacidad de corriente igual a 2.81 A. Por lo anterior y debido a un factor de disponibilidad comercial, se propone utilizar una fuente de 5A y 5V. Ensamble del componente en Figura 3.43 (b).



(a)



(b)

Figura 3.43: (a) Fuente de poder conmutada de 5V, 5A y (b) Fuente en caja electrónica
Fuente: [43].

3.3.3. Diagramas esquemáticos y PCB

En la presente sección, se revisa los diagramas esquemáticos para cada componente que forma parte del diagrama de bloques (diagrama esquemático completo en Anexo H).

MCU Arduino mini Pro (Procesamiento)

En la Figura 3.44, se muestran las conexiones de la MCU Arduino Mini Pro (Procesamiento). Al respecto, este dispositivo recibe una tensión de 5V por el pin 21 y 23. Luego, la transferencia de datos de tipo I2C con el módulo ADC HX711 por los pines A4 (datos) y A5 (reloj); y la lectura de la señal UART procedente de la mini-PC por medio del pin 2 y la transmisión de datos (TX) hacia la MCU Interfaz, por el pin 1. Finalmente, la transmisión de datos hacia la mini-PC por el pin 15 y la lectura de la señal

de entrada digital procedente de la MCU de la interfaz por el pin 7.

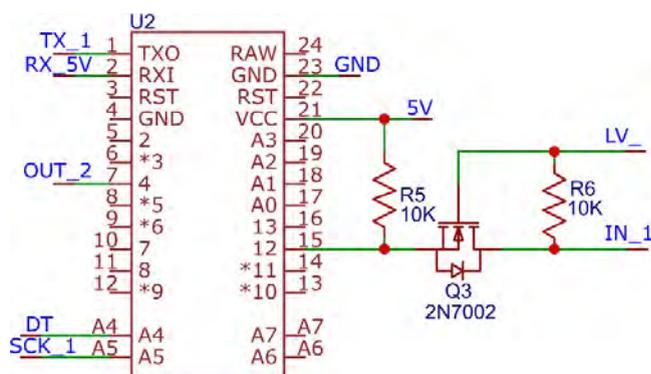


Figura 3.44: Diagrama esquemático de MCU Arduino Mini Pro (Procesamiento).
Fuente: Elaboración propia.

Mini-PC Raspberry Pi 4 (Procesamiento)

En la Figura 3.45, se muestran las conexiones de la mini-PC Raspberry Pi 4. Al respecto, el dispositivo se alimenta con una tensión de 5 V por el pin 4 y 6. Luego, el envío de datos (UART) hacia la MCU procesamiento por el pin 8, el cual requiere conectarse a un circuito convertidor de tensión (3.3->5V). Finalmente, se realiza la lectura de la señal digital procedente de la MCU procesamiento por el pin 16 (GPIO).

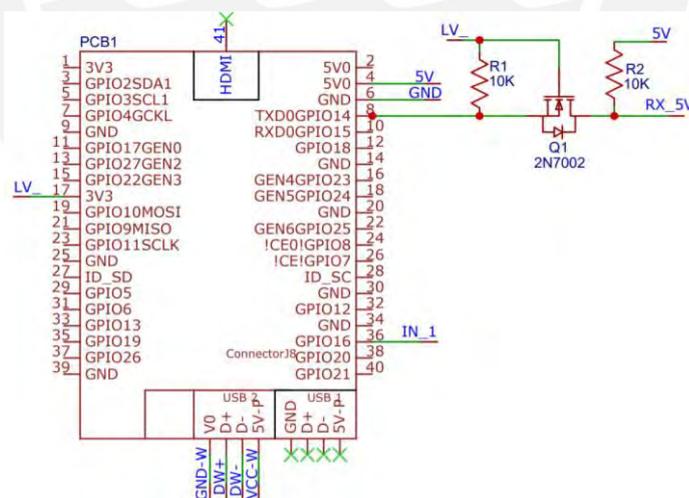


Figura 3.45: Diagrama esquemático mini-PC.
Fuente: Elaboración propia.

Módulo ADC HX711

En la Figura 3.46, se muestran las conexiones que pertenecen al módulo amplificador HX711. Por el lado derecho de la figura, ingresan las señales analógicas de fuerza por los pines A+ y A-; y, por los pines E- y E+, se proporciona la tensión eléctrica

(V_{Exc}) al conjunto de celdas. Luego, por el lado izquierdo, se muestran los puertos que se utilizan para la comunicación I2C con la MCU procesamiento, donde el puerto SCK_1 funciona como reloj de transmisión; y, el puerto DT, como canal de datos. Finalmente, la energía ingresa al módulo HX711 por los pines VCC y GND.

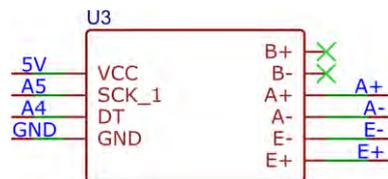


Figura 3.46: Diagrama esquemático módulo HX711.
Fuente: Elaboración propia.

Arreglo de celdas de carga

En la Figura 3.47, se muestra el diagrama esquemático de las 8 celdas de carga (J1-J8), donde cada una se conforma por 4 galgas extensiométricas en configuración *Wheatstone Bridge*. Sobre las conexiones, los pines E+ y E- se utilizan para energizar el circuito de Figura 3.47; y, los pines A+ y A-, para obtener la señal analógica de fuerza.

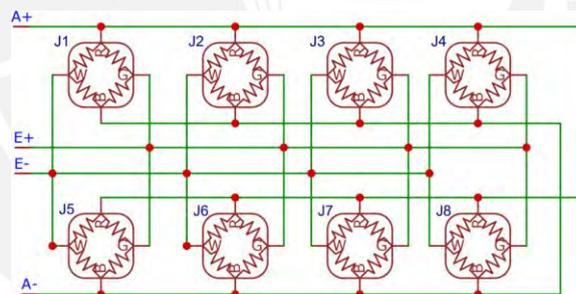


Figura 3.47: Diagrama esquemático de celdas de carga.
Fuente: Elaboración propia.

Cámara digital

En la Figura 3.48, se muestra el diagrama esquemático de la cámara digital, donde se encuentran las 4 conexiones que forman parte del protocolo de comunicación USB. Así, los pines 1 y 4 para la alimentación de 5V, y los pines 2 y 3 para los datos.

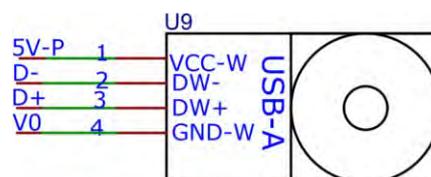


Figura 3.48: Diagrama esquemático cámara digital.
Fuente: Elaboración propia.

MCU Arduino mini Pro (Interfaz)

En la Figura 3.49, se muestra el diagrama esquemático de la MCU Interfaz. El dispositivo recibe una tensión de 5V por los pines 23 y 21. La lectura de las señales (UART) enviadas por la MCU Procesamiento, por el pin 2. Para la transmisión de datos, de tipo SPI, entre la MCU con la pantalla y el módulo SD, se utilizan los pines 13,14,15 y 16. Para el manejo del *driver* WS2812B del módulo LED, se cuenta con el pin 6. La lectura de las señales digitales enviadas por los sensores ópticos, por los pines 10 y 11. Y la lectura de la señal digital procedente de la MCU Procesamiento, por el pin 5.

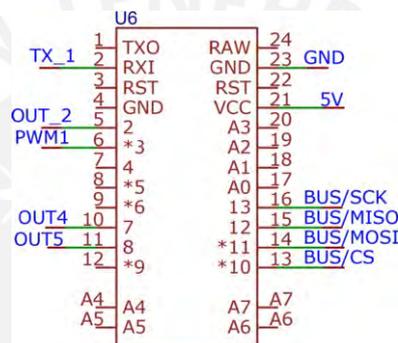


Figura 3.49: Diagrama esquemático MCU Arduino Mini Pro (Interfaz).
Fuente: Elaboración propia.

Pantalla LCD 128x64

En la Figura 3.50, se muestra el diagrama esquemático de la pantalla LCD la cual se logra controlar utilizando 8 pines. La energía ingresa por los pines 1 (GND) y 2 (VCC). Así mismo, el control de la intensidad de luz se realiza por los pines 19 (BLA) y 20 (BLK). Sobre las conexiones de tipo datos, se cuenta con los pines 4 (RS), 5 (R/W) y 6 (E) para la comunicación SPI con la MCU Arduino Mini Pro del dominio de la interfaz.

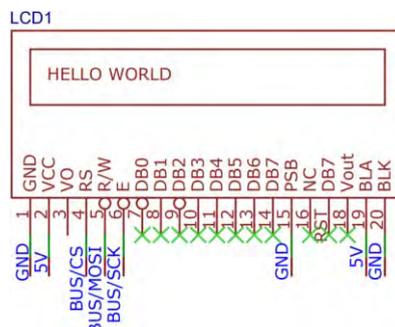


Figura 3.50: Diagrama esquemático pantalla LCD 128x64.
Fuente: Elaboración propia.

Módulo lector SD

En la Figura 3.51, se presenta el diagrama esquemático del módulo SD el cual recibe 5V por los pines 5 y 6. La comunicación (SPI) con la MCU Interfaz, por los pines 1 (CS), 2 (SCK), 3 (MOSI) y 4 (MISO).

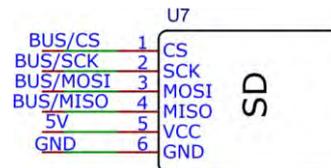


Figura 3.51: Diagrama esquemático modulo SD.
Fuente: Elaboración propia.

Módulo óptico IR

En la Figura 3.52, se muestra el diagrama esquemático de los dos módulos ópticos que se utilizan para ingresar las señales de control al sistema. Ambos módulos se alimentan con una tensión de 5V por los pines 1 y 3; así mismo, emiten una señal digital en alta, por el pin 2, cuando existe presencia de algún objeto frente a los sensores infrarrojos. Estas dos señales digitales ingresan a la MCU Interfaz por los pines 10 y 11.



Figura 3.52: Diagrama esquemático módulos ópticos IR.
Fuente: Elaboración propia.

Interruptor a presión

En la Figura 3.53, se muestra el diagrama esquemático del interruptor a presión NO (*Normally Open*), que se conecta a la fuente de poder por los pines 1 (GND) y 2 (5V). Naturalmente, cuando el interruptor cambia de estado a NC (*Normally closed*), se obtiene una diferencia de tensión entre los pines 4 y 3. Finalmente, se debe indicar que el interruptor cuenta con un diodo LED (entre los pines 2 y 3) conectado en serie al sistema, esto último para indicar el paso de la energía hacia el sistema.

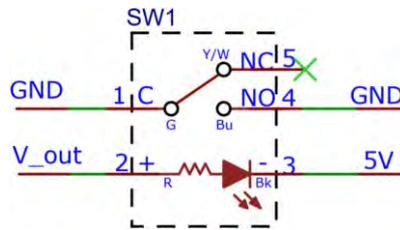


Figura 3.53: Diagrama esquemático del interruptor a presión.
Fuente: Elaboración propia.

Arreglo de módulos LED

En la Figura 3.54, se muestra el diagrama de conexiones de los módulos LED, los cuales se alimentan con una tensión de 5V. Para la recepción de señal PWM se cuenta con el pin 2 del módulo LED1. Para la transmisión de datos entre módulos, se utiliza un circuito en serie, donde el pin 4 de cada módulo se conecta al pin 2 del siguiente módulo, tal como se muestra en la Figura 3.54.

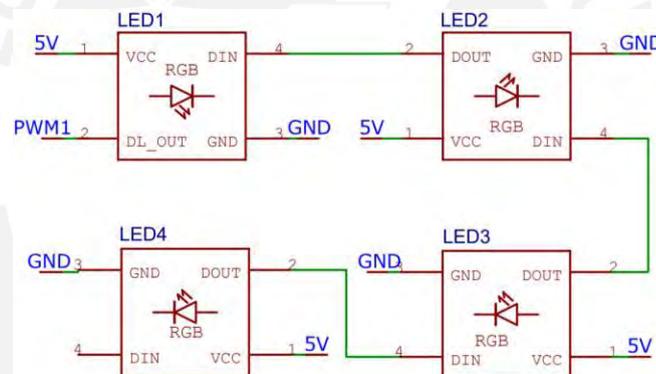


Figura 3.54: Diagrama esquemático arreglo de módulos LED.
Fuente: Elaboración propia.

PCB

En esta sección, se revisa el diseño de la tarjeta impresa que sujeta los componentes que no cuentan con una estructura propia para ser ensamblados hacia la caja electrónica. Así, se mencionan a las dos unidades MCU Arduino Mini Pro, el módulo amplificador HX711 y el circuito de conversión bidireccional de nivel lógico (5V-3.3V). A todo esto, se debe mencionar a los conectores JST que se utilizan para conectarse con la mini-PC, con el arreglo de celdas de carga, con los interruptores ópticos y con el conjunto de módulos LED. El diseño final del circuito impreso se presenta en la Figura 3.55.

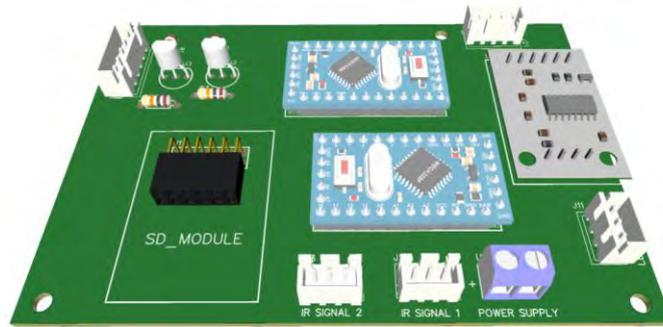


Figura 3.55: Vista frontal de circuito impreso.
Fuente: Elaboración propia.

Para la fabricación, se propone que el circuito impreso esté compuesto por una sola capa de conducción de cobre en la parte inferior de la tarjeta. También se sugiere que los *pads* sean circulares con un diámetro de 2 mm y cuente con agujeros de 0.6 mm de diámetro, y que el ancho de los caminos (*nets*) mida 1.5 mm. La parte inferior del circuito impreso se muestra en la Figura 3.63.

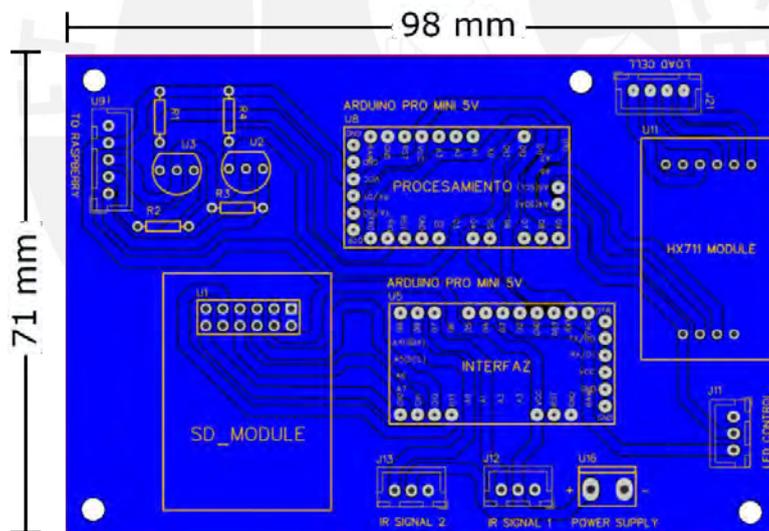


Figura 3.56: Vista inferior de circuito impreso.
Fuente. Elaboración propia.

34 Diseño del software

En la presente sección, se desarrolla el diseño del software para los procesos que se ejecutan dentro de la MCU Interfaz, MCU Procesamiento y mini-PC, esto mediante diagramas de flujo. Luego, en la segunda parte, se desarrolla el diseño de los algoritmos involucrados en la transformación de las señales de fuerza (filtración, cálculo de potencia

mecánica y nivel de dispersión de esta última variable), y el de los algoritmos de validación del CMJ (perpendicularidad de rodilla y verticalidad del torso).

3.4.1. Diagramas de flujo

Los diagramas de flujo, que se presentan a continuación, solo incluyen la línea *master* que se ejecuta en cada unidad de procesamiento. Es decir, se aborda, únicamente, el bucle cerrado **main()** (funciones del bucle en Anexo G.5).

a. MCU Interfaz

Como se indica en la matriz morfológica, el diseño del *software* se desarrolla bajo el método POO (programación orientada a objetos). Por ello, se propone contar con dos clases para la MCU Interfaz (ver Figura 3.57).

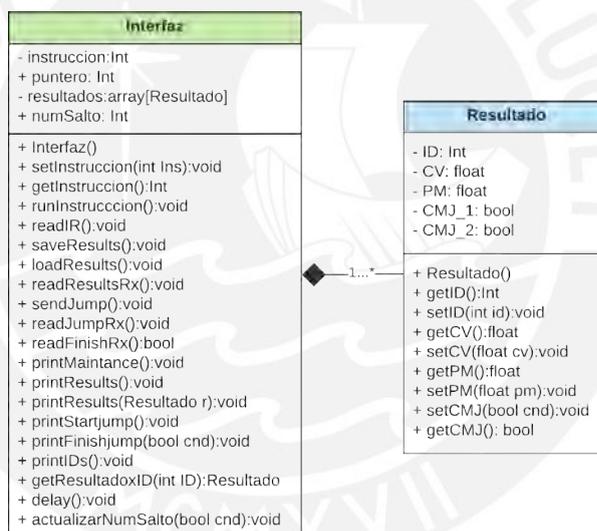


Figura 3.57: Diagrama UML interfaz.

Fuente: Elaboración propia.

Antes de revisar el diseño de la línea *master* **main()**, es importante mencionar que el atributo **instrucción** de la clase Interfaz se utiliza para etiquetar los 4 estados del proceso principal: 0 para “bloquear sistema”, 1 para “seleccionar el tipo de operación”, 2 para “medir nivel de fatiga” y 3 para “revisar resultados pasados”. Se recomienda revisar la descripción de los métodos de la Figura 3.57 en Anexo G.2. Luego, en la Figura 3.58 (a), se presenta los procesos que se ejecutan antes de la línea *master*. En esta etapa, se utiliza una función *callback* que se activa cuando no existe presencia sobre la

plataforma; es decir, se ingresa al estado “bloquear sistema” (ver Figura 3.58 (b)).

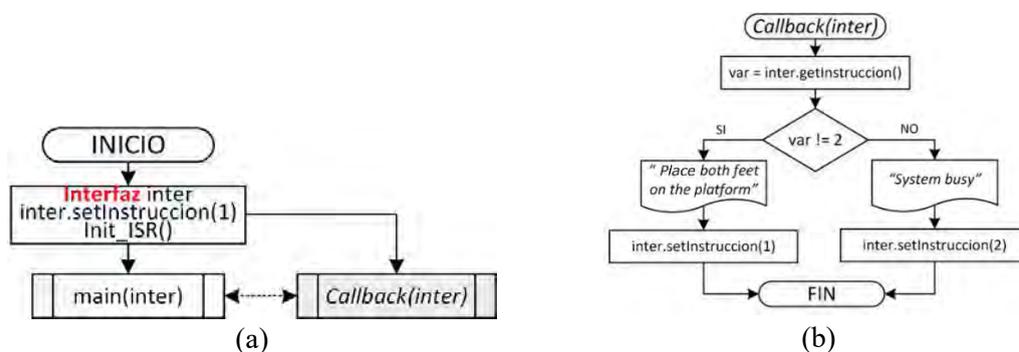


Figura 3.58: (a) Secuencias previas y (b) función de interrupción *callback*.

Fuente: Elaboración propia.

La línea `main()`, de la Figura 3.59, ejecuta el método `showOptions()` como primer estado de la MCU (1). El siguiente paso es verificar que el valor del atributo **instrucción** se mantenga en 1 con el fin de iniciar la lectura de los módulos infrarrojos por medio del método `readIR()`, este último varia los valores del atributo **puntero** e **instrucción**. Después, con el valor **instrucción** actualizado, se pasa a ejecutar el proceso que corresponde a dicha etapa: un valor de 2 para medir el nivel de fatiga (borde morado en el diagrama de la Figura 3.66); y 3, para revisar las mediciones pasadas (borde verde en el diagrama de la Figura 3.65). La medición de la fatiga inicia enviando la intención de salto a la MCU Procesamiento; luego, se espera la respuesta de este último componente mediante el método `readJumpRx()` con el fin de indicar, por pantalla, que el sistema se encuentra listo para la medición mediante el método `printStartJump()`. Tras cada salto, se lee la señal de retorno de la MCU Procesamiento mediante el método `ReadFinishRx()` con el objetivo de evaluar si el salto fue satisfactorio y, ante una respuesta positiva, se incrementa en uno el atributo **numSalto**. Este proceso se repite 6 veces hasta recibir todos los resultados, proyectarlos y almacenarlos en memoria mediante los métodos `readResultsRx()`, `saveResults()` y `printResults()`, respectivamente.

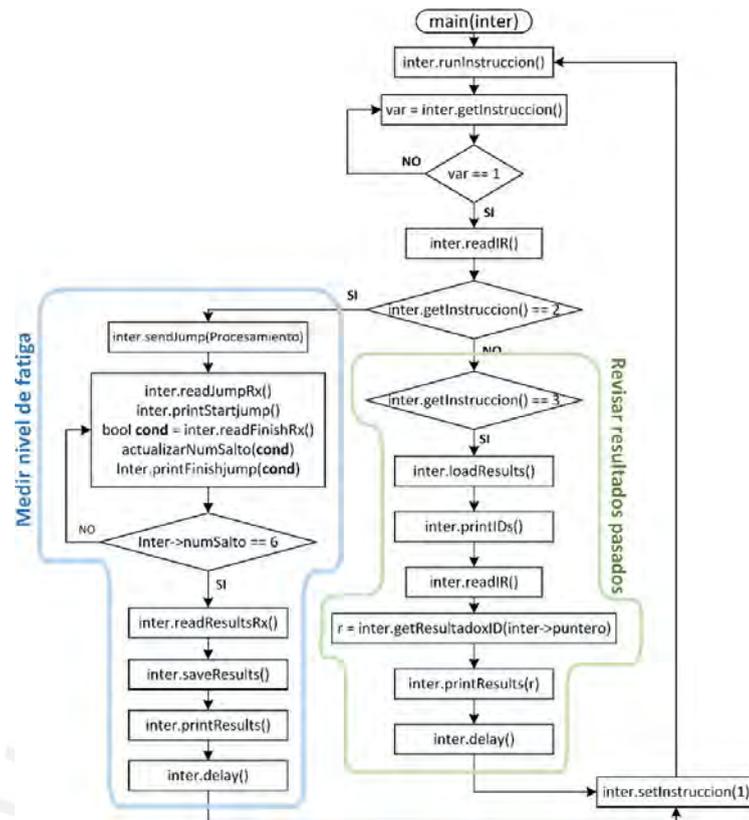


Figura 3.59: Hilo de ejecución principal de la MCU Interfaz.
Fuente: Elaboración propia.

b. MCU Procesamiento

En este apartado, se revisa el diseño de la línea *master* de la MCU procesamiento. Para esto, se propone utilizar 3 clases: Procesamiento, Mediciones y la clase HX711, esta última implementada en la librería HX711.h de Tob Tillaart [44]. En la Figura 3.60 se muestran los 6 atributos de la clase Procesamiento. La primera de ellas (**instrucción**) funciona igual que el atributo de la clase Interfaz; la segunda (**resultado**) se compone de un arreglo de objetos de tipo **Medición**, objetos que almacenan los valores de la potencia mecánica (PM) y los resultados de validación del CMJ; el tercer atributo (**fuerza**) es un arreglo bidimensional con el objetivo de almacenar valores de fuerza y tiempo; finalmente, el atributo **CV** (Coeficiente de Variabilidad) e **ID** para el nivel de dispersión de la potencia mecánica y para el código de identificación de la serie saltos, respectivamente. La descripción de los métodos de la clase Procesamiento y Medición se pueden revisar en Anexo G.3.

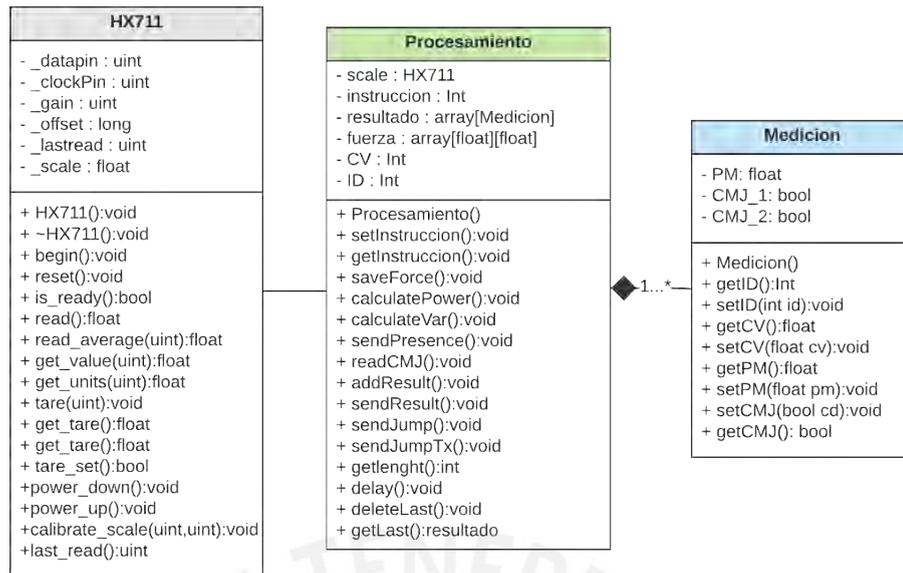


Figura 3.60: Diagrama UML Procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.61, se define las etapas previas a la línea master. Dentro de estas, se recurre a una función *callback* la cual se llama cuando se detecta el ingreso de la señal de inicio de prueba proveniente de la MCU interfaz. La función *callback* se encarga de cambiar el valor del atributo **instrucción** de 0 a 1 mediante el método **setInstruccion(1)**. Luego, se envía la señal de inicio de medición a la MCU interfaz y mini-PC mediante los métodos **sendJumpTx()** y **sendJump()** (ver Figura 3.61 (b)).

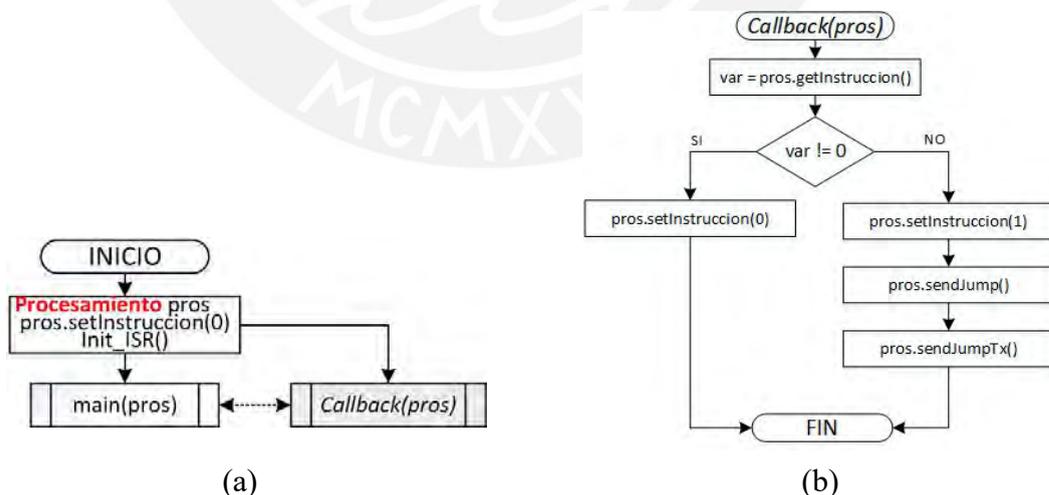


Figura 3.61: Hilo post ejecución de línea master y (b) función *callback*.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3.62, la línea master **main()** de la MCU Procesamiento inicia comunicando a la MCU Interfaz si existe presencia sobre la plataforma, esto con el

método **sendPresence()**. Luego, se verifica que el valor del atributo **instrucción** sea mayor o igual a 1 para iniciar con la lectura, filtración y almacenamiento de las señales de fuerza mediante el método **saveForce()**. Una vez con los datos de fuerza almacenados, se procede a comunicar el final de la etapa de mediciones a la unidad mini-PC con el objetivo de iniciar la validación del CMJ mediante el método **sendFinish()**. Se continúa con el cálculo de la potencia mecánica máxima utilizando el método **calculatePower()** y se espera la señal con los resultados de validación del CMJ provenientes de la mini-PC mediante el método **readCMJ()**. Tanto el resultado de validación del CMJ como el valor de la potencia mecánica máxima se almacenan en el atributo **resultado** mediante el método **addResult()**. Para el caso de que el **resultado** sea correcto, se envía la señal de fin de salto hacia la MCU interfaz mediante el método **sendFinishTx(True)**.

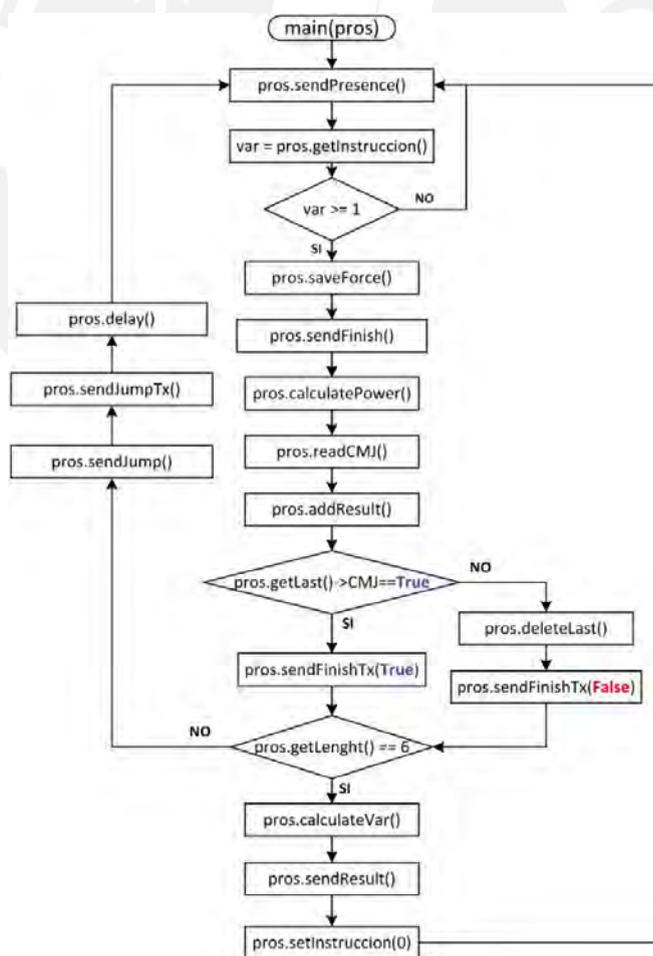


Figura 3.62: Hilo de ejecución principal de la MCU Procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

c. Mini-PC

La mini-PC cuenta con una sola clase que se compone de 8 atributos y 14 métodos (descripción de métodos en Anexo G.4). El primer atributo (**instrucción**) sirve para etiquetar las etapas que pertenecen al proceso principal; el atributo **knee_angles** y **back_angles**, para almacenar los ángulos que se generan entre los segmentos cadera-rodilla-tobillo y los segmentos hombro-tobillo y la línea vertical que pasa por esta última articulación, respectivamente; el atributo **model**, representa el modelo de estimación de pose; el atributo **cv2**, representa las clases de la librería OpenCv; y los atributos **CMJ_1** y **CMJ_2**, que almacenan los resultados de validación del CMJ (ver Figura 3.63).

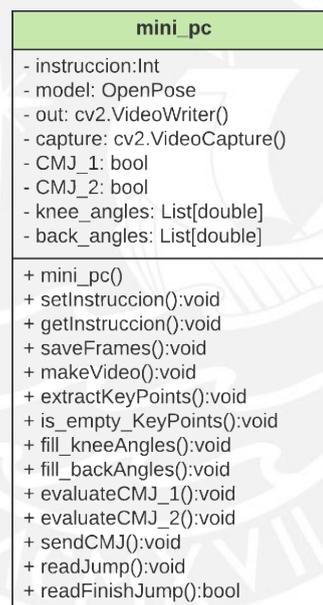


Figura 3.63: Diagrama UML mini-PC.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.64, se indican los procesos previos a la función **main()**. Es decir, se inicia creando el objeto **mini** (tipo **mini_pc**) y se asigna en 0 al atributo **instrucción**.



Figura 3.64: Configuración de condiciones iniciales en mini-PC.

Fuente: Elaboración propia.

El hilo principal **main()** de la mini-PC empieza con la lectura de la señal de inicio de prueba procedente de la MCU Procesamiento, donde el valor de **instrucción** cambia a 1 para el caso de una señal positiva. De esta manera, se le indica al sistema que inicie con el registro de los *frames* de video hasta que se reciba la señal de fin de salto de la MCU Procesamiento, mediante el método **readFinishJump()**. Luego, los *frames* pasan por un proceso de integración, mediante el método **makeVideo()**, con el fin de obtener un video que sirva de argumento para el modelo de reconocimiento de articulaciones. Con el video, el método **extractKeyJoints()** obtiene los ángulos de interés que se generan en la rodilla y el torso del usuario, ángulos almacenados en los atributos **knee_Angles** y **back_Angles**. Finalmente, se evalúa el CMJ utilizando **evaluateCMJ()**, y se envía el resultado a la MCU Procesamiento mediante el método **sendCMJ()** (ver Figura 3.65).

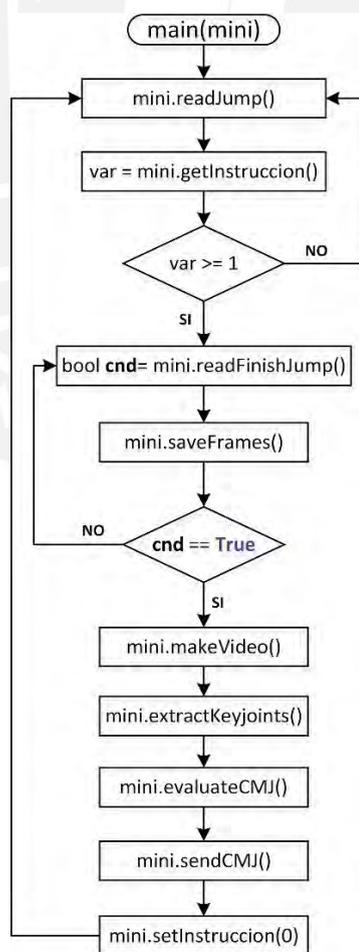


Figura 3.65: Hilo de ejecución principal de la unidad mini-PC.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Algoritmos de procesamiento de fuerza

En la presente, se diseñan los algoritmos de transformación de las señales de fuerza. Es decir, se define al atenuador de ruido, el algoritmo para el cálculo de la potencia mecánica máxima y para el cálculo del nivel de dispersión de esta última variable.

a. Filtro digital de atenuación de ruido

Para atenuar el ruido agregado en la señal digital de fuerza captada por los sensores, se propone utilizar un filtro pasa bajos FIR, ya que este es siempre estable y se puede implementar en un *hardware* con baja capacidad de procesamiento. Con el fin de obtener la frecuencia de corte, se revisa el estudio de Wang et al. [45], quienes sostienen que las señales por debajo de los 20 Hz son las que representan a la fuerza entre el pie de una persona y la plataforma de fuerza. Por ello, se propone que el filtro FIR discrimine las señales por encima de los 5 Hz. La relación 3.14, representa al filtro FIR requerido.

$$F(z) = \sum_{k=0}^{M-1} a[k] \cdot z^k. \quad (3.14)$$

Con el fin de obtener los coeficientes $a[k]$ del filtro 3.14, se recurre al *software* online TFilter [46] el cual recibe 4 argumentos para el diseño: frecuencia de muestreo igual a 160 Hz, ganancia de 1 (0 dB) en banda de paso (0-5Hz), banda de transición entre 5 y 15 Hz, ganancia de 0.003162 (-50 dB) para banda de rechazo. La respuesta del filtro diseñado en el dominio de la frecuencia se muestra en la Figura 3.66.

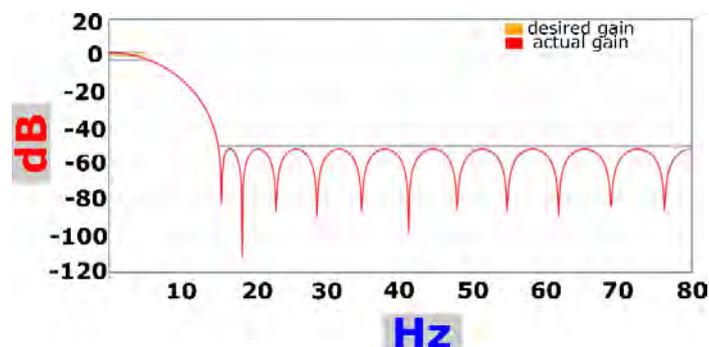


Figura 3.66: Respuesta de filtro FIR en dominio de frecuencia.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene 25 coeficientes para el filtro FIR agrupados dentro del vector $\mathbf{a}[\mathbf{k}] = [0.0010, 0.0050, 0.0087, 0.0155, 0.0242, 0.0349, 0.0471, 0.060, 0.0727, 0.0841, 0.0932, 0.0990, 0.1010, 0.0990, 0.0932, 0.0841, 0.0727, 0.060, 0.0471, 0.0349, 0.0242, 0.0155, 0.0087, 0.0050, 0.0010]$.

b. Detección de fase concéntrica en señales discretas de fuerza

El diseño del presente algoritmo parte de la necesidad de identificar la fase del CMJ donde ocurre la mayor potencia mecánica, que, según la bibliografía, se presenta durante la fase concéntrica del salto. De igual forma, es importante mencionar que la aplicación del presente algoritmo será efectivo luego del proceso de atenuación de las señales digitales de fuerza. Entonces, se presenta la propuesta en la Figura 3.67:

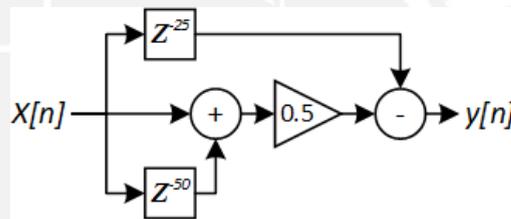


Figura 3.67: Algoritmo de detección de fase concéntrica.
Fuente: Elaboración Propia.

Con el algoritmo anterior, se propone ubicar los vértices de las dos primeras parábolas que se forman durante el desarrollo estándar de fuerza del CMJ, donde cada una indica el inicio y fin de la fase concéntrica. Para ubicar dichos vértices, el algoritmo busca, en primer lugar, obtener la media del valor presente de fuerza con el valor ubicado 50 muestras por detrás, este proceso para cada muestra $\mathbf{X}[\mathbf{n}]$. Por último, se calcula la diferencia entre la media calculada y el valor ubicado 25 muestras por detrás dando como resultado el valor $\mathbf{y}[\mathbf{n}]$. Entonces, comparando este último valor con un umbral (*threshold*), se logra detectar el vértice de interés.

c. Modelamiento de señales discretas de fuerza

Ahora, se necesita de una señal continua de fuerza que pueda ser tratada con el fin

de obtener la potencia mecánica máxima. Para esto, se propone diseñar un algoritmo de regresión de orden 2 tal como se expresa a continuación:

$$F(t) = at^2 + bt^1 + c.$$

Se utiliza el método de mínimos cuadrados para hallar los coeficientes de la ecuación cuadrática. Para esto, se resuelve la relación 3.15:

$$\begin{bmatrix} \sum F \\ \sum F \cdot Y \\ \sum F^2 \cdot Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum t^2 & \sum t & n \\ \sum t^3 & \sum t^2 & \sum t \\ \sum t^4 & \sum t^3 & \sum t^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

d. Cálculo de la potencia mecánica máxima

La potencia mecánica de interés se desarrolla durante la fase concéntrica, ya que la energía neuromuscular del tren inferior se libera en mayor proporción durante esta etapa. Luego, debido a que la aceleración no es constante durante el ascenso en la fase concéntrica, se procede a calcular la potencia mecánica para pequeños intervalos de tiempo (potencia instantánea) mediante la relación 3.16.

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} F \cdot \frac{\Delta r}{\Delta t} = F(t) * v. \quad (3.16)$$

Con la segunda ley de Newton, se logra expresar la variable v en función a t :

$$F(t) = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

$$F(t) \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v,$$

$$\frac{1}{m} \int F(t) \cdot \Delta t = \int \Delta v.$$

Integrando la última relación en un intervalo de 0 m/s (fase isométrica) hasta V para Δv , se obtiene la velocidad en función al tiempo tal como se indica en (3.17).

$$\frac{1}{m} \cdot \int F(t) \cdot \Delta t = v. \quad (3.17)$$

Reemplazando la relación 3.17 en 3.16, se obtiene la siguiente ecuación:

$$P(t) = \frac{1}{m} \cdot \int F^2(t) \cdot \Delta t. \quad (3.18)$$

e. Cálculo del nivel de dispersión

En esta sección, se revisa el algoritmo que permita obtener el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima. Para ello, se propone utilizar la desviación estándar de la variable de interés $P[k]$ respecto a su media; es decir, se calcula el coeficiente de variación (CV). Así, la definición del CV se presenta en la siguiente relación:

$$CV = \frac{S_P}{\bar{P}} \cdot 100\%. \quad (3.19)$$

Donde la desviación típica (S_P) se define como:

$$S_P = \sqrt{\frac{(P[1] - \bar{P})^2 + \dots + (P[6] - \bar{P})^2}{n}}. \quad (3.20)$$

Y el denominador \bar{P} en (3.19) representa la media aritmética de los valores de potencia mecánica máxima obtenidos en cada salto de las n repeticiones:

$$\bar{P} = \frac{P[1] + \dots + P[n]}{n}.$$

3.4.3. Algoritmos de validación del CMJ

A continuación, se revisan los algoritmos para verificar la perpendicularidad de la rodilla durante la isometría y la verticalidad del torso durante la fase concéntrica.

a. Perpendicularidad de rodilla durante isometría

Para validar la perpendicularidad de rodilla, primero es necesario obtener el ángulo presente en los segmentos cadera-rodilla y rodilla-tobillo. Para ello, se define la posición de las articulaciones de interés en el espacio bidimensional según los pares (x_c, y_c) , (x_r, y_r) y (x_t, y_t) , desde la cadera hasta el tobillo respectivamente. Entonces, con la relación 3.21, se procede a hallar el ángulo de rodilla θ_r .

$$\theta_r = \tan^{-1} \left| \frac{\frac{y_t - y_r}{x_t - x_r} - \frac{y_c - y_r}{x_c - x_r}}{1 + \frac{y_t - y_r}{x_t - x_r} \cdot \frac{y_c - y_r}{x_c - x_r}} \right|. \quad (3.21)$$

Al evaluar los *frames* de video en la relación 3.21, se obtiene los ángulos de rodilla dentro del vector $\theta_j[n]$. Después, como se revisó, el ángulo de rodilla debe alcanzar aproximadamente los 90° durante la isometría, donde este valor puede ser significativamente mayor o menor ante una mala ejecución. Con esta consideración, se propone diseñar un algoritmo que verifique la perpendicularidad considerando un margen de tolerancia con el fin de validar este primer requerimiento. Entonces, se propone una tolerancia de $90^\circ \pm 10$. Se presenta el algoritmo de interés en la Figura 3.68.

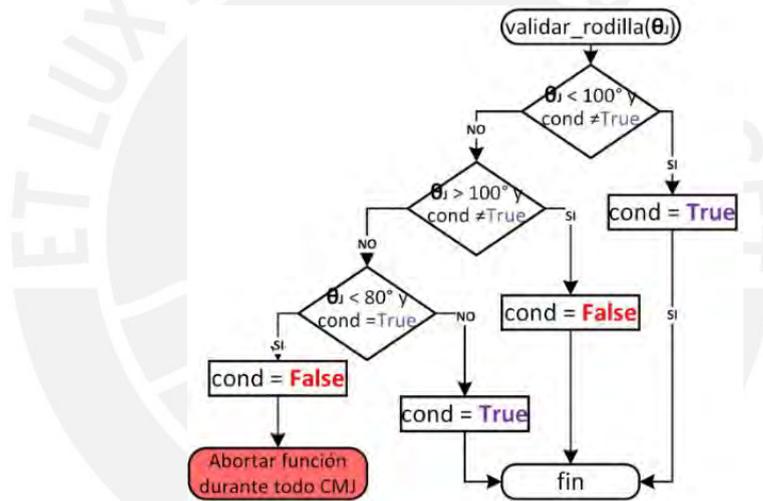


Figura 3.68: Algoritmo de validación de perpendicularidad de rodilla durante isometría.
Fuente: Elaboración propia.

El método de la clase Procesamiento que alberga el algoritmo de la Figura 3.68 se define con el nombre **validar_rodilla()**. Este último cuenta con una variable lógica global **cond** la cual se coloca en alta cuando se logra validar el primer requerimiento.

b. Verticalidad de torso durante fase concéntrica

El segundo algoritmo debe verificar la verticalidad del torso. Para ello, es necesario identificar los requisitos geométricos que serán considerados durante el diseño del algoritmo. Así, se propone revisar un caso análogo al CMJ: la cinemática de un resorte en extensión vertical como se presenta en la figura 3.69. En esta, se puede evidenciar que

es importante contar con los extremos del componente sobre un eje vertical. Para el caso del CMJ, la zona pie-piso definirá el cruce por donde debe pasar el eje vertical (referencia); y el extremo superior (hombro), para verificar la inclinación.

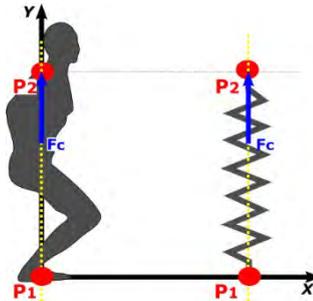


Figura 3.69: Representación análoga de la fase concéntrica del CMJ.
Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó, se evaluará la inclinación del torso utilizando como argumento el ángulo que se genera por la intercepción del segmento vertical que pasa por el tobillo (punto detectable más cercano a la zona de contacto pie-piso) y el segmento tobillo-hombro. Todos los ángulos obtenidos del video se almacenan dentro del vector $\theta_w[n]$. Además, se aceptará un margen de tolerancia de $\pm 10^\circ$. Diseño final de algoritmo en Figura 3.70.

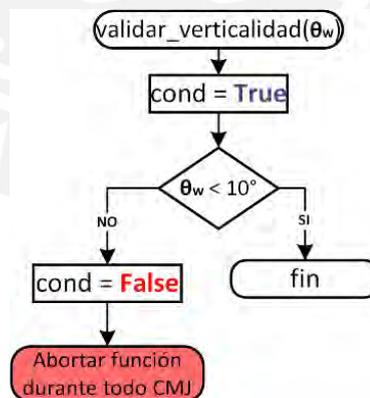


Figura 3.70: Algoritmo de validación de verticalidad de torso.
Fuente: Elaboración propia.

4. Implementación de los algoritmos de procesamiento

En el presente capítulo, se aborda la implementación y prueba de los algoritmos de transformación de las señales de fuerza, desde la adquisición hasta cálculo del nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima (variable que determina el nivel de fatiga). En la segunda parte, se abarca la implementación y prueba de los algoritmos de validación del CMJ, desde la lectura de los *frames* de video hasta la verificación del CMJ.

4.1. Prueba de algoritmos de procesamiento de señales de fuerza

La implementación y prueba de los algoritmos de señales de fuerza se componen de 4 etapas: filtración y detección de fase concéntrica en CMJ, modelamiento, cálculo de potencia mecánica máxima y cálculo del nivel de fatiga neuromuscular (nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima). Cabe indicar que la lectura de señales de fuerza no se contempla en la presente, ya que se cuenta con la clase HX71.

4.1.1. Filtración y almacenamiento de señales de fuerza

a. Componentes

Para el proceso de atenuación de ruido se utiliza el filtro pasa bajos elaborado en el apartado 3.4.2. También es necesario implementar el prototipo en configuración [**sensor de fuerza**] – [**celda de carga**] – [**modulo acondicionador**] – [**MCU Procesamiento**]. Las características del conjunto [**sensor de fuerza**]–[**celda de carga**], que se propone utilizar para la etapa de prueba, se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Comparación entre celda de carga seleccionada y de prueba.

Especificaciones	Valor
Capacidad (kgf)	10
Rated Output(mV/V)	1.0
Safe Overload (%FS)	120
Ultimate Overload(%FS)	150
Zero Balance(%FS)	±0.1
Creep(%FS)	±0.074 /30min
Input Resistance(Ω)	1000
Input Resistance(Ω)	1000
Insulation Resistance(M Ω)	≥ 2000

Fuente: [47].

Así, el prototipo requerido se presenta en la Figura 4.1. En esta, se cuenta con **la**

celda de carga en paralelo, la unidad de procesamiento **Arduino Pro Mini** para la lectura de las señales digitales de fuerza, y también con el **módulo acondicionador HX711**, que amplifica la señal analógica de los sensores de fuerza y envía la señal digitalizada de 24 bits hacia la unidad de procesamiento.

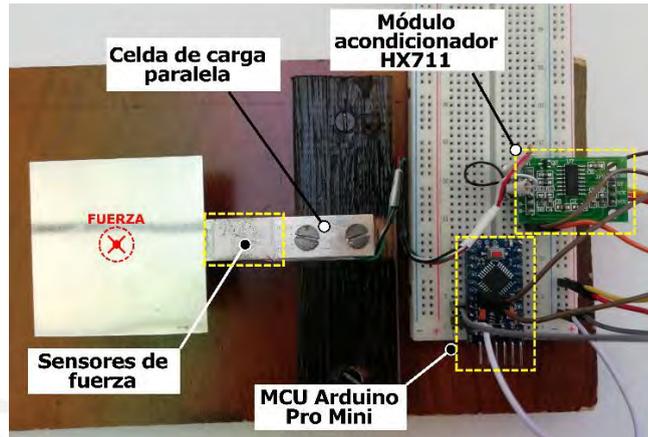


Figura 4.1: Configuración de componentes para prueba de atenuación de ruido.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para ingresar las señales de fuerza, se propone utilizar 5 pesas de calibración que permitan variar la fuerza aplicada sobre el conjunto celda-transductor en el rango de 0.002 a 0.05 kgf (pesas en Figura 4.2).



Figura 4.2: Pesas de calibración para prueba de atenuación de ruido.
Fuente: Elaboración propia.

b. Resultados de atenuación de ruido

A continuación, se revisan los resultados del experimento con las pesas de calibración. Es decir, se realizó la medición de fuerza luego de agregar las pesas sobre la celda de manera secuencial y ascendente desde el reposo: 2gf, 30gf, 50gf y 100gf. En la Figura 4.3, se presente los resultados obtenidos. Así, se concluye que el ruido es

perceptible en el orden de los 0.002 kgf.

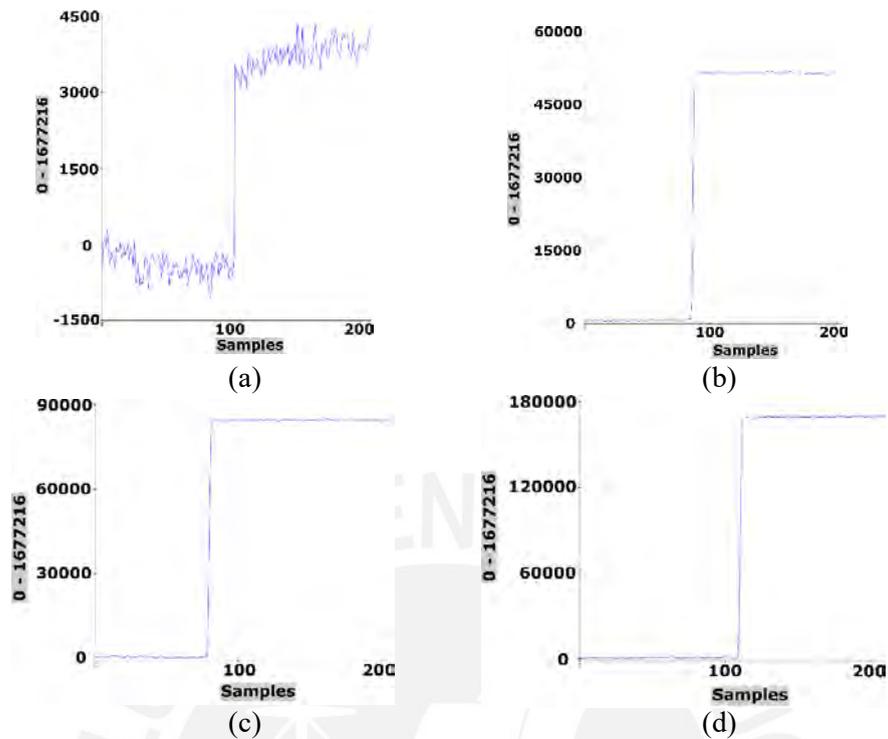


Figura 4.3: Lectura de señales de fuerza: (a) 2gf, (b) 30gf, (c) 50gf y (d) 100gf.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se procede a evaluar las señales de la Figura 4.3 con el método `process_value()` de la clase `Procesamiento`. Los resultados se observan en la Figura 4.4.

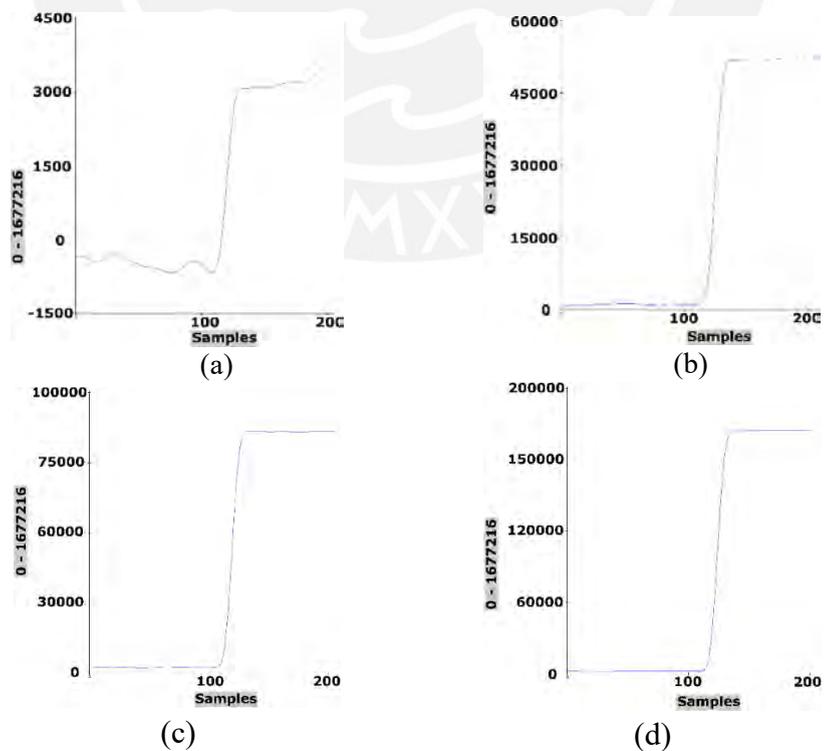


Figura 4.4: Señal de fuerza atenuada por filtro FIR: (a) 2gf, (b) 30gf, (c) 50gf y (d) 100gf.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se aprecia que el filtro diseñado logra atenuar las señales con frecuencias mayores a los 5 Hz (ver caso atenuado de señal en figura 4.3 (a)).

c. Detección de fase concéntrica del CMJ

Para la detección de la fase concéntrica, es necesario implementar un generador analógico de señales que permita simular el desarrollo de la fuerza pie-piso durante el CMJ. El generador propuesto, presente en la Figura 4.5, se conforma de una **MCU Generador de señales**, un módulo **DAC MCP4725** y un **divisor de voltaje (1:1000)**.

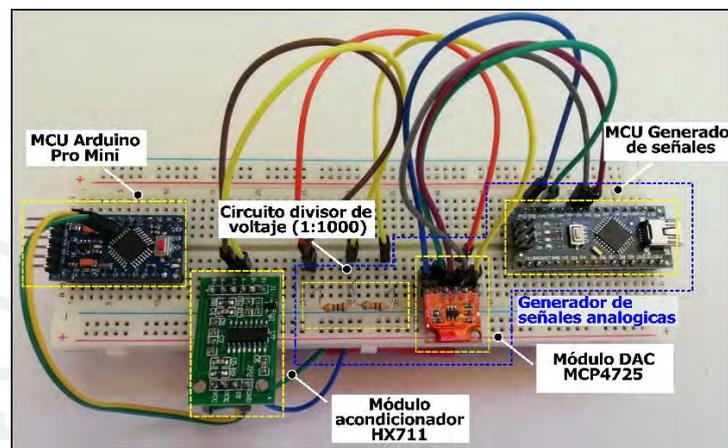


Figura 4.5: Generador de señales analógicas.

Fuente: Elaboración propia.

La simulación empieza en la **MCU generador de señales**; es decir, este emite una señal serial de 12 bits según el protocolo I2C hacia el módulo DAC, señal que sigue el modelo de la ecuación 4.1 la cual representa a una aproximación de la fuerza en el CMJ. Luego, el módulo DAC transforma la señal entrante a otra analógica en el margen de 0 a 5 V. Finalmente, esta última se escala por un circuito divisor de voltaje con el fin de obtener un margen de menor magnitud: 0 a 5 mV.

$$f(t) = \begin{cases} P, & t_i \leq t < t_1 \\ \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (t - t_1) + \phi_1\right), & t_1 \leq t < (t_1 + 2T) \\ \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (t - t_1) + \phi_1\right), & (t_1 + 2T) \leq t < (t_1 + \frac{9}{4}T) \\ P, & (t_1 + \frac{9}{4}T) \leq t < t_f \end{cases} \quad (4.1)$$

Con el hardware y el modelo de la ecuación 4.1, se propone generar dos señales de

fuerza para dos casos del CMJ; el primero, para el salto de una persona de 80 kgf de peso que logra alcanzar una fuerza máxima de 360 kgf (4.5 veces el peso del usuario según análisis realizado en capítulo 1); un segundo caso, para una persona de 50 kgf de peso. Después, una vez con las señales de fuerza para los dos casos mencionados, estas ingresan a un proceso de amplificación y digitalización en el **módulo acondicionador HX711** para luego ser muestreadas por la **MCU Arduino Pro Mini** a una tasa de 10 ms. Las muestras se presentan en la Figura 4.6, donde es necesario mencionar que la amplitud es la octava parte de la fuerza total captada sobre la plataforma de fuerza, esto último debido a que la configuración en paralelo de las celdas de carga emite la media aritmética del conjunto de medidas tomadas por las 8 celdas de carga.

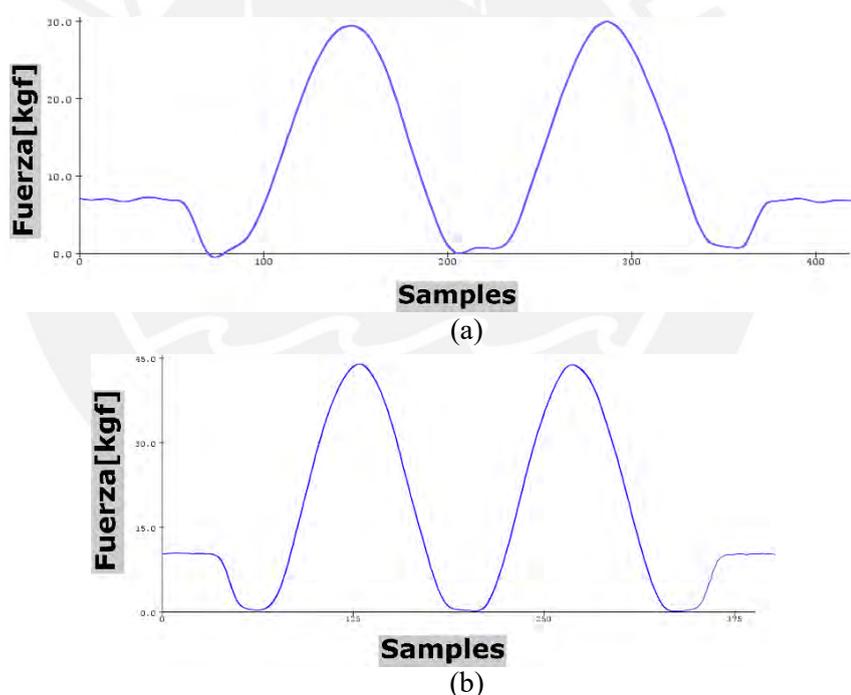


Figura 4.6: Desarrollo de fuerza aproximada para CMJ: (a) usuario de 50 y (b) 80 kgf.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se recurre al algoritmo diseñado en la sección 3.4.2 para la detección de la fase concéntrica, que se encarga de identificar tanto el vértice de la primera parábola cóncava hacia arriba como hacia abajo (inicio y fin de fase concéntrica). El algoritmo matemático expresado matemáticamente se presenta a continuación:

$$\text{abs}((x[n - 50] + x[n]) \cdot 0.5 - x[n - 25]) > \text{Threshold}, \quad x[n] \text{ fuerza discreta del CMJ.}$$

Los resultados, de aplicar el algoritmo en las señales de la Figura 4.6, se muestran en la Figura 4.7.

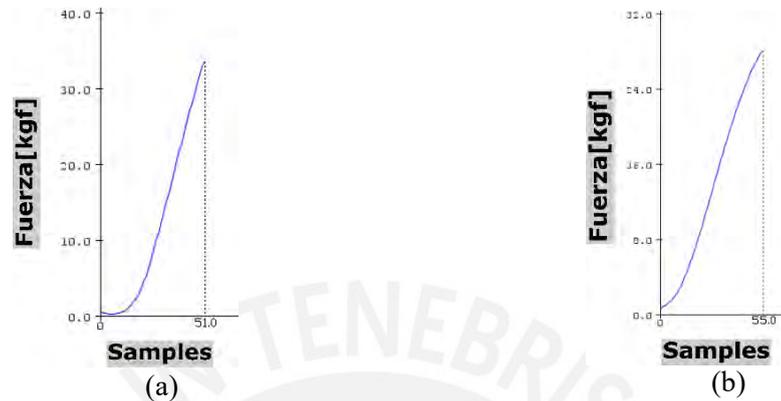


Figura 4.7: Desarrollo de fuerza durante fase concéntrica para usuario de (a) 80 kg y (b) 50kg.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, las señales de la Figura 4.7 se almacenan dentro de la memoria SRAM de la MCU Arduino Pro Mini, que posee una capacidad de 2 KB.

4.1.2. Análisis de regresión para señales discretas de fuerza

En la presente sección, se revisa el proceso de aproximación por regresión cuadrática de las dos señales discretas de la Figura 4.7. El resultado, una señal continua plasmada en la Figura 4.8 y 4.9, para cada caso respectivamente. Agregar que el dominio en un margen de $0 \text{ ms} < t < 0.01 * (\text{cantidad de muestras}) \text{ ms}$.

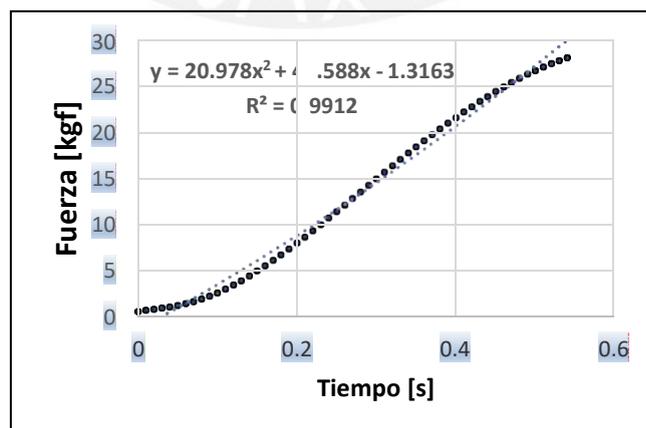


Figura 4.8: Aproximación cuadrática de fase concéntrica para usuario de 50kg.
Fuente: Elaboración propia.

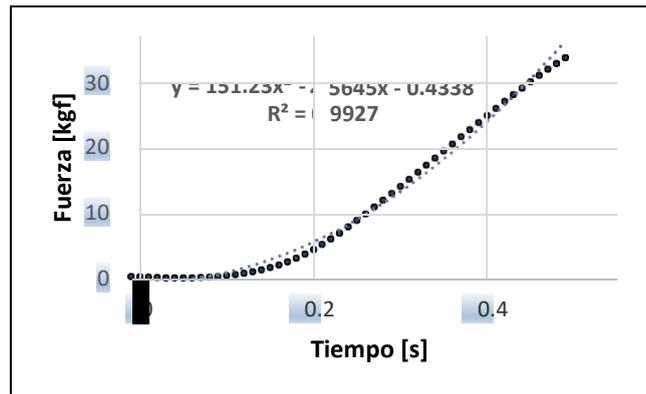


Figura 4.9: Aproximación cuadrática de fase concéntrica para usuario de 80kg.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se revisa la bondad del ajuste; es decir, el coeficiente de determinación (R^2), para los dos casos, supera los 0.9 (buena aproximación).

4.1.3. Cálculo de la potencia mecánica máxima

Para obtener el valor máximo de la potencia mecánica durante la fase concéntrica es necesario realizar el cálculo de esta variable física para pequeños intervalos de tiempo. Así, con la ecuación 3.17, se logra el cálculo de la potencia instantánea y, para ello, se requiere de la magnitud de la masa del usuario y el desarrollo de la fuerza en el tiempo durante la fase concéntrica. Después, para resolver la integral que se encuentra dentro de la ecuación 3.17, se presenta la siguiente solución:

$$P(t_1 < t < t_2) = \frac{1}{m} \cdot \int_{t_1}^{t_2} F^2(t) \cdot \Delta t$$

Reemplazando $F(t)$ por la expresión cuadrática de la fase concéntrica, se obtiene:

$$P(t_1 < t < t_2) = \frac{1}{m} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2)^2 \cdot \Delta t.$$

Resolviendo la relación anterior para $t_1 < t < t_2$, se obtiene:

$$P(t) = \frac{1}{m} \cdot 6159.11 \cdot (b_0^2 t + b_0 b_1 t^2 + 0.33(2b_0 b_2 + b_1^2)t^3 + 0.5b_1 b_2 t^4 + 0.2b_2^2 t^5) \Big|_{t_1}^{t_2}.$$

Finalmente, Al evaluar las señales de la Figura 4.8 y 4.9 con el algoritmo implementado dentro del método `calculatePower()` de la MCU Arduino Pro Mini (código en Anexo G.9), se obtiene que el primer usuario de 50 kg alcanza 1143.32 W

de potencia mecánica instantánea máxima durante la fase concéntrica del CMJ; el segundo, 1402.35 W.

4.1.4. Cálculo del nivel de fatiga neuromuscular

Como se revisó en la bibliografía, es necesario recordar que el salto en contramovimiento es un método fiable para medir el nivel de fatiga neuromuscular a lo largo de una temporada deportiva. Del mismo modo, es necesario recordar la importancia de establecer un protocolo adecuado de medición con el fin de aumentar la exactitud en los resultados, ya que se demostró, en los estudios bibliográficos, que la sensibilidad del test del CMJ varía según la disciplina deportiva. En ese sentido, se propone determinar el nivel de fatiga mediante el coeficiente de variabilidad (CV), métrica recomendada en bibliografía. Así mismo, se recomienda revisar el documento [6] para determinar el proceso de interpretación de resultados del CV. La implementación se encuentra dentro de la MCU Arduino Pro Mini en el método `calculateVar()` de la clase **Procesamiento** (código en Anexo G.10)

42 Implementación de los algoritmos de validación del CMJ

En la presente sección, se revisa la implementación y pruebas de los algoritmos que corresponden al proceso de validación del CMJ. Para ello, se torna necesario realizar un experimento a fin de obtener muestras graficas del CMJ. Así, la sección inicia revisando los componentes del experimento y, luego, se procede con las pruebas. Esto último involucra la detección de las articulaciones, utilizando el modelo *OpenPose*, del hemisferio derecho del cuerpo (hombro, cadera, rodilla y tobillo); finalmente, termina con la validación de la perpendicularidad de rodilla y verticalidad del torso.

a. Componentes

Los componentes, que se utilizan para obtener muestras del CMJ, se presentan en la Figura 4.10. Al lado izquierdo, se encuentran los componentes del ensamble **trípode**

de captura de imágenes conformada por la cámara digital Logitech C270, el adaptador impreso en ABS, el trípode TF-3120 y, en lugar de la unidad de procesamiento mini-PC, la PC DELL modelo Latitude 7300. En cambio, al lado derecho, se presenta una estructura secundaria que representa a la plataforma de fuerza, de 0.4 x 0.4 x 0.12 m y ubicada a 2.87 m del centro del trípode.



Figura 4.10: (a) Trípode de captura de imágenes y (b) plataforma de salto.
Fuente: Elaboración propia.

b. Lectura e integración de imágenes

Para la prueba experimental de obtención de datos, se contó con la ayuda de un voluntario de 1.65 m de altura y 60 kgf de peso. Además, el desarrollo del salto fue monitorizado por los componentes que se muestran en la Figura 4.14 (a) y se utilizó la estructura ortoédrica de la Figura 4.14(b). Así mismo, se utilizan los algoritmos de lectura e integración que se encuentran dentro del método `makeVideo()` de la clase `mini_pc` (código en Anexo G.11). Sobre el funcionamiento del algoritmo, es necesario mencionar que la toma de muestras se realiza mientras el parámetro `condicion` sea igual a `True`, este último cambia a `False` cuando se recibe una señal de la MCU Procesamiento indicando el fin del salto. Los *frames* del video (.AVI) obtenidos de la prueba experimental se muestran en la Figura 4.11.

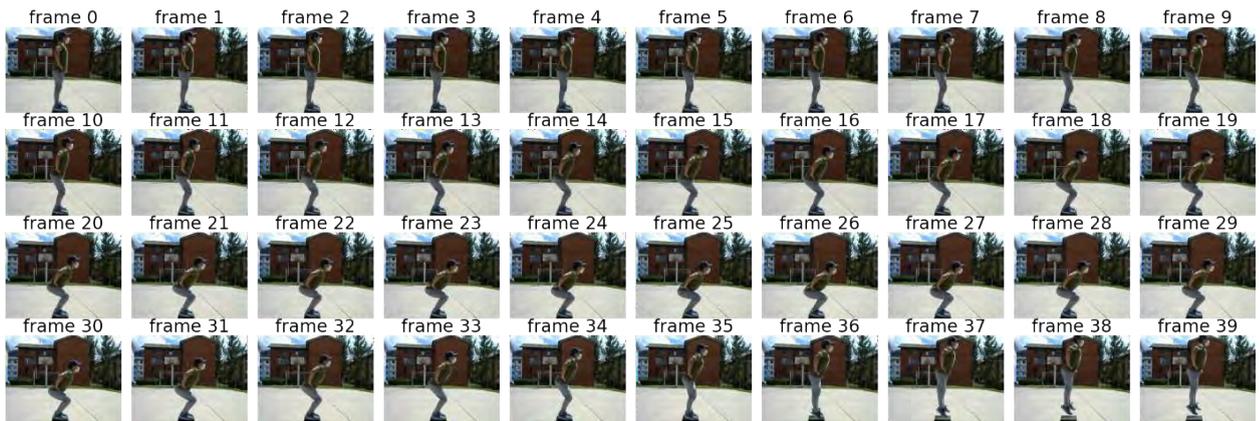


Figura 4.11: *Frames* de video de fase concéntrica de CMJ para usuario de 1.65 m de altura.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Extracción de puntos clave

La extracción de los puntos clave de interés se realiza por medio del modelo *OpenPose* en su versión portable para Linux. El modelo recibe como argumento de entrada el video de nombre **CMJ.avi** publicado en el apartado anterior. Como salida, se obtiene tantos archivos **.json** como *frames* conforman el archivo de video **CMJ.avi**, donde cada archivo **.json** contienen la posición de 25 puntos clave (*keypoints*) del cuerpo almacenados en pares ordenados. La implementación de las líneas de comando para la extracción de los *keypoints* se desarrolla dentro del método **extractKeyPoints()** de la clase **mini_pc**. Además, se cuenta con el método **is_empty_KeyPoints()** para eliminar los archivos **.json** que corresponden a registros pasados y almacenados dentro de la carpeta **KeyPoints** (revisar código en Anexo G.12).

Sobre la configuración de las carpetas para el proceso de validación del CMJ, se cuenta con la carpeta principal del proyecto de nombre **CMJ** la cual almacena tres carpetas: la primera (**openpose**) reúne todo los archivos del modelo *OpenPose*; luego, la segunda (**KeyPoints**) almacena los archivos **.json** con la posición de las articulaciones; la tercera (**code**), almacena los archivos ejecutables del código que reúne los métodos que pertenecen a la clase **mini_pc**. Finalmente, el video publicado por el método **makeVideo()** se ubica en la carpeta principal **CMJ** (ver Figura 4.12).

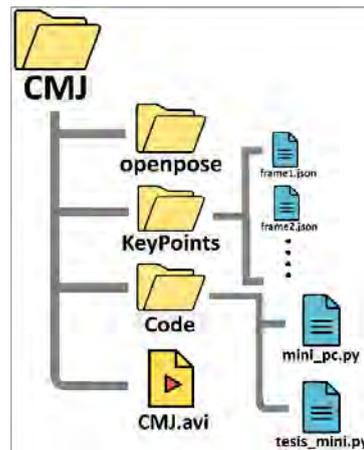


Figura 4.12: Configuración de carpetas para validación del CMJ dentro de mini-PC.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Verificación de perpendicularidad de rodilla

Según la bibliografía, la etapa isométrica del CMJ requiere que el ángulo de rodilla alcance idealmente los 90° , ángulo formado por el cruce de los segmentos cadera-rodilla y tobillo-rodilla. Sin embargo, en la práctica, es poco probable que el usuario cumpla con dicha exigencia. Por consiguiente, se propone una tolerancia que permita la validez del criterio de perpendicularidad de rodilla; es decir, bastará con identificar que el ángulo de rodilla se encuentre entre los 80° y 100° , sin ubicarse por debajo del límite inferior en alguno de los *frames* de video, para validar el primer criterio. La implementación de lo anterior se realiza dentro del método `evaluateCMJ_1()` de la clase `mini_pc`, tal como se muestra en código en Anexo G.13.

También indicar que el método `evaluateCMJ_1()` se alimenta de la información proporcionada por el método `fill_kneeAngles()` de la clase `mini_pc`. Este último método se encarga de leer los archivos con extensión `.json` y, luego, obtiene el ángulo de rodilla mediante la función `getAngle()` para cada *frame* de video. El resultado de evaluar los *frames* de la Figura 4.11 con el método `evaluateCMJ_1()`, se aprecia en la Figura 4.13. En esta, se encuentra cada *frame* rotulado en la parte superior con información que describe el número de captura y el ángulo de rodilla. Así mismo, las barras de color que se ubican al costado de cada *frame* explican de manera gráfica el proceso de aprobación

del criterio de perpendicularidad de rodilla que se desarrolla dentro del método **evaluateCMJ_1()**. Desde el *frame* 19 hasta el 24, se logra cumplir con el criterio de aprobación (barra de color verde); sin embargo, el ángulo de rodilla del *frame* 25 se ubica por debajo de los 80°, esto significaría la desaprobación del criterio de perpendicularidad de rodilla.

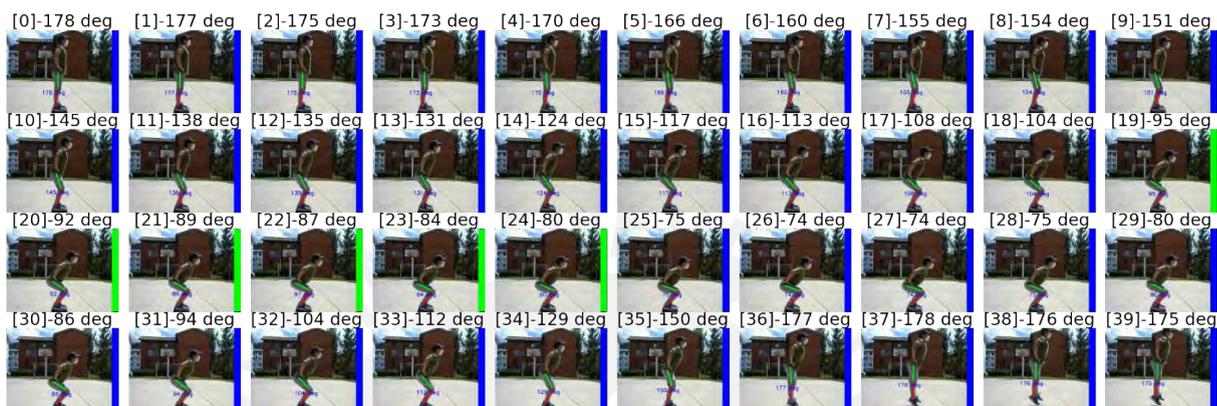


Figura 4.13: Resultado de validación de perpendicularidad de rodilla durante isometría.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Verificación de verticalidad de tronco

Según la bibliografía, durante la ejecución del CMJ, se busca que el deportista mantenga el tronco, tanto durante la fase excéntrica como concéntrica del CMJ, lo más cerca a línea de acción vertical que pasa por la región de contacto pie-piso. El fin, de lo anterior, es reducir la presencia de fuerzas horizontales sobre la plataforma de fuerza producto del movimiento del tren superior durante el impulso. Por ello, se propone que el proceso de verificación de la verticalidad del tronco conste en analizar un valor geométrico que indique el nivel de inclinación del tronco del usuario respecto al eje vertical mencionado. Es decir, según el análisis realizado en la sección 3.4.3, se propone analizar el ángulo formado por el cruce que se forma entre el segmento compuesto por el punto de articulación más cercano a la zona de contacto pie-piso (tobillo) y el punto que se ubica sobre el hombro derecho del usuario con el segmento vertical. Así, al igual que el proceso de validación de perpendicularidad de rodilla, se considera una tolerancia de $\pm 10^\circ$ para validar el segundo criterio de validación.

Recurriendo al método **evaluateCMJ_2()**, el cual se alimenta con la información de los ángulos de inclinación proporcionados por el método **fill_backAngles()**, se procede a evaluar los *frames* de la Figura 4.11 obteniendo como resultado las capturas de la Figura 4.14. En esta, cada *frame* se encuentra rotulado en la parte superior con el número de captura y con el ángulo de inclinación del tronco respecto al eje vertical. A lo anterior, se destaca las barras de color verde y azul que se ubican al costado izquierdo de cada *frame*, y que se utilizan para indicar de manera gráfica el proceso de validación que realiza el método **evaluateCMJ_2()**. Es decir, hasta el *frame* 14 se logra que el ángulo de inclinación se ubique dentro del margen de tolerancia (barra de color verde). No obstante, se logra superar el margen permitido en las siguientes capturas, por lo que se considera como inválido el segundo criterio de validación del CMJ para el experimento.

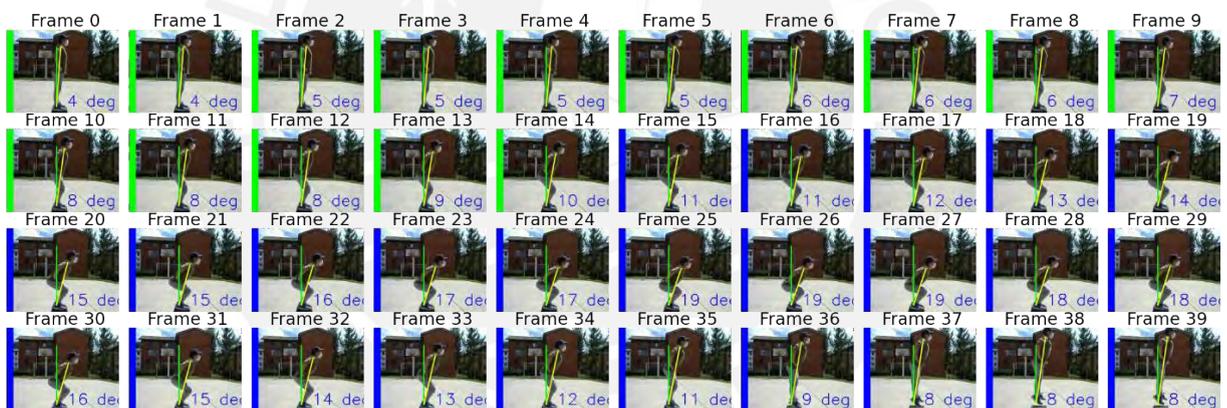


Figura 4.14: Resultado de verticalidad de tronco durante CMJ.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Modelo de reconocimiento de articulaciones

Para el modelo de reconocimiento de pose, se propuso revisar, en el estado del arte, los modelos de tipo *open source* disponibles. Así, se procedió con la elección del modelo *Open Pose* por tres motivos: robustez, tiempo de detección e implementación. La robustez del modelo se debió a la gran escala y buena calidad de datos (*datasets*) utilizados para la etapa de entrenamiento como a la destacada propuesta del modelo no parametrizado de afinidad de partes (PAF por sus siglas en inglés). Por un lado, los datos de entrenamiento fueron proporcionados por *CMU Panoptic Studio dataset*, *MPII Human*

Pose *dataset* (25000 imágenes) y COCO *dataset*; y, por otro lado, el beneficio del modelo no parametrizado permite corregir varios problemas de modelos anteriores como el de superposición, pose, escala y cantidad de personas (revisar Anexo B.2). Por su parte, el tiempo de detección se ve optimizado porque *Open Pose* utiliza un proceso de reconocimiento inverso al común de muchos algoritmos. Generalmente, los modelos de reconocimiento de pose parten con la predicción de personas en una imagen para luego, y sobre dicha región, proceder con la estimación de pose. Este proceso puede tardar mucho si se trata de reconocer la pose de varias personas dentro de una imagen. En cambio, *Open Pose* propone iniciar con la detección de todas las partes propias de una persona (incluye articulaciones) en una imagen para luego asociarlas a fin de obtener la pose de una persona. Esta propuesta conlleva a reducir el tiempo de reconocimiento aun si se intenta incrementar el número de personas en una imagen. En la Figura 4.15, se presenta la comparación gráfica de tres modelos de reconocimiento de pose, donde se distingue un tiempo de reconocimiento constante de *Open Pose*. Finalmente, se destaca la fácil implementación y aplicación por requerir bajo conocimiento, ya que el modelo es implementable en sistemas operativos como Linux, Windows, Mac OSX y Nvidia TX2. Además, también trabaja con distintos formatos de video e imágenes tanto para los archivos de entrada como de salida.

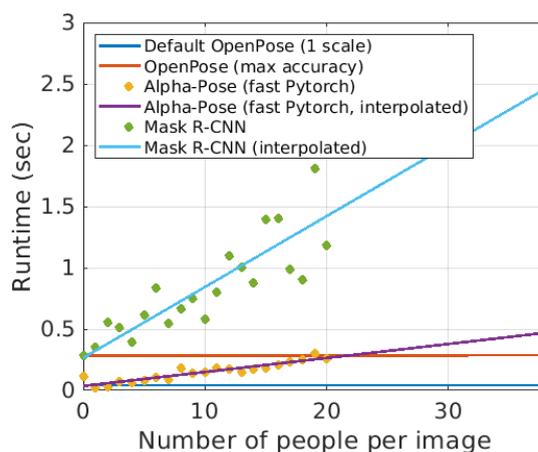


Figura 4.15: Tiempo de reconocimiento para modelos *pose estimation*.
Fuente [22].

5. Costos

En este capítulo, se revisa el financiamiento que se requiere para implementar un ejemplar del sistema mecatrónico de medición del nivel de fatiga neuromuscular en deportistas utilizando el salto en contramovimiento. Para ello, se revisan los costos parciales que se necesitan para los componentes eléctrico–electrónicos. Este último incluye los componentes del dominio de procesamiento y sensores. Luego, se observan los costos de los componentes mecánicos que abarcan las piezas de la estructura base, estructura superior, caja electrónica y trípode. Finalmente, en la última sección, se analiza el costo total del sistema, incluyendo los servicios por diseño.

5.1. Costo de componentes eléctrico – electrónicos

En la Tabla 5.1 y la Tabla 5.2, se presentan los costos para los componentes eléctrico-electrónicos del sistema mecatrónico, incluyendo la clasificación de estos según el lugar de distribución (territorio nacional o en territorio extranjero, respectivamente). Para el caso de los componentes importados, se presentan los precios en dólares que a la fecha equivalen a 3.94 soles por 1 dólar estadounidense. Además, es necesario mencionar que los costos para los componentes importados incluyen el flete e impuestos en aduanas.

Tabla 5.1: Costo de componentes eléctrico – electrónicos nacionales.

Componente	Proveedor	Precio unitario (S/)	Cantidad	Precio total (S/)
Módulo óptico IR-FC51		3.5	2	7
Micro SD 8 GB	Electromania Peru E.I.R.L	9	1	9
Cámara Logitech C270	Supertec S.A.C.	116.8	1	116.8
Pantalla LCD 128 x 64 px		44.5	1	44.5
Módulo Led WS2812B		0.8	4	3.2
Módulo Micro SD		5.5	1	5.5
Módulo ADC HX-711		5	1	5
MCU Arduino Pro Mini		15	2	30
Conector JST x 3 Pines		0.7	3	2.8
Conector JST x 4 Pines	Electronica Hi-Ti S.A.C.	1	1	1
Conector JST x 5 Pines		1.2	1	1.2
Bornera de 2 vías		0.4	1	0.4
Transistor FET 2N7000		1.6	2	3.2
Resistencia de 10 K Ω		0.1	4	0.4
Fuente de poder 5V,5A		27.3	1	27.3
			Subtotal (S/)	257.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2: Costo de componentes eléctrico – electrónicos importados.

Componente	Proveedor	Precio unitario (\$.)	Cantidad	Precio total (\$.)
Mini-PC Raspberry pi	Amazon Store	132.15	1	132.15
Celdas de carga 50 kgf	Gold Shine China	30	8	240
Impresión circuito PCB	JLPCB	7.1	1	7.1
Interruptor ON/OFF	APIELE	38.02	1	38.02
Subtotal (\$)				417.27
Subtotal (S/)				1644.00

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para el ensamblaje de los componentes eléctrico-electrónicos, se asigna un tiempo de 6 horas con un presupuesto de S/ 30 por hora. Además, se debe mencionar que el proceso de ensamblaje incluye la unión por soldadura entre los componentes electrónicos y la tarjeta impresa PCB, mas no la fabricación de este último.

5.2 Costo de componentes mecánicos

En la Tabla 5.3 y la tabla 5.4, se presentan los costos para implementar la parte mecánica del sistema mecatrónico. Por ejemplo, en la primera tabla, se listan los tubos estructurales cuadrados de $\frac{3}{4}$ ", 1" y 1 $\frac{1}{4}$ ", que forman parte de los subensambles estructura base y estructura superior. De igual forma, en la segunda tabla, se listan los costos para los componentes mecánicos de sujeción, como los tornillos *Stove Bolts* y pernos estructurales.

Tabla 5.3: Costo de componentes mecánicos.

Componente	Proveedor	Precio unitario x m/m2 (S/)	Cantidad (m/m2)	Precio total (S/)
Tubo cuadrado LAF 3/4"	Corporación Aceros Arequipa S.A.	10.4	2.1	21.9
Tubo cuadrado LAF 1"		8.4	7	58.8
Tubo cuadrado LAF 1 1/4"		12.4	0.5	6.2
Platina $\frac{1}{4}$ x 1 $\frac{1}{4}$ "		14.8	0.2	3
Bobina LAF e = 1 mm	Plásticos Tecnicos Nijs S.A.	20.2	0.3	6.1
Plancha de Polipropileno		250	0.36	90
Mascara en ABS	Saia VEO - PUCP	3.5	5.81	20.4
Adaptador en ABS trípode		3.5	5.82	20.4
Acrílico e = 3 mm	Darglass Peruana SRL	74	0.084	6.3
Subtotal (S/)				233.1

Fuente: Elaboración propia.

Es preciso señalar que todos los componentes mecánicos se adquieren dentro del mercado nacional y que el tubo circular de *nylon*, que forma parte del ensamble de la celda de carga, requiere ser manufacturado mediante torneado, ya que no se dispone de

este elemento dentro del mercado local ni extranjero con las características requeridas.

Tabla 5.4: Costo de componentes mecánicos de sujeción.

Componente	Proveedor	Precio unitario (S/)	Cantidad	Precio total (S/)	
Tornillo Stove Bolt M2.5x16	Torniper Import S.C.R.L.	0.4	4	1.6	
Tornillo Stove Bolt M2.5x14		0.4	4	1.6	
Tornillo Stove Bolt M3x20		0.4	2	0.8	
Tornillo Stove Bolt M3x12		0.4	7	2.8	
Espaciador hexagonal M3x5.5		0.5	4	2	
Remache de acero d = 3mm		0.5	14	7	
Perno estructural 5/16" x 3/4"		1.2	8	9.6	
Perno estructural 1/4" x 3/4"		1.2	32	38.4	
Arandela cónica d _i = 11.2 mm		0.3	32	9.6	
Tuerca de acero M2.5		0.3	8	2.4	
Tuerca de acero M3		0.3	32	9.6	
Tuerca de acero 1/4"		0.8	32	25.6	
Tubo de nylon circular 15 x 40 mm		Corporación Solminsa S.A.C.	5	1	5
			Subtotal (S/)	116	

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para la manufactura y ensamble de los componentes, se asigna un tiempo de 8 horas con un presupuesto de S/ 40 por hora. La manufactura incluye el proceso de soldadura de los tubos cuadrados, el doblado de las chapas metálicas, el corte de las platinas y la unión de todos estos componentes mediante los elementos de sujeción de la Tabla 5.4. Se requiere un financiamiento de S/ 320 para toda la manufactura y ensamble de la parte mecánica del sistema mecatrónico.

5.3. Costo del sistema

En la Tabla 5.5, se muestra el resumen de los costos requeridos para implementar un ejemplar del sistema mecatrónico. Así, se presenta el costo de los componentes tanto eléctrico-electrónicos como mecánicos, que requieren un financiamiento de S/ 2250.4. A este monto se adiciona el valor de S/ 40 por el concepto del trípode TF-3120, que se adquiere en la tienda Grupo Cadi Perú S.A.C. Luego, tanto la fabricación y ensamblaje del sistema requieren un financiamiento de S/ 500; y el diseño del sistema e implementación de los algoritmos de procesamiento, un financiamiento de S/ 3720. Esto último se debe a que se asigna un presupuesto mensual de S/ 930 (sueldo básico) por un tiempo de 4 meses con jornadas de trabajo de 8 horas diarias. Finalmente, luego de revisar

todos los costos involucrados en el diseño e implementación del sistema mecatrónico que se presentan en la Tabla 5.5, se concluye que se requiere un monto de S/ 6510.4 para la construcción de un ejemplar del sistema mecatrónico en mención.

Tabla 5.5: Costo total del sistema mecatrónico.

Concepto	Costo (S/)
Costo de componentes eléctrico-electrónicos	1901.3
Costo de componentes mecánicos	349.1
Costo de trípode	40
Subtotal para componentes eléctrico-mecánicos	2290.4
Costo de fabricación y ensamblaje de componentes eléctrico-electrónicos y mecánicos.	500
Costo de diseño	3720
Costo final del sistema mecatrónico	6510.4

Fuente: Elaboración propia.



Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones del presente proyecto abarcan la reflexión final de los resultados conseguidos para el objetivo general y los específicos. Por otro lado, las recomendaciones se definen con base en los fragmentos del proyecto que requieren posterior análisis con el fin de complementar con nuevas propuestas la tecnología del sistema mecatrónico para medir el nivel de fatiga neuromuscular utilizando el CMJ.

a. Conclusiones

Como objetivo principal, se propuso diseñar un sistema mecatrónico para medir el nivel de la fatiga neuromuscular (FN) en deportistas utilizando el salto en contramovimiento (CMJ por sus siglas en inglés), y un subsistema de validación de la ejecución del CMJ utilizando un sistema de captura de imágenes y un modelo de reconocimiento de pose. Para ello, se logró diseñar un sistema, de fácil manipulación por el usuario, que utiliza el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima, luego de una serie de 6 saltos, como herramienta para medir el nivel relativo de la FN.

Además, en la etapa inicial del diseño, se consiguió revisar los antecedentes para el modelamiento corporal donde, finalmente, se eligió el modelo *Open Pose* como parte del proyecto. De la misma manera, se consiguió revisar los antecedentes sobre sistemas de medición de variables físicas presentes en el salto; así, se decidió medir las señales de fuerza pie-piso utilizando una plataforma de fuerza compuesta por celdas de carga.

Luego, se consiguió definir los requerimientos del proyecto y, principalmente, se alcanzó el cumplimiento de todos aquellos que son de nivel obligatorio. Es decir, se logró respetar los requerimientos de geometría, cinemática, masa, energía, material, señales, mantenimiento, fabricación, electrónica, comunicación, interfaz y costos.

Se consiguió diseñar la estructura de funciones para los 5 dominios del sistema de medición (interfaz, procesamiento, energía, sensores y mecánica) hasta alcanzar la

elaboración de la matriz morfológica. Con la matriz, se definió tres conceptos de solución los cuales fueron evaluados bajo criterios técnicos y económicos. El resultado, de la evaluación, reveló que el diseño del sistema debía utilizar una plataforma ortoédrica de fuerza y un trípode para el sistema de captura de imágenes.

Sobre el diseño de la plataforma de fuerza, se consiguió diseñar un subsistema mecánico que permite medir la fuerza pie-piso para una persona de hasta 85 kgf de peso. El diseño considero el análisis mecánico ante fallas para los elementos involucrados en la transmisión de fuerzas hacia los concentradores de las celdas de carga. De la misma manera, se revisó el campo de visión requerido por el subsistema de captura de imágenes donde se determinó que el trípode debía ubicarse a 2.85 m de la plataforma.

Sobre el diseño eléctrico, se consiguió elaborar tanto el diagrama de bloques como esquemático de todo el sistema, y los cálculos eléctricos que permitan la selección apropiada de los componentes electrónicos. Los cálculos ayudaron principalmente a definir la configuración del arreglo de sensores, los cuales se conectan en paralelo para obtener la fuerza promedio captada por todo el grupo de sensores. También ayudo a determinar las características de la fuente de poder.

Para el software, se consiguió diseñar un filtro FIR que atenué las señales con frecuencias mayores a los 5 Hz. También se diseñó un algoritmo para transformar las señales discretas de fuerza en continuas y, finalmente, un algoritmo tanto para el cálculo de la potencia mecánica instantánea máxima como para el nivel de dispersión de este último parámetro. Sobre la validación del CMJ, se consiguió diseñar dos algoritmos: uno para validar la perpendicularidad de rodilla y otro para validar la verticalidad del tronco.

Finalmente, se logró respetar la proyección económica propuesta con una inversión necesaria de S/.2290.4 para los materiales, S/.500.0 para la mano de obra y fabricación, y S/.3720 para el diseño del sistema.

b. Recomendaciones

Las recomendaciones aquí planteadas buscan incentivar la investigación a fin de mejorar el primer alcance desarrollado en el presente proyecto.

En primer lugar, se pudo observar que el sistema eléctrico-mecánico de captación de fuerzas pie-piso no logra discriminar las fuerzas horizontales. Por lo tanto, se recomienda diseñar una configuración electrónica complementaria que logre conservar únicamente las fuerzas verticales de interés pie-piso.

En segundo lugar, es importante que el sistema mecatrónico obtenga las magnitudes físicas que se utilizan para el análisis de la FN en un tiempo que no retrase ni perjudique el desarrollo de test del CMJ. Sin embargo, durante la elaboración del presente proyecto, se identificó que el tiempo de procesamiento en la etapa de filtración de las señales de fuerza y durante la etapa de reconocimiento de articulaciones llega a ser muy prolongado. Esto último se debe, principalmente, a las condiciones del hardware y software utilizados. En consecuencia, se recomienda buscar un algoritmo de menor costo computacional y una unidad de mayor capacidad de procesamiento para la etapa de filtración de señales de fuerza. Así mismo, se recomienda utilizar un mini ordenador con 1.5 GB en GPU, 2 GB de memoria RAM y unidad de procesamiento con 8 núcleos para ejecutar el modelo de renacimiento de pose *Open Pose*.

En tercer lugar, se recomienda realizar un análisis mecánico al subsistema de medición de fuerza para casos más específicos. Es decir, este análisis debe enfocarse en revisar los elementos encargados de la transmisión de cargas hacia los concentradores cuando, por ejemplo, el usuario aterrice al borde de la plataforma o con un solo pie de apoyo.

Por último, dado que el subsistema de verificación del CMJ se compone de un trípode y una cámara digital para capturar las imágenes que corresponden al desarrollo

del CMJ, resulta importante ubicar la cámara en una posición permanente con el fin de uniformizar el proceso de medición del nivel de fatiga utilizando el test del CMJ. Por consiguiente, se recomienda diseñar una estructura que reemplace o complemente al trípode de captura de imágenes planteado con el fin de mantener la cámara en una posición fija cada vez que se realice el test del CMJ.



Referencias bibliográficas

- [1] ¡Una buena noticia! Tecnología de avanzada para los deportistas peruanos de cara a Lima 2019 [VIDEO]. (18 de abril de 2018). *Diario Depor*. <https://depor.com/full-deportes/buena-noticia-tecnologia-avanzada-deportistas-peruanos-video-70427/>
- [2] Campos, J., & Ramón V. (2011). *Teoría y planificación del entrenamiento deportivo*. Paidotribo, 13-103.
- [3] Moreno, J. E. (2018). La fatiga, tipos causas y efectos. *Revista digital: Actividad Física y Deporte*, 3(2), 87-95.
- [4] Morell, A., Gonzáles C., & Llop, F. (2007). Presente y futuro del ácido láctico. *Archivos de medicina del deporte*, 15(120), 270-284.
- [5] Vásquez, A. (2017, junio). *Métodos para evaluar la fatiga del deportista: un trabajo de campo*. En III Simposio Internacional en Ciencias de la Actividad Física y la Salud, 3-6.
- [6] Moreno, S. M. (2020). La altura del salto en contramovimiento como instrumento de control de la fatiga neuromuscular: revisión sistemática. *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, (37), 820-826.
- [7] Masse, J. M. (2001). Aplicación del Test de Salto CMJ (Counter Movement Jump) con Plataforma de Contacto. *Blogs Evaluación*. <https://g-se.com/aplicacion-del-test-de-salto-cmj-counter-movement-jump-con-plataforma-de-contacto-bpr57cfb26ce6203>.
- [8] Vert Sport Instruments. (n.d.). *G-vert technology*. <https://www.myvert.com/gvert>
- [9] Borges, T. O., Moreira, A., Bacchi, R., Finotti, R. L., Ramos, M., Lopes, C. R., & Aoki, M. S. (2017). Validation of the VERT wearable jump monitor device in elite youth volleyball players. *Biology of sport*, 34(3), 239. 10.5114/biolsport.2017.66000

- [10] Health Professional Solutions. (n.d.). *Assesment tools: vertical jump tests*.
https://www.healthprofessionalsolutions.com.au/Jump_Testing_Mats_s/2241.htm
- [11] Amazon Store. (n.d.). *Deportes y actividades al aire libre: plataformas pliométricas*.
<https://www.amazon.com/gill-athletics-vertical-jump-test/dp/b001cckgw2>
- [12] Bts Bioengineering. (n.d.). *Force plates and preasure mats: INFINI-T*.
<https://www.btsbioengineering.com/products/infini-t-force-platform/>
- [13] Kistler Measure, Analyze Innovative. (n.d.). *Kistler Mars 3.0: Effective Solution for Performance Diagnostics. Competencies and success Stories*, Suiza, 2017.
<https://www.kistler.com/en/about-us/competencies/success-stories/article/kistler-mars-30-effective-solution-for-performance-diagnostics/>.
- [14] Optojump Next. (2020). *User Manual: Manual Version 1.12.1 / Software Version 1.12*. <http://www.optojump.com/optojumpnext/media/manuals/manual-en.pdf>
- [15] Perrine, J., & Scates, A. (1980). *U.S. Patent No. 4,208,050*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. <https://bit.ly/3okqrBP>.
- [16] Stuessi, E. (1998). *Portable jumping force measuring platform* (E.U. Patent No. 0,882,474). *Espacenet Patent search*. <https://bit.ly/3kvX1Qa>
- [17] Lara Sánchez, A. J., Abián Vicén, J., Alegre Durán, L. M., Jiménez Linares, L., & Aguado Jódar, X. (2005). *Medición directa de la potencia con tests de salto en voleibol femenino*. *Arch. med. deporte*, 111-120.
- [18] Kinovea (n.d). *Kinovea: features*. <https://www.kinovea.org/features.html>
- [19] Cong, R., & Winters, R. (n.d.). *How does the Xbox Kinect work*.
<https://www.jameco.com/Jameco/workshop/howitworks/xboxkinect.html>
- [20] Walmsley, K. (2011, 11 April). *Initial fooling around with Kinect and AutoCAD. Through the Interface*. <https://bit.ly/3n9Isn1>

- [21] Ramakrishna, V., Munoz, D., Hebert, M., Bagnell, J. A., & Sheikh, Y. (2014, September). Pose machines: Articulated pose estimation via inference machines. In *European Conference on Computer Vision* (33-47). Springer, Cham. doi: 10.1007/97833191060523.
- [22] Cao, Z., Hidalgo, G., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2019). OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 43(1), 172-186. 10.1109/tpami.2019.2929257
- [23] Laffaye, G., Wagner, P. P., & Tombleson, T. I. (2014). Countermovement jump height: Gender and sport-specific differences in the force-time variables. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(4), 1096-1105. 10.1519/JSC.0b013e3182a1db03
- [24] McNair, P. J., & Prapavessis, H. (1999). Normative data of vertical ground reaction forces during landing from a jump. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(1), 86-88. 10.1016/s1440-2440(99)80187-x
- [25] Kim, J. W., Kwon, Y., Jeon, H. M., Bang, M. J., Jun, J. H., Eom, G. M., & Lim, D. H. (2014). Feet distance and static postural balance: implication on the role of natural stance. *Bio-medical materials and engineering*, 24(6), 2681-2688. 10.3233/BME-141085
- [26] Chapman, G. J., Halstead, J., & Redmond, A. C. (2016). Comparability of off the shelf foot orthoses in the redistribution of forces in midfoot osteoarthritis patients. *Gait & posture*, 49, 235-240. 10.1016/j.gaitpost.2016.07.012
- [27] Trinidad, L. E. (2011). *Engineering modeling, analysis and optimal design of custom foot orthotic*. University of Massachusetts Amherst.
- [28] Memarian A, Soltani S, Aghakani K, et al. *Estimation of Body Height by Measuring*

- Foot Dimensions: A Survey on Iranian Adult People.* J Med Toxicol Clin Forens Med. 2016, 3:1.
- [29] Shepherdson, R., & Shepherdson P. C. (2011). Planar beam load cell assembly (U.S. Patent No. 0,127,091). *Patent and Trademark Office*. <https://bit.ly/3orWyPU>.
- [30] Frederick E. C. *Optimal Frictional Properties for Sport Shoes And Sport Surfaces*. Exeter Research, Inc. 15:22.
- [31] Jones N. *Raspberry Pi B+ Case With Fan (3D Design)*. MakerBot Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:624084>
- [32] Vishay Precision Group. (2010). Co-Planar Beam Load Cell–Model 380. [Data Sheet], 12075, 248-249. <https://bit.ly/30uImh0>
- [33] Naylamp Mechatronics. (n.d.). *Módulo HX 711 Transmisor de celda de carga*. <https://bit.ly/3kypaFX>
- [34] Logitech. “C270 HD Webcam”. <https://www.logitech.com/es-roam/products/webcams/c270-hd-webcam.960-000947.html> .
- [35] Naylamp Mechatronics. (n.d.). *Display LCD Gráfico 128x64*. https://naylampmechatronics.com/lcd-alfanumerico/350-display-lcd-grafico-128x64.html?%20search_query=LCD&results=35
- [36] Open Circuit Shop. (n.d.). *TCRT5000 Infrared line detection module*. <https://opencircuit.shop/product/TCRT5000-Infrared-line-detection-module>
- [37] Data Logger. (n.d.). Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino [Data Sheet]. <https://bit.ly/3nbVd06>
- [38] Naylamp Mechatronics. (n.d.). *Cinta LED WS2812B: 5 Leds x 16 cm*. https://naylampmechatronics.com/luces-iluminacion/77-cinta-led-ws2812b-5-leds-x-16cm.html?search_query=LED&results=119

- [39] Sparkfun Start Something. (n.d.). *Arduino Pro Mini 328–5V/16Mhz*.
<https://www.sparkfun.com/products/11113>
- [40] Sparkfun Start Something. (n.d.). *Raspberry Pi 4 Model B (4 GB)*.
<https://www.sparkfun.com/products/15447>
- [41] Level Converter. (2017). In Let's control it Wiki.
https://www.letscontrolit.com/wiki/index.php/Level_Converter
- [42] Amazon Store. (n.d.). *Apiele -Interruptor de botón de cierre de 0.748 in, 3/4 pulgadas, 12 V, CC, color negro, símbolo de alimentación LED con enchufe 1NO1NC SPDT ON/Off (carcasa roja/negra)*. <https://amzn.to/3Hiwake>
- [43] Vistronica Tienda Virtual de Electrónica. *Fuente Suicheada / Conmutada 5V 5A 25W*. <https://www.vistronica.com/fuente-de-voltaje/fuente-conmutada/fuente-conmutada-5v-5a-detail.html>
- [44] Tillaart R. HX711 - Library (versión 0.2.3). GitHub repository. <https://github.com/RobTillaart/Arduino/tree/master/libraries/HX711>.
- [45] Wang, H., Liu, J., & Chen, S. (2009, August). An intelligent 3D force platform for plantar pressure distribution measurement. In *2009 International Conference on Mechatronics and Automation* (4479-4483). IEEE. 10.1109/ICMA.2009.5244849
- [46] Isza, P. (2018). *TFilter*. <http://t-filter.engineerjs.com/>
- [47] Hi-Fi Electrónica. Miniature Load Cell 10 Kg Scale Sensor. <https://bit.ly/3o18QJU>
- [48] OpenCV. (2015). *Open Source Computer Vision Library*. <https://opencv.org/>

Anexos

Índice de Anexos

- A. Transcripción de entrevista a entrenador deportivo**
- B. Consideraciones previas del proyecto**
- C. Lista de requerimientos**
- D. Estructura de funciones**
- E. Características de componentes mecánicos y electrónicos**
- F. Funcionamiento del sistema mecatrónico**
- G. Información complementaria para diseño eléctrico y software**
- H. Planos mecánicos y electrónicos**



A. Transcripción de entrevista a entrenador deportivo

El día 04 de noviembre del 2020, se presentó la oportunidad de poder conversar con el profesor Cesar Arrese Ramírez, entrenador internacional de nivel 3 de la selección de voleibol de la Pontificia Universidad Católica del Perú y campeón nacional de voleibol en distintas categorías (desde sub10 hasta la categoría de mayores). A continuación, se presentan las preguntas y respuestas de la entrevista realizada que aporten en la definición de la problemática y los requerimientos del proyecto.

1- ¿Cómo vio el crecimiento de la práctica deportiva en el periodo 2015-2020?

Como encargado de la selección de voleibol de la Pontificia Universidad Católica del Perú, pude apreciar que el crecimiento tanto en la rama masculina como femenina ha aumentado y de manera gradual. Justamente, el mejor lugar para percibir esto es en los talleres de masificación, lugar donde se reúnen alumnos con distintas condiciones físicas.

2- ¿Durante un ciclo de entrenamiento, que tan importante es realizar un diagnóstico y análisis de las condiciones del atleta? ¿Cuándo se considera más importante (antes, durante o después)?

Es muy importante y sobre todo al comenzar un ciclo de entrenamiento. Después de ello, el diagnóstico se realiza para controlar las condiciones del atleta con el fin de alcanzar los objetivos inicialmente planteados.

3- ¿Cuál es el método que utiliza para conocer las condiciones de los atletas?

Personalmente, cuando requiero conocer el estado de un atleta, recorro a las pruebas antropométricas. Luego de ello, el método que se utilice varía según el criterio del entrenador y las condiciones del atleta, ya que algunos se encuentran en condiciones altamente competitivas.

4- ¿En su entorno, que tan frecuente y riguroso observa el control de la fatiga deportiva?

En realidad, depende si el control de la fatiga está contemplado en el plan del entrenador,

ya que algunos consideran importante un control integral desde el inicio del ciclo de entrenamiento como otros no. También, recomiendo que el control de la fatiga se realice desde el colegio para cuando el atleta alcance un nivel de competitividad mayor pueda evitar la fatiga.

5- ¿Existen suficientes herramientas para realizar el control de la fatiga deportiva?

En realidad, si existen y el uso depende fundamentalmente de su disponibilidad. Una gran mayoría utiliza los métodos tradicionales, y aquellos entrenadores que se encuentran en condiciones de contar con aparatos modernos también lo aprovechan.

6- ¿Qué opina de crear tecnologías dentro de la universidad que permitan medir el nivel de fatiga en los atletas?

Obviamente me parece importante que se desarrolle tecnologías que complementen el trabajo de los entrenadores. Justamente, hace un tiempo participe de un proyecto de investigación desarrollado por la facultad de Ingeniería Mecánica enfocado en analizar la biomecánica del cuerpo durante la recepción del balón en el voleibol.

7- ¿Cómo entrenador y como cliente final, que características debe poseer una tecnología que permita medir el nivel de la fatiga de un atleta?

Sobre todo, que sea sencillo; es decir, que no sea un aparato muy grande y que sea fácilmente manipulable. También agregar que las mediciones que realice sean precisas.

B. Consideraciones previas del proyecto

B.1 Ejecución del salto en contramovimiento

El desarrollo del salto en contramovimiento se clasifica en 4 fases, donde la primera de ellas inicia con el atleta en posición erguida y con ambas manos en la cintura, como se muestra en Figura B.1 (a). Luego, en un movimiento descendente rápido y continuo, el atleta comienza la fase excéntrica doblando las rodillas y con el tronco alineado en todo momento al eje vertical hasta alcanzar la fase isométrica. Esta última fase se caracteriza por ser el instante donde el centro de masa del usuario se encuentra más cerca al piso y, al mismo tiempo, las rodillas alcanzan, aproximadamente, los 90° , como se observa en la Figura B.1 (b). Desde este punto, empieza la fase concéntrica con la extensión de rodillas, liberando la energía almacenada en el sistema neuromuscular del tren inferior, hasta alcanzar el despegue y posterior vuelo (ver Figura B.1 (c)).

Durante el tiempo de vuelo, el atleta debe mantener el tronco y los miembros inferiores en completa extensión hasta alcanzar contacto con la plataforma (ver Figura B.1 (d)), la misma posición que facilita la amortiguación durante el aterrizaje.

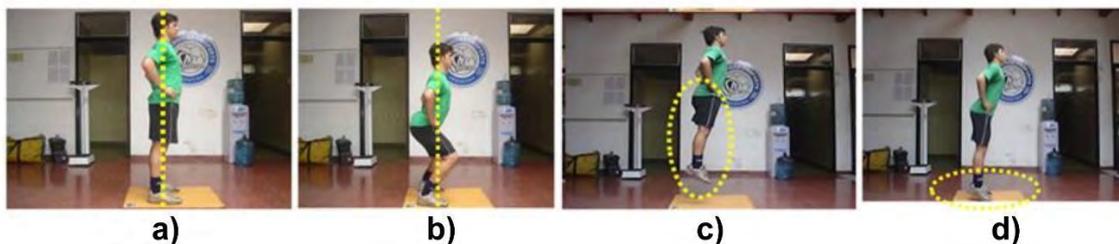


Figura B.1: Secuencia del salto en contramovimiento.

Fuente: [7].

B.2 Funcionamiento del modelo de reconocimiento de pose *Open Pose*

Se logra describir el funcionamiento del modelo Open Pose revisando los 3 procesos internos más significativos, los mismos que se componen de algoritmos entrenados mediante técnicas de *deep learning* (redes neuronales convolucionales y aprendizaje supervisado). Tanto el proceso 1 como el 2 se ejecutan en simultáneo, *branch*

1 y 2, respectivamente, tal como se muestra en la arquitectura CNN multicapa de la Figura B.2: en el *branch* de color beige se realiza la predicción de las ubicaciones de cada una de las partes del cuerpo derivando en los mapas de confianza 2D (PCM, por sus siglas en inglés); y en el *branch* de color azul se realiza la predicción de los campos vectoriales que describen la orientación y ubicación de los miembros del cuerpo (PAF, por sus siglas en inglés). Ambos se repiten durante t veces. Luego, en el tercer y último proceso, se desarrolla la asociación de partes con el fin de obtener la pose final de cada persona en una imagen, esto último utilizando el método de coincidencia bipartita.

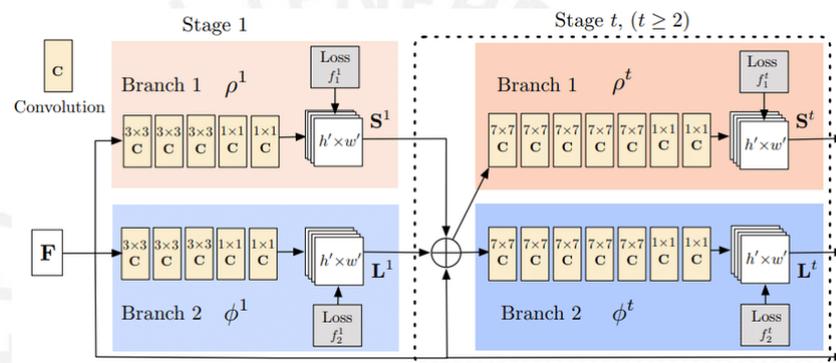


Figura B.2: Arquitectura multi-stage de modelo *Open Pose*.
Fuente: [22].

Finalmente, se debe mencionar que la matriz F corresponde al mapa de características (*feature map*) de una imagen o *frame* de video. Además, dicha matriz se concatena con las predicciones realizadas en cada etapa con el fin de cumplir la supervisión del modelo.

Predicción de mapas de confianza para partes del cuerpo

Como se mencionó párrafos anteriores, los mapas de confianza describen la predicción de la ubicación de las partes del cuerpo dentro de una imagen. La evaluación supervisada durante el entrenamiento de las redes convolucionales que corresponden a la presente etapa se basó en desarrollar un proceso comparativo entre las predicciones y las articulaciones anotadas en el *dataset*. Esta comparación culminó en la obtención de los

mapas de confianza *groundtruth* \mathbf{S}^* , definido según la notación de la ecuación B.1.

$$\mathbf{S}_{j,k}^*(\mathbf{P}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{P} - \mathbf{x}_{j,k}\|_2^2}{\sigma^2}\right). \quad (\text{B.1})$$

Donde $\mathbf{x}_{j,k}$ indica la posición etiquetada, \mathbf{P} la posición predicha y σ una constante (j y k el número articulación y persona respectivamente). Después, aplicando la técnica de supresión de no máximos (*non-maximum suppression*) a los resultados en \mathbf{S}^* , se logra conservar las estimaciones con valores máximos \mathbf{S}^* según la siguiente relación:

$$\mathbf{S}^*(\mathbf{P}) = \max_j \mathbf{S}_{j,k}^*(\mathbf{P}).$$

Al final, durante la etapa de *testing*, se verifica que la técnica anteriormente utilizada logre aumentar la exactitud en las predicciones de cada una de las partes del cuerpo. Además, se logra obtener tantos mapas de confianza como partes se encuentran en el cuerpo (ver Figura 4.3).



Figura B.3: Predicción de mapas de confianza para partes del cuerpo.
Fuente: [22].

Predicción de campo de afinidad para asociación de partes

La predicción del campo de afinidad de partes (PAF, por sus siglas en inglés) se enfoca en estimar campos vectoriales 2D que describan la ubicación y orientación de las extremidades del cuerpo en una imagen. Así e igual que en el anterior apartado, la evaluación durante el entrenamiento del algoritmo de estimación del campo de afinidad de partes se basó en conservar los puntos estimados que se ubiquen sobre alguna

extremidad. Para el caso válido, se asigna al punto estimado el vector unitario \mathbf{v} que se encuentra en dirección al eje longitudinal del miembro \mathbf{c} del cuerpo \mathbf{k} (parámetros en Figura B.4).

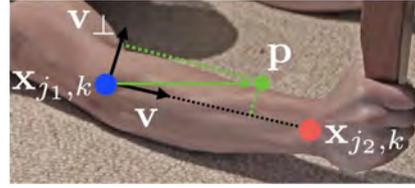


Figura B.4: Predicción de mapas de confianza para partes del cuerpo.
Fuente: [22].

Para el caso adverso, el punto adquiere el valor de 0, y es discriminado durante la etapa de evaluación. Este proceso se puede revisar en la siguiente expresión:

$$\mathbf{L}_{c,k}^*(\mathbf{p}) = \begin{cases} \mathbf{v} & \text{si } \mathbf{p} \text{ esta sobre } \mathbf{c}, \mathbf{k} \\ \mathbf{0} & \text{para los demas casos} \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

Además, es necesario indicar que la región que abarca una extremidad se encuentra dentro del margen expreso en la ecuación B.3:

$$0 \leq \mathbf{v} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{x}_{j_1,k}) \leq l_{c,k} \wedge |\mathbf{v}_{\perp} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{x}_{j_1,k})| \leq \sigma_l \quad (\text{B.3})$$

Donde $\mathbf{x}_{j_1,k}$ es la ubicación anotada de la articulación que se ubica al límite de una extremidad, y tanto $l_{c,k}$ como σ_l definen el largo y ancho en pixeles de este último miembro. Finalmente, se procede a medir el nivel de asociación E , que existe entre una extremidad formada por dos articulaciones estimadas (\mathbf{d}_{j_1} y \mathbf{d}_{j_2}) y el PAF, que se superpone a dicha extremidad. Así, la medición del nivel de asociación se basará en resolver la integral de línea que forma parte de la expresión B.4.

$$E = \int_{u=0}^{u=1} \mathbf{L}_c(\mathbf{P}(u)) \cdot \frac{\mathbf{d}_{j_2} - \mathbf{d}_{j_1}}{\|\mathbf{d}_{j_2} - \mathbf{d}_{j_1}\|_2} du \quad (\text{B.4})$$

Donde $\mathbf{P}(u)$ interpola las dos partes del cuerpo \mathbf{d}_{j_1} y \mathbf{d}_{j_2} .

Estrategia de asociación de partes

El proceso de asociación de partes mediante la técnica de coincidencia bipartita se

basa en obtener el emparejamiento más óptimo entre las partes estimadas que deriven en la formación de la pose de una persona en la imagen. Para conseguirlo, primero, se define el grupo de articulaciones estimadas que se logran alcanzar dentro de una imagen, este grupo dentro del conjunto $D_j = \{\mathbf{d}_j^m: \text{para } j \in \{1 \dots J\}, m \in \{1 \dots N_j\}\}$, donde $\mathbf{d}_j^m \in \mathbb{R}^2$. Luego, se define la variable $Z_{j_1 j_2}^m \in \{0,1\}$, que se utiliza para indicar si dos articulaciones pueden presentar una posible asociación. Cabe indicar que dos articulaciones del mismo tipo no pueden estar emparejadas. Finalmente, con los argumentos indicados anteriormente, el proceso de emparejamiento se basa en encontrar las asociaciones de miembros o extremidades con mayor suma de valores o pesos, suma que al final indica la conformación de la pose de una persona. Para esto, cada segmento formado por dos articulaciones se valora en función a la relación B.4 (E). Todo el proceso anterior se refleja en la secuencia de imágenes de la Figura B.5. Los puntos de color rojo y azul, en la imagen izquierda, son candidatos para formar un miembro, y las líneas verdes representan todas las posibles asociaciones. Después, en la imagen central, se recurre a la técnica del punto medio como estrategia para reducir el tiempo de emparejamiento. Finalmente, en la imagen derecha, se muestra explícito el resultado de emparejar correctamente dos partes utilizando el campo vectorial de afinidad de partes (flechas de color verde).



Figura B.5: Estrategia de asociación de partes para detección de pose.
Fuente: [22].

Resultados del modelo Open Pose

El modelo *Open Pose* se evalúa utilizando las imágenes asignadas para la etapa de *testing* de dos *datasets* (MPII Y COCO 2016), donde algunas de ellas presentan variantes en la ubicación de las personas a fin de aumentar la dificultad durante la etapa de prueba, como sobrepoblación, tamaño de escala, rotación y superposición. Los resultados de utilizar 288 imágenes en la prueba del algoritmo *Open Pose* y en otros tres modelos semejantes de reconocimiento de pose se presentan en la Tabla B.1.

Tabla B.1: Resultados de estimación para modelos de detección de pose.

Method	Hea	Sho	Elb	Wri	Hip	Kne	Ank	mAP	s/image
Deepcut	73.4	71.8	57.9	39.9	56.7	44.0	32.0	54.1	57995
Iqbal et al.	70.0	65.2	56.4	46.1	52.7	47.9	44.5	54.7	10
Deepcut	87.9	84.0	71.9	63.9	68.8	63.8	58.1	71.2	230
Open Pose	93.7	91.4	81.4	72.5	77.7	73.0	68.1	79.7	0.005

Fuente: [22].

En la tabla anterior, se mide la precisión de estimar de 7 *keypoints*, y se observa que el modelo Open Pose es el de mayor valor con un **mAP** (*mean average precision*) de 79.7. También se revisa el tiempo medio de predicción por imagen, donde, nuevamente, el modelo Open Pose logra alcanzar una media de 0.005 segundos menor a los demás modelos.

C. Lista de requerimientos

Tabla C.1: Lista de requerimientos (1/3).

Lista de requerimientos		Hoja	1 de 3	
Proyecto	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO		Elaborado	05/10/2020
			Autor	I. Rojas
Actualización (fecha)	E D	Requerimientos	Responsable	
15/08/2021	E	1. Función principal Obtener el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima luego del CMJ utilizando un subsistema de medición de fuerza y validar la ejecución del CMJ utilizando un subsistema de captura de imágenes.	I.R.C	
15/08/2021	E	2. Geometría Subsistema de medición de fuerza: -Área de la base < 70 cm ² -Altura < 25 cm. Subsistema de captura de imágenes y validación del CMJ:	I.R.C	
	E	-Área de la base < 50 cm ² . -Altura < 150 cm.		
15/08/2021	E	3. Cinemática Todas las partes del sistema sin movimiento durante la operación.	I.R.C	
15/08/2021	E	4. Masa -Subsistema de medición de fuerza < 15 kg. -Subsistema de captura de imágenes y validación del CMJ < 600 g.	I.R.C	
15/08/2021	E	5. Energía Entrada: -Fuente de energía externa = 220VAC, 60 Hz. -Fuerzas voluntarias.	I.R.C	
	E	Salida: -Calor. -Energía luminosa.		
15/08/2021	E	6. Material - Rígido y dúctil según su aplicación. - Resistente a la fatiga para piezas con cargas cíclicas. -Temperatura externa de trabajo para piezas mecánicas < 40°C. - Temperatura externa de trabajo para componentes electrónicos < 85°C.	I.R.C	
15/08/2021	E	7. Señales Entrada: -Señal de encendido/apagado (contacto por interacción). -Señal subir/bajar (manejo de punteros). -Señal para seleccionar y cancelar.	I.R.C	
	E	8. Salida: -Señal de resultados y opciones de selección. -Señal de espera. -Luz y calor.		

Tabla C.2: Lista de requerimientos (2/3).

Lista de requerimientos		Hoja	2 de 3	
Proyecto	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO		Elaborado	05/10/2020
			Autor	I. Rojas
Actualización (fecha)	E D	Requerimientos	Responsable	
15/08/2021	D	9. Seguridad -Cumplir el grado de protección: IP31 -Extensiones para facilitar la manipulación del sistema. -Materiales no conductores de calor y electricidad.	I.R.C	
15/08/2021	E D	10. Ergonomía -Elementos para el ingreso de señales de control al alcance del usuario. -Visibilidad de las señales proyectadas a una distancia mínima de 1.5 m.	I.R.C	
15/08/2021	E	11. Fabricación -Materiales, mano de obra y manufactura deben encontrarse dentro del mercado local.	I.R.C	
15/08/2021	D D D	12. Instalación -Tiempo de instalación menor a 5 min. -Nivel de conocimiento para instalación: Intuitivo. -Piezas desmontables para instalación.	I.R.C	
15/08/2021	E D	13. Transporte -Trasporte manual -Puntos de apoyo para instalación.	I.R.C	
15/08/2021	E E D D	14. Operación -Energía interna < 12 VDC. -Funcionamiento sobre superficies planas. -Nivel de humedad externa < 70%. -Nivel de iluminación externa > 500 lux.	I.R.C	
15/08/2021	E	15. Mantenimiento -Mantenimiento correctivo para todo el sistema. -Disposición de repuestos en el mercado local. -Facilidad para acceder a los componentes internos del sistema.	I.R.C	
15/08/2021	E	16. Electrónica -Conjunto de sensores que garanticen la lectura de las fuerzas pie-piso en una persona con peso de 85kgf o menos durante el CMJ. -Procesador para ejecutar el modelo de reconocimiento de articulación y validar el CMJ. -Dispositivo para captura de imágenes en alta resolución. -Unidad electrónica para procesar las señales de fuerza que deriven en el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima. -Unidad electrónica para administrar tanto los estados del sistema como las señales de entrada de control y las señales de proyección de salida. -Memoria electrónica para almacenar configuraciones del sistema y resultados pasados.	I.R.C	

Tabla C.3: Lista de requerimientos (3/3).

Lista de requerimientos		Hoja	3 de 3	
Proyecto	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO		Elaborado	05/10/2020
			Autor	I. Rojas
Actualización (fecha)	E D	Requerimientos	Responsable	
15/08/2021	E	17. Comunicación -Comunicación analógica entre sensores de fuerza y módulos electrónicos de acondicionamiento de señales. -Comunicación digital entre unidades de procesamiento y unidad de interfaz. -Todas las conexiones por cables.	I.R.C	
15/08/2021	E	18. Interfaz -Pantalla para proyección de resultados, etapas de funcionamiento y opciones de selección. -Indicadores luminosos para señales de espera. -Interruptores ópticos para ingreso de señales de control.	I.R.C	
15/08/2021	E	19. Software -Diseño del software principal de funcionamiento. -Diseño del algoritmo de procesamiento de las señales de fuerza que deriven en el nivel de dispersión de la potencia mecánica máxima. -Diseño del algoritmo de validación de la ejecución del CMJ que utilice un modelo de reconocimiento de articulaciones elaborado por un tercero.	I.R.C	
15/08/2021	E	20. Costo -Costo de materiales < 2500 soles - Costo de diseño < 4000 soles - Costo de fabricación y ensamblaje < 600 soles	I.R.C	

Fuente: Elaboración propia.

D. Estructura de funciones

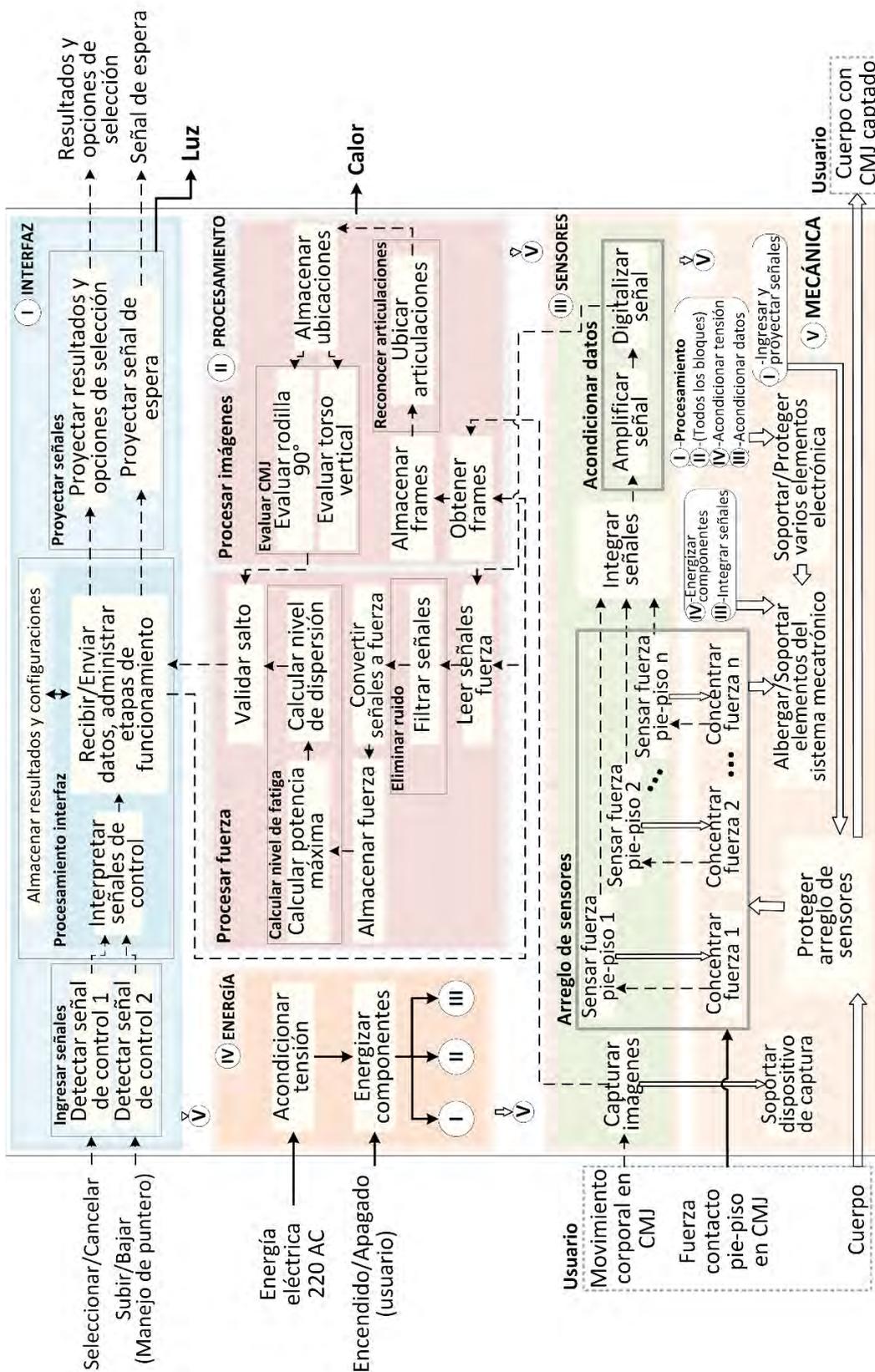


Figura D.1: Estructura de funciones del sistema mecatrónico.

Fuente: Elaboración propia.



Platinas



NORMAS TÉCNICAS

- Propiedades Mecánicas: ASTM A36/A36M y NTP 350.400
- Tolerancias Dimensionales: ASTM A6/A6M y NTP 241.105



PRESENTACIÓN

Se comercializa en barras de 6 metros de longitud. Se suministra en paquetes de 1 t.



USOS

En la fabricación de estructuras metálicas, puertas, ventanas, rejas, piezas forjadas y otros.



PROPIEDADES MECÁNICAS

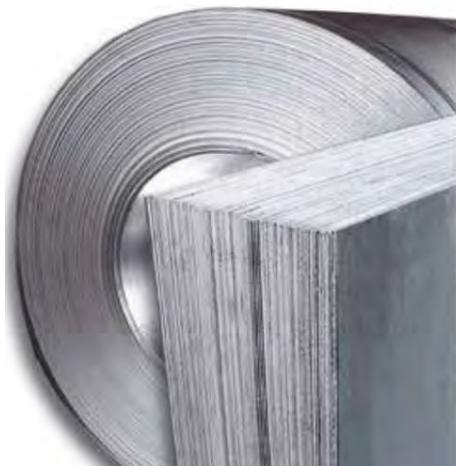
- Límite de Fluencia mínimo = 250 Mpa (2,530 kg/cm²) mínimo
- Resistencia a la Tracción = 450 - 550 Mpa (4,080-5,620 kg/cm²)
- Alargamiento en 200 mm:
 - 1/8" y 3/16" = 15.0% mínimo
 - 1/4" = 17.5% mínimo
 - 5/16, 3/8", 5/8", 3/4" y 1" = 20.0% mínimo
- Doblado a 180° = Bueno
- Soldabilidad = Buena

DIMENSIONES

Sistema Inglés (pulgadas)		
1/8 x 1/2	1/4 x 1	1/2 x 3
1/8 x 3/4	1/4 x 1 1/4	1/2 x 4
1/8 x 1	1/4 x 1 1/2	5/8 x 4
1/8 x 1 1/4	1/4 x 2	3/4 x 4
1/8 x 1 1/2	1/4 x 2 1/2	1 x 4
1/8 x 2	1/4 x 3	3/8 x 5
3/16 x 1/2	1/4 x 4	3/8 x 6
3/16 x 5/8	3/8 x 1	1/2 x 5
3/16 x 3/4	3/8 x 1 1/4	1/2 x 6
3/16 x 1	3/8 x 1 1/2	5/8 x 5
3/16 x 1 1/4	3/8 x 2	5/8 x 6
3/16 x 1 1/2	3/8 x 2 1/2	3/4 x 5
3/16 x 2	3/8 x 3	3/4 x 6
3/16 x 2 1/2	3/8 x 4	1 x 5
3/16 x 3	1/2 x 1 1/2	1 x 6
1/4 x 5/8	1/2 x 2	
1/4 x 3/4	1/2 x 2 1/2	



Planchas y Bobinas LAF



DIMENSIONES NOMINALES

PLANCHAS LAF (PLAF A 1008 TB)	BOBINAS (BLAF A 1008 TB)
0.30 x 1,200 x 2,400 mm	0.30 x 905 mm
0.40 x 905 x 2,400 mm	0.30 x 1,200 mm
0.40 x 1,200 x 2,400 mm	0.40 x 905 mm
0.45 x 1,200 x 2,400 mm	0.40 x 1,200 mm
0.50 x 1,200 x 2,400 mm	0.50 x 905 mm
0.55 x 1,200 x 2,400 mm	0.55 x 1,200 mm
0.60 x 1,200 x 2,400 mm	0.60 x 910 mm
0.70 x 1,200 x 2,400 mm	0.60 x 1,200 mm
0.75 x 1,200 x 2,400 mm	0.70 x 1,200 mm
0.80 x 1,200 x 2,400 mm	0.75 x 1,200 mm
0.85 x 1,200 x 2,400 mm	0.80 x 1,200 mm
0.90 x 1,200 x 2,400 mm	0.85 x 1,200 mm
0.95 x 1,200 x 2,400 mm	0.90 x 1,200 mm
1.00 x 1,200 x 2,400 mm	0.95 x 1,200 mm
1.15 x 1,200 x 2,400 mm	1.00 x 1,200 mm
1.20 x 1,200 x 2,400 mm	1.15 x 1,200 mm
1.45 x 1,200 x 2,400 mm	1.20 x 1,200 mm
1.50 x 1,200 x 2,400 mm	1.45 x 1,200 mm
1.90 x 1,200 x 2,400 mm	1.50 x 1,200 mm
1.95 x 1,200 x 2,400 mm	1.90 x 1,200 mm
2.00 x 1,200 x 2,400 mm	1.95 x 1,200 mm



NORMAS TÉCNICAS

ASTM A1008/A1008M Tipo B y Dimensiones según JIS G3141-2011.



USOS

En partes expuestas donde se requiere un buen acabado superficial; como por ejemplo: muebles, tubos, paneles, carrocerías, artefactos electrodomésticos, etc.



PRESENTACIÓN

- ACABADO: Las planchas y bobinas laminadas en frío son aceitadas con bordes de laminación.
- EMPAQUETADO DE PLANCHAS: Se entregan paquetes de 3TM.
- BOBINAS: Se entregan con peso mínimo de 4TM aproximadamente.



PROPIEDADES MECÁNICAS

- Límite de Fluencia mínimo = 140 - 275 MPa (1,410 - 2,810 kg/mm²) (referencial).
- Alargamiento en 50 mm = 30.0% mínimo (referencial).

Figura E.2: Propiedades para platina de acero estructural ASTM A36 y A1008. Fuente: [Aceros Arequipa].

Electrodos Lincoln Electric

Especificaciones técnicas:

Modelo:	Gricon
E6011	3/32" pulgadas
E6011	1/8" pulgadas
E6011	5/32" pulgadas
E7018	1/8" pulgadas
E7018	5/32" pulgadas

Figura E.3: Selección de electrodo para unión soldada entre platina como tuerca y marco superior.

Fuente: [Edipesa].



Quadrant's Proteus® LSG HS PP - At a Glance

Properties of Proteus® LSG HS PP

- Superior resistance to common autoclave/steam sterilization techniques as a result of the high heat deflection temperature (HDT > 300 °F / 149 °C per ASTM D 648)
- Excellent dimensional stability
- Proven biocompatibility per ISO 10993-5
- Plates produced from natural homopolymer base resin that is USP Class VI compliant and that meets the food contact code of regulations specified by the FDA.
- Excellent machinability
- Lot traceability & material certification
- Available in standard colors: white and black
- Available as plates
- Other colors possible via make to order (MTO) request

Disponibilidad

- **Disponible en stock:** Barras cuadradas de (10-60mm) y planchas con espesores de (6-60mm).
- **Otras medidas de barras y planchas a pedido directo.** Consúltenos.

Quadrant produces machinable advanced engineering materials such as Ketron® LSG PEEK, Quadrant® LSG PPSU, Quadrant® LSG PSU and Durantron® LSG PEI as rod, plate or tube and can facilitate the manufacture of finished parts from its full range of materials. This broad product range and our knowledgeable application development team can support your use of our pre-certified, biocompatible Life Science Grades, as well as implantable grade PE-UHMW (Chirulen® and Extrulen™).

Figura E.4: Propiedades para chapa PP.

Fuente: [Platensa].

DIN 2093											
Dati tecnici / Technical data											
cod. code	D [mm]	d [mm]	S [mm]	h [mm]	h+S [mm]	cod. code	D [mm]	d [mm]	S [mm]	h [mm]	h+S [mm]
41443087	8	4,2	0,40	0,20	0,60	41443399	40	20,4	1,50	1,15	2,65
41443100	10	5,2	0,40	0,30	0,70	41443412	40	20,4	2,00	0,90	3,15
41443113	12,5	6,2	0,70	0,30	1,00	41443425	40	20,4	2,50	0,90	3,45
41443126	14	7,2	0,50	0,40	0,90	41443438	45	22,4	1,75	1,30	3,05
41443139	14	7,2	0,80	0,30	1,10	41443451	45	22,4	2,50	1,00	3,50
41443152	15	8,2	0,80	0,40	1,20	41443464	50	18,4	2,00	1,50	3,50
41443161	16	8,2	0,60	0,45	1,05	41443477	50	25,4	2,00	1,40	3,40
41443165	18	9,2	0,70	0,50	1,20	41443490	50	25,4	3,00	1,10	4,10
41443178	18	9,2	1,00	0,40	1,40	41443503	56	28,5	2,00	1,60	3,60
41443191	20	10,2	0,80	0,55	1,35	41443516	56	28,5	3,00	1,30	4,30
41443204	20	10,2	1,10	0,45	1,55	41443522	60	20,5	2,00	2,10	4,10
41443217	22,5	11,2	0,80	0,65	1,45	41443542	60	30,5	3,00	1,70	4,70
41443230	22,5	11,2	1,25	0,50	1,75	41443555	63	31,0	2,50	1,75	4,25
41443243	25	12,2	1,50	0,55	2,05	41443568	63	31,0	3,50	1,40	4,90
41443256	28	10,2	1,00	0,90	1,90	41443581	70	35,5	3,00	2,10	5,10
41443269	28	12,2	1,50	0,75	2,25	41443594	71	36,0	4,00	1,60	5,60
41443282	28	14,2	1,00	0,80	1,80	41443607	80	41,0	3,00	2,30	5,30
41443295	28	14,2	1,50	0,65	2,15	41443620	80	41,0	4,00	2,20	6,20
41443308	31,5	16,3	1,25	0,90	2,15	41443633	80	41,0	5,00	1,70	6,70
41443321	31,5	16,3	1,75	0,70	2,45	41443646	100	41,0	4,00	3,20	7,20
41443334	31,5	16,3	2,00	0,75	2,75	41443659	100	51,0	3,50	2,80	6,30
41443347	34	16,3	2,00	0,85	2,85	41443672	100	51,0	5,00	2,80	7,80
41443360	35,5	18,3	1,25	1,00	2,25	41443685	112	57,0	4,00	3,75	7,20
41443373	35,5	18,3	2,00	0,80	2,80	41443698	140	72,0	5,00	4,70	9,00
41443386	40	16,3	2,00	1,10	3,10						

Figura E.5: Selección de arandela believe DIN 2093.
Fuente: [Gnutti Bortolo]

Technical data sheet ABS	Ultimaker			
	Injection molding		3D printing	
Mechanical properties (*)	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	2030 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	1681.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	43.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	39.0 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	33.9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	4.8 %	ISO 527 (50 mm/min)	3.5 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	34 %	ISO 527 (50 mm/min)	4.8 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	70.5 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	2070.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	10.5 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	58 kJ/m ²	ISO 179	-	-
Hardness	97 (Shore A)	-	-	-

Figura E.6: Propiedades para plástico ABS.
Fuente: [Ultimaker]



indiamart[®]

Product Specification

Usage/Application	Photography
Model Name/Number	TF-3120
Tripod Material	Aluminum Tripod
Color	Black
Max Load	20 Kg
Product Weight	1250 gm
Maximum Length	1020 mm

Figura E.7: Especificaciones para trípode TF-3120.
Fuente: [Indiamart]

Model 380
Tedeo-Huntleigh

VPG Transducers
Celtron • Revere • Sensortronics • Tedeo-Huntleigh

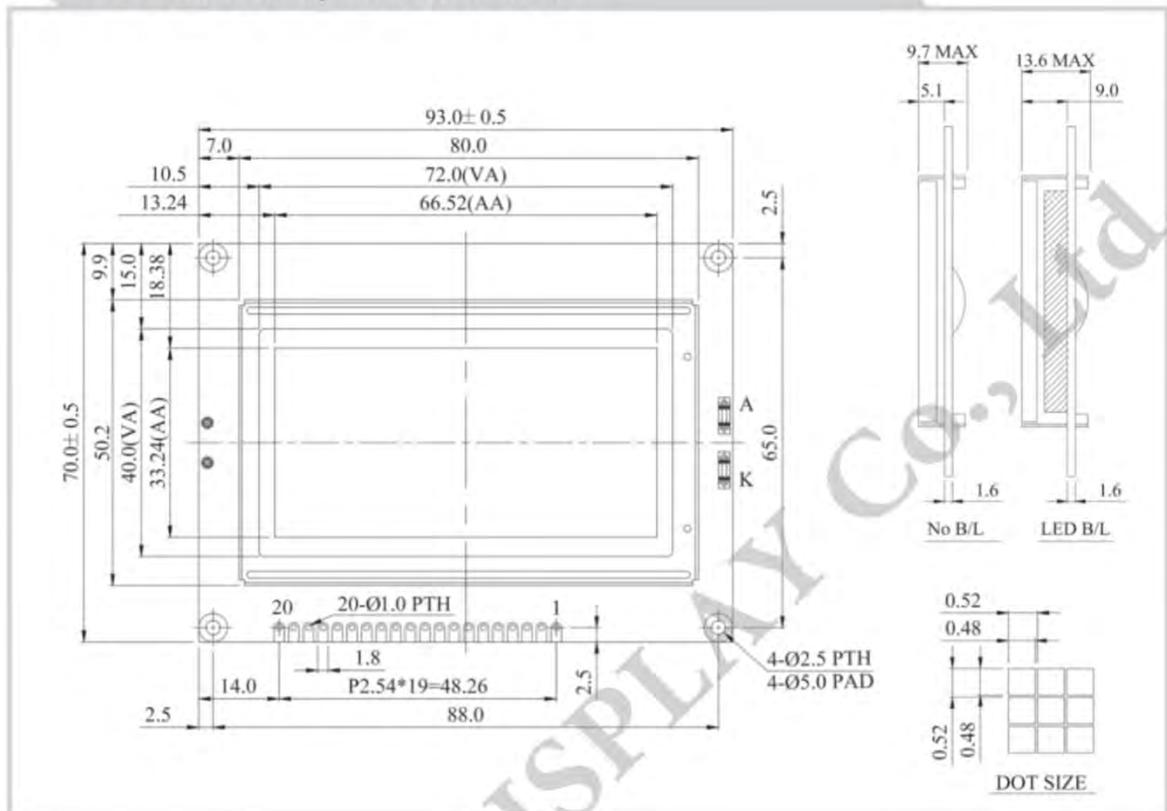
Co-Planar Beam Load Cell

SPECIFICATIONS				
PARAMETER	VALUE			UNIT
Rated capacity – R.C. (E _{max})	7.5, 37.5, 50, 75, 150, 250			kg
Accuracy class	E	G4	H5	
OIML Accuracy class	NA	C3	C4	
Maximum no. of intervals (n)	NA	3000	4000	
Y = E _{max} /V _{min} *	NA	7500*	7500*	
Rated output – R.O.	1.0			mV/V
Rated output tolerance	0.10	0.001		±mV/V
Zero balance	0.10			±mV/V
Creep, 30 min.	0.074	0.024	0.018	±% of load
Zero return, 30 min.	0.05	0.0167	0.0125	±% of load
Temperature effect on output	0.002	0.001	0.00075	±% of load/°C
Temperature effect on zero	0.007	0.00186	0.00186	±% of R.O./°C
Input impedance	1160±15			Ω
Output impedance	1000±10			Ω
Insulation resistance	5000			MΩ
Temperature range, compensated	-10 to +40			°C
Temperature range, safe	-30 to +70			°C
Maximum safe central overload	300			% of R.C.
Ultimate static overload	400			% of R.C.
Safe side load	200			% of R.C.
Cable type	4 conductors, 26AWG, flat, PVC			
Cable length	1.5			m
Color code	+Exc: Green, +Sig: Red, -Exc: blk, -Sig: wht			
Construction	Aluminum, RTV potting			
Environmental protection	IP65			
Outline dimensions drawing	378.000.003			

* Consult factory for higher Y values availability
All specifications subject to change without notice.

Figura E.8: Características para celda de carga de tipo plano modelo 380.
Fuente: [32].

WG12864A Graphic 128x64 dots



Feature

1. Built-in controller (NT 7108 or equivalent)
2. 5V power supply
3. 1/64 duty cycle
4. WG12864AB: N.V. option for 3.3V
5. WG12864A1: double-row interface

Pin No.	Symbol	Description
1	V _{SS}	Ground
2	V _{DD}	Power supply for logic
3	V _O	Contrast Adjustment
4	D/I	Data/ Instruction select signal
5	R/W	Read/Write select signal
6	E	Enable signal
7	DB0	Data bus line
8	DB1	Data bus line
9	DB2	Data bus line
10	DB3	Data bus line
11	DB4	Data bus line
12	DB5	Data bus line
13	DB6	Data bus line
14	DB7	Data bus line
15	CS1	Select Column 1~ Column 64
16	CS2	Select Column 65~ Column 128
17	/RES	Controller reset signal, Active Low
18	V _{EE}	Negative Voltage Output
19	A	Power supply for B/L +
20	K	Power supply for B/L -

Mechanical Data

Item	Standard Value	Unit
Module Dimension	93.0 x 70.0	mm
Viewing Area	72.0 x 40.0	mm
Mounting Hole	88.0 x 65.0	mm
Dot Pitch	0.52 x 0.52	mm
Dot Size	0.48 x 0.48	mm

Electrical Characteristics

Item	Symbol	Standard Value	Unit
		typ.	
Input Voltage	V _{DD}	5.0	V
Recommended LCD Driving Voltage for Normal Temp. Version module @25°C	V _{DD} -V _O	8.90	V

Figura E.9: Características técnicas para pantalla LCD 128X64.
Fuente: [Naylamp Mechatronics]

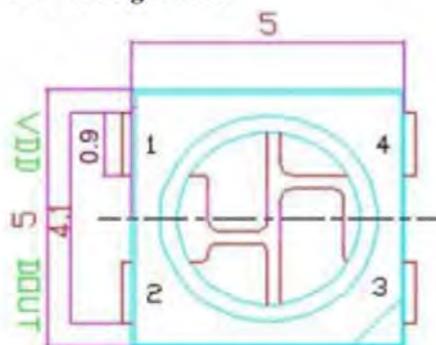


General

Material	Aluminium, Plastic
Operating Voltage	3.3V - 5.5V
Medium	Light
Function	Proximity
Sensor	IR
IC	LM393 Comparator
Detection distance	2 ~ 30cm
Detection angle	35 ° Degree
Board size	3.2 x 1.4cm

Figura E.10: Características módulo infrarrojo FC-51.
Fuente: [Ardugeek electronics]

PIN configuration



PIN function

NO.	Symbol	Function description
1	VDD	Power supply LED
2	DOUT	Control data signal output
3	VSS	Ground
4	DIN	Control data signal input

Absolute Maximum Ratings

Prameter	Symbol	Ratings	Unit
Power supply voltage	V_{DD}	+3.5~+5.3	V
Input voltage	V_I	-0.5~ $V_{DD}+0.5$	V
Operation junction temperature	T_{opt}	-25~+80	°C
Storage temperature range	T_{stg}	-40~+105	°C

Electrical Characteristics ($T_A=-20\sim+70^{\circ}\text{C}$, $V_{DD}=4.5\sim 5.5\text{V}$, $V_{SS}=0\text{V}$, unless otherwise specified)

Figura E.11: Características modulo LED WS2812B.
Fuente: [Naylamp Mechatronics]

24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation < 1.5mA, power down < 1uA
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: -40 ~ +85°C
- 16 pin SOP-16 package

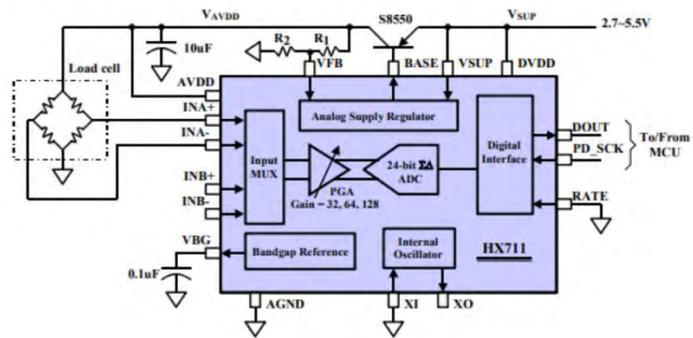
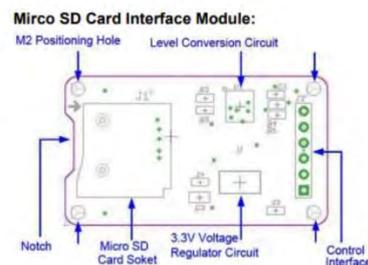


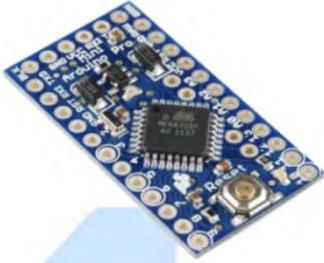
Figura E.12: Características modulo acondicionador ADC HX711. Fuente: [SparkFun].



Interface Parameters:

Items	Min	Typical	Max	Unit
Power Voltage VCC	4.5	5	5.5	V
Current	0.2	80	200	mA
Interface Electrical Potential	3.3 or 5			V
Support Card Type	Micro SD Card(<=2G), Mirco SDHC Card(<=32G)			—
Size	42X24X12			mm
Weight	5			g

Figura E.13: Características modulo lector de tarjeta micro SD. Fuente: [Sparkfun].



Especificaciones

Microcontrolador	ATmega328
Velocidad del reloj	16MHz
Memoria Flash	32KB
Memoria SRAM	2KB
Memoria EEPROM	1 KB
Voltaje de Funcionamiento	5 V
Corriente de Funcionamiento:	150 mA
Pines digitales I/O	14(incluidos 6 salidas para PWM)
Pines de Entrada Analógicos	8
Comunicación	TTL RX/TX
Dimensiones	33 x 18 mm
Fuente de Alimentación externa:	fuentes de alimentación de CD externa (5 -12 V)

Figura E.14: Características de Arduino Mini Pro.
Fuente: [39].

Hardware

- Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 running at 1.5GHz
- 1, 2 and 4 Gigabyte LPDDR4 RAM options
- H.265 (HEVC) hardware decode (up to 4Kp60)
- H.264 hardware decode (up to 1080p60)
- VideoCore VI 3D Graphics
- Supports dual HDMI display output up to 4Kp60
- 1x Gigabit Ethernet port (supports PoE with add-on PoE HAT)
- 1x Raspberry Pi camera port (2-lane MIPI CSI)
- 1x Raspberry Pi display port (2-lane MIPI DSI)
- 28x user GPIO supporting various interface options:
 - Up to 6x UART
 - Up to 6x I2C
 - Up to 5x SPI
 - 1x SDIO interface
 - 1x DPI (Parallel RGB Display)
 - 1x PCM
 - Up to 2x PWM channels
 - Up to 3x GPCLK outputs

Interfaces

- 802.11 b/g/n/ac Wireless LAN
- Bluetooth 5.0 with BLE
- 1x SD Card
- 2x micro-HDMI ports supporting dual displays up to 4Kp60 resolution
- 2x USB2 ports
- 2x USB3 ports

Figura E.15: Características para mini ordenador Raspberry Pi 4 Model B.
Fuente: [40].

logitech



TECHNICAL SPECIFICATIONS

Max Resolution: 720p/30fps

Camera mega pixel: 0.9

Focus type: fixed focus

Lens type: plastic

Built-in mic: Mono

Mic range: Up to 1 m

Diagonal field of view (dFoV): 55°

Universal mounting clip fits laptops, LCD or monitors

Figura E.16: Características de cámara digital Logitech C270.
Fuente: [Logitech].

APIELE

MOUNTING HOLE SIZE:	3/4" 19MM	OPERATION:	LATCHING *
STRUCTURE:	1NO 1NC	LAMP COLOR:	
PROTECTION DEGREE:	IP65	SHELL MATERIAL:	ALUMINUM
RATED CURRENT:	5A	LAMP VOLTAGE:	12V

* (ON-OFF. PRESS THE BUTTON SWITCH WORK. PRESS AGAIN, SWITCH STOP WORK)

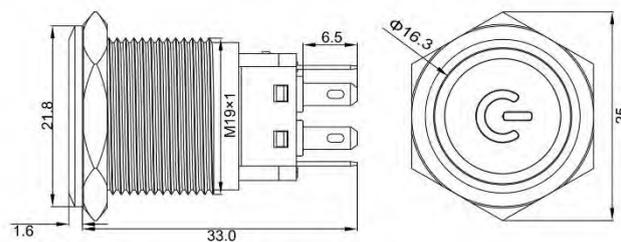


Figura E.17: Interruptor Apiele 3/4" de tipo *latching*.
Fuente: [Apiele].

F. Funcionamiento del sistema mecatrónico

Una vez que el sistema de medición se encuentra instalado, se procede a verificar la presencia del usuario sobre la plataforma mediante la lectura de los sensores de fuerza. Caso contrario, se visualiza el mensaje que se muestra en la Figura F.1.

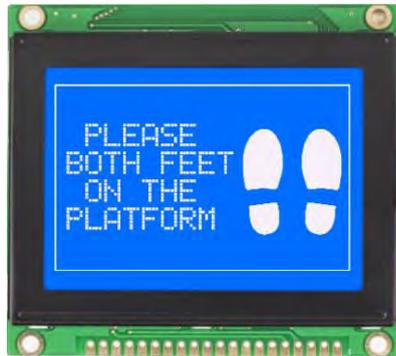


Figura F.1: Mensaje de alerta en pantalla.
Fuente: Elaboración propia.

Al verificarse la presencia del usuario sobre la plataforma, se proyectan dos opciones en pantalla (ver Figura F.2): la primera hace referencia al proceso de medición de la fatiga; y la segunda, al proceso de revisión de mediciones pasadas. El usuario debe seleccionar una de estas utilizando los módulos infrarrojos.

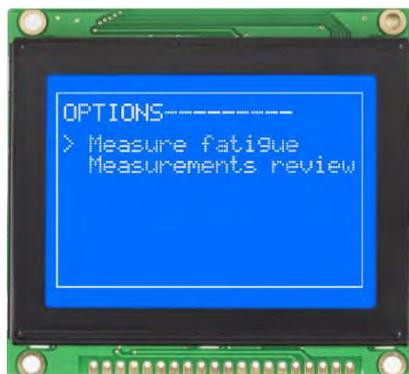


Figura F.2: Opciones de selección en pantalla.
Fuente: Elaboración propia.

En caso de seleccionar la primera opción, el sistema inicia midiendo por única vez el peso del usuario, argumento necesario para calcular la potencia mecánica. Luego, el sistema solicitará la ejecución del primer salto proyectando el mensaje de la Figura F.3.

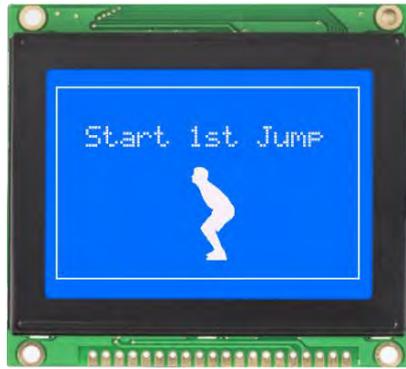


Figura F.3: Mensaje para inicio de salto.
Fuente: Elaboración propia.

El número de saltos programado en el sistema es de 6 repeticiones (cantidad recomendada en literatura [6]). El usuario debe concretar cada salto y realizar una pausa de recuperación entre ellos, pausa que tardará el tiempo que determine el especialista con el fin de agudizar el proceso de medición. Sobre el desarrollo del CMJ, se debe iniciar en una posición erguida sobre la plataforma; luego, continuar con la fase excéntrica; y finalizar con la fase concéntrica o liberación de energía del CMJ hasta alcanzar el despegue, vuelo y aterrizaje (ver Figura F.4).

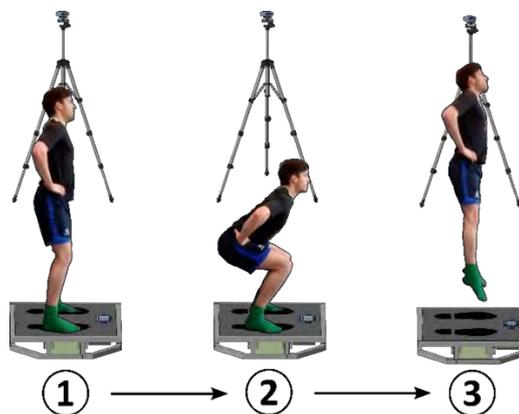


Figura F.4: Ejecución del CMJ sobre el sistema principal de medición.
Fuente: Elaboración propia.

En caso de no cumplirse uno de los criterios de validación del CMJ, como la perpendicularidad de rodilla durante la isometría, el sistema proyecta un mensaje en pantalla, tal como se muestra en la Figura F.5, con el fin de solicitar la repetición del último salto.



Figura F.5: Mensaje para salto invalido.
Fuente: Elaboración propia.

Al culminar los 6 saltos válidos, el sistema proyecta en la pantalla tanto el resumen de los resultados de la potencia mecánica máxima de cada salto como el coeficiente de variación y el código de operación de toda la serie (ver Figura F.6).

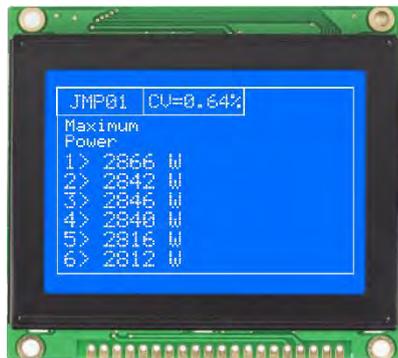


Figura F.6: Proyección de resultados luego del CMJ.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en caso de seleccionar la segunda opción que se presenta en la pantalla (ver Figura F.2), el sistema proyectará todos los códigos de las mediciones de fatiga realizadas anteriormente, con el fin de que el usuario pueda revisar los resultados pasados de su interés.

G. Información complementaria para diseño eléctrico y software

G.1 Circuito convertidor de nivel lógico para comunicación entre MCU y mini-PC

Las unidades de procesamiento MCU y mini-PC requieren mantener una comunicación serial de 3.3 V. Sin embargo, la tensión para la comunicación de la MCU procesamiento se encuentra alrededor de los 5V; y para el caso de la mini-PC, alrededor de los 3.3V. Este problema de incompatibilidad de tensiones se logra solucionar utilizando un circuito convertidor de nivel lógico bidireccional de la Figura F.1.

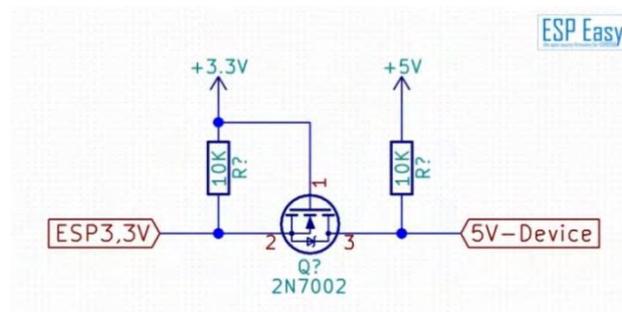


Figura G.1: Active bi-directional level converter circuit.

Fuente: [41]

El circuito anterior se compone de un mosfet canal N bidireccional (**2N7002**). Cuando se alimenta el pin **ESP3.3V** con una tensión de 3.3V, se obtiene una tensión de salida de 5V por el pin **5V-Device**. Mismo funcionamiento para el caso inverso.

G.2 Métodos de MCU Interfaz

Tabla G.1: Descripción de métodos de la MCU Interfaz.

Clase	Método	Descripción	Método	Descripción
Interfaz	Interfaz()	Constructor de clase	readFinishRx()	Lee fin de salto de MCU Procesamiento
	setInstruccion(param)	Asigna valor a atributo instrucción	printMaintance()	Imprime sistema bloqueado
	getInstruccion()	Obtiene valor de atributo instrucción	printResults()	Imprime valores de atributo resultados
	runInstruccion()	Ejecuta instrucción	printResults(param)	Imprime valores de objeto param
	readIR()	Lee señales IR y cambia valor de puntero e instruccion	printStartjump()	Imprime inicio de salto
	saveResults()	Almacena datos de atributo resultados en memoria	printFinishjump(param)	Imprime fin de salto si param es True
	loadResults()	Carga datos de memoria en resultados	printIDs()	Imprime ID's de atributo resultados
	readResultsRx()	Lee resultados por serial de MCU Procesamiento	getResultadoxID(param)	Obtiene objeto Resultado por ID
	sendJump()	Envía inicio de salto a MCU Procesamiento por GPIO	delay()	Detiene la ejecución por 500 ms
	readJumpRx()	Lee confirmación de salto vía	actNumSalto(para	Incrementa en 1 el atributo

	serial de MCU Procesamiento	m)	numSalto si param es True	
Resultado	Resultado()	Constructor de clase	setCV(param)	Asigna param a atributo CV
	getID()	Obtiene ID	getPM()	Obtiene atributo PM
	setID(param)	Asigna param a atributo ID	setPM(param)	Asigna param a atributo PM
	getCV()	Obtiene atributo ID	getCMJ()	Obtiene atributo CMJ

Fuente: Elaboración propia.

G.3 Métodos de MCU Procesamiento

Tabla G.2: Descripción de métodos de la MCU Procesamiento.

Clase	Método	Descripción	Método	Descripción
Procesamiento	Procesamiento ()	Constructor de clase	addResult()	Agrega resultado actual a atributo resultado
	setInstruccion(param)	Asigna param a atributo instruccion	sendResult ()	Envía atributo resultado a MCU Interfaz
	getInstruccion()	Obtiene atributo instrucción	sendJump ()	Envía confirmación de salto a MCU Interfaz
	saveForce()	Filtra y almacena las señales de fuerza en atributo fuerza	sendJumpTx ()	Envía inicio de salto a mini-PC
	calculatePower()	Calcula potencia máxima de atributo actual fuerza	getLength ()	Obtiene el tamaño del atributo resultado
	calculateVar ()	Calcula variabilidad de potencia máxima	delay ()	Detiene el proceso en 500 ms
	sendPresence ()	Envía a MCU Interfaz presencia sobre plataforma	deleteLast ()	Elimina ultimo objeto de atributo resultado
Medicion	readCMJ ()	Lee resultados de evaluación de CMJ de mini-PC	getLast ()	Obtiene el ultimo objeto de atributo resultado
	Medicion ()	Constructor de clase	getPM()	Obtiene atributo PM
	getID()	Obtiene atributo ID	setPM(param)	Asigna param a atributo PM
	setID(param)	Asigna param a atributo ID	getCMJ()	Obtiene atributo CMJ
	getCV()	Obtiene atributo CV	setCMJ(param)	Asigna param a atributo CMJ
	setCV(param)	Asigna param a atributo CV		

Fuente: Elaboración propia.

G.4 Métodos de mini-PC

Tabla G.3: Descripción de métodos de mini-PC.

Clase	Método	Descripción	Método	Descripción
mini_pc	mini_pc()	Constructor de clase	extractKeyjoints()	Extrae y almacena posición de articulaciones en atributo keyjoints
	setInstruccion (param)	Asigna param a atributo instruccion	evaluateCMJ()	Evalúa las condiciones de salto del CMJ
	getInstruccion()	Obtiene atributo instruccion	sendCMJ()	Envía los resultados del CMJ a MCU Procesamiento
	saveFrames()	Almacena <i>frames</i> de video en PC	readJump()	Lee intención de inicio de prueba de MCU Procesamiento
	makeVideo()	Integra <i>frames</i> para generar video	readFinishJump()	Lee intención de fin de prueba de MCU Procesamiento

Fuente: Elaboración propia.

G.5 Diagramas de flujo de unidades de procesamiento

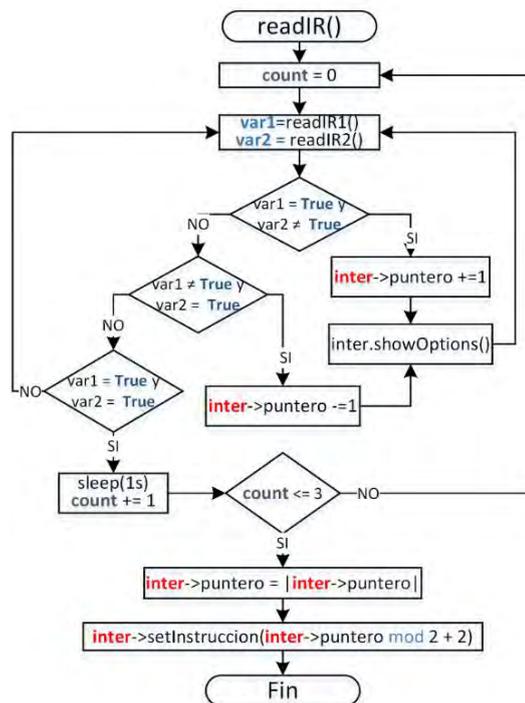


Figura G.2: Diseño de función `readIR()` de MCU Interfaz.
Fuente: Elaboración propia.

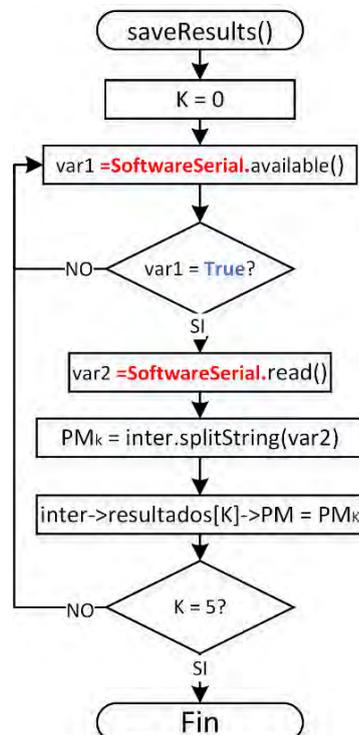


Figura G.3: Diseño de función `saveResults()` de MCU Interfaz.
Fuente: Elaboración Propia.

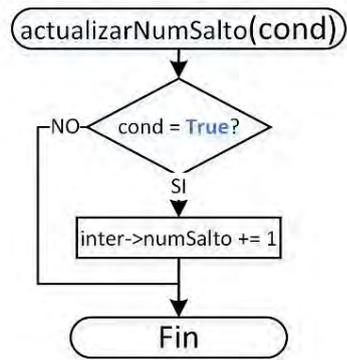


Figura G.4: Diseño de función `actualizarNumSalto(cond)`.
Fuente: Elaboración propia.

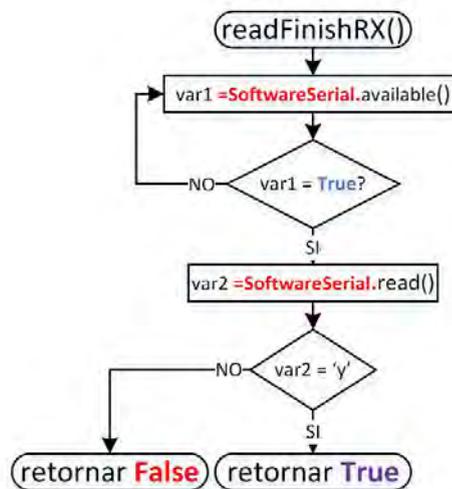


Figura G.5: Diseño de función `readFinishRX()` de MCU Interfaz.
Fuente: Elaboración propia.

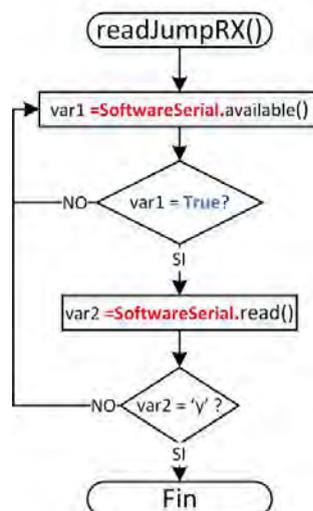


Figura G.6: Diseño de función `readJumpRX()` de MCU Interfaz.
Fuente: Elaboración propia.

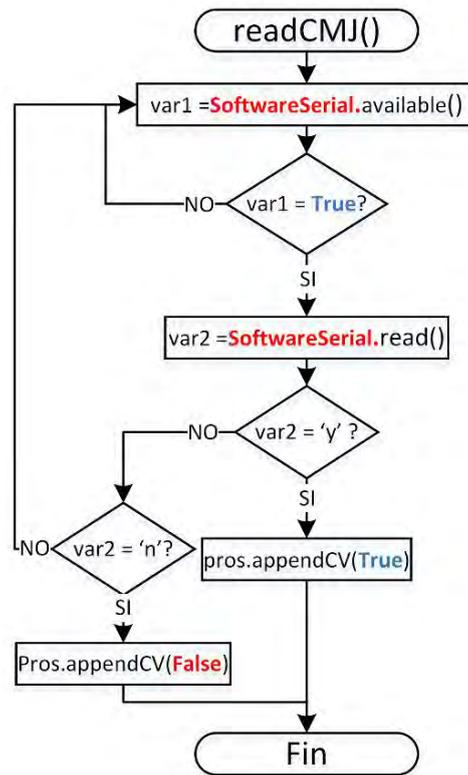


Figura G.7: Diseño de función **readCMJ()** de MCU Procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.



Figura G.8: Diseño de función **getLast()** de MCU Procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.



Figura G.9: Diseño de función **getLenght()** de MCU Procesamiento.
Fuente: Elaboración propio.

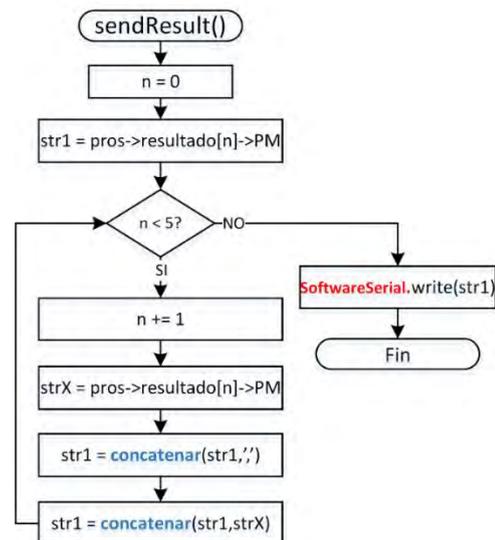


Figura G.10: Diseño de función `sendResult()` de MCU Procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

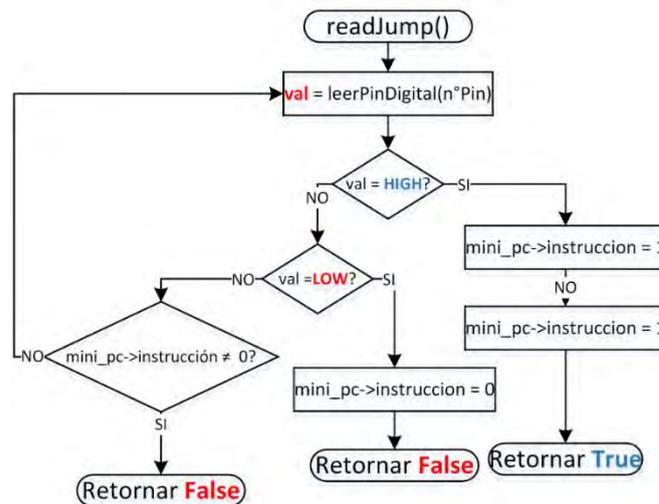


Figura G.11: Diseño de función `readJump()` de unidad mini-PC.
Fuente: Elaboración propia.

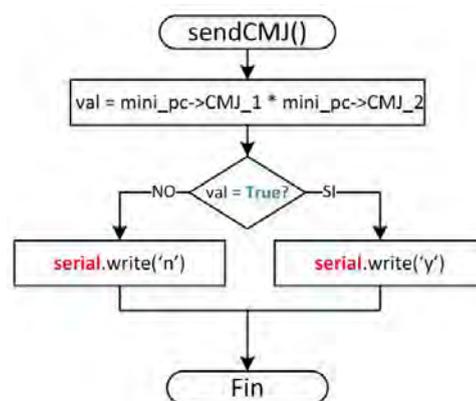


Figura G.12: Diseño de función `sendCMJ()` de unidad mini-PC.
Fuente: Elaboración propia.

G.6 Código de filtro FIR pasabajos

```

/**Método para almacenar los coeficientes del filtro FIR**/
bool Procesamiento::set_firCoeff(double *coef){
    // agregar coeficientes de filtro a atributo fir_coeff[]
    for(int i = 0; i < TAP; i++){
        this->fir_coeff[i] = *(coef + i);
    }
    return true; // retorna verdad al finalizar
}

/**Método para obtener el factor de ganancia**/
bool Procesamiento::set_Factor(){
    double val_tmp[TAP];
    double count = 0.0;
    for(int i = 0 ; i < TAP; i++){
        val_tmp[i] = 1.0; // se genera una señal de 1's en variable local val_tem[]
        // producto de coeficientes de filtro con señal de 1's
        count = this->fir_coeff[i] * val_tmp[i];
    }
    this->factor = count; // asigna el factor de ganancia para señal unitaria
    return true; // retorna verdad al finalizar
}

/**Método para filtrar señal actual con filtro FIR **/
double Procesamiento::process_value(float now_value){
    double count = 0.0;
    this->val[this->k] = now_value; // agregar señal actual en posición k
    for(int i = 0; i < TAP; i++){
        // producto de coeficientes de filtro con señal actual y pasadas
        count += this->fir_coeff[i] * this->val[(this->k+i)%TAP];
    }
    this->k += 1; // aumenta en 1 la posición del valor actual
    if(this->k == 25) this->k = 0; // reinicia a 0 valor de posición actual
    return count/this->factor; // retorna señal filtrada
}

```

G.7 Código para detección de fase concéntrica del CMJ

```

/**Metodo saveForce para detección y almacenamiento de señal de fuerza durante fase concéntrica**/
bool Procesamiento::saveForce(){
    if(this->instrucion == 1){ // Instrucion = 1 : Almacenar señales de fuerza
        float force = this->scale.get_units(); // lectura fuerza de sensores
        delay(10); // 10 ms para periodo de muestreo
        this->slider.Add(force); // se agrega valor actual de fuerza a lista slider
        // condición que verifica vértice de zona cóncava
        if(abs(((this->slider[50] + this->slider[0])*0.5 - this->slider[25])) > 8){
            this->current_state = true;
        }else{
            this->current_state = false;
        }
    }
    if(this->current_state != this->last_state){ //detecta vértice de fase concéntrica
        if(this->current_state == true){
            this->state = !this->state;
            this->l += 1;
        }
    }
    this->last_state = this->current_state;
    if(this->state == true)this->fuerza.Add(force); //Almacena señales de fase concéntrica
    if(this->l == 3){ // verifica fin de fase concéntrica
        modelar(); // función para regresión cuadrática
        sendFinish(); // Envía fin de salto a Mini-pc
        this->instrucion = 2; // Cambia de etapa a calculo de potencia
        return true; // Retorna verdad para fin de almacenar fuerza
    }
    this->slider.RemoveFirst(); // elimina primer valor de lista slider
}
else{
    return false;}}

```

G.8 Código de regresión por aproximación cuadrática

```

/**Método modelar() para aproximar un modelo continuo a partir de señales discretas*/
bool Procesamiento::modelar(){
    //*****
    // Cantidad de datos discretos de fuerza
    int k1 = this->fuerza.Count();
    // Coeficientes de minimos cuadrados
    float k2 = 0.0, k3 = 0.0, k4 = 0.0, k5 = 0.0, k6 = 0.0, k7 = 0.0, k8 = 0.0;
    // variable de dominio tiempo
    float time[k1];
    for(int j = 0; j < k1; j++){
        time[j] = j * 0.01; //dominio X
        k2 = k2 + time[j]; // ΣX
        k3 = k3 + pow(time[j],2); // Σ(X^2)
        k4 = k4 + pow(time[j],3); //Σ(X^3)
        k5 = k5 + pow(time[j],4); //Σ(X^4)
        k6 = k6 + this->fuerza[j]; // Σ(Y)
        k7 = k7 + (time[j] * this->fuerza[j]); // Σ(X*Y)
        k8 = k8 + (pow(time[j],2) * this->fuerza[j]); // Σ(X^2)*Y}
    // Calculo del sistema 3x3 por regla de Cramer
    float As = ((k1*k3*k5) + (k2*k4*k3*2)) - ((pow(k3,3) + (pow(k4,2)*k1) + (pow(k2,2)*k5)));
    float Ab0 = ((k6*k3*k5) + (k2*k4*k8) + (k3*k7*k4)) - ((pow(k3,2)*k8) + (k6*pow(k4,2)) + (k2*
k7*k5));
    float Ab1 = ((k1*k7*k5) + (k2*k8*k3) + (k3*k6*k4)) - ((pow(k3,2)*k7) + (k4*k8*k1) + (k5*k6*k
2));
    float Ab2 = ((k1*k3*k8) + (k2*k7*k3) + (k6*k2*k4)) - ((pow(k3,2)*k6) + (k1*k7*k4) + (pow(k2,
2)*k8));
    // Almacenar coeficientes de modelo cuadrático en atributo coeficientes de tipo lista
    this->coeficientes.Add(Ab0/As);this->coeficientes.Add(Ab1/As);this-
>coeficientes.Add(Ab2/As);
    return true;} // Fin de regresión

```

G.9 Código para el cálculo de potencia mecánica máxima instantánea

```

/**Método calculatePower() para calcular la potencia instantánea máxima durante la fase concéntrica
del CMJ**/
void Procesamiento::calculatePower(){
    // F(t) = b0 + b1*t + b2*t^2
    // Potencia = ∫(F(t))^2 dt = 6159.11[(b0^2)*x + b0*b1(x^2) + 0.3333*(2*b0*b2 + b1^2)(x^3) +
0.5*b1*b2(x^4) + 0.2*b2^2(x^5)] + const
    // Potencia = 6159.11[k1*x + k2*(x^2) + k3*(x^3) + k4*(x^4) + k5*(x^5)] + const
    if(this->instruccion == 2){ // verifica estado calcular potencia
        float k1 = 6159.11*pow(coeff[0],2);
        float k2 = 6159.11*coeff[0]*coeff[1];
        float k3 = 6159.11*0.3333*(2*coeff[0]*coeff[2] + pow(coeff[1],2));
        float k4 = 6159.11*0.5*coeff[1]*coeff[2];
        float k5 = 6159.11*0.2*pow(coeff[2],2);
        float current_PM = 0.0, last_PM = 0.0;
        double dom[this->fuerza.Count()];
        // dominio con intervalos de 0.01 s
        for (int j = 0; j < this->fuerza.Count(); j++) dom[j] = 0.01*j;
        // bucle para obtener la potencia instantánea máxima
        for (int i = 0; i < (this->fuerza.Count()); i++){
            float current_PM = (1/this->peso)*(k1*(dom[i+1] - dom[i]) +
            k2*(pow(dom[i+1],2)-pow(dom[i],2)) + k3*(pow(dom[i+1],3)-pow(dom[i],3)) +
            k4*(pow(dom[i+1],4)-pow(dom[i],4)) + k5*(pow(dom[i+1],5)-pow(dom[i],5)));
            if(current_PM > last_PM){
                last_PM = current_PM;
            }
        }
        // almacena potencia máxima en objeto de posición NUM_JUMP de lista resultado
        this->resultado[NUM_JUMP]->setPM(last_PM);
        this->NUM_JUMP += 1; // aumenta en 1 el numero de salto
        if(NUM_JUMP == 6)NUM_JUMP = 0; // reinicia a 0 cuando se realizan 6 saltos
        this->instruccion = 3; // Cambio de estado recibir CMJ}}

```

G.10 Código para el cálculo de coeficiente de variabilidad

```

/**Método calculateVar() para hallar el nivel de dispersión de la potencia mecánica
durante la fase concéntrica del CMJ */
bool Procesamiento::calculateVar(){
    double media = 0.0;
    double varianza = 0.0, desv;
    /*Calculo de la media*/
    for (int i=0; i < this->resultado.Count(); i++){
        Serial.println(this->resultado[i]->getPMI());
        media += (this->resultado[i]->getPMI()) / (this->resultado.Count());
    }
    /*Calculo de la varianza */
    for (int i=0; i < this->resultado.Count(); i++){
        varianza += pow(this->resultado[i]->getPMI() - media,2) / this-
>resultado.Count();
    }
    /*Calculo de la desviación estándar */
    desv = sqrt(varianza);
    /*Calculo y almacenamiento del coeficiente de variación*/
    this->CV = desv/media;
    return true;} //retorna verdad cuando finaliza cálculo de CV

```

G.11 Código para generar video

```

def makeVideo(self, condicion):
    ret, frame = self.capture.read()
    if ret == True:
        self.out.write(frame)
        if condicion == False:
            self.capture.release()
            self.out.release()
            return True
    else:
        print("No se puede realizar capturas")
        return False

```

G.12 Código para extracción de *keypoints*

```

def evaluateCMJ_1(self):
    self.CMJ[0] = False
    fill_kneeAngles()
    current = False
    last = False
    count = 0
    for i in self.knee_angles:
        if (i <= 100 and i >= 80):
            current = True
        else:
            current = False
        if current != last:
            if (current == True or current = False):
                count += 1
            last = current
    if count == 1:
        self.CMJ[0] = True
    else:
        self.CMJ[0] = False

def fill_kneeAngles(self):
    self.knee_angles.clear()
    path, dirs, files = next(os.walk(KeyPoints /))
    for i in range(len(files)):
        if i < 10:
            f = open("KeyPoints/CMJ_00000000000%d_keypoints.json" % i)
        else:

```

```

        f = open("KeyPoints/CMJ_0000000000%d_keypoints.json" % i)
        data = json.load(f)
        list_key = ordenar(data['people'][0]['pose_keypoints_2d'])
        list_four_ = articulaciones(list_key)
        angle = getAngle((0, 0), list_four_, "knee")
        self.knee_angles.append(angle)

```

G.13 Código para validación de perpendicularidad de rodilla

```

def evaluateCMJ_1(self):
    self.CMJ[0] = False
    fill_kneeAngles()
    current = False
    last = False
    count = 0
    for i in self.knee_angles:
        if (i <= 100 and i >= 80):
            current = True
        else:
            current = False
        if current != last:
            if (current == True or current = False):
                count += 1
            last = current
    if count == 1:
        self.CMJ[0] = True
    else:
        self.CMJ[0] = False

def fill_kneeAngles(self):
    self.knee_angles.clear()
    path, dirs, files = next(os.walk(KeyPoints /))
    for i in range(len(files)):
        if i < 10:
            f = open("KeyPoints/CMJ_0000000000%d_keypoints.json" % i)
        else:
            f = open("KeyPoints/CMJ_0000000000%d_keypoints.json" % i)
        data = json.load(f)
        list_key = ordenar(data['people'][0]['pose_keypoints_2d'])
        list_four_ = articulaciones(list_key)
        angle = getAngle((0, 0), list_four_, "knee")
        self.knee_angles.append(angle)

```

G.14 Código para validación de verticalidad de tronco

```

def evaluateCMJ_2(self):
    self.CMJ[1] = False
    self.fill_backAngles()
    current = False
    last = False
    count = 0

    for i in self.back_angles:
        if (i >= 0 and i <= 10):
            current = True
        elif i > 10:
            current = False

        if current != last:
            if (current == True or current = False):
                count += 1
            last = current

    if count == 1:
        self.CMJ[1] = True
    else:
        self.CMJ[1] = False

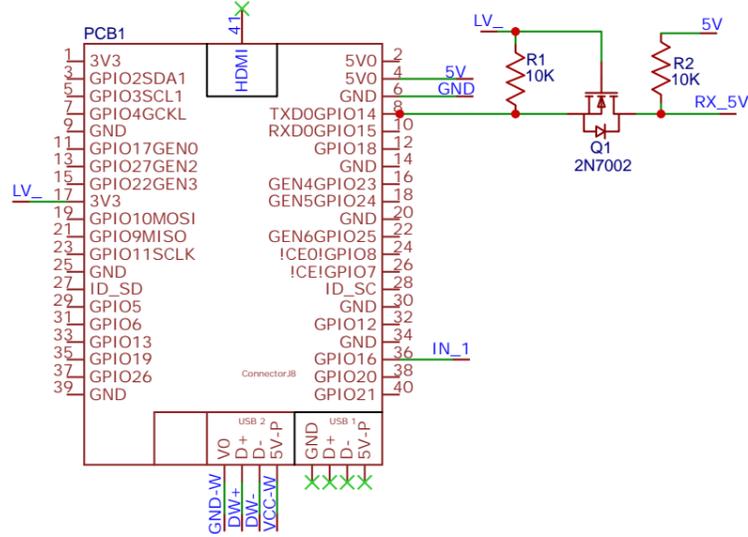
```

```
def fill_backAngles(self):
    self.back_angles.clear()
    path, dirs, files = next(os.walk(KeyPoints/))
    ankle = (0,0)
    for i in range(len(files)):
        if i < 10:
            f = open("KeyPoints/CMJ_00000000000%d_keypoints.json" % i)
        else:
            f = open("KeyPoints/CMJ_00000000000%d_keypoints.json" % i)
        data = json.load(f)
        list_key = ordenar(data['people'][0]['pose_keypoints_2d'])
        list_four_ = articulaciones(list_key)
        if i == 0:
            ankle = list_four_[3][:2]
        angle = getAngle(ankle, list_four_, "back")
        self.back_angles.append(angle)
```

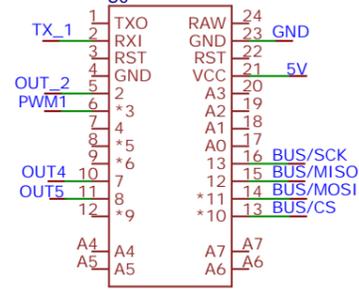
H. Planos mecánicos y electrónicos

a. Diagrama esquemático del sistema mecatrónico general

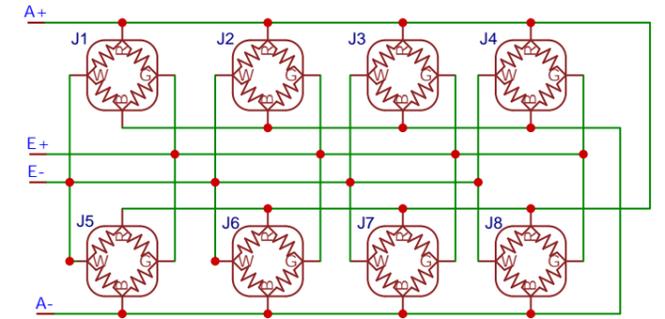
RASPBERRY_PI_4



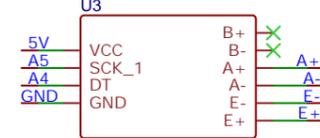
ARDUINO PRO MINI (INTERFAZ)



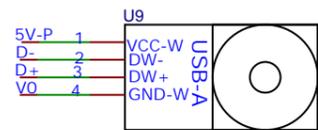
ARREGLO SENSORES DE FUERZA



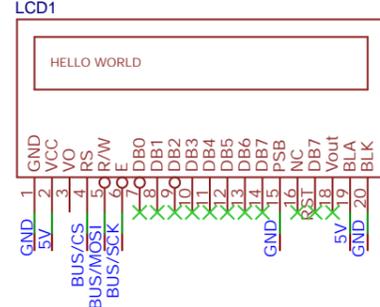
AMPLIFICADOR HX711



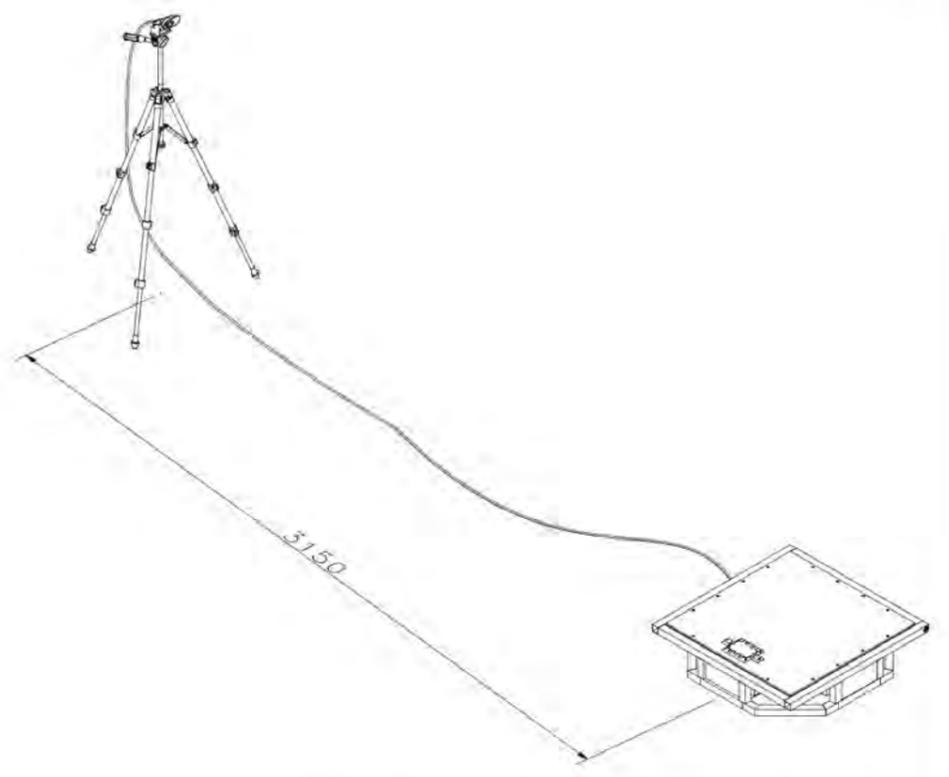
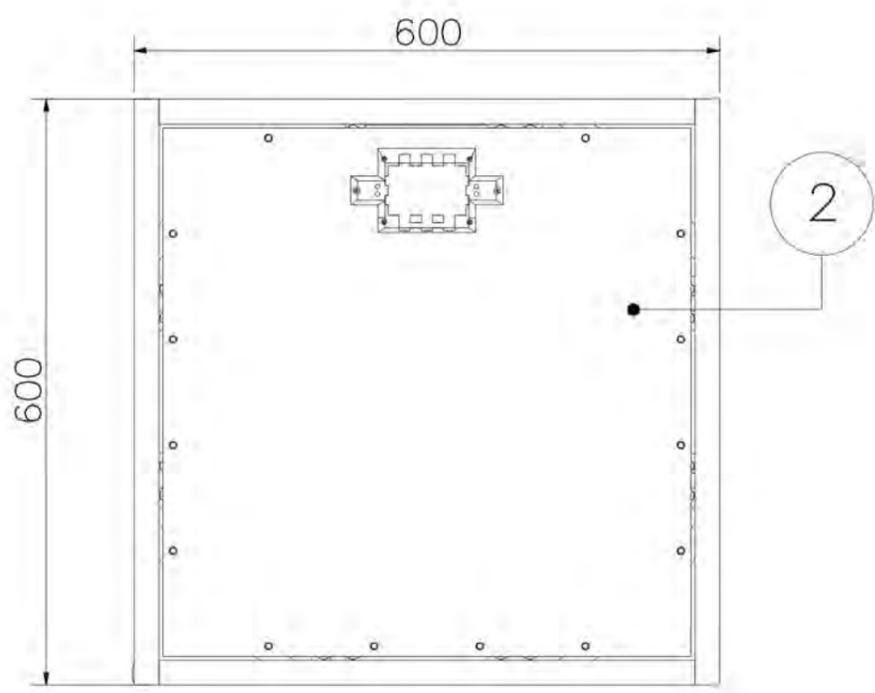
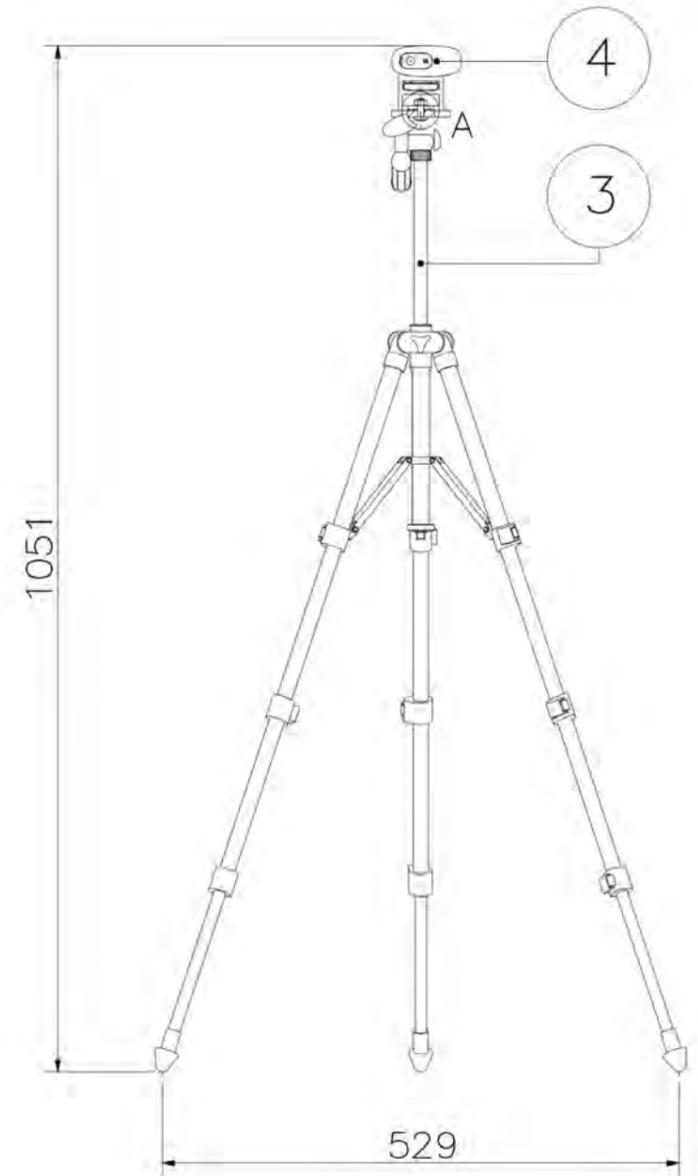
HD WEBCAM



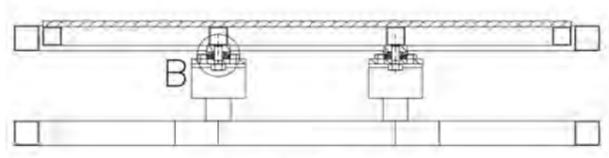
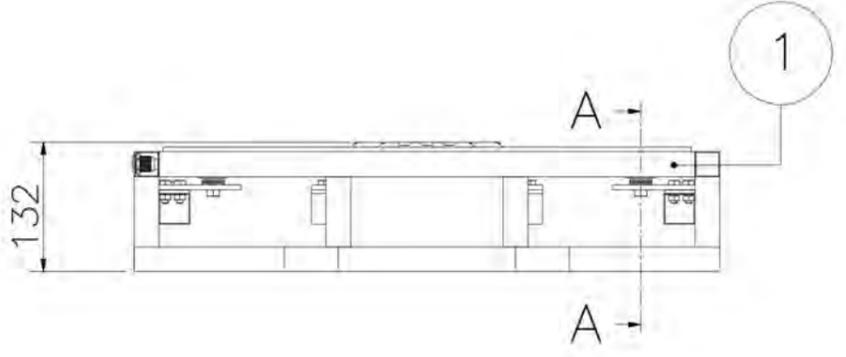
LCD_128X64



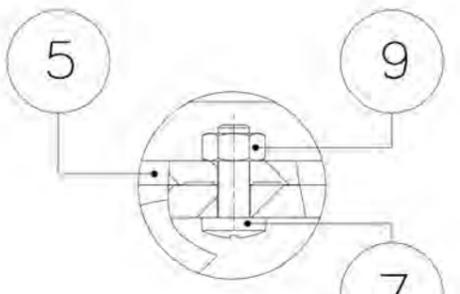
b. Planos mecánicos



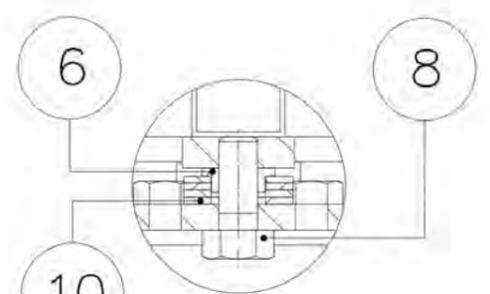
VISTA ISOMÉTRICA



CORTE A-A



DETALLE A
ESCALA 1:1

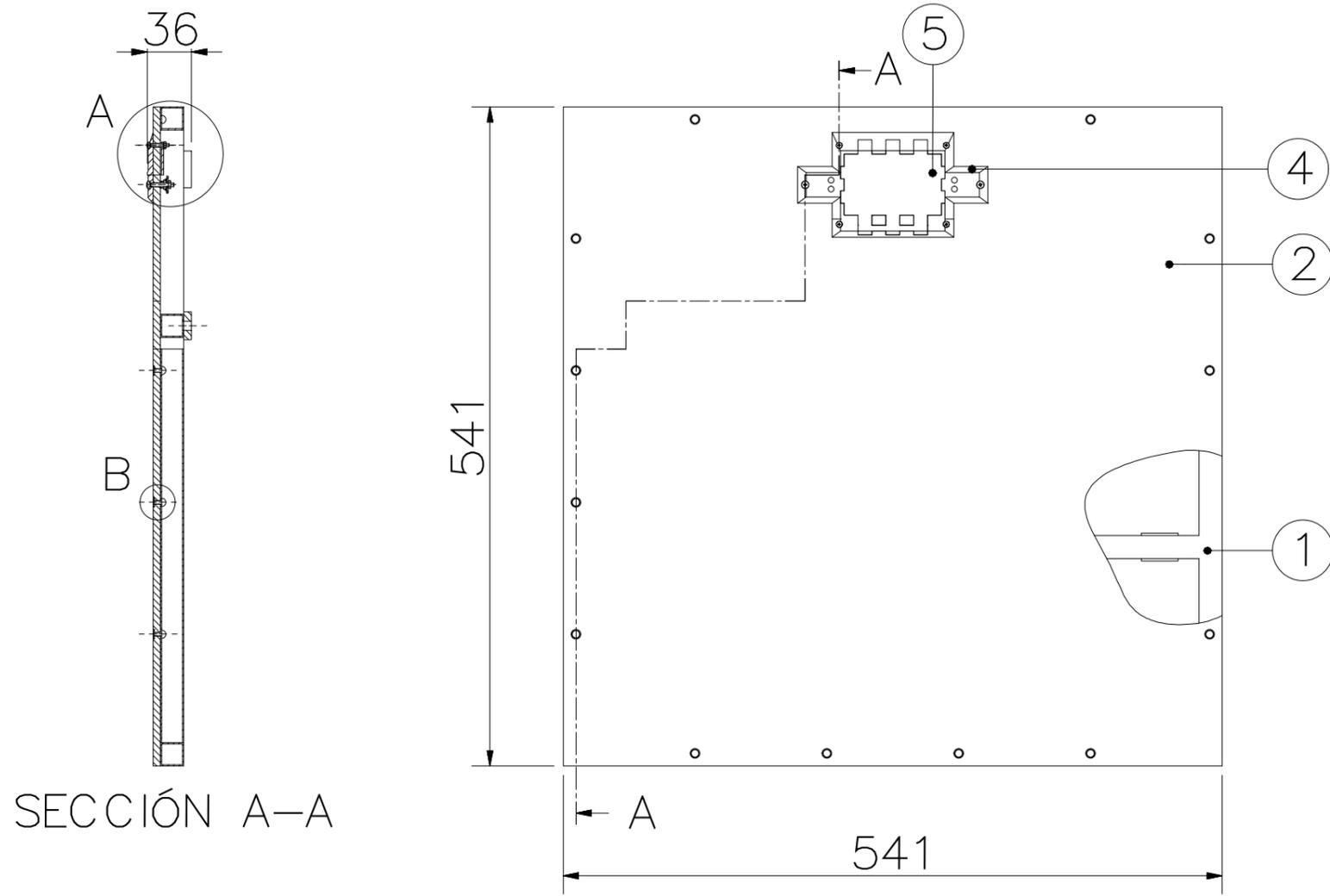


DETALLE B
ESCALA 1:1

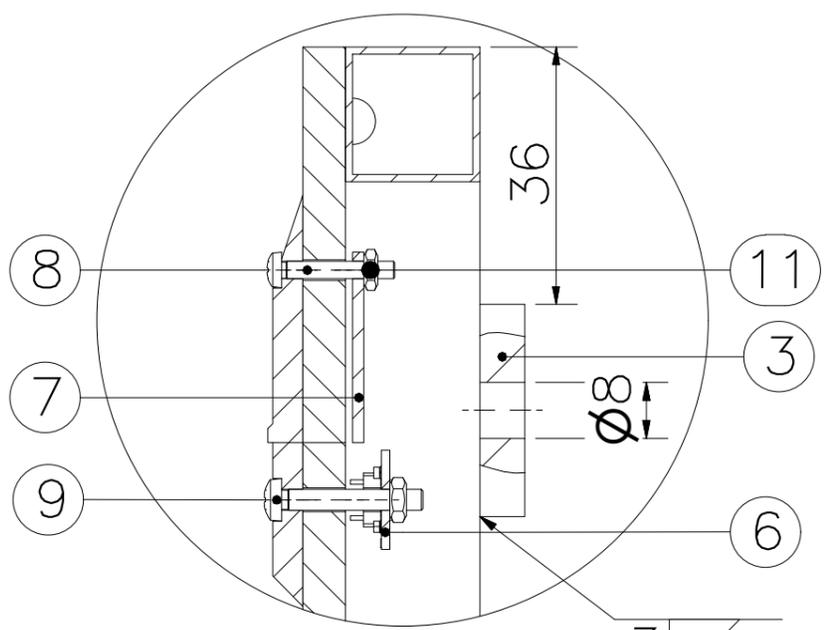
PARTS LIST				
POS./CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
10	32 ARANDELA BELIEVE	DIN 125-A	St	D = 22.5 mm, d = 11.2
9	1 TUERCA HEXAGONAL - M8		St	
8	6 TORNILLO HEXAGONAL - M8 X 19	ANSI/ASME	St	
7	2 TORNILLO GOTA - M7 X 22	DIN 933	St	
6	8 ARANDELA DE HOMBRO		Nylon	VER 09-A4-D03
5	1 ADAPTADOR DE CAMARA		ABS	VER 07-A3-D01
4	1 CAMARA DIGITAL		-	Logitech C270
3	1 TRIPODE		-	TF-3120
2	1 ESTRUCTURA SUPERIOR		-	VER 02-A3-E02
1	1 ESTRUCTURA BASE		-	VER 03-A3-E03

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA
	ENSAMBLE PRINCIPAL	1:5
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.12.01
		LÁMINA: D1-A2-E01

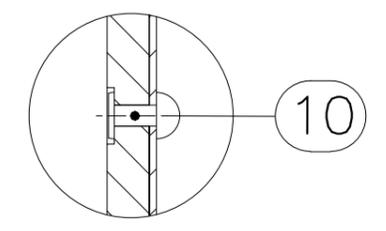
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



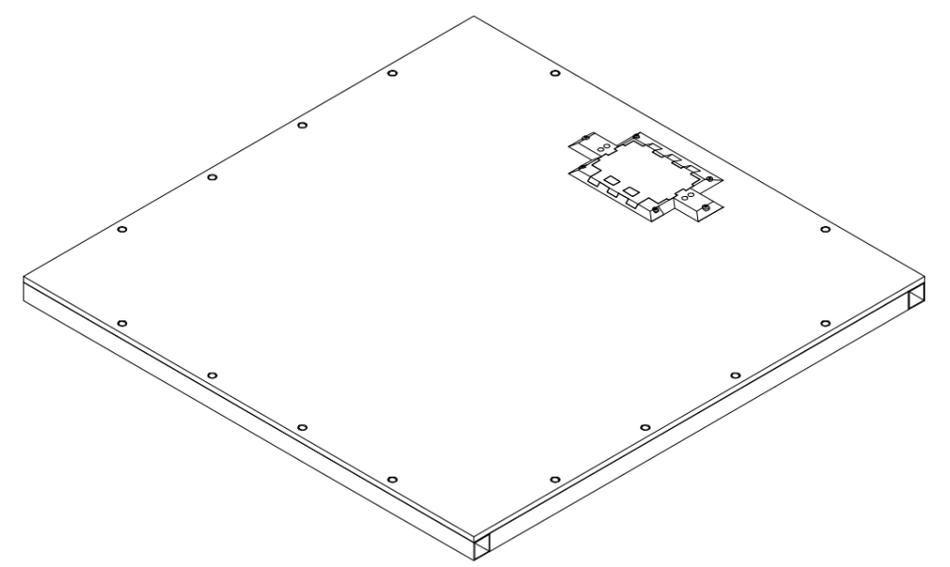
SECCIÓN A-A



DETALLE A
ESCALA 1:1



DETALLE B
ESCALA 1:1

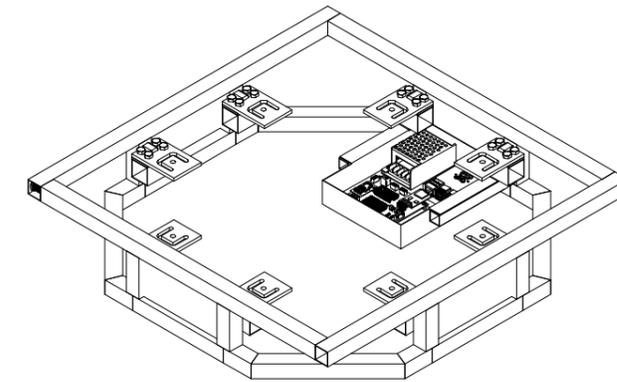
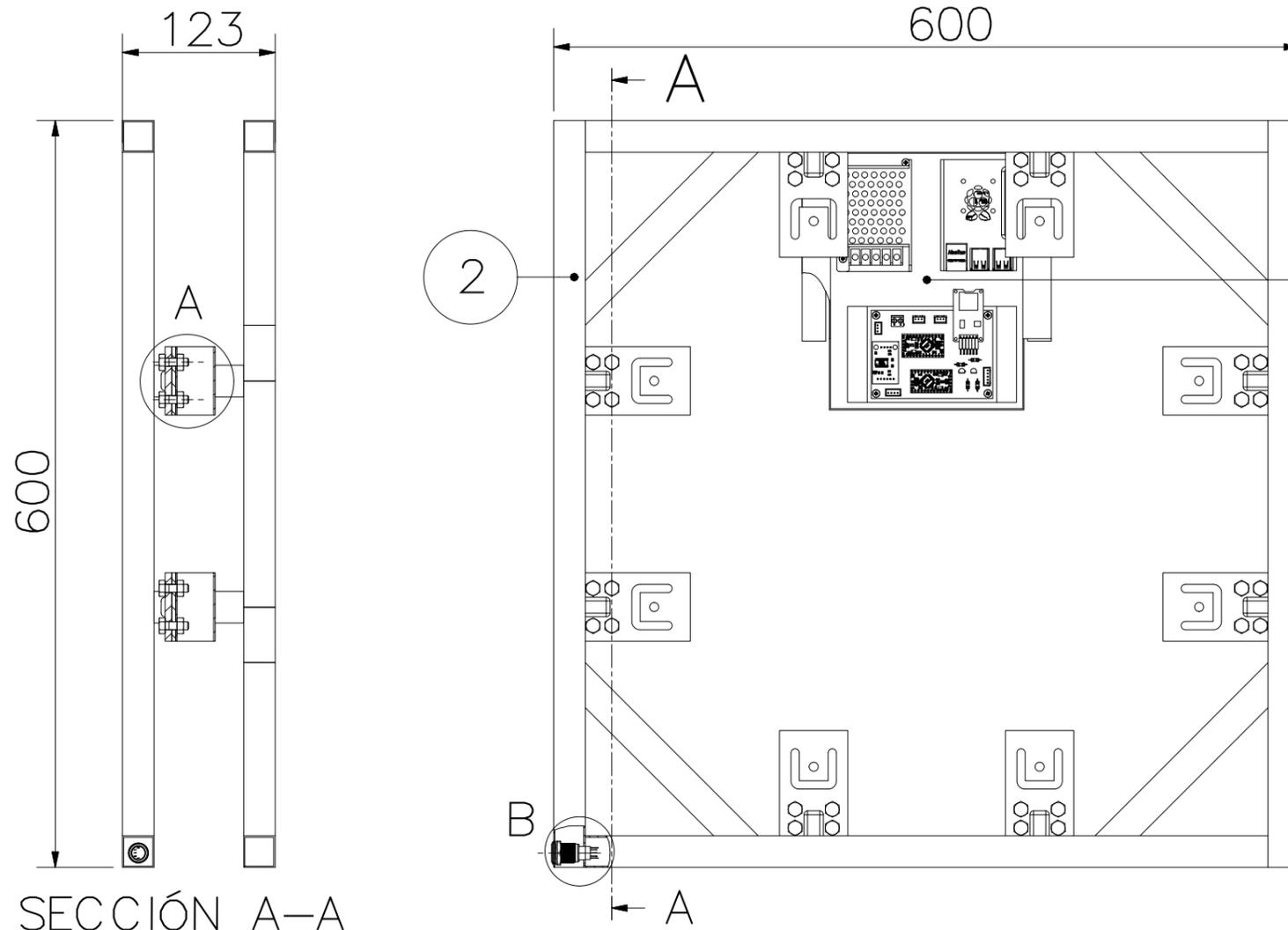


VISTA ISOMÉTRICA

PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
11	6	TUERCA M3	DIN 934	St	
10	14	REMACHE 3.2 x 6.4 mm	DIN 7337	Al	
9	2	TORNILLO STOVE BOLT M3 x 20	DIN 7985	St	
8	4	TORNILLO STOVE BOLT M3 x 16	DIN 7985	St	
7	1	PANTALLA LCD 128 X 64 Px.		-	
6	2	MODULO IR		-	FC-51
5	1	VENTANA 3 mm		PMMA	A = 69 X 86 mm
4	1	MASCARA INTERFAZ		ABS	VER 08-A3-D02
3	8	PLATINA 1/4" x 1"	ASTM A6	A36	L = 30 mm
2	1	CHAPA SUPERIOR		PP	VER 10-A3-D04
1	1	MARCO SUPERIOR	ASTM A513	ASTM 1008	VER 05-A3-E05

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA 1:5
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15
		LÁMINA: 02-A3-E02

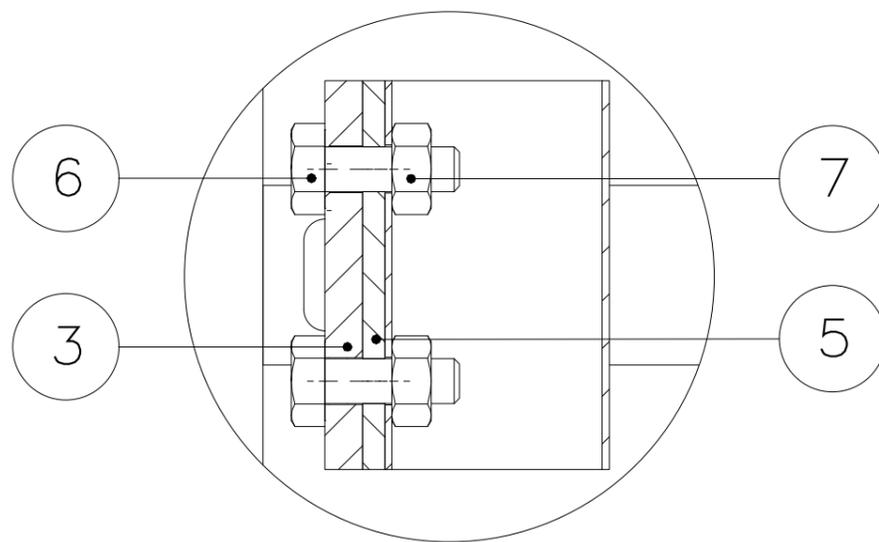
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



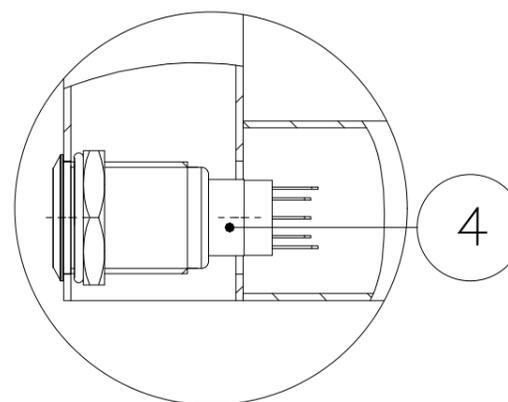
VISTA ISOMÉTRICA

NOTAS:

1. Espesor de union soldada, entre caja electronica y marco base, 1 mm



DETALLE A
ESCALA 1:1



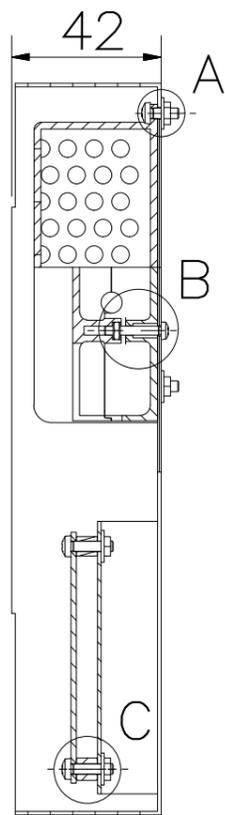
DETALLE B
ESCALA 1:1

PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
7	32	TUERCA HEXAGONAL M6	DIN 934	St	
6	32	TORNILLO HEXAGONAL M6 x 20	DIN 933	St	Grado 4
5	8	PLATINA 5/4" x 1/8"	ASTM A6	A36	L = 55 mm
4	1	PULSADOR MECANICO M19		SS	Type Latch
3	8	CONCENTRADOR DE FUERZA		Al	VPG Model 380
2	1	MARCO BASE	-	ASTM 1008	VER 06-A3-E06
1	1	CAJA ELECTRONICA	-	-	VER 04-A3-E04

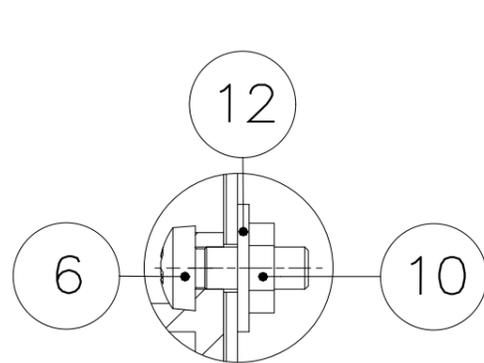
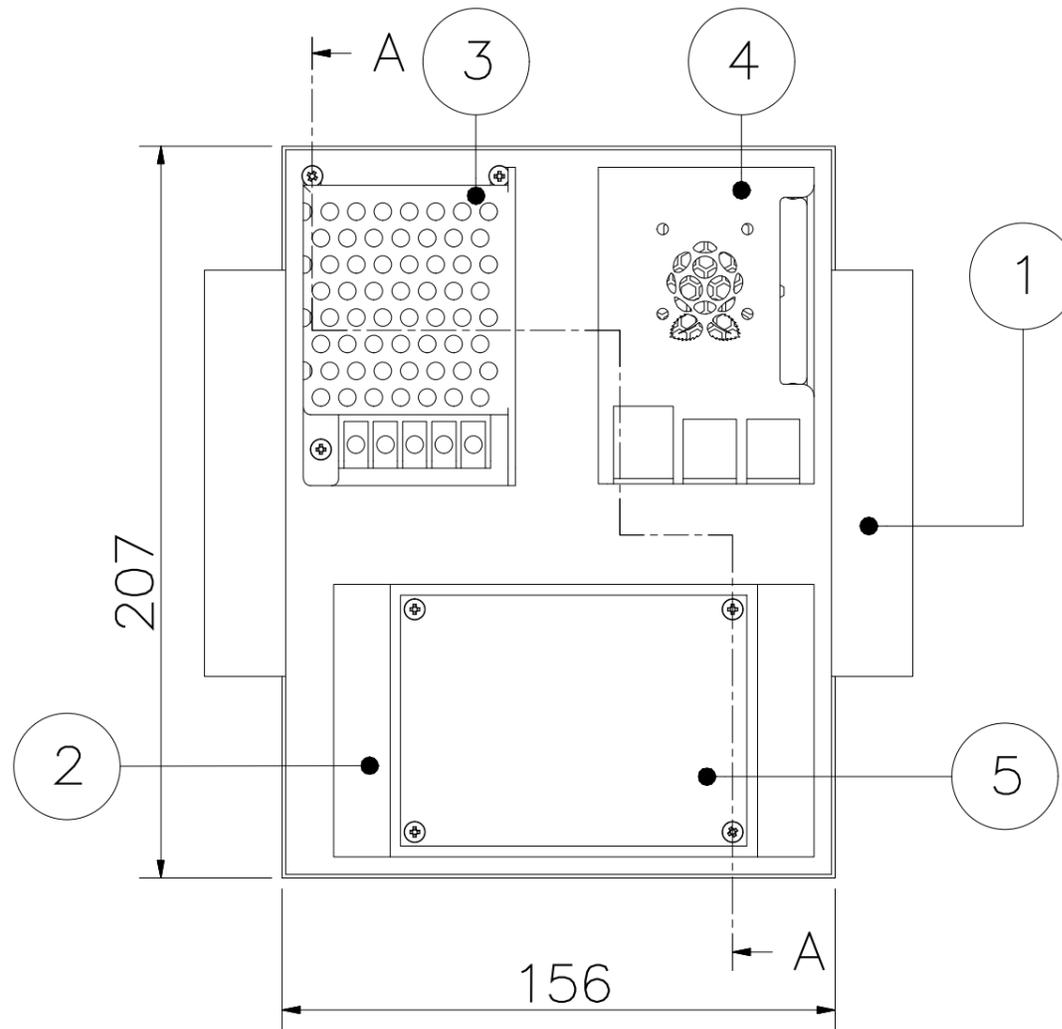
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA
	ESTRUCTURA BASE	1:5
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15
		LÁMINA: 03-A3-E03

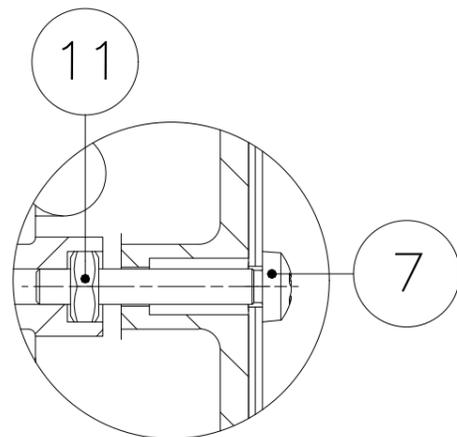
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



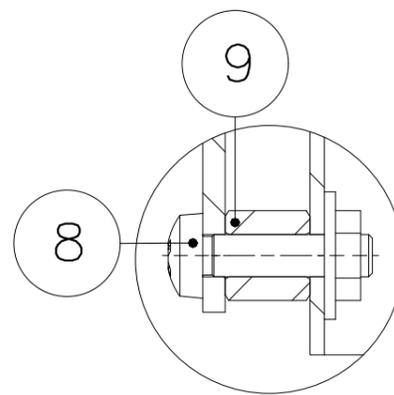
SECCIÓN A-A



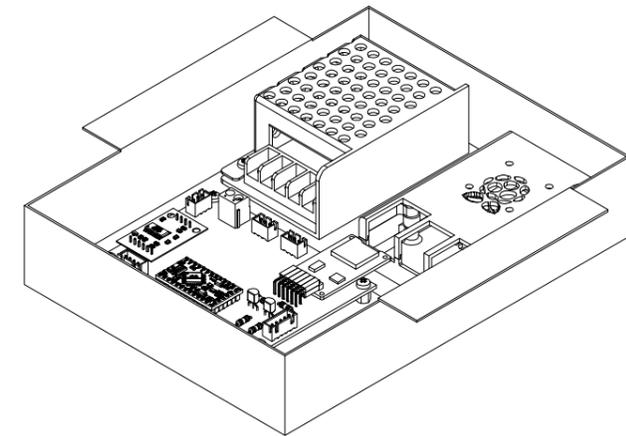
DETALLE A
ESCALA 2:1



DETALLE B
ESCALA 2:1



DETALLE C
ESCALA 2:1



VISTA ISOMÉTRICA

NOTAS:

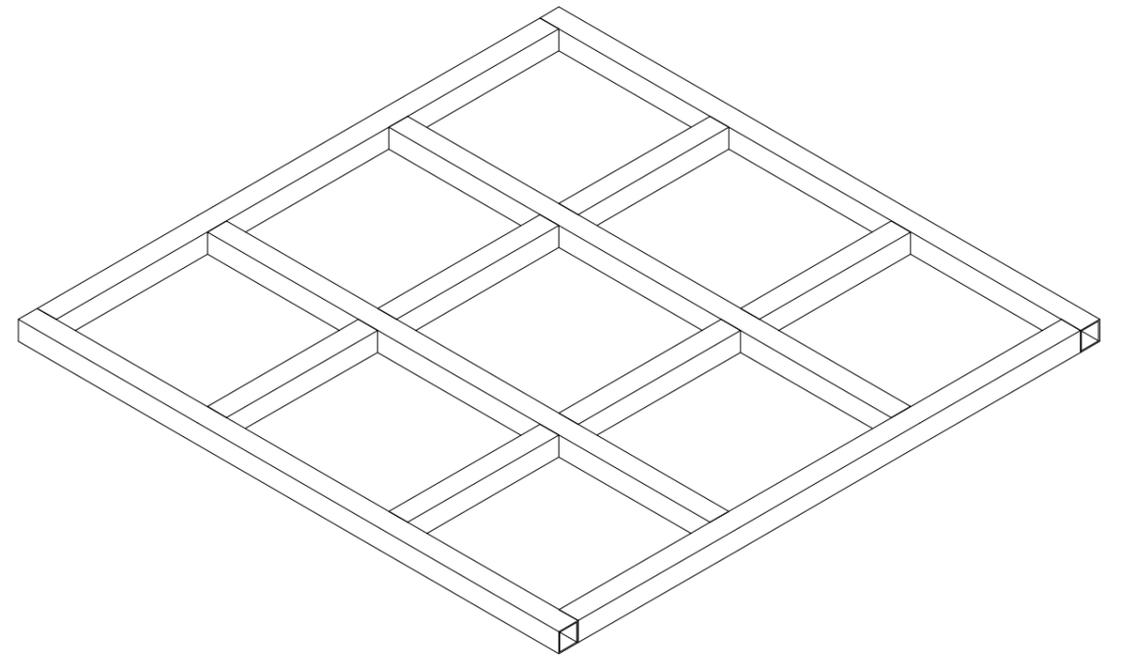
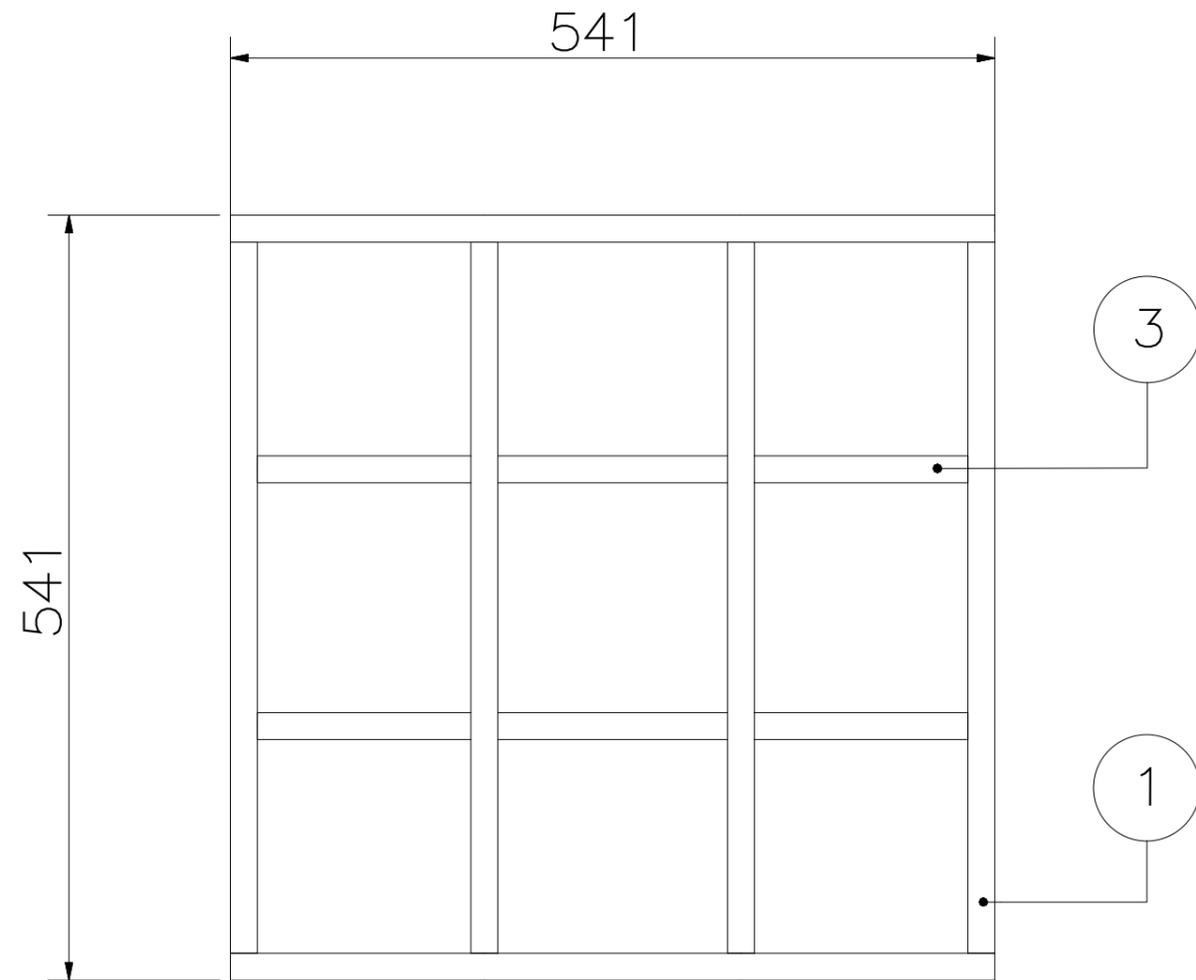
1. Espesor de soldadura, entre caja y chapa pcb, 1 mm.

PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
12	7	ARANDELA	DIN 9021	St	D = 9 mm, d = 3.2 mm
11	4	TUERCA HEXAGONAL - M2.5	ISO 4032	St	
10	7	TUERCA HEXAGONAL - M3	DIN 4036	St	
9	4	ESPACIADOR HEXAGONAL - M3	-	St	H = 6 mm
8	5	TORNILLO - M3 x 12	DIN 7985	St	
7	4	TORNILLO - M2.5 x 16	DIN 7985	St	
6	2	TORNILLO - M3 x 8	DIN 7985	St	
5	1	PCB	-	-	REVISAR CAP. 3
4	1	RASPBERRY CASE		PLA	FUENTE [32]
3	1	FUENTE PODER CASE		Al	FUENTE [44]
2	1	CHAPA PCB		ASTM A1008	VER 12-A3-D06
1	1	CAJA		ASTM A1008	VER 11-A3-D05

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA*
	CAJA ELECTRÓNICA	1:2
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15
		LÁMINA: 04-A3-E04

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



VISTA ISOMÉTRICA



NOTAS:

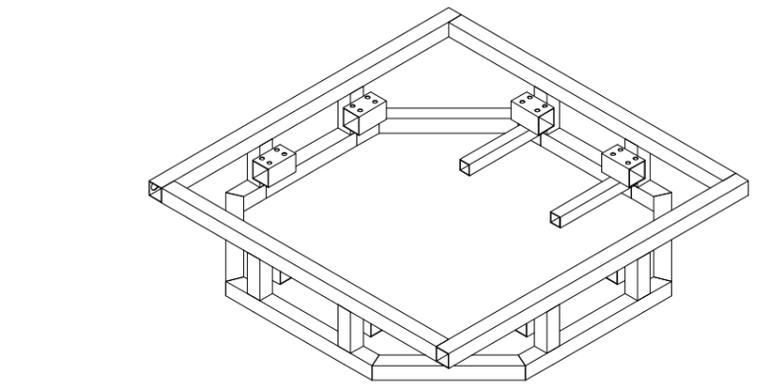
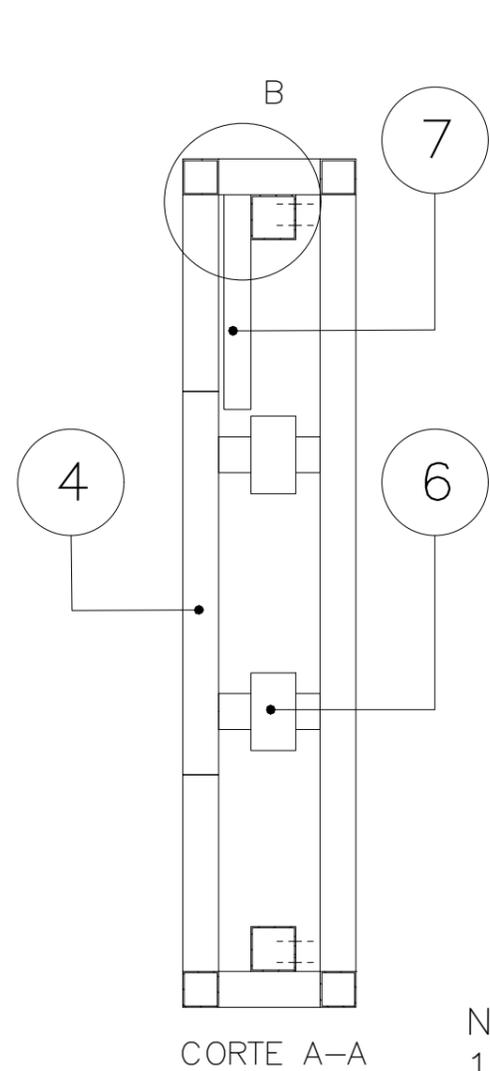
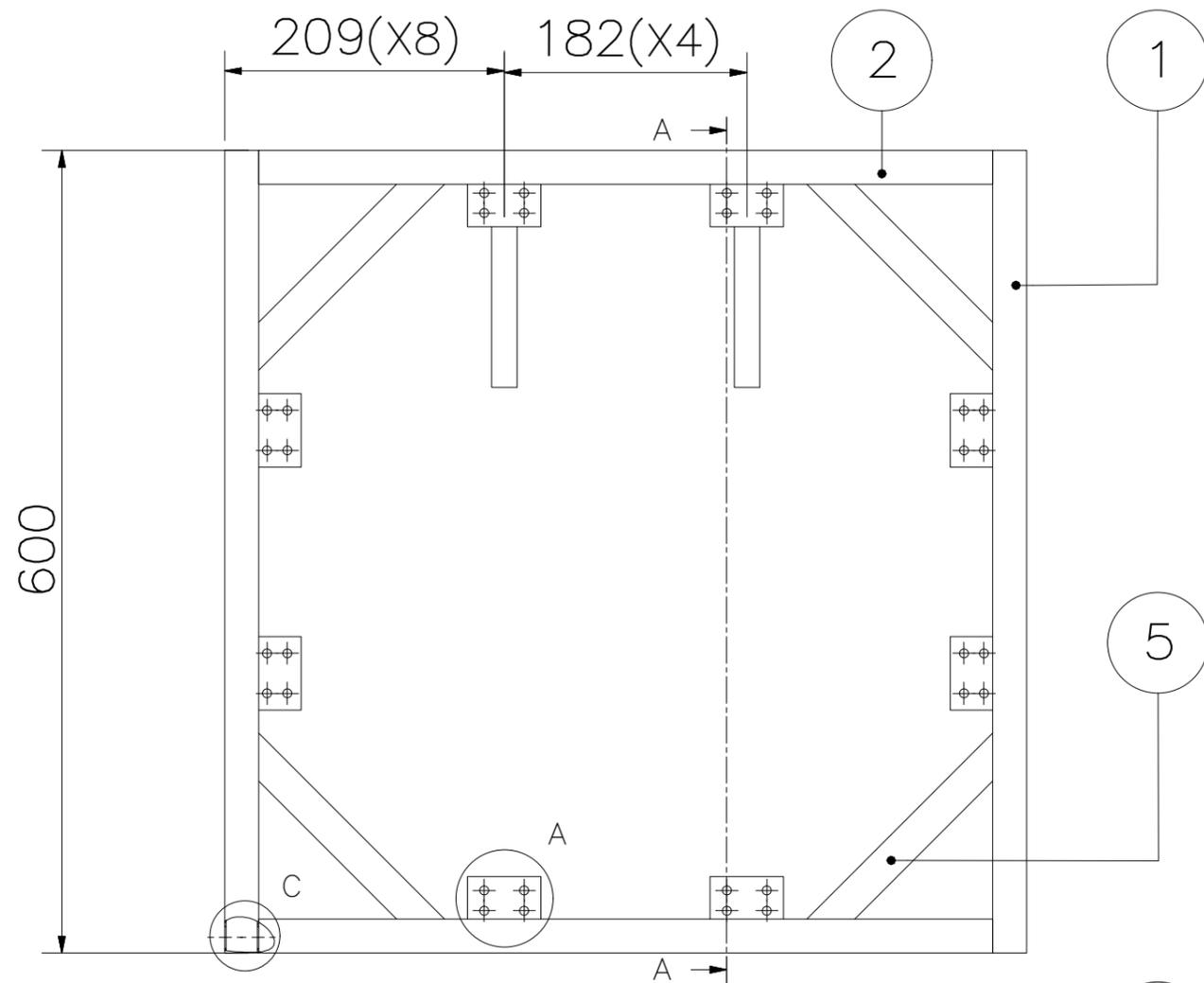
1. Espesor de soldadura 1 mm.

PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
3	6	TUBO CUADRADO 3/4" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 151 mm
2	2	TUBO CUADRADO 3/4" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 541 mm
1	4	TUBO CUADRADO 3/4" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 503 mm

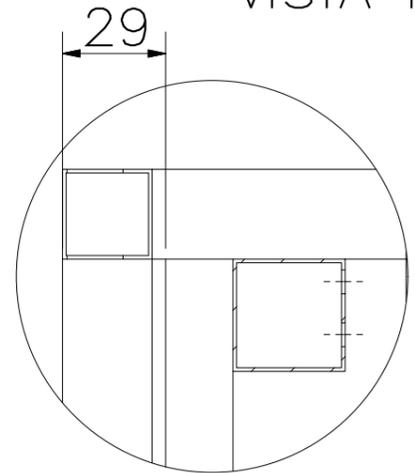
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA
	MARCO SUPERIOR	1:5
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15
		LÁMINA: 05-A3-E05

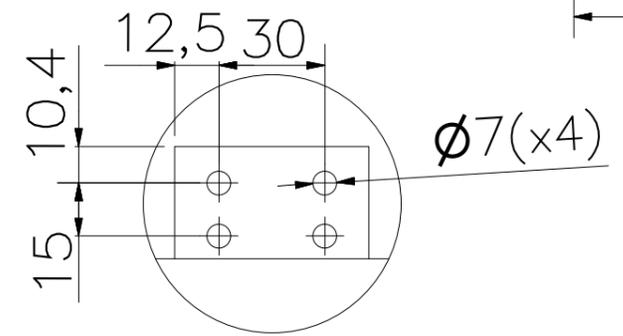
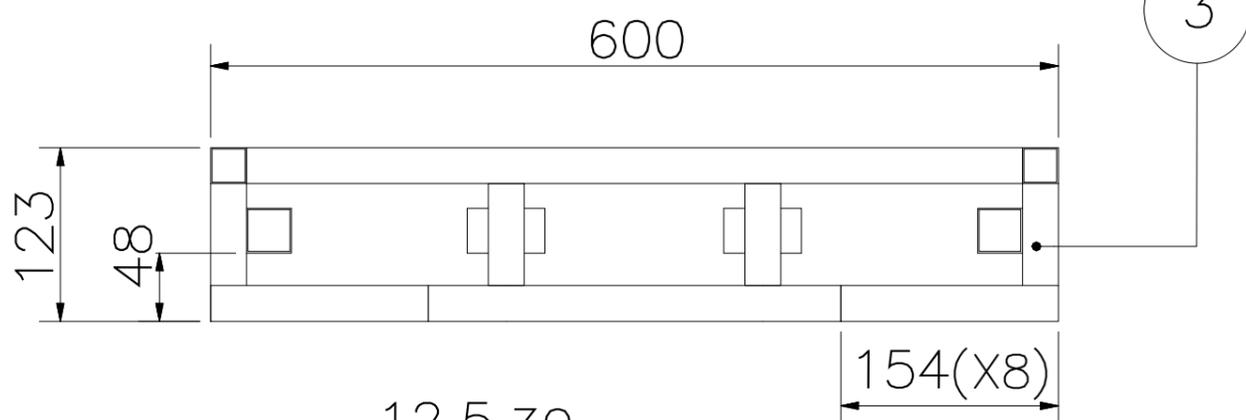
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



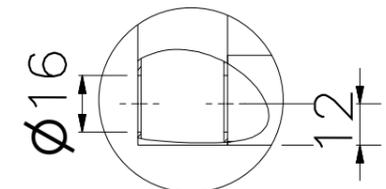
VISTA ISOMÉTRICA



DETALLE B
ESCALA 1:2



DETALLE A
ESCALA 1:2



DETALLE C
ESCALA 1 : 2

Notas:
1. Espesor de soldadura 1 mm.

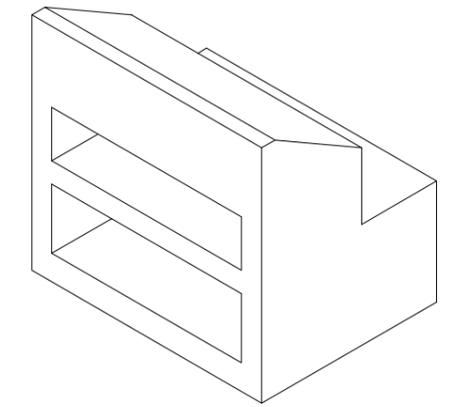
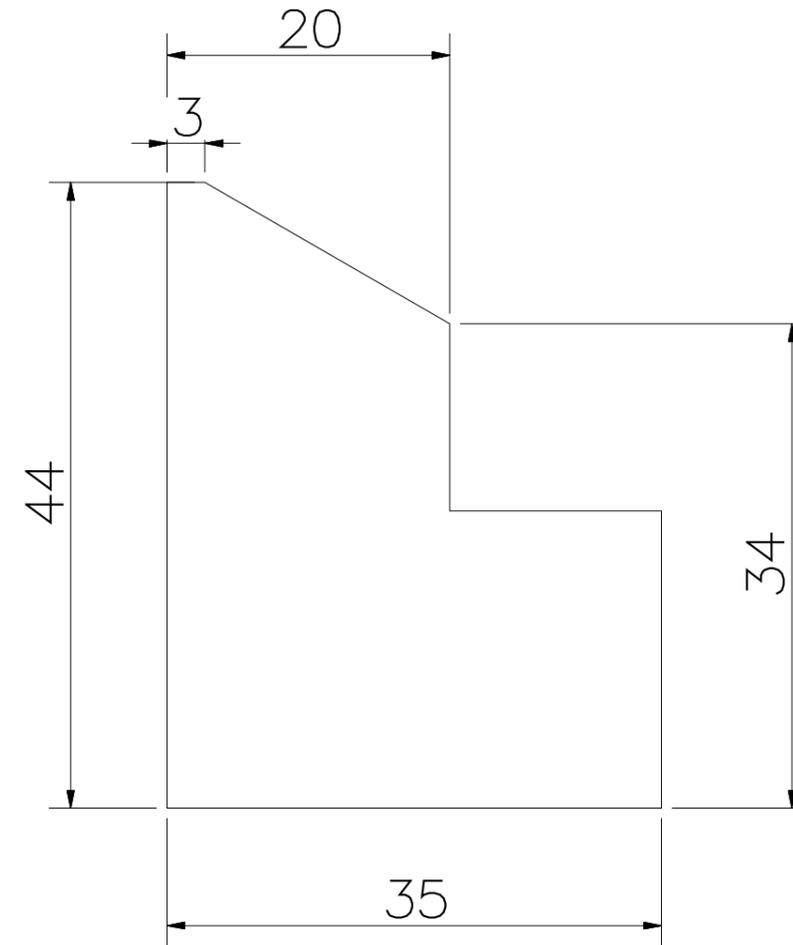
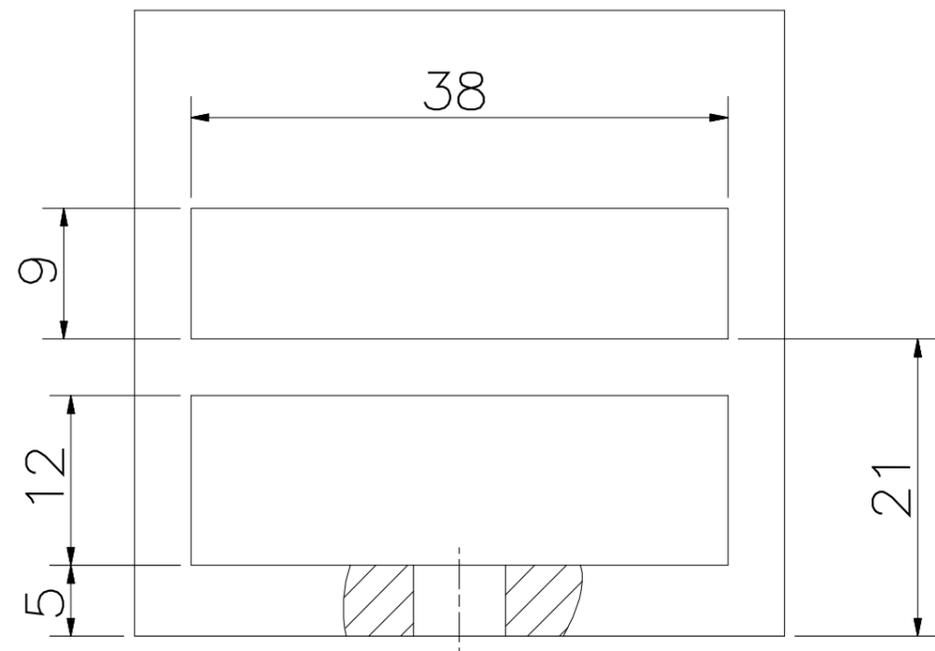
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
7	2	TUBO CUADRADO 3/4" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 152 mm
6	8	TUBO CUADRADO 5/4" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 55 mm
5	4	TUBO CUADRADO 1" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	
4	4	TUBO CUADRADO 1" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	
3	8	TUBO CUADRADO 1" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 72 mm
2	2	TUBO CUADRADO 1" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 549 mm
1	2	TUBO CUADRADO 1" x 0.039"	ASTM A513	ASTM 1008	L = 600 mm

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

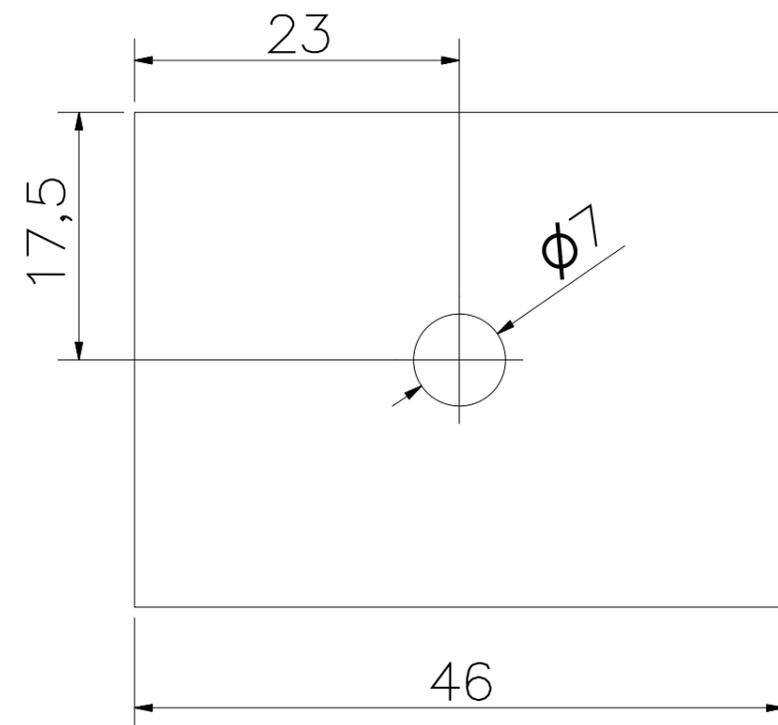
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA
		1:5
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

LÁMINA:
06-A3-E06



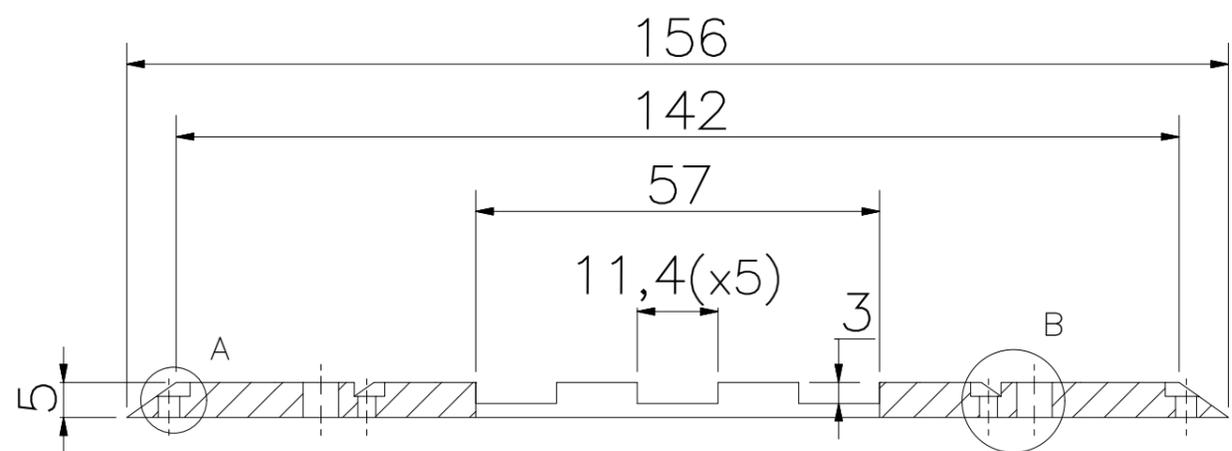
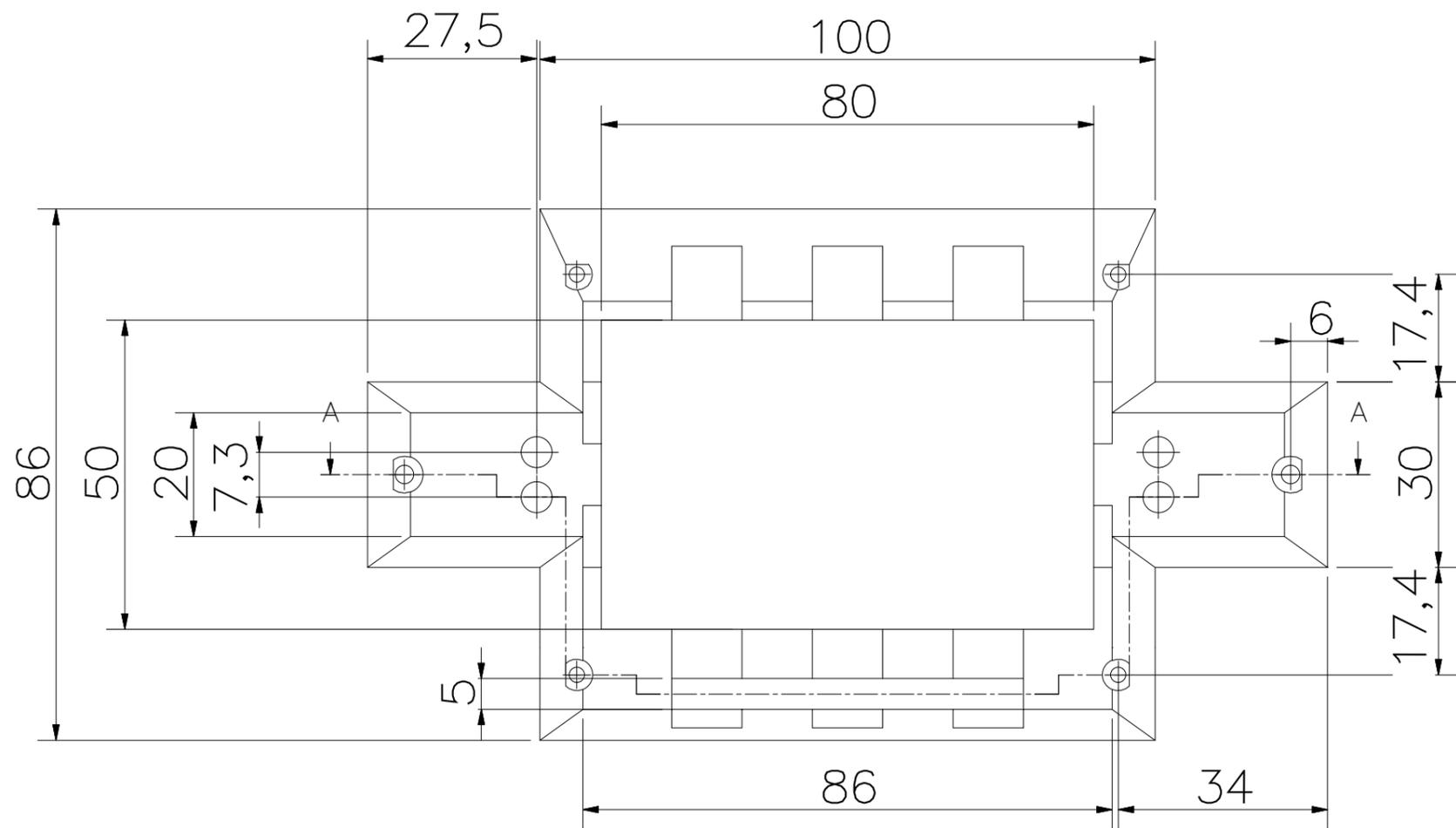
VISTA ISOMÉTRICA



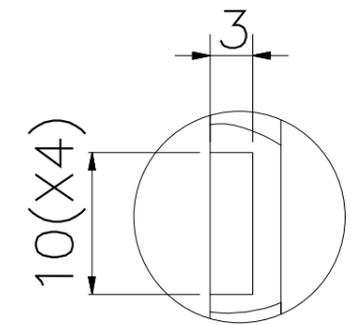
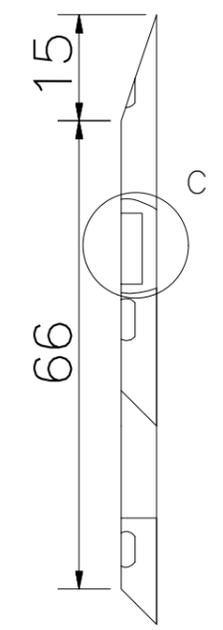
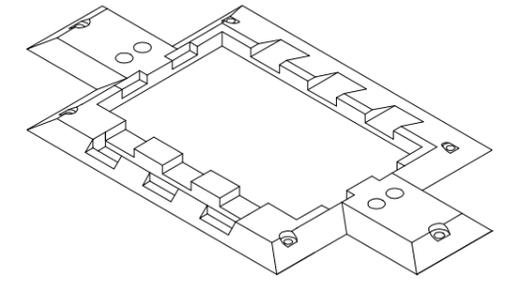
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500
OTRAS FUNDICIONES	±1,0	±1,8	±2,5	±4,0	±6,0

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

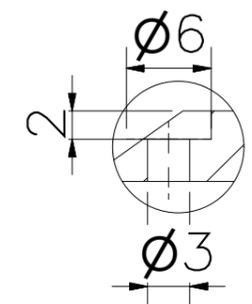
ACABADO SUPERFICIAL N9	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN E 7168 ABS FUNDIDO	MATERIAL PLASTICO ABS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA
	ADAPTADOR DE CÁMARA	2:1
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.12.02
		LÁMINA: 07-A3-D01



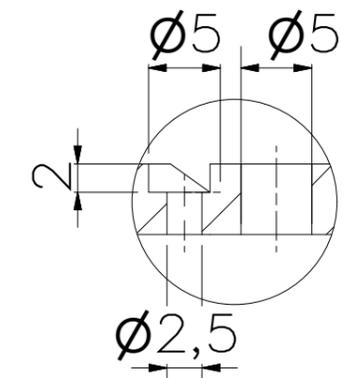
CORTE A-A



DETALLE C
ESCALA 2:1



DETALLE A
ESCALA 2:1

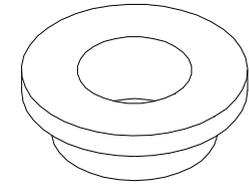
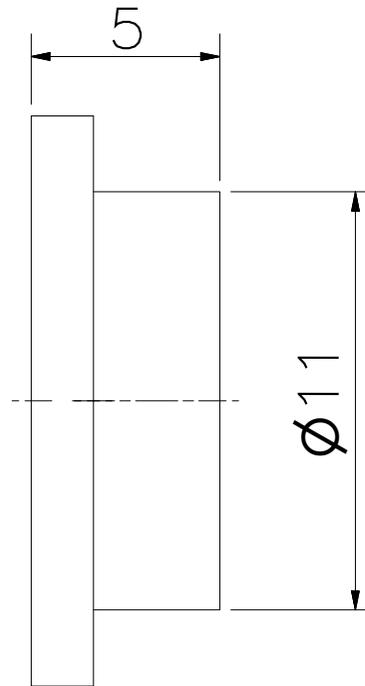
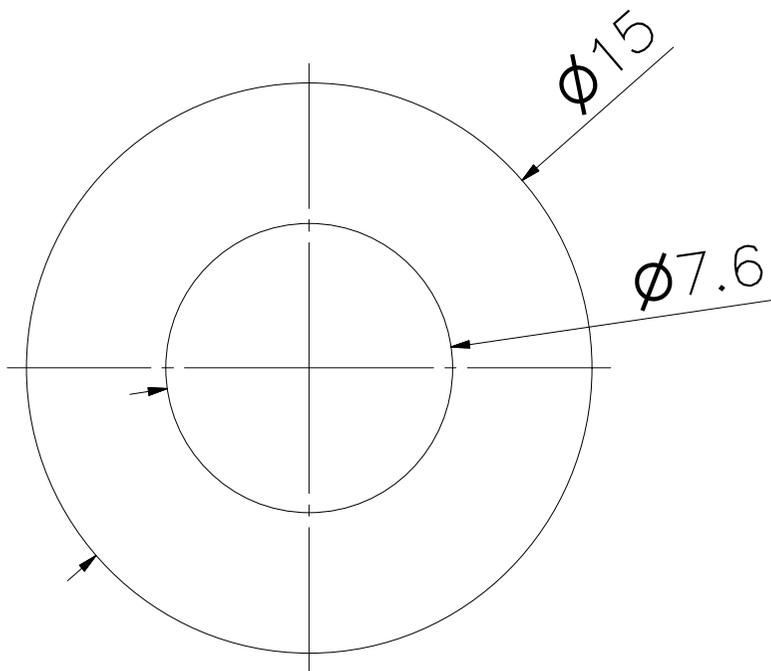


DETALLE B
ESCALA 2:1

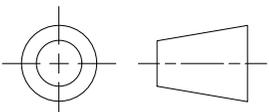
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN 7168					
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	Más de 315 hasta 500
OTRAS FUNDICIONES	±1,0	±1,8	±2,5	±4,0	±6,0

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL N9	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 ABS FUNDIDO	MATERIAL PLASTICO ABS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA
	MASCARA INTERFAZ	1:1
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.12.02
		LÁMINA: 08-A3-D02

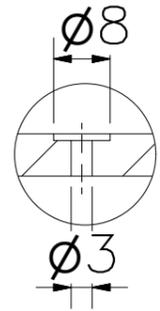


VISTA ISOMÉTRICA

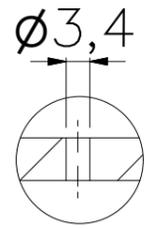
ACABADO SUPERFICIAL N6 Torneado	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL PA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO ARANDELA DE HOMBRO	ESCALA 5:1
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.12.02
		LÁMINA: 09-A4-D03

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN 7168

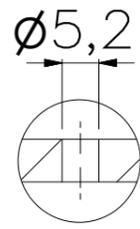
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



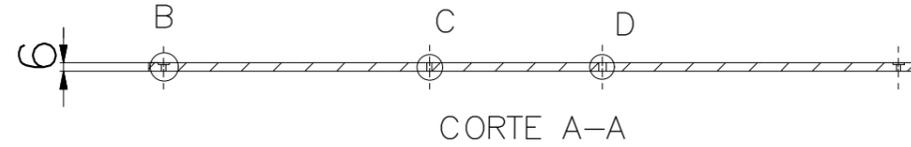
DETALLE B
ESCALA 1:1



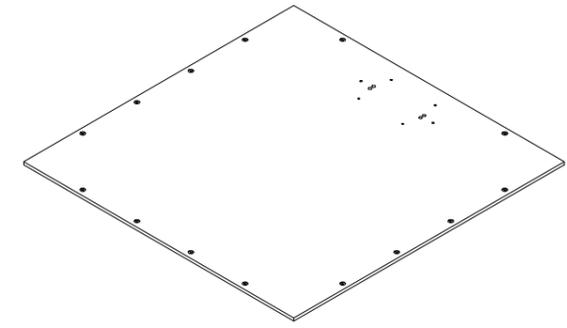
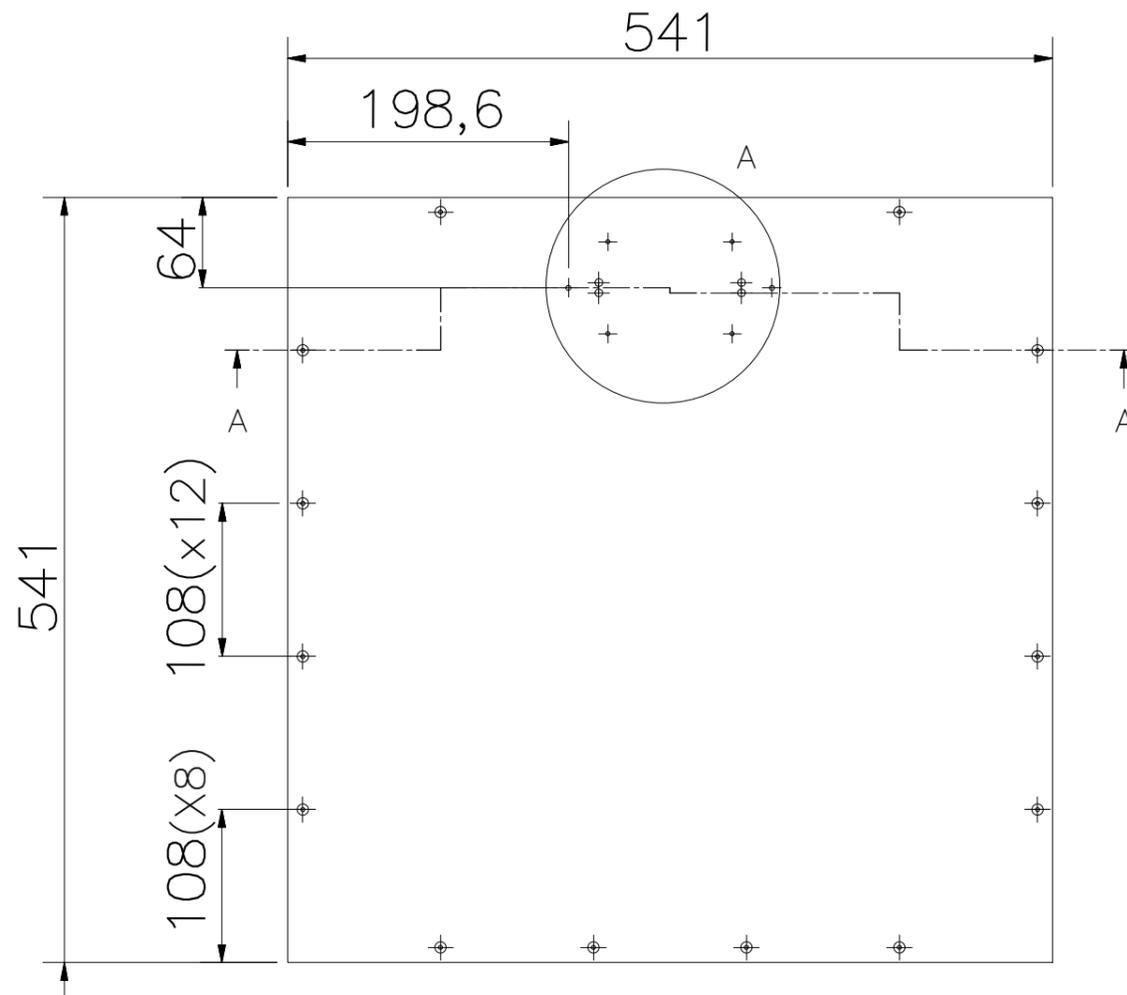
DETALLE C
ESCALA 1:1



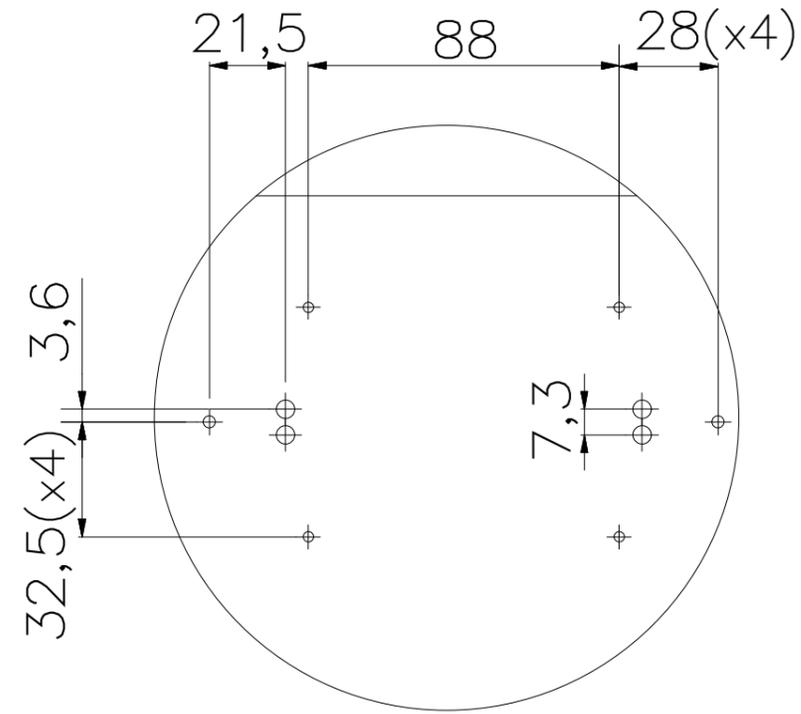
DETALLE D
ESCALA 1:1



CORTE A-A



VISTA ISOMÉTRICA



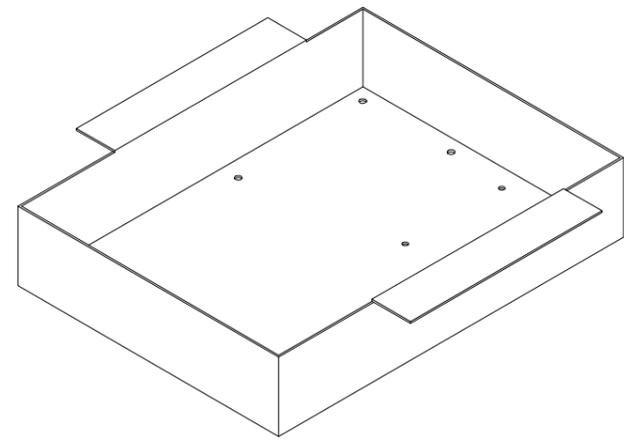
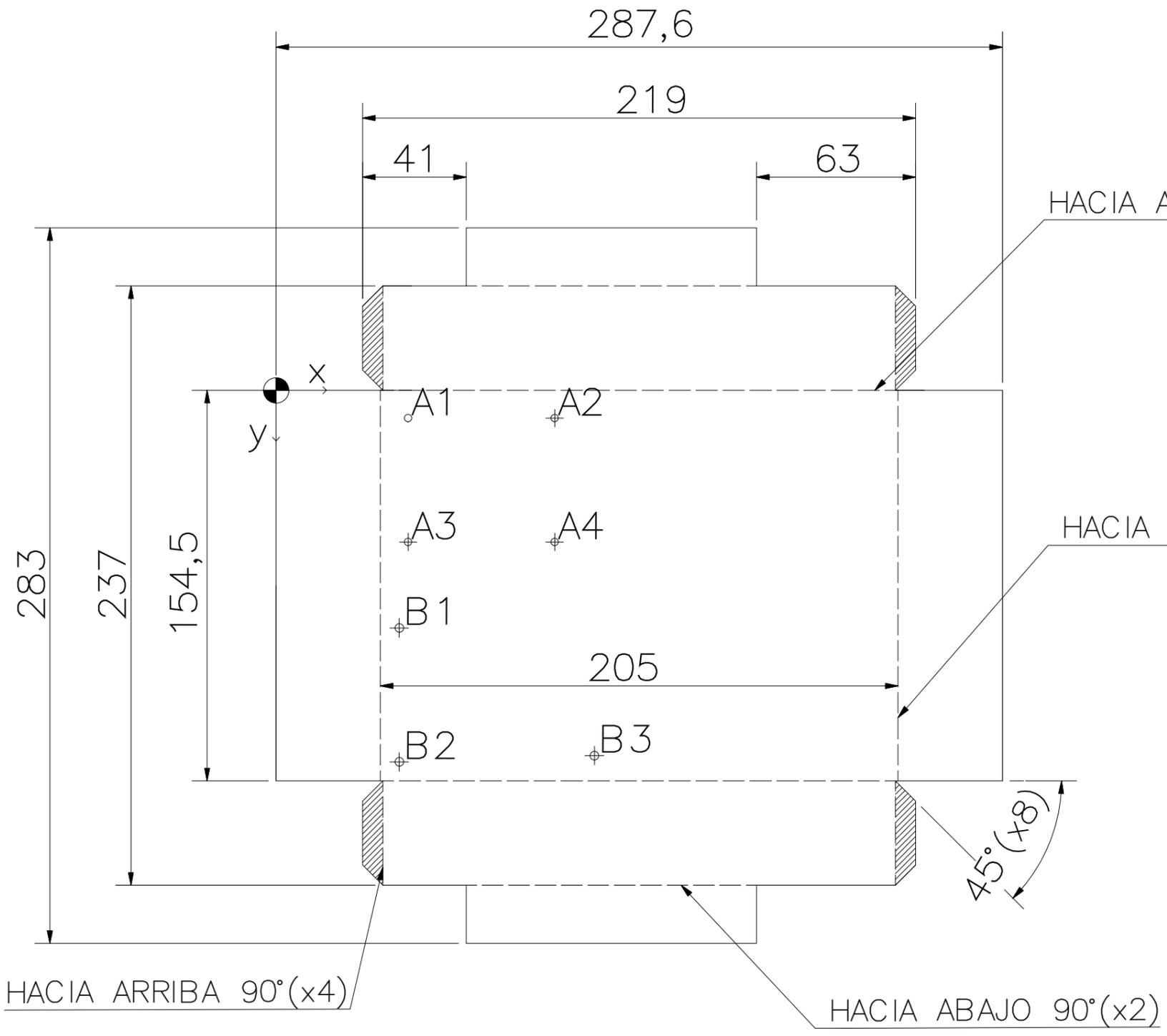
DETALLE A
ESCALA 1 : 2

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN 7168

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

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL N9	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL PP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA 1:5
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.12.02
		LÁMINA: 10-A3-D04



VISTA ISOMÉTRICA

HOLE TABLE			
HOLE	XDIM	YDIM	DESCRIPTION
A1	52,30	-11,00	∅2,9 -1 DEEP
A2	110,30	-11,00	∅2,9 -1 DEEP
A3	52,30	-60,00	∅2,9 -1 DEEP
A4	110,30	-60,00	∅2,9 -1 DEEP
B1	48,80	-94,04	∅3,4 -1 DEEP
B2	48,80	-147,04	∅3,4 -1 DEEP
B3	126,05	-144,54	∅3,4 -1 DEEP

ACABADO SUPERFICIAL N9/	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL ASTM A1008
----------------------------	---	------------------------

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

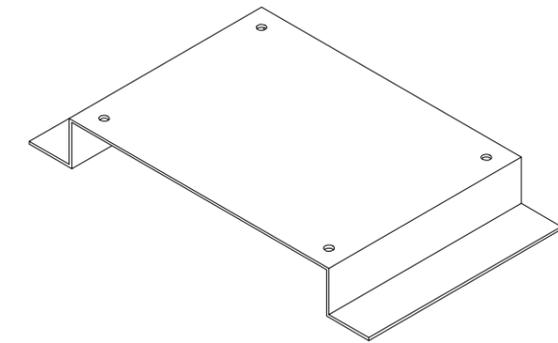
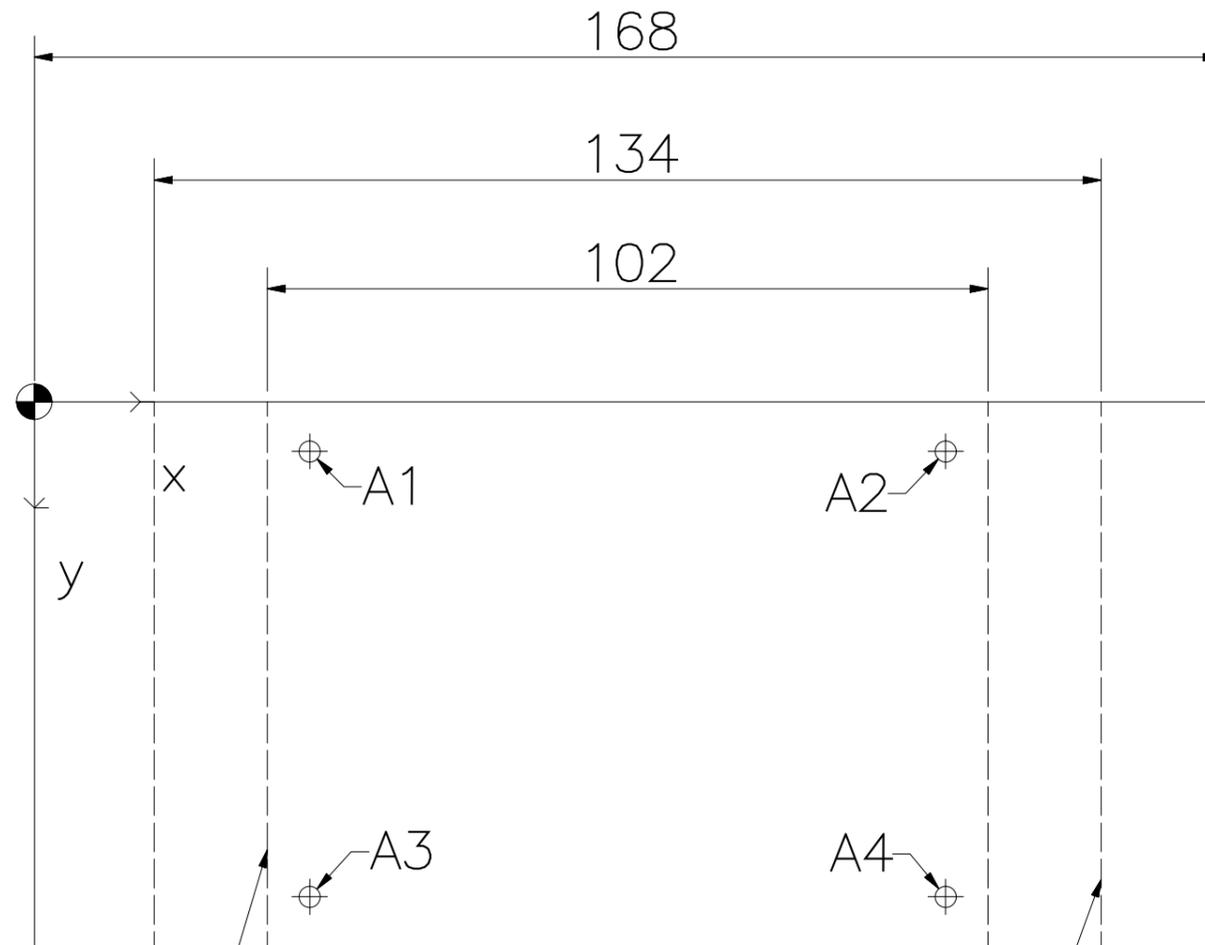
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA 1:2
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15

- Notas:
 1. Tipo de soldadura, para región sombreada, por puntos.
 2. Espesor de chapa 1 mm.

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN 7168							
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

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

LÁMINA:
11-A3-D05



VISTA ISOMÉTRICA

HACIA ARRIBA 90° (x2)

HACIA ABAJO 90° (x2)

NOTAS:

1. Espesor de chapa pcb 1 mm

HOLE TABLE			
HOLE	XDIM	YDIM	DESCRIPTION
A1	39,00	-7,00	∅3 -1 DEEP
A2	129,00	-7,00	∅3 -1 DEEP
A3	39,00	-70,00	∅3 -1 DEEP
A4	129,00	-70,00	∅3 -1 DEEP

ACABADO SUPERFICIAL N9 ✓	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL ASTM A1008
--------------------------------	---	------------------------

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA MEDIR EL NIVEL DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS UTILIZANDO EL SALTO EN CONTRAMOVIMIENTO	ESCALA 1:1
20132256	ROJAS CARRASCO, IVAN ALEXIS	FECHA: 2021.08.15

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN 7168

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

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

LÁMINA:
12-A3-D06