

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Mecatrónica



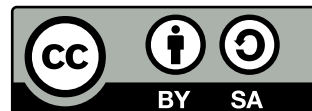
Diseño de un sistema semiautomatizado para la lectura del menisco en pruebas
de calibración de contenedores volumétricos.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Kenneth Gregorio Gutiérrez Bravo

Cartago, 10 de junio 2024

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons “Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional”.



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 10 de junio de 2024



Kenneth Gutiérrez Bravo

Céd: 208060611

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Kenneth Gutiérrez Bravo

Proyecto: Diseño de un sistema semiautomatizado para la lectura del menisco en pruebas de calibración de contenedores volumétricos.



Ing. Roger Meléndez Poltronieri

Asesor

Cartago, 10 de junio de 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Kenneth Gutiérrez Bravo

Proyecto: Diseño de un sistema semiautomatizado para la lectura del menisco en pruebas de calibración de contenedores volumétricos.

Miembros del jurado evaluador



Ing. María Murillo Morgan

Jurado



Dra. -Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 10 de junio de 2024

Resumen

En el presente documento se detalla el proceso de diseño de un sistema para la visualización de meniscos en pruebas de calibración de matraces aforados para el Laboratorio de Volumen del Laboratorio Costarricense de Metrología.

El sistema desarrollado está conformado por componentes mecánicos, eléctricos y de programación que se combinan para brindar una solución que permite agilizar el procedimiento actual. Para lograr lo anterior se siguió el proceso de diseño de ingeniería, donde dadas las necesidades del cliente se investigaron las mejores opciones y finalmente se seleccionó la solución más factible para el problema. Mediante un diagnóstico del estado del arte del proceso actual realizado en el laboratorio, se identificaron los aspectos a mejorar, además, se evaluó el equipo disponible en el laboratorio para la construcción del prototipo. Con manufactura aditiva, corte láser, uso de un sistema de control electrónico y la programación en *LabVIEW* se implementó un prototipo funcional del Sistema Identificador de Menisco (SIM).

Se realizó un análisis de los elementos mecánicos críticos para determinar el cuál determinó que se cuenta con un factor de seguridad mayor a 3. Finalmente se utilizó el sistema para realizar tres calibraciones de matraces aforados de 100 mL las cuales determinaron que el uso del mecanismo mejora la exactitud del proceso en un 35% y una disminución en la incertidumbre final expandida del 40% con respecto al proceso actual.

Palabras clave: Sistema de Visión, Manufactura aditiva, calibración, LabVIEW, incertidumbre expandida

Abstract

In the present document, the design process of a system for visualizing menisci in calibration tests of volumetric flasks for the Volumes Laboratory of the Costa Rican Metrology Laboratory is detailed.

The developed system consists of mechanical, electrical, and programming components that combine to provide a solution aimed at streamlining the current procedure. To achieve this, an engineering design process was followed, where the best options were researched based on client needs, and the most feasible solution for the problem was ultimately selected. A diagnosis of the state of the art of the current laboratory process identified areas for improvement, and an evaluation of the available equipment in the laboratory was conducted for prototype construction. Using additive manufacturing, laser cutting, an electronic control system, and the programming in *LabVIEW* a functional prototype of the Meniscus Identification System Sistema Identificador de Menisco (SIM) was implemented.

An analysis of critical mechanical elements was conducted to ensure a safety factor greater than 3. Finally, the system was used to perform calibration tests on three 100 mL volumetric flasks, demonstrating that the mechanism improves process accuracy by 35 % and reduces the final expanded uncertainty by 40 % compared to the current process.

Keywords: Vision System, Additive Manufacturing, Calibration, LabVIEW, Expanded Uncertainty

Agradecimiento

Primero que nada, quiero agradecerle a mi madre María Gutiérrez la cual siempre me ha apoyado de forma incondicional y ha estado conmigo desde que inicie mi educación formal, ella es un ejemplo de una persona trabajadora y es una motivación para mi persona. También, quiero agradecerle a mi padrastro Pedro Zeledón el cual siempre me ha apoyado y se ha asegurado que no me falte nada para nada con el fin de poder crecer como una mejor persona. El apoyo inquebrantable de mi familia ha sido mi mayor motivación y la fuerza impulsora detrás de mi éxito.

Agradecer también a mis amigos y compañeros que he hecho durante la carrera: André Arias, Célamo Porras, Christopher Morales, Carlos Jara, Carlos Elizondo, Alejandro Gómez y Juan Peña por todo el apoyo en momentos de estrés, por toda la enseñanza que me brindaron ya que son personas muy capaces y me brindaron una gran guía durante toda la carrera. Les deseo todo lo mejor a cada uno de ellos y muchas gracias por estar conmigo durante todo este proceso haciendo de mi etapa universitaria más amena.

Finalmente, extender mi agradecimiento a Stuart Meléndez por todo el apoyo y seguimiento a lo largo del proyecto. A Luis Rodríguez por brindarme acceso al Laboratorio de Volumen del Laboratorio Costarricense de Metrología. Además, siempre que necesité ayuda en cualquier aspecto relacionado con el proyecto estuvo anuente a brindar todo su apoyo. Sin ustedes no lo hubiera logrado.

Índice general

Índice de figuras	vi
Índice de tablas	xii
Lista de abreviaciones	xiv
1. Introducción	1
1.1. Entorno del proyecto	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Síntesis del problema	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Estructura del documento	4
2. Marco teórico	7
2.1. Metrología Física	7
2.1.1. Conceptos importantes	7
2.1.2. Metrología Física: Volumen	9
2.2. Proceso de Calibración de Cristalería de Laboratorio	11
2.2.1. Equipos y Patrones	11
2.2.2. Requisitos y pasos previos	11
2.2.3. Secuencia Operativa	12

2.2.4.	Procedimiento para la calibración de Matracas aforados	13
2.2.5.	Normas	15
2.3.	Principios de Incertidumbre y Estadística	16
2.3.1.	Fuentes de incertidumbre	16
2.4.	Principios Mecánicos	18
2.4.1.	Conceptos fundamentales	18
2.4.2.	Seguridad y fiabilidad en el diseño mecánico	19
2.5.	Manufactura Aditiva	20
2.6.	Principios de Visión Artificial	21
2.6.1.	Definiciones importantes sobre las ópticas de las cámaras	23
2.6.2.	Adquisición y Representación de Imágenes	24
2.6.3.	Filtrado y Realzado de Imágenes	29
2.6.4.	Segmentación	31
3.	Metodología	33
3.1.	Identificación de las necesidades del cliente	33
3.2.	Establecer especificaciones objetivo	35
3.3.	Generar conceptos del producto	36
3.4.	Seleccionar un concepto del producto	38
3.4.1.	Filtrado de conceptos	38
3.4.2.	Evaluación de conceptos	39
3.5.	Desarrollo y construcción de un prototipo	39
3.6.	Probar concepto de la solución	40
3.7.	Establecer especificaciones finales	40
4.	Diagnóstico	41
4.1.	Estado de arte del proceso	41
4.1.1.	Equipo disponible	41
4.1.2.	Descripción del proceso observado	46
4.2.	Identificación de variables por medir y controlar	49
4.3.	Identificación de necesidades y definición me especificaciones objetivo	49
5.	Desarrollo de la solución	53
5.1.	Selección de Concepto	53
5.1.1.	Filtrado de conceptos	53

5.1.2.	Evaluación de conceptos	57
5.2.	Desarrollo de la Plataforma Mecánica	60
5.2.1.	Sistema de movimiento vertical y Plataforma de de la cámara: Primera Iteración	61
5.2.2.	Sistema de movimiento vertical y Plataforma de de la cámara: Segunda Iteración	71
5.2.3.	Manufactura de las piezas del Sistema de movimiento vertical y Plataforma de de la cámara	74
5.2.4.	Sistema de energía y Potencia	77
5.2.5.	Espacio de almacenamiento	83
5.3.	Desarrollo del Módulo de Control	84
5.3.1.	Sistema de captura de la imagen	85
5.3.2.	Algoritmo de Visión Artificial	87
5.3.3.	Implementación de LabVIEW	95
6.	Resultados y Análisis	108
6.1.	Análisis del Factor de Seguridad	108
6.1.1.	Configuración del entorno de análisis	109
6.1.2.	Resultados obtenidos y análisis	110
6.2.	Análisis del torque necesario de los motores	113
6.3.	Análisis del comportamiento del programa de visión artificial	114
6.4.	Pruebas de calibraciones en matraces aforados de 100 mL.	115
6.4.1.	Determinación de la resolución del SIM	115
6.4.2.	Resultados del Matraz A	117
6.4.3.	Resultados del Matraz B	119
6.4.4.	Resultados del Matraz C	121
6.4.5.	Análisis de los resultados de las calibraciones	122
6.5.	Análisis Económico	125
6.5.1.	Flujos Netos de Efectivo	125
6.5.2.	Valor agregado	128
6.6.	Establecimiento de especificaciones finales	128
7.	Conclusiones y Recomendaciones	136
7.1.	Conclusiones	136
7.2.	Recomendaciones	138

Bibliografía	139
Anexos	146
A. Hojas de datos	147
Apéndices	148
B. Bitácora de diseño	149
B.1. Necesidades	149
B.1.1. Recopilación datos sin procesar del cliente	149
B.1.2. Interpretación datos sin procesar en términos de necesidades del cliente	154
B.1.3. Organización las necesidades en una jerarquía	155
B.1.4. Establecimiento la importancia relativa de las necesidades	156
B.1.5. Reflexión en los resultados y el proceso	157
B.2. Especificaciones	159
B.2.1. Elaborar la lista de métricas	159
B.2.2. Fijar objetivos ideales y mínimamente aceptables	160
B.3. Generación de conceptos	170
B.3.1. Paso 1: Aclarar el problema	170
B.3.2. Paso 2 y 3: Buscar Externamente e Internamente	170
B.3.3. Paso 4: Exploración sistemática	177
C. Códigos de la implementación de Visión Artificial	188
D. Implementación en LabVIEW	196
D.1. Implementación de LabVIEW	196
D.2. Ubicación de la manual de uso	196
D.3. Modalidad de Espera	196
D.4. Modalidad de control de la posición de la cámara	197
D.5. Captura de imágenes para la identificación del Menisco	200
D.5.1. Secuencia de uso	200
D.5.2. Registro y almacenamiento de imágenes	203
D.6. Requisitos para el uso del programa	204
D.6.1. Configuración del programa	204
D.6.2. Instalación de dependencias	205

D.7. Proceso de configuración del Arduino	205
E. Datos de experimentos realizados	208
E.1. Datos del experimento de comportamiento del programa identificador de menisco	208
E.2. Datos de las calibraciones	208
E.3. Vídeos de funcionamiento	208
F. Planos estructurales	209

Índice de figuras

1.1. Diagrama del proceso de ajuste de menisco.	3
2.1. Formas presentadas por el menisco en cristalería de laboratorio. [16]	10
2.2. Formas de los meniscos de acuerdo a la limpieza de la cristalería. [19]	12
2.3. Componentes del esfuerzo sobre la superficie normal a la dirección x . [26]	19
2.4. Partes de una impresora 3D de la tecnología DFM. [27]	21
2.5. Diagrama de las etapas más comunes presentes en un sistema de visión artificial. [30]	22
2.6. Diagrama de cómo los rayos de luz inciden en la lente y se unen a una distancia focal. [32]	23
2.7. Algunos tipos de distorsiones que se pueden presentar en imágenes. [33]	24
2.8. Tipos de reflexión dependiendo del material de incidencia. [32]	25
2.9. Diferencia entre los haces de luz en reflexión y refracción. [32]	25
2.10. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación trasera. [35]	26
2.11. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación axial difusa. [33]	27
2.12. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación frontal. [33]	27
2.13. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación lateral. [33]	28
2.14. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación por campo oscuro. [33]	28
2.15. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación difusa tipo domo. [33]	29
2.16. Ejemplo de un histograma de la imagen de un menisco.	30

3.1. Proceso de diseño adaptado de la metodología de Ulrich-Eppinger. [41]	33
3.2. Método de generación de conceptos de cinco pasos. [41]	36
3.3. Diagrama de bloques de los subsistemas del proyecto.	37
3.4. Descomposición funcional de los dos subsistemas de la solución.	38
4.1. Menisco captado por la cámara proyectado en un monitor.	42
4.2. Sistema de sujeción para la cámara actual del laboratorio.	43
4.3. Balanza empleada para la medición de la masa en seco y con líquido del equipo a calibrar.	44
4.4. Termómetro empleado en las pruebas de calibración.	45
4.5. Mesas de planitud empleadas para la calibración de cristalería de laboratorio.	45
4.6. Lupas utilizadas para la visualización del menisco.	46
4.7. Imagen de un matraz con la cinta negra.	47
4.8. Visualización del menisco al emplear y no emplear un cinta negra por debajo de la línea de aforo. [16]	47
4.9. Cristalería a calibrar sobre la mesa de plenitud.	48
4.10. Jeringa de Insulina empleada para el ajuste del menisco.	48
4.11. Matriz de relación entre la necesidad y su métrica.	50
5.1. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto J.	57
5.2. Tornillo y tuerca de avance empleado.	62
5.3. Cojinete empleado para sujetar el tornillo sin fin.	62
5.4. Opciones para el soporte del sistema de movimiento vertical.	63
5.5. Sistema de Movimiento Vertical.	64
5.6. Guía de eje de riel lineal empleado.	64
5.7. Soportes de Tornillo de Avance	65
5.8. Soportes de Doble Barra Lisa	66
5.9. Módulos de Tornillo de Avance y Doble Barra Lisa.	67
5.10. Lámina de Acrílico empleada para dar guía a los cojinetes	68
5.11. Posible error cuando no se utiliza la lámina de acrílico.	68
5.12. Plataformas con rodamiento lineal para ejes de 8mm.	69
5.13. Uniones entre las plataformas de movimiento.	69
5.14. Cámara empleada en el sistema.	70
5.15. Jaula de contención para la cámara.	70
5.16. Pieza de unión de la plataforma móvil con la tuerca de avance.	71

5.17. Montaje de la Primera Iteración.	72
5.18. Cambios en el soporte de la cámara presentes en la segunda iteración	73
5.19. Sistema de sujeción de la cámara en su segunda Iteración.	74
5.20. Impacto de las cargas en tensión según la orientación de la pieza. [44]	76
5.21. Diferentes patrones de relleno disponible en la impresión 3D. [44]	76
5.22. Impresión 3D planteada en el software de configuración de la impresora 3D. .	77
5.23. Impresión 3D en las impresora del laboratorio.	77
5.24. Motor Paso a Paso seleccionado.	78
5.25. Distintos acoples entre el tornillo sin fin y el motor Nema 17.	79
5.26. Elementos de control para el motor Nema 17.	80
5.27. Características de la Fuente de Alimentación S-120-12.	81
5.28. Partes de la alimentación para la fuente de poder.	81
5.29. Conexiones del Shield V3 de Arduino Uno al motor paso a paso.	82
5.30. Espacio de almacenamiento.	83
5.31. Sujeción del motor en el espacio de almacenamiento.	84
5.32. Diagrama del Módulo de Control	85
5.33. Disposición de la cámara y la cristalería de laboratorio.	85
5.34. Fuente de iluminación difusa. [47]	87
5.35. Flujo empleado para el procesamiento de la imagen en Visión Artificial (VA).	87
5.36. Imagen original para el proceso de VA.	88
5.37. Cuadro de selección para la zona de interés.	89
5.38. Resultado luego de la etapa <i>Recortar imagen original</i>	89
5.39. Resultados luego convertir todas las imágenes a su escala de grises.	90
5.40. Histograma del proceso antes de realizar la mejora del contraste.	90
5.41. Estado de la imagen del proceso completo luego de la mejora de contraste. .	91
5.42. Imágenes binarizadas.	92
5.43. Resultado esperado después de la identificación de bordes.	94
5.44. Tab Control empleado para variar entre las distintas modalidades del programa.	96
5.45. Interfaz gráfica del modo de espera del programa de LabVIEW.	96
5.46. Interfaz gráfica del modo de captura de imágenes del programa de LabVIEW.	98
5.47. Bloques para integrar funciones de Python en LabVIEW.	98
5.48. Implementación en LabVIEW del proceso de Visión Artificial y creación del registro.	100
5.49. Interfaz gráfica cuando el menisco se encuentra a 12 píxeles de la línea de aforo.	101

5.50. Ejemplo de las líneas guardadas en el registro.	101
5.51. Interfaz gráfica del panel de control de la posición de la cámara.	102
5.52. Diagrama de flujo de la lógica de control de posición de la cámara.	103
5.53. Nodos de la biblioteca LINX de LabVIEW utilizados en el control de la posición de la cámara.	104
5.54. Implementación en LabVIEW del movimiento hacia abajo.	105
5.55. Implementación en LabVIEW del movimiento hacia abajo cuando el sensor detecta un objeto.	105
5.56. Implementación en LabVIEW del estado de bloqueo de motores.	106
5.57. Detalles del uso del sensor Infrarrojo.	107
6.1. Sistema de sujeción de la cámara.	108
6.2. Configuración del PLA en Autodesk Inventor.	109
6.3. Configuración de elementos para el análisis de elementos finitos del sistema de sujeción de la cámara.	110
6.4. Resultados obtenidos de la prueba de elementos finitos.	111
6.5. Casos extremos de inclinación en el sistema de sujeción de la cámara.	112
6.6. Estados del menisco empleados para determinar la resolución del SIM	116
6.7. Distribución de los resultados en las calibraciones del Matraz A.	123
6.8. Respuesta del cliente sobre la satisfacción del registro del SIM.	130
6.9. Rango de desplazamiento de la cámara.	132
6.10. Respuesta del cliente sobre la satisfacción con la interfaz gráfica del SIM.	133
6.11. Respuesta del cliente sobre la satisfacción con la interfaz gráfica del SIM.	134
B.1. Matriz de relación entre la necesidad y su métrica.	160
B.2. Tecnología del Cremallera y Piñon. [51]	170
B.3. Tecnología de transmisión por correa. [54]	171
B.4. Representación de la tecnología de tornillo de avance. [54]	171
B.5. Representación de la tecnología de tornillo de Bolas. [55]	172
B.6. Representación de la tecnología de Pistón. [56]	172
B.7. Abrazadera actual de la lente de la cámara.	173
B.8. Vista de la cámara para apreciar los agujeros de sujeción de tornillos.	173
B.9. Sujetadores de teléfono en vehículos.	174
B.10.Árbol de clasificación para los fragmentos de concepto de fuente de energía del SIM.	177

B.11. Diagrama de combinación de conceptos.	178
B.12. Esquema del concepto A.	179
B.13. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto A.	179
B.14. Esquema del concepto B.	180
B.15. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto B.	180
B.16. Esquema del concepto C.	181
B.17. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto C.	181
B.18. Esquema del concepto D.	182
B.19. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto D.	182
B.20. Esquema del concepto E.	183
B.21. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto E.	183
B.22. Esquema del concepto F.	184
B.23. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto F.	184
B.24. Esquema del concepto G.	185
B.25. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto G.	185
B.26. Esquema del concepto H.	186
B.27. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto H.	186
B.28. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto I.	187
D.1. Modo de espera del Sistema Identificador de Menisco.	197
D.2. Configuración de botones para indicarle que que ascienda.	198
D.3. Configuración de botones para indicarle que que descienda.	198
D.4. Perilla de configuración de velocidad.	199
D.5. Casos en los cuales la cámara no se desplazará.	199
D.6. Escritura del nombre de la calibración.	200
D.7. Ventana con lo que visualiza la cámara.	201
D.8. Etapa de confirmación de la imagen.	201
D.9. Selección de región de interés.	202
D.10. Área seleccionada ampliada.	202
D.11. Imagen Final.	202
D.12. Estatus del menisco.	203
D.13. Carpeta con los resultados de la calibración.	204
D.14. Detalles del registro.	204
D.15. Configuración del directorio donde se encuentra el archivo de Python.	205
D.16. Paso dos de la configuración del Arduino UNO.	205

D.17.Paso 3 de la configuración del Arduino UNO.	206
D.18.Paso 3 de la configuración del Arduino UNO.	206
D.19.Pasos 5 y 6 de la configuración del Arduino UNO.	207
D.20.Pasos 7 de la configuración del Arduino UNO.	207

Índice de tablas

2.1. Errores máximos permitidos y el diámetro Interno de los Matraces. [20] . . .	13
2.2. Fuentes de luz y sus principales características. [33], [35], [36]	26
3.1. Escala de importancia utilizada para caracterizar las necesidades.	35
3.2. Evaluación relativa utilizada en la matriz de filtrado de conceptos. [41] . . .	39
3.3. Escala empleada en la evaluación de concepto.	39
4.1. Especificaciones objetivo que tiene que cumplir la solución.	51
4.2. Necesidades finales para el Sistema Identificador de Menisco con las cuales se trabaja en el proyecto.	52
5.1. Matriz de filtrado de conceptos.	55
5.2. Tabla de combinación de los conceptos D y E para generar el concepto DE. .	56
5.3. Matriz de evaluación de conceptos.	59
5.4. Matriz de evaluación de conceptos (Continuación).	60
5.5. Características del PLA de acuerdo a su porcentaje de relleno. [46]	76
6.1. Propiedades Mecánicas del Ácido Poliláctico (PLA). [43], [48]	109
6.2. Resultados obtenidos en la prueba de comportamiento esperado en el progra- ma de visión.	115
6.3. Diferencia en volumen captadas por el SIM entre es Estatus 2 y 1.	116
6.4. Distancia entre el menisco y la línea de aforo promedio identificado por el SIM en el Estatus 2 y 1.	117
6.5. Resultados obtenidos durante la calibración del matraz A.	118

6.6. Incertidumbre obtenida en la calibración del Matraz A, unidades mL.	119
6.7. Resultados obtenidos durante la calibración del matraz B.	120
6.8. Incertidumbre obtenida en la calibración del Matraz B, unidades mL.	121
6.9. Resultados obtenidos durante la calibración del matraz C.	121
6.10. Incertidumbre obtenida en la calibración del Matraz C, unidades mL.	122
6.11. Registro histórico de calibraciones del Matraz A.	124
6.12. Error normalizado en las calibraciones de tres matraces con respecto a su valor sin emplear el SIM.	124
6.13. Resumen de costos del equipo previamente adquirido por el laboratorio.	125
6.14. Costos realizados durante el desarrollo del proyecto.	126
6.15. Análisis de Flujo Neto de Efectivo del Sistema de Identificación de Menisco.	127
6.16. Corrección en el volumen identificado para tres matraces con un volumen nominal de 100 mL.	131
6.17. Especificaciones finales del Sistema Identificador de Menisco.	135
B.1. Importancia de cada una de las necesidades del proyecto.	157
B.2. Necesidades finales para el Sistema Identificador de Menisco.	158
B.3. Lista de métricas para el SIM.	159
B.4. Especificaciones objetivo.	161
B.5. Lista de componentes presentes en el laboratorio.	162
B.5. Lista de componentes presentes en el laboratorio.	163
B.5. Lista de componentes presentes en el laboratorio.	164
B.6. Ángulo al cual se presenta el paralaje según la distancia de trabajo.	167
B.6. Ángulo al cual se presenta el paralaje según la distancia de trabajo.	168
B.7. Factor de seguridad de acuerdo con la aplicación y materiales empleados. [50]	168
B.7. Factor de seguridad de acuerdo con la aplicación y materiales empleados. [50]	169

Lista de abreviaciones

ABS Acrilonitrilo Butadieno Estireno

BIPM Buró Internacional de Pesas y Medidas

CAD Diseño Asistido por Computadora

CGPM Conferencia General de Pesas y Medidas

CIPM MRA Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas

CMCs Capacidades de Medición y Calibración

DFM Modelado por Deposición Fundida

FIR Respuesta Finita al Impulso

FNE Flujos Netos de Efectivo

IMECO Confederación Internacional de Medición

INTECO Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica

IIR Respuesta de Impulso Infinita

KCDB Key Comparison Database

LAIMI Laboratorio Institucional de Microcomputadores

LACOMET Laboratorio Costarricense de Metrología

LCM Laboratorio Costarricense de Metrología

MP Mega Píxeles

OIML Organización Internacional de Metrología Legal

Pa Pascales

PETG Tereftalato de Polietileno

PLA Ácido Poliláctico

SD Sistema a Diseñar

SIM Sistema Identificador de Menisco

TC Material Volumétrico para Contener

TD Material Volumétrico para Dispensar

VA Visión Artificial

WD Distancia de trabajo

1.1. Entorno del proyecto

La metrología está sumamente presente en todos los aspectos de la sociedad a pesar de no ser notada. Se trata de una ciencia básica que juega un papel fundamental en muchos campos como la investigación, la fabricación industrial, la medicina, las telecomunicaciones, el comercio, etc. [1]. Por ende, [2] define la metrología como:

La disciplina científica que se dedica a las mediciones. La metrología abarca tanto los aspectos teóricos como los aspectos prácticos de las mediciones, sea cual fuere el nivel de exactitud, o el campo de la ciencia o de la tecnología en el que ocurren.

Entre las principales aplicaciones de la metrología, se consideran: [3]

- El establecimiento, reproducción, conservación y difusión de las unidades de medida y sus estándares.
- La teoría general de la medición, junto con los métodos, procedimientos de ejecución y la evaluación de la incertidumbre relacionada.
- Análisis de las características de los instrumentos de medición desde la perspectiva de su uso práctico.
- Garantizar que las mediciones sean uniformes y consistentes en su realización.

La importancia crucial de la metrología, como mencionamos anteriormente, resalta la necesidad y pertinencia de contar con organizaciones metroológicas a nivel nacional e internacional para promover la uniformidad y precisión de las mediciones. Entre las principales organizaciones internacionales de metrología se encuentran el Buró Internacional de

Pesas y Medidas (BIPM), la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y la Confederación Internacional de Medición (IMECO). [2]

Dada la suma importancia de la metrología y lo fundamental que resulta para el desarrollo científico, en Costa Rica, en 1973 se estableció la Oficina Nacional de Normas y Unidades de Medida con el propósito de supervisar y gestionar las actividades relacionadas con la normalización y metrología. Posteriormente, en 1995, se amplió su mandato mediante un decreto que incluyó la acreditación y la regulación técnica dentro de sus responsabilidades. En el año 2002, se estableció el Laboratorio Costarricense de Metrología (LACOMET), a través de la Ley 8279, titulada "Sistema Nacional para la Calidad". Este laboratorio se creó como una entidad descentralizada con personalidad jurídica instrumental, adscrita al Ministerio de Economía, Industria y Comercio. Su función principal es cumplir con las normativas nacionales e internacionales relacionadas con la metrología. [4]

El objetivo primordial del Laboratorio Costarricense de Metrología (LCM) es asegurar la trazabilidad de las mediciones realizadas en el país conforme a los estándares establecidos por el Sistema Internacional de Unidades (SI). Además, busca difundir y fundamentar la metrología a nivel nacional, custodiar los patrones nacionales y desempeñar el papel de laboratorio nacional de referencia en metrología. [4]

El presente proyecto se desarrolló más específicamente en el Laboratorio de Volumen del LCM, que tiene la responsabilidad de calcular el volumen de un líquido contenido o dispensado por un instrumento volumétrico. La medición precisa de volúmenes de líquidos es crucial en diversos ámbitos, incluyendo investigaciones científicas, desarrollo de productos industriales y transacciones comerciales que implican líquidos como agua o combustibles. Para minimizar errores en estas mediciones, es esencial contar con instrumentos debidamente calibrados y una cadena de trazabilidad adecuada [5]. Este laboratorio lleva a cabo calibraciones en instrumentos desde $1 \mu\text{L}$ hasta 19 L, y todas sus Capacidades de Medición y Calibración (CMCs) están reconocidas a nivel internacional y son públicas en el Apéndice C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM MRA), el cual se encuentra en la Key Comparison Database (KCDB) del BIPM. [5], [6]

1.2. Descripción del problema

Durante las pruebas de capacidad para matraces aforados ejecutadas por el Laboratorio de Volumen se lleva a cabo un proceso altamente reiterativo donde se repite el procedimiento ilustrado en la Fig. 1.1. Este proceso es fundamental ya que el la incertidumbre que genera más del 50% de la incertidumbre expandida del proceso de calibración completo. El laboratorio cuenta con lupas manuales y una cámara para realizar esta medición de una mejor manera, las primeras ya son un equipo obsoleto y altamente dependientes de la manipulación humana, mientras que la cámara no cuenta con la estructura indicada para su correcta sujeción y manipulación. Otro detalle para recalcar es que dada la naturaleza manual del proceso no se cuenta con una interfaz que conecte los datos captados por la cámara al software actual del laboratorio. Todo lo anterior ocasiona que el proceso presente una alta variabilidad en el tiempo de ejecución y alta incertidumbre de medición.

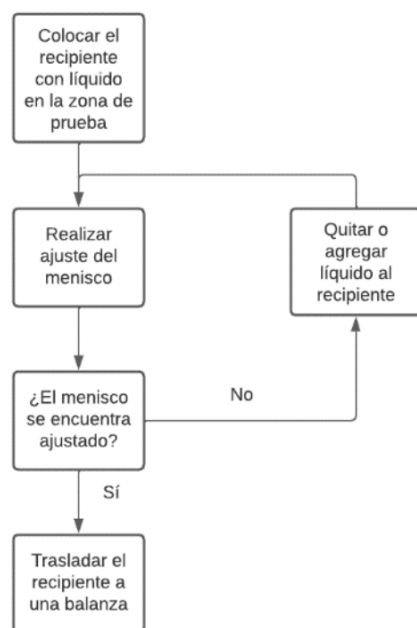


Figura 1.1. Diagrama del proceso de ajuste de menisco.

Aunque el uso de estas herramientas facilita una mejor visualización del menisco, la determinación de si se encuentra en la posición de aforo sigue dependiendo en gran medida de las capacidades visuales del observador. Por ende, se necesita aprovechar las herramientas actuales para desarrollar un sistema que sea capaz de manipular la cámara y indicar si el menisco o región oscura de este esta cerca de la línea de aforo.

1.3. Síntesis del problema

El proceso de ajuste del menisco en las Pruebas de Calibración de Cristalería de Laboratorio resulta incómodo y extenuante para el ejecutor. El problema radica en la falta de comodidad al utilizar el equipo de visualización y en su falta de integración con otros instrumentos del laboratorio, así como en la incertidumbre humana sobre la precisión de su alineación con la línea de aforo. Esta situación conduce a una ineficiencia significativa en la gestión del tiempo y resulta en una limitación de las capacidades de medición y calibración del laboratorio.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Realizar un diagnóstico del proceso de calibración actual y el equipo empleado en la lectura del menisco.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico del proceso de calibración actual y el equipo empleado en la lectura del menisco.
2. Diseñar la estructura de soporte para los elementos físicos del sistema semiautomático identificador de líneas de aforo.
3. Diseñar un sistema identificador de líneas de aforo en recipientes volumétricos para llevar a cabo calibraciones de alta exactitud en el Laboratorio Costarricense de Metrología.
4. Validar el diseño del sistema semi-automatizado de calibración de recipientes volumétricos.

1.5. Estructura del documento

El presente documento está compuesto por siete capítulos que son fundamentales para presentar de manera completa el proceso de ingeniería y todo el trabajo realizado. Los capí-

tulos son los siguientes: Introducción, Marco Teórico, Metodología, Diagnóstico, Desarrollo de la Solución, Resultados y Análisis, y Conclusiones y Recomendaciones.

El capítulo de Introducción cumple la función de proporcionar una descripción del problema al cual se busca solución en este proyecto, así como una breve exposición de las necesidades del Laboratorio Costarricense de Metrología LCM. Además, presenta los objetivos y el alcance del proyecto.

El capítulo del Marco Teórico aborda todos los aspectos necesarios para comprender los conceptos fundamentales relacionados con el problema y su solución. Además de las bases de metrología, incertidumbre, estadística y sistemas de visión mencionados, este capítulo también abarca otros temas relevantes para el proyecto, tales como fundamentos de ingeniería mecánica, tecnologías de control y cualquier otro conocimiento teórico necesario para contextualizar adecuadamente la problemática y su resolución. Todos estos conceptos son cruciales para el entendimiento y desarrollo del proyecto.

Por otro lado, el capítulo de Metodología describe el proceso de diseño de ingeniería utilizado para desarrollar el concepto de solución para la problemática identificada, así como las pruebas que se realizarán para validar dicha propuesta.

El capítulo cuatro corresponde al Diagnóstico el cual es un análisis del estado del arte del proceso de calibración de cristalería de laboratorio. Se da una breve descripción de todo el proceso y se analiza en gran detalle la corrección del menisco con el fin de identificar sus principales aspectos a mejorar. Luego, continúa el Desarrollo de la Solución (Capítulo 5) donde se documenta de una forma detallada el proceso de diseño de cada uno de los componentes de la propuesta, sus características y funciones.

Una vez presentada en detalle la propuesta de solución, prosiguen los Resultados y Análisis de la solución, donde se muestran los resultados de las simulaciones de las partes críticas del diseño de la Plataforma Mecánica y las mejoras obtenidas en el proceso de ajuste de menisco. Se compararán los resultados obtenidos con el Sistema Identificador de Menisco SIM contra los resultados obtenidos actualmente con los medios del ejecutor.

Finalmente, el capítulo de Conclusiones y Recomendaciones pretende mostrar de una manera concisa los resultados obtenidos del proyecto, así como brindar retroalimentación para mejorar la solución y el proceso llevado a cabo.

El principal aporte de ingeniería en este proyecto consiste en la identificación y mejora de un proceso conocido de calibración, con el objetivo de investigar formas de mejorar las Capacidades de Medición del Laboratorio de Volumen del LCM y la calidad de vida de sus integrantes. Con ello, se busca que el país demuestre su compromiso con la excelencia y la

mejora en las prácticas metrológicas, con el fin de alcanzar siempre mejores resultados y brindar una mayor calidad a clientes nacionales e internacionales.

2.1. Metrología Física

La metrología es la ciencia de la medición, que abarca todos los aspectos teóricos y prácticos relacionados con la determinación de magnitudes físicas y el establecimiento de unidades de medida. La metrología busca asegurar la exactitud y la precisión en las mediciones, así como asegurar la trazabilidad de las mismas a estándares internacionales. Por otro lado, la metrología física se centra específicamente en las mediciones de cantidades físicas como masa, tiempo, longitud, temperatura, entre otras, utilizando instrumentos y procesos especializados. Esta rama de la metrología juega un papel fundamental en diversos campos científicos, tecnológicos e industriales, contribuyendo al avance del conocimiento y al desarrollo de tecnologías más precisas y confiables. [2]

2.1.1. Conceptos importantes

Dada la importancia de los conceptos metrológicos en este proyecto, esta sección documentará los más esenciales:

- **Calibración:** son una serie de acciones realizadas para determinar la conexión entre las lecturas proporcionadas por un dispositivo o sistema de medición, los valores asociados a una medida materializada o a una referencia, y los valores que corresponden a las magnitudes establecidas por los estándares internacionales. [7]
- **Medidas:** surge de la comparación entre la cantidad de la magnitud que se desea evaluar y la unidad de medida correspondiente. Esta comparación se expresa a través de un número acompañado de la unidad utilizada para la medición. [8]

- **Método de Medición:** es el proceso sistemático que se emplea para obtener valores numéricos de una magnitud o variable específica. Este proceso implica el uso de instrumentos, técnicas y procedimientos estandarizados para realizar mediciones de manera precisa y reproducible. Su principal objetivo es obtener resultados confiables y precisos que sean útiles para el análisis, la toma de decisiones o la investigación en un área particular. [9]
- **Principio de Medición:** son los fundamentos teóricos y prácticos que guían el proceso de obtener valores de una magnitud específica utilizando instrumentos y técnicas de medición. Los principios de medición incluyen conceptos como la trazabilidad, la exactitud, la precisión, la linealidad y la incertidumbre, entre otros. Además, estos principios también abarcan aspectos relacionados con la selección y calibración de instrumentos, la toma de muestras, la manipulación de datos y la evaluación de la incertidumbre asociada a las mediciones. [10]
- **Error:** A continuación, se describen los principales tipos de errores producidos durante el proceso de medición:
 - Los errores sistemáticos son desviaciones consistentes y predecibles entre el valor medido y el valor verdadero de una magnitud, que se producen de manera constante en todas las mediciones realizadas. Estos errores suelen deberse a factores externos o condiciones experimentales que afectan de manera uniforme todas las mediciones. Los errores sistemáticos pueden darse por diversas razones, por ejemplo, debido a daños en los instrumentos de medición, a errores en los procedimientos de medición o a condiciones ambientales fuera del rango recomendado. [11]
 - Los errores aleatorios son fluctuaciones no predecibles en las mediciones que se producen de manera aleatoria y sin un patrón discernible. Estos errores pueden surgir debido a una variedad de factores, como la variabilidad inherente en los sistemas de medición, las condiciones ambientales cambiantes o la habilidad del operador. Los errores aleatorios no afectan consistentemente todas las mediciones y tienden a cancelarse entre sí cuando se realizan múltiples mediciones del mismo valor. La reducción de los errores aleatorios se puede mitigar aumentando el número de mediciones tomadas y aplicando técnicas estadísticas para mitigar la incertidumbre asociada con la medición. [11]
- **Trazabilidad:** se refiere a la capacidad de relacionar el resultado de una medición o

el valor de un patrón con referencias específicas, generalmente patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena continua de comparaciones, cada una con sus propias incertidumbres determinadas. La importancia de la trazabilidad radica en su capacidad para comparar resultados y garantizar consistencia. [12]

2.1.2. Metrología Física: Volumen

La calibración de material volumétrico es esencial para llevar a cabo ensayos experimentales en una variedad de contextos, como productos químicos, industriales, de investigación y para la enseñanza, entre otros. Además, los instrumentos volumétricos, como la cristalería de laboratorio, son fundamentales, ya que permiten la medición precisa de volúmenes de líquidos, tanto para contenerlos como para transferirlos durante la realización de experimentos y ensayos. [13]

Antes de iniciar la calibración del material volumétrico, es esencial tener conocimiento de los tipos de instrumentos presentes en los laboratorios y cómo se clasifican. Actualmente, el material volumétrico se puede clasificar de diversas formas. Sin embargo, para comprender este proceso, es fundamental distinguir entre el Material Volumétrico para Contener (TC) y el Material Volumétrico para Dispensar (TD), que son parte de la clasificación utilizada para indicar el tipo de calibración del material volumétrico. [13]

- **Material Volumétrico para Contener:** los materiales diseñados para retener una cantidad específica de líquido en su interior, indicada por una marca en su superficie exterior, se conocen como material volumétrico para contener. Según la Organización Internacional de Normalización (ISO), este tipo de material se identifica con las iniciales “In”, que denotan el volumen interno que puede contener. Algunos ejemplos de este tipo de material incluyen el matraz aforado y las probetas graduadas. [13], [14]
- **Material Volumétrico para Dispensar:** estos recipientes se emplean para entregar una cantidad específica de líquido, y al igual que en el caso anterior, su capacidad se indica en la parte exterior del instrumento. Se les asigna la designación “Ex” según la Organización Internacional de Normalización (ISO), que se refiere al volumen extraído o dispensado. Algunos ejemplos de este tipo de material son las buretas y las pipetas graduadas y aforadas. [13], [14]

Otra clasificación importante de los equipos volumétrico es según la tolerancia o máximo error permitido, en Clase A, los de mayor exactitud, y en Clase B, los de menor exactitud. [15]

Un método muy empleado para calibrar cristalería de laboratorio es el gravimétrico, el cual consiste en medir la masa del líquido que contiene o entrega en un nivel específico (línea de aforo o medida volumétrica). Un proceso fundamental es determinar cuándo el líquido contenido por el equipo se encuentra en el punto de referencia. Esto se conoce como la corrección de menisco, el cual es el proceso que se desea mejorar en el presente proyecto.

El menisco es la curvatura que se forma en la superficie de un líquido cuando está contenido en un recipiente. Debido a las fuerzas de cohesión entre la pared del equipo de laboratorio y el líquido se da este fenómeno. El menisco puede ser cóncavo o convexo (ver Fig. 2.1), dependiendo de las propiedades del líquido y del material del recipiente. En el contexto de la medición volumétrica, el menisco se utiliza como referencia para determinar el volumen exacto de líquido contenido en un instrumento de medición. [16]



(a) Menisco Cóncavo



(b) Menisco Convexo

Figura 2.1. Formas presentadas por el menisco en cristalería de laboratorio. [16]

Para leer el menisco sin error de paralaje, el equipo a calibrarse debe estar en posición vertical y los ojos del ejecutor de la calibración deben encontrarse a la altura del menisco. Este es un tipo de error que ocurre al leer una escala graduada, como la que se encuentra en instrumentos de medición. Ocurre cuando la línea de visión del observador no está en línea con el plano, lo que puede causar una lectura incorrecta de la medida. Esto se debe a que el observador percibe la posición de la escala graduada desde un ángulo, lo que puede llevar a una sobre-estimación o subestimación del valor real [17]. Para evitar este error, es importante asegurarse de que la línea de visión del observador esté perpendicular a la escala graduada al realizar una medición. Lo anterior es uno de los focos del presente proyecto, ya que hay que tomarlo en cuenta para el diseño mecánico.

Es importante mencionar el principal instrumento que se analizará en el presente proyecto el cual son los balones aforados. Estos son imprescindibles para la preparación precisa de soluciones mediante disolución o dilución a un volumen determinado. Estos recipientes tienen

una forma bulbosa con un fondo plano y un cuello estrecho. Suelen tener una única marca en su cuello que indica el volumen de líquido contenido en su interior. [18]

2.2. Proceso de Calibración de Cristalería de Laboratorio

En la presente sección se describirá el proceso completo de calibración realizado en el LCM para calibrar cristalería de laboratorio.

2.2.1. Equipos y Patrones

Para realizar la calibración se necesita como mínimo el siguiente equipo: [19]

1. Una balanza con la capacidad suficiente para pesar la cristalería con y sin contenido.
2. Un termómetro calibrado para la temperatura ambiente, con una resolución menor o igual a $0,1^{\circ}\text{C}$.
3. Un barómetro calibrado con una resolución menor o igual a 10 Pascales (Pa) y una incertidumbre estándar menor o igual a 10 Pa.
4. Un higrómetro calibrado con una resolución mejor o igual a 1 % de la lectura.
5. Agua de alta pureza.
6. Una lupa o lente de aumento.

2.2.2. Requisitos y pasos previos

A continuación, se enumeran los cuidados y procesos previos al proceso de calibración. Es esencial constatar que las condiciones ambientales en el laboratorio cumplan con ciertos requisitos antes de comenzar cualquier procedimiento:

- Humedad relativa entre 45 % y 70 %.
- La temperatura del aire debe estar entre 18°C y 22°C .
- No debe haber una variación mayor a 1°C durante el proceso.

Los dispositivos utilizados durante la calibración, como termómetros, pesas, balanzas y los medidores de las condiciones ambientales, deben mantenerse en condiciones óptimas de funcionamiento y estar sometidos a un control metrológico adecuado. Verificar que la balanza esté funcionando correctamente y encenderla 30 minutos antes de iniciar el procedimiento de calibración.

Utilizar agua almacenada en un contenedor en el laboratorio con 24 horas de anticipación a su uso, para que la temperatura del agua esté equilibrada con la temperatura del aire del laboratorio. El agua no debe almacenarse por más de 10 días naturales. Durante el proceso de calibración, la temperatura del agua debe estar entre los 18 °C y 22 °C; si esto no se cumple, se debe detener la calibración hasta que se cumplan las condiciones. Además, la temperatura del agua no puede variar en más de 0,5 °C durante todo el proceso de calibración para equipos sin escala o durante toda la calibración de un punto en equipos con escala; si esto no se cumple, se debe repetir el proceso de calibración.

Todo el equipo a calibrar debe estar en el laboratorio al menos dos horas antes de iniciar el proceso de calibración, y debe estar lavado y limpio. Si durante la calibración se presentan meniscos mal definidos o algún tipo de mancha o suciedad en las paredes de la cristalería, se debe detener el proceso y se debe lavar nuevamente el la cristalería. Un menisco mal formado se puede apreciar en la Fig. 2.2a.



(a) Menisco mal formado



(b) Menisco bien formado

Figura 2.2. Formas de los meniscos de acuerdo a la limpieza de la cristalería. [19]

2.2.3. Secuencia Operativa

A continuación se describen los pasos realizados que son independientes de la cristalería que se va a calibrar: [19]

1. Se realiza una inspección visual de todo el equipo. Buscando posibles fugas, rupturas, marcas borrosas o ilegibles, o cualquier alteración visible que pueda ocasionar una alteración en el proceso.

2. Se determina el tipo de equipo volumétrico, su tiempo de espera, su tiempo de entrega, y el error máximo permitido según su clase. En el caso de los matraces aforados, los errores máximos permitidos se pueden apreciar en la Tabla 2.1.
3. Se selecciona el coeficiente de expansión térmica del equipo de acuerdo con su material.
4. Se realiza la limpieza del equipo a calibrar.
5. Una hora antes de iniciar la calibración, se anotan todos los datos que se utilizarán durante la calibración, incluyendo las condiciones ambientales y cualquier cambio en la última hora de la temperatura ambiente y la humedad relativa. En el caso de no cumplir con los requisitos antes mencionado se apuntan los valores actuales y se espera una hora más. Si las condiciones siguen sin cumplir se vuelven a apuntar y se comunica a un nivel superior para decidir cuándo se reanudará el proceso.
6. Si durante el proceso uno de los requerimientos respecto a las características del ambiente se deja de cumplir se detendrá el proceso y se documentaran las razones para dicha decisión, se esperará un máximo de dos horas para la recuperación de las condiciones óptimas. En el caso de que no se vuelva a contar con las condiciones óptimas, se comunicará a la jefatura.

Tabla 2.1. Errores máximos permitidos y el diámetro Interno de los Matraces. [20]

Capacidad Nominal mL	Error máximo permitido mL		Diámetro interno del cuello en la línea de graduación mm
	Clase A	Clase B	
5	0,025	0,05	8
10	0,025	0,05	8
25	0,04	0,08	10
50	0,06	0,12	12
100	0,10	0,20	14
200	0,15	0,30	17
250	0,15	0,30	17
500	0,25	0,50	21
1000	0,40	0,80	25
2000	0,60	1,2	30

2.2.4. Procedimiento para la calibración de Matraces aforados

A continuación, se documentan los pasos seguidos para calibrar balones aforados ya que es el equipo que se analiza en el presente proyecto: [19]

1. Se pesa el equipo a calibrar, tiene que estar limpio y seco, con su respectiva tapa (si es posible).
2. Solo para volúmenes mayores a 100 mL, se pesa patrones de forma que su masa sea tan cercana al valor de la masa del equipo a calibrar.
3. Para todos los volúmenes, se coloca en la balanza el equipo a calibrar, limpio y seco, con su respectiva tapa (si es posible).
4. Se registran las condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. Luego, se retira el equipo a calibrar de la balanza.
5. En el caso de balones aforados de una sola marca (como en el presente proyecto), los pasos del 2 al 4 se repiten 5 veces.
6. Se llena el equipo a calibrar con agua destilada hasta aproximadamente 1 cm por encima de la línea de aforo y se deja reposar durante 10 minutos para que el conjunto equipo y líquido entre en equilibrio térmico.
7. Se coloca el equipo a calibrar sobre una superficie plana, la cual debe ser revisada previamente con un nivel de burbuja.
8. Dado el caso, se eliminan las gotas de agua en la superficie exterior del equipo, arriba del menisco y las burbujas de aire dentro del agua o menisco.
9. Se elimina el agua lentamente hasta la línea de aforo a calibrar con la ayuda del dispositivo de ajuste del menisco. Se eliminan las gotas de agua sobre la marca de aforo.
10. Si el equipo no permite eliminar fácilmente el agua sobre la marca, el ajuste del equipo a la línea de aforo se realiza eliminando agua a unos milímetros debajo de esta y luego añadiendo agua lentamente con la ayuda de un dispositivo de ajuste hasta la marca de aforo a calibrar.
11. Se coloca la tapa del equipo (si es posible) y se determina la masa del equipo y su contenido, luego se retira el equipo de la balanza.
12. Se anotan las condiciones ambientales: humedad relativa, temperatura y presión atmosférica. También, se anota la temperatura del agua dentro del recipiente. Antes de sacar el termómetro del agua, se agita con cuidado.

13. Se agrega agua hasta aproximadamente 1 cm por encima de la línea de aforo y se repite el proceso desde el paso 7 hasta el paso 12 cinco veces para balones aforados de una única marca.
14. Se calcula el volumen promedio y su incertidumbre, y se elabora el certificado de calibración siguiendo los lineamientos correspondientes.

El procedimiento descrito desde el paso 7 hasta el paso 13 se realizará en detalle en el capítulo 4, ya que es el proceso que el cliente desea mejorar. En este capítulo, se documentarán las necesidades identificadas tras revisar dicho proceso.

2.2.5. Normas

INTE/ISO 4787:2018

También titulado *Cristalería para laboratorio instrumentos volumétricos-métodos para prueba de la capacidad y su uso*, es una norma aprobada por la Comisión Nacional de Normalización del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). Documenta todo lo referente al proceso de calibración de cristalería de laboratorio. Abarca detalles como: líquido para la calibración, proceso de calibración y el ajuste del menisco. [21]

ISO 17025

Es una norma orientada hacia los laboratorios de ensayo y/o calibración para que puedan garantizar ante sus clientes la calidad y su capacidad para realizar análisis. Las revisiones por pares en el LCM se llevan a cabo bajo esta norma. [22]

INTE ISO/IEC 17043:2010

Esta Norma Internacional proporciona una base coherente para determinar la competencia de las organizaciones que proveen ensayos de aptitud. Proporcionaba guías completas no solo sobre cómo llevar a cabo y operar los ensayos de aptitud, y la selección y aplicación de estos ensayos por parte de los organismos de acreditación de laboratorios, sino también descripciones detalladas de los tipos típicos de ensayos de aptitud. [23]

2.3. Principios de Incertidumbre y Estadística

En esta sección se mostrarán las fuentes de incertidumbre en el proceso de calibración de matraces aforados.

2.3.1. Fuentes de incertidumbre

Modelo de medición

El volumen no se determina de manera directa, sino que se calcula a partir de mediciones indirecta. El volumen de un contenedor a 20 °C se calcula como se muestra en la Ec. 2.1. [19]

$$V_{20} = (M_w) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a}\right) [1 - \alpha(t - t_r)] \quad (2.1)$$

Donde:

- V_{20} : es el volumen contenido por el balón aforado a 20 °C (mL).
- M_w : es la masa contenida por el recipiente (g).
- ρ_a : es la densidad del aire en el laboratorio (g/cm³).
- ρ_s : es la densidad de los patrones de masa (g/cm³).
- ρ_w : es la densidad del agua (g/cm³).
- α : Coeficiente de expansión volumétrico del material del recipiente (°C⁻¹).
- t : temperatura a la cual se realizó la medición (°C).
- t_R : la temperatura de referencia (°C).

Contribución a la incertidumbre por repetibilidad

La calibración de cada equipo de cristalería se realiza n veces, lo que hace que el resultado final se reporte como el valor promedio de todas las mediciones. La incertidumbre en el volumen debido a la repetición de las mediciones se puede expresar como se muestra en la Ec. 2.2. [19]

$$u_{\text{repetibilidad}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.2)$$

Contribución por la resolución del equipo

En equipos volumétricos de una sola línea de aforo (como lo es el matraz aforado) se debe considerar un factor de incertidumbre debido a las dimensiones del cuello donde se encuentra dicha marca. Este factor se calcula de acuerdo a la Ec. 2.3.1.

$$u_{\text{resolución}} = \frac{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Donde:

- d = diámetro en cm de la posición donde se encuentra la línea de aforo.
- h = altura en cm aproximada del error en la posición del menisco. Distancia entre el punto más bajo del menisco y la línea de aforo.

La altura h , se mide en milímetros. En dispositivos con una línea de aforo, corresponde al menor cambio de volumen que puede percibir el instrumento o persona que realiza el ajuste del menisco, este volumen se calcula de la siguiente manera [24]:

$$V_R = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad (2.4)$$

Cálculo de la densidad del aire y de su incertidumbre

La incertidumbre asociada la densidad del aire se debe a la temperatura ambiente, la humedad relativa, la presión atmosférica y la fracción molar del CO_2 . [19]

Cálculo de la densidad del agua y su incertidumbre

Esta incertidumbre se presenta debido a la temperatura del agua en el momento de la calibración. [19]

Incertidumbre típica combinada

Esta se puede definir como el resultado de una medición cuando este es obtenido a partir de mediciones indirectas, es decir, medir otras magnitudes y despejar dicho valor. Está definido como la raíz cuadrada positiva de la suma de varianzas o covarianzas de todas las magnitudes utilizadas en su cálculo. [19]

$$u_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial c_i}\right)^2 \cdot (u_{xi})^2} \quad (2.5)$$

Incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida que se reporta utiliza un factor k para tener una probabilidad de cobertura del 95 %. Esto se muestra en la Ec. 2.6. [19]

$$U_{exp} = k \cdot u_c \quad (2.6)$$

2.4. Principios Mecánicos

2.4.1. Conceptos fundamentales

Fuerza y momento

La fuerza es una magnitud que puede deformar o acelerar un objeto; en nuestro contexto, puede aplicarse a piezas específicas del diseño mecánico. En mecánica, se puede definir como una interacción que puede cambiar la velocidad de un componente. Mientras tanto, el momento es una fuerza aplicada de tal manera que puede generar rotación en una pieza del mecanismo. [25]

Tensión y deformación

La tensión es la fuerza interna que experimenta un material o elemento mecánico cuando este es influido por una fuerza, mientras que la deformación es el cambio que sufre debido a la misma [26]. Este aspecto es fundamental, ya que el diseño a implementar tiene que poder soportar la tensión del caso y no caer en deformaciones irreversibles.

Esfuerzos mecánicos

Los esfuerzos que actúan sobre un elemento mecánico se pueden descomponer y representar en dos tipos: uno que actúa en la dirección normal de la superficie y otro que interactúa de forma tangencial. Los esfuerzos en la dirección normal se representan con el símbolo σ y usualmente se conocen como tensión, mientras que los esfuerzos tangenciales se representaron con el símbolo τ y se conocen como esfuerzo cortante. Esto se puede apreciar mejor en

la Fig. 2.3. La forma de calcular ambos esfuerzos se muestra en las Ecs. 2.7 y 2.8, los cuales son dividir la fuerza experimentada en cada dirección entre el área de la superficie normal.

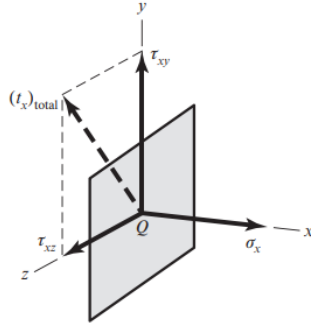


Figura 2.3. Componentes del esfuerzo sobre la superficie normal a la dirección x . [26]

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.8)$$

Rigidez

La rigidez se refiere a la resistencia que tiene el material que se utilizará para la manufactura ante la deformación ocasionada por una fuerza. Esta se suele representar en términos de módulo de elasticidad, como se aprecia en la ecuación 2.9. Sus unidades son las mismas que las del esfuerzo, los Pascales. [26]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.9)$$

Donde:

- σ : es el esfuerzo al cual se somete el material.
- ϵ : es la deformación unitaria que experimenta el material ante el esfuerzo correspondiente.

2.4.2. Seguridad y fiabilidad en el diseño mecánico

Cuando se realiza un diseño, existen muchas incertidumbres con respecto al esfuerzo y su resistencia, entre las cuales están: [26]

- La composición del material a emplear en el proyecto.
- La distribución e intensidad de las cargas que se van a soportar.

Durante el diseño, hay que adecuarse a estas incertidumbres, utilizando un valor conocido como factor de seguridad, el cual es una medida de lo que puede soportar un componente sin presentar ninguna falla. Es la relación entre la carga máxima que el elemento mecánico puede soportar teóricamente y la carga esperada en la aplicación [26]. Este valor es fundamental durante el diseño mecánico, ya que permite garantizar la fiabilidad y la seguridad de los componentes y estructuras. Este valor se calcula de acuerdo con la Ec. 2.10.

$$n = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Esfuerzo esperado}} = \frac{S}{\sigma(\tau)} \quad (2.10)$$

2.5. Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, es una tecnología que se ha vuelto popular en los últimos años. A diferencia de los métodos tradicionales de manufactura, que comienzan con un bloque de material y se van sustrayendo partes para generar la pieza deseada (como el torneado o el fresado), la manufactura aditiva coloca el material capa por capa [27]. Tiene muchas ventajas, como las siguientes:

1. **Permite una gran personalización y detalles:** como se pueden modelar las piezas antes de iniciar su manufactura, permite diseños que serían imposibles con otros métodos. [28]
2. **Gran reducción de residuos:** debido a que la pieza a manufacturar se va creando capa por capa, solo se emplea el material necesario para la pieza, eliminando los residuos de los otros métodos. [28]
3. **Es muy ágil y flexible:** permite corregir piezas de una forma muy sencilla. [28]

Existen muchas técnicas de impresión 3D, entre ellas: [27]

- **SLS:** Sinterización selectiva por láser.
- Modelado por deposición fundida.
- **SLA:** Estereolitografía.

- Digital Light.
- **DLP:** Processing Polyjet.
- **LDM:** Deposición directa de metal.

El método a emplear durante el presente proyecto es el de Modelado por Deposición Fundida (DFM). Este inicia por un modelado en 3D utilizando herramientas Diseño Asistido por Computadora (CAD). Este tipo de técnica hace uso de termoplásticos como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Ácido Poliláctico (PLA). La máquina empleada (impresora 3D) se puede apreciar en la Fig. 2.4. En estas máquinas, el cabezal se desplaza en un patrón sobre la mesa de construcción para así ir depositando el material y construir la pieza deseada. [27]

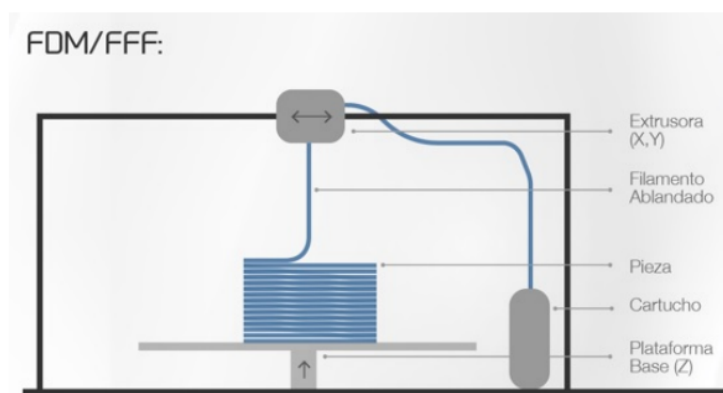


Figura 2.4. Partes de una impresora 3D de la tecnología DFM. [27]

2.6. Principios de Visión Artificial

La visión artificial es un campo de la ciencia que abarca diversas técnicas y conocimientos con respecto a capturar, procesar y examinar imágenes [29]. Constituye un área multidisciplinaria como lo son la informática, ingeniería eléctrica e inteligencia artificial. La VA se basa en algoritmos y técnicas para procesar imágenes con el fin de extraer características relevantes y tomar decisiones o realizar acciones en función de estas. En esta sección se presentarán los conceptos necesarios para comprender los componentes de una solución de VA con el fin de dar un contexto para la solución planteada en el presente proyecto.

Un sistema de visión artificial está constituido por múltiples etapas o partes como se puede apreciar en la Fig. 2.5. A partir de este se puede elaborar múltiples soluciones.

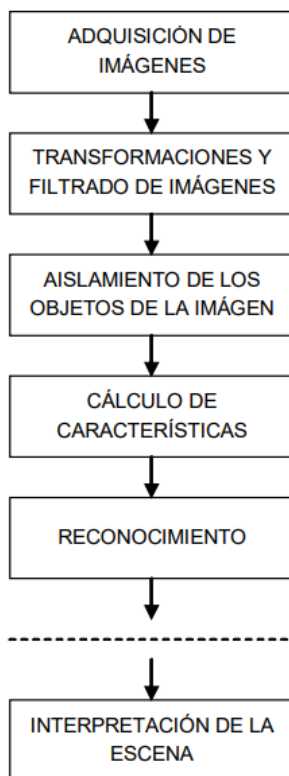


Figura 2.5. Diagrama de las etapas más comunes presentes en un sistema de visión artificial. [30]

Cada una de las fases realiza lo siguiente:

- **Adquisición de imágenes:** en este paso se obtiene la imagen digital por medio de sensores (usualmente una cámara). [30]
- **Transformaciones y filtrado de imágenes:** también conocido como preprocesamiento, el objetivo de esta etapa es mejorar la imagen para poder procesarla mejor. [30]
- **Aislamiento de los objetos de la imagen:** esta etapa se conoce como segmentación, y su objetivo principal es dividir la imagen en distintos objetos siguiendo características deseadas. [30]
- **Cálculo de características:** en esta etapa se identifica o se calcula lo que es más importante para la solución. [30]

- **Reconocimiento:** es la etapa que procesa los cálculos de las características para presentarlos de una forma que permita tomar decisiones. [30]

A continuación, se presentan en más detalle los aspectos teóricos de dichas etapas.

2.6.1. Definiciones importantes sobre las ópticas de las cámaras

En esta sección se presentan algunos conceptos importantes necesarios para entender soluciones de visión artificial:

- **Ópticas:** son componentes de las cámaras encargados de capturar y procesar la luz de manera controlada con el fin de crear una imagen de alta calidad en el sensor. [31]
- **Distancia focal:** corresponde a la distancia medida entre la lente y el sensor de la cámara (Fig. 2.6). Al variar esta distancia podemos acercar o alejar un objeto, lo que usualmente se llama zoom. [32]
- **Distancia de trabajo:** es la distancia que existe entre la lente y el objeto que se desea fotografiar.



Figura 2.6. Diagrama de cómo los rayos de luz inciden en la lente y se unen a una distancia focal. [32]

- **Problemas de las ópticas:** las imágenes capturadas por las ópticas no son perfectas; siempre se presenta alguna distorsión en el resultado final. Se presentan debido a la conversión de un objeto en 3 dimensiones a una imagen en dos dimensiones. En la Fig. 2.7 se presenta un cuadrado fotografiado ante distintas distorsiones.

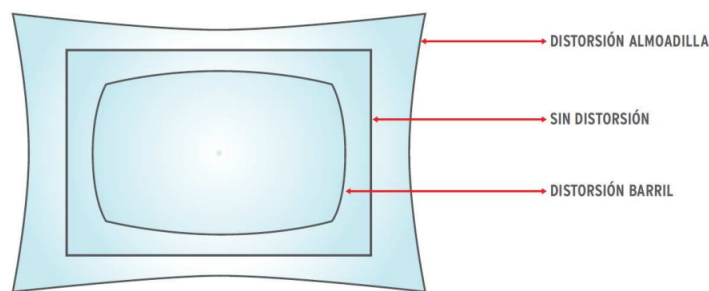


Figura 2.7. Algunos tipos de distorsiones que se pueden presentar en imágenes. [33]

2.6.2. Adquisición y Representación de Imágenes

El proceso de adquisición de las imágenes es la etapa más importante de todo el proceso, ya que una imagen adecuada es fundamental para el resto del procesamiento. Antes de estudiar las distintas fuentes y técnicas de iluminación, vale la pena estudiar un poco acerca de la luz, ya que es la fuente de iluminación.

La luz

Entender el comportamiento de la luz es sumamente importante, ya que los datos que se presentan en una imagen son una distribución de la misma. Lo que capta la cámara es la luz que se encuentra con el objeto deseado y se refleja hacia los sensores de la cámara. Durante este proceso se presentan tres fenómenos físicos fundamentales de entender. [32], [34]

- **Absorción:** este fenómeno se presenta cuando la luz choca con un objeto opaco; una fracción de la luz es absorbida por el objeto y la otra es reflejada o refractada. [32]
- **Reflexión:** este fenómeno se presenta cuando la luz choca contra una superficie que separa dos medios diferentes. Un porcentaje de la luz rebota de la superficie en una dirección determinada por el tipo de la superficie. Si la superficie es muy lisa se presenta una *reflexión especular*, donde todos los rayos de luz se reflejan en la misma dirección (Fig. 2.8b). Mientras que en la *reflexión difusa* la luz se refleja en distintas direcciones (Fig. 2.8a) debido a las irregularidades de la superficie.



Figura 2.8. Tipos de reflexión dependiendo del material de incidencia. [32]

- **Refracción:** es el fenómeno que se presenta cuando un haz de luz, en vez de ser reflejado, ingresa al material del obstáculo (Fig. 2.9). La diferencia con la absorción es que este haz puede volver a refractarse hacia el exterior volviéndose una transmisión. Este fenómeno es empleado en las lentes de la cámara. [32]

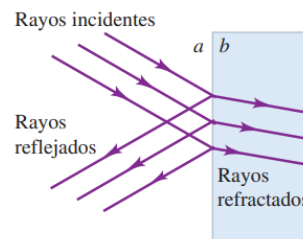


Figura 2.9. Diferencia entre los haces de luz en reflexión y refracción. [32]

Fuentes de iluminación

La fuente de la cual se genera la iluminación de nuestro ambiente es sumamente importante, en la Tabla 2.2 se aprecian las principales fuentes de iluminación.

Disposición de la iluminación

Además de la fuente de iluminación, otro aspecto fundamental es la ubicación de la fuente de luz. Hay multitud de maneras de acomodar la iluminación, que se enumeran a continuación:

- **Iluminación de fondo:** esta técnica consiste en ubicar la fuente de iluminación detrás del objeto que se desea capturar en imágenes (Fig. 2.10). Es útil para destacar los

Tabla 2.2. Fuentes de luz y sus principales características. [33], [35], [36]

Fuente de iluminación	Características
Incandescentes	Bajo costo
	Buena intensidad
	Se degeneran
	Poco eficiente energéticamente
	Se calientan con facilidad
Fluorescentes	Multitud de formas y tamaños
	Baratos
	Iluminación difusa que minimiza los reflejos
	Difícil de atenuar
Fibra Óptica	Gran intensidad con luz uniforme
	Sistemas Frágiles
	Alcance de 5 metros
LED	Ideal para iluminación en entornos reducidos
	Bueno para luz difusa
	Bajo consumo
	Se pueden emplear como flash
Flash Xenón	De bajo precio
	Gran intensidad
	Posee un alto costo de implementación
Láser	Su control es complicado
	VA en 3 dimensiones
	Fácil control
	De alto precio
	Rango de iluminación muy limitado

contornos del objeto y ayuda a detectar las formas y hacer mediciones dimensionales más certeras. [35]

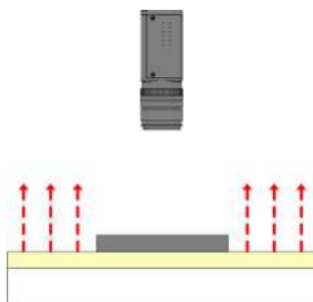


Figura 2.10. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación trasera. [35]

- **Iluminación Axial Difusa:** en esta configuración la luz se distribuye uniformemente en todas las direcciones desde una fuente central (Fig. 2.11). Se utiliza para suavizar las sombras y reducir los reflejos, proporcionando una iluminación uniforme y suave en una escena o superficie. Este tipo de iluminación es común en entornos donde se requiere una iluminación uniforme sin sombras duras. Su principal ventaja es que permite la inspección en materiales altamente reflectantes, pero no permite detectar el relieve de la superficie. [33], [35]

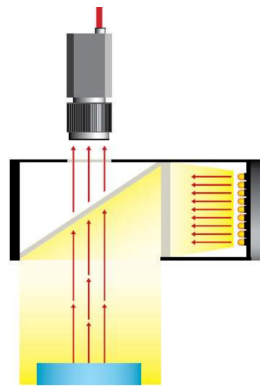


Figura 2.11. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación axial difusa. [33]

- **Iluminación frontal:** la cámara se posiciona mirando al objeto en la misma dirección de la luz (Fig. 2.12). Es un método indicado para superficies con pocos reflejos como papel y tela, pero no es adecuado para objetos sobre superficies reflectantes. Su principal ventaja es que elimina sombras y funciona cuando hay una gran distancia entre el objeto a capturar y la cámara, pero no es eficaz para superficies reflectantes. [33]

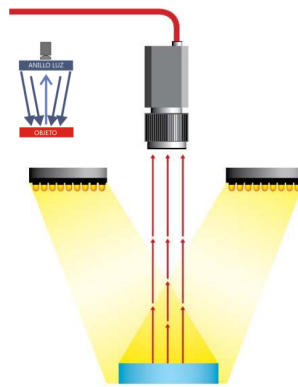


Figura 2.12. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación frontal. [33]

- **Iluminación lateral:** se posiciona la cámara mirando al objeto mientras que la dirección de la luz es lateral al objeto (Fig. 2.13). Es indicada para resaltar bordes porque crea una sombra muy definida. La desventaja es que genera una sombra para cada relieve del objeto a analizar, lo que puede producir sombras innecesarias. [33], [34]

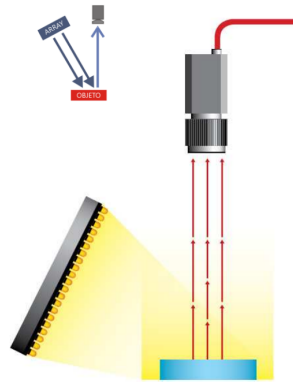


Figura 2.13. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación lateral. [33]

- **Iluminación por campo oscuro:** la luz es emitida mediante un anillo desde todas las direcciones y esta rebotará en los relieves del objeto e irán hacia la cámara (Fig. 2.14). Posee ventajas como que destaca los detalles en superficies con poco contraste y su principal desventaja es que no es recomendable para objetos que absorben mucha luz. [33]

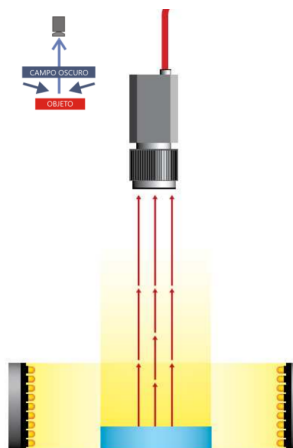


Figura 2.14. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación por campo oscuro. [33]

- **Iluminación difusa tipo domo:** es un tipo específico de iluminación difusa que utiliza una fuente de luz ubicada dentro de una estructura hemisférica o semiesférica, conocida como domo. La luz se distribuye uniformemente en todas las direcciones desde el interior del domo (Fig. 2.15), creando así una iluminación suave y uniforme en la escena. Este enfoque de iluminación es comúnmente utilizado en aplicaciones de fotografía, visión por computadora y diseño de productos para obtener imágenes con sombras suaves y sin reflejos molestos. La forma y el tamaño del domo pueden variar dependiendo de la aplicación y las necesidades específicas de iluminación. [33], [35]

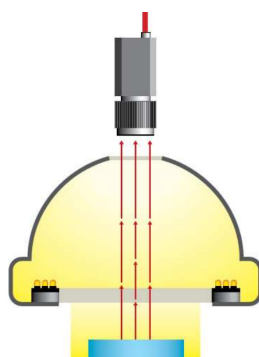


Figura 2.15. Ubicación de los elementos de la escena en una iluminación difusa tipo domo. [33]

2.6.3. Filtrado y Realzado de Imágenes

Esta etapa consiste en trabajar con la imagen recién capturada y aplicarle una serie de operaciones para mejorar su calidad o resaltar los detalles que se quieren analizar. Para realizar este trabajo, es muy importante una representación gráfica de la imagen, conocida como histograma. Este es una imagen que muestra la frecuencia con la que aparecen los distintos niveles de intensidad de los píxeles (Fig. 2.16). Resulta sumamente útil para analizar la imagen y con esto realizar ajustes de exposición, mejorar su contraste y detectar las características de una imagen. [37]

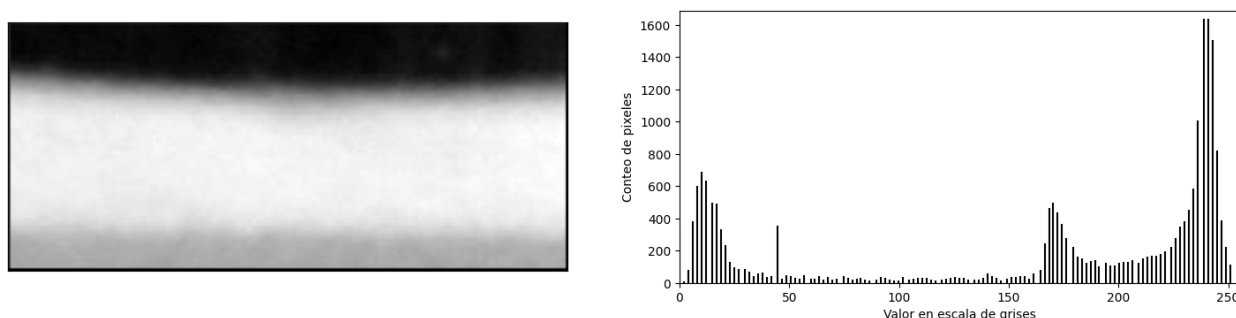


Figura 2.16. Ejemplo de un histograma de la imagen de un menisco.

El preprocesado pretende reparar en la imagen los desperfectos producidos o no eliminados por el hardware: deformación de la imagen, ruido, poco o mucho contraste o brillo, etc. En un proceso de VA, se intenta evitar el uso de estas técnicas ya que necesitan mucho tiempo de cómputo. La necesidad del empleo de varias de estas técnicas indica una incorrecta calibración, iluminación y selección de los elementos de captura de imagen no fueron seleccionados de la mejor manera. Posee dos tipos de operaciones: corrección y mejora de la imagen para etapas superiores. [30]

A continuación, se muestran las principales operaciones en esta etapa:

- **Operaciones básicas:** son operaciones que se pueden realizar píxel por píxel en una imagen. Algunas operaciones son las siguientes:

1. *Inversión:* es obtener el valor inverso de cada píxel. [30]
2. *Producto o división por una constante:* en esta operación se multiplica el valor de cada píxel por una constante. [30]
3. *Binarización:* consiste en establecer un valor y todos los píxeles menores al valor se establecen en cero y los mayores se establecen en el valor máximo, es decir, uno. [30]

- **Transformaciones geométricas de imágenes:** con estas operaciones se pueden modificar características geométricas de las imágenes. Se suelen emplear cuando hay distorsiones o se presentan imágenes deformadas, y todos estos algoritmos tienen como resultado una nueva distribución de los píxeles. Entre las principales operaciones se encuentran: [30], [38]

1. Traslación o desplazamiento.

2. Rotación o giro.
 3. Escalado.
 4. Espejo.
 5. Interpolación.
- **Algoritmos generadores de ruido:** son funciones o algoritmos que producen ruido en una imagen. Puede sonar contradictorio, ya que lo que se suele desear es eliminar este ruido. Una de sus funciones puede ser probar la respuesta de la solución ante estos ruidos. [30]
 - **Filtrado:** son algoritmos que se emplean para mitigar el ruido en la imagen. Este ruido puede presentarse debido a múltiples razones, como problemas con los sensores, ruido eléctrico, o perturbaciones en el proceso de transmisión de datos. Se dividen en dos tipos principales: [30], [39]
 1. *Filtros en el dominio espacial:* estos manipulan de forma directa la luminancia de los píxeles de la imagen. Algunos son: promediadores de área, filtro de media, filtro de mediana y filtros promediadores de líneas. [39]
 2. *Filtros en el dominio de la frecuencia:* estos modifican de forma indirecta la luminancia de los píxeles de la imagen. Entre estos filtros se encuentran la Transformada Discreta de Fourier y los filtros de Respuesta Finita al Impulso (FIR) y Respuesta de Impulso Infinita (IIR). [30]

2.6.4. Segmentación

En esta etapa se busca dividir la imagen en regiones significativas que representan características de interés. Lo que se busca es identificar y delimitar límites de los distintos componentes de la imagen, separándolos del fondo o de otros elementos que no son de interés. Es una etapa fundamental en las soluciones de visión artificial, ya que ofrece una representación más clara de los detalles con los que se quiere trabajar en una imagen, dejando el cálculo de los detalles de interés para una etapa posterior. [30], [40]

Existen una gran cantidad de técnicas según las características que se quieran destacar:

- **Segmentación basada en umbralización:** consiste en realizar un análisis del histograma y, a partir de los datos del histograma se separan los píxeles en grupos dependiendo del nivel de intensidad de los mismos. Existen diversas técnicas para seleccionar estos grupos y separarlos: [30]

1. Método P-Cuantil
 2. Umbralización basada en la búsqueda de mínimos.
 3. Umbralización basada en técnicas de reconocimiento de formas.
 4. Umbralización en estructuras de datos jerárquicas.
- **Segmentación basada en bordes:** estos algoritmos se basan en identificar los bordes o contornos en una imagen. Los bordes se suelen caracterizar por ser transiciones abruptas en la intensidad de los píxeles. Algunas técnicas son las siguientes: [30]
 1. Detección de bordes.
 2. Extracción de la frontera.
 3. Transformada de Radón.
 4. Transformada de Hough.
 - **Segmentación orientada a regiones:** los algoritmos descritos anteriormente se enfocan en encontrar los bordes presentes en la imagen, mientras que este método examina las regiones directamente según su estructura, homogeneidad u otras características. Algunas técnicas son: [30]
 1. Unión de regiones.
 2. Crecimiento por regiones por agregación de píxeles.
 3. Algoritmo de crecimiento con mezclado.
 4. Mediante extracción y análisis de texturas.
 - **Técnicas de clusterizado:** consisten en agrupar los píxeles en conjuntos llamados *clusters*. Estos grupos pueden representar áreas que comparten similitudes, como niveles de intensidad, texturas o colores. [30]

En este capítulo se detallan los procedimientos metodológicos utilizados durante la realización del proyecto. Se abordan los fundamentos teóricos de la metodología y se describe cómo se aplicaron para llevar a cabo la ejecución del proyecto. El proyecto se basará en la metodología de diseño propuesta por Karl Ulrich y Steven Eppinger, la cual establece un proceso genérico para el desarrollo de nuevos productos dividido en seis etapas: planificación, desarrollo de conceptos, diseño a nivel de sistema, diseño detallado, pruebas y refinamientos, y lanzamiento a producción. [41]

Debido a la naturaleza y alcance del presente proyecto el cual no tiene como fin desarrollar un producto para comerciar, no se va a abarcar todos los pasos antes mencionados. La Fig. 3.1 muestra la metodología de diseño seguida durante el desarrollo del proyecto, ya que el producto tiene la función de investigar una posible mejora al proceso de calibración.

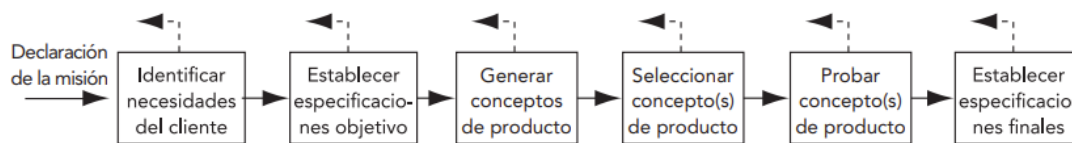


Figura 3.1. Proceso de diseño adaptado de la metodología de Ulrich-Eppinger. [41]

3.1. Identificación de las necesidades del cliente

El propósito de este paso es comprender las necesidades del cliente y transmitir las de manera efectiva para el desarrollo de la solución. El resultado de este proceso es una lista jerárquica de declaraciones cuidadosamente elaboradas que representan las necesidades del

cliente, organizadas según su importancia, la cual puede ser relevante para muchas o todas las necesidades identificadas. El proceso tiene como meta lograr los siguientes objetivos: [41]

- Garantizar que el producto esté alineado con las necesidades del cliente.
- Reconocer tanto las necesidades implícitas o no expresadas como las necesidades claramente definidas.
- Suministrar una base de datos que respalde las especificaciones del producto.
- Establecer un archivo para registrar la actividad relacionada con las necesidades durante el proceso de desarrollo.
- Garantizar la inclusión y la recopilación exhaustiva de todas las necesidades críticas del cliente.

Para la determinación de necesidades, este proyecto siguió la siguiente secuencia:

1. **Recopilación de datos sin procesar del cliente:** se realizó mediante una entrevista con el cliente para conversar sobre la problemática y sus necesidades.
2. **Interpretación de datos sin procesar en términos de necesidades del cliente:** una vez realizada la entrevista, se procesó lo dicho por el cliente en necesidades orientadas al diseño de ingeniería.
3. **Organización de las necesidades en una jerarquía:** se organizaron las necesidades en una lista que consiste en un conjunto de necesidades principales, cada una de las cuales estará compuesta por un conjunto de necesidades secundarias.
4. **Establecimiento de la importancia relativa de las necesidades:** se envió una encuesta al cliente para establecer la importancia relativa de cada necesidad. Además de solicitar que tan importante consideraba cada necesidad, se le pidió al cliente declarar si la necesidad le parecía innovadora o inesperada con el fin de identificar alguna necesidad que agregara más valor agregado a la propuesta. La escala aplicada a las necesidades se puede apreciar en la Tabla 3.1.
5. **Reflexión sobre los resultados y el proceso:** una vez establecida la importancia de cada necesidad, se analizó en detalle cada una para comprender por qué algunas necesidades tenían más o menos importancia. Por consiguiente, se comentaron los resultados con el cliente para determinar si hay necesidades que no son importantes para el proyecto o si es necesario agregar nuevas necesidades.

Tabla 3.1. Escala de importancia utilizada para caracterizar las necesidades.

Descripción	Escala
La característica es indeseable. No consideraría un producto con esta característica.	1
La característica no es importante, pero no me importaría tenerla.	2
Sería bueno tener esta característica, pero no es necesaria.	3
La característica es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.	4
La característica es de importancia crítica. No consideraría un producto sin ella.	5

3.2. Establecer especificaciones objetivo

En este punto del proyecto, se ha obtenido un entendimiento general de las necesidades del cliente. Sin embargo, con el fin de evitar interpretaciones subjetivas de los objetivos del proyecto, es fundamental desarrollar un conjunto de especificaciones detalladas que definan claramente las funcionalidades y objetivos finales del sistema de enjambres. Estas especificaciones deben ser específicas, claras y medibles, garantizando así que se cumplan los requisitos del proyecto de manera precisa y efectiva [41]. El proceso de establecer las especificaciones objetivo consiste en cuatro pasos:

1. **Elaborar la lista de métricas:** las métricas más valiosas son aquellas que capturan de manera directa el nivel de satisfacción del producto respecto a las necesidades del cliente. La correlación entre las necesidades y las métricas es fundamental para el concepto de especificaciones. Se parte de la premisa de que es factible traducir las necesidades del cliente en un conjunto de especificaciones concretas y medibles. Cumplir con estas especificaciones se considera esencial para lograr la satisfacción del cliente.
2. **Fijar objetivos ideales y mínimamente aceptables:** en este paso, se reunió y condensó la información disponible y una investigación bibliográfica para establecer los valores objetivo de cada métrica. Se utilizan dos tipos de valores objetivo: el valor ideal y el valor marginalmente aceptable. El valor ideal representa el mejor resultado al que se aspira alcanzar. Por otro lado, el valor marginalmente aceptable indica el mínimo necesario para que el diseño sea viable o aceptado. Estos dos objetivos orientan las etapas posteriores de generación y selección de conceptos, así como el posterior refinamiento de las especificaciones una vez que se ha elegido el concepto del producto.
3. **Reflexionar en los resultados y el proceso.**

3.3. Generar conceptos del producto

Un concepto consiste en una descripción aproximada y simplificada de la tecnología, el principio de funcionamiento y forma en la cual se puede solucionar el problema. El concepto, por lo general, es expresado como un bosquejo o alguna técnica sencilla, y muchas veces es acompañado por una breve descripción. En la Fig. 3.2, se aprecia un método secuencial, el cual fue el empleado durante el proyecto. Este método divide la generación de concepto en cinco pasos.

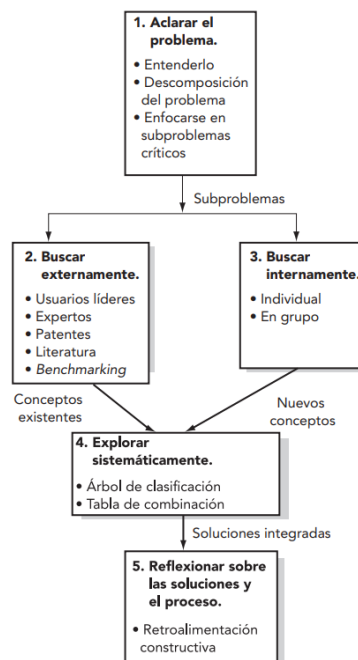


Figura 3.2. Método de generación de conceptos de cinco pasos. [41]

■ Paso 1: Aclarar el problema

Este paso consiste en generar un entendimiento general del problema y, si es necesario, descomponerlo en más pequeños para tener problemas más sencillos. En la Fig. 3.3, se muestran los dos subsistemas donde la Plataforma Mecánica corresponde a la parte física del proyecto, siendo esta la plataforma para acomodar los sensores y los actuadores. Recibe como entradas la energía, la cámara y la señal de control para los motores. Sus salidas son la cámara sujeta y estable y los datos de los sensores, como las imágenes capturadas.

El subsistema de Módulo de Control consiste en toda la lógica y el código necesarios para controlar los actuadores y procesar la imagen para identificar el menisco. Recibe como

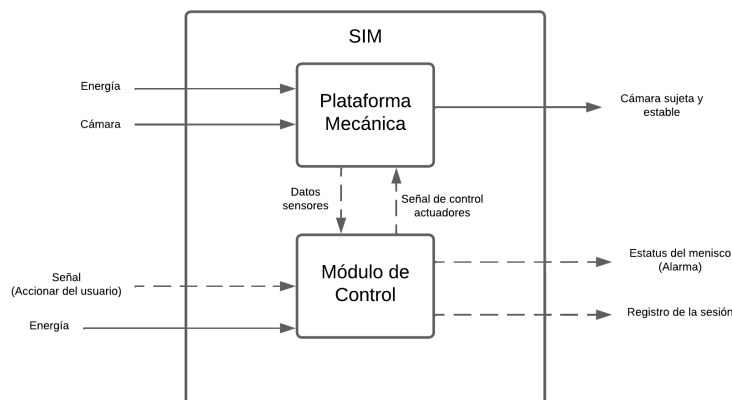


Figura 3.3. Diagrama de bloques de los subsistemas del proyecto.

entradas energía, señales del usuario y datos de la cámara, y su salida es el estatus del menisco y el registro de la sesión. En la Fig. 3.4, se puede apreciar la descomposición de cada uno de los dos subsistemas. Con la Fig. 3.4a, se puede apreciar que el modulo de control lo que realiza es capturar la imagen y procesarla, para después identificar la línea de aforo, seguidamente controla la posición de la cámara para llegar a determinar la condición del menisco. Con respecto a la Plataforma Mecánica en la Fig. 3.4b, lo que realiza es acondicionar la cámara para que sea más sencilla de emplear.

■ Paso 2 y 3: Buscar Externamente e Internamente

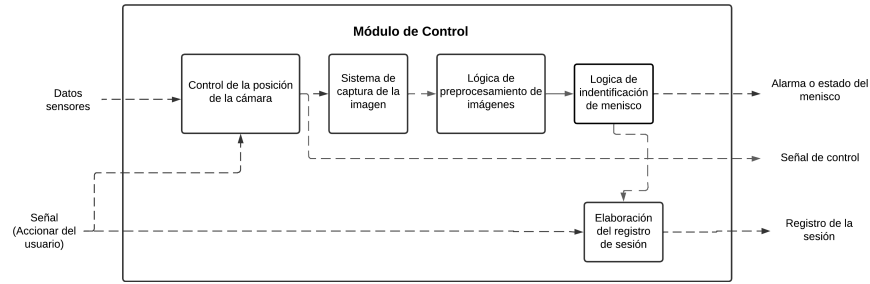
Este paso consiste en investigar, recabar y hallar posibles soluciones existentes al problema general y a los subproblemas. Mientras tanto la búsqueda interna hizo uso del conocimiento personal para general ideas mediante una lluvia de ideas [41]. En el Apéndice B.3.2, se puede leer en detalle lo identificado durante la búsqueda externa y externa.

■ Paso 4: Explorar sistemáticamente

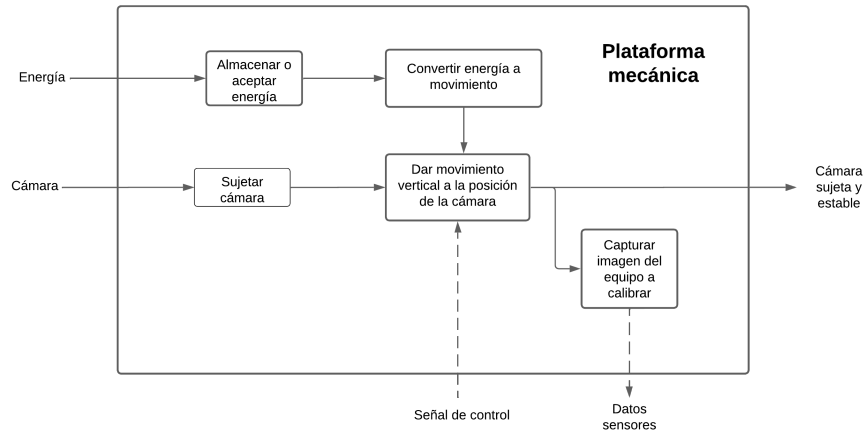
Una vez realizada una búsqueda externa e interna exhaustiva, se tuvieron muchas opciones para solucionar cada subproblema, conocidos como *fragmentos de conceptos*. La exploración sistemática consiste en combinar todos los *fragmentos* para generar conceptos que solucionen el problema general [41]. En el Apéndice B.3.3, se detalla la generación de todas las combinaciones de conceptos.

■ Paso 5: Reflexionar sobre las soluciones y el proceso

En este paso, se analiza todo el proceso de generación de conceptos para ver si hay algún aspecto a mejorar o un detalle no se investigó de la mejor manera.



(a) Módulo de Control



(b) Plataforma Mecánica

Figura 3.4. Descomposición funcional de los dos subsistemas de la solución.

3.4. Seleccionar un concepto del producto

Una vez que se generaron todos los conceptos, es necesario determinar la mejor combinación posible entre todas las alternativas anteriormente presentadas. Este proceso se divide en dos etapas principales: el *filtrado de conceptos* y la *evaluación de conceptos*. [41]

3.4.1. Filtrado de conceptos

Este paso se basa en un método desarrollado por Stuart Pugh, que consiste en utilizar una matriz de selección de conceptos. Su finalidad es reducir rápidamente el número de conceptos y mejorarlos. Todos los conceptos son comparados contra uno de referencia. Esta selección utiliza el concepto base y lo compara con las demás soluciones propuestas. La Tabla 3.2 muestra la evaluación utilizada para esta matriz.

Tabla 3.2. Evaluación relativa utilizada en la matriz de filtrado de conceptos. [41]

Descripción	Símbolo
Mejor que	-
Igual que	0
Peor que	+

El objetivo de esta matriz es determinar qué conceptos continuarán el proceso, cuáles necesitan revisión y cuáles se pueden combinar y descartar por no ser factibles.

3.4.2. Evaluación de conceptos

Este funciona como el segundo filtro, funciona de una manera similar al anterior pero con una mayor resolución (Tabla 3.3). Además, ahora cada uno de los criterios de selección ahora se les asigna un peso relativo que fue discutido y definido en una conversación con el cliente.

Tabla 3.3. Escala empleada en la evaluación de concepto.

Calificación	Descripción
5	Mucho peor que la referencia
4	Peor que la referencia
3	Igual que la referencia
2	Mejor que la referencia
1	Mucho mejor que la referencia

Este proceso es crucial para seleccionar el concepto óptimo que mejor satisfaga las necesidades del proyecto. Más detalles sobre este paso se encuentran detallados en la Sección 5.1.

3.5. Desarrollo y construcción de un prototipo

Una vez seleccionado el concepto a desarrollar, se procede a la construcción de un prototipo para realizar pruebas. Se utilizó software CAD para el diseño y dimensionado de los componentes mecánicos, lo cual permitió verificar su interacción con los actuadores y otros elementos eléctricos. Simultáneamente, se desarrolló el código para el procesamiento de imágenes y el control de actuadores.

Una vez construido el prototipo, se integraron la Plataforma Mecánica y el Módulo de Control para llevar a cabo pruebas de funcionamiento. Durante esta etapa se realizaron ajustes, se corrigieron errores y se avanzó hacia la validación del sistema.

3.6. Probar concepto de la solución

En esta etapa se toma el prototipo del concepto seleccionado y se le realizan las pruebas necesarias para establecer el grado de cumplimiento de las necesidades, las pruebas a realizar van a definirse en función de las métricas a medir. En el Secciones 5.2 y 5.3 se documentan las pruebas de simulación y de concepto. Mientras que en el Capítulo 6 se muestra la puesta en practica del prototipo del concepto final en pruebas de calibración para ser comparado con el proceso actual.

3.7. Establecer especificaciones finales

Una vez implementada la solución se vuelven a revisar las especificaciones definidas al principio del proceso, esto con el objetivo de determinar si la solución cumple con las necesidades del cliente y en caso de tener especificaciones inferiores de lo esperado se debe realizar un análisis de las restricciones del concepto, limitaciones encontradas como el costo económico y el desempeño y consideraciones que se realizaron durante la implementación.

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de estudiar el procedimiento actual de ajuste de menisco ejecutado por el LCM con el objetivo de identificar las necesidades identificadas que necesitan ser cubiertas por la solución propuesta.

4.1. Estado de arte del proceso

4.1.1. Equipo disponible

En la siguiente sección se realizará una breve descripción del equipo que emplea el equipo de laboratorio para la corrección del menisco.

Cámara y monitor

Para ayudar con la visualización del menisco el ejecutor emplea una cámara de 48 Mega Píxeles (MP) y transmite a un monitor la imagen del menisco. Este sistema solo tiene la función de proyectar la imagen agrandada de la zona del menisco para que el usuario pueda identificar con mayor facilidad cuando este está en la posición correcta. La cámara tiene las siguientes características: [42]

- Sensor de 40 MP y formato $\frac{1}{2,3}$ pulgadas.
- Píxel efectivo: 16 MP.
- Tamaño del píxel: (1,43 x 1,43) μm .
- Conexión a PC mediante USB con una resolución de 2 MP (1920x1080).

Con respecto al monitor es uno de 23 pulgadas de 1920x1080p para visualizar lo grabado por la cámara. Cabe recalcar que este equipo solo permite al usuario amplificar sus capacidades naturales de visualización (Fig. 4.1), como podría ser el empleo de una lupa, y no contribuye directamente a la corrección del menisco. Por lo tanto, la decisión sobre si el menisco se encuentra en la posición correcta sigue dependiendo del operador.

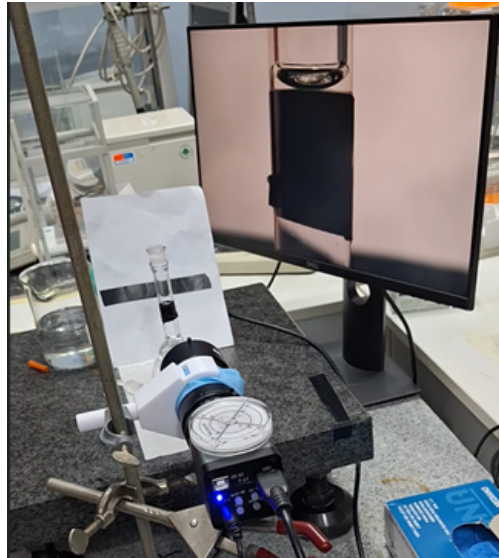


Figura 4.1. Menisco captado por la cámara proyectado en un monitor.

Sistema de sujeción de la cámara

Como se observa en la Fig. 4.1, para colocar la cámara en el espacio de trabajo y ajustarla a la posición donde se encuentra la línea de ajuste del equipo analizado se utiliza un soporte de buretas Fig. 4.2a con un “brazo” impreso en 3D Fig. 4.2b para sostenerlo desde la lente y así mantenerlo en una posición estable.



(a) Sistema completo de sujeción de la cámara.



(b) Brazo de sujeción actual de la cámara impreso en 3D.

Figura 4.2. Sistema de sujeción para la cámara actual del laboratorio.

Este equipo cumple con su función principal de permitir el control de la altura sobre la mesa de trabajo donde se encuentra la cámara. Sin embargo, su eficiencia se ve comprometida debido a que cada ajuste de la cámara requiere liberar la presión de la sujeción, lo que puede desalinearse la cámara y requerir un nuevo ajuste utilizando un nivel para asegurar que la cámara permanezca paralela a la mesa y evitar errores de paralaje. La dificultad de este proceso de alineación puede variar significativamente, resultando a veces en ajustes rápidos y otros en ajustes más complicados que no garantizan una posición satisfactoria.

Además, otro problema de este sistema es que el soporte de buretas no está fijado a la mesa de trabajo, lo que puede provocar movimientos accidentales de la cámara y desenfoques en la imagen del menisco. Esto obliga al usuario a reajustar el enfoque, lo que podría afectar la integridad de la muestra y alterar los resultados del análisis. También se observa el uso de un guante azul alrededor de la lente en el área de sujeción, utilizado para ajustar la holgura que puede afectar la estabilidad de la cámara. En resumen, este equipo no está diseñado específicamente para la función que realiza en el laboratorio actualmente, siendo uno de los aspectos críticos a abordar en el proyecto actual.

Balanza

Para hacer las mediciones de masa durante el proceso se hace empleo de la balanza de masas mostrada en la Fig. 4.3, tiene una incertidumbre de ± 0.0001 g.

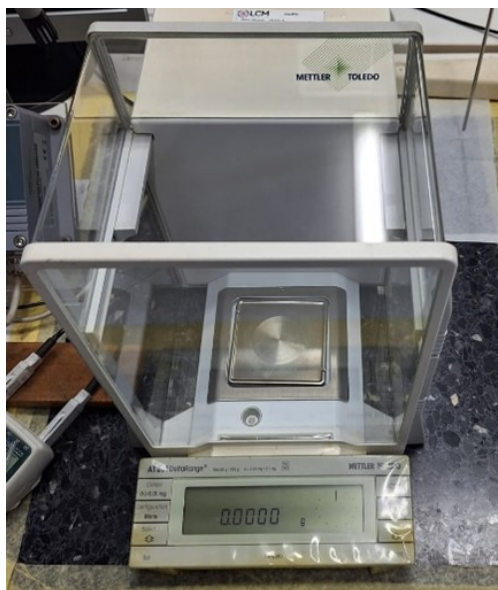


Figura 4.3. Balanza empleada para la medición de la masa en seco y con líquido del equipo a calibrar.

Termómetro para el líquido contenido

Para hacer la medición de la temperatura del líquido vertido en los equipos se hace por medio del termómetro de la Fig. 4.4, posee una incertidumbre de ± 0.01 °C.

Mesa de planitud

En las pruebas de ajuste de menisco es fundamental que el equipo a calibrar se encuentre en una superficie plana para que el menisco pueda ser observado sin ninguna deformación, como lo descrito en el Paso 7 del proceso descrito en la sección 2.2.4. Por lo que se hace el uso de mesas de planitud de la Fig. 4.5 para asegurar dicha característica. La mesa de planitud superior, más pequeña, tiene una medidas de (40 x 40) cm. Mientras tanto la inferior, más grande, tiene unas dimensiones de (62 x 91) cm.



(a) Terminal del termómetro que es ingresado al matraz aforado para medir su temperatura.



(b) Interfaz de control del termómetro.

Figura 4.4. Termómetro empleado en las pruebas de calibración.



Figura 4.5. Mesas de planitud empleadas para la calibración de cristalería de laboratorio.

Lupas

Se utilizan lupas simples para examinar con mayor detalle la posición del menisco.



Figura 4.6. Lupas utilizadas para la visualización del menisco.

4.1.2. Descripción del proceso observado

En la siguiente sección se documenta el proceso que se realiza actualmente en el LCM para hacer el ajuste de menisco en pruebas de cristalería para laboratorio. Dicho proceso es el que se realiza para la calibración de contenedores volumétricos de guardado y vertido de equipos de laboratorio.

1. Antes de llenar el recipiente con líquido se inicia colocando una cinta de color negro por debajo de la línea de ajuste del equipo y en toda su circunferencia como se puede apreciar en la Fig. 4.7, esta cinta tiene la función de que cuando el menisco se acerque a la misma este refleje el color y así se pueda apreciar mejor su forma y posición Fig. 4.8a.

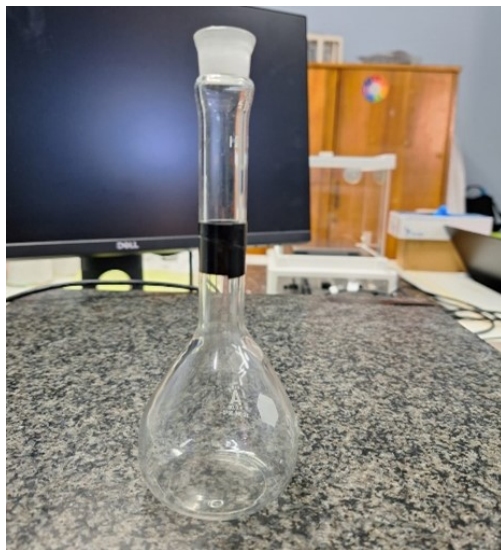
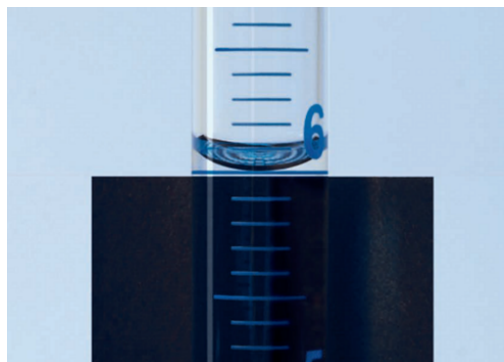


Figura 4.7. Imagen de un matraz con la cinta negra.

2. Se mide la masa de del equipo con la cinta con la ayuda de una balanza de la Fig. 4.3.
3. Una vez conocida la masa del instrumento sin líquido se le vierte agua hasta llegar a un punto cercano con la línea de ajuste a simple vista y se coloca sobre una mesa de plenitud Fig. 4.9 para asegurar la estabilidad del menisco.



(a) Con cinta.



(b) Sin cinta.

Figura 4.8. Visualización del menisco al emplear y no emplear un cinta negra por debajo de la línea de aforo. [16]



Figura 4.9. Cristalería a calibrar sobre la mesa de plenitud.

4. El ejecutante del proceso acomoda la cámara dependiendo del tamaño del recipiente y realiza el ajuste del “zoom” de forma manual. Este paso se realiza para usar la imagen como ayuda para apoyar las capacidades de visión humana y poder visualizar de una mejor manera el menisco.
5. Se ajusta el menisco con la ayuda de la jeringa para insulina (Fig. 4.10) hasta el punto donde el punto más bajo quede al mismo nivel de la línea de ajuste. Nota: se puede hacer uso de una hoja en blanco por detrás de la cristalería para ayudar con el contraste del menisco (Fig. 4.1).



Figura 4.10. Jeringa de Insulina empleada para el ajuste del menisco.

6. Se vuelve a pesar el equipo de laboratorio con el líquido para detectar la diferencia de masa.
7. Se mide la temperatura del líquido con la ayuda de un termómetro (Fig. 4.4).
8. Se le agrega agua para desajustar el menisco y se repite desde el punto 3 por 5 repeticiones.

4.2. Identificación de variables por medir y controlar

Tras un análisis detallado del equipo y del proceso de corrección de menisco, así como de sus ventajas y desventajas durante la calibración, se determinó la necesidad de obtener información precisa sobre las dimensiones de las mesas de calibración y las características específicas de los matraces aforados utilizados en el laboratorio. Por lo tanto, la primera acción fue realizar una visita al laboratorio para medir el volumen de los matraces aforados pertinentes para este proyecto, que son matraces de 100 mL.

En cuanto a las variables que deben ser medidas, se observa que el proceso actual cuenta con equipos adecuados para medir la temperatura, la presión y la masa del matraz aforado con y sin líquido. Sin embargo, la determinación de la proximidad del menisco a la línea de aforo sigue dependiendo principalmente de las capacidades visuales del ejecutante del proceso de calibración. A pesar de contar con herramientas como lupas y cámaras, aún se requiere una manera de medir de manera precisa esta distancia para informar al usuario cuando el menisco esté suficientemente cerca, por encima o por debajo de la línea de aforo deseada.

4.3. Identificación de necesidades y definición de especificaciones objetivo

A partir de las visitas al laboratorio y realizar las reuniones con el equipo del laboratorio se realizó la definición de las necesidades del sistema las cuales se pueden apreciar en la Tabla 4.2 y en la Fig. 4.11 se puede apreciar la relación entre las necesidades y las métricas. El detalle de las entrevistas y el procesamiento de las necesidades hasta llegar a las finales se puede apreciar en el Apéndice B.

Después de completar con éxito la identificación y compilación de las necesidades conforme a las etapas del proceso de diseño de ingeniería, el siguiente paso crucial implica establecer

Capítulo 4. Diagnóstico

las especificaciones objetivo. Este aspecto resultará fundamental en fases posteriores, ya que servirá como referencia para validar las decisiones de diseño y para el proceso de validación del prototipo funcional.

La revisión de la lista de necesidades se llevó a cabo en colaboración del ejecutante del proceso de calibración. El siguiente paso fue definir una serie de métricas directamente relacionadas con la mayoría de las necesidades identificadas y asignarles valores objetivos correspondientes. Estas métricas fueron establecidas considerando las características del proceso actual en el laboratorio, con el fin de alinearse lo más posible con el procedimiento existente y satisfacer las expectativas del personal involucrado.

Después de determinar las métricas se definieron las especificaciones objetivo que necesitan cumplir el prototipo para validar el concepto ganador, estas se puede apreciar en la Tabla 4.1, el detalle de cada valor se puede apreciar en el Apéndice B.2.2 . Una vez realizado este análisis y definición de las necesidades y métricas se puede proseguir con el Desarrollo de la solución.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Métricas														
Necesidades		Costo del SIM.	Uso de componentes del LCM.	Dimensiones de la estructura mecánica del SIM.	Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.	Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.	Corrección en la identificación del Volumen.	Versatilidad de Visualización de E equipos.	El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.	Rango de posiciones verticales del SIM.	Evaluación de la Amigabilidad de la Interfaz de Usuario.	Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM.	Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.	Facilidad de Desarme y Almacenamiento.	Tiempo de Desarme y Almacenamiento.	Uso de la cámara actual.
1	El SIM es implementado con el mínimo uso de recursos económicos.	■														
2	El SIM habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.		■													
3	La estructura del SIM se puede colocar sobre la mesa de planitud.			■												
4	Los valores registrados por el SIM se guardan en un registro y se documentan.				■											
5	El SIM es capaz de identificar el menisco cuando se encuentra cerca de la línea de afiro con distintos grados de tolerancia para matraces a brados de 100 ml.					■										
6	El valor medido en matraces a brados de 100 ml por el SIM es estable.						■									
7	El SIM permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.							■								
8	El SIM puede controlar la posición vertical del sensor en un modo manual para la visualización de los distintos equipos.								■							
9	La interfaz de control del SIM es amigable para el usuario.									■						
10	La estructura del SIM mantiene el ángulo del sensor estable para evitar el error de paralele.										■					
11	La estructura del SIM garantiza la integridad del equipo y la estabilidad de este durante su empleo.											■				
12	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.												■			
13	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se empleado de forma rápida.													■		
14	El SIM hace uso de la cámara actual del laboratorio.														■	

Figura 4.11. Matriz de relación entre la necesidad y su métrica.

Tabla 4.1. Especificaciones objetivo que tiene que cumplir la solución.

Número de métrica	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unidad	V. Marginal	V. Ideal
1	1	Costo del SIM.	4	€	< 300 000	<100 000
2	2	Uso de componentes del LCM.	4	%	≥50 %	≥70 %
3	3	Dimensiones de la estructura mecánica del SIM.	4	cm	< 60x60 cm	< 40x40cm
4	4	Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.	2	Evaluación	≥6	≥8
5	5	Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.	4	Lista	2	4
6	6	Corrección en la Identificación del Volumen.	5	%	≤0.2 %	≤0.1 %
7	7	Versatilidad de Visualización de Equipos.	3	Lista	1	3
8	8	El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.	4	Binario	Sí	Sí
9	8	Rango de posiciones verticales del SIM.	4	cm	≥25	≥35
10	9	Evaluación de la Amigabilidad de la Interfaz de Usuario.	4	Subjetivo	≥6	≥8
11	10	Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM.	5	°	<1.3	<1
12	11	Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.	5	Adimensional	≥2	≥2.5
13	12	Facilidad de Desarme y Almacenamiento.	4	Subjetivo	≥3	≥4
14	13	Tiempo de Desarme y Almacenamiento.	2	Minutos	≤10	≤5
15	14	Uso de la cámara actual.	4	Binario	Sí	Sí

Tabla 4.2. Necesidades finales para el Sistema Identificador de Menisco con las cuales se trabajará en el proyecto.

Numero de necesidad	Necesidad	Importancia
1	El SIM es implementado con el mínimo uso de recursos económicos.	4
2	El SIM habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.	4
3	La estructura del SIM se puede colocar sobre la mesa de planitud.	4
4	Los valores registrados por el SIM se guardan en un registro y se documentan.	2
5	El SIM es capaz de identificar el menisco cuando se encuentra cerca de la línea de aforo con distintos grados de tolerancia para matraces aforados de 100 ml.	4
6	El valor medido en matraces aforados de 100 ml por el SIM es estable.	5
7	El SIM permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.	3
8	El SIM puede controlar la posición vertical del sensor en un modo manual (para la visualización de los distintos equipos).	4
9	La interfaz de control del SIM es amigable para el usuario.	4
10	La estructura del SIM mantiene el ángulo del sensor estable para evitar el error de paralaje.	5
11	La estructura del SIM garantiza la integridad del equipo y la estabilidad de este durante su empleo.	5
12	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.	4
13	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se empleado de forma rápida.	2
14	El SIM hace uso de la cámara actual del laboratorio.	4

Desarrollo de la solución

En este capítulo se documenta la quinta etapa de la metodología descrita en la sección 3.5. En este se mostrarán todos los aspectos técnicos, logísticos y espaciales acerca de la toma de decisiones y el proceso que se llevo a cabo para el desarrollo de un prototipo del concepto ganador.

5.1. Selección de Concepto

En esta sección se documentará el proceso descrito en la sección 3.4 a partir de los conceptos generados y mostrados en el Apéndice B.3.3. Se mostrará todo el proceso que se realizó hasta llegar al concepto al cual se le creará un prototipo para hacer la validación.

5.1.1. Filtrado de conceptos

Esta es la etapa inicial hace uso de una matriz de selección de conceptos (Fig. 5.1). Antes de analizar las evaluaciones realizadas en esta matriz es importante justificar los criterios de selección.

- **Costo de implementación:** este criterio de selección surge a partir de las métricas 1 y 2 mostradas en la Tabla 4.1.
- **Curva de aprendizaje:** este es un criterio que engloba la curva de aprendizaje que se necesita para realizar su desarrollo y la que necesitará el usuario.
- **Facilidad de manufactura:** surge a partir de las métrica 1, 13 y 14 mostradas en la Tabla 4.1. Además tiene en cuenta la complejidad de las tecnologías para una posterior

manufactura del prototipo.

- **Facilidad de mantenimiento:** surge a partir de las métrica 3, 10 y 12 mostradas en la Tabla 4.1.
- **Simplicidad de instalación y desinstalación del sistema para su uso:** surge a partir de las métrica 3, 7, 13, 14 mostradas en la Tabla 4.1.
- **Rango de posiciones verticales:** surge a partir de la métrica 3, 7 y 8 mostradas en la Tabla 4.1.
- **Resolución y precisión del movimiento vertical:** surge a partir de la Métrica 8 mostradas en la Tabla 4.1.
- **Firmeza en el ángulo del sensor de visualización:** surge a partir de la Métrica 11 y 12 mostradas en la Tabla 4.1.

Para esta comparación relativa es necesario seleccionar un Concepto de Referencia para tener un punto en común para comparar todos los demás conceptos. El mejor candidato es el Concepto B (Fig. B.14) el cual es una combinación de tecnologías equilibradas. Después de establecer el concepto de referencia se realizó junto al equipo del LCM con el que se trabajó se establecieron por cada uno de los conceptos la evaluación relativa, según la Tabla 3.2, de cada uno.

Al analizar los resultados de la Tabla (5.1) se pueden apreciar a cinco conceptos con una evaluación neta positiva con los que se puede seguir trabajando. El Concepto B pasa de forma directa ya que es la referencia, el Concepto C pasa de forma inmediata ya que los aspectos que se encuentran por debajo de la referencia no poseen un gran peso en la importancia de sus necesidades respectivas, esto se apreciará mejor en la siguiente etapa.

Tabla 5.1. Matriz de filtrado de conceptos.

Criterio de selección	Conceptos								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Costo de la implementación	-	0	-	-	-	-	-	-	-
Curva de aprendizaje	-	0	-	-	0	0	-	-	-
Facilidad de manufactura	0	0	+	+	+	+	0	+	-
Facilidad de mantenimiento	0	0	+	+	+	+	-	0	-
Simplicidad de instalación y desinstalación del sistema para su uso.	-	0	-	+	0	-	-	0	0
Rango de posiciones verticales	0	0	0	0	-	0	0	0	0
Resolución y precisión del movimiento vertical	0	0	+	+	+	+	0	+	+
Firmeza en el ángulo del sensor de visualización	-	0	+	-	0	-	0	+	0
Suma +	0	0	4	4	3	3	0	3	1
Suma 0	4	8	1	1	3	2	4	3	3
Suma -	4	0	3	3	2	3	4	2	4
Evaluación neta	-4	0	1	1	1	0	-4	1	-3
Lugar	5	2	1	1	1	2	5	1	4
¿Continuar?		Si	Si	Combinar	Combinar			Revisar	

Con respecto a los Conceptos D y E se tomó la decisión de analizarlos y ver las desventajas y ventajas ya que poseen puntos fuertes y débiles diferentes que son importantes en el presente proyecto. En la Tabla 5.2 se pueden analizar los distintos segmentos de cada uno de los conceptos y la combinación resultante. Los segmentos que ambos conceptos eran igual se mantuvieron, se seleccionó la base simple por encima de la abrazadera tipo soporte de teléfono ya que la primera ofrece una posición más única lo que puede evitar desajustes al momento de acomodar la cámara. La selección del motor síncrono por encima del servomotor se debe a que este último no permite un gran rango de movimiento lo cual es esencial para el presente proyecto. Por último, la selección de Skimage y el microcontrolador se debe a el alto impacto en el costo final de la solución que tienen sobre sus competidores.

Tabla 5.2. Tabla de combinación de los conceptos D y E para generar el concepto DE.

Segmento de concepto	Concepto D	Concepto E	Concepto DE
Convertir energía en movimiento rotacional	Motor síncrono	Servomotor	Motor síncrono
Sujetar la cámara	Abrazadera tipo soporte de teléfono	Base simple	Base Simple
Dar movimiento vertical a la cámara	Tornillo de avance/bolas	Tornillo de avance/bolas	Tornillo de avance/bolas
Plataforma de procesamiento de imágenes	Labview	Skimage	Skimage
Equipo de control de dispositivos	Microcontrolador	Microprocesador	Microcontrolador

Al Concepto H se decidió dar una revisión ya que los dos segmentos en los cuales son inferior a la referencia son el costo y la curva de aprendizaje, con respecto al primero podemos notar que a actualmente emplea los segmentos que corresponde a la combinación de la biblioteca de visión de LabVIEW y un microcontrolador, por consiguiente, este aspecto es el que se necesita corregir. Se seleccionó el uso de OpenCV que es una biblioteca para el procesamiento de imágenes gratuita. Se mantuvo el uso de un microcontrolador (Fig. 5.1) ya que el laboratorio posee uno lo que deja libertad el poder dedicar el resto del presupuesto a otros componentes y de esta forma se generó un nuevo concepto denominado Concepto J.

Una vez identificados todos los conceptos se prosiguió con la matriz de evaluación de conceptos.

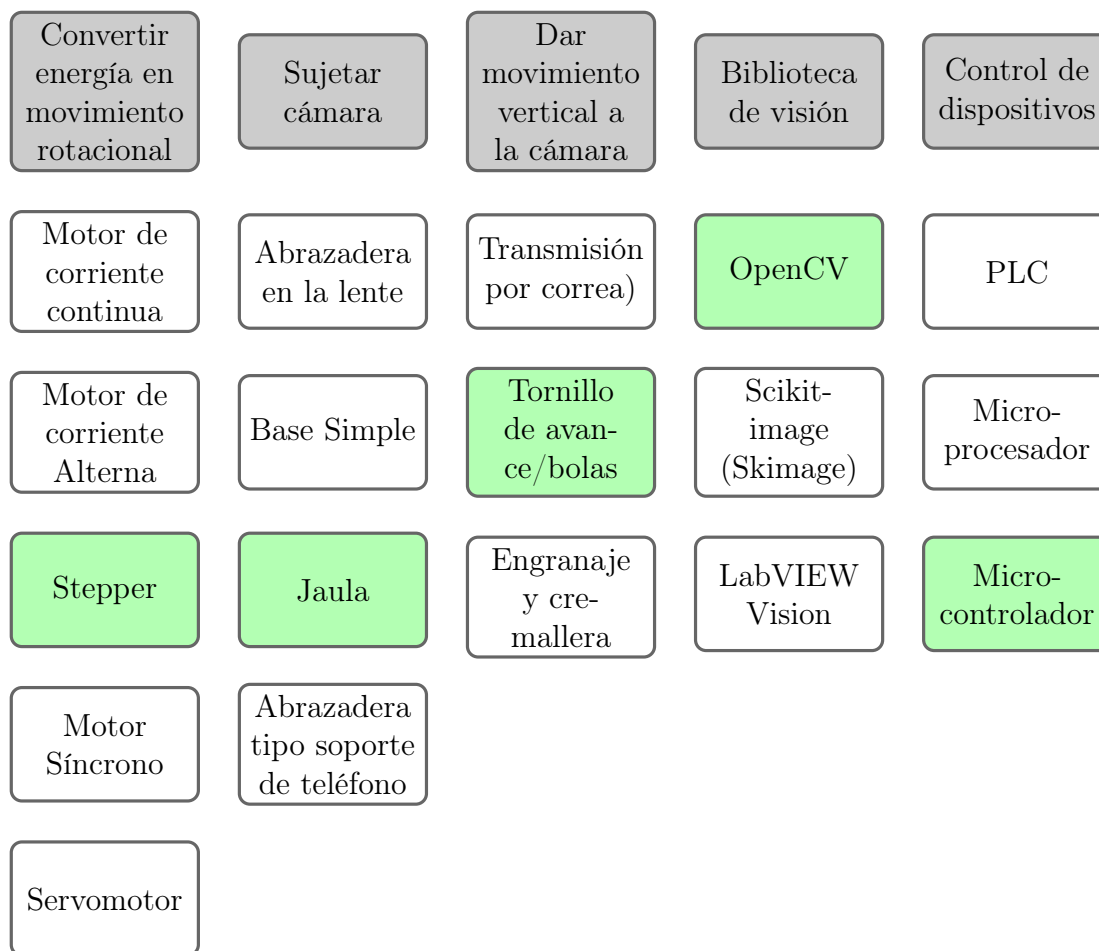


Figura 5.1. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto J.

5.1.2. Evaluación de conceptos

Una vez con los conceptos finales combinados y revisados se prosiguió a comparar estos en la Matriz de Evaluación de Conceptos en la cual se volvieron a comparar los conceptos más refinados, en esta etapa se ponderó la importancia relativa de los criterios de selección, esto se puede apreciar en la columna de *Peso %* de las Tablas 5.3 y 5.4, y se enfocó en comparaciones más refinadas de cada concepto. Este peso relativo se estableció en conjunto con el cliente y la importancia de las necesidades de las cuales se originaron. La escala de comparación entre los distintos conceptos se puede apreciar en la Tabla 3.3 recomendada por la metodología que se ha empleado en todo el proceso la cual es la de Ulrich-Eppinger.

Una vez establecido la escala de evaluación y los conceptos para comparar se establecieron los valores referencia, estos valores son los que se encuentran en negrita de la Tabla 5.3. Cabe

recalcar que a pesar de que el Concepto B fue la referencia en la etapa anterior en esta etapa no lo es, esto se debe a que el Concepto B no es un promedio de todos lo demás, por ende, en los valores de criterio que no se consideraron la media fueron seleccionados de otros conceptos.

Ahora se documentará las razones de los valores seleccionados en cada criterio de evaluación para cada uno de los conceptos:

Concepto C

Este tiene un valor de 1 en el Costo de implementación principalmente por el Microprocesador ya que la compra de este más todos los periféricos necesarios para adaptarlo a las necesidades del proyecto realzarían el coste de la solución. El valor asignado a la curva de dificultad corresponde a la necesidad de aprender sobre como emplear el Microprocesador. La facilidad de manufactura y el criterio relacionado al mantenimiento se deben al uso de un tornillo de avance en contraposición de las poleas y correas. El valor de 2 en la simplicidad de instalación se da porque se usa una jaula en vez de la base simple y esto puede llegar a dificultar la colocación de la cámara en el sistema al momento de emplearlo. La resolución de la posición vertical es la que se seleccionó como referencia la cual es la lograda por los distintos tornillos de avance. Finalmente, la firmeza en el ángulo de la cámara es el más alto posible ya que la jaula ofrece la mejor opción para este segmento de concepto.

Concepto DE

La disminución en su evaluación del costo se debe a la necesidad de la adquisición se un motor síncrono. La facilidad de manufactura se debe a la misma razón que el Concepto C. Un aspecto importante es el mantenimiento que se mantiene con una evaluación 3 debido al motor, ya que estos necesitan un especial cuidado. La facilidad de instalación, firmeza del ángulo de la cámara y rango de posiciones verticales se mantiene igual debido a la similitud con el concepto de referencia.

Tabla 5.3. Matriz de evaluación de conceptos.

Criterios de selección	Peso %	Concepto			
		B		C	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo de la implementación	15	3	0,45	1	0,15
Curva de aprendizaje de software	5	3	0,15	2	0,10
Facilidad de manufactura	10	3	0,30	4	0,40
Cantidad/Facilidad de mantenimiento	5	3	0,15	4	0,20
Simplicidad de instalación y desinstalación del sistema para una calibración	10	3	0,30	2	0,20
Rango de posiciones verticales	15	3	0,45	3	0,45
Resolución y precisión del movimiento vertical	20	2	0,40	3	0,60
Firmeza en el ángulo del sensor de visualización	20	3	0,60	5	1
	100				
	Total puntos		2,80		3,10
	Lugar		4		2
¿Continuar?					

Concepto J

Este tiene un valor muy alto con respecto al coste de la evaluación debido a que la gran mayoría de componentes cables se pueden adquirir a un precio bajo o ya se cuenta con estos en el laboratorio, tales como: el microcontrolador, los motores a pasos, el tornillo de avance y los componentes del módulo de control. Razones similares a los valores asignados a la facilidad de manufactura y mantenimiento. El valor asignado a la facilidad de instalación del equipo y a la firmeza en el ángulo del sensor de visualización es por las mismas razones antes mencionadas en el Concepto C.

Tabla 5.4. Matriz de evaluación de conceptos (Continuación).

		Concepto			
		DE		J	
Criterios de selección	Peso %	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo de la implementación	15	2	0,30	5	0,75
Curva de aprendizaje de software	5	3	0,15	3	0,15
Facilidad de manufactura	10	4	0,40	4	0,40
Cantidad/Facilidad de mantenimiento	5	3	0,15	4	0,20
Simplicidad de instalación y desinstalación del sistema para una calibración	10	3	0,30	2	0,20
Rango de posiciones verticales	15	3	0,45	3	0,45
Resolución y precisión del movimiento vertical	20	3	0,60	3	0,60
Firmeza en el ángulo del sensor de visualización	20	3	0,60	5	1
	100				
	Total puntos		2,95		3,75
	Lugar		3		1
¿Continuar?				Desarrollar	

A partir del proceso mostrado anteriormente se toma la conclusión de desarrollar el concepto de solución: **Concepto J**.

5.2. Desarrollo de la Plataforma Mecánica

En esta sección se describe el proceso de diseño de la Plataforma Mecánica mostrado en la Fig. 3.4b. En esta se denotan las siguientes partes necesarias en la estructura:

1. **Sistema de movimiento vertical:** es la parte de la estructura que convierte el movimiento de los motores en un movimiento lineal para variar la posición de la cámara. En la selección de concepto se representa por la columna *Dar movimiento vertical a la cámara* en la Fig. 5.1.
2. **Plataforma de la cámara:** es la parte donde se colocará la cámara; esta debe ser lo suficientemente firme para no experimentar desniveles. En la selección de concepto se

representa en la columna de *Sujetar Cámara* en la Fig. 5.1.

3. **Sistema de energía y potencia:** esto abarca las conexiones eléctricas para la interacción de los motores, la fuente de energía y el microcontrolador necesarios para brindar movimiento al sistema.
4. **Espacio de almacenamiento:** este apartado corresponde a la base donde se acomodará el *Sistema de movimiento Vertical* y se almacenará el *Sistema de energía y potencia*, para así conformar un sistema móvil que se pueda guardar y utilizar sin necesidad de armar todo el sistema.

Para el desarrollo de este sistema se realizaron dos iteraciones del diseño; primero se mostrará el diseño original seguido por la segunda iteración. Se documentará las razones por la cual se tomaron las decisiones para actualizar y sus principales diferencias. Esto se realizará únicamente para los primeros dos sistemas descritos anteriormente; con respecto a los segundos dos, solo se realizará una breve descripción y mención de la primera iteración antes de describir en detalle la segunda iteración debido a los pocos cambios realizados en este. Cabe recalcar que todo el diseño en 3D se realizó empleando el programa CAD *Autodesk Inventor*.

5.2.1. Sistema de movimiento vertical y Plataforma de de la cámara: Primera Iteración

Estos dos sistemas se presentarán en conjunto ya que el diseño de ambos son dependientes entre sí. En esta sección solo se tratará el diseño mecánico de estos elementos sin entrar en detalles de las características de su manufactura, las decisiones con respecto a este ámbito se puede apreciar en la sub-sección 5.2.3. Pero cabe recalcar que todas las piezas se manufacturaran en impresión 3D para tener un contexto.

El **Concepto J** consiste en una combinación del uso de un tornillo de avance para obtener el movimiento vertical y una jaula para la sujeción de la cámara. Una de las métricas especificadas en la Tabla 4.1 es poseer como mínimo un rango de movimiento vertical para la cámara mayor a 25 cm e idealmente mayor a 35 cm. Al realizar una búsqueda en el mercado costarricense se identificaron tornillos de avance de 40 cm y 50 cm, ambos son cumplen con estas especificaciones, pero es necesario tener una extensión mayor ya que parte de estos no será parte del movimiento efectivo de la cámara.

El tornillo de avance (Fig. 5.2) ya era parte del equipo presente en el laboratorio. Este es de acero inoxidable por lo que ofrece una gran estabilidad, con 50 cm de longitud, 8 mm de diámetro y 2 mm de paso. El mismo trae incorporado una tuerca de avance de bronce de 4 hilos el cual tiene como característica multiplicar el avance dando como resultado un avance de 8 mm cada vez que se da una revolución, en el Anexo A se puede leer en detalle la hoja de datos de este componente.



Figura 5.2. Tornillo y tuerca de avance empleado.

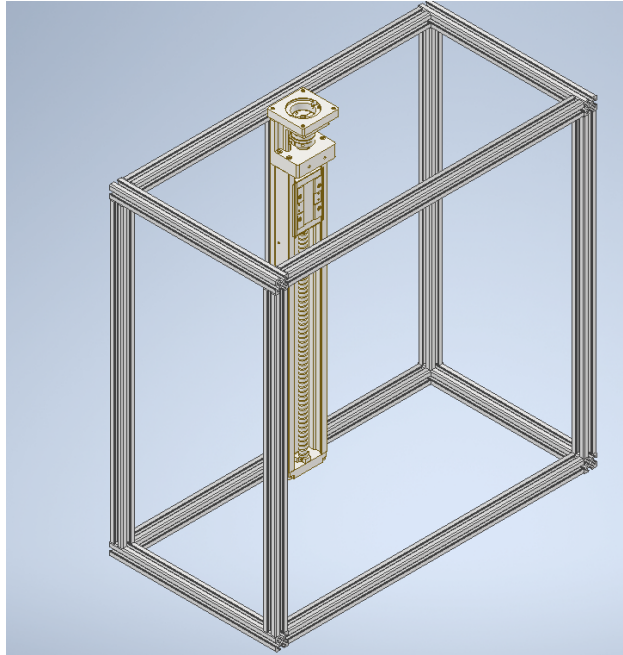
Después de tener seleccionado el medio para generar movimiento vertical son necesarios unos cojinete para sujetar este a un mecanismo estático. El cojinete seleccionado se puede apreciar en la Fig. 5.3, el cual funciona para ejes de 8 mm, con dimensiones de (48 x 26 x 11) mm, cuenta con una buena característica la cual es que se puede colocar en una superficie plana y se sujeta con tornillos M5.



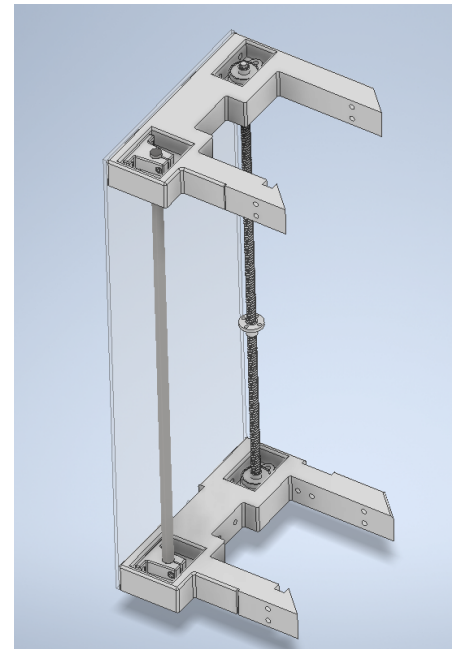
Figura 5.3. Cojinete empleado para sujetar el tornillo sin fin.

Lo siguiente analizar es la manera para sujetar el tornillo de avance y los cojinetes. Se analizaron dos opciones (Fig. 5.4) la primera es el empleo de perfiles de aluminio para formar

un chasis donde se monte este sistema (Fig. 5.4a, Sistema A), mientras que el otro es el uso de una barra lisa para dar otro punto de apoyo (Fig. 5.4b, Sistema B).



(a) Sistema de soporte con Perfiles de aluminio.



(b) Soporte con barra lisa.

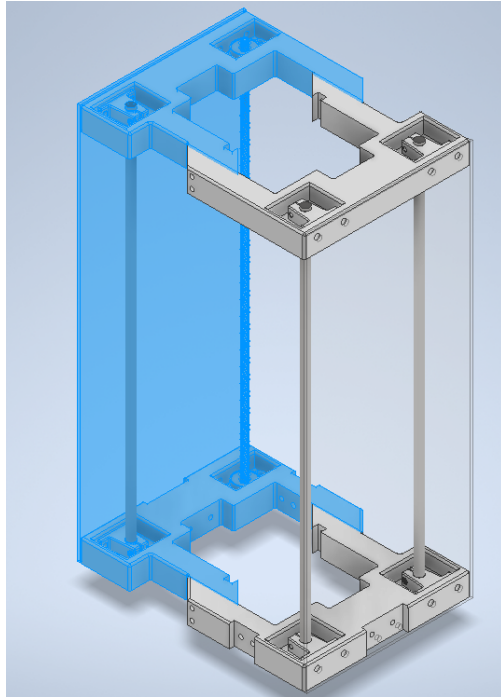
Figura 5.4. Opciones para el soporte del sistema de movimiento vertical.

El seleccionado fue el soporte con barra lisa por las siguientes razones:

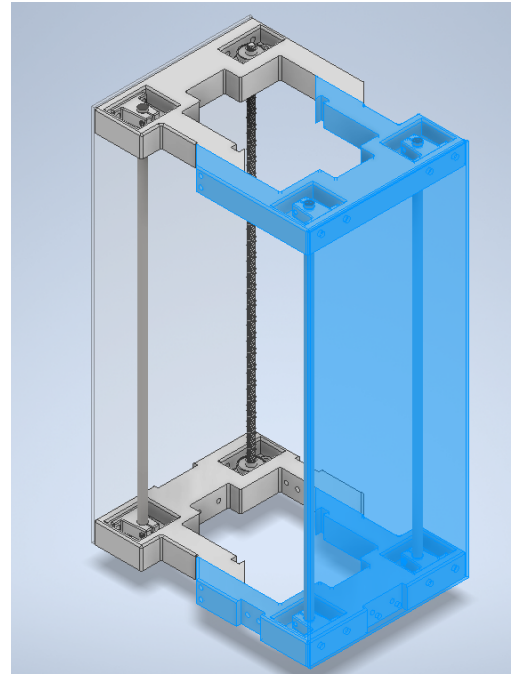
- El sistema B ofrece una opción de modularidad mayor al sistema A, ya que es más sencillo realizar un sistema desmontable.
- Por el uso de perfiles de aluminio que son más denso que la impresión 3D la solución será más pesada.
- Por el tamaño de los perfiles de aluminio, resulta más incómodo de mover y acomodar en la mesa de planitud del laboratorio.
- La compra de perfiles de aluminio aumentaría el presupuesto del proyecto se desaprovecharía el acceso a impresoras 3D y el laboratorio cuenta con una barra lisa.

Dado lo anterior, se iniciará con la descripción del diseño del sistema de movimiento basado en la barra lisa y impresión 3D. Este se puede apreciar en la Fig. 5.5, el cual está conformado por dos módulos: El Módulo Tornillo de avance el cual está compuesto por el

tornillo de avance y una barra lisa, y el Módulo Doble Barra Lisa, el cual contiene dos barras lisas.



(a) Módulo Tornillo de Avance.



(b) Módulo Doble Barra Lisa.

Figura 5.5. Sistema de Movimiento Vertical.

Con respecto a la barra lisa estas tienen unas dimensiones de 10 mm de diámetro, 50 cm de longitud y están hechos de acero cromado. Como este no gira, no necesita un cojinete, por lo cual se empleó el soporte de la Fig. 5.6 el cual está hecho de aluminio y se puede sujetar con tornillos M5.



Figura 5.6. Guía de eje de riel lineal empleado.

Módulo Tornillo de Avance

Este Módulo (Fig. 5.5a) es el que se encarga de sujetar el tornillo de avance y la barra lisa. Está conformado por dos piezas: una superior y otra inferior.

- **Soporte Tornillo de Avance Superior:** Este posee dos espacios, en uno se coloca el cojinete para el tornillo de avance y en el otro la guía para la barra lisa (Fig. 5.7b), estos son agujeros de forma cuadrada, de manera que cuando se coloquen la barra y el tornillo queden por debajo de este nivel, evitando así que queden expuestos, lo cual podría ser peligroso. En el espacio que contiene solo agujeros en la pared vertical del mismo es donde va la guía, mientras que el otro aprovecha que el cojinete se puede colocar de manera horizontal, cuadro rojo en la Fig. 5.7b.
- **Soporte Tornillo de Avance Inferior:** Es una pieza similar a su contraparte superior, su principal diferencia se puede apreciar por los cuadros rojos en la Fig. 5.7a el cual consiste en dos cortes en el material y la suma de agujeros pasantes para tornillos M5 los cuales se usarán para unir este Módulo con el *Espacio de Almacenamiento*.

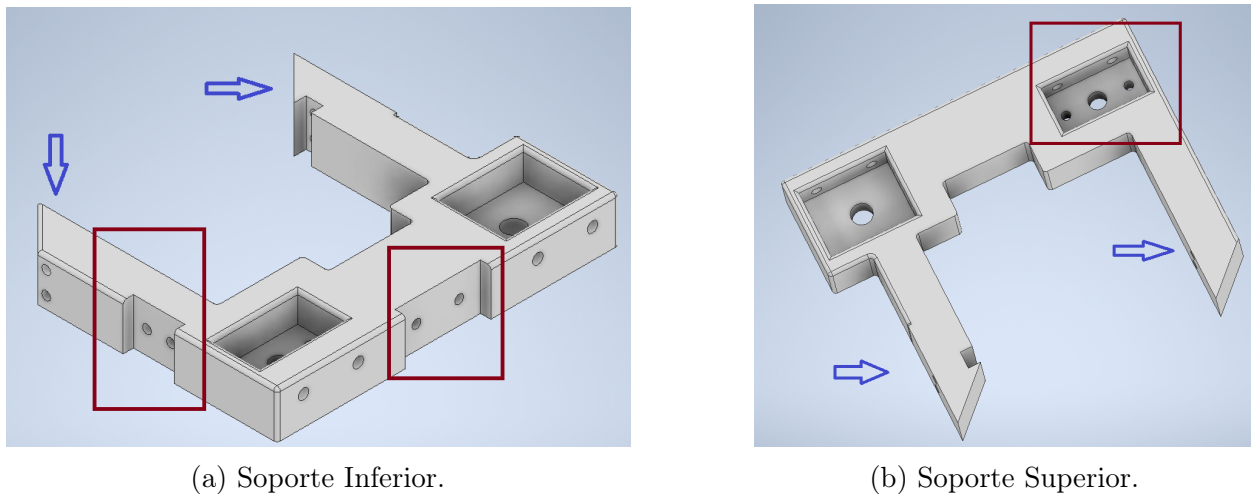


Figura 5.7. Soportes de Tornillo de Avance

Módulo Doble Barra Lisa

Este Módulo (Fig. 5.8) se usa para darle otros puntos de apoyo al sistema, para que este sea más firme y así evitar problemas de estabilidad, también se añadió para que cuando se acomode la cámara este el centro de masas se encuentre en el espacio entre los dos módulos. Al igual que el anterior emplea dos partes: una inferior y la otra superior.

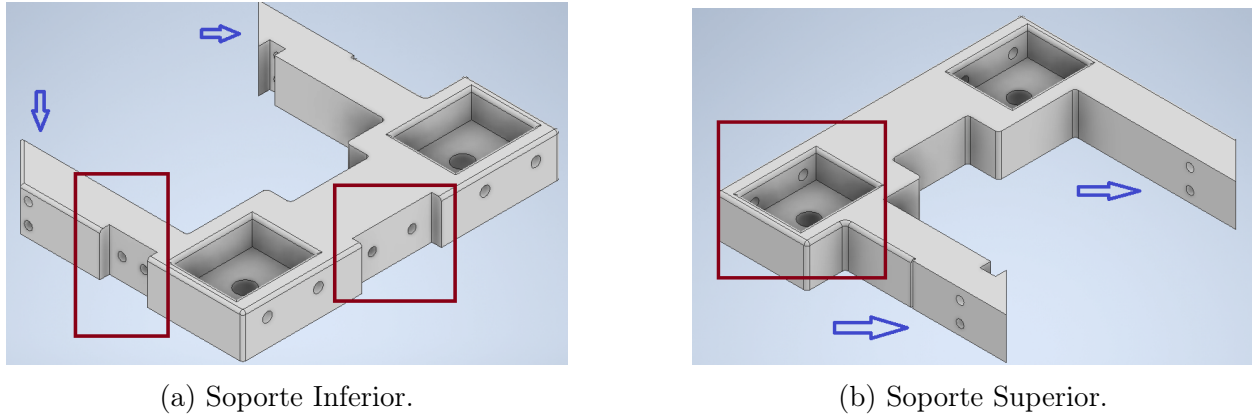


Figura 5.8. Soportes de Doble Barra Lisa

- **Soporte Doble Barra Lisa Superior:** Esta pieza es sumamente similar a su contraparte del tornillo de avance, su diferencia principal es que ahora posee solo agujeros pasantes para tornillos M6 para las dos guías de la barra lisa, esto es señalado por un cuadro rojo en la Fig. 5.8b.
- **Soporte Doble Barra Lisa Inferior:** Es fundamentalmente igual a la parte superior, con la diferencia de que posee dos espacios para que este se una al *Espacio de Almacenamiento* con la ayuda de agujeros pasantes para tornillos M5.

Unión entre los módulos

Un aspecto que no se ha descrito anteriormente es lo señalado por las flechas azules en las Fig. 5.7 y la Fig. 5.8 los cuales se diseñaron con el fin de realizar la unión entre estos dos módulos y así formar un sistema único. En la Fig. 5.9 se puede apreciar la unión de ambos módulos mediante pernos M5.

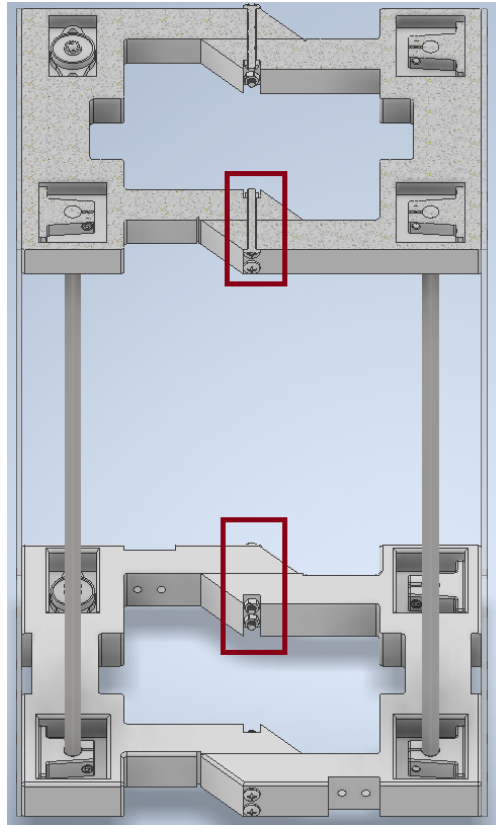


Figura 5.9. Módulos de Tornillo de Avance y Doble Barra Lisa.

Placas de soporte y guía

Un aspecto importante a mencionar son las placas laterales que se pueden apreciar en la Fig. 5.10 estos son laminas de acrílico de 3 mm de grosor que se colocan para mejorar la estabilidad y para que se funcionen como guía al momento de ajustar las guías y los cojinetes, ya que en la vida real esto resulta más complicado que en el software, en la Fig. 5.11 se puede apreciar un posible error cuando no se tiene esta guía ya que la barra lisa se encuentra por encima de tornillo de avance.

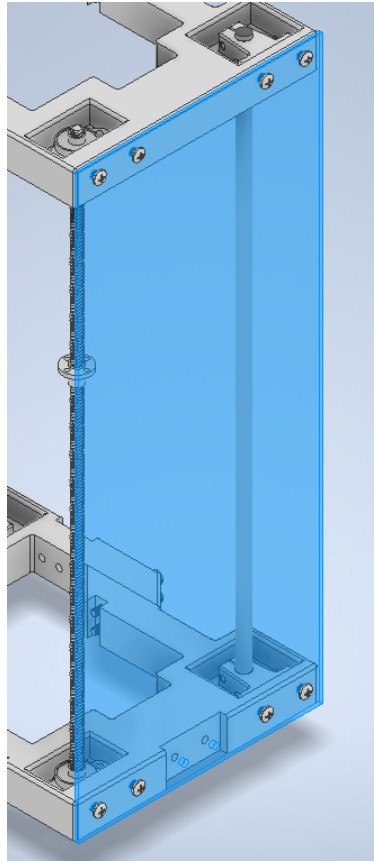


Figura 5.10. Lámina de Acrílico empleada para dar guía a los cojinetes



Figura 5.11. Posible error cuando no se utiliza la lámina de acrílico.

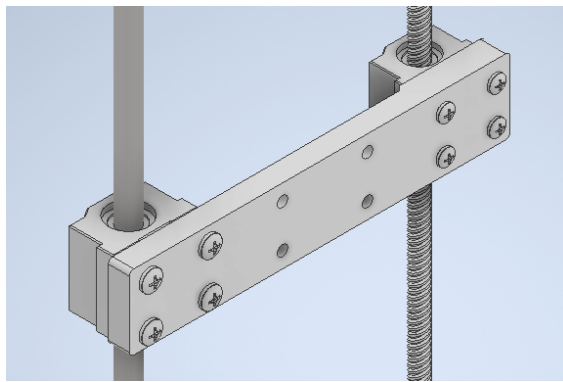
Sujeción de la cámara

Para unir la plataforma donde se coloca la cámara al tornillo de avance es necesario un cojinete para que esta se desplace junto a la tuerca de avance. Para esto se utilizó unas plataformas de rodamiento lineal en el tornillo de avance y barra lisa (Fig. 5.12), ambos son fundamentalmente iguales, solo que la de la barra lisa es más grande por ser 10 mm de diámetro.

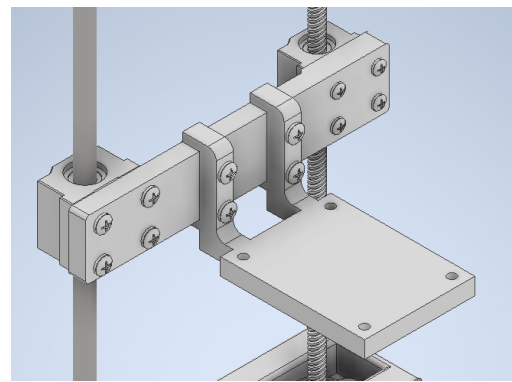


Figura 5.12. Plataformas con rodamiento lineal para ejes de 8mm.

Hay una característica que no posee la barra lisa es que no posee el soporte que ofrece tuerca de avance, por lo que fue necesario crear una manera para que esta se mueva en conjunto con la tuerca. Esta es la placa que se puede apreciar en la Fig. 5.13a el cual une a ambas plataformas mediante tuercas M4 en el caso del tornillo de avance y tuercas M5 en la barra lisa, al mismo tiempo se le dejó unos agujeros pasantes en su zona media para que en esa zona se pueda sujetar la plataforma donde se sostendrá la cámara (Fig. 5.13b).



(a) Unión de las plataformas de movimiento.



(b) Soporte para la cámara.

Figura 5.13. Uniones entre las plataformas de movimiento.

Para sujetar la cámara se empleará una jaula como lo estipula el **Concepto J**, pero antes de establecer el diseño es necesario conocer las dimensiones de la cámara y la lente. La lente es de la marca Navitar Zoom 7010 donde su longitud es 13 cm y su diámetro máximo es de 6 cm (Fig. 5.14a) lo cual es bastante grande, se pueden apreciar sus dimensiones en el Anexo A. Mientras la cámara mide (55.5 x 55.5 x 53.5) mm (Fig. 5.14c).



Figura 5.14. Cámara empleada en el sistema.

Por ende es necesario diseñar una jaula que mantenga esta cámara fija y que tenga la posibilidad de posteriormente con solo cambiar algunas características y así poder ajustar la jaula para sostener otra cámara dada una actualización. Cabe recalcar que la jaula no posee un límite trasero ya que por esta zona es donde se conecta el cable con el cual se envía la información hacia la computadora (Fig. 5.14b) y posee unos agujeros que coinciden con un espacio para pernos de la cámara para dejar la cámara totalmente segura como se puede apreciar en la Fig. 5.15 marcado con un cuadro rojo. Además, posee cuatro agujeros pasantes señalados por el indicador azul con los cuales se une a la plataforma para así dejar fija la jaula y evitar posibles caídas del equipo.

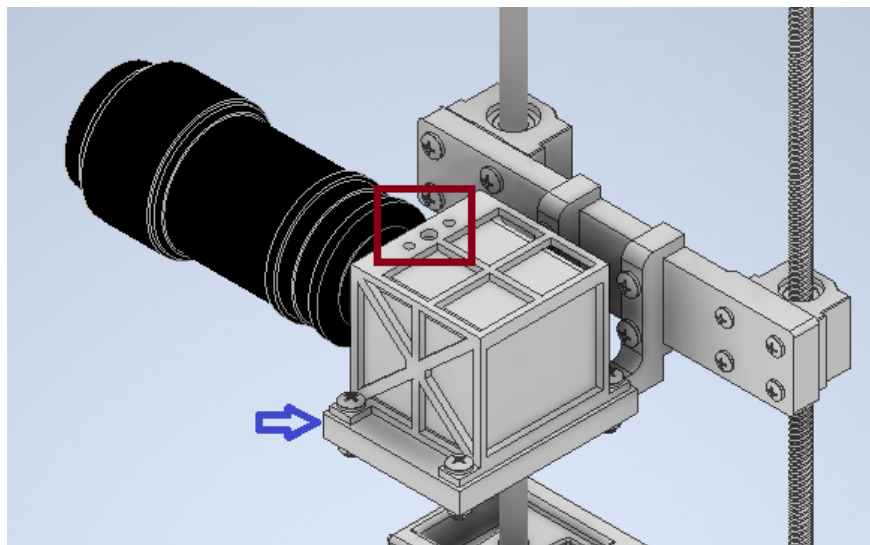


Figura 5.15. Jaula de contención para la cámara.

Además, se diseñó una pieza para unir con mayor firmeza la plataforma móvil y evitar

deslizamientos en la posición del mismo. El diseño de esta pieza se debe a que la plataforma no tiene una manera de quedar unida a la tuerca de avance y esta cuando el sistema se encuentra en reposo por acción de la gravedad comienza a girar y regresa a su posición inferior por la gravedad. Este consiste en una pieza en forma de L (Fig. 5.16a), que se unirá mediante los pernos de la plataforma móvil a la misma quedando una sujeción de 3 piezas. En su sección horizontal posee un cilindro que ingresa en el espacio para pernos de la tuerca de avance (Fig. 5.16b), lo que hace que quede firme con la plataforma de avance y que esta no pueda dar vueltas o pierda su posición cuando el sistema se encuentra sin movimiento.

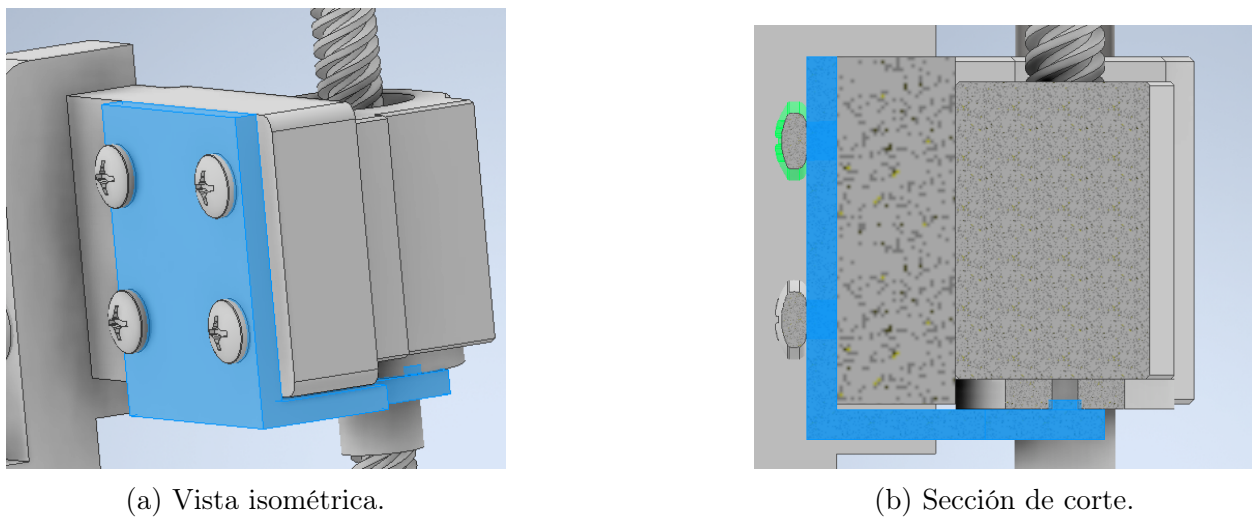


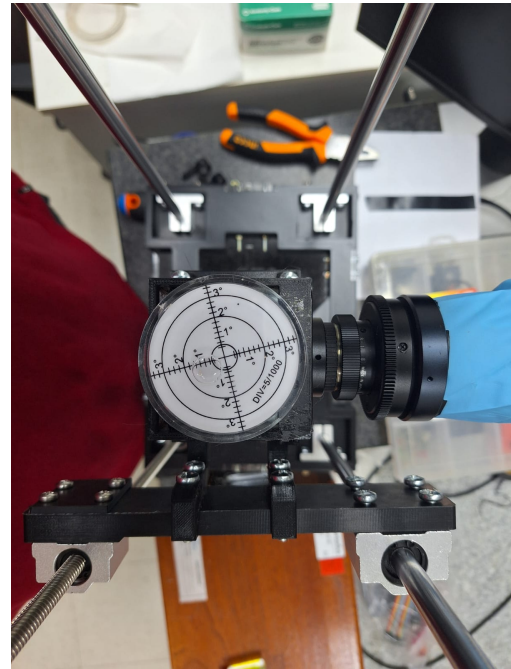
Figura 5.16. Pieza de unión de la plataforma móvil con la tuerca de avance.

5.2.2. Sistema de movimiento vertical y Plataforma de de la cámara: Segunda Iteración

Después de diseñar lo descrito en la sub-sección anterior y manufacturarlo, se identificó un gran problema que estaba ocasionando el no cumplimiento de una métrica. En la métrica objetivo número 11 mostradas en la Tabla 4.1 se muestra los límites de la inclinación que puede experimentar la cámara una vez ubicada en la solución diseñada. El ángulo máximo permitido es de $1,3^\circ$, mientras que en la Fig. 5.17b podemos apreciar que la cámara se encuentra inclinada por lo que es necesario analizar las razones y cómo se puede solucionar.



(a) Montaje de la cámara en la Primera Iteración

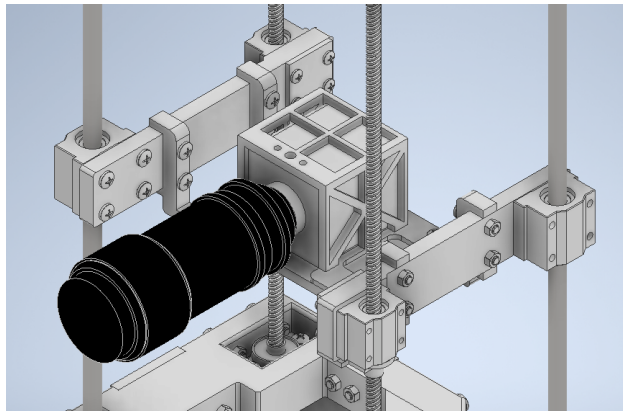


(b) Soporte para la cámara.

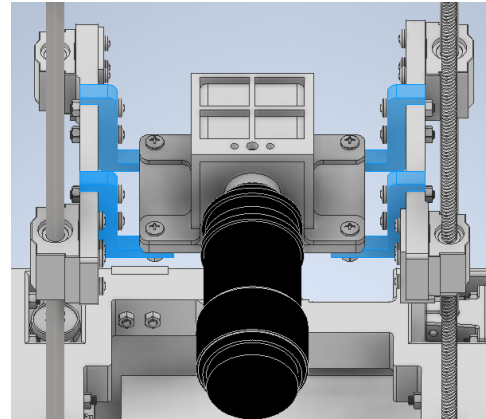
Figura 5.17. Montaje de la Primera Iteración.

Esta inclinación principalmente se da por que el mayor peso del conjunto cámara-lente es la lente se encuentra en la parte delantera. También, el diseño de la iteración 1 deja la plataforma en voladizo, lo que hace más sencillo que se presente este comportamiento. Otro aspecto es que la plataforma corrediza de la barra lisa lo que se apoya por la unión entre este y la del tornillo de avance, por lo que al estar la óptica del lado más cercano de la barra lisa este no puede ofrecer una resistencia a la inclinación. Por ende, es necesario realizar un rediseño de esto para evitar este problema.

Lo que se necesita es que la cámara posea más puntos de apoyo para que no se incline, para lograr esto el único elemento que tiene un soporte firme es la tuerca de avance. Por consiguiente, se decidió diseñar un sistema de elevación y la respectiva base para la cámara debido a dicho cambio. En la Fig. 5.18a podemos observar la propuesta para solucionar este problema, la misma consiste en hacer uso de dos tornillos de avance, se colocan alternados para evitar que el peso de la cámara recaiga sobre alguna plataforma de barra lisa. Con respecto a cómo se soportaron y sujetaron los cojinetes del nuevo tornillo de avance y de la barra lisa lo que se hizo fue eliminar los *Módulo Doble Barra Lisa* inferior y superior, y sustituirlos por dos *Módulos Tornillo de Avance* sin ningún cambio pero colocados en forma de espejo.



(a) Montaje de la cámara propuesto para la segunda iteración.

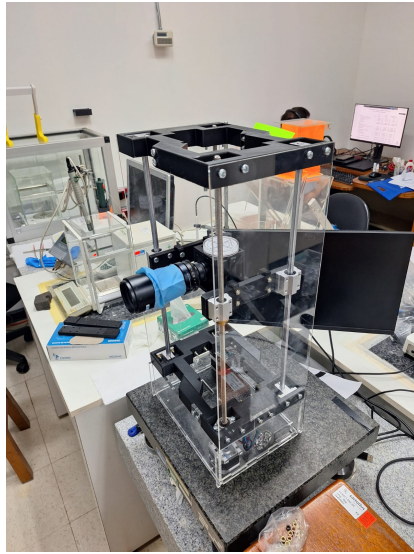


(b) Subdivisión del soporte para la cámara.

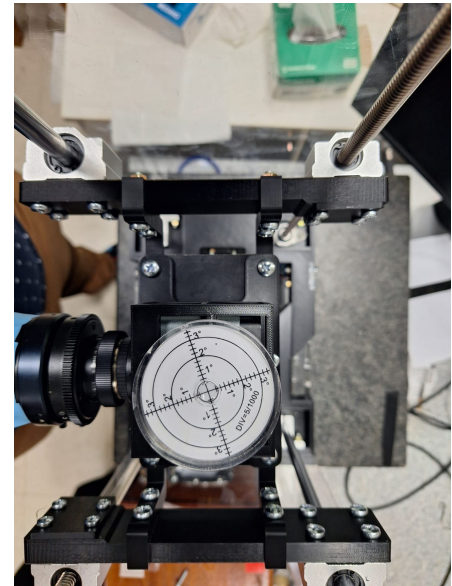
Figura 5.18. Cambios en el soporte de la cámara presentes en la segunda iteración

Otra actualización que se realizó para mejorar la modularidad de la solución fue cambiar el diseño de *Soporte para la cámara*, mostrado en la Fig. 5.13b, dividiéndolo en las piezas que se unen a la *Unión de las plataformas en movimiento*, como se observan las piezas marcadas en la Fig. 5.18b, y dejando una sola plataforma que se funcionará de unión entre la jaula y el resto del mecanismo. Esta decisión da muchas ventajas; primero queda más centrado la jaula, lo que mejora el centro de masas del sistema; segundo, permite que, dado una actualización donde solo cambie la cámara, como lo es conseguir una más grande, sea suficiente con desarmar estos sujetadores, diseñar una plataforma más grande con los agujeros pasantes en el mismo sitio, rediseñar la jaula y volver a colocar todas las piezas nuevas para su funcionamiento.

Después de realizar el rediseño del sistema de soporte de la cámara, se volvió a manufacturar como se aprecia en la Fig. 5.19a y se volvió a medir el desnivel del mismo. En la Fig. 5.19b se puede apreciar que ahora la burbuja del nivel se encuentra prácticamente en el centro lo que nos indica que la cámara se encuentra plana y así se evitará el error de paralaje al momento de emplear el SIM. Cabe recalcar que, tanto para la Iteración 1 como para la 2, la medición del nivel se realizó sobre una mesa plana ubicada en el laboratorio, lo que descarta que el desnivel observado inicialmente se originara por la superficie sobre la cual se colocó el dispositivo.



(a) Montaje de la cámara en el laboratorio.



(b) Medición del nivel.

Figura 5.19. Sistema de sujeción de la cámara en su segunda Iteración.

5.2.3. Manufactura de las piezas del Sistema de movimiento vertical y Plataforma de de la cámara

En esta sección se tratará sobre las consideraciones que se tuvieron a la hora de la selección del material para la impresión 3D de las piezas de los sistemas anteriormente discutidos.

Selección del material

Para la manufactura de todas las piezas anteriormente diseñadas se tienen las siguientes opciones: PLA, PLA max, Tereftalato de Polietileno (PETG) y ABS. El primero esta disponible en el laboratorio por lo que es el más cómodo de emplear y las demás se encuentran disponibles en el servicio de impresión 3D del Laboratorio Institucional de Microcomputadores (LAIMI), pero vale la pena analizar las demás opciones para determinar la mejor opción.

- **PLA:** es por mucho la opción más popular, es un plástico biodegradable y no emite vapores tóxicos como lo hace el ABS. Es capaz de mantener su integridad 60° sin ningún problema, posee una resistencia a la tracción entre los 50-70 MPa y un módulo de elasticidad entre los 3 - 4 GPa. [43]

- **PLA max:** es una versión mejorada del PLA.
- **PETG:** es un material termoplástico ampliamente utilizado en la impresión 3D. Posee una resistencia a la tracción entre 50 - 70 MPA y es capaz de mantener su integridad hasta los 80°. [44]
- **ABS:** es un material conocido por su capacidad para resistir impactos, su estabilidad dimensional y su alta resistencia a la temperatura. Es capaz de mantener su integridad hasta los 120° el cual es el calor más grande de todos los materiales disponibles, tiene una resistencia a la tracción de 20 MPA y un módulo de flexión que se encuentra entre los 2.1 GPa y 7.6 GPa. [45]

De los materiales disponibles el más adecuado es el PLA max ya que puede soportar más esfuerzos que el PETG y el ABS, el uso del ABS no está justificado ya que su mayor característica es su alta resistencia a la temperatura ya que en esta aplicación no se va a presentar y el ambiente mantiene la temperatura baja. No obstante, la impresión se realizará en PLA ya que el laboratorio donde se realiza el proyecto posee filamentos de este material y la diferencia entre ambos materiales no afecta dado las bajas cargas de la aplicación.

Consideraciones para la impresión 3D

Al momento de realizar una impresión 3D es importante tener en cuenta 3 factores importantes: el porcentaje de relleno, el tipo de relleno y la orientación de la pieza.

▪ Porcentaje de relleno

El porcentaje de relleno en una impresión 3D se puede modificar desde el 0% hasta el 100% la decisión más sencilla es el máximo, pero vale la pena analizar si la aplicación es factible con un menor porcentaje de relleno, ya que la disminución de este disminuye el peso de la solución y los gastos ya que se necesita menos material. En la Universidad Industrial de Santander se realizaron pruebas con probetas de PLA con distintos porcentajes de relleno, en la Tabla 5.5 se puede observar un resumen de sus resultados. Se puede apreciar que el PLA con un relleno del 40% logra un esfuerzo máximo promedio de 53 MPa, mientras que el 80% solo logra 2 MPa más, por lo que se decidió imprimir con la primera opción ya que no es una diferencia tan significativa, pero se ahorra la mitad del material.

Tabla 5.5. Características del PLA de acuerdo a su porcentaje de relleno. [46]

Porcentaje de relleno	Módulo de Young [GPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]
13	1,41	52,61
27	1,41	51,95
40	1,42	53,49
80	1,45	55,76

■ **Orientación de la pieza y patrón de relleno**

Un aspecto importante es reconocer de que dirección van a proveer las cargas que experimentarán las piezas, ya que la impresión 3D realiza la construcción de las piezas apilando capas del material lo que ocasiona que exista una orientación en la cual es más indicado imprimir las piezas. En la Fig. 5.20 se puede apreciar esta característica por lo que siempre que fuera posible las piezas se orientaron de esta forma para ser impresas. Con respecto al patrón del relleno existen múltiples formas (Fig. 5.21), se seleccionó el giroide ya que debido a su geometría este ofrece soporte en todas las direcciones lo que permite bajar las concentraciones de esfuerzo.



Figura 5.20. Impacto de las cargas en tensión según la orientación de la pieza. [44]

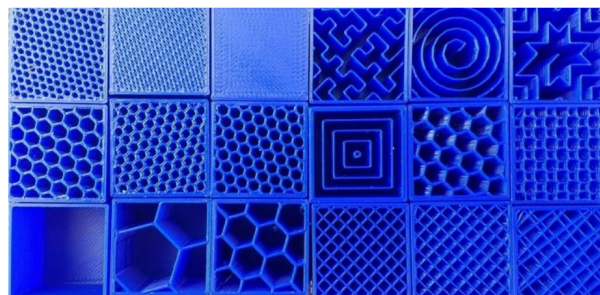


Figura 5.21. Diferentes patrones de relleno disponible en la impresión 3D. [44]

Las impresiones se realizaron en el LCM durante un periodo de 3 semanas con PLA de color negro. En la Fig. 5.22 se puede apreciar una Pieza del *Módulo Tornillo de Avance* en el software de la impresora 3D, mientras que la Fig. 5.23 se puede apreciar su impresión en proceso.

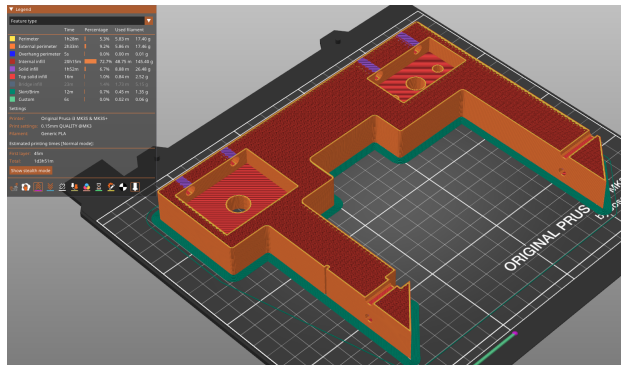


Figura 5.22. Impresión 3D planteada en el software de configuración de la impresora 3D.

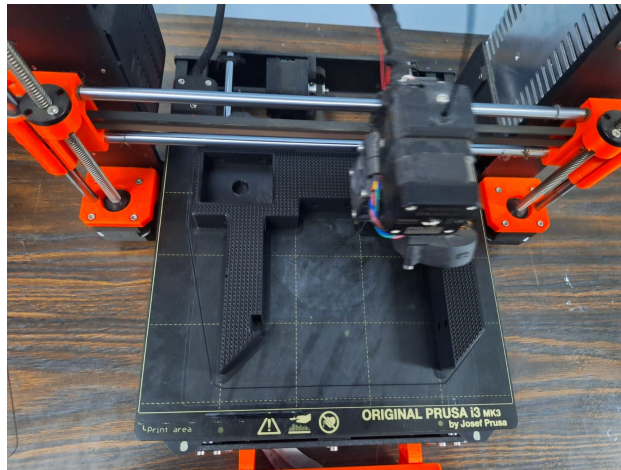


Figura 5.23. Impresión 3D en las impresora del laboratorio.

5.2.4. Sistema de energía y Potencia

Una vez diseñado los elementos mecánicos del sistema de posición de la cámara es fundamental estudiar como o con cual medio se le va a brindar la energía necesaria y su control. A continuación, se documentará la principal información sobre cada elemento perteneciente a este sistema y posteriormente mostrará las conexiones utilizadas.

Motor - Stepper

Para que la tuerca de avance proporcione un movimiento lineal, es necesario que el perno de avance gire. El análisis de cuál fuente de movimiento es la más indicada se realizó en la sección 5.1, en la cual el **Concepto J** tiene como fragmento de concepto en la columna *Convertir energía en movimiento rotacional* (ver Fig. 5.1) un motor paso a paso para esta tarea. Para esta decisión, se decidió emplear un motor previamente adquirido por el LCM. En la Tabla B.5 se puede apreciar que se cuenta con dos motores Paso a Paso Nema17 de modelo JK42HS-1204F (Fig. 5.24) y también se pueden analizar sus principales características. Entre sus principales características se encuentran (para leer su hoja de datos, ir al Anexo A):

- Longitud y ancho del motor: (40 x 42) mm.
- Corriente por fase: 1.3 A.
- Resistencia por fase: 2.6 Ω .
- Número de cables: 4.
- Peso: 0.28 kg.
- Longitud del eje: 24 mm.
- Ancho del eje: 5 mm.
- 200 pasos necesarios para una revolución.

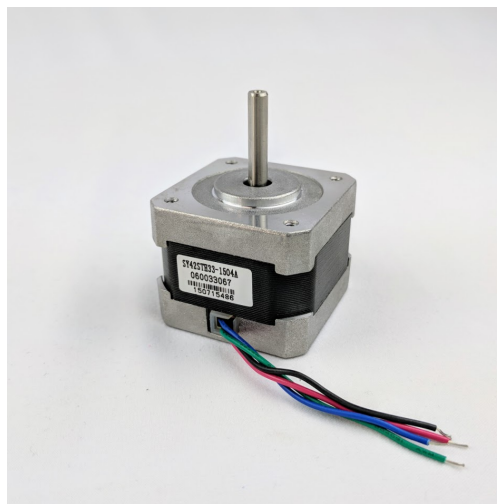


Figura 5.24. Motor Paso a Paso seleccionado.

Un factor importante a observar es el ancho o diámetro del eje, el cual es de 5 mm. El tornillo de avance empleado es de 8 mm, por lo que es necesario, además de un medio para unirlos, que este posea la característica de adaptar distintos diámetros. En la Fig. 5.25a se puede apreciar un adaptador rígido de (5 x 8) mm, el cual es adecuado para aplicaciones que requieren una transmisión precisa y sin holgura de torque entre los ejes. En la Fig. 5.25b podemos apreciar uno flexible, que es más adecuado cuando se necesita cierta flexibilidad para compensar desalineaciones o absorber vibraciones y choques. El más recomendado en este caso sería la segunda opción, pero como podemos observar en la Tabla B.5, el LCM cuenta con acoples rígidos. Esta aplicación no se espera tener una gran presencia de vibraciones o choques. El único detalle a tener en cuenta es que, al momento del diseño, se debe dejar lo más alineados posible ambos ejes. En el Anexo A se pueden apreciar las dimensiones del acople rígido.



(a) Acople Rígido.



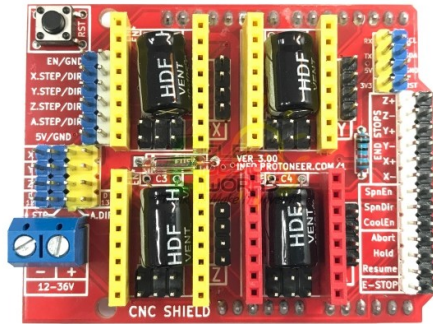
(b) Acople flexible.

Figura 5.25. Distintos acoples entre el tornillo sin fin y el motor Nema 17.

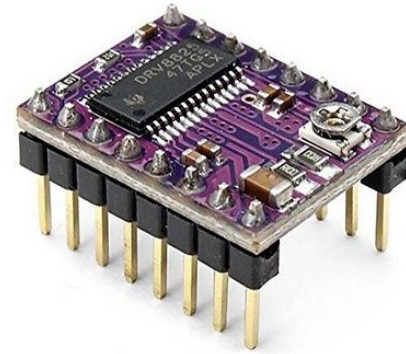
Microcontrolador y driver para Stepper

Como se discutió en la sección de selección de componentes es necesario un microcontrolador para enviar las órdenes a los motores. Además, al usar motores paso a paso es necesario el uso de drivers para regular las corrientes que estos emplean y realizar las secuencias de movimiento. En la Tabla B.5 se puede apreciar que el LCM previamente adquirió un Arduino UNO, el cual resulta más que suficiente para la tarea a realizar, ya que lo único que se necesita es controlar dos motores. Para realizar el aislamiento del control lógico y el sistema de potencia, se empleó un CNC Shield V3 (Fig. 5.26a), el cual es ampliamente utilizado para el control de CNC ya que provee la capacidad de controlar hasta 4 motores en un solo

dispositivo.



(a) CNC Shield V3.0 para Arduino.



(b) DRV8825 Motor Driver.

Figura 5.26. Elementos de control para el motor Nema 17.

En la Fig. 5.26a podemos apreciar que es necesario conectar controladores al Shield para que este funcione. El seleccionado fue el DRV8825, que ofrece una corriente máxima de 2.5 A, lo cual es mayor a los 1.3 A necesarios por fase para movilizar el motor. También se puede apreciar que el Shield puede ser alimentado con una fuente de corriente continua entre 12 - 36 V, por lo que el controlador tiene que ser capaz de soportar este rango también al momento de ser alimentado. El DRV8825 soporta hasta 36 V de alimentación. Otra característica útil de estos controladores es que poseen un potenciómetro con el cual se puede ajustar la máxima corriente de salida; con esto, la misma se puede limitar al máximo de los motores, el cual es de 1.3 A. En el Anexo A se pueden apreciar las especificaciones en más detalle de ambos componentes.

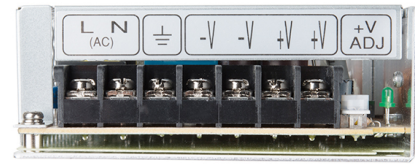
Fuente de poder

Como se discutió en el inciso anterior es necesario alimentar al CNC Shield V3 con una fuente de tensión entre 12 y 36 V. En la lista del equipo previamente adquirido por el LCM (Fig. B.5), se puede apreciar que se cuenta con una fuente de poder de 12V y 10 A. La misma es una fuente de alimentación con dos salidas, puede ser alimentada con 110 VAC a 220 VAC, posee un enfriado mediante ventilación por aire convencional, una frecuencia de conmutación de 27 KHz y protecciones contra corto circuitos y sobrecargas. Este modelo pertenece a la serie S-120, es el S-120-12 (Fig. 5.27a), el cual puede modificar su salida entre los 10.6-13.2 V. Para alimentar el Shield se dejó en 12.6 V para sobrepasar por poco la

alimentación mínima de este y dejar un rango dado en caso de necesitar más energía. En el Anexo A, se puede apreciar la información de capacidades y dimensiones en mayor detalle sobre este componente.



(a) Fuente de Alimentación.



(b) Puertos disponibles.

Figura 5.27. Características de la Fuente de Alimentación S-120-12.

Se puede apreciar en la Fig. 5.27b que la fuente de poder se alimenta de una fuente AC. Por ende, se empleó una entrada de alimentación IEC 320 C14 que permite conectarse a la alimentación de electricidad doméstica costarricense de 120 VAC.



(a) Cable IEC 320 C14.



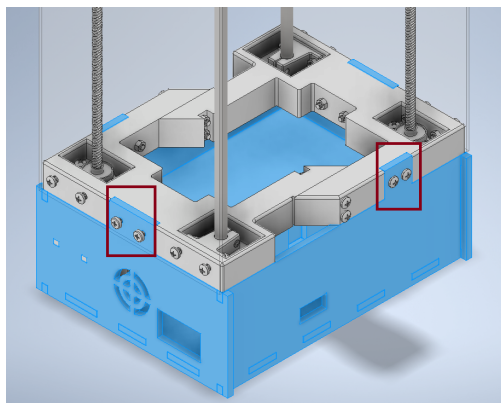
(b) Interruptor de la alimentación.

Figura 5.28. Partes de la alimentación para la fuente de poder.

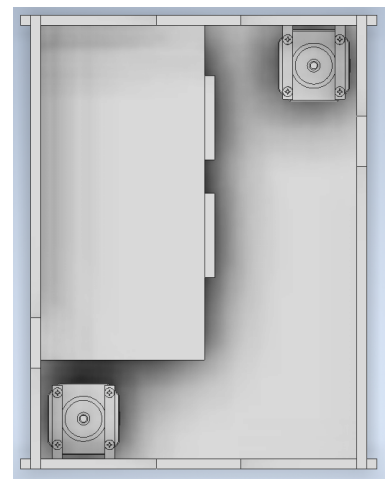
- Pin 2: Pulso de paso en el eje X.
- Pin 3: Pulso de paso en el eje Y.
- Pin 4: Pulso de paso en el eje Z.
- Pin 5: Dirección en el eje X.
- Pin 6: Dirección en el eje Y.
- Pin 7: Dirección en el eje Z.
- Pin 8: Enable/Disable.

5.2.5. Espacio de almacenamiento

Una vez identificados los elementos pertenecientes a la fuente de energía, motores y control de los motores, se prosiguió con el diseño de la zona de almacenamiento y soporte. En la Fig. 5.30a se puede apreciar la zona inferior de la solución, la cual corresponde al espacio de almacenamiento. En la Fig. 5.30b se puede apreciar la disposición de los motores y la fuente de poder en este espacio.



(a) Uniones con el sistema de movimiento vertical.

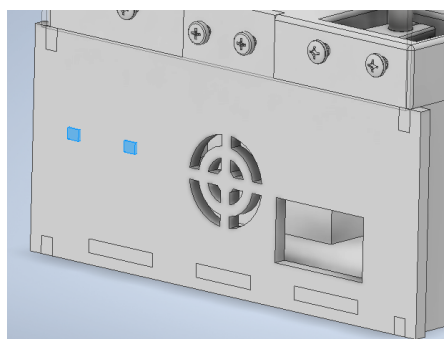


(b) Disposición de los elementos en el espacio de almacenamiento.

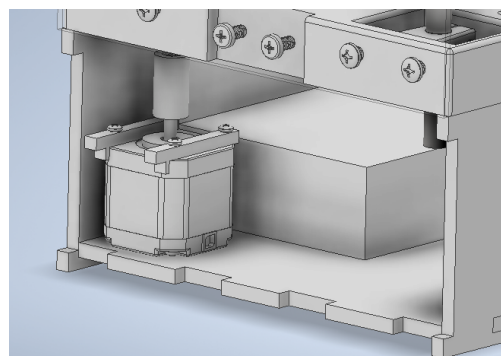
Figura 5.30. Espacio de almacenamiento.

El espacio de almacenamiento consiste en láminas de acrílico de 6 mm de grosor, las cuales se unen para formar una caja. Estas poseen unas extensiones, ver cuadros rojos en

la Fig. 5.30a, con las cuales se unen al sistema de movimiento vertical mediante pernos M5. También este espacio posee los espacios necesarios para que ingresen el cable serial para el Arduino UNO y para incrustar el interruptor de la fuente de poder; estos se pueden apreciar en la Fig. 5.30a. En la Fig. 5.30b se puede apreciar que los motores se ajustan en el espacio por dos láminas que poseen pernos que aprovechan los que ya poseen los motores. Esta pieza se puede apreciar en la Fig. 5.31, donde se aprecia cómo la misma une las paredes del espacio de almacenamiento con el motor para que este quede fijo y alineado con el eje del tornillo de avance.



(a) Piezas de unión en el espacio de almacenamiento.



(b) Vista de la unión con el Stepper.

Figura 5.31. Sujeción del motor en el espacio de almacenamiento.

Planos estructurales

- En el Apéndice F se pueden apreciar los planos detallados de todas las piezas de la Plataforma Mecánica.

5.3. Desarrollo del Módulo de Control

En esta sección se documenta la solución propuesta para el Módulo de Control. En la Fig. 5.32 se puede apreciar los componentes que conforman este módulo, los cuales se explicarán a continuación en mayor detalle.

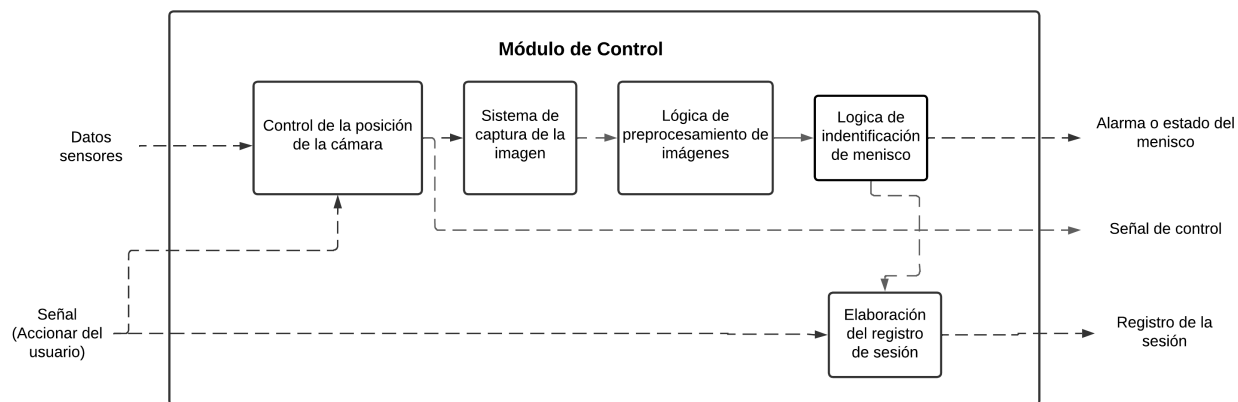


Figura 5.32. Diagrama del Módulo de Control

5.3.1. Sistema de captura de la imagen

Un aspecto importante al momento de implementar una solución es la posición de la cámara y la iluminación necesaria para resaltar mejor las características que se desean.

Con respecto a la posición de la cámara, como se documentó en secciones anteriores, para la correcta visualización del menisco hay que observar este desde el lateral de la cristalería de laboratorio y, dado la disposición de las mesas de planitud, la mejor ubicación es la presentada en la Fig. 5.33, donde el dispositivo se coloca en el lateral de la cristalería y se acomoda según la altura del mismo.



Figura 5.33. Disposición de la cámara y la cristalería de laboratorio.

En el caso de la iluminación, por indicación del laboratorio se utilizarán luces fluorescentes

que ya iluminan el cuarto. No hay que preocuparse por la contaminación de la luz ambiente, ya que el espacio donde se realizan las imágenes se encuentra aislado del exterior. Esta luz del laboratorio posee ciertas características que la hacen suficiente para la solución: su buena disposición en el laboratorio que crea una iluminación uniforme y, debido a su lejanía con la mesa de planitud, al momento de que los rayos de luz se han difuminado lo suficiente para evitar reflejos. Pese a que se utilizará este tipo de iluminación, es importante analizar los demás tipos de disposición para proponer uno para futuras mejoras. A continuación, se documentan las razones por las cuales se descartan o seleccionan las disposiciones de iluminación.

- **Iluminación de fondo:** se puede observar esta disposición en la Fig. 2.10. El problema de este tipo de iluminación es que es buena para resaltar contornos y esto no es lo deseado en esta aplicación.
- **Iluminación axial difusa:** esta disposición se puede apreciar en la Fig. 2.11. Resulta ventajosa porque es buena para iluminar sin sombras duras y permite la inspección de material altamente reflectante como lo es el vidrio.
- **Iluminación frontal:** esta disposición de iluminación resulta negativa, ya que genera reflejos por su contacto directo con las superficies.
- **Iluminación por campo oscuro:** no es recomendable por la forma del equipo de laboratorio, ya que el anillo de iluminación obstruiría la cámara.
- **Iluminación difusa tipo domo:** muestra buenos resultados con superficies reflectantes. El problema es que, dado los distintos tamaños de la cristalería, se tendría que poseer un domo adecuado para distintos equipos.
- **Iluminación difusa:** esta disposición propone iluminar desde la parte superior de los equipos de cristalería a diferencia de todos los demás métodos. Esto es para evitar un contacto con el lateral de los mismos y así evitar afectar la forma del menisco. El empleo de la luz del laboratorio sería una simulación de este tipo de iluminación, pero sería mejor un sistema dedicado.

Expuesto todo lo anterior, la mejor solución para no afectar el reflejo del menisco que se forma con la cinta negra colocada por debajo de la línea de aforo es un sistema de iluminación difusa desde arriba del balón aforado. Se puede emplear un equipo como el mostrado en la

Fig. 5.34. En el presente proyecto se utilizará la luz del laboratorio, que, dado lo antes explicado, no resulta una mala opción para sustituir la iluminación difusa.



Figura 5.34. Fuente de iluminación difusa. [47]

5.3.2. Algoritmo de Visión Artificial

El algoritmo de visión artificial es todo el proceso que experimenta la imagen desde el momento en ser obtenida hasta que da un valor útil para tomar decisiones. En la Fig. 5.35 se puede apreciar el flujo que experimenta la imagen durante el proceso. El algoritmo se divide en dos secciones principales: el preprocesado y la segmentación e identificación de bordes. La implementación se realizó en Python mediante la biblioteca OpenCV.

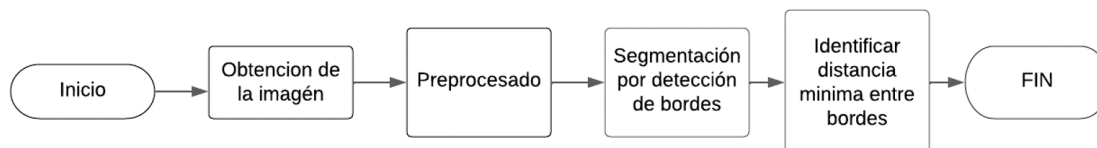


Figura 5.35. Flujo empleado para el procesamiento de la imagen en VA.

Preprocesamiento

Los pasos descritos en esta sección son fundamentales para realizar una extracción o fortalecer las características que se desean analizar en la aplicación. A continuación, se muestran

los pasos necesarios realizados en este proceso para resaltar características deseadas, o eliminar aquellas que no son útiles para el usuario. Durante la descripción de los siguientes pasos se mostrarán tres imágenes para observar su evolución y resaltar la importancia de realizar todos los procesos para obtener un buen resultado: la primera, sin recortar la imagen; la segunda, sin mejorar el contraste; y la tercera, realizando ambos procesos anteriores. La imagen original con la que se trabajó es la mostrada en la Fig. 5.36, donde se puede apreciar la zona de aforo de un balón aforado con su menisco cerca de la línea de aforo. Antes de iniciar con la descripción de cada etapa, para una lectura más fluida, el código en Python de la solución se encuentra en el Apéndice C.

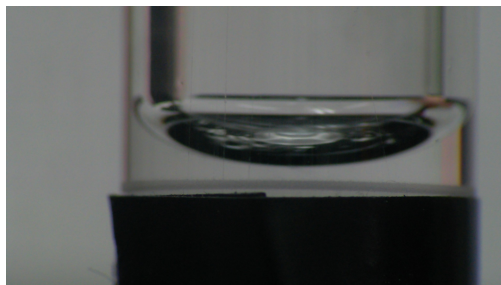


Figura 5.36. Imagen original para el proceso de VA.

1. Recortar imagen original

Este paso surge de la necesidad de eliminar información innecesaria de la imagen original. Al observar la Fig. 5.36, se puede apreciar que la cámara captura todo el menisco, las paredes laterales del balón aforado, la línea de aforo y la cinta negra que se coloca por debajo. Esto resulta en un exceso de información ya que lo único que se quiere analizar es la parte más cercana del menisco con la línea de aforo. Este recorte se realiza mediante la función *seleccionar_region*¹, la cual permite seleccionar una zona con el clic derecho del ratón que se almacenará como una nueva imagen. El cuadro de selección se puede apreciar en la Fig. 5.37. Para la creación de esta área, se discutió la mejor opción entre dos alternativas:

- Cuadro estático: Este es un cuadro de dimensiones y posición fijas; el usuario tendría que acomodar el menisco o la cámara para que la parte de interés quede en este cuadro. Ventajas: crea un proceso más estandarizado al buscar siempre la misma posición. Desventaja: puede resultar incómodo acomodar el menisco en el recuadro e imposibilita analizar distintos tamaños de meniscos.

¹La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 64.

- Cuadro dinámico: En esta aplicación, después de tomar la imagen, el usuario con el cursor seleccionará el área a analizar. Ventajas: posibilidad de analizar distintos tamaños de menisco y elimina la incomodidad de acomodar la cámara. Desventajas: propenso a errores humanos o falsos resultados por errores humanos.

Dado lo anteriormente discutido, se decidió utilizar la opción dinámica, ya que los errores humanos se pueden mitigar con entrenamiento o con alarmas para avisar de posibles errores. En la Fig. 5.38, se puede analizar la zona recortada resultante. No se aprecia la del proceso sin recorte porque no posee este paso en específico.

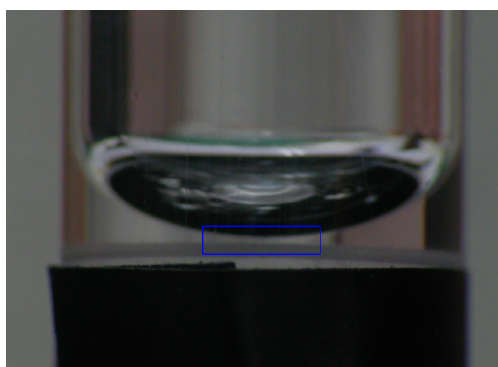
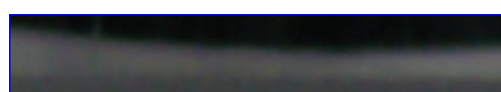


Figura 5.37. Cuadro de selección para la zona de interés.



(a) Proceso sin mejora de contraste



(b) Proceso completo.

Figura 5.38. Resultado luego de la etapa *Recortar imagen original*.

2. Convertir a escala de grises

Las imágenes recortadas mostradas en la Fig. 5.38, a pesar de que se ven en blanco y negro a primera vista, no están en escala de grises y pueden poseer algún componente de color. Por ende, la imagen recortada se procesa mediante la función `convertir_a_escala_de_grises2`, la cual convierte la imagen a escala de grises. En la Fig. 5.39 se pueden apreciar los tres procesos luego de convertirla a escala de grises. No se muestra el resultado de la imagen sin recortar ya que en este paso no se muestra el efecto que tiene el no realizar el recorte. Este

²La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 279.

efecto se notará hasta la segmentación de bordes, y cuando se presente la consecuencia se mostrarán los resultados.



Figura 5.39. Resultados luego convertir todas las imágenes a su escala de grises.

3. Mejorar contraste de la imagen

En la Fig. 5.39 podemos apreciar que la imagen resultante está compuesta de tres componentes: el segmento más oscuro representa el menisco, un elemento menos oscuro que es la línea de aforo, y el elemento más claro que constituye el agua. Para analizar la calidad de una imagen hay que hacer la lectura del histograma de la imagen (Fig. 5.40). En esta podemos apreciar que las imágenes poseen dos características:

- Poco brillo: ya que la mayoría de los píxeles tienden a cero (valores oscuros).
- Saturadas: los píxeles se encuentran concentrados en un rango pequeño; en las imágenes podemos apreciar que la mayoría de valores van de 0 - 100 cuando podrían ir de 0 - 255.

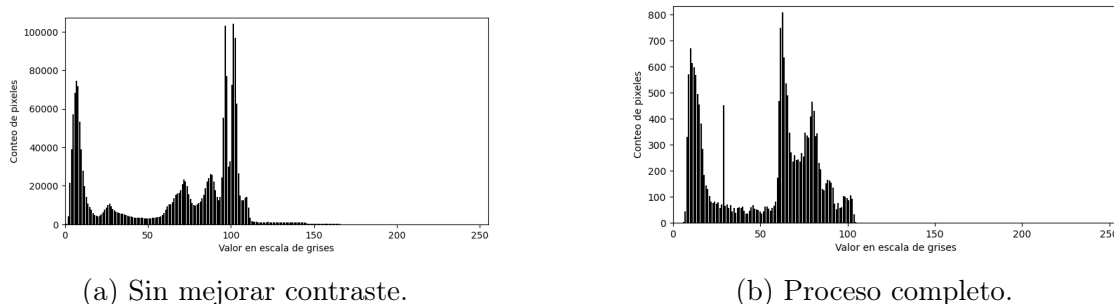


Figura 5.40. Histograma del proceso antes de realizar la mejora del contraste.

Estas características afectan el procesamiento posterior, ya que al estar tan cercanos todos los valores de intensidad, resulta más complicado diferenciarlos, y se pueden combinar entre ellos. Por ende, se implementó la función *aumentar_contraste*³, en la cual se aplica una

³La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 245.

normalización a los píxeles para expandir el rango de valores de 0 - 255. La normalización funciona de acuerdo a la Ec. 5.1.

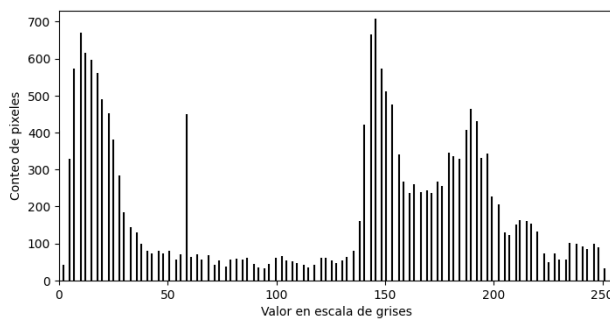
$$\text{valor}_{\text{normalizado}} = \frac{(\text{valor}_{\text{original}} - \text{min}_{\text{original}}) \times (\text{nuevo}_{\text{max}} - \text{nuevo}_{\text{min}})}{\text{max}_{\text{original}} - \text{min}_{\text{original}}} + \text{nuevo}_{\text{min}} \quad (5.1)$$

Donde:

- $\text{max}_{\text{original}}$ y $\text{min}_{\text{original}}$ corresponden al valor máximo y mínimo de intensidad en los píxeles de la imagen original.
- $\text{nuevo}_{\text{max}}$ y $\text{nuevo}_{\text{min}}$ son los valores mínimos y máximos que se tendrán luego de la normalización.
- $\text{valor}_{\text{original}}$ es el valor original del píxel a normalizar.
- $\text{valor}_{\text{normalizado}}$ es el valor de intensidad luego de la normalización.

Luego de hacer la sustitución de valores se obtuvo la Ec. 5.2. En la Fig. 5.41 se puede apreciar la imagen y el histograma del proceso completo luego de la mejora del contraste. En el histograma se puede apreciar cómo los valores pasaron de estar concentrados entre 0 - 100 (Fig. 5.40b) a valores más dispersos entre 0 - 255 (Fig. 5.41a), lo que proporciona una gama más grande de valores para posteriores procesos. En la Fig. 5.41b se puede observar cómo ahora si diferencian mejor el menisco, la línea de aforo y el líquido contenido.

$$\text{valor}_{\text{normalizado}} = \frac{(\text{valor}_{\text{original}} - \text{min}_{\text{original}}) \times 255}{\text{max}_{\text{original}} - \text{min}_{\text{original}}} \quad (5.2)$$



(a) Histograma.

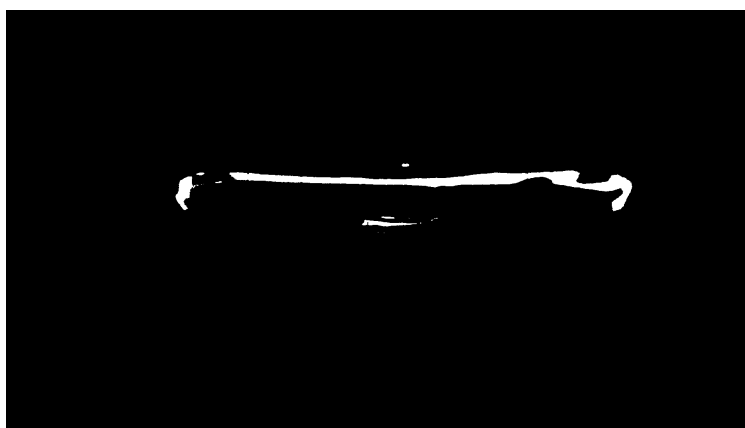


(b) Proceso completo.

Figura 5.41. Estado de la imagen del proceso completo luego de la mejora de contraste.

4. Binarizar la imagen

Esta etapa del proceso sigue la misma línea que el proceso anterior. Ahora se binarizará la imagen para obtener una imagen con solo valores negros y blancos, lo que en el futuro facilitará la identificación de las fronteras de los elementos y así eliminar las líneas difusas. Esto se realizó mediante la función *binarizar_por_umbral_offset*⁴, que aplica la binarización de acuerdo al histograma de la imagen luego de la mejora. En la Fig. 5.41a, se puede apreciar que hay dos picos de valores, uno cercano a cero que corresponde a lo más oscuro o sea el menisco y el siguiente que inicia en el valor 150 que corresponde a la línea de aforo. Por consiguiente, la función analiza el histograma, busca el segundo mayor pico de intensidad, en este caso 150, y agrega un offset para seleccionar dicho valor y binarizar la imagen. En la Fig. 5.42, se pueden apreciar cómo en los tres procesos las imágenes en este momento del proceso se encuentran píxeles únicamente totalmente negros y blancos.



(a) Sin recortar.



(b) Sin mejorar contraste.



(c) Proceso completo.

Figura 5.42. Imágenes binarizadas.

En esta etapa, se puede apreciar la importancia de recortar la imagen y de mejorar el

⁴La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 265.

contraste. En la Fig. 5.42c, se puede visualizar sin ningún problema las zonas que corresponden al menisco y a la línea de aforo, separadas por una franja blanca que es el agua. La irregularidad de las líneas se presenta por la resolución de la cámara, la cual se puede mejorar al cambiarla por una con mayores capacidades. Con respecto a la imagen sin recortar, se puede observar que la imagen posee muchos elementos blancos que constituyen las zonas más claras de la imagen, pero estos están dispersos y no se puede determinar o diferenciar el menisco y la línea de aforo. Finalmente, la Fig. 5.42b corresponde al resultado de la binarización sin mejorar el contraste. Al estar estos valores concentrados en un corto rango de intensidades (Fig. 5.40a), hay píxeles del agua con una intensidad muy cercana al menisco o línea de aforo lo que hace que estos se binaricen de color negro, perdiendo así la forma del menisco y la línea de aforo.

Identificación de distancia del menisco

Una vez realizado el preprocesamiento, es momento de identificar la distancia entre el menisco y la línea de aforo. Esto se realiza mediante las dos etapas indicadas en la Fig. 5.35. Durante la descripción de esta etapa solo se mostrarán los resultados del flujo de trabajo del proceso completo, ya que es el que muestra resultados de interés y válidos en esta etapa.

5. Segmentación por detección de bordes

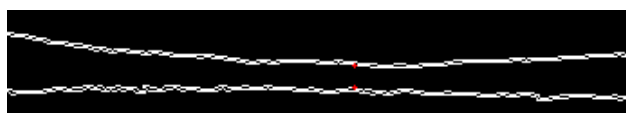
En esta etapa se busca identificar los píxeles que constituyen los bordes, ya que estos son los que interesa conocer para determinar la cercanía del menisco con la línea de aforo. La implementación de este proceso se realizó en la función *detectar_bordes_horizontales*⁵. Este proceso se realiza mediante el siguiente proceso:

- Detección de bordes: se aplica un filtro Sobel, que es un operador de convolución que resalta los cambios de intensidad en una imagen, en el eje y para resaltar los bordes horizontales.
- Umbralización: se aplica una umbralización al gradiente vertical obtenido con el filtro Sobel, dejando una figura con los bordes en blanco y el resto en negro.
- Encontrar contornos: Se encuentran todos los contornos de la imagen binarizada con los bordes horizontales para identificar la cantidad de líneas y determinar el estatus del menisco.

⁵La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 175.

- Dibujar contornos: Se crea una nueva imagen con los contornos identificados.
- Contar contornos: Se cuentan la cantidad de contornos para determinar el estatus del menisco.

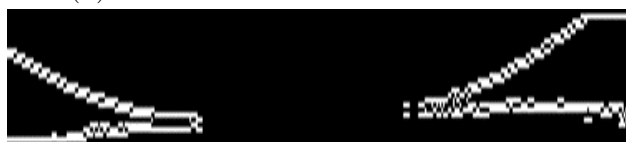
Después de realizar este proceso, se esperan tres posibles resultados o estados del menisco: menisco lejano de la línea de aforo, menisco casi tocando la línea de aforo y menisco tocando la línea de aforo. A partir de estos resultados se toman distintas decisiones. Si el menisco se encuentra lejano o muy cercano, el sistema solo identificará dos contornos y procederá a medir la distancia entre los elementos. Si hay más de dos contornos, el sistema omite el paso de medir la distancia entre ellos y da un mensaje indicando que el menisco ya se encuentra sobre la línea de aforo.



(a) Gran distancia entre menisco y línea de aforo.



(b) Menisco cercano a la línea de aforo.



(c) Menisco tocando la línea de aforo.

Figura 5.43. Resultado esperado después de la identificación de bordes.

6. Identificar distancia mínima entre bordes

Si hay dos contornos, existen dos posibilidades. La primera es que se encuentren separados, como se muestra en la Fig. 5.43a, donde el menisco no toca la línea de aforo. En este caso, se procede a emplear la función *encontrar_distancia_y_colorear*⁶, que se encarga de recorrer los dos contornos más cercanos y comparar las coordenadas en y de los pares en las mismas coordenadas x de ambos contornos. Una vez identificados los dos puntos más

⁶La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 203.

cercanos, guarda la distancia en un mensaje y colorea de rojo los píxeles más cercanos, como se aprecia en la Fig. 5.43a. La otra opción con dos contornos es la mostrada en la Fig. 5.43c, en la cual hay dos contornos laterales hasta la zona de contacto. En este caso, se utiliza la función *calcular_porcentaje_vacio*⁷, que revisa si hay algún espacio en la imagen sin contornos, lo que confirma que verdaderamente está tocando o este se encuentra muy cerca de la línea de aforo. Lo que se calcula es el porcentaje del ancho de la imagen que posee dos contornos.

- Menor al 10 %: el menisco está a punto de tocar la línea de aforo.
- Entre el 40 % y el 10 %: el menisco está tocando la línea de aforo sin pasar por debajo en gran proporción.
- Mayor al 40 %: el menisco está tocando o por debajo de la línea de aforo.

En el caso de detectar más de dos contornos, también se utiliza la función *calcular_porcentaje_vacio* porque el resultado puede ser similar al de la Fig. 5.43c. Sin embargo, por otros aspectos, el programa puede detectar más contornos. Entonces, se vuelve a calcular el porcentaje de espacio en el eje x que cubren los n contornos identificados. Los porcentajes significan lo siguiente:

- Menor al 10 %: el menisco está a punto de tocar la línea de aforo.
- Entre el 40 % y el 5 %: el menisco está tocando la línea de aforo sin pasar por debajo en gran proporción.
- Mayor al 40 %: el menisco está tocando o por debajo de la línea de aforo.

5.3.3. Implementación de LabVIEW

La ejecución de las funciones de procesamiento de imágenes y control de los motores se realiza por medio de LabVIEW, ya que el laboratorio posee sus demás programas en esta plataforma y se desea seguir por la misma línea. La interfaz gráfica se separa en tres pestañas distintas (Fig. 5.44), la conmutación entre estos tres estados se realiza mediante un control y una estructura case.

1. Estado de espera: aquí no se realiza ninguna función.

⁷La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 354.

2. Captura de imagen: donde se capturan las imágenes con la cámara y se realiza el procesamiento de las imágenes.
3. Control de motores: donde se pueden controlar los motores y modificar la posición de la cámara.

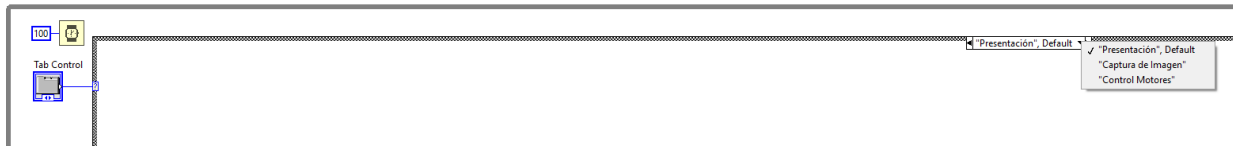


Figura 5.44. Tab Control empleado para variar entre las distintas modalidades del programa.

Estado de espera



Figura 5.45. Interfaz gráfica del modo de espera del programa de LabVIEW.

Como se mencionó, en este estado el programa no realiza ninguna función específica. Funciona como un estado de espera para cuando el usuario se encuentra preparando otros detalles de la calibración. Posee un interruptor para finalizar el programa, el cual es recomendado usar antes que el *stop* de LabVIEW para evitar desconfiguraciones del Arduino UNO.

Captura de imagen

En esta sección se realiza el control de la cámara para enviarle las señales de tomar una fotografía y procesarla para determinar el estado del menisco. En la Fig. 5.46 se puede apreciar la interfaz gráfica de esta modalidad. Posee los siguientes elementos:

- Espacio para colocar la denominación de la calibración. Tiene una etiqueta *INGRESE EL NOMBRE DE LA CALIBRACIÓN*.
- Un botón para indicar si se quiere guardar las imágenes del proceso, las que se mostraron en la sección sobre el algoritmo de visión artificial. Posee la etiqueta *GUARDAR IMÁGENES DEL PROCESO*.
- Botón de capturar la imagen para iniciar el proceso de capturas de imágenes. Posee la etiqueta *CAPTURAR IMAGEN*.
- Interruptor para decidir si la imagen capturada es correcta o si se quiere reiniciar el proceso.
- Botón para continuar con el proceso una vez tomada la decisión con el interruptor. Posee la etiqueta *CONTINUAR CON EL PROCESO*.
- Un indicador que se activa cuando está en la etapa de decisión, se puede apreciar encerrado en un cuadro azul en la Fig. 5.46.
- Un panel donde se muestra un mensaje del estatus del menisco. Tiene la etiqueta *ESTATUS DEL MENISCO*.
- Unos indicadores para visualizar el estado del menisco, se pueden apreciar encerrados en un cuadro rojo en la Fig. 5.46.

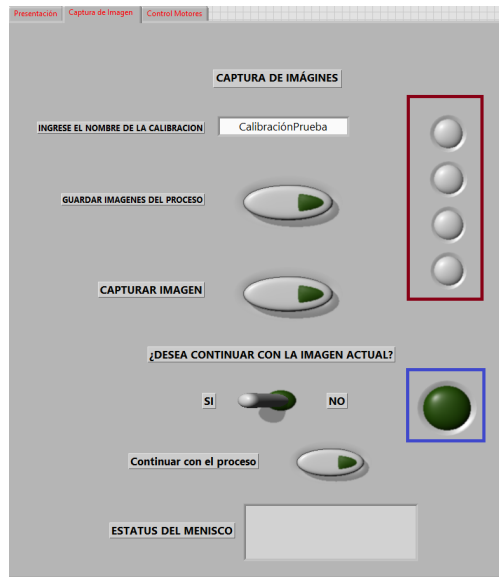


Figura 5.46. Interfaz gráfica del modo de captura de imágenes del programa de LabVIEW.

Para realizar la ejecución de las funciones de Python se utilizaron los bloques de la Fig. 5.47, que permiten ejecutar funciones de programadas en Python sin la necesidad de implementar lo mismo con la lógica de LabVIEW.

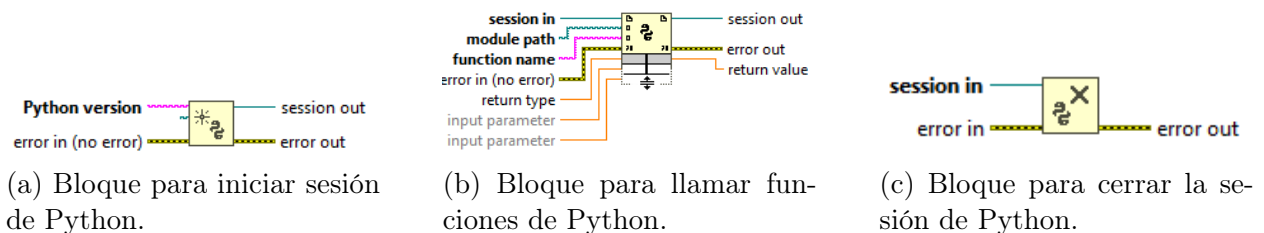


Figura 5.47. Bloques para integrar funciones de Python en LabVIEW.

A continuación, se explica el orden de ejecución de esta modalidad. La implementación en LabVIEW se puede apreciar en la Fig. 5.48:

1. El programa no realiza ninguna acción hasta que se presiona *CAPTURAR IMAGEN*. En el caso de no escribir ningún nombre de la calibración, aparecerá un mensaje de error ya que no se cuenta con una entrada esperada.
2. Una vez presionado el botón, se ingresa a la estructura de secuencia. En la primera secuencia se abre la comunicación con Python, indicando la versión que tiene instalada la computadora.

3. Se llama a la función *capturar_Imagen*⁸, la cual abre la imagen y permite capturarla presionando la tecla “s” del teclado y la guarda en una variable. Además, esta función revisa el archivo de registro en el cual se tiene almacenado el número de iteraciones que se han realizado en la calibración.
4. Se activa el indicador señalado en azul en la Fig. 5.46, donde se decide si continuar con el resto del proceso o terminar el proceso en este momento. Esta etapa finaliza al presionar *CONTINUAR CON EL PROCESO*.
5. Se llama a la función *ejecutar*⁹, la cual realiza todo el algoritmo de Visión Artificial antes explicado. Tiene una entrada que es el estado de *GUARDAR IMÁGENES DEL PROCESO* para indicarle si guardar o no las imágenes a través del algoritmo. Tiene como salida dos posibles mensajes:
 - La distancia entre los bordes es de: y ¹⁰.
 - El menisco está tocando la línea o sobre la línea de ajuste.
6. Se envía el mensaje descrito anteriormente a la función *guardar_linea_en_archivo*¹¹, la cual recibe la línea de texto y la guarda en un archivo .txt con la fecha y el número de iteración para llevar un registro del proceso. Además, actualiza el número de iteraciones actuales.
7. Se llama a la función *establecer_alarma*¹², la cual toma el mensaje generado del estado del menisco, lo transforma en un número y lo envía a las funciones lógicas del final del flujo para establecer alertas, señaladas con un cuadro rojo en la Fig. 5.46, según la cercanía del menisco con la línea de aforo. Tiene la siguiente nomenclatura:
 - Rojo: si el menisco está tocando la línea de aforo o se encuentra por debajo de la línea de aforo. Un porcentaje sin contornos mayor al 40 %.
 - Naranja: si el menisco está tocando la línea de aforo. Se puede apreciar la interfaz gráfica de este caso en la Fig. 5.49. Un porcentaje sin contornos entre el 10 % y 40 %.

⁸La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 301.

⁹La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 387.

¹⁰Corresponde a la distancia en píxeles entre la línea de aforo y el menisco.

¹¹La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 485.

¹²La implementación en Python se encuentra en el Apéndice C, línea 518.

- Amarillo: si el menisco se encuentra sumamente cerca de la línea de aforo, que el porcentaje sin dos contornos en el eje x sea menor al 10% o la distancia entre los dos contornos sea de 0 píxel.
- Verde: si la distancia entre el menisco y la línea de aforo es mayor a 1 píxel. En otras palabras, el menisco todavía se encuentra separado de la línea de aforo de forma clara.
- Negro: en el caso de que se capture una imagen donde no se identifique ningún contorno dado que se seleccionó una sección equivocada. También se activa cuando se encuentran muchos contornos.

8. Se muestra el mensaje de estado y la alarma dependiendo del estatus del menisco. En la Fig. 5.50 puede apreciarse un ejemplo del registro.

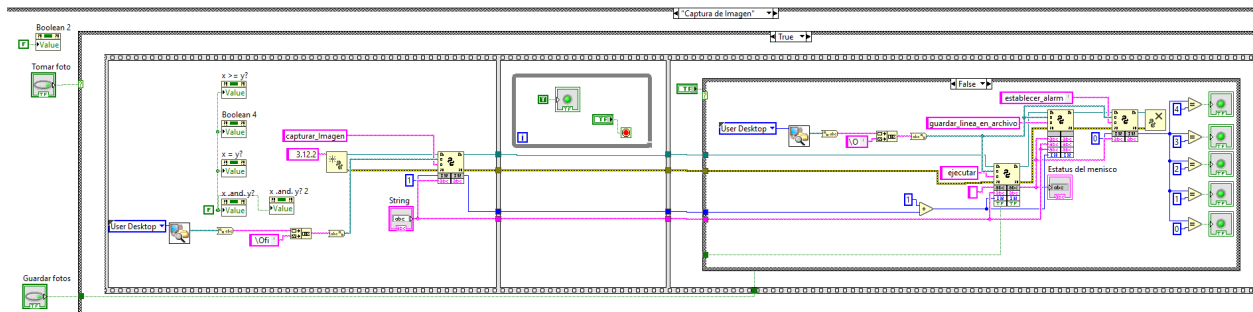


Figura 5.48. Implementación en LabVIEW del proceso de Visión Artificial y creación del registro.

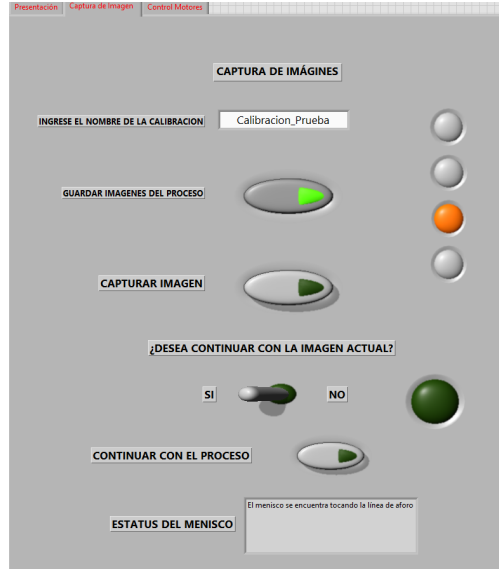


Figura 5.49. Interfaz gráfica cuando el menisco se encuentra a 12 píxeles de la línea de aforo.

```
Laboratorio Costarricense de metrología LCM.  
Registro de uso del Sistema Identificador de Menisco (SIM).  
La primer iteración se ha realizado el:2024-05-15 13:40:40  
Total de calibraciones: 24  
[2024-05-15 13:40:40] Iteración numero:1_La distancia entre los bordes es de: 4 .  
[2024-05-15 13:41:30] Iteración numero:2_El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.  
[2024-05-15 13:42:19] Iteración numero:3_El menisco se encuentra tocando la línea de aforo.  
[2024-05-15 13:43:27] Iteración numero:4_El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.  
[2024-05-15 13:47:03] Iteración numero:5_El menisco se encuentra tocando la línea de aforo.
```

Figura 5.50. Ejemplo de las líneas guardadas en el registro.

En el Apéndice E.3 se puede apreciar el vídeo de funcionamiento de esta sección.

Control de motores

En esta sección se realiza el control de los motores para variar la posición de la cámara con el fin de poder identificar meniscos de distintos recipientes o para otras aplicaciones que el personal de laboratorio quiera realizar. En la Fig. 5.51 se puede apreciar la interfaz gráfica de esta modalidad posee los siguientes elementos.

- Botón para dirección descendente indicado por una imagen de una cámara y una flecha hacia abajo.
- Botón para dirección ascendente indicado por una imagen de una cámara y una flecha hacia abajo.

- Una perilla para establecer la velocidad de desplazamiento.
- Botón para dar la instrucción de avance en la dirección y velocidad especificada.

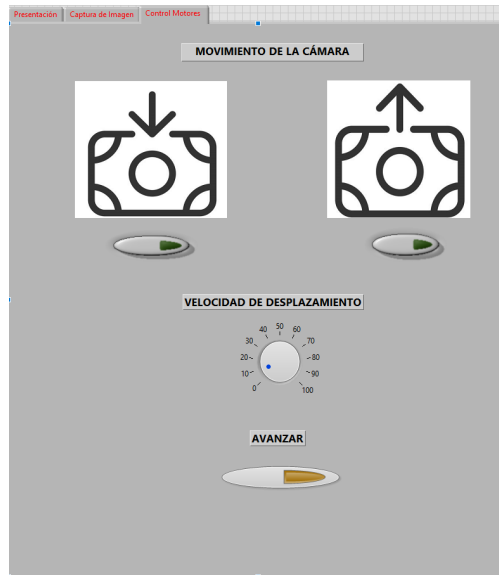


Figura 5.51. Interfaz gráfica del panel de control de la posición de la cámara.

En la Fig. 5.52 se puede apreciar el diagrama de flujo del funcionamiento del funcionamiento de esta sección. A continuación, se explica el funcionamiento de cada etapa y como se cambia entre ellas.

- **¿DIRECCIÓN?**: esta es una etapa de transición rápida que revisa si hay una dirección especificada.
- **NO MOVER**: se activa si no se tiene ninguna dirección seleccionada o si se tienen ambas direcciones seleccionadas ya que esto no es posible.
- **ESPERAR AVANCE ARRIBA**: se activa cuando se indica que se quiere mover hacia arriba, se queda en este estado de no movimiento hasta que se le da la instrucción de avance o se desactiva la dirección. Cabe recalcar que solo se mueve si no se detecta nada por el sensor superior.
- **MOVER HACIA ARRIBA**: en este estado la cámara se mueve de forma ascendente mientras se mantenga presionado el botón de avanzar, no se desactive la dirección y el sensor superior no detecte la cámara.

- **ESPERAR AVANCE ABAJO:** se activa cuando se indica que se quiere mover hacia abajo, se queda en este estado de no movimiento hasta que se le da la instrucción de avance o se desactiva la dirección. Cabe recalcar que solo se mueve si no se detecta nada por el sensor inferior.
- **MOVER HACIA ABAJO:** en este estado la cámara se mueve de forma descendente mientras se mantenga presionado el botón de avanzar, no se desactive la dirección y el sensor inferior no detecte la cámara.

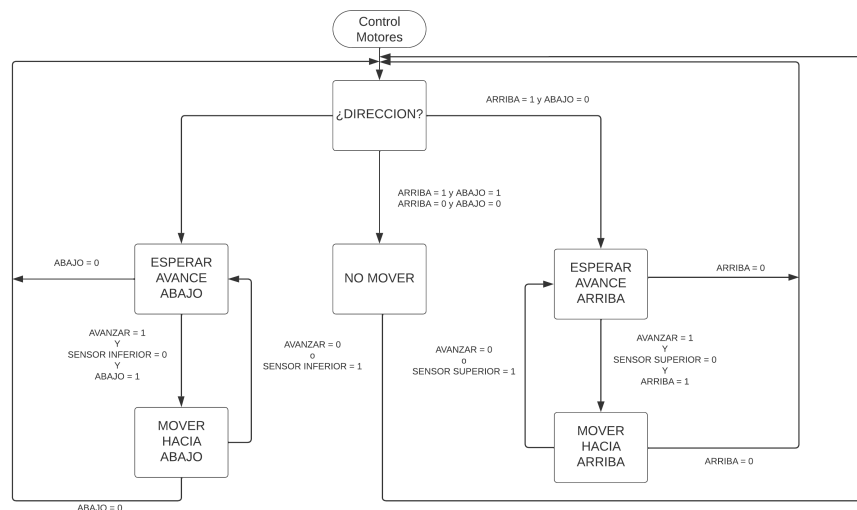


Figura 5.52. Diagrama de flujo de la lógica de control de posición de la cámara.

Para realizar el control de los motores y leer el estado de los sensores inferior y superior se utilizó un Arduino Uno como se especificó anteriormente. A continuación, se muestran las conexiones de cada pin:

- Digital 2: Pasos para el módulo x.
- Digital 3: Pasos para el módulo y.
- Digital 5: Dirección del módulo x.
- Digital 6: Pasos para el módulo y.
- Digital 8: Enable para los motores.
- Digital 12: Estado del sensor superior.

- Digital 13: Estado del sensor inferior.

Para enviar las instrucciones y leer la información desde LabVIEW se empleó la biblioteca LINX y los módulos mostrados en la Fig. 5.53, los cuales fueron usados en la implementación de esta solución.

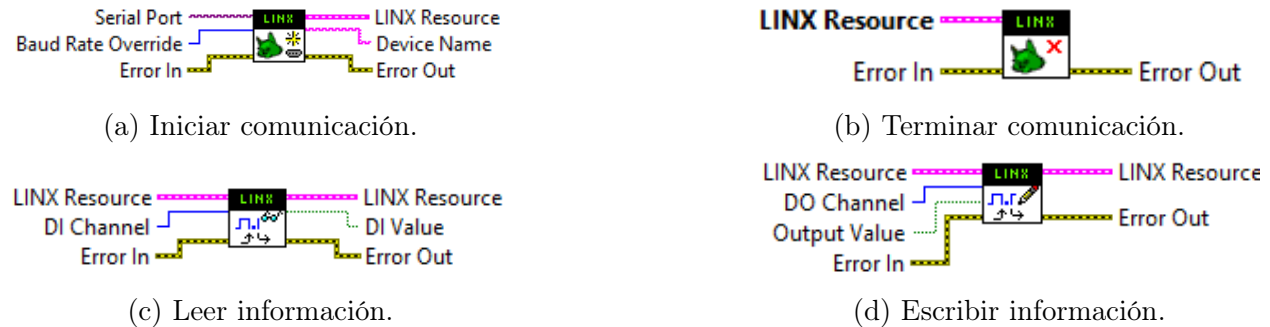


Figura 5.53. Nodos de la biblioteca LINX de LabVIEW utilizados en el control de la posición de la cámara.

▪ MOVER HACIA ABAJO/ARRIBA

Solo se realizará la descripción de los bloques con el movimiento descendente, ya que la implementación de ambos es igual, solo que se intercambian los pines antes mencionados. En el movimiento descendente se emplean los pines: 2, 3, 5, 6, 8 y 13. El movimiento ascendente solo intercambia el pin 13 por el 12.

En la Fig. 5.54 se puede apreciar la implementación en LabVIEW del movimiento descendente. A este estado se ingresa cuando solamente se tiene activada la dirección Abajo y el *Digital Read* del pin 13 indica que no hay nada. La *Secuencia lineal* está compuesta por dos pasos. En el primero, se le indica avanzar a los pines 3 y 2, pero con la dirección en *False* para la dirección descendente. En el caso del movimiento ascendente, a estos dos pines se les envía un *True*. Después de que finalice el tiempo del *wait*, pasa al siguiente paso que desactiva los pines de paso durante el mismo tiempo de la secuencia anterior. Esta conmutación entre activar y desactivar el pin de paso es lo que simula los pasos de los motores paso a paso, y así avanza el mismo. Cabe recalcar que los *wait* en cada etapa de la secuencia son los que determinan la velocidad del movimiento. Mientras más pequeño sea el valor, más rápida será la permutación entre los dos estados y, por consiguiente, mayor será la velocidad de desplazamiento. Este valor se selecciona con la perilla que va de 0 - 100, siendo 0 la velocidad más baja y 100 la más rápida. El valor se pasa por un procesamiento para invertir los valores.

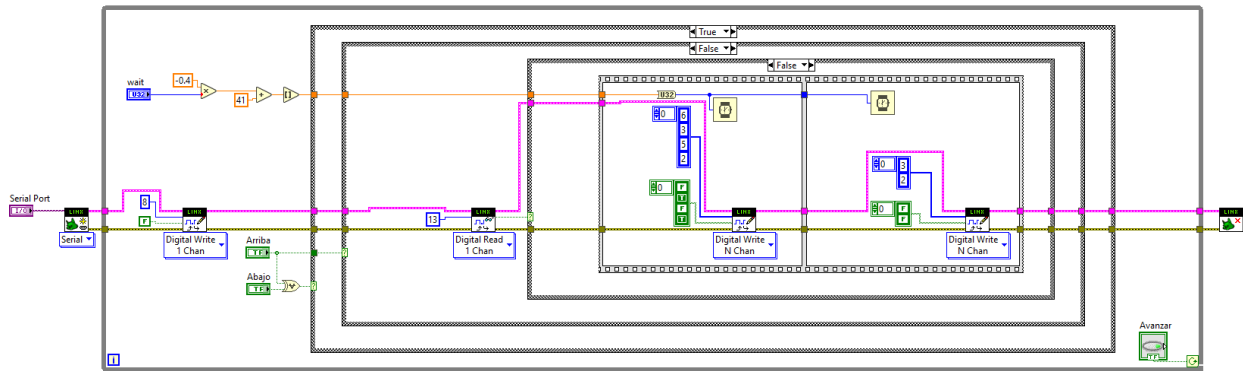


Figura 5.54. Implementación en LabVIEW del movimiento hacia abajo.

Nótese en la Fig. 5.54 que la estructura *case* más interna decide su estado a partir del valor leído en el pin 13 para el movimiento descendente (en el caso del ascendente, el pin 12). Cuando este sensor detecta un objeto, cambia al estado mostrado en la Fig. 5.55, el cual ahora es un bloque vacío que indica que el motor no se puede mover más hacia abajo/arriba.

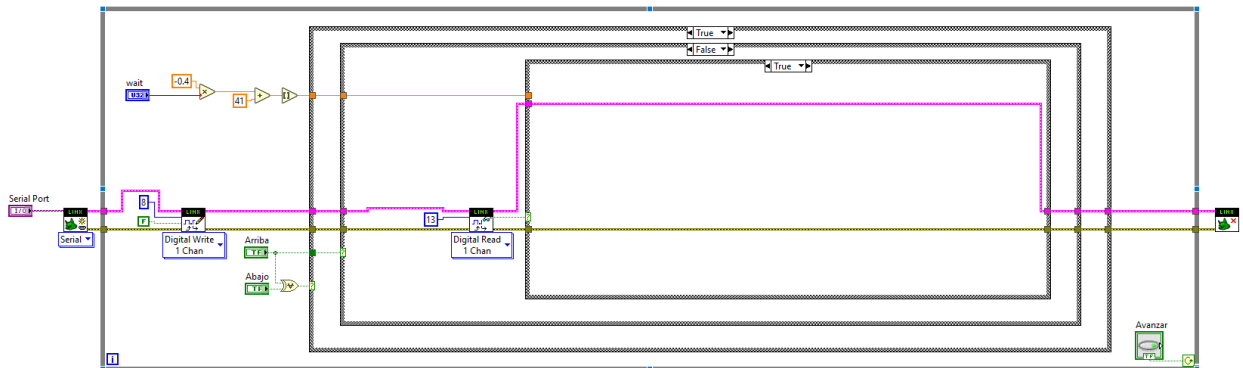


Figura 5.55. Implementación en LabVIEW del movimiento hacia abajo cuando el sensor detecta un objeto.

El último caso es el bloque *NO MOVER* de la Fig. 5.52, el cual se presenta cuando se tienen ambas direcciones en *True* o *False*. Lo que sucede en este caso se aprecia en la Fig. 5.56, en la cual se envía un *False* a todos los pines de los motores para bloquear la posición actual.

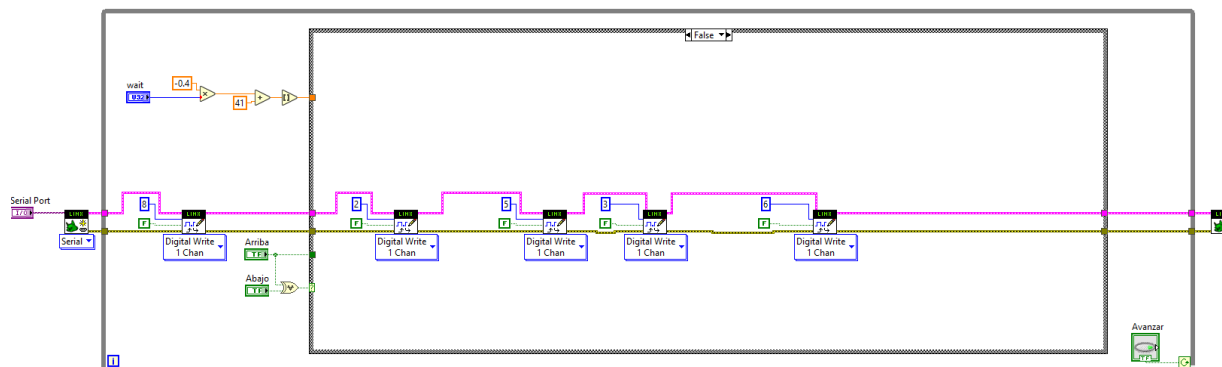


Figura 5.56. Implementación en LabVIEW del estado de bloqueo de motores.

En el Apéndice E.3 se puede apreciar el vídeo de funcionamiento de esta sección.

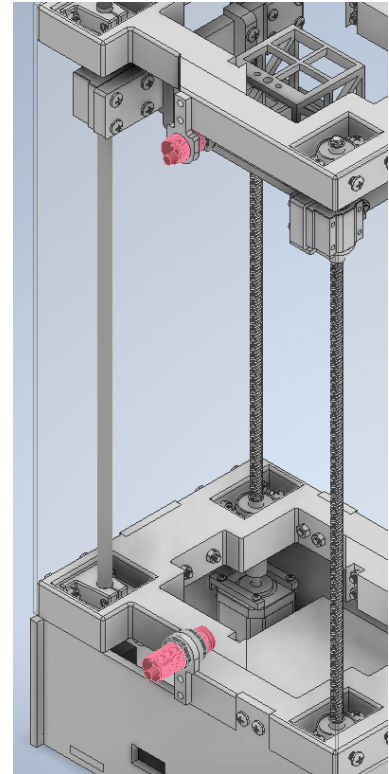
Aspectos varios de la implementación en LabVIEW

- **Sensores de final de carrera**

La necesidad del uso de sensores como final de carrera para el rango de movimiento de la cámara se identificó una vez iniciada la programación en LabVIEW, cuando se reconoció el problema de dejar presionado el avance en una dirección y llegar a los límites, lo que podría ocasionar daños en los motores. Se analizaron distintas opciones para este sensor, entre las cuales se encuentran: sensores de contacto, sensores ultrasónicos que miden la distancia, sensores infrarrojos que miden distancia, y sensores de presencia ausencia infrarrojos. El primero no se empleó debido a la dificultad de acomodar el contacto con una zona de la jaula de la cámara para detenerlo cerca de los límites. Los sensores que miden distancia resultaban útiles para esta aplicación, pero al usar un sensor digital de presencia-ausencia se eliminan los errores de distancia y se simplifica la implementación al solo leer dos posibles valores. El sensor digital seleccionado fue el E18-D80K (Fig. 5.57a), el cual es fácil de montar y posee una gran distancia de detección. Tiene la ventaja de que se puede leer sus datos con el CNC Shield y la energía que necesita para funcionar se puede obtener del mismo sin la necesidad de utilizar una nueva fuente de energía. Además, posee un potenciómetro con el cual se puede modificar su rango de detección de 3 cm a 80 cm. Para acceder a su hoja de datos, leer el Anexo A. Además, se diseñó un soporte para fijarlo a la plataforma mecánica (Fig. 5.57b).



(a) Sensor infrarrojo A18-D80K.



(b) Proceso completo.

Figura 5.57. Detalles del uso del sensor Infrarrojo.

■ Conexión del Arduino a LabVIEW

Se recomienda leer el Apéndice D.7, donde se explica en detalle el proceso para programar, configurar y utilizar el Arduino UNO en LabVIEW.

6.1. Análisis del Factor de Seguridad

Un aspecto fundamental al momento de realizar la implementación de una estructura mecánica es la determinación del factor de seguridad para el sistema, o al menos, las piezas que son consideradas los puntos críticos del sistema ya sea por su ubicación, porque reciben la mayor carga o mayor estrés, o porque sirven de sujeción para un elemento importante. A continuación, se muestra el análisis del Sistema de Movimiento Vertical antes expuesto, más específicamente el sistema de sujeción de la cámara que se aprecia en la Fig. 6.1, el cual es la parte de mayor importancia en el sistema ya que guarda y sostiene la cámara y es el encargado de garantizar la seguridad de la misma.

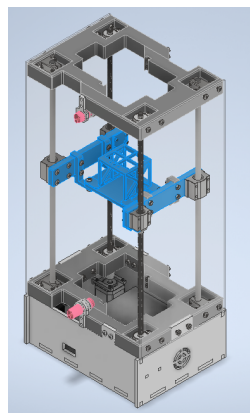


Figura 6.1. Sistema de sujeción de la cámara.

6.1.1. Configuración del entorno de análisis

Para realizar el análisis se utilizó la herramienta de análisis estático de Autodesk Inventor. El primer paso a realizar antes de la simulación es la determinación de los materiales que componen el elemento a analizar. Anteriormente se explicó que todas las piezas se manufacturaron en impresión 3D con PLA, el cual tiene las características que aparecen en la Tabla 6.1. Estas son las características necesarias para hacer un análisis estático. En la Fig. 6.2 se puede apreciar la configuración del material en el *software*; cabe recalcar que la densidad corresponde al 40 % de la teórica, ya que las piezas fueron impresas a un 40 %.

Tabla 6.1. Propiedades Mecánicas del Ácido Poliláctico (PLA). [43], [48]

Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Densidad [g/cm ³]	Límite de Elasticidad [Mpa]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Módulo Cortante [GPa]
1,420	0,380	1,420	30,000	47,200	2,4



Figura 6.2. Configuración del PLA en Autodesk Inventor.

Lo siguiente es la determinación de las restricciones fijas del sistema a analizar. En la Fig. 6.3 se pueden apreciar las dos caras del sistema que tienen esta característica, las cuales están en contacto con los tornillos sin fin y la tuerca de avance, impidiendo el desplazamiento en este eje. Las caras en contacto con las plataformas de la barra lisa no se fijaron, ya que estos elementos no ofrecen resistencia.

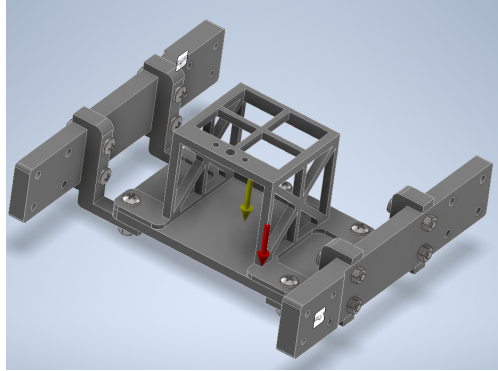
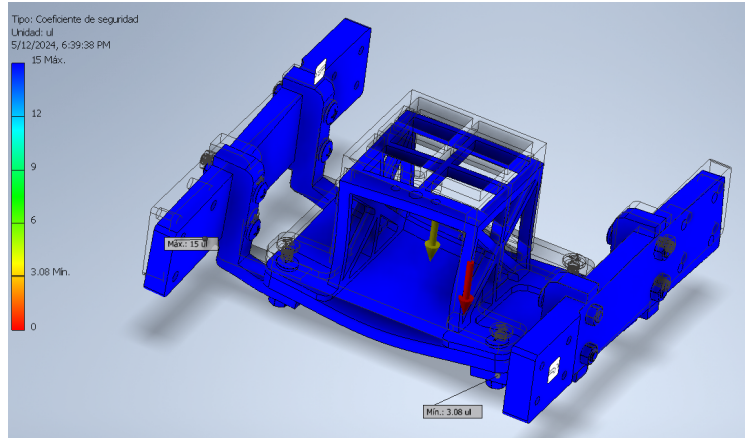


Figura 6.3. Configuración de elementos para el análisis de elementos finitos del sistema de sujeción de la cámara.

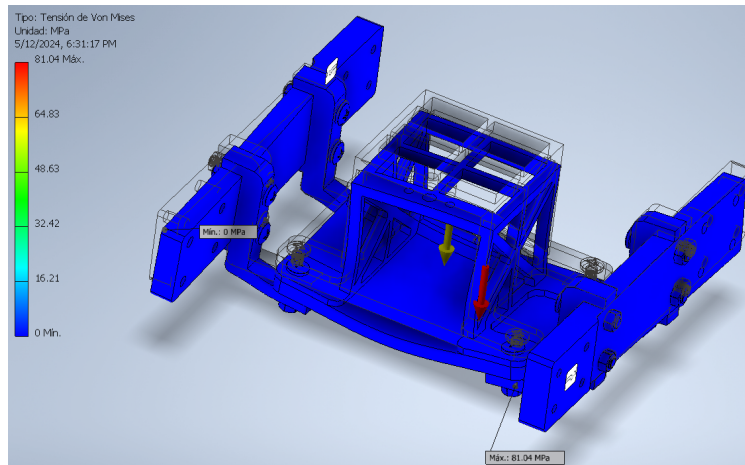
El siguiente elemento a colocar es la gravedad la cual se aprecia con la flecha roja apuntando en la dirección en la que tiene que ir, la gravedad posee un valor de $9810,000 \text{ mm/s}^2$. Finalmente, se aplicó la fuerza resultante del peso de la cámara y la lente empleadas, que tienen un peso de $0,580783 \text{ g}$, que corresponden a una fuerza de $5,6974 \text{ N}$. La posición de aplicación de esta fuerza en el sistema está representada por el indicador amarillo en la Fig. 6.3. Posteriormente, se le indica al *software* la instrucción de simular para obtener resultados.

6.1.2. Resultados obtenidos y análisis

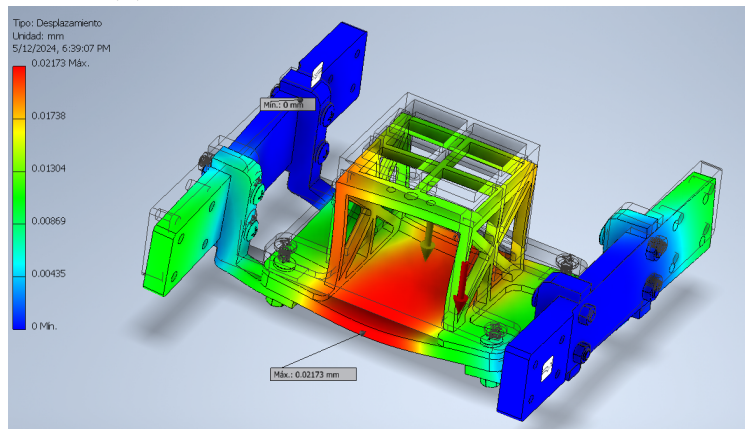
Después de realizar la simulación, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 6.4, los cuales corresponden al esfuerzo de Von Mises, el desplazamiento experimentado y el factor de seguridad. En la Fig. 6.4b se puede apreciar que el estrés máximo experimentado es de 84.04 MPa , el cual corresponde a los experimentados por los pernos que unen la jaula, base de Jaula y lo une con el resto de la estructura. Mientras tanto, el desplazamiento máximo se encuentra en el centro de la base de la jaula, siendo de $0,02173 \text{ mm}$, más específicamente en el centro de la misma y en la cara frontal.



(a) Factor de seguridad del sistema de sujeción de la cámara.



(b) Resultados de la Tensión de Von Mises.



(c) Desplazamiento experimentado por el sistema de sujeción de cámara.

Figura 6.4. Resultados obtenidos de la prueba de elementos finitos.

Para determinar si este desplazamiento afectará la inclinación de la cámara, se considerará el caso más extremo. En el primero, las partes laterales no se desplazan en absoluto, y en el segundo, la parte trasera tampoco se desplaza. Además, se asumirá que el desplazamiento máximo ocurre en la cara frontal para calcular la máxima distancia posible. Estas dos situaciones se pueden apreciar en la Fig. 6.5. El cálculo de los grados se puede apreciar en las Ecs. 6.1 y 6.2, donde se observa que el resultado está muy por debajo del rango permitido en las especificaciones, que es de 1° . Si se calcula el valor máximo entre estos casos extremos y el valor permitido de 1° , se encuentra que la inclinación experimentada está 47,6 veces por debajo del máximo permitido.

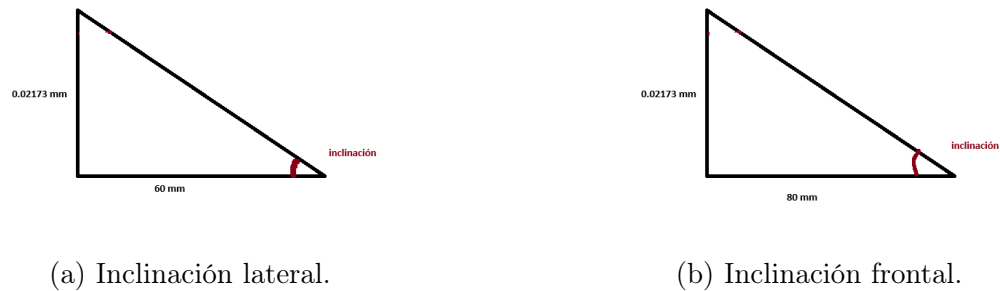


Figura 6.5. Casos extremos de inclinación en el sistema de sujeción de la cámara.

$$\text{Inclinación}_{\text{lateral}} = \arctan \frac{0,02173}{60} = 0,021^\circ \quad (6.1)$$

$$\text{Inclinación}_{\text{frontal}} = \arctan \frac{0,02173}{80} = 0,015^\circ \quad (6.2)$$

$$F_{ang} = \frac{1}{0,021} = 47,6 \quad (6.3)$$

Con respecto al factor de seguridad que se muestra en la Fig. 6.4a, se observa que el valor máximo experimentado por el sistema es de 3,08, lo cual está 0,508 por encima del valor deseado. Esto garantiza la seguridad de la cámara utilizada y permite el uso de ópticas con un mayor peso.

6.2. Análisis del torque necesario de los motores

En esta sección se analizará si el torque que proporcionan los motores Nema 17, que es de 0,46 Nm, es adecuado. Primero, es importante determinar la masa que el sistema mueve, que incluye el sistema de sujeción más la cámara, con un valor de 0,8307 kg, lo que corresponde a una fuerza experimentada de 8,1491 N. Para esta validación, se asume que el movimiento lo proporciona un único tornillo sin fin y motor. Las ecuaciones que determinan el torque experimentado por el tornillo sin fin en la subida y bajada están dadas por las Ecs. 6.4 y 6.5

$$T_s = \frac{F \cdot d_n}{2} \left(\frac{l + \pi f d_n}{\pi d_n - fl} \right) \quad (6.4)$$

$$T_b = \frac{F \cdot d_n}{2} \left(\frac{-l + \pi f d_n}{\pi d_n - fl} \right) \quad (6.5)$$

Donde:

- F: Fuerza experimentada. $F = 8,1491$.
- d_n : diámetro del tornillo sin fin. $d_n = 8$ mm.
- l: avance del tornillo. $l = 8$ mm.
- f: fricción del tornillo sin fin. $f = 0,23$

Entonces:

$$T_s = \frac{8,1491 \cdot 0,08}{2} \left(\frac{0,08 + \pi 0,23 \cdot 0,08}{\pi \cdot 0,08 - 0,23 \cdot 0,08} \right) = 0,1928 \text{Nm} \quad (6.6)$$

$$T_b = \frac{8,1491 \cdot 0,08}{2} \left(\frac{-0,08 + \pi 0,23 \cdot 0,08}{\pi \cdot 0,08 - 0,23 \cdot 0,08} \right) = -0,031 \text{Nm} \quad (6.7)$$

Se observa que el valor del torque para la bajada, como se muestra en la Ec. 6.7, es negativo, lo que indica que no se necesita fuerza del motor para realizar este movimiento. Mientras tanto, se aprecia que el torque necesario para el movimiento ascendente, como se muestra en la Ec. 6.6, es de 0,1928 Nm, lo que resulta en un factor de seguridad del motor calculado en la Ec. 6.8 es de 2,4. Esto indica que con un único motor se puede mover el sistema de movimiento vertical, y si se emplean dos motores con la carga repartida en dos tornillos de avance, este valor aumenta, lo que deja el sistema lo suficientemente dimensionado para mover cámaras diferentes ya sean más grandes o pequeñas en futuras actualizaciones.

$$F_{\text{motor}} = \frac{0,46}{0,1928} = 2,386 \quad (6.8)$$

6.3. Análisis del comportamiento del programa de visión artificial

En esta sección se documenta la primera validación que verifica la congruencia y repetibilidad de los resultados del programa de visión artificial. La prueba consistió en lo siguiente: se utilizaron un grupo de imágenes entre las cuales se encuentran los siguientes estados:

- Tocando o por debajo de la línea de aforo: Estatus 0.
- Menisco tocando la línea de aforo: Estatus 1.
- A punto de tocar: Estatus 2.
- Separado claramente: Estatus 3.
- Imagen incorrecta: Estatus 4.

Para realizar la prueba, se ingresaron directamente las imágenes a las funciones del programa, mezclando las cinco opciones anteriores. Luego, los resultados fueron revisados por los integrantes del laboratorio para validar las salidas del programa. En total, se utilizaron 10 imágenes para el experimento. Las pruebas se llevaron a cabo en dos computadoras diferentes:

- Computadora A: Computador de escritorio con un procesador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400 @ 2,60GHz 2,59 GHz.
- Computadora B: Laptop con un procesador: 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450H 2,00 GHz.

El enlace a las imágenes utilizadas en la prueba y los resultados se puede encontrar en el Apéndice E.1. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 6.2 donde se comparan los resultados esperados con los obtenidos en las dos computadoras. Se pudo confirmar que el programa muestra el mismo comportamiento independientemente del dispositivo utilizado para ejecutarlo. Sin embargo, es importante destacar que este ejercicio solo valida que el

programa responde correctamente según lo esperado, y se necesitarán realizar calibraciones para determinar si la solución es capaz de dar resultados congruentes con lo esperado de esta prueba.

Tabla 6.2. Resultados obtenidos en la prueba de comportamiento esperado en el programa de visión.

Imagen	Estado esperado	Computadora A	Computadora B	Concordancia
1	4	4	4	Sí
2	3	3	3	Sí
3	3	3	3	Sí
4	1	1	1	Sí
5	2	2	2	Sí
6	4	4	4	Sí
7	2	2	2	Sí
8	0	0	0	Sí
9	1	1	1	Sí
10	0	0	0	Sí

6.4. Pruebas de calibraciones en matraces aforados de 100 mL.

6.4.1. Determinación de la resolución del SIM

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al realizar calibraciones de matraces aforados de un valor nominal de 100 mL con el uso del Sistema Identificador de Menisco (SIM). Se llevaron a cabo la calibración de tres matraces distintos para constatar la reproducibilidad de los resultados y verificar que el volumen y la incertidumbre expandida obtenidas al realizar este proceso cumpliera con los estándares del laboratorio. Durante las pruebas, se siguió el proceso y los requisitos descritos en la sección 2.2 mostrada en el marco teórico.

Cabe recalcar que los datos de los matraces 1 y 2 se realizaron con la computadora B descrita en la validación anteriores, mientras que la calibración del matraz C se realizó con una de las computadoras pertenecientes al Laboratorio de Volumen. Primero, se determinó la resolución del SIM, el cual consiste en el cambio mínimo de volumen que puede percibir el sistema. Posteriormente, se calculó la incertidumbre debida al menisco. Para leer en mayor detalle en que consiste esta incertidumbre y como se define ir a la sección 2.3.1 de este documento. En lugar de realizar las cinco mediciones habituales del menisco tocando la línea

de aforo que es como se realiza en el procedimiento usual, se realizaron 10 mediciones en cada matraz, agrupadas en 5 repeticiones por matraz. Primero se realizaron las mediciones cuando el SIM identificó que el menisco se encontraba a punto de tocar la línea de aforo (Estatus 2), es decir que este se encuentra muy cerca pero no tocando la línea de aforo como se aprecia en la Fig. 6.6a. Después se sustrajo más volumen hasta que el sistema indique que el menisco se encuentra tocando la línea de a (Estatus 1) como se aprecia en la Fig. 6.6b. El cambio entre estos dos estados se tomará como el cambio de volumen mínimo que puede identificar la solución y por consiguiente la resolución del sistema.

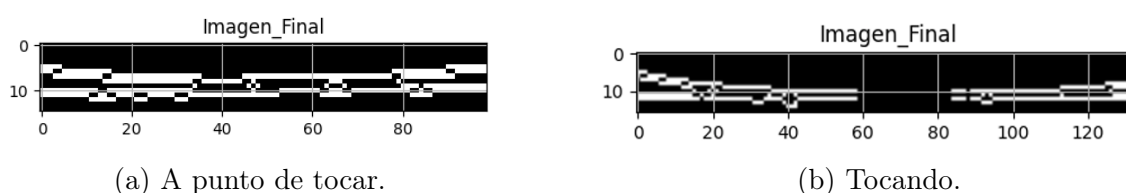


Figura 6.6. Estados del menisco empleados para determinar la resolución del SIM

Tabla 6.3. Diferencia en volumen captadas por el SIM entre es Estatus 2 y 1.

Repeticion	Estatus	Matraz A (mL)			Matraz B (mL)			Matraz C (mL)		
		2	1	Dif	2	1	Dif	2	1	Dif
1		100,093	100,09	0,003	100,042	100,031	0,011	100,089	100,082	0,007
2		100,114	100,105	0,009	100,046	100,041	0,005	100,099	100,091	0,008
3		100,122	100,106	0,016	100,045	100,036	0,009	100,094	100,084	0,010
4		99,976	99,970	0,006	100,040	100,032	0,008	100,093	100,088	0,005
5		99,987	99,983	0,004	100,037	100,023	0,014	100,097	100,092	0,005

En la Tabla 6.3 se pueden apreciar los volúmenes al especificar el Estatus 2 y cuando se presentó el Estatus 1, para estudiar todos los datos que llevaron a estos valores es necesario leer el Apéndice E.2. Estos volúmenes se calcularon mediante la Ec. 2.1.

Actualmente, en el laboratorio se utiliza una altura de 0,1 mm para definir la incertidumbre debida a la resolución de visualización del menisco, este valor fue definido en un experimento realizado en el pasado y fuera del alcance de este proyecto, se considera como valor de referencia para las pruebas a realizar. Las alturas correspondientes a las diferencias se calcularon de la siguiente manera:

$$h = \frac{4V_R}{\pi d^2} \quad (6.9)$$

Donde d es el diámetro interno en la zona de la línea de ajuste, para los tres matraces corresponde a 14 mm. En la Tabla 6.4 se puede apreciar la distancia del menisco a la línea de

aforo de cada una de las diferencias detectadas. Se puede apreciar que en los tres matraces se obtiene una altura cercana a 0,5 mm, de hecho el promedio entre los tres corresponde a $(0,052 \pm 0,006)$ mm de distancia el cual disminuye la resolución para esta incertidumbre en un 52 % con respecto al valor actual utilizado. El impacto en la disminución de la resolución del proceso se apreciará mejor al analizar la incertidumbre final expandida.

Tabla 6.4. Distancia entre el menisco y la línea de aforo promedio identificado por el SIM en el Estatus 2 y 1.

Repetición	Matraz A		Matraz B		Matraz C	
	Dif (mL)	h (mm)	Dif (mL)	h (mm)	Dif (mL)	h (mm)
1	0,003	0,019	0,011	0,071	0,007	0,045
2	0,009	0,058	0,005	0,032	0,008	0,050
3	0,016	0,104	0,009	0,058	0,010	0,065
4	0,006	0,039	0,008	0,052	0,005	0,035
5	0,004	0,026	0,014	0,089	0,005	0,032
Promedio		0,049		0,061		0,046
Promedio general			0,052 mm			
Incertidumbre			0,006 mm			

Antes de iniciar con el análisis de los resultados de las calibraciones realizadas con el SIM mediante una entrevista con el cliente se obtuvieron los valores estándar obtenidos en calibraciones anteriores de cada uno de los matraces, estos son los siguientes valores:

- Matraz A: $(99,973 \pm 0,019)$ mL.
- Matraz B: $(100,046 \pm 0,020)$ mL.
- Matraz C: $(100,100 \pm 0,016)$ mL.

6.4.2. Resultados del Matraz A

En la Tabla 6.5 se aprecian los resultados obtenidos en la calibración del matraz A, donde se nota que el volumen medido es de 99,982 mL. La desviación de este valor respecto al valor estándar se puede apreciar en la Ec. 6.10, siendo solamente del 0,009 %, lo cual indica que el volumen obtenido en la calibración se asemeja a los resultados obtenidos por el laboratorio. Si se analiza un caso menos positivo, que es comparar el valor del volumen obtenido contra el valor nominal del balón aforado de 100 mL, se observa una desviación del 0,018 % del valor nominal, este cálculo se puede apreciar en la Ec. 6.11, cumpliendo el indicador y especificación

establecida de no tener una desviación mayor al 1 % en ambas comparaciones. De hecho, si se calcula la desviación del valor estándar con respecto al valor nominal, esta corresponde a un 0,027 %, demostrando que el valor obtenido del SIM disminuye la desviación en un factor de 1,5.

Tabla 6.5. Resultados obtenidos durante la calibración del matraz A.

X1 (g)	X2 (g)	Ta (°C)	HR %	P (Pa)	Tw (°C)	Masa real del agua (g)	Volumen a 20 °C (mL)
61,345	161,056	20,5	63	88000	20,18	99,710	99,986
61,345	161,039	20,3	64	87950	20,26	99,693	99,970
61,344	161,051	20	57	87930	20,26	99,705	99,983
61,345	161,052	20,4	60	87930	20,31	99,705	99,984
61,344	161,049	20,6	62	87920	20,47	99,703	99,985
Promedio						99,703	99,982
Desviación estándar						0,006	0,0064

Donde:

- X1: Masa del matraz en seco.
- X2: Masa del matraz con líquido.
- Ta: Temperatura del ambiente al momento de medir X2.
- HR: Húmeda relativa al momento de medir X2.
- P: Presión al momento de medir X2.
- Tw: temperatura del líquido contenido al momento de medir X2.

$$D_{1ref} = \frac{|99,973 - 99,982|}{99,982} \cdot 100 = 0,009 \% \quad (6.10)$$

$$D_1 = \frac{|100 - 99,982|}{100} \cdot 100 = 0,018 \% \quad (6.11)$$

$$F_{1disminucion} = \frac{0,027}{0,018} = 1,5 \quad (6.12)$$

Con respecto a la incertidumbre de este proceso se puede apreciar en la Tabla 6.6 que la incertidumbre expandida con el SIM corresponde a $\pm 0,012$ mL. Por lo tanto, el valor medido en esta calibración es de $(99,982 \pm 0,012)$ mL con la resolución del SIM, mientras que manteniendo la resolución actual del sistema el valor sería $(99,982 \pm 0,019)$ mL. En este podemos apreciar que la incertidumbre expandida al emplear la resolución de menisco del SIM pasa de un valor de $\pm 0,019$ mL a $\pm 0,012$ mL lo que significa una disminución 36 % en la incertidumbre reportada por el laboratorio en sus calibraciones de matraces aforados de 100 mL, la misma mejora se presenta si se compara la incertidumbre obtenida por el SIM con la reportada por el cliente. Además, se puede apreciar como como esta incertidumbre que con la resolución actual representa un 86,48 % de la incertidumbre total disminuye hasta un 63,36 % lo que es una disminución del 23,13 % en su contribución.

Tabla 6.6. Incertidumbre obtenida en la calibración del Matraz A, unidades mL.

Incertidumbre	Resolución estándar	%	Resolución del SIM	%
Resolución (menisco)	0,0089	86,48	0,0046	63,36
Desviación	0,0029	9,00	0,0029	24,40
Otros	0,0032	4,52	0,0032	12,24
Incertidumbre combinada	0,00956	100,00	0,00581	100
Fracción p en por ciento (95)	2		2,02	
Incertidumbre expandida	0,019		0,012	

6.4.3. Resultados del Matraz B

En la Tabla 6.7 se aprecian los resultados obtenidos en la calibración del matraz B, el volumen identificado en este matraz es de 100,033 mL el cual se desvía solamente un 0,013 % de valor establecido por el laboratorio (Ec. 6.13). Si se compara este valor con el valor nominal reportado por el creador del matraz, que es 100 mL, se presenta una desviación del 0,033 %, este cálculo se puede apreciar en la Ec. 6.14, cumpliendo con la especificación de no tener una desviación mayor al 1 %. Comparando las desviaciones obtenidas por el SIM y por el laboratorio previamente, se observa que la desviación se reduce en un factor de 1,4, lo que indica que el SIM logra mediciones con una menor desviación.

Tabla 6.7. Resultados obtenidos durante la calibración del matraz B.

X1 (g)	X2 (g)	Ta (°C)	HR %	P (Pa)	Tw (°C)	Masa real del agua (g)	Volumen a 20 °C (mL)
69,007	168,765	20,1	60	87860	20,07	99,757	100,031
69,007	168,774	20,1	59	87830	20,12	99,766	100,041
69,007	168,767	20,4	60	87840	20,24	99,758	100,036
69,007	168,763	20	63	87880	20,26	99,754	100,033
69,007	168,753	20	58	87870	20,28	99,744	100,023
Promedio						99,756	100,033
Desviación estandar						0,008	0,0066

$$D_{2ref} = \frac{|100,046 - 100,33|}{100,046} \cdot 100 = 0,013 \% \quad (6.13)$$

$$D_2 = \frac{|100 - 100,033|}{100} \cdot 100 = 0,033 \% \quad (6.14)$$

$$F_{2disminucion} = \frac{0,046}{0,033} = 1,4 \quad (6.15)$$

Con respecto a la incertidumbre de este proceso, se puede apreciar en la Tabla 6.8 que la incertidumbre expandida con el SIM corresponde a $\pm 0,012$ mL. Por lo tanto, el valor medido en esta calibración es de $(100,033 \pm 0,012)$ mL con la resolución del SIM, mientras que manteniendo la resolución actual del sistema, el valor sería $(100,033 \pm 0,019)$ mL. Aquí se observa que la incertidumbre expandida al emplear la resolución de menisco del SIM pasa de un valor de $\pm 0,019$ mL a $\pm 0,012$ mL, lo que significa una disminución del 36 % en la incertidumbre reportada por el laboratorio en sus calibraciones de matraces aforados de 100 mL. Además, al comparar la incertidumbre reportada con la resolución del SIM con la incertidumbre estándar reportada por el cliente ($\pm 0,020$ mL), se presenta una mejora más marcada que es de un 40 %. También se puede apreciar cómo esta incertidumbre, que con la resolución actual representa un 87,34 % de la incertidumbre total, disminuye hasta un 65,10 %.

Tabla 6.8. Incertidumbre obtenida en la calibración del Matraz B, unidades mL.

Incertidumbre	Resolución estándar	%	Resolución del SIM	%
Resolución (menisco)	0,0089	87,34	0,0046	65,10
Desviación	0,0030	9,71	0,0030	26,77
Otros	0,0032	2,95	0,0032	8,13
Incertidumbre combinada	0,00951	100,00	0,00573	100
Fracción p en por ciento (95)	2		2,03	
Incertidumbre expandida	0,019		0,012	

6.4.4. Resultados del Matraz C

En la Tabla 6.9 se aprecian los resultados obtenidos en la calibración del matraz C, cuyo valor medido es de 100,087 mL. Este valor se desvía del valor indicado por el cliente en un 0,02 %, como se muestra en la Ec. 6.16. En cambio si se compara el valor medido contra el volumen nominal de 100 mL, se observa una desviación del 0,087 %, este cálculo se puede apreciar en la Ec. 6.17, cumpliendo con la especificación de no tener una desviación mayor al 1 %. La principal razón por la cual se sospecha este incremento en la desviación es que se presentaron problemas con la limpieza del matraz. En la Ec. 6.18 se puede apreciar que la desviación a pesar de los problemas disminuye en un factor de 1,14.

Tabla 6.9. Resultados obtenidos durante la calibración del matraz C.

X1 (g)	X2 (g)	Ta (°C)	HR %	P (Pa)	Tw (°C)	Masa real del agua (g)	Volumen a 20 °C (mL)
72,509	172,313	20,3	66	87890	20,28	99,804	100,082
72,508	172,320	20,1	64	87880	20,33	99,811	100,091
72,505	172,315	19,9	61	87890	20,3	99,805	100,084
72,508	172,318	20	59	87870	20,33	99,809	100,088
72,508	172,320	20,5	61	87880	20,4	99,811	100,092
Promedio						99,808	100,087
Desviación estándar						0,003	0,0041

$$D_{3ref} = \frac{|100,100 - 100,087|}{100,100} \cdot 100 = 0,013\% \quad (6.16)$$

$$D_3 = \frac{100,087 - 100}{100} \cdot 100 = 0,087\% \quad (6.17)$$

$$F_{3\text{disminucion}} = \frac{0,100}{0,087} = 1,15 \quad (6.18)$$

Con respecto a la incertidumbre de este proceso, se puede observar en la Tabla 6.10 que la incertidumbre expandida con el SIM corresponde a $\pm 0,010$ mL. Por lo tanto, el valor medido en esta calibración es de $(100,087 \pm 0,010)$ mL. Aquí se observa que la incertidumbre expandida al emplear la resolución de menisco del SIM pasa de un valor de $\pm 0,018$ mL a $\pm 0,010$ mL lo que significa una disminución 44,4% en la incertidumbre reportada por el laboratorio en sus calibraciones de matraces aforados de 100 mL. Además, al comparar con la incertidumbre reportada por el cliente ($\pm 0,016$ mL) se presenta una mejora del 37,5%. También se puede apreciar cómo esta incertidumbre, que con la resolución actual contribuye en un 94,04% de la incertidumbre total, disminuye hasta un 81,01% en su contribución.

Tabla 6.10. Incertidumbre obtenida en la calibración del Matraz C, unidades mL.

Incertidumbre	Resolución estándar	%	Resolución del SIM	%
Resolución (menisco)	0,0089	94,04	0,0046	81,01
Desviación	0,0018	4,05	0,0018	12,89
Otros	0,0032	1,91	0,0032	6,1
Incertidumbre combinada	0,00917	100,00	0,00513	100,00
Fracción p en por ciento (95)	2		2	
Incertidumbre expandida	0,018		0,010	

6.4.5. Análisis de los resultados de las calibraciones

Una vez mostrados los resultados de las tres calibraciones realizadas, es importante revisar si estos resultados son congruentes y válidos. En el caso del Matraz A, este funciona como control del laboratorio, por lo que se cuenta con un registro de resultados desde 2011 hasta la actualidad. El primer aspecto a analizar es la disminución en la desviación de los valores obtenidos respecto al valor nominal de los matraces. En la Ec. 6.19 se puede apreciar el promedio, que corresponde a un factor de mejora de 1,35 o una disminución del 35% en la desviación del volumen medido en las calibraciones con respecto a las calibraciones previamente realizadas.

$$F_{\text{promedio}} = \frac{1,15 + 1,5 + 1,4}{3} = 1,35 \quad (6.19)$$

El Matraz A se calibra periódicamente como prueba de las capacidades de medición

del laboratorio. En la Tabla 6.11 se pueden apreciar los valores históricos, donde el valor de referencia es el control denominado **LACOMET DMF-003-2011**. Se observa que la calibración del matraz A realizada con el uso del SIM, denominada **Control 2024-05-13**, posee un error normalizado de 0,38, lo cual indica que se encuentra cercano a los valores históricos y es un valor válido, no un error aislado que no puede ser reproducido. En otras palabras, al obtener un valor menor a la unidad, se puede determinar que los resultados son congruentes con el histórico. En la Fig. 6.7 se puede apreciar cómo este valor se encuentra dentro del rango de valores obtenidos (el valor más a la derecha). Con respecto a los otros dos matraces, el valor obtenido en calibraciones previas es $(100,046 \pm 0,020)$ mL para el Matraz B y $(100,100 \pm 0,016)$ mL para el Matraz C, según lo reportado por el laboratorio. En la Tabla 6.12 se puede apreciar un resumen de los errores normalizados de los tres matraces, todos por debajo de la unidad lo que indica que las tres pruebas dan valores válidos.

Al analizar todos los resultados, se puede apreciar que el valor agregado del proyecto es la disminución de la resolución del menisco en el proceso, de 0,1 mm a 0,052 mm, lo que reduce la incertidumbre expandida reportada por el laboratorio. Con estas pruebas y las repeticiones que en el futuro se realicen en el laboratorio se puede llegar a tener un valor estándar de la resolución para así realizar una revisión por pares y de esta forma utilizar la resolución del SIM de manera oficial y así poder reportar estos valores a nivel internacional.

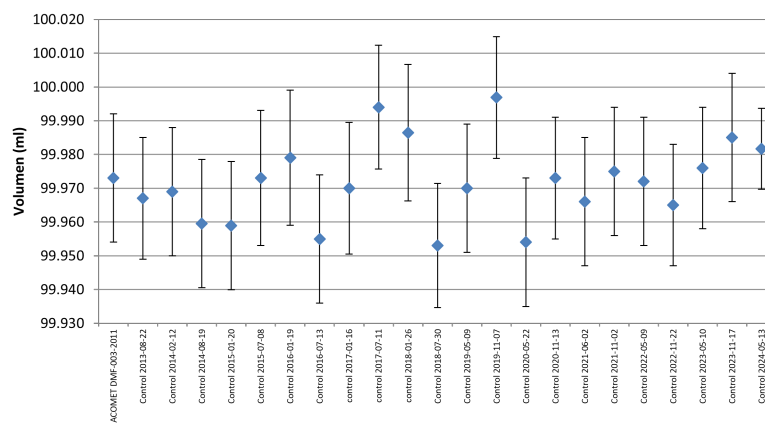


Figura 6.7. Distribución de los resultados en las calibraciones del Matraz A.

Tabla 6.11. Registro histórico de calibraciones del Matraz A.

Control	Volumen (ml)	Incertidumbre expandida (ml)	Diferencia con el último control (ml)	Error normalizado
LACOMET DMF-003-2011	99,973	0,019	0,000	0,00
Control 2013-08-22	99,967	0,018	0,006	0,23
Control 2014-02-12	99,969	0,019	0,004	0,15
Control 2014-08-19	99,960	0,019	0,013	0,50
Control 2015-01-20	99,959	0,019	0,014	0,52
Control 2015-07-08	99,973	0,020	0,000	0,00
Control 2016-01-19	99,979	0,02	0,006	0,22
Control 2016-07-13	99,955	0,019	0,018	0,67
Control 2017-01-16	99,970	0,0195	0,003	0,11
Control 2017-07-11	99,994	0,018	0,021	0,80
Control 2018-01-26	99,986	0,020	0,013	0,48
Control 2018-07-30	99,953	0,018	0,020	0,76
Control 2019-05-09	99,970	0,019	0,003	0,11
Control 2019-11-07	99,997	0,018	0,024	0,91
Control 2020-05-22	99,954	0,019	0,019	0,71
Control 2020-11-13	99,973	0,018	0,000	0,00
Control 2021-06-02	99,966	0,019	0,007	0,26
Control 2021-11-02	99,975	0,019	0,002	0,07
Control 2022-05-09	99,972	0,019	0,001	0,04
Control 2022-11-22	99,965	0,018	0,008	0,31
Control 2023-05-10	99,976	0,018	0,003	0,11
Control 2023-11-17	99,985	0,019	0,012	0,45
Control 2024-05-13	99,982	0,012	0,009	0,38

Tabla 6.12. Error normalizado en las calibraciones de tres matraces con respecto a su valor sin emplear el SIM.

Calibración	Volumen (ml)	Incertidumbre expandida (ml)	Error normalizado
Matraz A	99,982	0,012	0,38
Matraz B	100,033	0,012	0,46
Matraz C	100,087	0,010	0,69

Para acceder a las tablas, hojas de cálculo e imágenes que se emplearon para estas pruebas, consultar el Apéndice E.2. Además, se pueden revisar los elementos que conforman la incertidumbre reportada como **Otros**.

6.5. Análisis Económico

En esta sección se presenta el análisis financiero para demostrar la viabilidad económica de este proyecto, una vez expuesta la viabilidad técnica. Este busca fortalecer la decisión de incluir el Sistema de Visualización de Menisco (SIM) durante la calibración de cristalería de laboratorio. Este análisis se dividirá en dos ramas: la primera constituye un análisis de Flujos Netos de Efectivo (FNE) dado el uso del SIM. La segunda vertiente es el valor agregado que brinda el proyecto: impacto en la comunidad metrológica y mejora el bienestar del usuario.

6.5.1. Flujos Netos de Efectivo

El primer paso de este análisis es determinar la inversión realizada para el desarrollo del proyecto. En la Tabla 6.13 se puede apreciar los componentes utilizados de la lista expuesta en la Tabla B.5. No se incluyen los precios de la cámara, lente y monitor debido a que estos ya los poseía el laboratorio y no se adquirieron para este proyecto sino que el proyecto busca darles más usos. La suma del equipo previamente adquirido ronda los 106,5 USD.

Tabla 6.13. Resumen de costos del equipo previamente adquirido por el laboratorio.

Equipo	Costo Individual	Cantidad	Costo Total
Tornillos Sin Fin	10,95	2	21,9
Barras Lisa	5,95	2	11,9
Motor Paso a Paso	16,95	2	33,9
Acoples para Motores	2,95	2	5,9
Arduino UNO	15,95	1	15,95
Fuente de poder 12V 10 A	16,95	1	16,95
		Total	106,5

En la Tabla 6.14 se puede apreciar todos los componentes adquiridos durante el proceso para la creación del prototipo funcional. Es importante mencionar que el precio de la impresión 3D se refiere únicamente a lo que se imprimió fuera del laboratorio para agilizar el proceso, mientras que la mayor parte de estas piezas se manufacturaron en el laboratorio utilizando material ya existente para otros usos, sin compra adicional de material. Un rubro más que no se incluye en la lista es la licencia corporativa de LabVIEW, ya que el laboratorio ya la posee y el uso de este *software* es independiente al proyecto ya que la gran mayoría de los procesos del laboratorio ya se realizan en este y por consiguiente el presente proyecto no contribuye a la compra del mismo. Si se suman los valores mostrados en la Tabla 6.13 y 6.14 se puede determinar la inversión total necesaria para el proyecto el cual es de 311,16 USD.

Tabla 6.14. Costos realizados durante el desarrollo del proyecto.

Equipo	Costo Individual (USD)	Cantidad	Costo Total (USD)
Guías de barra lisa	2,95	4	11,8
Plataforma varilla Lisa	4,95	2	9,9
Sensores Infrarrojos	12,95	2	25,9
Motor driver	6,95	2	13,9
CNC Shield V3,0	8,95	1	8,95
Terminal de poder	4,5	1	4,5
Cable de alimentación	6,55	1	6,55
Plataforma tornillo sin fin	5,95	2	11,9
Cojinetes Tornillo sin fin	4,95	4	19,8
Cables eléctricos	7,72	1	7,72
Pernos y Tuercas	12,16	1	12,16
Servicios de Corte Láser y materia prima	39,58	1	39,58
PLA para impresión 3D	32	1	32
		Total	204,66

Una vez determinado la inversión realizada para el proyecto es momento de determinar los beneficios económicos que el SIM va a brindar. Este beneficio se representa en dos, el primero es debido a las ganancias recibidas por servicios de calibración realizados en el LCM para balones aforados tanto de forma interna o externa, el otro lo constituye el ahorro percibido en horas profesionales, ya que el sistema disminuirá el tiempo de preparación para la calibración.

Para determinar la ganancia por ventas de servicios anuales, se tuvo una conversación con el cliente y se determinó que se realizan aproximadamente 20 calibraciones al año. Al revisar la lista de servicios brindados por el LCM presentada en su página web [49] el precio de las calibraciones de matraces aforados es de 65 USD por lo que el ingreso anual asciende a los 1300 USD. Tras una discusión con el personal del laboratorio se decidió analizar una situación conservadora donde se puede esperar un aumento del 10% de las calibraciones anuales, lo que representa nuevos ingresos valorados en 130 USD al año.

En el caso del ahorro correspondiente a las horas profesionales debido al uso del sistema se conversó con el cliente que el salario promedio (ya aproximado debido a confidencialidad en los salarios) es de 2250 USD al mes, en un horario de 8 am a 5 pm durante 5 días semanales, lo que hace un total de 180 horas al mes con 12,5 USD ganados en cada hora. Al conversar el cliente este especificó que el tiempo ahorrado al no tener que acomodar la cámara y su posición es de 20 minutos lo que equivale a 4,2 USD del salario del ejecutor del proceso, extendiéndolo a un año el ahorro en tiempo es de 84 USD. Otro aspecto importante de ahorro de la solución es el hecho de que el programa de visión con recursos de código abierto, lo que evita la compra de la Licencia de Desarrollo del Módulo Visión Development

que tiene un costo de 625 USD anuales.

Una vez obtenidos estos valores de ganancias anuales por medio de la venta de servicios y ahorro en el tiempo profesional del cliente, se puede realizar el cálculo de variables de interés según el análisis del FNE como se muestra en la Tabla 6.15. Cabe resaltar que el gasto de 50 USD se seleccionó pensando en el peor de los casos como imprevistos en el caso que se dañen una gran parte de los componentes de la solución por algún accidente. Además, a los ingresos por servicio se les deduce el 30% del impuesto de renta que paga el LCM. A los ingresos a partir de un año se les reduce un 24% para determinar el FNE. Tras realizar todo el análisis se puede apreciar que en el año cero se obtiene un *Valor Actual Neto* de 1357,05 USD en un plazo de 6 años, lo que se traduce en una Tasa Interna de Retorno del 177,105%.

La situación que se tomó para el cálculo es conservadora, ya que se asume un alto precio para el mantenimiento que es probable que no se dé por la robustez del sistema, pero se demuestra la factibilidad de la inversión inicial ya que el laboratorio recuperará el 177,105% de su inversión. Además, se calcula el índice de deseabilidad que da un valor de 5,36, lo que indica que es bastante conveniente la realización de este proyecto.

Tabla 6.15. Análisis de Flujo Neto de Efectivo del Sistema de Identificación de Menisco.

AÑOS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
INVERSION INICIAL							
Equipamiento	311,16						
Total Inversion Inicial	311,16						
BENEFICIOS							
Ahorro por Tiempo de calibración		84	84	84	84	84	84
Venta Servicios		130	130	130	130	130	130
Ahorro en Licencias Cooperativas		625	625	625	625	625	625
GASTOS VARIABLES INCREM							
Total de gastos		50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
UTILIDAD ANTES DE IMP,		789,00	789,00	789,00	789,00	789,00	789,00
IMPUESTO DE RENTA		236,70	236,70	236,70	236,70	236,70	236,70
UTILIDAD DES/IMPUES,		552,30	552,30	552,30	552,30	552,30	552,30
FLUJO NETO EFECTIVO	-311,16	552,30	552,30	552,30	552,30	552,30	552,30
FNE descontados (24%)	\$1668,21						
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	\$1357,05						
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	177,105%						
ÍNDICE DE DESEABILIDAD (ID)	5,36						

6.5.2. Valor agregado

Una vez realizado el análisis económico del proyecto, es importante analizar los valores agregados que trae el proyecto, ya que el mismo no fue realizado con el objetivo de disminuir costos. El primero es el fortalecimiento del proceso de calibración, ya que con la implementación de este sistema se evitan errores de paralaje y disminuye el error humano, lo que fortalece las capacidades de medición del laboratorio las cuales son revisadas por parte de laboratorios de mayor jerarquía metrológica a nivel mundial. El segundo valor agregado es que también contribuye al cuidado de la salud del cliente, ya que anteriormente para revisar el menisco con una lupa, los técnicos debían agacharse, mientras que con este sistema pueden controlar y visualizar el menisco de pie o sentados. Además, el proyecto sirve como base para futuras investigaciones u oportunidades de mejora, ya que establece las bases para, en un futuro, fortalecer los algoritmos de visión artificial o implementar mejores cámaras con el fin de mejorar el proceso. La base ya está realizada y se puede adaptar a distintos equipos.

6.6. Establecimiento de especificaciones finales

En la presente sección se documenta el cumplimiento de las especificaciones objetivo con el fin de establecer las especificaciones finales de la solución. Las especificaciones objetivos se pueden apreciar en la Tabla 4.1.

1. Costo del SIM.

Como se puede apreciar en la sección 6.5 la inversión realizada durante el proyecto es de 204,66 USD lo que corresponde a 106013,88 colones al cambio del 19 de mayo de 2024 por lo que solo se superó el valor ideal por 6000 colones y la especificación queda dentro del valor marginal que es tener unos gastos menores a 30000 colones.

2. Uso de componentes del LCM.

En la Tabla B.5 se aprecia los componentes previamente adquiridos por el laboratorio, a continuación se muestra los componentes empleados en el desarrollo de la solución.

- Cámara Hayear.
- Monitor.
- Tornillos sin fin, dos unidades.

- Varilla lisa, dos unidades.
- Motor Nema 17, dos unidades.
- Acoplamiento rígido, 2 unidades.
- Arduino UNO.
- Fuente de poder.
- Impresoras 3D.
- Computadoras del laboratorio.

Entonces, el porcentaje de equipo empleado se puede calcular de la siguiente manera, cabe recalcar que cada componente se toma como un solo elemento ya que obligar a usar 3 varillas lisas cuando el mejor diseño era con dos sería un análisis injusto:

$$\%_{\text{uso}} = \frac{\text{Equipo empleado}}{\text{Total de equipo previo}} \cdot 100 = \frac{10}{12} \cdot 100 = 83,3\% \quad (6.20)$$

El valor de 83,3% es mayor al valor ideal que se especificó (70%) por lo que se cumple la especificación.

3. Dimensiones de la estructura mecánica del SIM

En la Hoja 3 de los planos detallados en el Apéndice F se puede apreciar que las dimensiones son de (21,2 x 27) cm lo que esta dentro de las especificaciones ideales que es (40 x 40) cm.

4. Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.

En el siguiente enlace: **Click aquí** se encuentra la respuesta brindada por el cliente. En la Fig. 6.8 se puede apreciar la respuesta del cliente. La respuesta es 10 lo cual indica, Totalmente satisfecho: La experiencia fue excepcionalmente satisfactoria en todos los aspectos posibles; no se podría pedir una mejor experiencia. Lo que cumple la expectativa que es mayor o igual a 8.

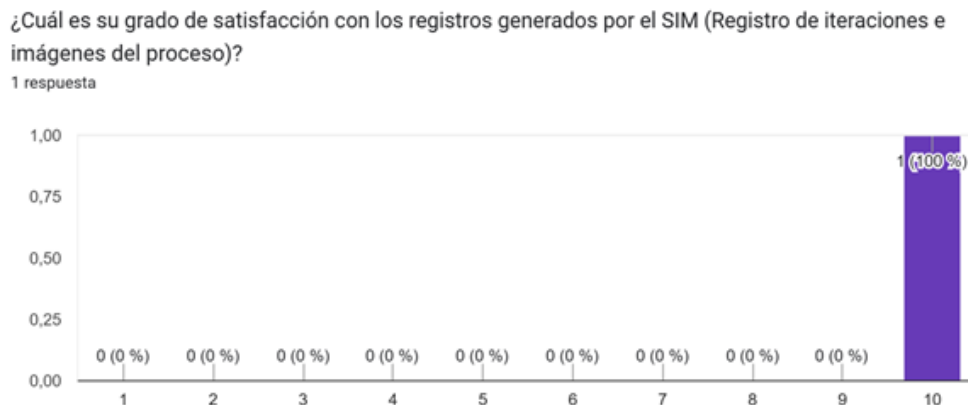


Figura 6.8. Respuesta del cliente sobre la satisfacción del registro del SIM.

5. Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.

A través de las 3 calibraciones expuestas en la sección 6.4 el sistema es capaz de identificar los siguientes estados:

- El menisco se encuentra totalmente separado de la línea de aforo.
- El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.
- EL menisco se encuentra tocando la línea de aforo.
- El menisco se encuentra tocando la línea de aforo o por debajo de la misma.

Por ende se cumple la especificación objetivo que es identificar los cuatro estados del menisco.

6. Corrección en la identificación del menisco.

En la Tabla 6.16 se puede apreciar el resumen de los volúmenes identificados en 3 matraces aforados con un volumen nominar de 100 mL. En el cual se puede apreciar que todos los valores poseen una corrección menor al 0,1% que es el valor ideal esperado.

Tabla 6.16. Corrección en el volumen identificado para tres matraces con un volumen nominal de 100 mL.

Calibración	Volumen (mL)	Incertidumbre expandida (mL)	Corrección %
Matraz A	99,982	0,012	0,018
Matraz B	100,033	0,012	0,033
Matraz C	100,087	0,10	0,087

7. Versatilidad de visualización de equipos.

En el siguiente enlace: **Click aquí** se puede apreciar la evidencia de como el SIM puede visualizar los meniscos en probetas y pipetas, además de los matraces aforados lo que cumple la expectativa de identificar meniscos para al menos 3 equipos distintos.

8. El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.

En la Fig. 5.51 se puede apreciar el control de la velocidad del dispositivo.

9. Rango de desplazamiento vertical del SIM.

En rango de desplazamiento es de 40 cm. En la Fig. 6.9 donde se aprecia la distancia entre los sensores de final de carrera que cumple la expectativa de 35 cm.

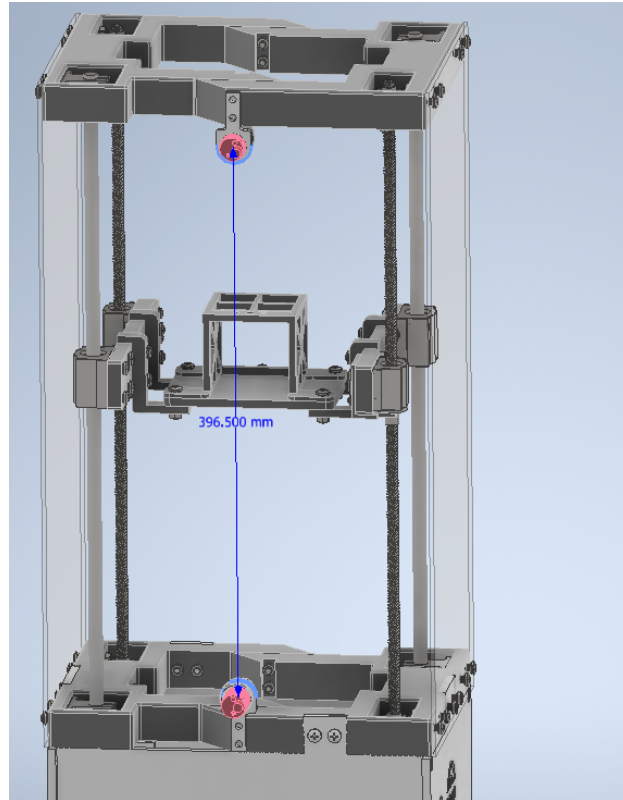


Figura 6.9. Rango de desplazamiento de la cámara.

10. Evaluación de la Amabilidad de la Interfaz de Usuario.

En el siguiente enlace: [Click aquí](#) se aprecia la encuesta realizada. En la Fig. 6.8 se puede apreciar la respuesta del cliente. La respuesta es 9 lo cual indica, Extremadamente satisfecho: La experiencia superó con creces todas las expectativas, y se sintió un alto grado de satisfacción. Lo que cumple la expectativa que es mayor o igual a 8.

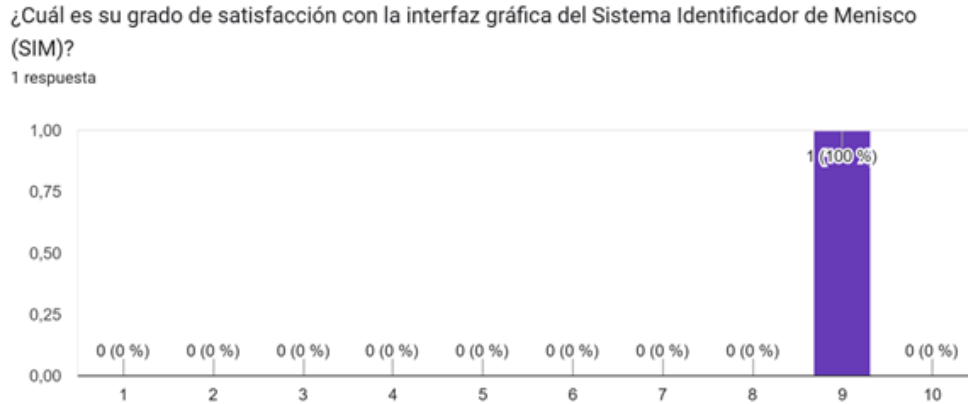


Figura 6.10. Respuesta del cliente sobre la satisfacción con la interfaz gráfica del SIM.

11. Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM (cámara).

En la sección 6.1.2 se puede apreciar que la inclinación de estos dos componentes debido a la simulación es mucho menor a lo establecido como valor ideal. Además, en el siguiente **Enlace** se muestra un nivel de burbuja colocado durante el desplazamiento de la cámara donde se puede apreciar que el movimiento no provoca un cambio en la orientación.

12. Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.

En la sección 6.1.2 se puede apreciar que el factor de seguridad más bajo presente es de 3,08 lo que cumple correctamente la expectativa planteada.

13. Facilidad de Desarme y Almacenamiento.

En el siguiente enlace: **Click aquí** se aprecia la encuesta realizada. En la Fig. 6.11 se puede apreciar la respuesta del cliente. La respuesta es 5 lo cual indica, Muy fácil: El proceso de desarme es extremadamente sencillo y rápido. La solución se guarda de manera ordenada y sin ningún problema. Lo que cumple la expectativa que es mayor o igual a 4.

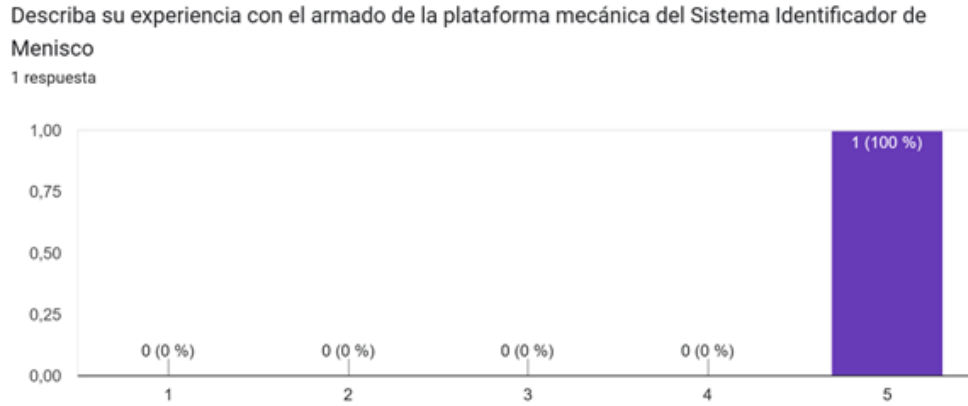


Figura 6.11. Respuesta del cliente sobre la satisfacción con la interfaz gráfica del SIM.

14. Tiempo de Desarme y Almacenamiento

El tiempo de desarme en todas las calibraciones realizadas fue menor a los 5 minutos.

15. Uso de la cámara actual para lograr los demás objetivos.

Si se logró llegar a las especificaciones de exactitud y precisión con la cámara actual. En la Tabla 6.17 se muestran las especificaciones finales.

Tabla 6.17. Especificaciones finales del Sistema Identificador de Menisco.

Número de métrica	Métrica	Unidad	Valor logrado
1	Costo del SIM.	€	<150000
2	Uso de componentes del LCM.	%	83,3
3	Dimensiones de la estructura mecánica del SIM.	cm	22 x 27
4	Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.	Evaluación	10
5	Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.	Lista	4
6	Corrección en la Identificación del Volumen.	%	≤0,1
7	Versatilidad de Visualización de Equipos.	Lista	3 o más
8	El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.	Binario	Sí
9	Rango de posiciones verticales del SIM.	cm	39
10	Evaluación de la Amigabilidad de la Interfaz de Usuario.	Subjetivo	9
11	Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM.	°	<1°
12	Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.	Adimensional	≤3,08
13	Facilidad de Desarme y Almacenamiento.	Subjetivo	4
14	Tiempo de Desarme y Almacenamiento.	Minutos	<5
15	Uso de la cámara actual.	Binario	Sí

Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

■ Conclusiones correspondientes al objetivo específico 1

1. A partir del diagnóstico realizado al proceso y equipo actual empleado en las calibraciones de matraces aforados fue posible determinar las principales fuentes del problema, las variables a medir y controlar.
2. A partir del diagnóstico realizado fue posible identificar la relación de las necesidades pronunciadas por el cliente y el procedimiento actual de calibración.

■ Conclusiones correspondientes al objetivo específico 2

3. El estudio de los elementos mecánicos críticos de la Plataforma Mecánica de la propuesta de diseño permite evidenciar que el diseño de la solución posee un factor de seguridad mayor 3 lo que garantiza la integridad de este y la seguridad de la cámara.
4. El diseño de la plataforma mecánica en dos secciones principales, espacio de almacenamiento y sistema de elevación permite que el sistema sea sencillo de mantener y realizar cambios de partes de ser necesario.
5. El sistema de elevación permite colocar la cámara para visualizar instrumentos volumétricos en un rango de 0 - 38 cm de altura.

■ Conclusiones correspondientes al objetivo específico 3

6. El sistema de visión es capaz de diferenciar de forma clara cuando el menisco se encuentra o no sobre la línea de aforo en cristalería de una única marca.
7. Es posible concluir que el sistema construido cumple con las necesidades especificadas por el cliente, lo cual se alcanzó mediante la programación de un control lógico en LabVIEW, el cual es compatible con el sistema del laboratorio.

■ **Conclusiones correspondientes al objetivo específico 4**

8. A partir de los resultados de las calibraciones realizadas se puede concluir que el sistema es capaz de medir el volumen en matraces aforados de 100 mL con un error menor al 0,1 %.
9. Los resultados de las calibraciones en matraces aforados de 100 mL demuestran que la solución aumenta la exactitud con respecto a calibraciones previas en un 35 %.
10. Se puede concluir que con la implementación de la solución se puede disminuir la resolución de visualización del menisco de 0,10 mm a 0,05 mm lo que significa una disminución a la mitad de las capacidades actuales.
11. Los resultados obtenidos de las calibraciones permiten concluir que el sistema es capaz de realizar calibraciones en matraces aforados con una incertidumbre expandida $\leq \pm 0,019$ mL.
12. Los resultados obtenidos de las calibraciones realizadas muestran que la incertidumbre expandida obtenida en calibraciones utilizando el sistema es menor en un 40 % con respecto a la obtenida en calibraciones anteriores en el laboratorio.
13. Mediante una comparación del Error Normalizado se verificó que los resultados obtenidos por el sistema y su incertidumbre final expandida, son concordantes a los datos históricos del laboratorio.

■ **Conclusiones relacionados a otros aspectos**

14. El análisis económico de Flujo Neto de Efectivo confirmó la viabilidad financiera del prototipo diseñado, el cual obtuvo una tasa interna de retorno del 177 % y un índice de deseabilidad del 5,36.

7.2. Recomendaciones

Se dirigen las siguientes recomendaciones al cliente que está encargado de la inclusión del prototipo funcional como método de calibración para matraces aforados:

1. Implementar el sistema de iluminación propuesto en la sección de diseño con el fin de mejorar o eliminar sesgo de los resultados actuales.
2. Realizar más calibraciones en matraces aforados de 100 mL con el fin de estandarizar la resolución de visualización del menisco.
3. Realizar calibraciones en matraces aforados de distinta capacidad para reforzar los resultados obtenidos por la solución.
4. Realizar calibraciones en otra cristalería de laboratorio con una única línea de aforo para fortalecer los resultados obtenidos por la solución.
5. Una vez realizado las tres recomendaciones anteriores, proponer una revisión por pares para emplear los resultados obtenidos de la resolución del SIM en calibraciones oficiales a nivel nacional e internacional.
6. Automatizar el control de la posición de la cámara con el fin de estandarizar tamaños de equipos empleados.

Bibliografía

- [1] Centro Español de Metrología, *La Metrología también existe*. España: Comité de Metrología del Instituto de la Ingeniería de España, dic. de 2014. dirección: https://www.cem.es/sites/default/files/30363_lametrologiatambienexiste_web.pdf.
- [2] L. Bermúdez, M. Murrel, A. Leandro, K. Vetrani y M. Mora, *Metrología General y Trazabilidad*. Costa Rica: PROCAME, 2014.
- [3] E. Prieto, *EL Sistema Internacional de Unidades (SI) y su próxima revisión*. España: Centro Español de Metrología, feb. de 2012.
- [4] L. C. de Metrología. “Nuestra Historia.” (mar. de 2024), dirección: https://lcm.go.cr/acerca-de/nuestra_historia/.
- [5] L. C. de Metrología. “Laboratorio de Volumen.” (mar. de 2024), dirección: <https://lcm.go.cr/laboratorio-de-volumen/>.
- [6] Bureau International des Poids et Mesures, *Key Comparison Database (KCDB) - CMCs*, Bureau International des Poids et Mesures, [Accedido: 9 de marzo de 2024]. dirección: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?includedFilters=&excludedFilters=cmcDomain.CHEM-BIO%2CcmcBranches.Mass%2C+mass+standards%2CcmcBranches.Pressure%2CcmcBranches.Temperature&page=0&keywords=lacomet>.
- [7] J. Chiva, *Metodología y Calibración de las variables de control utilizadas en sistemas navales e industriales*. España: Facultat de Náutica de Barcelona, mar. de 2014.
- [8] L. Laroze, N. Porras y G. Fuster, *Conceptos y Magnitudes en Física*. Chile: Departamento de Física: Universidad Técnica Federico Santa María, mar. de 2014.

- [9] A. S. Morris y R. Langari, *Measurement and Instrumentation Principles*. Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN: 0750650818. dirección: [https://staff-old.najah.edu/sites/default/files/Butterworth-Heinemann,\[1\].Measurement%20and%20Instrumentation%20Principles,%203rd%20Edition.\[2001.ISBN0750650818\]_0.pdf](https://staff-old.najah.edu/sites/default/files/Butterworth-Heinemann,[1].Measurement%20and%20Instrumentation%20Principles,%203rd%20Edition.[2001.ISBN0750650818]_0.pdf).
- [10] D. Hamby, *Introduction to Measurement Theory*. Cambridge University Press, 2018, ISBN: 9781107183814.
- [11] S. Medina, *Breve Introducción a la teoría de errores y la graficación*, Primera. México: Universidad Autónoma de Aguascalientes, mar. de 2017, ISBN: 9786078523504. dirección: https://editorial.uaa.mx/docs/breve_introduccion_teoría_errores.pdf.
- [12] F. Pezet y M. Talavera, “Trazabilidad en las mediciones de masa,” *Centro Nacional de Metrología*, 2002. dirección: <https://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio%202002/doctos/te077.pdf>.
- [13] N. I. s.a. “¿Qué es la calibración de material volumétrico?” (Mar. de 2023), dirección: <https://net-interlab.es/calibracion-material-volumetrico/>.
- [14] V. GmbH, *Competence in Volume Measurement*. BRAND, 2020. dirección: https://www.vitlab.com/fileadmin/user_upload/VITLAB-GmbH/Sonstiges/Druckschriften/Broschueren/Volumenmessung/PDF/Broschuere_Volumenmessung_EN.pdf.
- [15] M. Blanco y P. Silva, *Estimación de la incertidumbre en la calibración de un matraz*, 2009.
- [16] BRAND. “Trabajar con material volumétrico en vidrio.” (mar. de 2023), dirección: <https://www.brand.de/es/aplicaciones/trabajar-con-material-volumetrico-en-vidrio>.
- [17] D. Mardanbegi y D. Hansen, “Parallax error in the monocular head-mounted eye trackers,” sep. de 2012, págs. 689-694. DOI: 10.1145/2370216.2370366.
- [18] Facultad de Bioquímica y Ciencia Biológicas, *Cátedra de Química Analítica I: Trabajos Prácticos*, Universidad Nacional del Litoral, C.C. 242 - S3000ZAA - Santa Fe - Argentina, 2019. dirección: https://fbcb.web1.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2019/10/TP2019_1-4.pdf.
- [19] Laboratorio Costarricense de Metrología, *Calibración de equipo volumétrico por el método de gravimétero*, 2023.

- [20] American Society for Testing Materials (ASTM), “Standard Specification for Laboratory Glass Volumetric Flasks,” ASTM, Philadelphia, Standard E 288-06, 2009, pág. 3.
- [21] INTECO, *Laboratory glassware. Volumetric instruments Methods for testing of capacity and for use*, INTE/ISO 4787:2018, jun. de 2018.
- [22] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, Consultado el 27 de mayo de 2024, 2017. dirección: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v2:es>.
- [23] *ISO/IEC 17043:2010(E), Evaluación de la aptitud de los proveedores de ensayos de laboratorio por ensayos de aptitud*, https://interlab.mx/pdf/ISO_IEC_17043_Esp2011.pdf, Consultado el 27 de mayo de 2024, 2011.
- [24] G. Harris y V. Miller, *Selected Procedures for Volumetric Calibration*. Estados Unidos: National Institute of Standards y Technology (NIST), mayo de 2019. dirección: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2019/NIST.IR.7383-2019.pdf>.
- [25] R. Freedman e Y. Hugh, *Física Universitaria*, twelfth. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2009, vol. 1, ISBN: 9786074422887.
- [26] R. Budynas y J. Nisbett, *Diseño de ingeniería mecánica de Shingley*, tenth. México: McGrawHill Education, 2018, ISBN: 1456260901.
- [27] J. N. Díaz López, “RETOS DE LA CADENA DE SUMINISTRO CON LA INCLUSIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D - FABRICACIÓN ADITIVA AM,” *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 2018, ISSN: 1900-5016. dirección: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=409658132012>.
- [28] Á. Hernández, R. Muñoz y R. Christoph, “Manufactura Aditiva,” *Realidad y Reflexión*, págs. 97-109, 2016. dirección: <http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/2873/1/Manufactura%20aditiva.pdf>.
- [29] B. Petisco, *Introducción a la Visión Artificial*, sep. de 2022. dirección: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/3290>.
- [30] J. Ordieres-Meré, M. Limas, F. J. Ascacibar et al., *Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial Recurso electrónico - En línea*. ene. de 2006, 96 p.
- [31] J. Igual, *Óptica avanzada para fotógrafos*. Foto Igual, 2015, vol. 3. dirección: https://fotoigual.com/wp-content/uploads/2022/05/muestra_fotoigual_optica_avanzada.pdf.

- [32] R. Freedman e Y. Hugh, *Física Universitaria, con física moderna*, twelfth. México: PEARSON EDUCATION, 2009, vol. 2.
- [33] J. Antiga, *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*, abr. de 2012. dirección: https://www.infoplcn.net/files/documentacion/vision_artificial/infoPLC_net_Conocimientos_vISIONARTIFICIAL.pdf.
- [34] MICROSCAN, *Iluminaciones Precisas para la Visión Artificial*, 2013. dirección: https://cpi.com.ar/info_productos/pdf/ILUMINADORES.pdf.
- [35] COGNEX, *Introducción a la visión artificial: Una guía para la automatización de procesos y mejorar la calidad*. Estados Unidos: COGNEX, 2018. dirección: https://bcnvision.es/uploads/videotutoriales/uploads/guias%20por%20sectores/introduccion%20a%20la%20vision%20artificial_compressed.pdf.
- [36] J. Arias, *Desarrollo de un sistema basado en visión artificial para la inspección de etiquetas en el proceso de marcación fiscal de bebidas*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2022. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23163/1/UPS-CT010024.pdf>.
- [37] A. Catalán, “Técnicas de procesamiento digital de Imágenes,” *Revista de Marina*, págs. 68-71, abr. de 2019.
- [38] S. Barreto, *Transformaciones geométricas sobre imágenes digitales*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. dirección: <https://www.alammi.info/2congreso/memorias/Documentos/martes/TRANSFORMGEOMETRICAS.pdf>.
- [39] S.-H. Bustamante, *Algoritmos de procesamiento de imagen aplicados a la detección de figuras geométricas y sus propiedades espaciales*, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, mar. de 2014. dirección: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-4500/UCE4968_01.pdf.
- [40] M. Montavo, “Técnicas de Visión Artificial para la segmentación y detección de líneas de cultivo en imágenes agrícolas,” Tesis doct., Universidad Complutense de Madrid, 2015. dirección: <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/af9f1582-8593-4e6d-94aa-9ce9ee288df6/content>.
- [41] K. Ulrich y S. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, fifth. Mexico: McGrawHill Education, 2012, ISBN: 9786071509444.

- [42] Amazon, *HAYEAR 48MP HD HDMI TV 1080P USB Digital Industria Microscopio Cámara C-Mount para inspección soldadura PCB reparación*, Accedido el 10 de febrero de 2024. dirección: <https://www.amazon.com/es/Industria-Microscopio-inspecci%C3%B3n-soldadura-reparaci%C3%B3n/dp/B086X3XVC3>.
- [43] F. Delgado, “Caracterización de filamento de PLA reciclado para impresión 3D,” Tesis de mtría., Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, 2021. dirección: <https://riull.uull.es/xmlui/bitstream/handle/915/24777/Caracterizacion%20de%20filamento%20de%20PLA%20reciclado%20para%20impresion%203D.pdf?sequence=1>.
- [44] Y. Quevedo, Bonilla y Camilo, “Caracterización de las propiedades mecánicas del copolímero PETG mediante impresión FDM 3D,” Tesis de mtría., Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, 2021. dirección: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28358/QuevedoSupelanoYeisonNefitali2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [45] INNOFIL, *Filamento ABS Fusion+*, ago. de 2019. dirección: <https://sicnova3d.com/wp-content/uploads/basf-fichas-tecnicas.pdf>.
- [46] C. Villamizar y B. Uribe, “Análisis de las Propiedades Mecánicas en Piezas de PLA Fabricadas por Manufactura Aditiva con Fibras Orgánicas de Refuerzo,” Tesis doct., Universidad Industrial de Santander: Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, 2022. dirección: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/99a3f2ca-b0ac-4508-b9b4-502851fc09d4/content>.
- [47] AMAZON. “Andoer Softbox - Kit de iluminación para fotografía, equipo de estudio profesional con caja de luz de 20 x 28 pulgadas, bombilla de temperatura bicolor de 2800-5700K 85W con control remoto, soporte de.” Visitado el 1 de mayo de 2024. (ene. de 2021), dirección: https://www.amazon.com/-/es/Andoer-Softbox-iluminaci%C3%B3n-profesional-temperatura/dp/B08T61SMMH/ref=sims_dp_d_dex_ai_speed_loc_mtl_v4_d_sccl_2_6/143-4874390-9067916?pd_rd_w=tMVWB%5C&content-id=amzn1.sym.af515e1d-64ab-47a5-8a2e-6be4d0f4cdc5%5C&pf_rd_p=af515e1d-64ab-47a5-8a2e-6be4d0f4cdc5%5C&pf_rd_r=HF1KEQ475GSWMGZK113X%5C&pd_rd_wg=yMsXd%5C&pd_rd_r=1b8b66f8-bd0b-4bfd-a4b7-0bfe94b32154%5C&pd_rd_i=B08T61SMMH%5C&th=1.

- [48] MatWeb, *Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer*, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1>, Accedido el 12 de Mayo, 2024.
- [49] LCM. “Tarifas de los servicios del Laboratorio Costarricense de Metrología.” (mayo de 2024), dirección: <https://lcm.go.cr/servicios/servicios-metrologicos/>.
- [50] R. Maria, *SUMMARY OF SAFETY CRITERIA IN DESIGN*, mayo de 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1501.5285.
- [51] Güdel, *Rack and Pinion*, mar. de 2023.
- [52] J. Sanando y C. Sango, “Diseño de un mecanismo de apertura y cierre de una estructura adaptable para la cámara de la pequeña y mediana empresa de Pinchicha ubicada en el centro de exposiciones Quito,” *Escuela Politécnica Nacional*, sep. de 2015. dirección: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11520/1/CD-6500.pdf>.
- [53] Transmisiones y Equipos. “¿Cuál es la función del sistema piñón y cremallera?” (Jun. de 2022), dirección: <https://www.ajtransmisiones.com/blog/funciones-del-pinion-cremallera>.
- [54] PBCLinear Europe GmbH, *Belt Drive or Lead Screw*, <https://www.pbclinear.eu/belt-drive-or-lead-screw/>, Accedido el 9 de febrero de 2024.
- [55] J. Jonhson, *Selecting and Sizing Ball Screw Drives*, Thomson Linear Motion, Accedido el 8 de febrero de 2024. dirección: https://www.thomsonlinear.com/downloads/articles/Selecting_Sizing_Ball_Screw_Drives_taeen.pdf.
- [56] A. Maldonado, “Estudio y Diseño de un Cilindro Hidráulico para uso Naval,” Universidad de Málaga, 2023. dirección: https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/26471/tfg_Maldonado_Monta%C3%B1ez_Adolfo-5582.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [57] M. Morales y A. Hernández, *Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustibles*, <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>, 2014.
- [58] M. Rodríguez, *Máquinas de corriente continua*, <https://personales.unican.es/rodrigma/pdfs/maquinas%20cc.pdf>, 2017.
- [59] A. de Vandelvira, *Motores de corriente alterna: sistemas automáticos de producción alimentaria*, http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf, nov. de 2011.

Anexos



Hojas de datos

Para leer en detalle a cada hoja de datos acceder a los siguientes enlaces:

- Hoja de datos del Tornillo de avance: **Click aquí**
- Hoja de datos del Stepper: **Click aquí**
- Dimensiones del acople del motor: **Click aquí**
- Hoja de datos del Shield V3 para Arduino: **Click aquí**
- Hoja de datos del driver DR8825: **Click aquí**
- Hoja de datos de la fuente de poder: **Click aquí**
- Hoja de datos del sensor infrarrojo: **Click aquí**

Apéndices



Bitácora de diseño

En este Apéndice se detalla en mayor detalle el procedimiento y pasos realizados durante el proceso de ingeniería de Ulrich - Eppinger.

B.1. Necesidades

B.1.1. Recopilación datos sin procesar del cliente

A continuación, se documentan las preguntas realizadas con su respectiva respuesta durante las entrevistas con el cliente:

- **¿Puede realizar una descripción general del proceso?**

Pruebas de calibración en volumen, hay equipos de volumen que para calibración se necesita hacer la visualización de un menisco. Eso para equipos de verter y contener, esto siempre lleva el trabajo de utilizar una cámara para ayudar a la visualización. El empleo de la cámara tiene la ventaja de la digitalización de la imagen, se quiere ver si con esto se desea un programa para detectar cuando el menisco toca el aforo. Se busca aprovechar el equipo para poder identificar el menisco. Se puede hacer con una visualización con lupa y con cámara. Esta visualización tiene varias situaciones a mejorar. La colocación de la cámara se quiere mejorar. También se quiere buscar la oportunidad de mejorar la incertidumbre por menisco que es muy importante para buscar un estudio.

- **¿Cuánto suele durar haciendo el proceso?**

Es un valor muy variante. Con respecto a la solución no se busca rapidez, funciona si es un tipo patrón o referencia para calibrar el menisco, ya que no es como otras calibraciones. Esta solución busca a buscar una referencia visual del punto que se está buscando.

- **¿Cada vez que modifica el volumen contenido por el proceso mueve el recipiente?**

El recipiente si se mueve durante la modificación de volumen, sería bueno idear algo para que siempre este en la misma posición. Al hacer estas repeticiones se genera fatiga.

- **¿Me puede hablar sobre las incomodidades que experimenta durante el proceso?**

Hay dos situaciones, la duda que le da al menisco la puede disminuir con esta herramienta, o por cansancio o falta de práctica. A veces pasa periodos sin hacer las calibraciones, así que se siente una falta de practica por lo que sería bueno tener un punto de comparación. Humanamente no es posible medir lo que está cerca de la línea, es lo que se toma como incertidumbre. Si el programa puede decir cuanta falta para la línea. Lo primero seria que la solución identifique cuando está lo suficientemente cerca de la línea de aforo, poder definirle un error para que dé como aceptable lo cerca que este. Con el solo hecho de que el sistema le diga que está lo suficientemente cerca ya ayudaría con un punto de guía, para no variar mucho de ese.

- **¿En el caso de que no se pueda llegar a mejorar la lectura con el equipo actual cuanto aceptaría?**

Se acepta una medición en los límites del equipo actual ya que no se compraría otra cámara. Además, el lente es viejo así que lo que se quiere investigar es la posible mejora. Este proyecto es más una investigación. Él siempre toma como fija la distancia mientras este lo suficientemente cerca, esa distancia la calculo con una medida indirecta. Que es de 0,1 mm. El no mide, si no que mediante experimentación estableció esa distancia. Quiere algo que logre una precisión de menisco reproducible. No hay problemas con que la solución no se pueda usar siempre, con que la pueda armar cada cierto tiempo para comparar es suficiente.

- **¿Es importante que la solución funcione con varios tipos de recipientes o quiere atacar uno en específico?**

Como es una investigación de mejora la solución se puede enfocar en un solo equipo de laboratorio, porque varían mucho entre los mismos equipos y más cambiando entre ellos. De hecho, entre matraces las líneas de graduación pueden variar. Se puede centrar en un equipo, tipo de línea que no busque solucionar en todos los casos. Por el tiempo puede ser en un rango muy reducido de radios. Pero si se puede se pueden abarcar más.

- **¿Cuáles son los recipientes que suele calibrar, en que rangos de diámetro rondan dichos recipientes**

Los recipientes con líneas de ajuste que suele calibrar son: matraces, pipetas, pipetas graduadas, buretas, probetas. Son los relativamente comunes.

- **¿Estos recipientes son de graduación única o tienen toda la graduación?**

La gran mayoría no poseen graduación.

- **¿Con cuál equipo realiza actualmente el proceso de lectura del menisco?**

Lupas, la cámara, la lente y un monitor.

Para sostener la cámara se emplea un soporte de laboratorio para buretas con una prensa con un sistema que se le había diseñado a la cámara con la impresora 3D.

El problema principal de la prensa y el sistema actual es que cuesta controlar su nivel, lo que hace que se tenga que manipular mucho ya que se necesita totalmente paralela a la superficie para evitar la paralaje de la toma. Se poseen mesas de plenitud, el sistema que sostiene la cámara tiene que ir en la misma.

- **¿Se necesita una distancia fija o recomendada del instrumento a calibrar del punto de visión humano/cámara o esta distancia puede variar?**

No hay una distancia recomendada para medir la cámara, lo que afecta es el enfoque del lente y la cámara lo que hace variar esa distancia. El la modifica moviendo el enfoque o el recipiente. Se quiere eliminar este movimiento del equipo.

- **¿Cuántas veces tiene que realizar la lectura del menisco en cada calibración?**

5 veces

- **¿Cuál es el presupuesto que dispone para invertir en la solución? ¿En el caso de ser necesario se puede comprar más equipo? Me refiero a si es totalmente necesario usar el equipo actual del laboratorio ya que lo que se busca es sacarles provecho a estos.**

Se podría utilizar 100000 colones, pero uno de los requisitos más importantes de este proyecto es que se use el equipo con el que se cuenta actualmente.

- **¿Cuántas personas están involucradas en el proceso de calibración?**

Solo yo, realizo el proceso completo.

- **La estructura que conlleve la solución planea que este en una posición fija o que se pueda retirar para realizar otros procesos en el mismo espacio**

Se desea móvil, ya que la configuración, posición de la cámara es diferente entre cada equipo de laboratorio. Además, la idea es que la cámara pueda ser usada en otros procesos. La configuración del ambiente a veces cambia para otras aplicaciones. Por comodidad se desea que varia la altura y que el enfoque se controle de forma manual. O documentar el proceso para siempre usar las mismas medidas, ya que se quiere que esto siempre sea reproducible. No quiere que este pueda mover en el horizontal ya que no le interesa que la estructura sea tan grande.

- **En el caso de ser móvil, cuanto tiempo está dispuesto a tomar para armar todo el set up de medición.**

No hay problema, ya que se puede tomar el tiempo para armarlo y tener ese punto de calibración de vez en cuando.

- **Como es el equipo de computadoras que tiene en el laboratorio.**

Computadoras viejas, usan solo entrada USB, no el otro puerto de la Cámara. Pero se puede hacer para otras computadoras

- **¿Cuál es el software que emplean en el laboratorio?.**

Se posee licencia de LabVIEW. Pero no de su biblioteca de Visión Artificial.

- **¿Entiendo que el proceso actual es manual, desea que dicho proceso sea totalmente automático o está bien con tener un control manual para poder tener cierto control del proceso?**

No, posición vertical puede ser manual, pero la identificación del menisco que sea automática.

- **Me podría contar sobre el ambiente del laboratorio: temperatura, humedad e iluminación.**

La temperatura y la humedad son constantes, con respecto a la iluminación se ve afectada con la hora del día, pero se pueden tapar para eliminar la luz mayor parte de la luz del exterior.

- **¿La solución tiene que ser amigable con el sistema que se utiliza actualmente en el laboratorio o puede ser una solución aparte?**

Ambas, puede ser utilizando LabVIEW o algún software libre.

- **En el caso que el equipo actual no sea capaz de medir lo que se quiere mejorar desea que le plantee una solución con otra cámara o le gustaría que se adecuara a las capacidades de dicha cámara.**

Sí, el plan es investigar cómo se puede mejorar las mediciones con el equipo actual.

- **¿Que le parece dos modos?, uno para tomarse como referencia y otro para medir.**

Si, la modalidad de medir para los matraces, los demás para el resto de las aplicaciones. Es más útil en el día a día que se mantenga la incertidumbre entre cada medida. Reproducibilidad.

- **¿Desea mejorar la exactitud o precisión?**

Lo que se quiere mejorar es la reproducibilidad, que cada cierto tiempo se posea un sistema para comparar y así poder detectar desviaciones. Lo esencial que se quiere es identificar cuando el menisco toca la línea de ajuste, ese pegar en la línea de ajuste no tiene que ser exacto, si no darle un rango de lo que el sistema puede lograr. Eliminar el factor de duda humano que no puede determinar si el menisco efectivamente está tocando la línea de ajuste.

- **¿Quiere una distancia traducida en distancia humano o con que identifique la cercanía?**

Lo que se quiere es un sistema que puede identificar si la distancia entre el menisco y la línea del ajuste. No importa si el proceso se vuelve mucho más lento. Lo preferible es que pueda identificar que está cerca del menisco y que de una distancia. Si se identifique que no puede medir una distancia menor a 0.1 mm está bien mientras de la distancia. El que funciona más es que él pueda controlar la posición de la cámara, que tenga una modalidad donde le permita tener control al usuario. Lo que se busca es experimentar y mejorar el proceso, no hay una gran cantidad de equipos. Si no investigar a ver si con el equipo actual se puede mejorar el proceso. No me interesa mucho la distancia humana mientras el sistema puede identificar la cercanía.

B.1.2. Interpretación datos sin procesar en términos de necesidades del cliente

Después de realizar la entrevista y procesar lo dicho por el cliente se recabaron las siguientes necesidades:

1. El Sistema a Diseñar (SD) habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.
2. El SD hace uso de la cámara actual del laboratorio.
3. El SD permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.
4. El SD es capaz de identificar del menisco cuando el menisco se encuentra cerca de la línea de ajuste con distintos grados de tolerancia para matraces aforados de 100 ml.
5. El valor medido en matraces aforados de 100 ml por el SD es estable.
6. El SD se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.
7. El SD puede controlar la posición vertical del sensor (cámara) de medición.
8. El SD posee un modo manual donde se puede controlar la posición vertical del sensor con el que se mide para usarlo en otras aplicaciones.

9. La estructura del SD mantiene el ángulo del sensor (cámara) estable para evitar el error de paralaje.
10. La estructura del SD es estable para garantizar la integridad del equipo y la estabilidad de este durante la medición.
11. La estructura del SD se puede colocar sobre las mesas de planitud.
12. El SD tiene interacción con el equipo de computadoras del laboratorio.
13. El control de la estructura del SD se puede realizar desde una computadora.
14. Los valores registrados por el SD se guardan en un registro y se documentan.
15. El presupuesto para el desarrollo SD se mantiene lo más bajo posible.
16. La interfaz de control del SD es fácil de emplear.
17. El SD se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se empleado de forma rápida.

B.1.3. Organización las necesidades en una jerarquía

Ahora se organizaron las necesidades en una jerarquía.

1. El SD es implementado con el mínimo uso de recursos económicos.
2. El SD habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.
 - 2.1 La estructura del SD se puede colocar sobre las mesas de plenitud.
 - 2.2 El SD tiene interacción con el equipo de computadoras del laboratorio.
 - 2.3 El control de la estructura del SD se puede realizar desde una computadora.
 - 2.4 Los valores registrados por el SD se guardan en un registro y se documentan.
 - 2.5 El SD hace uso de la cámara actual del laboratorio.
3. La distancia del menisco a la línea de aforo medida en matraces de 100 ml es reproducible.

- 3.1 El SD es capaz de identificar del menisco cuando el menisco se encuentra cerca de la línea de ajuste con distintos grados de tolerancia para matraces aforados de 100 ml.
- 3.2 El valor medido en matraces aforados de 100 ml por el SD es estable.
4. El SD permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.
 - 4.1 El SD puede controlar la posición vertical del sensor(cámara) de medición.
 - 4.2 El SD posee un modo manual donde se puede controlar la posición vertical del sensor con el que se mide para usarlo en otras aplicaciones.
5. La interfaz de control del SD es fácil de emplear.
6. La estructura mecánica del SD es estable.
 - 6.1 La estructura del SD mantiene el ángulo del sensor(cámara) estable para evitar el error de paralaje.
 - 6.2 La estructura del SD es estable para garantizar la integridad del equipo y la estabilidad de este durante la medición.
7. El SD se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.
8. El SD se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se empleado de forma rápida.

B.1.4. Establecimiento la importancia relativa de las necesidades

Una vez establecida la jerarquía de las necesidades se envió la encuesta al cliente y se estableció la importancia de las necesidades la cual se puede apreciar en la Tabla B.1. Cabe recalcar que dado el proyecto se cambio Sistema a DiseñarSD por Sistema Identificador de Menisco (SIM).

Tabla B.1. Importancia de cada una de las necesidades del proyecto.

Numero de necesidad	Necesidad	Importancia
1	El SIM es implementado con el mínimo uso de recursos económicos.	4
2	El SIM habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.	4
3	La estructura del SIM se puede colocar sobre la mesa de plenitud.	4
4	El SIM tiene interacción con el equipo de computadoras del laboratorio.	4
5	El control de la estructura del SIM se puede realizar desde una computadora.	4
6	Los valores registrados por el SIM se guardan en un registro y se documentan.	2
7	El SIM es capaz de identificar el menisco cuando se encuentra cerca de la línea de aforo con distintos grados de tolerancia para matraces aforados de 100 ml.	4
8	El valor medido en matraces aforados de 100 ml por el SIM es estable.	5
9	El SIM permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.	3
10	El SIM puede controlar la posición vertical del sensor en modo manual.	4
11	La interfaz de control del SIM es amigable para el usuario.	4
12	La estructura mecánica del SIM es firme y estable.	5
13	La estructura del SIM mantiene el ángulo del sensor (cámara) estable para evitar el error de paralaje.	5
14	La estructura del SIM garantiza la integridad del equipo y la estabilidad de este durante su empleo.	5
15	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.	4
16	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se empleado de forma rápida.	2
17	El SIM hace uso de la cámara actual del laboratorio.	4

B.1.5. Reflexión en los resultados y el proceso

Una vez con la importancia de cada necesidad se tuvo una segunda reunión con el cliente para hacer una revisión detallada sobre las necesidades del momento, a partir de este detalle

dieron como resultado las necesidades de la Tabla B.2.

Tabla B.2. Necesidades finales para el Sistema Identificador de Menisco.

Numero de necesidad	Necesidad	Importancia
1	El SIM es implementado con el mínimo uso de recursos económicos.	4
2	El SIM habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.	4
3	La estructura del SIM se puede colocar sobre la mesa de plenitud.	4
4	Los valores registrados por el SIM se guardan en un registro y se documentan.	2
5	El SIM es capaz de identificar el menisco cuando se encuentra cerca de la línea de aforo con distintos grados de tolerancia para matraces aforados de 100 ml.	4
6	El valor medido en matraces aforados de 100 ml por el SIM es estable.	5
7	El SIM permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.	3
8	El SIM puede controlar la posición vertical del sensor en un modo manual (para la visualización de los distintos equipos).	4
9	La interfaz de control del SIM es amigable para el usuario.	4
10	La estructura del SIM mantiene el ángulo del sensor estable para evitar el error de paralaje.	5
11	La estructura del SIM garantiza la integridad del equipo y la estabilidad de este durante su empleo.	5
12	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.	4
13	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se empleado de forma rápida.	2
14	El SD hace uso de la cámara actual del laboratorio.	4

B.2. Especificaciones

B.2.1. Elaborar la lista de métricas

A partir de las necesidades se establecieron las siguientes métricas. Esta se puede apreciar en la Tabla B.3. La relación entre las necesidades y las métricas se puede apreciar en la Fig. B.1

Tabla B.3. Lista de métricas para el SIM.

Número de métrica	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unidad
1	1	Costo del SIM.	4	€
2	2	Uso de componentes del LCM.	4	%
3	3	Dimensiones de la estructura mecánica del SIM.	4	cm
4	4	Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.	2	Evaluación
5	5	Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.	4	Lista
6	6	Corrección en la Identificación del Volumen.	5	%
7	7	Versatilidad de Visualización de Equipos.	3	Lista
8	8	El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.	4	Binario
9	8	Rango de posiciones verticales del SIM.	4	cm
10	9	Evaluación de la Amigabilidad de la Interfaz de Usuario.	4	Subjetivo
11	10	Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM.	5	°
12	11	Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.	5	Adimensional
13	12	Facilidad de Desarme y Almacenamiento.	4	Subjetivo
14	13	Tiempo de Desarme y Almacenamiento.	2	Minutos
15	14	Uso de la cámara actual.	4	Binario

		Métricas														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Costo del SIM.	Uso de componentes del LCM.	Dimensiones de la estructura mecánica del SIM.	Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.	Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.	Corrección en la identificación del Volumen.	Versatilidad de Visualización de Equipos.	El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.	Rango de posiciones verticales del SIM.	Evaluación de la Amigabilidad de la Interfaz de Usuario.	Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM.	Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.	Facilidad de Desarme y Almacenamiento.	Tiempo de Desarme y Almacenamiento.	Uso de la cámara actual.
Necesidades																
1	El SIM es implementado con el mínimo uso de recursos económicos.	■														
2	El SIM habilita la integración del equipo actual para la identificación del menisco.		■													
3	La estructura del SIM se puede colocar sobre la mesa de planitud.			■												
4	Los valores registrados por el SIM se guardan en un registro y se documentan.				■											
5	El SIM es capaz de identificar el menisco cuando se encuentra cerca de la línea de aforo con distintos grados de tolerancia para matraces a frados de 100 ml					■										
6	El valor medido en matraces a frados de 100 ml por el SIM es estable.						■									
7	El SIM permite la visualización de distintos equipos de laboratorio con distintas capacidades.							■								
8	El SIM puede controlar la posición vertical del sensor en un modo manual para la visualización de los distintos equipos.								■	■						
9	La interfaz de control del SIM es amigable para el usuario.										■					
10	La estructura del SIM mantiene el ángulo del sensor estable para evitar el error de paralelaje.											■				
11	La estructura del SIM garantiza la integridad del equipo y la estabilidad de este durante su empleo.												■			
12	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea.													■		
13	El SIM se puede desarmar para guardarlo durante el tiempo que no se emplea de forma rápida.														■	
14	El SIM hace uso de la cámara actual del laboratorio.															■

Figura B.1. Matriz de relación entre la necesidad y su métrica.

B.2.2. Fijar objetivos ideales y mínimamente aceptables

Después se establecieron los valores ideales y marginales. Esto se muestra en la Tabla B.4.

Tabla B.4. Especificaciones objetivo.

Número de métrica	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unidad	V. Marginal	V. Ideal
1	1	Costo del SIM.	4	€	< 300 000	<100 000
2	2	Uso de componentes del LCM.	4	%	≥50 %	≥70 %
3	3	Dimensiones de la estructura mecánica del SIM.	4	cm	< 60x60 cm	< 40x40cm
4	4	Puntuación de la satisfacción de la calidad de los registros.	2	Evaluación	≥6	≥8
5	5	Tolerancias disponibles para la identificación del menisco.	4	Lista	2	4
6	6	Corrección en la Identificación del Volumen.	5	%	≤0,2 %	≤0,1 %
7	7	Versatilidad de Visualización de Equipos.	3	Lista	1	3
8	8	El SIM posee un control en la velocidad de desplazamiento.	4	Binario	Sí	Sí
9	8	Rango de posiciones verticales del SIM.	4	cm	≥25	≥35
10	9	Evaluación de la Amigabilidad de la Interfaz de Usuario.	4	Subjetivo	≥6	≥8
11	10	Rango de movimiento en Roll y Pitch del sensor del SIM.	5	°	<1,3	<1
12	11	Factor de seguridad de las piezas claves de la estructura mecánica.	5	Adimensional	≥2	≥2,5
13	12	Facilidad de Desarme y Almacenamiento.	4	Subjetivo	≥3	≥4
14	13	Tiempo de Desarme y Almacenamiento.	2	Minutos	≤10	≤5
15	14	Uso de la cámara actual.	4	Binario	Sí	Sí

A continuación, se muestra la justificación de cada Valor ideal o Valor Marginal:

■ **Especificación 1**

El valor ideal se definió con el posible presupuesto obtenible del Laboratorio Costarricense de Metrología

■ **Especificación 2**

Este porcentaje se define a partir del uso de los componentes ya ubicados en el laboratorio. La lista de partes se puede apreciar en la Tabla B.5.

Tabla B.5. Lista de componentes presentes en el laboratorio.

Componente	Cantidad	Descripción
Cámara Hayear de 48MP	1	Cámara empleada para ayudar al ejecutante con la visualización del menisco.
Monitor	1	Un monitor empleado para visualizar lo que la cámara captura.
Tornillos sin fin	2	Tornillo de avance de 8x500 mm con tuerca de latón.
Varilla lisa de 10 mm de diámetro y 50 cm de largo	3	Una varilla lisa es una barra metálica generalmente utilizada en los ejes de impresoras 3D o máquinas de grabado CNC para deslizarse. Esta varilla tiene un diámetro de 10 mm y una longitud de 50 cm.
Cojinete lineal LM10UU de 10 mm	6	Cojinetes Lineales

Tabla B.5. Lista de componentes presentes en el laboratorio.

Componente	Cantidad	Descripción
		Modelo: JK42HS40-1304F
Motor paso a paso Nema17"	2	<p>Formato NEMA 17</p> <p>Longitud del motor: 40 mm</p> <p>Ancho del motor: 42 mm</p> <p>Corriente por fase: 1.3 amperios</p> <p>Resistencia por fase: 2.9 Ω</p> <p>Torque de retención: 6 kg/cm</p> <p>Número de cables: 4</p> <p>Peso: 0.28 kg</p> <p>Longitud del eje: 24 mm</p> <p>Ancho del eje: 5 mm</p> <p>200 pasos por revolución, 1.8 grados.</p>
Acoplamiento rígido para motor paso a paso	2	<p>Los acoplamientos fijos se utilizan para conectar motores paso a paso, servo o de corriente alterna/de corriente continua a tornillos de bola o tornillos de avance.</p> <p>Dimensiones: 5x8x25 mm.</p>

Tabla B.5. Lista de componentes presentes en el laboratorio.

Componente	Cantidad	Descripción
		Controlador de micro pasos A3967.
Driver de un motor paso a paso	3	Pines MS1 y MS2 expuestos para cambiar la resolución de micro pasos a pasos completos, medios, cuartos y octavos. Compatible con motores paso a paso de 4, 6 y 8 cables de cualquier voltaje Control de corriente ajustable de 150mA/fase a 750mA/fase. Rango de alimentación de 7V a 30V. A mayor voltaje, mayor torque a altas velocidades.
Development board compatible with Arduino UNO Rev3	1	Un Arduino Uno genérico.
Fuente de Poder de 12V y 10A	1	Indicador LED para encendido Entrada: 110VCA / 220VCA Salida: 12Vcc 10 A.
Impresoras 3D	2	Máquinas de impresión 3D con filamentos.
Equipo de computadoras del laboratorio	1	Computadoras pertenecientes al laboratorio.

■ Especificación 3

La necesidad de la cual surge esta métrica es: *La estructura del SIM se puede colocar sobre la mesa de plenitud.* Por lo tanto, para definir esta especificación, se realizó una visita al laboratorio donde se hizo una medición de la mesa de plenitud y se conversó con el cliente la proporción entre la mesa de plenitud y el SIM.

■ **Especificación 4**

Para esta métrica se realizará una encuesta para que el cliente evalué la calidad y grado de satisfacción del almacenamiento de datos.

1. **Muy insatisfecho:** La experiencia ha sido extremadamente negativa, y no se cumplió ninguna expectativa.
2. **Insatisfecho:** La experiencia fue principalmente negativa, y pocas expectativas se cumplieron.
3. **Poco satisfecho:** La experiencia fue ligeramente negativa, y algunas expectativas se cumplieron.
4. **Neutral:** No se tiene una opinión positiva ni negativa; la experiencia fue ni buena ni mala.
5. **Poco satisfecho:** La experiencia fue ligeramente positiva, y algunas expectativas se cumplieron.
6. **Satisfecho:** La experiencia fue principalmente positiva, y la mayoría de las expectativas se cumplieron.
7. **Bastante satisfecho:** La experiencia fue positiva, y casi todas las expectativas se cumplieron.
8. **Muy satisfecho:** La experiencia fue extremadamente positiva, y todas las expectativas se cumplieron.
9. **Extremadamente satisfecho:** La experiencia superó con creces todas las expectativas, y se sintió un alto grado de satisfacción.
10. **Totalmente satisfecho:** La experiencia fue excepcionalmente satisfactoria en todos los aspectos posibles; no se podría pedir una mejor experiencia.

Las preguntas serán las siguientes:

1. ¿Cómo calificarías la facilidad de uso del registro de resultados?
2. ¿Encuentras que el registro de resultados cumple tus expectativas en términos de funcionalidad?

3. ¿Crees que el registro de resultados contribuye positivamente a tu productividad o eficiencia?
4. ¿Te sientes satisfecho con la presentación visual de los resultados en nuestra solución?
5. ¿Consideras que el registro de resultados es intuitivo y fácil de entender?
6. ¿Qué tan útil encuentras la información proporcionada por el registro de resultados para tomar decisiones informadas?
7. ¿Qué tan satisfecho estás en general con el registro de resultados de nuestra solución?

Estas preguntas te ayudarán a recopilar comentarios específicos sobre el registro de resultados y a identificar áreas de mejora para satisfacer mejor las necesidades y expectativas de los usuarios.

■ **Especificación 6**

Se va a comparar el valor medido en matraces de 100 mL contra el valor reportado del laboratorio y contra el valor nominal

■ **Especificación 7**

Los valores de esta especificación se conversaron con el cliente y personal del laboratorio, los valores de esta pueden variar de acuerdo con el método para visualizar el menisco.

■ **Especificación 8**

Esta especificación se refiere a la capacidad de poder identificar la cercanía del menisco a la línea de aforo en matraces aforados de distintas capacidades o en distintos equipos. Se realizará pruebas de identificación de meniscos en distintos equipos de laboratorio.

■ **Especificación 9**

Esta especificación se definió de forma binaria ya que es una característica que el cliente pidió del sistema.

■ **Especificación 10**

Se emplea la misma escala utilizada en la Especificación 4.

■ **Especificación 11**

El paralaje es el fenómeno óptico por el cual un objeto parece tener diferentes posiciones vistas desde diferentes puntos de observación. Esto ocurre cuando observamos un objeto desde dos puntos de vista ligeramente diferentes. En otras palabras, la paralaje se refiere al cambio aparente en la posición de un objeto cuando se ve desde diferentes ángulos. Este error depende de la instancia a la cual se va a colocar el sensor o punto de la vista (sensor) del instrumento, a continuación, se muestra el desplazamiento máximo permitido para distintas distancias. Suponiendo que el grosor de la línea de aforo es de 5mm el cálculo se haría de la siguiente forma:

$$Ang_{paralaje} = \arctan\left(\frac{5(\text{mm})}{WD(\text{mm})}\right) \quad (\text{B.1})$$

Donde Distancia de trabajo (WD) corresponde a la distancia desde la lente al equipo de laboratorio a calibrar. En la Tabla B.6 se observa el ángulo al cual se presenta el paralaje según la distancia de trabajo.

Tabla B.6. Ángulo al cual se presenta el paralaje según la distancia de trabajo.

Distancia de trabajo (mm)	Ángulo al que se presenta el paralaje (°)
100	2,86
110	2,60
120	2,38
130	2,20
140	2,04
150	1,90
160	1,78
170	1,68
180	1,59
190	1,50
200	1,43
210	1,36
220	1,30
230	1,24
240	1,19

Tabla B.6. Ángulo al cual se presenta el paralaje según la distancia de trabajo.

Distancia de trabajo (mm)	Ángulo al que se presenta el paralaje (°)
250	1,14
260	1,10
270	1,06
280	1,02
290	0,98
300	0,95

Se puede apreciar que mientras más lejos menor es el ángulo con respecto a la horizontal que se puede mover la cámara, para esta solución se tomara el valor menor a un 1° como ideal, y 1,5° como valor marginal. Ya que son las distancias a las que se suele colocar el instrumento de calibración de la lente de la cámara.

■ **Especificación 12**

Para la determinación de los factores de seguridad se siguió lo mostrado en la Tabla B.7.

Tabla B.7. Factor de seguridad de acuerdo con la aplicación y materiales empleados. [50]

Aplicación	Factor de seguridad
Para usar con materiales altamente confiables donde las condiciones de carga y ambientales no son críticas y donde el peso es una consideración importante.	1,3 – 1,5
Para usar con materiales confiables donde las condiciones de carga y del ambiente no son muy severas.	1,5 – 2,0
Para usar con materiales comunes donde las condiciones de carga y ambientales no son severas.	2,0 – 2,5
Para usar con materiales menos probados y frágiles donde las condiciones de carga y ambientales no son severas.	2,5 – 3,0

Tabla B.7. Factor de seguridad de acuerdo con la aplicación y materiales empleados. [50]

Aplicación	Factor de seguridad
Para el empleo con materiales cuyas propiedades no son confiables y donde las condiciones de carga y ambientales no son severas, o donde se utilizan materiales confiables bajo condiciones difíciles y las condiciones ambientales son difíciles.	3,0 – 4,0

La aplicación en la que nos encontramos utiliza materiales confiables con las condiciones de un laboratorio el cual tiene todos sus aspectos controlados. Por ende, para sobredimensionar el equipo se deseará un factor de seguridad mayor a 2,5 en el caso ideal y mayor a 2,0 en el marginal.

■ Especificación 13

Se analizará la siguiente escala:

1. **Muy difícil:** El proceso de desarme es extremadamente complicado y requiere mucho tiempo. El almacenamiento posterior es confuso y poco práctico.
2. **Difícil:** El desarme del producto presenta algunos desafíos y puede llevar más tiempo del esperado. El almacenamiento posterior es un poco complicado.
3. **Moderado:** El desarme del producto es moderadamente fácil, pero todavía puede ser un poco engorroso en ciertas áreas. El almacenamiento es relativamente sencillo, pero puede requerir cierto esfuerzo.
4. **Fácil:** El producto se desarma con relativa facilidad y no requiere mucho tiempo ni esfuerzo. El almacenamiento posterior es directo y sin complicaciones.
5. **Muy fácil:** El proceso de desarme es extremadamente sencillo y rápido. El producto se guarda de manera ordenada y sin ningún problema.

■ Especificación 14

Estos valores se establecieron a partir de charlas con el usuario, indico que el tiempo de armado del SIM no es importante como se puede constatar en el valor indicado en la encuesta. Por ende, se establecieron unos valores razonables para el usuario.

B.3. Generación de conceptos

En esta sección se documentará la generación de conceptos desde la descomposición funcional, hasta la exploración sistemática.

B.3.1. Paso 1: Aclarar el problema

Leer el *Paso 1* de la sección 3.3 para ver los detalles de esta sección.

B.3.2. Paso 2 y 3: Buscar Externamente e Internamente

Aquí se documentará la Búsqueda Interna y Externa para encontrar los *fragmentos* de conceptos.

- Dar movimiento vertical a la cámara

Sistema de Engranaje y Cremallera

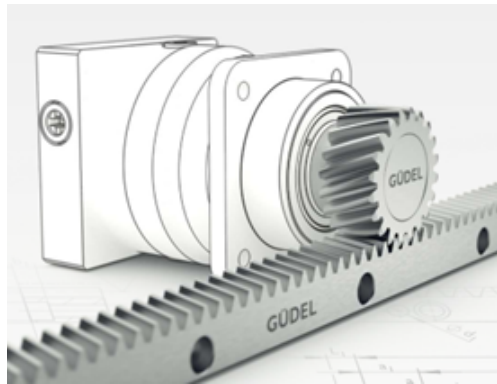


Figura B.2. Tecnología del Cremallera y Piñón. [51]

Es un mecanismo comúnmente utilizado para convertir el movimiento de rotación en lineal, o viceversa. Tiene las siguientes modalidades: [52], [53]

Transmisión de movimiento: cuando el piñón gira, sus dientes engranan con los de la cremallera y empujan o tiran de la cremallera, dependiendo de la dirección de rotación del piñón. Esto resulta en un movimiento lineal de la cremallera.

Conversión de movimiento: por otro lado, si la cremallera se mueve linealmente, arrastra el piñón a lo largo de su eje y lo hace girar. Esto convierte el movimiento lineal en movimiento

rotativo.

Transmisión por correa

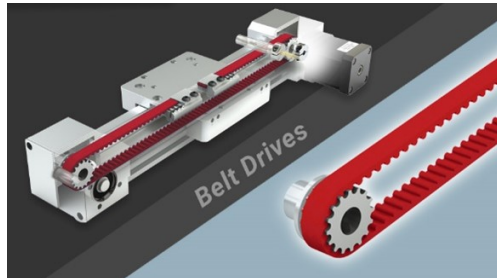


Figura B.3. Tecnología de transmisión por correa. [54]

Convierte movimiento rotativo a lineal utilizando una correa dentada. Ventajas: Puede desplazar objetos en largas carreras, alta velocidad de desplazamiento y alta eficiencia. Por otro lado, sus desventajas son las siguientes: su implementación tiene un alto coste, tiene una baja precisión y repetitividad en su posición (no ideal para movimientos precisos).

Tornillo de avance

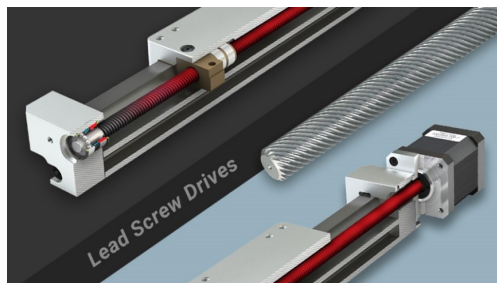


Figura B.4. Representación de la tecnología de tornillo de avance. [54]

Utiliza una varilla roscada para convertir movimiento rotacional en movimiento lineal. Tiene las siguientes ventajas: Bajo costo, alta precisión y repetibilidad en la posición, rápida respuesta. En contraposición sus desventajas son: limitadas capacidades de carga, velocidad limitada.

Tornillo de bolas

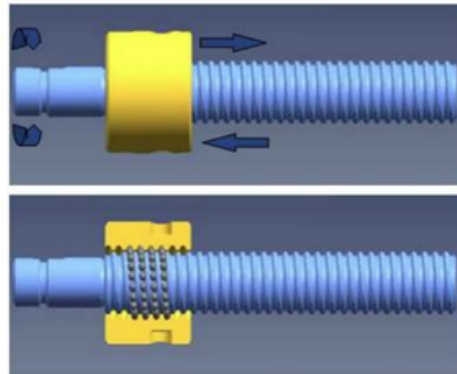


Figura B.5. Representación de la tecnología de tornillo de Bolas. [55]

La transmisión por tornillo de bolas es un mecanismo que convierte el movimiento rotacional en lineal. Este conecta el tornillo y la tuerca a través de bolas que ruedan en la forma correspondiente para transmitir el movimiento. Las fuerzas se distribuyen sobre un gran número de esferas, lo que proporciona una carga relativa comparativamente baja por cada una.

Pistón Hidráulico/Neumático

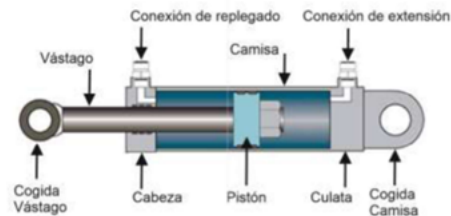


Figura B.6. Representación de la tecnología de Pistón. [56]

Los pistones hidráulicos son sistemas que generan movimiento lineal a partir de la presión de un fluido hidráulico.

■ Sujetar Cámara

Abrazadera en la lente (actual, pero refinado): Un sistema similar al usado actualmente, se sujetará el sistema desde la lente de la cámara.



Figura B.7. Abrazadera actual de la lente de la cámara.

Haciendo de la cámara con los tornillos de esta: una base con unos espacios para tornillos aprovechando los que trae ya la cámara.



Figura B.8. Vista de la cámara para apreciar los agujeros de sujeción de tornillos.

Abrazadera a la cámara (Jaula): una jaula que se divida en dos y que abrace la cámara para sujetarla desde todas las direcciones.

Abrazadera tipo soporte de teléfono con resorte: Una prensa inicialmente cerrada, se separará y se le introducirá la cámara, la presión se realizará mediante un resorte.



Figura B.9. Sujetadores de teléfono en vehículos.

■ **Aceptar o almacenar energía**

1. Químicos

- a) Gasolina: usar gasolina comercial para el uso de un generador (sistema de combustión).

2. Eléctrico.

- a) Directo del tomacorriente.
- b) Fuente de energía.
- c) Baterías Ion-Litio.
- d) Supercondensadores.
- e) Paneles solares.

3. Fuente de energía Neumática.

4. Fuente de energía Hidráulica.

5. Energía mecánica brindada por una persona.

■ **Convertir energía a movimiento**

Motor de combustión interna: Es una máquina que convierte la energía química contenida en un combustible en energía mecánica mediante la combustión del combustible dentro de una cámara de combustión interna. Son ampliamente utilizados en vehículos de todo tipo, generadores de electricidad estacionarios y en una variedad de aplicaciones industriales de aplicaciones industriales. [57]

Motor de corriente continua: Un motor de corriente continua es un tipo de motor eléctrico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de campos magnéticos [58]. Posee una serie de ventajas como:

- Ofrecen un control preciso de la velocidad y el par.
- Poseen un arranque suave y proporcionan un torque alto.
- Permiten un control sencillo y reversible de la dirección del movimiento.
- Son capaces de lograr una alta eficiencia energética.
- Poseen una amplia gama de tipos según el torque, velocidad y consumo necesario.

Motor de corriente alterna: Es un tipo de motor eléctrico que utiliza corriente alterna. Se basa en los principios del campo magnético rotativo producido por la corriente alterna para generar el movimiento del rotor [59]. Posee las siguientes características: [60][61]

- Es fácil de alimentar ya que es la forma de energía eléctrica más comúnmente disponible en redes eléctricas públicas.
- Suelen necesitar menos presupuesto que sus pares para realizar su mantenimiento.
- Poseen una amplia gama de opciones de control de velocidad, lo que resulta en un control más preciso y una mayor eficiencia energética.
- Pueden manejar niveles de potencia nominal mayores.

Motor paso a paso: funcionan mediante la conversión de pulsos eléctricos discretos en movimientos angulares precisos y controlados. Posee muchas aplicaciones que requieren un posicionamiento preciso, como en impresoras 3D, máquinas CNC, equipos de automatización industrial y robótica. [62]

Motor síncrono: tiene como principal característica que la velocidad de rotación del rotor está relacionada con la frecuencia de la corriente alterna de la cual recibe su energía.

Por ende su principal problemática es que necesita sí o sí un vareador de frecuencia para que su velocidad sea controlada lo que supone un esfuerzo económico mayor. [63]

Palanca rotacional: este ítem se refiere a el sistema de engranes y palanca necesarios para que una persona transfiera energía al SD mediante el movimiento de un brazo o otro.

- **Biblioteca de Visión Artificial**

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) es una biblioteca que contiene multiples funciones para el procesamiento de imágenes en multiples codigos de programación. Esta biblioteca es altamente versátil y es ampliamente utilizada en aplicaciones que van desde el reconocimiento facial y la detección de objetos hasta el seguimiento de movimiento y la realidad aumentada. Se puede acceder a su versión de Python por medio del módulo “cv2”. [64]-[66]

Scikit-image (Skimage) es una biblioteca de procesamiento de imágenes en Python que proporciona una gran variedad de algoritmos y herramientas para el tratamiento de imágenes digitales. Fue diseñada con el fin de ser fácil de usar, eficiente y versátil. Incluye las siguientes características: funciones de manipulación de imágenes, operaciones de procesamiento de imágenes, extracción de características y análisis de imágenes, integración de otras bibliotecas de Python y una documentación completa y comunidad activa. [67]

LabVIEW es un sistema de desarrollo de sistemas y un lenguaje de programación gráfico utilizado principalmente en aplicaciones de adquisición de datos, control de instrumentos y sistemas de prueba automatizados. Este posee una biblioteca de visión por computadora llamada Vision Development Module. Esta biblioteca proporciona una amplia gama de funciones para el procesamiento de imágenes, detección de características, la segmentación y otras tareas relacionadas con VA. A pesar de la gran facilidad de uso y que el LCM cuenta con la licencia de uso de LabVIEW no cuenta con el correspondiente para este módulo, pero LabVIEW sigue presentado altas ventajas para el control del sistema. [68]

- **Control de actuadores**

Microcontrolador: es un circuito integrado que contiene un procesador, memoria y periféricos de entrada y salida en un solo dispositivo, está diseñado para realizar el control de sistemas electrónicos. Posee muy buenas características para el uso en soluciones mecatrónicas como su pequeño tamaño, poco consumo de energía y su gran programabilidad. Cabe resaltar que el laboratorio posee un Arduino que es una plataforma de desarrollo de hardware que utiliza microcontroladores el cual está a total disposición del presente proyecto. [69]

PLC: es una máquina electrónica diseñada para controlar diversos dispositivos. Son muy usadas por sus características en instalaciones o aplicaciones donde sea necesario realizar procesos de maniobra y control. Posee muchas ventajas como: cuenta con un espacio mínimo, poco coste de mantenimiento y puedo controlar varios dispositivos. Por el contrario, posee las siguientes desventajas: es muy posible que se requiera una capacitación para su uso, tiene un alto coste inicial de implementación por lo que para soluciones pequeñas no es recomendado. [70]

Microprocesador: es un circuito de alta escala que tiene una gran capacidad de procesamiento de instrucciones y datos. No puede controlar equipo de forma directa, sino que necesita la adición de periféricos o equipo extra para constituir un sistema de control de equipo electrónico. [69]

B.3.3. Paso 4: Exploración sistemática

Para la exploración sistemática primero se hizo el diagrama de árbol observado en la Fig. B.10 para seleccionar el modo de energía que se va a emplear.

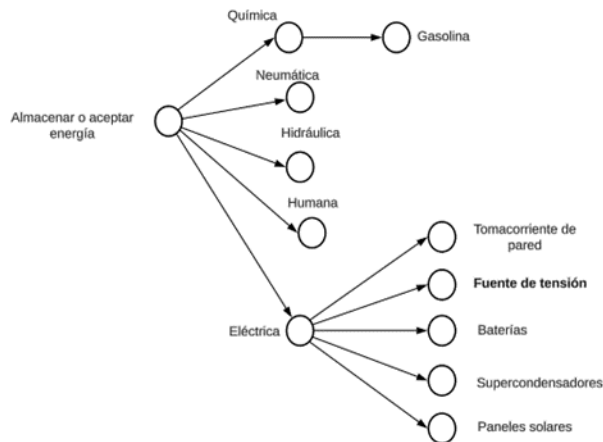


Figura B.10. Árbol de clasificación para los fragmentos de concepto de fuente de energía del SIM.

Para generar los conceptos se utilizó la Matriz de combinación mostrada en la Fig. B.11. En las sucesivas imágenes se pueden apreciar todos los conceptos iniciales generados.

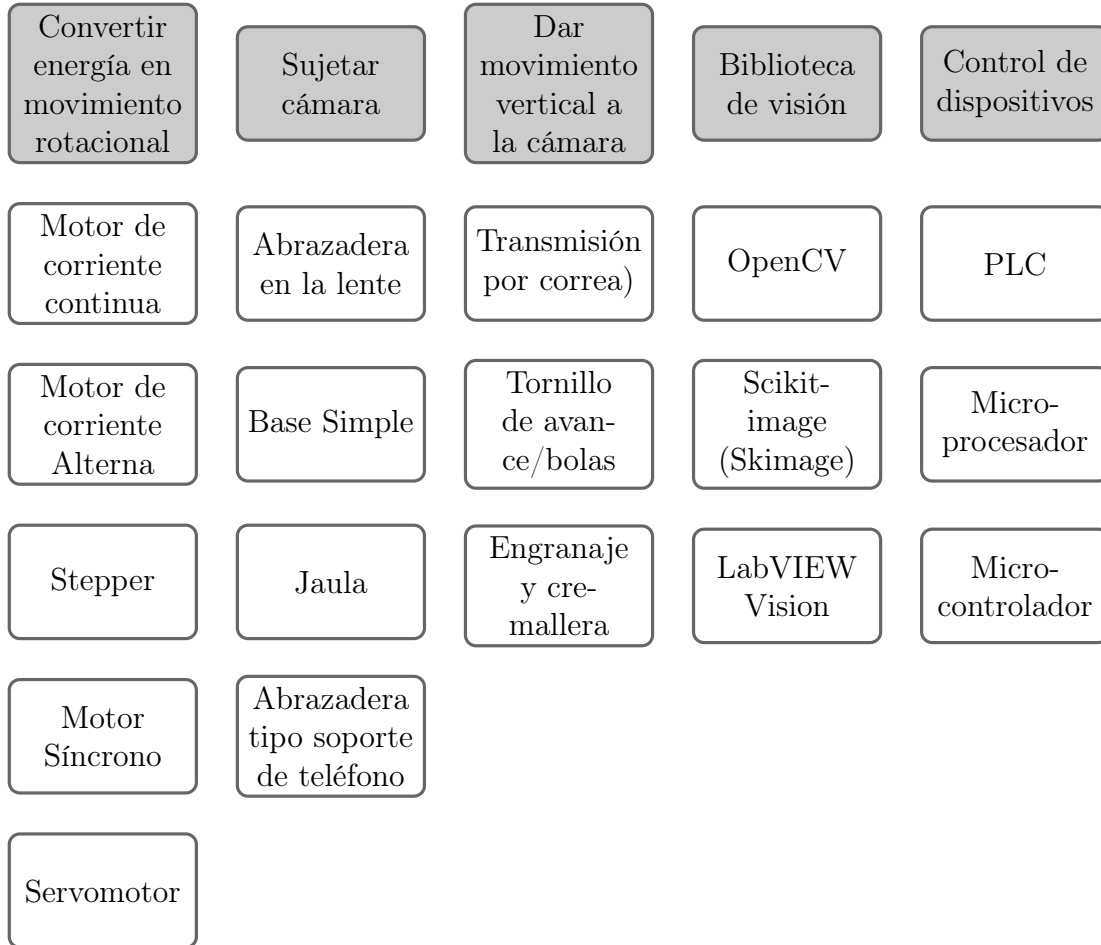


Figura B.11. Diagrama de combinación de conceptos.

Los conceptos generados son los siguientes:

- **Concepto A**

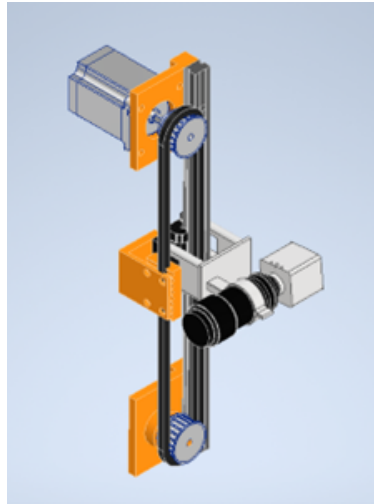


Figura B.12. Esquema del concepto A.

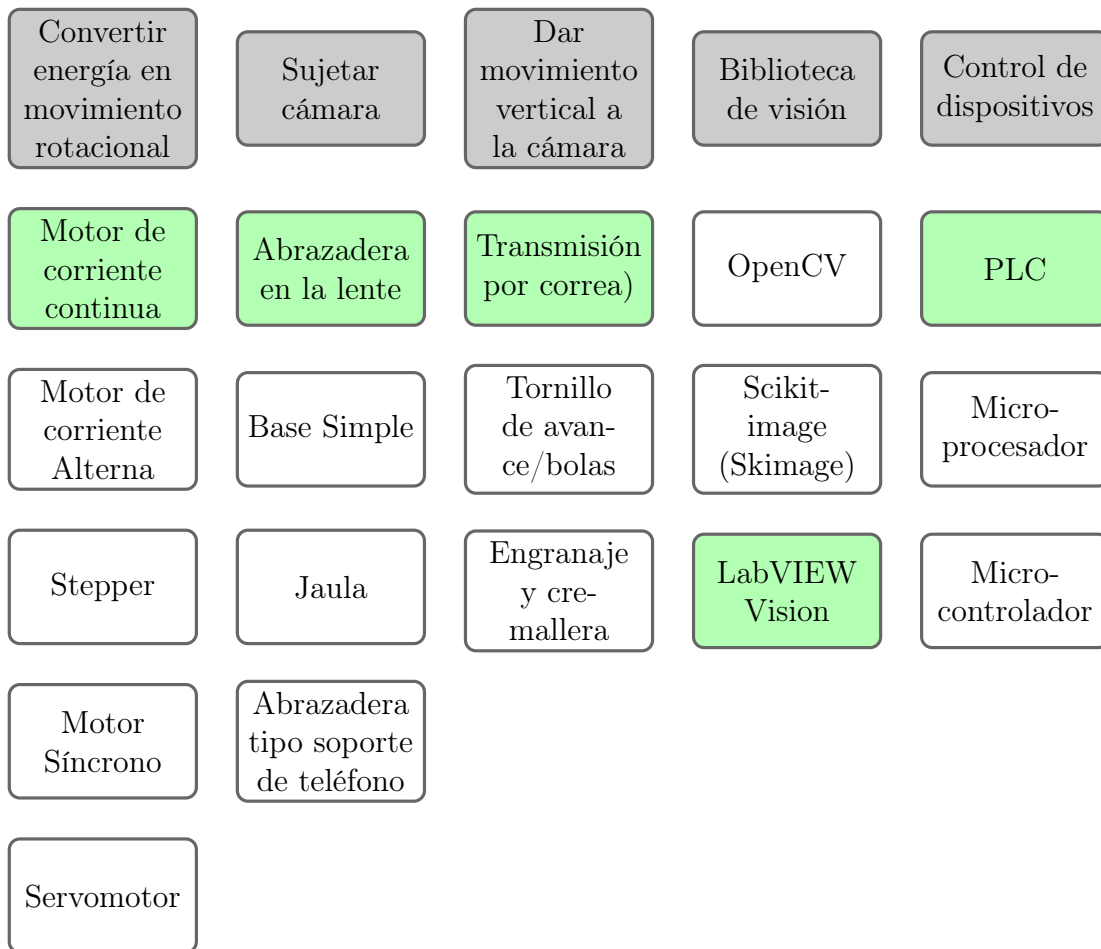


Figura B.13. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto A.

■ **Concepto B**

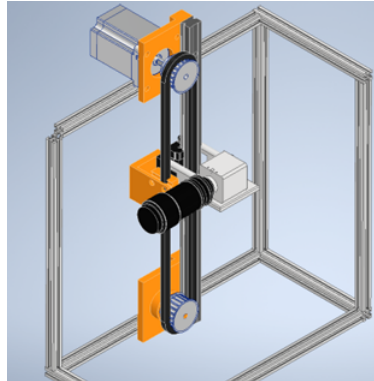


Figura B.14. Esquema del concepto B.

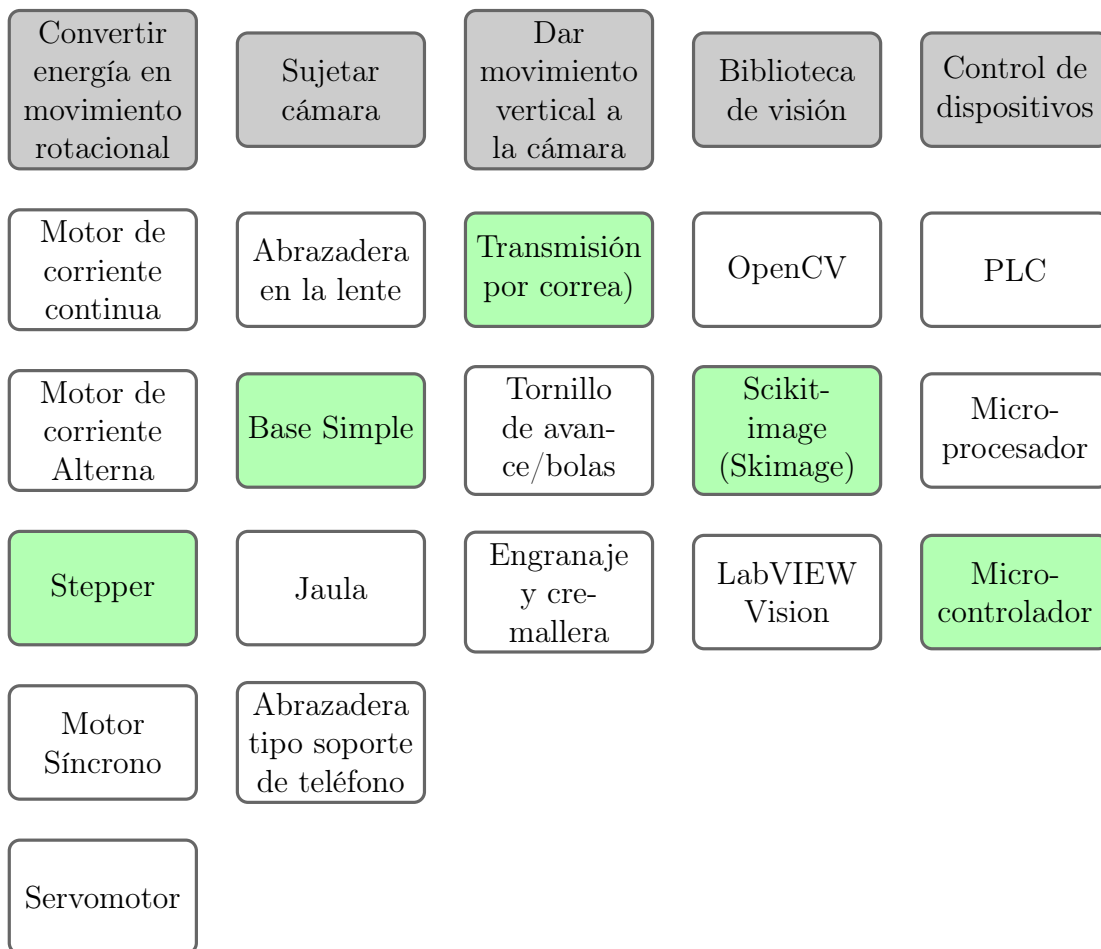


Figura B.15. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto B.

■ **Concepto C**

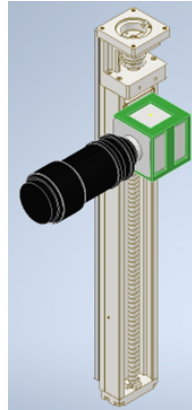


Figura B.16. Esquema del concepto C.

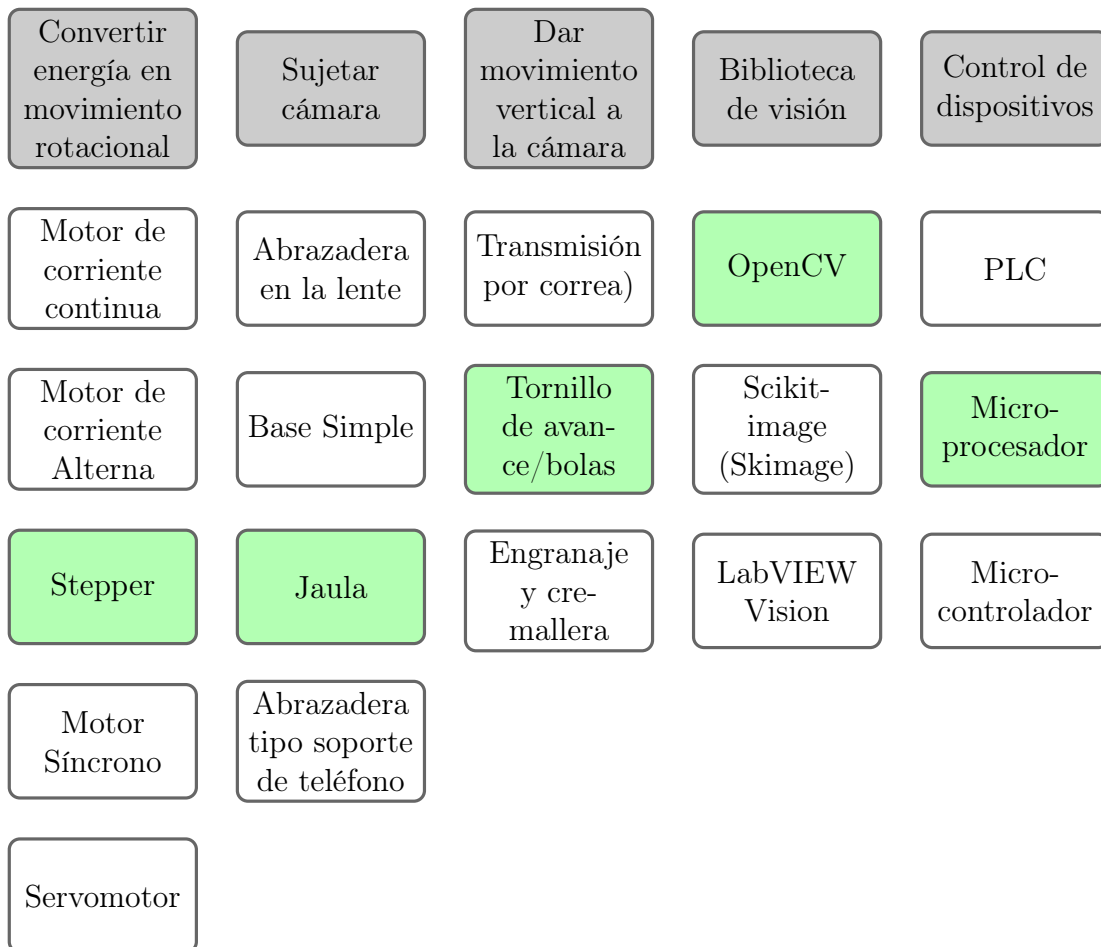


Figura B.17. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto C.

■ Concepto D

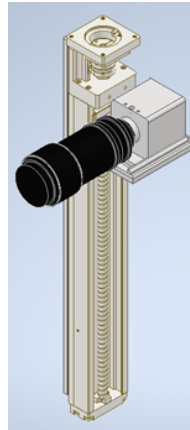


Figura B.18. Esquema del concepto D.

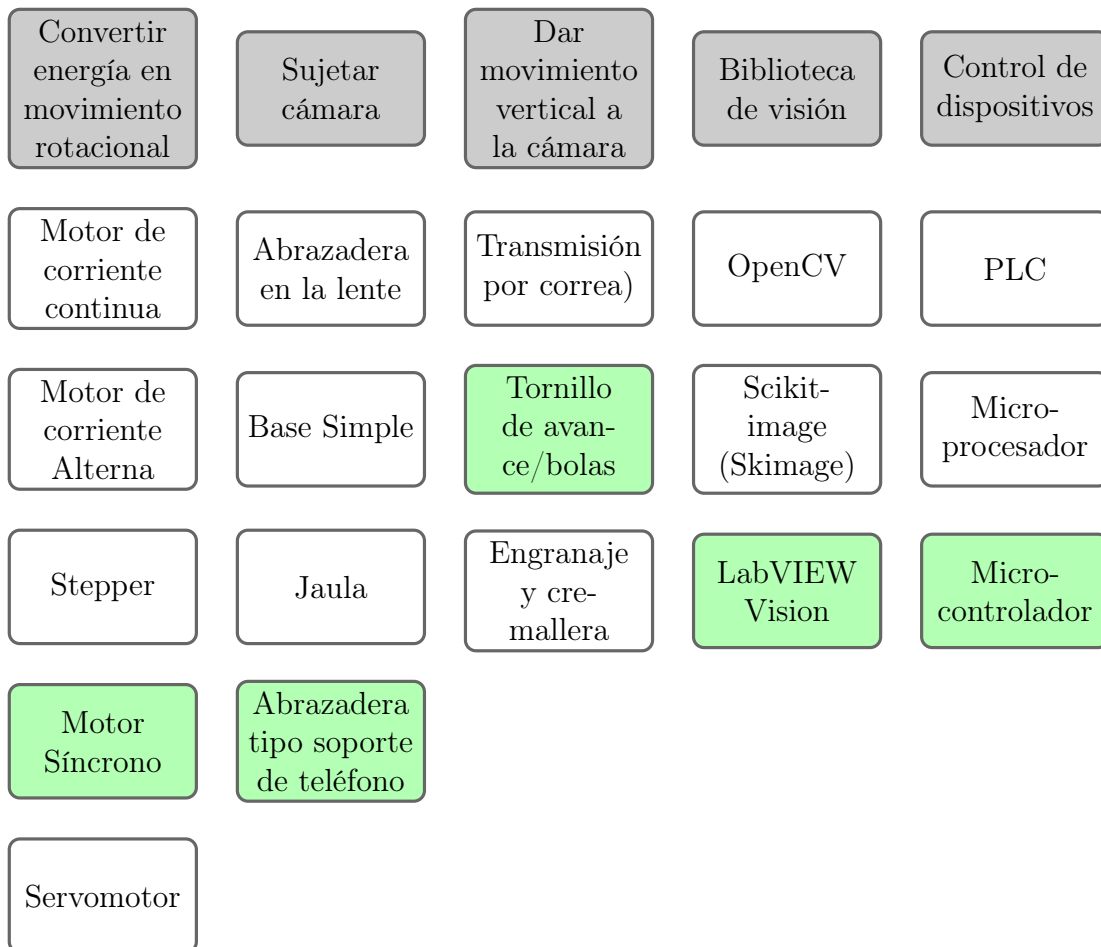


Figura B.19. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto D.

■ **Concepto E**

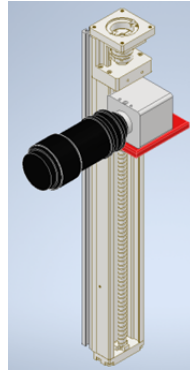


Figura B.20. Esquema del concepto E.

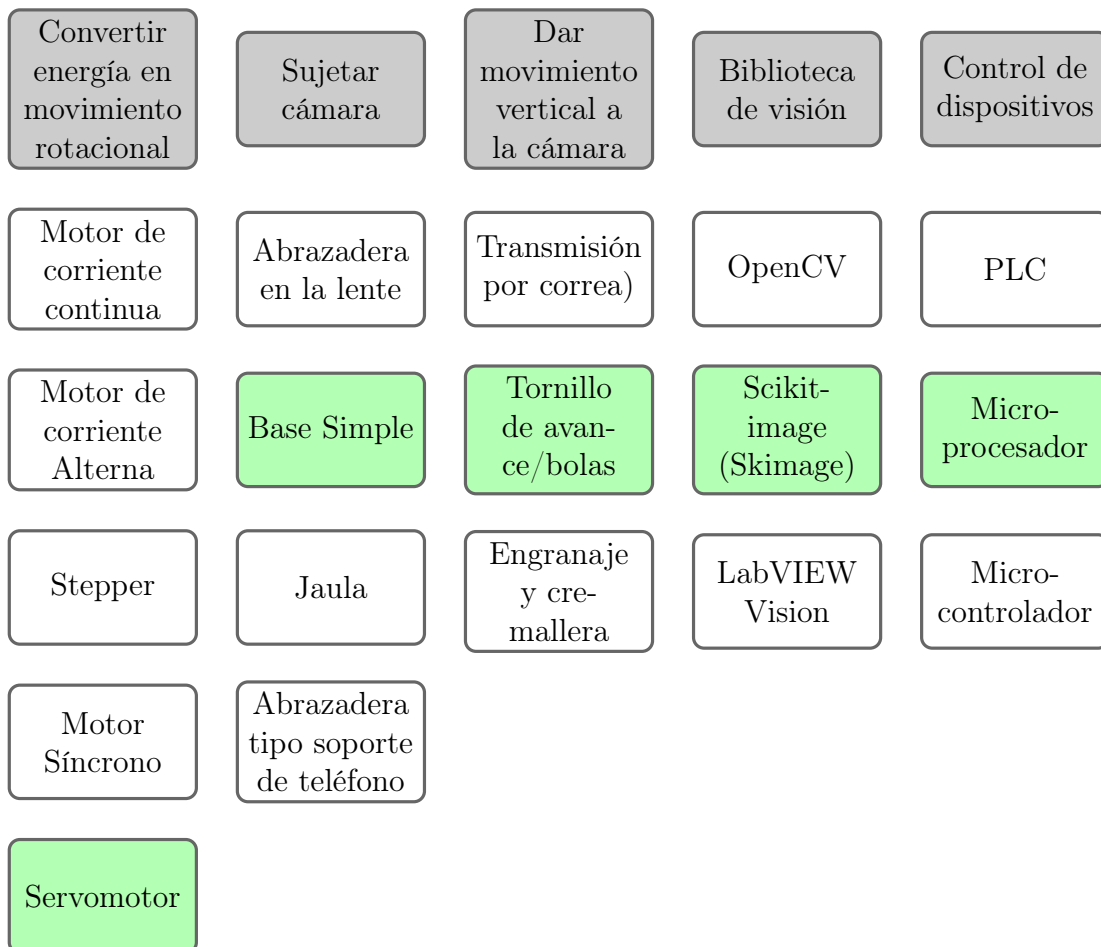


Figura B.21. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto E.

■ **Concepto F**

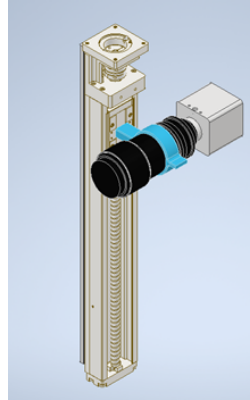


Figura B.22. Esquema del concepto F.

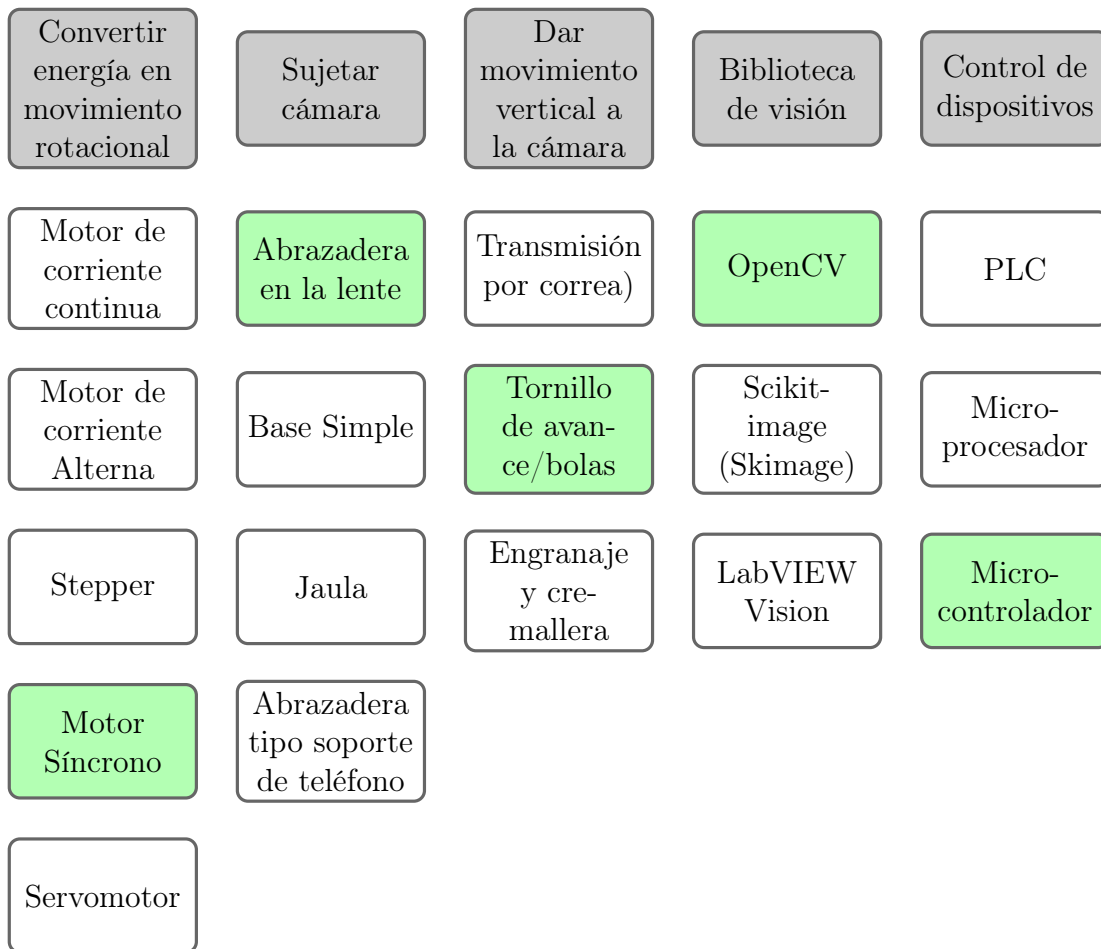


Figura B.23. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto F.

■ **Concepto G**

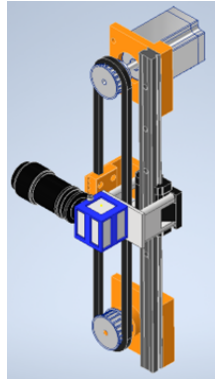


Figura B.24. Esquema del concepto G.

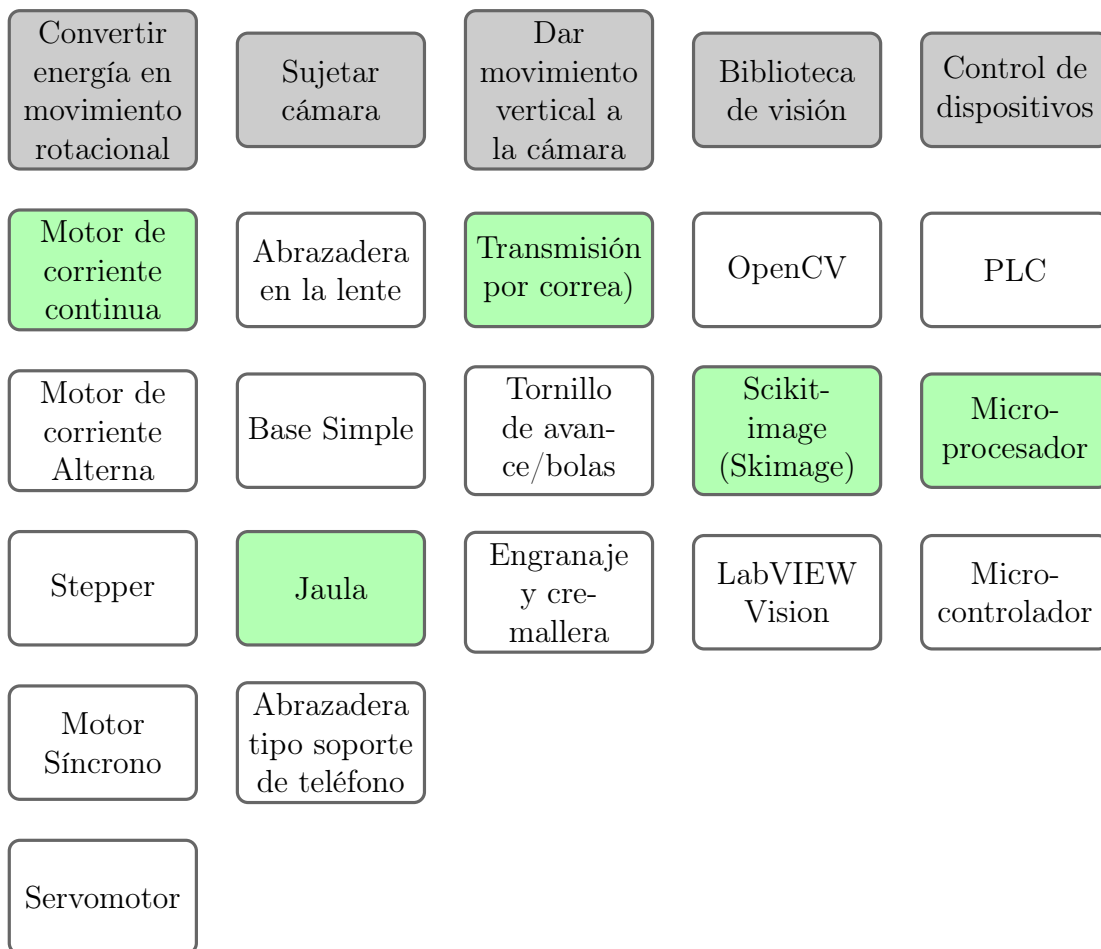


Figura B.25. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto G.

■ **Concepto H**

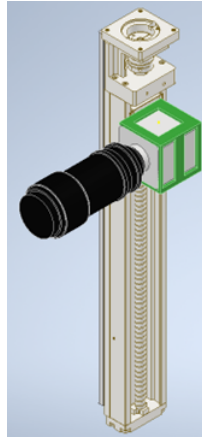


Figura B.26. Esquema del concepto H.

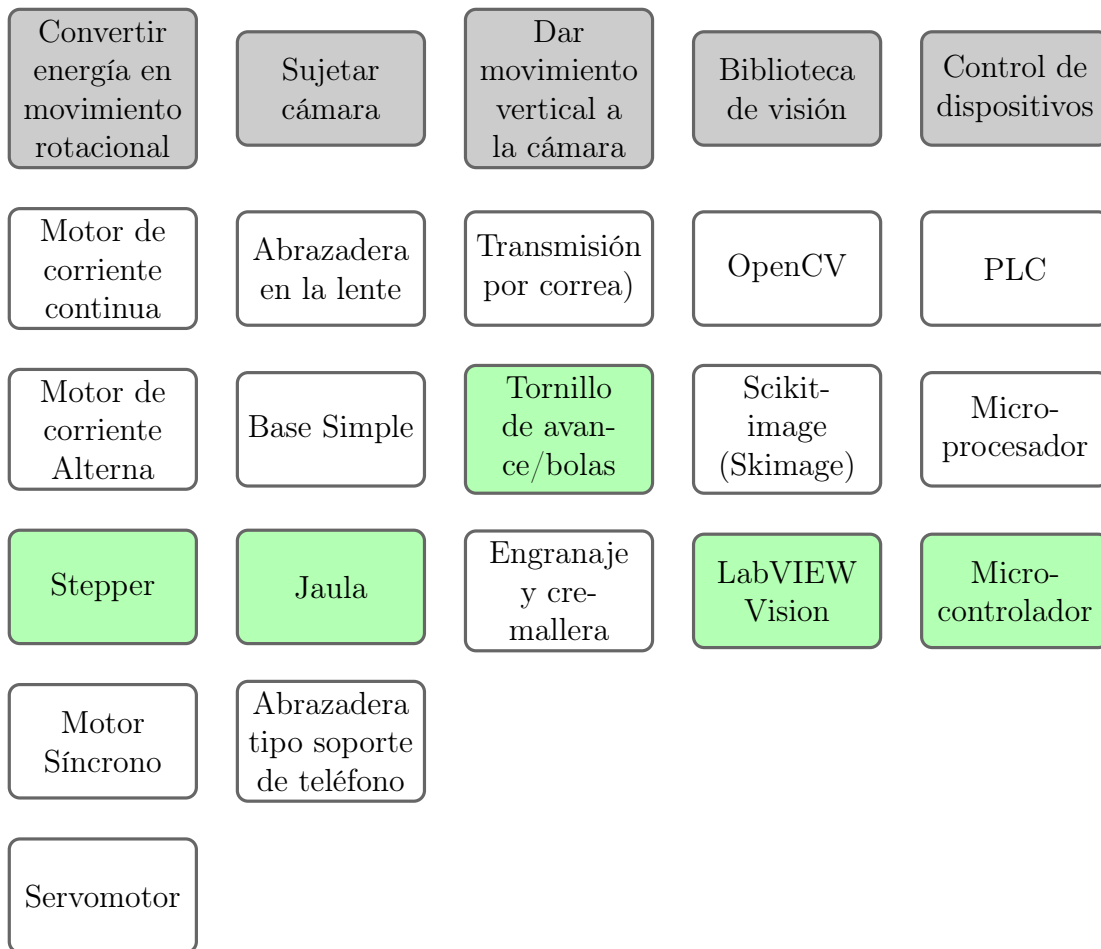


Figura B.27. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto H.

■ **Concepto I**

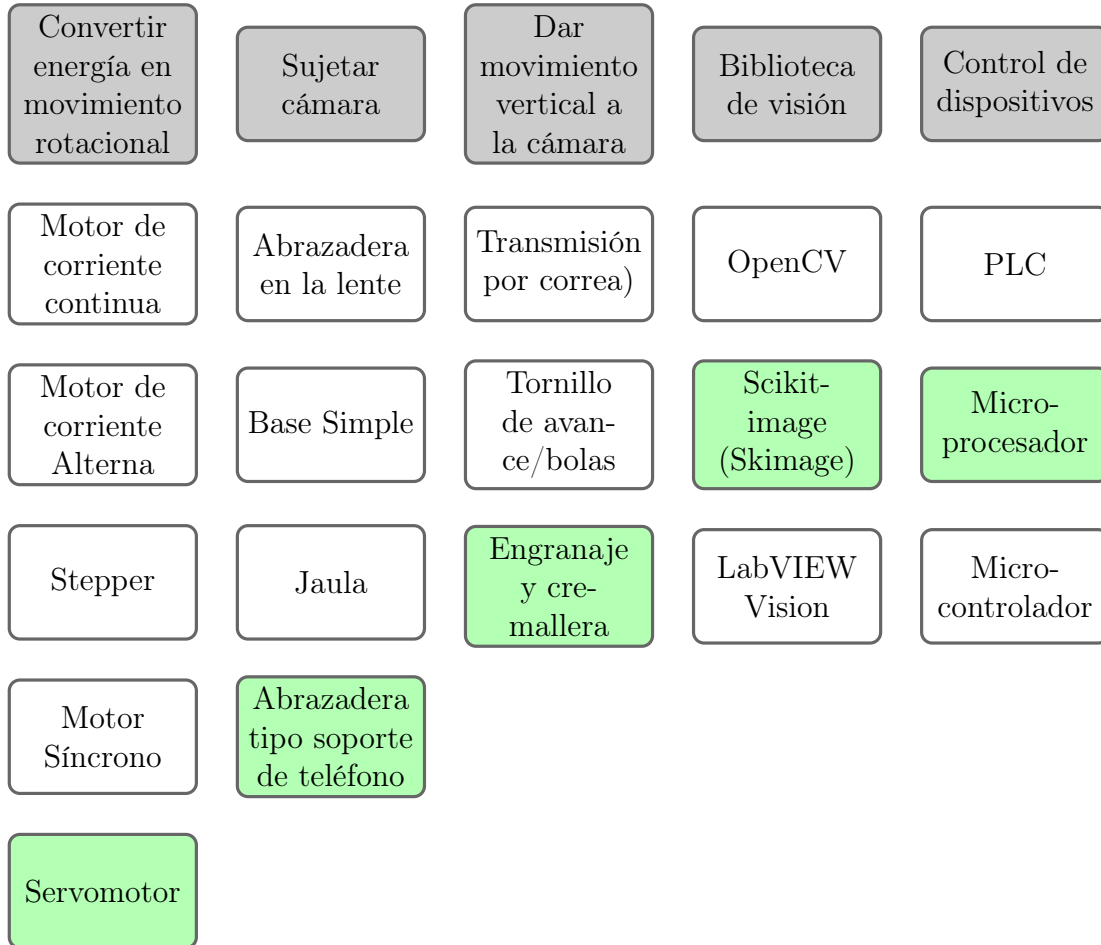


Figura B.28. Diagrama de combinación de fragmentos de conceptos: Concepto I.



Códigos de la implementación de Visión Artificial

En este apéndice se puede leer en detalle las funciones realizadas en *Python* para el procesamiento de imágenes y escritura del registro.

Puedes acceder al archivo en el siguiente enlace: **Click aquí**

A continuación, se aprecia el código:

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
1 #-----Importación de librerías -----#
2 import cv2
3 import numpy as np
4 import os
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import math
7 import sys
8 from datetime import datetime
9
10
11 #Definición de funciones
12 colours = ((255, 255, 255), (0, 255, 0))
13
14 #####
15 ## Esta función proyecta la imagen que recibe con input en una ventana
16 ## Input: Imagen a proyectar
17 #####
18 def mostrar_imagen(imagen):
19
20     # Verificar si la imagen se cargó correctamente
21     if imagen is None:
22         print("No se pudo cargar la imagen.")
23         return
24
25     # Definir el tamaño de la ventana emergente
26     cv2.namedWindow('Imagen', cv2.WINDOW_NORMAL) # Ventana redimensionable
27     cv2.resizeWindow('Imagen', 800, 600) # Establecer el tamaño deseado (ancho, alto)
28
29     # Mostrar la imagen en una ventana con el tamaño modificado
30     cv2.imshow('Imagen', imagen)
31     cv2.waitKey(0)
32     cv2.destroyAllWindows()
33
34 #####
35 # Esta función muestra la imagen final sin distorsiones del proceso
36 # Input: Imagen a mostrar
37 #####
38 def mostrar_imagen_sin_distorsion(imagen,ruta_guardado = None):
39     # Crear una figura y un eje
40     fig, ax = plt.subplots()
41
42     # Mostrar la imagen con el factor de zoom y la paleta de colores 'gray'
43     ax.imshow(imagen, cmap='gray', interpolation='nearest', aspect='auto')
44
45     # Habilitar el modo de zoom
46     ax.set(xlim=[0, imagen.shape[1]], ylim=[imagen.shape[0], 0])
47     ax.autoscale(enable=True, axis='both', tight=True)
48     ax.set_title('Imagen_Final')
49     ax.grid(True)
50
51     # Mostrar la barra de color
52     plt.colorbar(ax.imshow(imagen, cmap='gray'))
53     if ruta_guardado:
54         fig.savefig(ruta_guardado)
55     # Mostrar la imagen
56     plt.show()
57
58 #####
59 ## Esta función se encarga de recortar la zona que selecciona el usuario
60 ## con el mouse.
61 ## Input: Imagen a recortar
62 ## Output: Fragmento recortado
63 #####
64 def seleccionar_region(imagen_original):
65     global x_ini, y_ini, x_fin, y_fin, seleccionando
66
67     x_ini, y_ini, x_fin, y_fin = -1, -1, -1, -1
68     seleccionando = False
69
70     # Definir el tamaño de la ventana
71     cv2.namedWindow('Recorte', cv2.WINDOW_NORMAL) # Ventana redimensionable
72     cv2.resizeWindow('Recorte', 800, 600) # Establecer el tamaño deseado (ancho, alto)
73
74     # Mostrar la imagen original al abrir la ventana de selección
75     cv2.imshow('Recorte', imagen_original)
76     # Selección del espacio a recortar
```

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
77 def seleccionar_region_callback(event, x, y, flags, param):
78     global x_ini, y_ini, x_fin, y_fin, seleccionando
79
80     if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
81         x_ini, y_ini = x, y
82         seleccionando = True
83
84     elif event == cv2.EVENT_MOUSEMOVE:
85         if seleccionando:
86             x_fin, y_fin = x, y
87             imagen_recorte = imagen_original.copy()
88             cv2.rectangle(imagen_recorte, (x_ini, y_ini), (x_fin, y_fin), (255, 0, 0), 1)
89             cv2.imshow('Recorte', imagen_recorte)
90
91     elif event == cv2.EVENT_LBUTTONUP:
92         x_fin, y_fin = x, y
93         seleccionando = False
94         cv2.rectangle(imagen_original, (x_ini, y_ini), (x_fin, y_fin), (255, 0, 0), 1)
95         cv2.imshow('Recorte', imagen_original)
96
97     cv2.setMouseCallback('Recorte', seleccionar_region_callback)
98
99     while True:
100         if cv2.getWindowProperty('Recorte', cv2.WND_PROP_VISIBLE) < 1:
101             break
102         if cv2.waitKey(50) == 27: # Si se presiona la tecla Esc, salir del bucle
103             break
104
105     return imagen_original[min(y_ini, y_fin):max(y_ini, y_fin), min(x_ini, x_fin):max(x_ini, x_fin)]
106
107
108 #####
109 # Esta función permite guardar una imagen en un directorio seleccionado
110 # Input 1: Imagen a guardar
111 # Input 2: Nombre de como se quiere guardar la imagen
112 # Input 2: Nombre de la calibración
113 # Input 3: Numero de la repetición en la calibración
114 #####
115 def guardar_imagen(imagen, nombre, calibracion, num_calibracion):
116     subcarpeta = "Resultados"
117     # Obtener el directorio actual
118     directorio_actual = os.getcwd()
119     print (f"El path es: {directorio_actual}")
120     directorio_direccionado = os.path.join(directorio_actual, subcarpeta)
121     directorio_calibracion = os.path.join(directorio_direccionado, calibracion)
122     directorio_repeticion = os.path.join(directorio_calibracion, num_calibracion)
123     # Combinar el directorio actual con el nombre del archivo para obtener la ruta completa
124     ruta_completa = os.path.join(directorio_repeticion, nombre)
125
126     # Crear las carpetas si no existen
127     os.makedirs(directorio_repeticion, exist_ok=True)
128
129     # Intentar guardar la imagen en la ubicación especificada
130     try:
131         cv2.imwrite(ruta_completa, imagen)
132         print(f"La imagen se ha guardado correctamente en {ruta_completa}")
133         return True
134     except Exception as e:
135         print(f"Error al guardar la imagen: {e}")
136         return False
137
138 #####
139 # Esta función muestra en pantalla un histograma y lo retorna
140 # Input: Imagen de la cual se desea obtener el histograma,
141 #       debe esta binarizada
142 # Output: Histograma de la imagen
143 #####
144 def image_histogram(image):
145     # Definición de limite de histograma
146     lim_sup = 255
147
148     # Definición del tamaño de la imagen
149     plt.figure(figsize=(18, 4))
150     # Creación de la figura
151     # Imagen
152     plt.subplot(121)
153     plt.xticks([])
154     plt.imshow(image)
```

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
154 plt.yticks([])
155 plt.imshow(image, cmap='gray', vmin=0, vmax=255)
156 # Histograma
157 histogram, bin_edges = np.histogram(image, bins=256, range=(0, lim_sup))
158 plt.subplot(122),
159 plt.xlabel("Valor en escala de grises")
160 plt.ylabel("Conteo de pixeles")
161 plt.xlim([0.0, lim_sup])
162 plt.ylim([0.0, np.max(histogram)*(1.03)])
163 plt.vlines(bin_edges[0:-1], 0, histogram, colors='black')
164 # Se guarda la imagen
165 plt.savefig("Contraste.png", format='png', dpi='figure', bbox_inches='tight')
166 plt.close()
167
168 #####
169 # Esta función se encarga de detectar los bordes y dibujarlos en una imagen nueva
170 # Input: Imagen binarizada
171 # Output 1: Coordenadas de los contornos
172 # Output 2: Imagen con los contornos dibujados
173 # Output 2: Cantidad de contornos encontrados
174 #####
175 def detectar_bordes_horizontales(imagen_binarizada):
176
177     # Aplicar un filtro Sobel en el eje y para resaltar los bordes horizontales
178     sobel_y = cv2.Sobel(imagen_binarizada, cv2.CV_64F, 0, 1, ksize=3)
179
180     # Aplicar umbralización para obtener una imagen binaria de los bordes horizontales
181     _, bordes_horizontales = cv2.threshold(np.abs(sobel_y).astype(np.uint8), 50, 255, cv2.THRESH_BINARY)
182     # Encontrar todos los contornos en la imagen binaria de bordes horizontales
183     contornos, _ = cv2.findContours(bordes_horizontales, cv2.RETR_LIST, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
184
185     # Dibujar los contornos en una imagen en blanco
186     contornos_img = np.zeros_like(imagen_binarizada)
187     cv2.drawContours(contornos_img, contornos, -1, (255, 255, 255), 1) # -1 para dibujar todos los contornos
188
189     # Contar la cantidad de contornos detectados
190     num_contornos = len(contornos)
191
192     return contornos, contornos_img, num_contornos
193
194
195
196 #####
197 # Esta función recorre los contornos y calcula la distancia más corta entre ambos
198 # Input 1: Contornos previamente identificados
199 # Input 2: Imagen generada de los bordes
200 # Output 1: Distancia más cercana entre bordes
201 # Output 2: Imagen con los pixeles más cercanos coloreados
202 #####
203 def encontrar_distancia_y_colorear(contornos, imagen_original):
204     distancia_minima = float('inf')
205     imagen_coloreada = cv2.cvtColor(imagen_original, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
206     punto_mas_cercano_1 = None
207     punto_mas_cercano_2 = None
208
209     # Iterar sobre todos los pares de contornos
210     for i in range(len(contornos)):
211         for j in range(i + 1, len(contornos)):
212             # Obtener los puntos de los contornos y ordenarlos por coordenada x
213             puntos_contorno_1 = contornos[i][:, 0]
214             puntos_contorno_2 = contornos[j][:, 0]
215
216             # Iterar sobre las coordenadas x compartidas
217             for x in set(puntos_contorno_1[:], 0).intersection(set(puntos_contorno_2[:], 0)):
218                 # Obtener los puntos con la misma coordenada x en ambos contornos
219                 puntos_contorno_1_x = puntos_contorno_1[puntos_contorno_1[:] == x]
220                 puntos_contorno_2_x = puntos_contorno_2[puntos_contorno_2[:] == x]
221
222                 # Calcular la distancia vertical más cercana entre los puntos con la misma coordenada x
223                 for punto_contorno_1 in puntos_contorno_1_x:
224                     for punto_contorno_2 in puntos_contorno_2_x:
225                         distancia_vertical = abs(punto_contorno_1[1] - punto_contorno_2[1])
226                         if distancia_vertical < distancia_minima:
227                             distancia_minima = distancia_vertical
228                             punto_mas_cercano_1 = punto_contorno_1
229                             punto_mas_cercano_2 = punto_contorno_2
230
231     # Colorear los dos puntos más cercanos de rojo
```

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
232 if punto_mas_cercano_1 is not None and punto_mas_cercano_2 is not None:
233     punto_mas_cercano_1 = tuple(punto_mas_cercano_1)
234     punto_mas_cercano_2 = tuple(punto_mas_cercano_2)
235     cv2.circle(imagen_coloreada, punto_mas_cercano_1, 1, (0, 0, 255), -1)
236     cv2.circle(imagen_coloreada, punto_mas_cercano_2, 1, (0, 0, 255), -1)
237
238     return distancia_minima, imagen_coloreada
239
240 #####
241 # Esta función aumenta el contraste de la imagen recibida
242 # Input: Imagen en escala de grises
243 # Output: Imagen con el contraste mejorado
244 #####
245 def aumentar_contraste(imagen):
246     maximos = list(map(lambda x: max(x), imagen))
247     minimos = list(map(lambda x: min(x), imagen))
248     maxP = max(maximos)
249     minP = min(minimos)
250     x, y = np.shape(imagen)
251     contrastada = np.zeros((x, y), dtype=np.uint8)
252     for i in range(x-1):
253         for j in range(y-1):
254             contrastada[i][j] = 255*((imagen[i][j]-minP)/(maxP-minP))
255     return contrastada
256
257 #####
258 # Esta función binariza la imagen entre sus puntos de mayor cantidad
259 # de píxeles negros
260 # Input 1: Imagen a binarizar
261 # Input 2: Rango inicial del análisis
262 # Input 3: Rango final del análisis
263 # Output: Imagen binarizada
264 #####
265 def binarizar_por_umbral_offset(imagen, rango_inicio, rango_fin, offset):
266     # Calcular el histograma de la imagen
267     hist = cv2.calcHist([imagen], [0], None, [256], [0, 256])
268     # Encontrar el punto más alto en el rango especificado del histograma
269     punto_mas_alto = np.argmax(hist[rango_inicio:rango_fin]) + rango_inicio
270     # Aplicar la umbralización con un offset a partir del punto más alto
271     _, imagen_binarizada = cv2.threshold(imagen, punto_mas_alto + offset, 255, cv2.THRESH_BINARY)
272     return imagen_binarizada
273
274 #####
275 # Esta función recibe una imagen en colores y la pasa a escala de grises
276 # Input: Imagen en formato de color
277 # Output: Imagen en escala de grises
278 #####
279 def convertir_a_escala_de_grises(imagen):
280     imagen_gris = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
281     return imagen_gris
282
283 #####
284 # Función para tomar una foto y guardarla
285 # Input 1: Nombre de la calibración
286 # Input 2: Imagen
287 #####
288 def tomar_foto(nombre_archivo, imagen):
289     cv2.imwrite(nombre_archivo, imagen)
290     print(f"Foto guardada como {nombre_archivo}")
291
292
293
294 #####
295 # Función principal para mostrar el video de la cámara y permitir
296 # al usuario tomar fotos
297 # Input: Nombre de calibración
298 # Output: Imagen guardada en un lugar específico
299 # Return: el número de repetición de la iteración anterior
300 #####
301 def capturar_imagen(nombre_calibracion):
302     cap = cv2.VideoCapture(0) # Abrir la cámara (0 para la cámara predeterminada)
303
304     # Comprobar si la cámara se abrió correctamente
305     if not cap.isOpened():
306         print("Error al abrir la cámara")
307     return
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
309 # Esperar un breve momento para que la cámara se inicie correctamente
310 cv2.waitKey(2000)
311
312 while True:
313     ret, frame = cap.read() # Leer un fotograma de la cámara
314
315     if ret:
316
317         # Dibujar un cuadro azul en la imagen para resaltar un área específica
318         #cv2.rectangle(frame, (100, 100), (300, 300), (255, 0, 0), 1) # Posiciones fijas inicialmente
319
320         cv2.imshow('Presione "s" para tomar una foto, "q" para salir', frame) # Mostrar el fotograma
321
322         key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
323         if key == ord('s'):
324             # Tomar una foto si se presiona la tecla 's'
325             tomar_foto("Foto_Original.jpg", frame)
326             break
327         elif key == ord('q'):
328             # Salir si se presiona la tecla 'q'
329             break
330
331     else:
332         print("Error al capturar fotograma de la cámara")
333         break
334 # Crear el directorio si no existe
335 nombre_archivo = nombre_calibracion + ".txt"
336 ruta_archivo = f"Resultados/{nombre_calibracion}/{nombre_archivo}"
337 if not os.path.exists(ruta_archivo):
338     contador = 0
339 else:
340     # Si existe, sobrescribir la primera línea con el nuevo total de calibraciones
341     with open(ruta_archivo, "r") as archivo:
342         lineas = archivo.readlines()
343         contador = int(lineas[3].split(":")[-1].strip())
344
345 # Liberar los recursos y cerrar las ventanas
346 cap.release()
347 cv2.destroyAllWindows()
348 return contador
349
350 #####
351 # Funcion que calcula el porcentaje de imagen sin contorno
352 # Output: porcentaje de la imagen sin contorno
353 #####
354 def calcular_porcentaje_vacio(imagen_original):
355     # Obtener el ancho de la imagen
356     ancho_imagen = imagen_original.shape[1]
357
358     # Contar el número total de columnas vacías
359     columnas_vacias = 0
360
361     # Recorrer la imagen de izquierda a derecha
362     for x in range(ancho_imagen):
363         # Contar el número de píxeles blancos en la columna actual
364         blancos_en_columna = sum(imagen_original[:, x] == 255)
365
366         # Si hay menos de dos píxeles blancos en la columna, se considera como vacía
367         if blancos_en_columna < 2:
368             columnas_vacias += 1
369
370     # Calcular el porcentaje de columnas vacías respecto al ancho total de la imagen
371     porcentaje_vacio = (columnas_vacias / ancho_imagen) * 100
372
373     return porcentaje_vacio
374
375
376
377 #####
378 # Funcion principal que se encarga de ejecutar el flujo de procesamiento de imágenes
379 # Input 1: el directorio de una imagen en el caso de no desear tomar una imagen en el
380 # momento.
381 # Input 2: Nombre de la calibración.
382 # Input 3: Numero de calibración o repetición del programa.
383 # Input 4: Señal que indica si es necesario o no guardar las imagenes para una posterior
384 # revisión.
385 # Output 1: Mensaje con el estatus del menisco.
386 #####
```

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
-----
387 def ejecutar(nombre_calibracion,num_calibracion,guardar):
388
389     # Convierte el numero de calibracion en un texto para ser guardado
390     num_calibracion_str = "Calibracion_Num_" + str(num_calibracion)
391     Mensaje = ""
392
393     # Obtener el directorio actual
394     directorio_actual = os.getcwd()
395
396     # Nombre del archivo de la imagen
397     nombre_imagen = 'Foto_Original.jpg'
398
399     # Construir la ruta completa de la imagen
400     ruta_imagen = os.path.join(directorio_actual, nombre_imagen)
401
402     # Leer la imagen
403     imagen = cv2.imread(ruta_imagen)
404
405     # Se muestra en una ventana emergente la imagen original
406     mostrar_imagen(imagen)
407
408     # Se genera la seccion recortada de interes
409     imagen_recortada = seleccionar_region(imagen)
410
411     # Se muestra seccion de la imagen recortada
412     mostrar_imagen(imagen_recortada)
413
414     # Se convierte la seccion recortada a una escala de grises
415     imagen_grises = convertir_a_escalas_de_grises(imagen_recortada)
416
417     # Se muestra la imagen en escala de grises
418
419     # Se aumenta el contraste de la seccion recortada
420     imagen_gris_mejorada = aumentar_contraste(imagen_grises)
421
422     # Se muestra en una ventana la imagen con el contraste mejorado
423
424     # Se binariza la imagen
425     imagen_binarizada = binarizar_por_umbral_offset(imagen_gris_mejorada,50, 200, 30)
426
427     # Detecta los contornos en la imagen binarizada
428     contornos, bordes_horizontales_img, num_contornos = detectar_bordes_horizontales(imagen_binarizada)
429
430     # Revisa si el estatus del menisco
431     # 2 contornos el menisco se encuentra separado de la linea de aforo
432     # Mayor a 3 puede ser que toca la linea de foro o que hay un problema con la imagen tomada
433     if(num_contornos == 2):
434         # Se vuelve a binarizar la imagen
435         imagen_binarizada = binarizar_por_umbral_offset(imagen_gris_mejorada,50, 200, 20)
436         # Se vuelve a detectar bordes para volver mostrar el resultado para calcular la distancia entre bordes
437         contornos, bordes_horizontales_img, num_contornos = detectar_bordes_horizontales(imagen_binarizada)
438         distancia_bordes, imagen_puntos = encontrar_distancia_y_colorear(contornos, bordes_horizontales_img)
439         if(distancia_bordes == float('inf')):
440             porcentaje = calcular_porcentaje_vacio(bordes_horizontales_img)
441             if(porcentaje <= 10):
442                 Mensaje = Mensaje + "El menisco esta a punto de tocar la linea de aforo.\n"
443             elif(porcentaje <= 40 and porcentaje > 10):
444                 print("El menisco se encuentra tocando la linea de aforo.")
445                 Mensaje = Mensaje + "El menisco se encuentra tocando la linea de aforo.\n"
446             else:
447                 print("El menisco esta por debajo de la linea de aforo.")
448                 Mensaje = Mensaje + "El menisco esta tocando la linea o sobre la linea de ajuste.\n"
449         else:
450             # Se imprime un mensaje para posteriormente guardarlo
451             Mensaje = Mensaje + "La distancia entre los bordes es de: " + str(distancia_bordes) + " .\n"
452     elif(num_contornos >= 3 and num_contornos <= 9):
453         # Se guarda un mensaje para el registro
454         porcentaje = calcular_porcentaje_vacio(bordes_horizontales_img)
455         if(porcentaje <= 5):
456             Mensaje = Mensaje + "El menisco esta a punto de tocar la linea de aforo.\n"
457         elif(porcentaje <= 40 and porcentaje > 5):
458             print("El menisco se encuentra tocando la linea de aforo.")
459             Mensaje = Mensaje + "El menisco se encuentra tocando la linea de aforo.\n"
460         else:
461             print("El menisco esta por debajo de la linea de aforo.")
462             Mensaje = Mensaje + "El menisco esta tocando la linea o sobre la linea de ajuste.\n"
463     else:
```

Apéndices C. Códigos de la implementación de Visión Artificial

```
464     Mensaje = Mensaje + "Imagen incorrecta, vuelva a tomar la imagen.\n"
465 # Se guardan todas las imágenes en el caso de que el usuario lo indique
466 if(guardar):
467     guardar_imagen(imagen, "Imagen_Original.png", nombre_calibracion, num_calibracion_str)
468     guardar_imagen(imagen_recortada, "Imagen_recortada.png", nombre_calibracion, num_calibracion_str)
469     guardar_imagen(imagen_grises, "Imagen_gris_pre_mejora.png", nombre_calibracion, num_calibracion_str)
470     guardar_imagen(imagen_gris_mejorada, "Imagen_gris_Mejorada.png", nombre_calibracion, num_calibracion_str)
471     if(num_contornos == 2):
472         mostrar_imagen_sin_distorsion(imagen_puntos, ruta_guardado = f"Resultados/{nombre_calibracion}/{num_calibracion_str}/Imagen_Fi
473     else:
474         mostrar_imagen_sin_distorsion(bordes_horizontales_img, ruta_guardado = f"Resultados/{nombre_calibracion}/{num_calibracion_str}.
475 else:
476     if(num_contornos == 2):
477         mostrar_imagen_sin_distorsion(imagen_puntos)
478     else:
479         mostrar_imagen_sin_distorsion(bordes_horizontales_img)
480 return Mensaje
481
482 #####
483 # Esta funcion realiza el registro de la información para revisar el proceso
484 #####
485 def guardar_linea_en_archivo(linea, nombre_archivo, nombre_calibracion, numero_calibracion):
486     nombre_archivo = nombre_archivo + ".txt"
487     linea_nueva = "Iteración numero:" + str(numero_calibracion) + "_" + linea
488     # Obtener la fecha y hora actual
489     fecha_hora_actual = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
490     # Formatear la línea con la fecha y hora
491     linea_formateada = f"[{fecha_hora_actual}] {linea_nueva}\n"
492     # Verificar si el archivo existe
493     ruta_archivo = f"Resultados/{nombre_calibracion}/{nombre_archivo}"
494     if os.path.exists(ruta_archivo):
495         # Si existe, sobrescribir la primera línea con el nuevo total de calibraciones
496         with open(ruta_archivo, "r") as archivo:
497             lineas = archivo.readlines()
498             lineas[3] = f"Total de calibraciones: {numero_calibracion}\n"
499         with open(ruta_archivo, "w") as archivo:
500             archivo.writelines(lineas)
501     else:
502         # Si no existe, escribir la primera línea con el total de calibraciones
503         with open(ruta_archivo, "w") as archivo:
504             archivo.write("Laboratorio Costarricense de Metrología LCM.\n")
505             archivo.write("Registro de uso del Sistema Identificador de Menisco (SIM).\n")
506             archivo.write(f"La primer iteración se ha realizado el:{fecha_hora_actual}\n")
507             archivo.write(f"Total de iteraciones: {numero_calibracion}\n")
508     # Escribir la línea en el archivo
509     with open(ruta_archivo, "a") as archivo:
510         archivo.write(linea_formateada)
511
512
513 #####
514 # Establece un indicador para mostrars en la interfaz grafica
515 # Input: Mensaje del estatus del menisco
516 # Output: Distancia entre el menisco
517 #####
518 def establecer_alarma(Mensaje_Datalog):
519     if(Mensaje_Datalog == "El menisco esta tocando la línea o sobre la línea de ajuste.\n"):
520         Estatus = 0
521     elif(Mensaje_Datalog == "El menisco se encuentra tocando la línea de aforo.\n"):
522         Estatus = 1
523     elif(Mensaje_Datalog == "El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.\n"):
524         Estatus = 2
525     elif(Mensaje_Datalog == "Imagen incorrecta, vuelva a tomar la imagen.\n"):
526         Estatus = 4
527     else:
528         Linea = Mensaje_Datalog.split()
529         Estatus_Temp = int(Linea[7])
530         if(Estatus_Temp == 0):
531             Estatus = 2
532         else:
533             Estatus = 3
534     return Estatus
```



Implementación en LabVIEW

D.1. Implementación de LabVIEW

Para acceder a los archivos de LabVIEW: [Click aquí](#)

D.2. Ubicación de la manual de uso

Para acceder al manual de usuario [Click aquí](#)

D.3. Modalidad de Espera

La modalidad de espera, se aprecia en la Fig. D.1, el cual posee una breve descripción del sistema y el botón de finalización del programa, se recomienda emplear esta opción en lugar de detener el programa de otras formas.



Figura D.1. Modo de espera del Sistema Identificador de Menisco.

D.4. Modalidad de control de la posición de la cámara

En esta sección se documenta como funciona la modalidad de la solución para realizar el movimiento de la cámara.

- **Mover hacia arriba**

Para mover la cámara en un movimiento ascendente es necesario presionar el botón con la cámara y una flecha hacia arriba y el botón de avanzar como se aprecia en la Fig. D.2.



Figura D.2. Configuración de botones para indicarle que que ascienda.

■ **Mover hacia Abajo**

Para mover la cámara en un movimiento descendente es necesario presionar el botón con la cámara y una flecha hacia abajo y el botón de avanzar como se aprecia en la Fig. D.3.

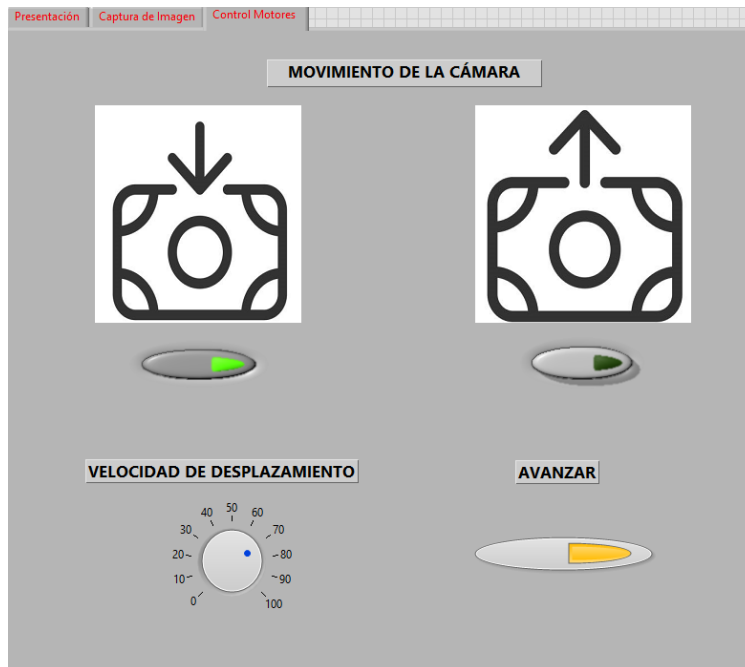


Figura D.3. Configuración de botones para indicarle que que descienda.

■ Configuración de la velocidad

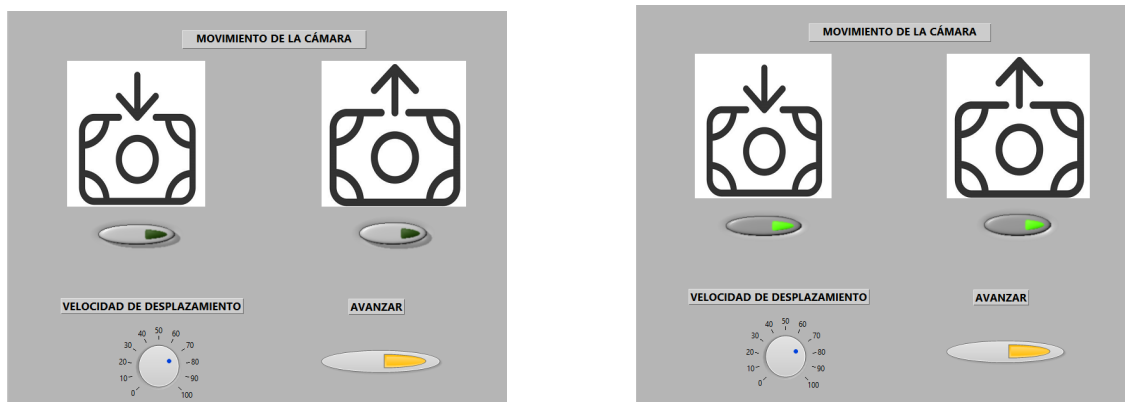
Para definir la velocidad de ascenso o descenso se realiza mediante la perilla señalada por un cuadro azul en la Fig. D.4, en esta mientras mayor sea el numero seleccionado más rápido se hará el movimiento.



Figura D.4. Perilla de configuración de velocidad.

■ Excepciones

Hay dos casos en el cual si se presiona el botón de avance el sistema no se moverá. El primero es en el caso que ninguna dirección se especifique (Fig. D.5a) o cuando se especifica la dirección ascendente y descendente al mismo tiempo (Fig. D.5b).



(a) Sin especificar dirección.

(b) Seleccionando las dos direcciones.

Figura D.5. Casos en los cuales la cámara no se desplazará.

D.5. Captura de imágenes para la identificación del Menisco

D.5.1. Secuencia de uso

A continuación, se documenta la secuencia para realizar la identificación del menisco.

1. Escribir el nombre de la calibración para crear el correspondiente registro. El Botón con la etiqueta de *GUARDAR IMAGENES DEL PROCESO* en el caso de ser presionado se almacenaran imágenes del proceso en la carpeta *ubicación_del_ejecutable\Resultados\Nombre_Calibración\Numero_de_Calibración*. En el caso contrario no se almacenará ninguna imagen.

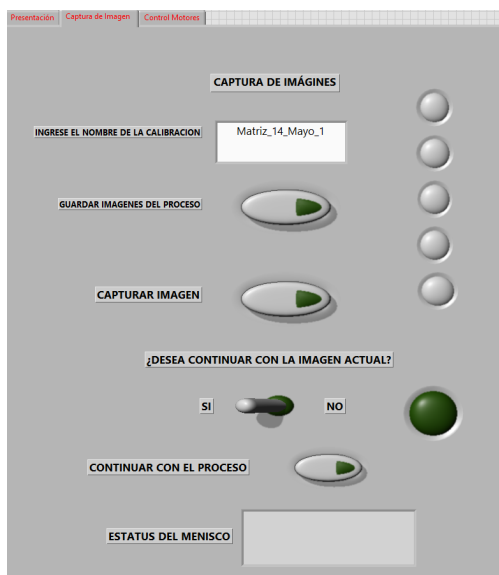


Figura D.6. Escritura del nombre de la calibración.

2. Presionar el botón *CAPTURAR IMAGEN*. Luego se emergerá una ventana con lo que visualiza la cámara.

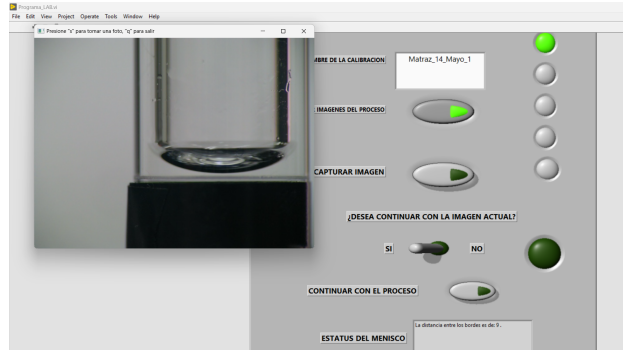


Figura D.7. Ventana con lo que visualiza la cámara.

3. Para capturar una imagen y analizarla presionar la tecla *s* del teclado.
4. Se activará el indicador de la etapa de confirmación, con el indicador se puede indicar que si quieres o no quieres trabajar con la imagen previamente capturada. En el caso de seleccionar no se terminará el proceso, en caso contrario se se realizará el análisis. Para confirmar la decisión hay que presionar el botón *CONTINUAR CON EL PROCESO*.



Figura D.8. Etapa de confirmación de la imagen.

5. Con la ayuda del ratón de la computadora, se selecciona la región de importancia o con cercanía del menisco, esta se visualizará con un cuadro azul. Para cerrar la ventana hacer click sobre **X** de la ventana luego de seleccionar la región.

Apéndices D. Implementación en LabVIEW

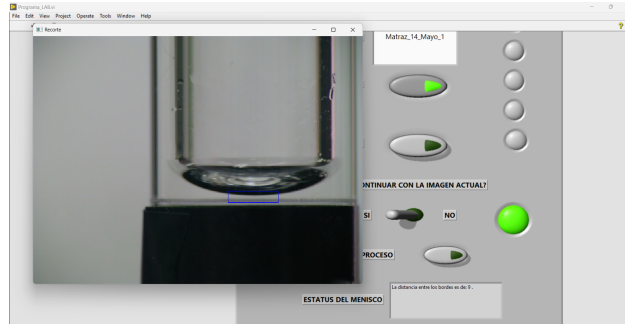


Figura D.9. Selección de región de interés.

6. Se mostrará la área seleccionada. Para continuar presionar la **flecha hacia arriba** del teclado.

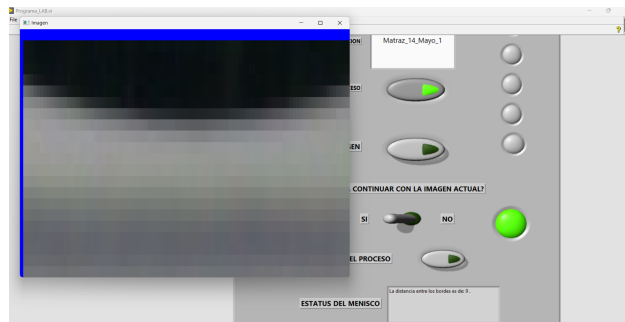


Figura D.10. Área seleccionada ampliada.

7. Se mostrará la imagen final procesada por todo el proceso. Para continuar presionar **X** de la ventana.

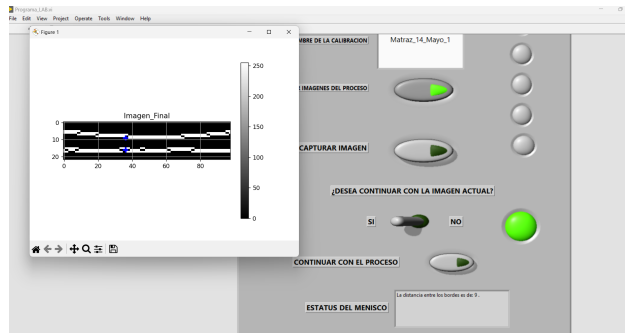


Figura D.11. Imagen Final.

8. El sistema mostrará el estado del menisco en la ventana *ESTATUS MENISCO* y se mostrará una alarma en la línea de indicadores verticales. La distancia que se muestra es en píxeles. Los distintos colores significan lo siguiente:

- Verde: el menisco se encuentra separado de la línea de aforo de forma clara.
- Amarillo: el menisco se encuentra a punto de tocar la línea de aforo.
- Naranja: el menisco se encuentra tocando la línea de aforo.
- Rojo: el menisco se encuentra tocando la línea de aforo, pero puede encontrarse por debajo de ella.
- Negro: la imagen capturada es incorrecta.

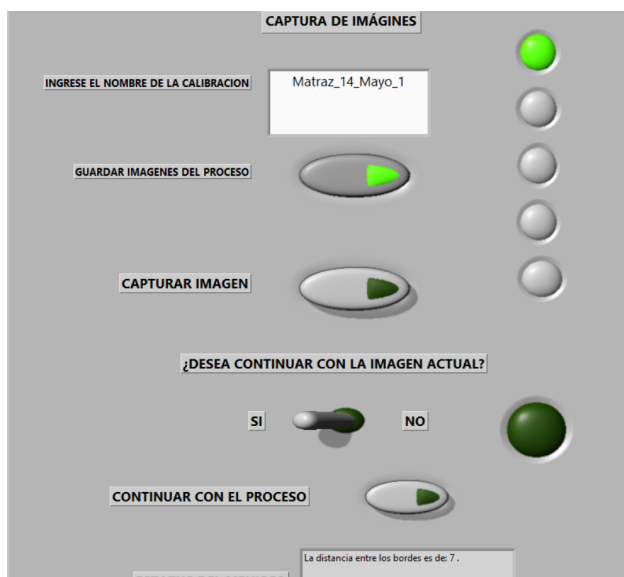


Figura D.12. Estatus del menisco.

D.5.2. Registro y almacenamiento de imágenes

Después de realizar la calibración se creará un archivo .txt con el registro dentro de la carpeta de resultados y en el caso de seleccionar que se quieren almacenar las imágenes del proceso se creará una carpeta con dichas imágenes.

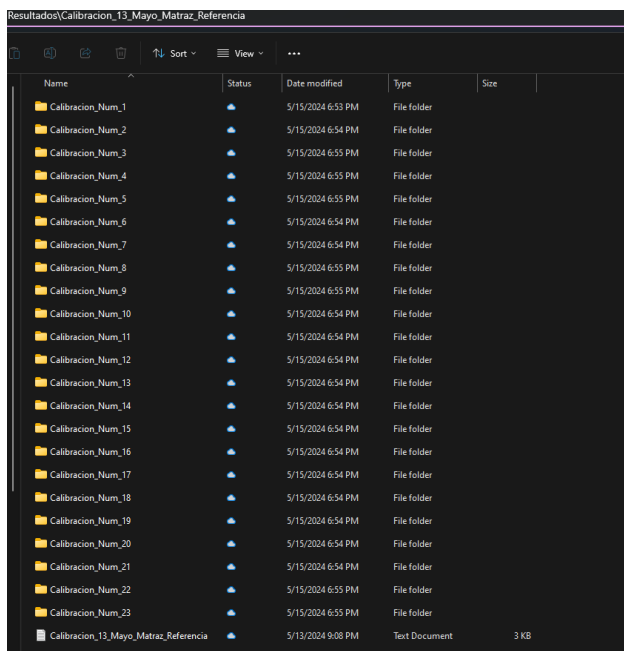


Figura D.13. Carpeta con los resultados de la calibración.

El registro tendrá una breve descripción, la hora de inicio del procedimiento, el total de repeticiones que se utilizó el programa y cada uno de los estatus del menisco obtenidos con la hora en la cual se obtuvieron.

```
Laboratorio Costarricense de metrología LCM.  
Registro de uso del Sistema Identificador de Menisco (SIM).  
La primer iteración se ha realizado el:2024-05-13 13:41:25  
Total de calibraciones: 23  
[2024-05-13 13:41:25] Iteración numero:1_El menisco esta tocando la línea o sobre la línea de ajuste.  
[2024-05-13 13:42:57] Iteración numero:2_El menisco se encuentra tocando la línea de aforo.  
[2024-05-13 13:49:54] Iteración numero:3_El menisco se encuentra tocando la línea de aforo.  
[2024-05-13 13:50:58] Iteración numero:4_El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.  
[2024-05-13 13:56:45] Iteración numero:5_El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.  
[2024-05-13 13:57:17] Iteración numero:6_La distancia entre los bordes es de: 19 .  
[2024-05-13 14:09:58] Iteración numero:7_La distancia entre los bordes es de: 3 .  
[2024-05-13 14:10:57] Iteración numero:8_La distancia entre los bordes es de: 7 .  
[2024-05-13 14:11:34] Iteración numero:9_El menisco esta a punto de tocar la línea de aforo.  
[2024-05-13 14:14:23] Iteración numero:10_El menisco se encuentra tocando la línea de aforo.
```

Figura D.14. Detalles del registro.

D.6. Requisitos para el uso del programa

D.6.1. Configuración del programa

En la sección de capturar imágenes para realizar el llamado de las funciones en Python es necesario especificar donde se encuentra el archivo **.py**. Para ello se implementó lo que se puede apreciar en la Fig. D.15 donde se puede especificar el directorio.

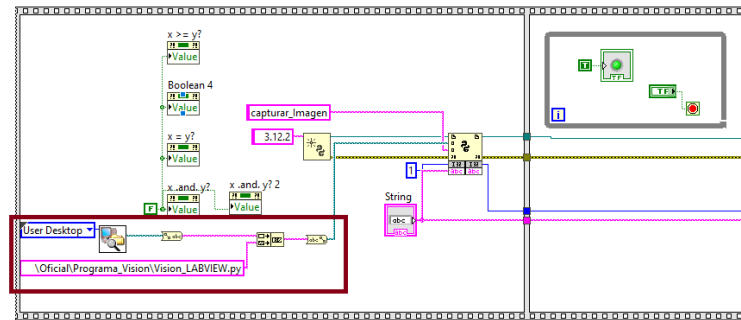


Figura D.15. Configuración del directorio donde se encuentra el archivo de Python.

D.6.2. Instalación de dependencias

Para poder ejecutar el código de Python y por consiguiente la modalidad de identificación de meniscos:

- Versión de Python mayor o igual a la **3.12.2**.
- Biblioteca de OpenCV para Python mayor o igual a la **4.9.0**.
- Biblioteca de Matplotlib para Python mayor o igual a la **3.8.4**.

D.7. Proceso de configuración del Arduino

A continuación, se documenta el procedimiento para configurar el Arduino UNO para ser usado en LabVIEW.

1. Conectar el Arduino UNO a de los puertos de la computadora.
2. Seleccionar el puerto en la interfaz serial de LabVIEW (Fig. D.16).

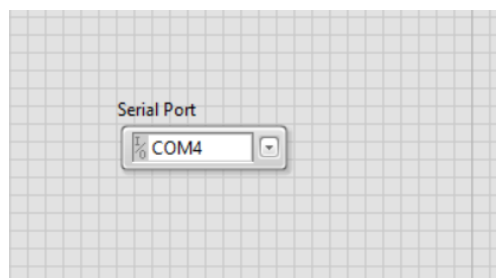


Figura D.16. Paso dos de la configuración del Arduino UNO.

Apéndices D. Implementación en LabVIEW

3. Ir a Tools >MakerHub >LINX >LINX Firmware Wizard (Fig. D.17).

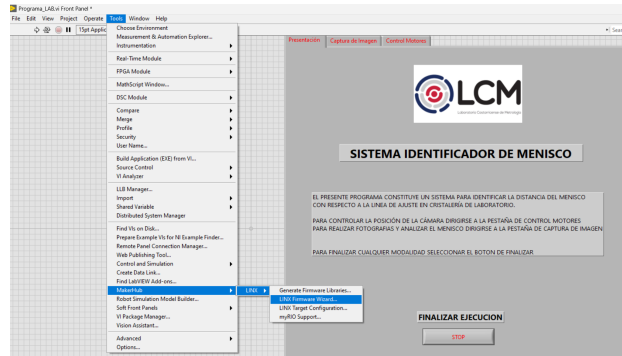


Figura D.17. Paso 3 de la configuración del Arduino UNO.

4. Seleccionar el microcontrolador con el que se va a trabajar (Fig. D.18).

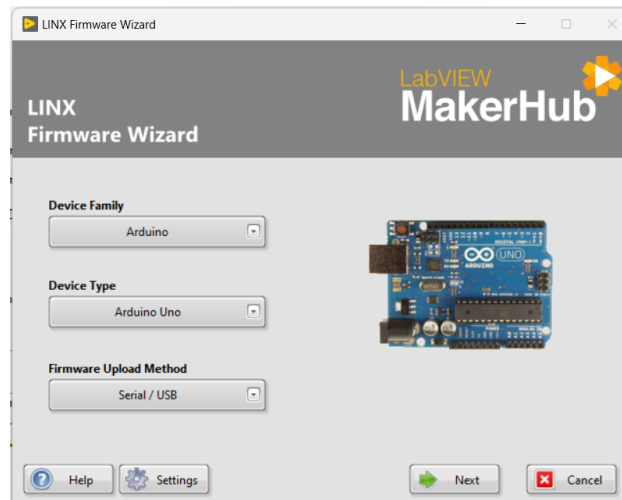
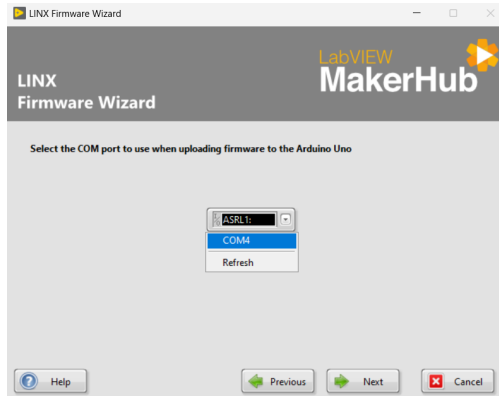


Figura D.18. Paso 3 de la configuración del Arduino UNO.

5. Seleccionar el puerto al cual está conectado el Arduino UNO (Fig. D.19a).

6. Seleccionar el botón *Next* (Fig. D.19b).



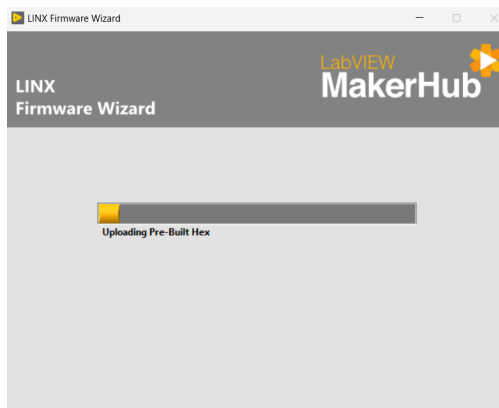
(a) Paso 5.



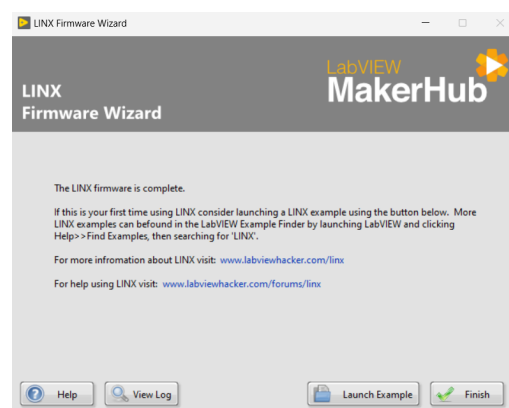
(b) Paso 6.

Figura D.19. Pasos 5 y 6 de la configuración del Arduino UNO.

7. Seleccionar el botón *Finish* (Fig. D.20).



(a) Barra de carga.



(b) Paso final.

Figura D.20. Pasos 7 de la configuración del Arduino UNO.



Datos de experimentos realizados

E.1. Datos del experimento de comportamiento del programa identificador de menisco

Para leer los datos empleados para la prueba de comportamiento acceder al siguiente **Enlace**.

E.2. Datos de las calibraciones

Para acceder a los datos y cálculos de las calibraciones de los Matraces A, B y C: **Click aquí**.

E.3. Vídeos de funcionamiento

Para ver el vídeo de funcionamiento del movimiento de la cámara acceder al siguiente **Enlace**.

Para ver el vídeo funcional de la sección de identificación de meniscos acceder al siguiente **Enlace**.



Planos estructurales

En este Apéndice se muestran los planos detallados de la plataforma mecánica. Para acceder a los planos puede hacer **Click aquí**. También, se muestran a continuación para una lectura rápida.



PAG	FOR	POS	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANT
1	A4			FICHA TÉCNICA 1	
2	A4			FICHA TÉCNICA 2	
3	A3			EMSAMBLE GENERAL	
4	A2		MT 10.00.00	EXPLOSIONADO GENERAL	
5	A2		MT 10.01.00	EXPLOSIONADO SISTEMA MOVIMIENTO VERTICAL	
6	A2		MT 10.02.00	EXPLOSIONADO ALMACENAMIENTO	
				PARTES	
7	A3	1	MT 10.01.01	PARTE SUPERIOR	2
8	A2	2	MT 10.01.02	PARTE INFERIOR	2
9	A4	9	MT 10.01.03	UNIÓN PLATAFORMA	2
10	A4	11	MT 10.01.04	SOSTENER NUT	2
11	A4	12	MT 10.01.05	UNIÓN BASE-JAULA	4
12	A4	13	MT 10.01.06	BASE JAULA	1
13	A3	14	MT 10.01.07	JAULA	1
14	A4	24	MT 10.01.08	SOSTENER SENSOR	2
15	A4	29	MT 10.02.01	AGARRE MOTOR	4
16	A3	32	MT 10.02.02	ALMACENAMIENTO DELANTERO	1
17	A3	33	MT 10.02.03	ALMACENAMIENTO TRASERO	1
18	A3	34	MT 10.02.04	PIEZA LATERAL IZQUIERDA	1
19	A3	35	MT 10.02:05	PIEZA LATERAL DERECHA	1
20	A4	36	MT 10.02.06	BASE ALMACENAMIENTO	1
21	A4	37	MT 10.02.07	PRENSAS FUENTES DE PODER	2
22	A4	39	MT 10.00.01	PLACA LATERAL	2

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA			
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024				
QA		DENOMINACIÓN			
MFG	4/28/2024	FICHA TÉCNICA 1			
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO: A4	UNIDADES:	DWG NO	REV 1
		ESCALA:			HOJA 1 DE 22



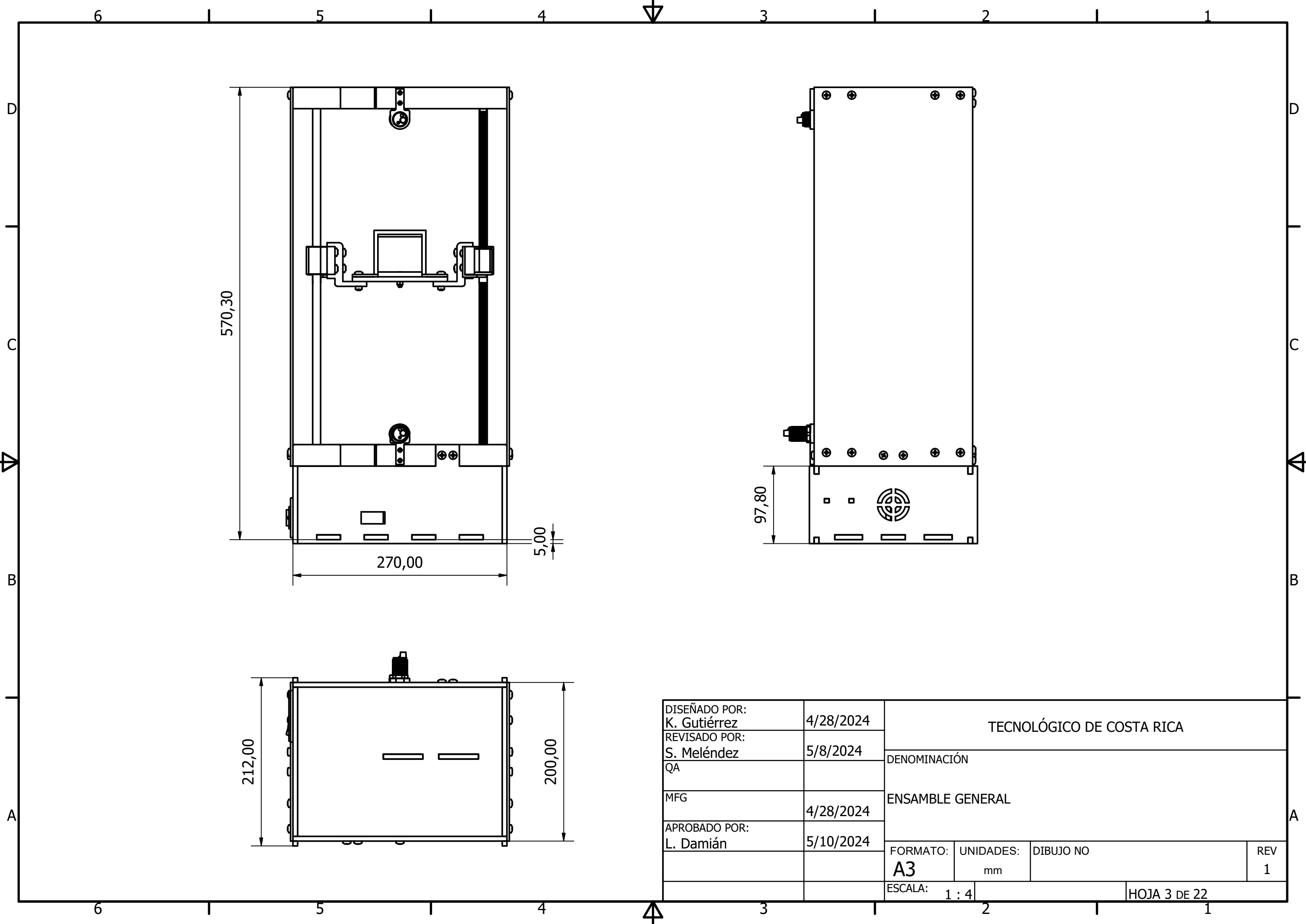


PAG	FOR	POS	OBSERVACIÓN	DENOMINACIÓN	CANT
				PIEZAS ESTANDARIZADAS	
		3	Linear Rail Shaft Guide/Support	GUÍA BARRA LISA	4
		4		COJINETE PARA PERNO AVANCE	4
		5		PERNO DE AVANCE	2
		6		BARRA LISA	2
		7	SC8UU 8mm Linear Ball Bearing For CNC	PLATAFORMA de 8 mm	2
		8	SC10UU 10mm Linear Ball Bearing For CNC	PLATAFORMA de 10 mm	2
		10		TUERCA DE AVANCE	2
		15	CABEZA PHILLIPS	PERNO M5 x 25 mm	24
		16		TUERCA M5	52
		17	CABEZA PHILLIPS	PERNO M5 x 20 mm	20
		18	CABEZA PHILLIPS	PERNO M5 x 50 mm	4
		19	CABEZA PHILLIPS	PERNO M4 x 20 mm	8
		20	CABEZA PHILLIPS	PERNO M4 x 16 mm	1
		21		TUERCA M4	1
		22	CABEZA PHILLIPS	PERNO M5 x 55 mm	8
		23	CABEZA PHILLIPS	PERNO M5 x 30 mm	4
		25	E18-D80NK Infrared Obstacle Sensor	SENSOR FIN DE CARRERA	2
		26	SPEPPER MOTOR RIGID COUPLING	ADAPTADOR MOTOR PERNO AVANCE	2
		27	NEMA 17	MOTOR PASO A PASO	2
		28	Fuse Holder 250VAC	CONEXIÓN ENERGÍA	1
		30	CABEZA PHILLIPS	PERNO M3 x 8 mm	8
		31	CON CNC SHIELD	ARDUINO UNO	1
		38	S-120-12	FUENTE DE PODER	1

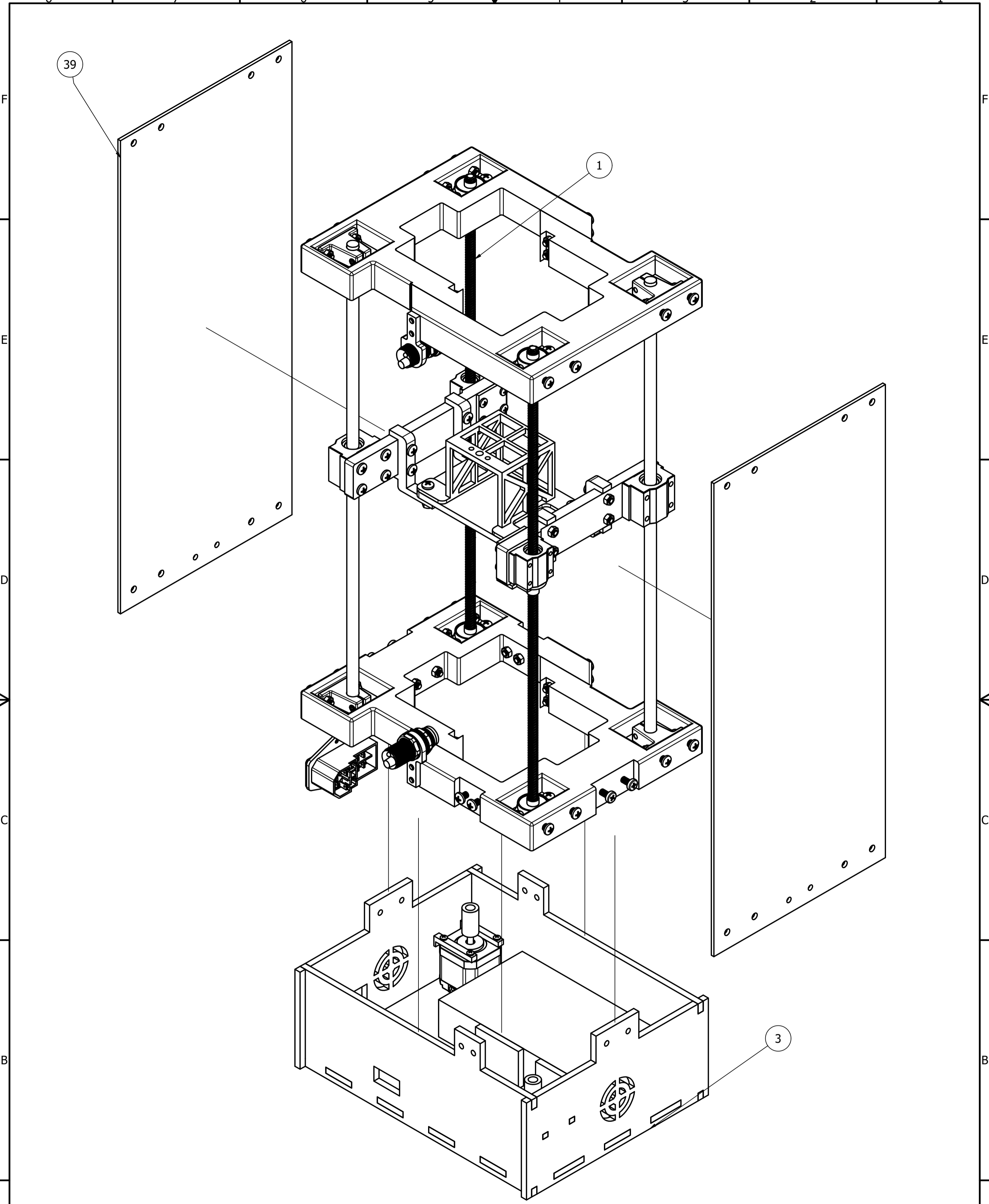


DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA			
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024				
QA		DENOMINACIÓN			
MFG	4/28/2024	FICHA TÉCNICA 2			
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO: A4	UNIDADES:	DWG NO	REV 1
		ESCALA:		HOJA 2 DE 22	



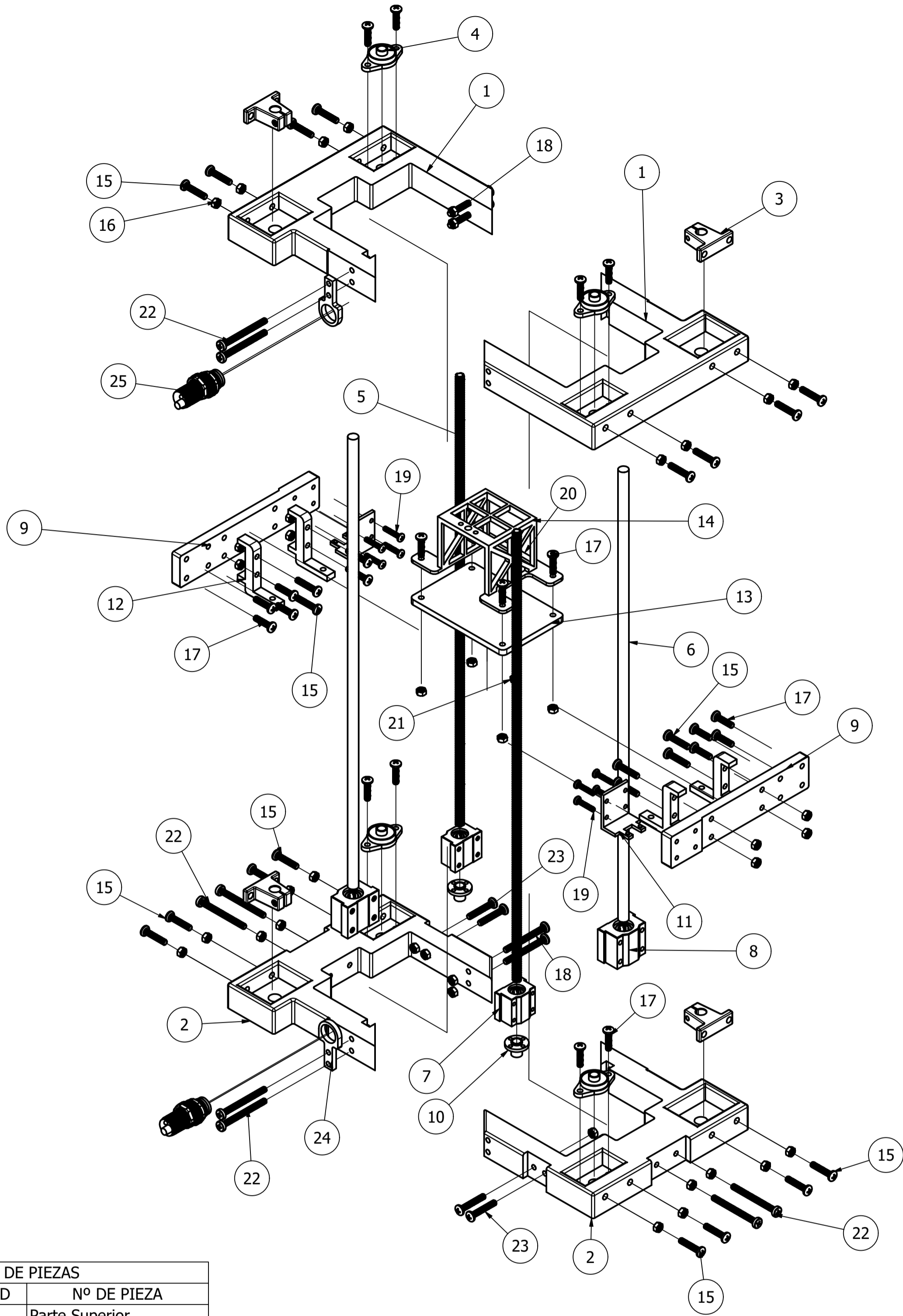


DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA			
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024				DENOMINACIÓN
QA		ENSAMBLE GENERAL			
MFG	4/28/2024	FORMATO: UNIDADES: DIBUJO NO REV			
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	A3	mm		1
		ESCALA: 1 : 4			HOJA 3 DE 22



Partes de la plataforma mecánica		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Sistema de movimiento vertical
39	2	Placas laterales
3	3	Espacio de almacenamiento

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024	DENOMINACIÓN		
QA		EXPLOSIONADO GENERAL		
MFG	4/28/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DIBUJO NO
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	A2		REV 1
		ESCALA:	1 : 2	HOJA 4 DE 22

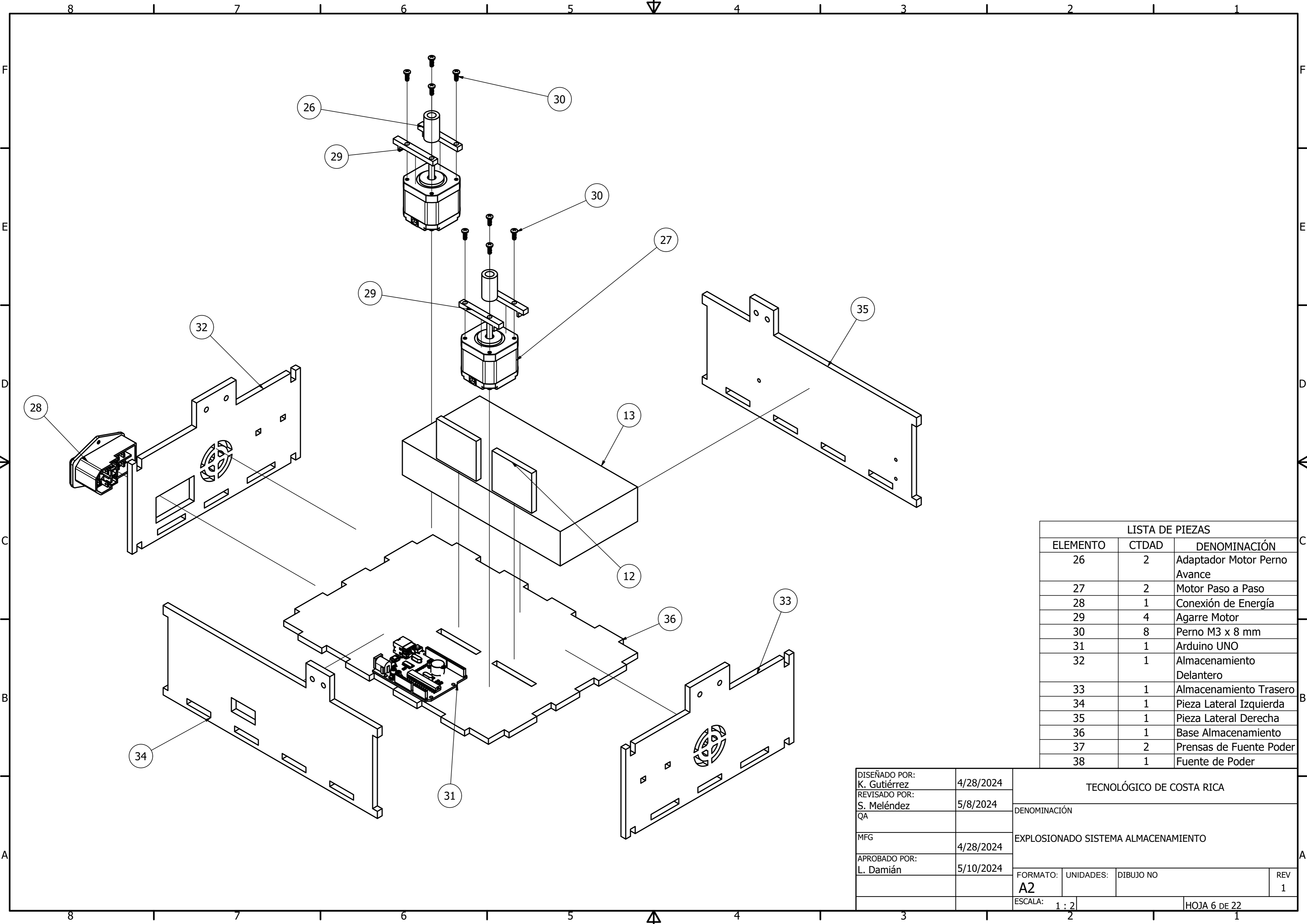


LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	2	Parte Superior
2	2	Parte Inferior
3	4	Guía para Barra Lisa
4	4	Cojinete para Perno de Avance
5	2	Perno de Avance
6	2	Barra Lisa
7	2	Plataforma de 8 mm
8	2	Plataforma de 10 mm
9	2	Unión Plataformas
10	2	Tuerca de Avance
11	2	Sostener Nut
12	4	Unión Base-Jaula
13	1	Base Jaula
14	1	Jaula
15	24	Perno M5 x 25 mm
16	52	Tuerca M5
17	20	Perno M5 x 20 mm
18	4	Perno M5 x 50 mm
19	8	Perno M4 x 20 mm
20	1	Perno M4 x 16 mm
21	1	Tuerca M4
22	8	Perno M5 x 55 mm
23	4	Perno M5 x 30 mm
24	2	Sostener Sensor
25	2	Sensor Fin Carrera

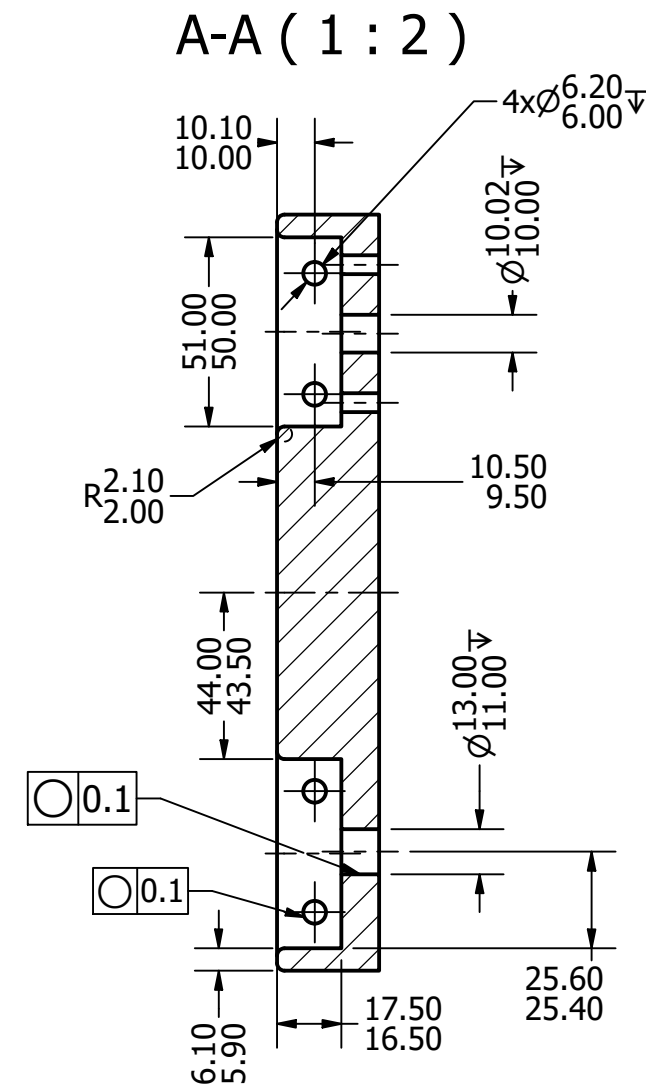
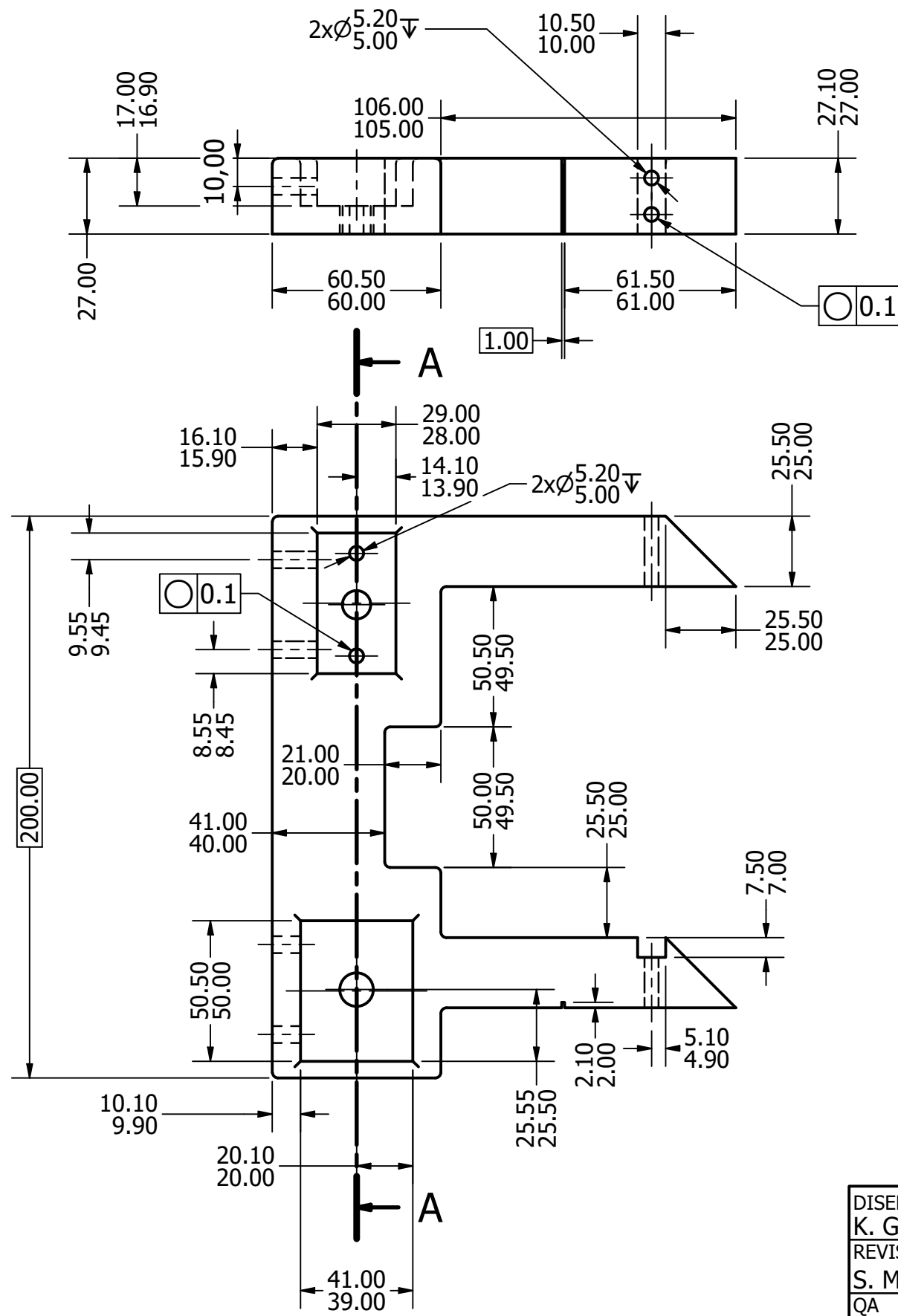
DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024	
QA		DENOMINACIÓN
MFG	4/28/2024	EXPLOSIONADO SISTEMA MOVIMIENTO VERTICAL
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	

FORMATO: A2	UNIDADES:	DIBUJO NO	REV 1
ESCALA: 1 : 3			HOJA 5 DE 22



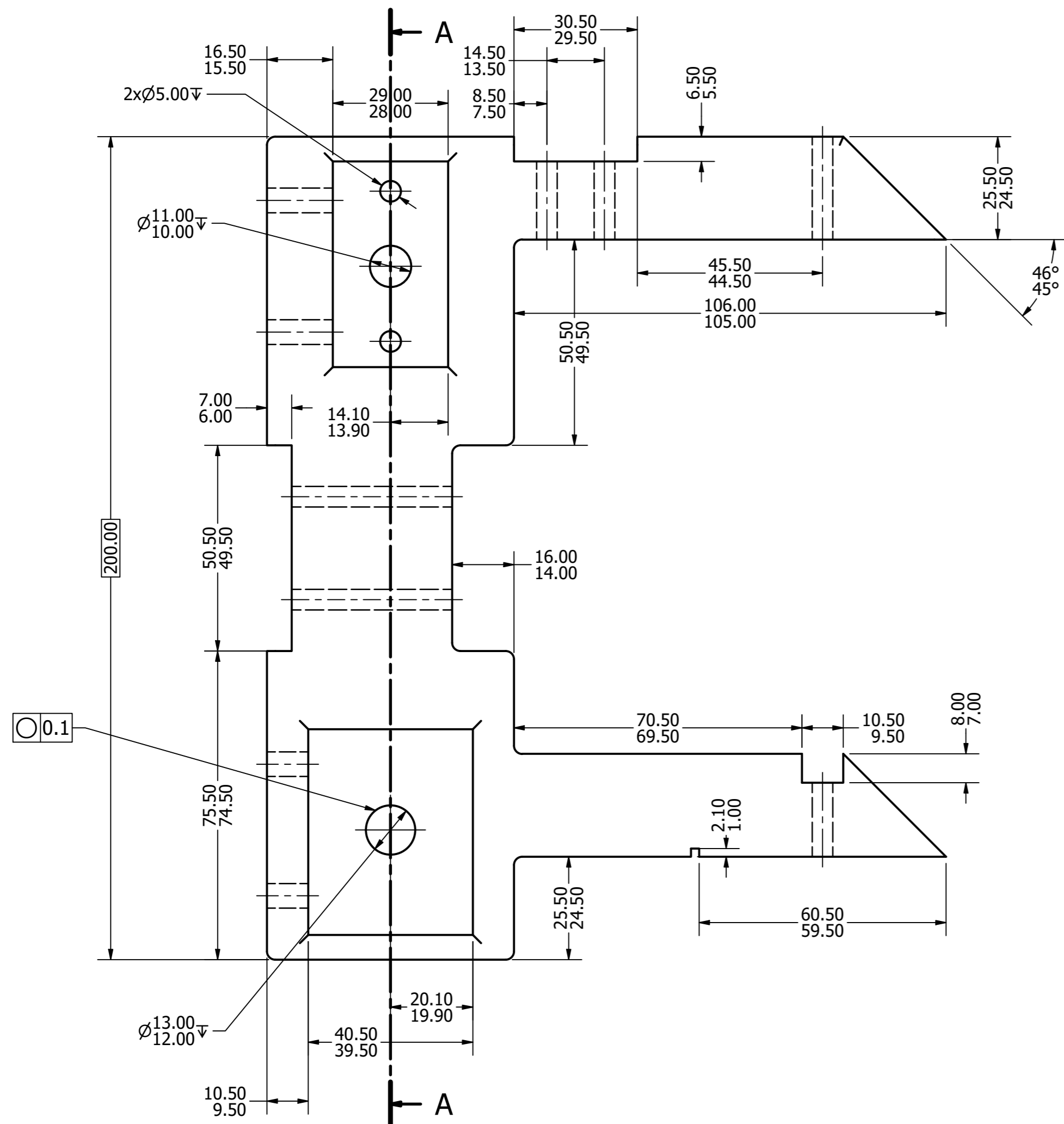
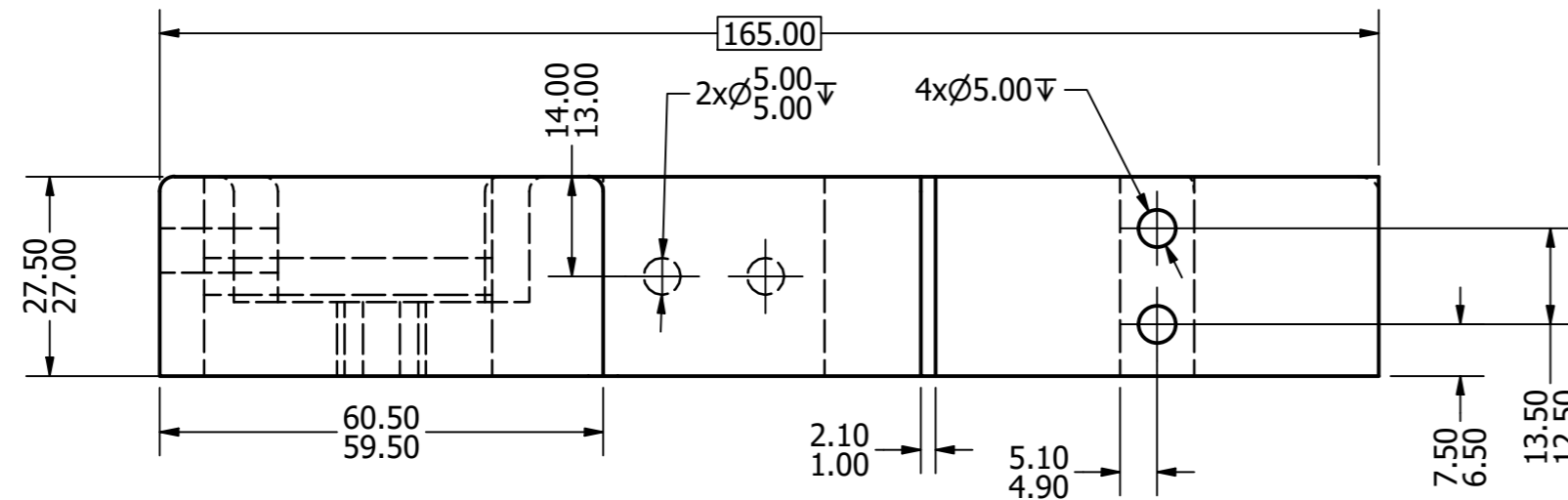
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	DENOMINACIÓN
26	2	Adaptador Motor Perno Avance
27	2	Motor Paso a Paso
28	1	Conexión de Energía
29	4	Agarre Motor
30	8	Perno M3 x 8 mm
31	1	Arduino UNO
32	1	Almacenamiento Delantero
33	1	Almacenamiento Trasero
34	1	Pieza Lateral Izquierda
35	1	Pieza Lateral Derecha
36	1	Base Almacenamiento
37	2	Prensas de Fuente Poder
38	1	Fuente de Poder

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024	DENOMINACIÓN		
QA		EXPLOSIONADO SISTEMA ALMACENAMIENTO		
MFG	4/28/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DIBUJO NO
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	A2		REV 1
		ESCALA:	1 : 2	HOJA 6 DE 22

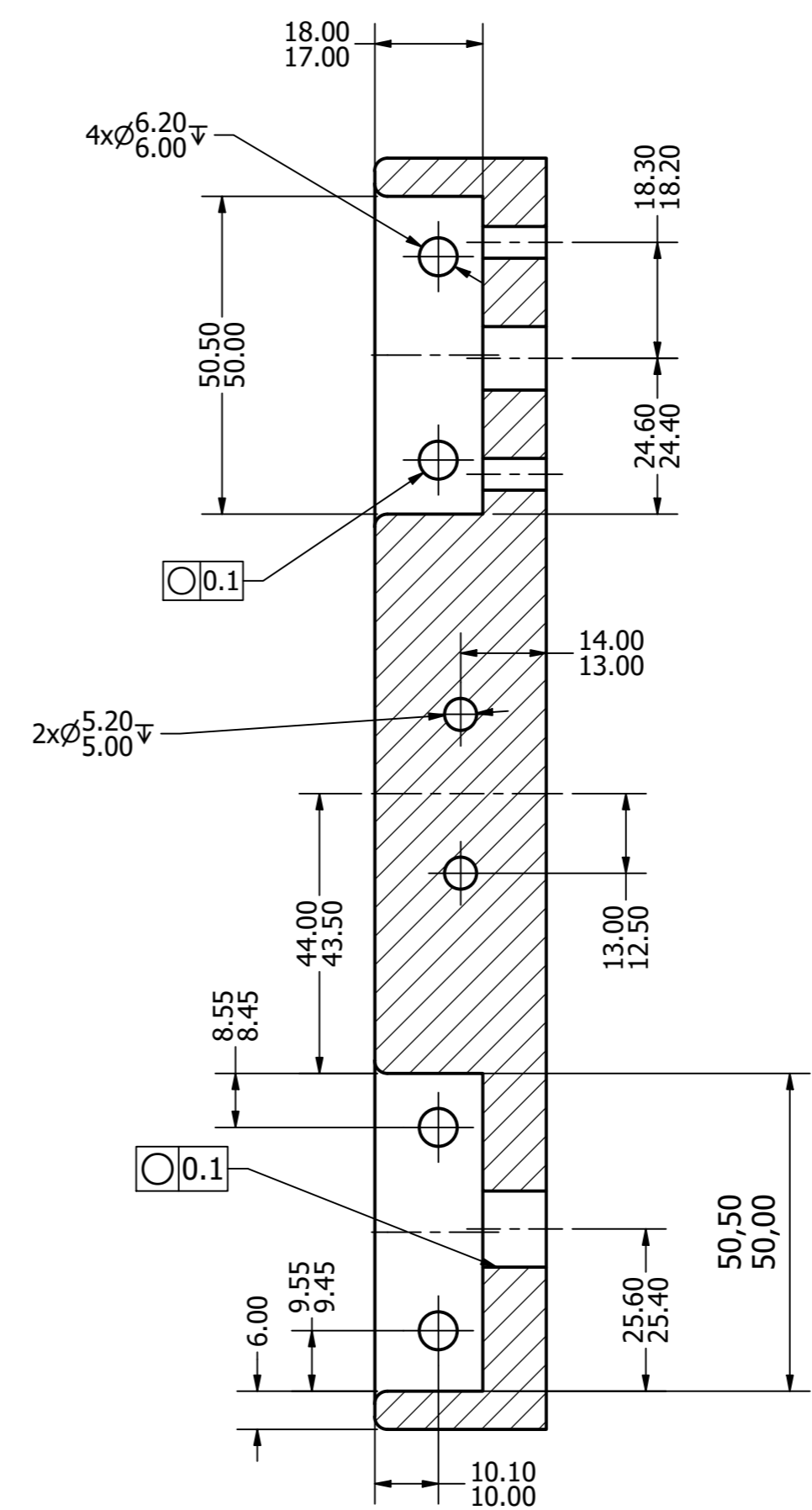


El acabado de la pieza es de 200um que es como sale de la impresora. Todos los redondeados no especificados son de 2mm de radio.

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024	DENOMINACIÓN		
QA		PARTE SUPERIOR		
MFG	4/28/2024	FORMATO: UNIDADES: DIBUJO NO REV		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	A3	mm	1
ESCALA: 1:2		HOJA 7 DE 22		

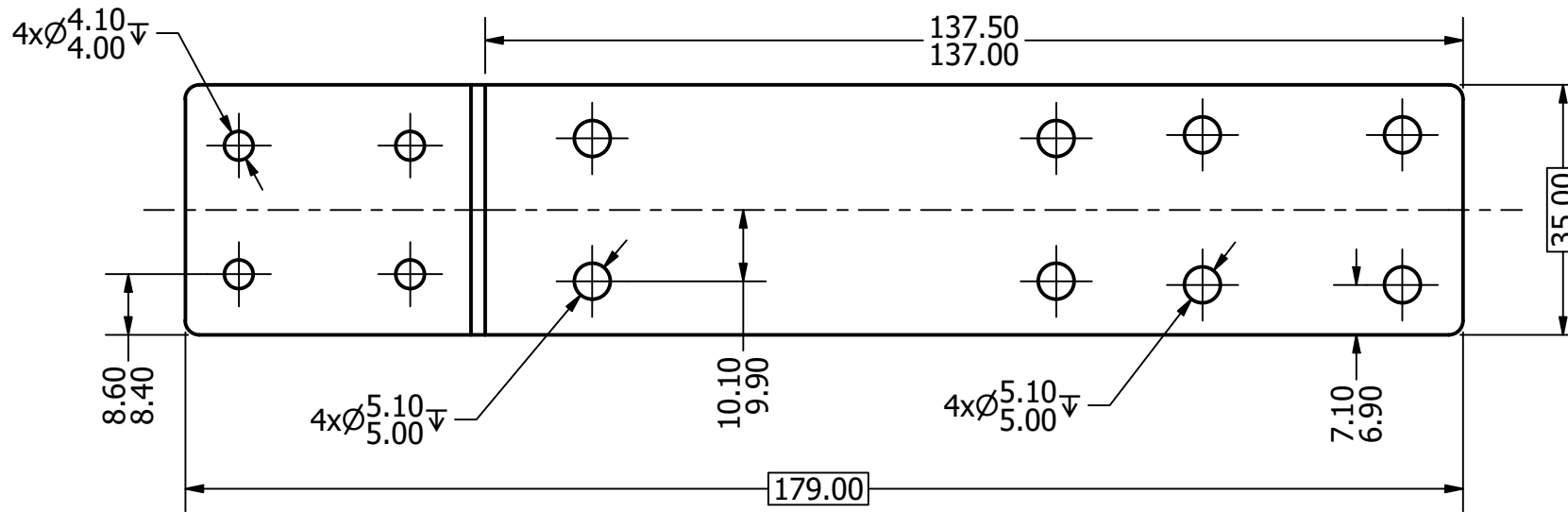
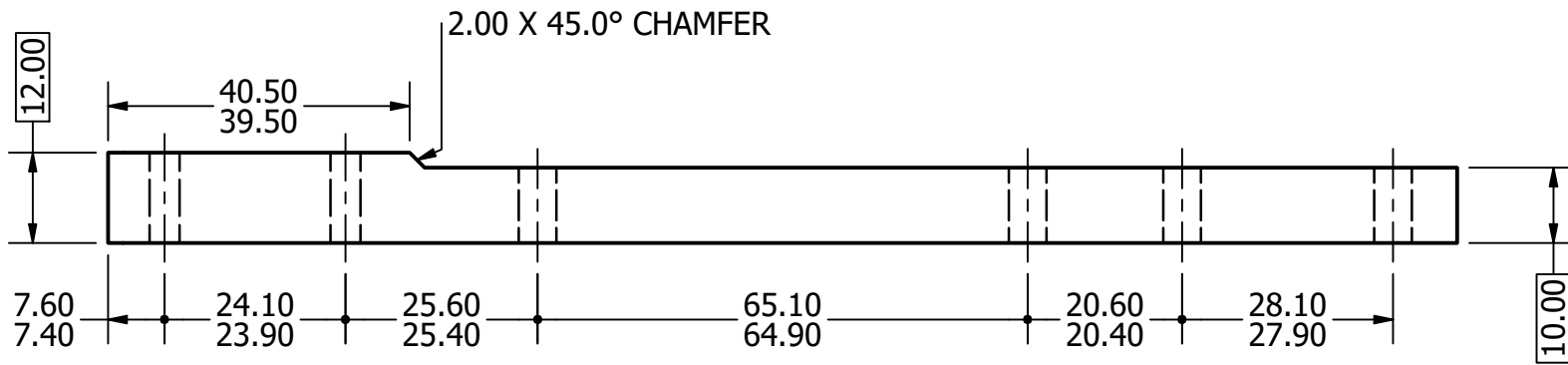


A-A (1:1)



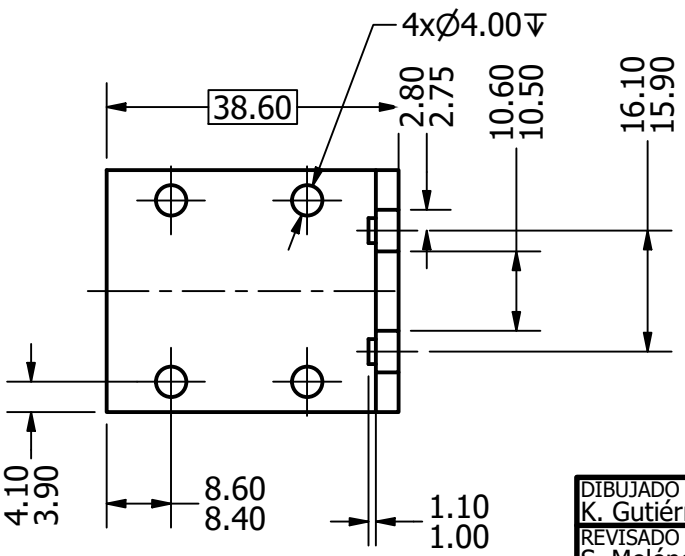
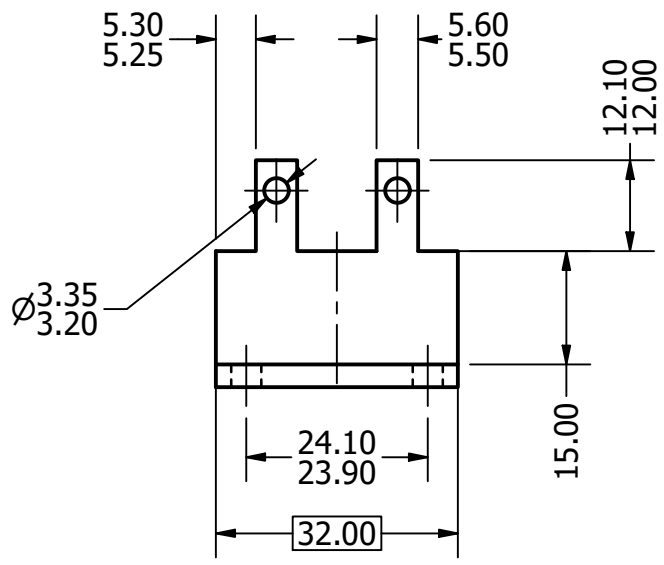
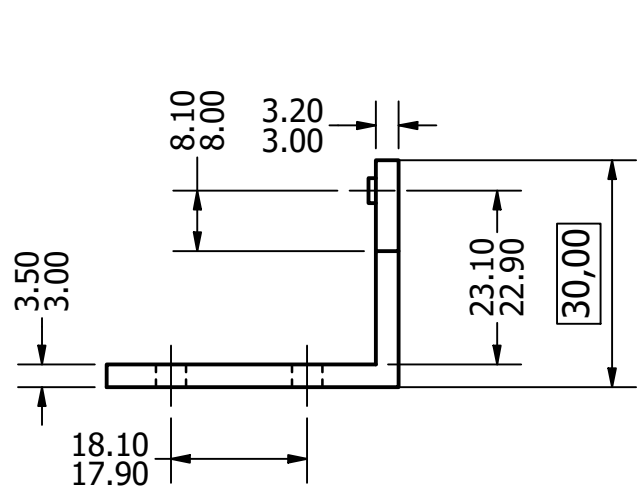
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. Todos los redondeados son de 2mm de radio.

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024	DENOMINACIÓN		
QA		PARTE INFERIOR		
MFG	4/28/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DIBUJO NO
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	A2	mm	REV 1
		ESCALA:	1:1	HOJA 8 DE 22



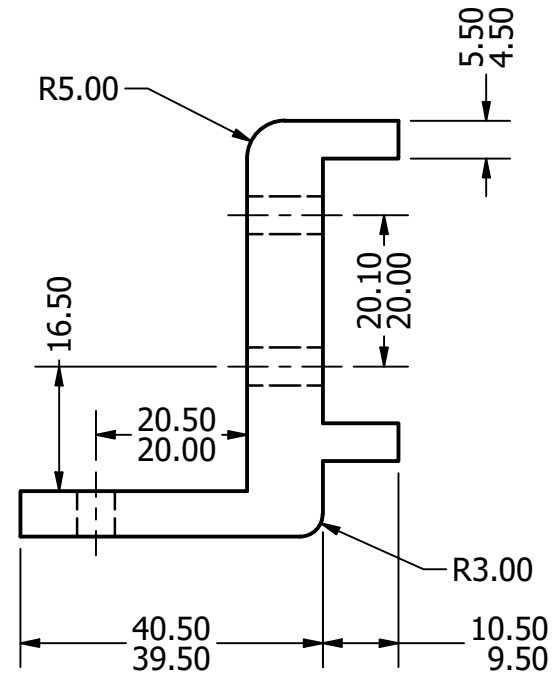
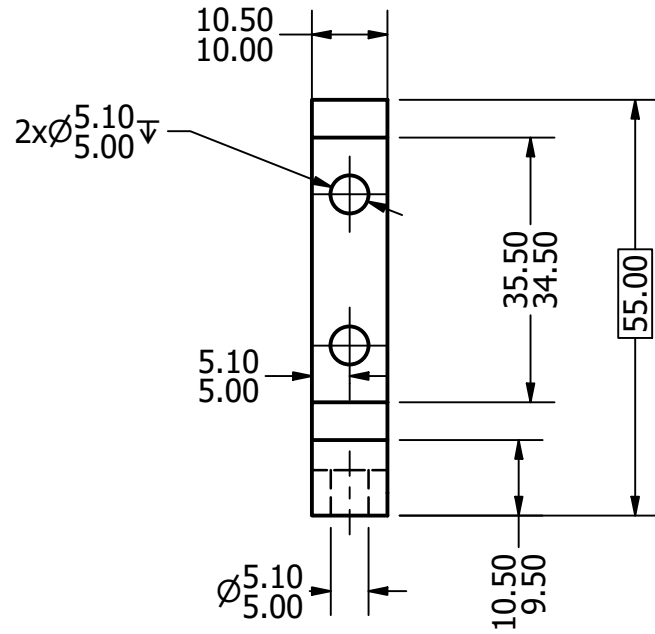
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. Todos los redondeados son de 2mm de radio.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	UNIÓN PLATAFORMA		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DWG NO
		A4	mm	REV 1
		ESCALA:	1 : 1	HOJA 9 DE 22



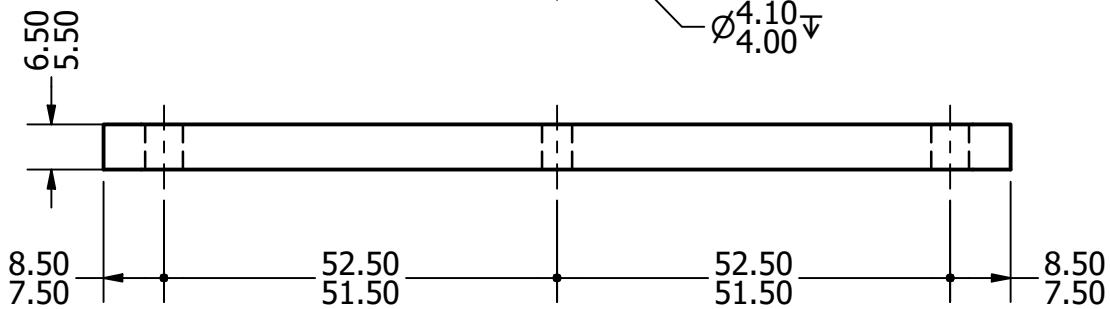
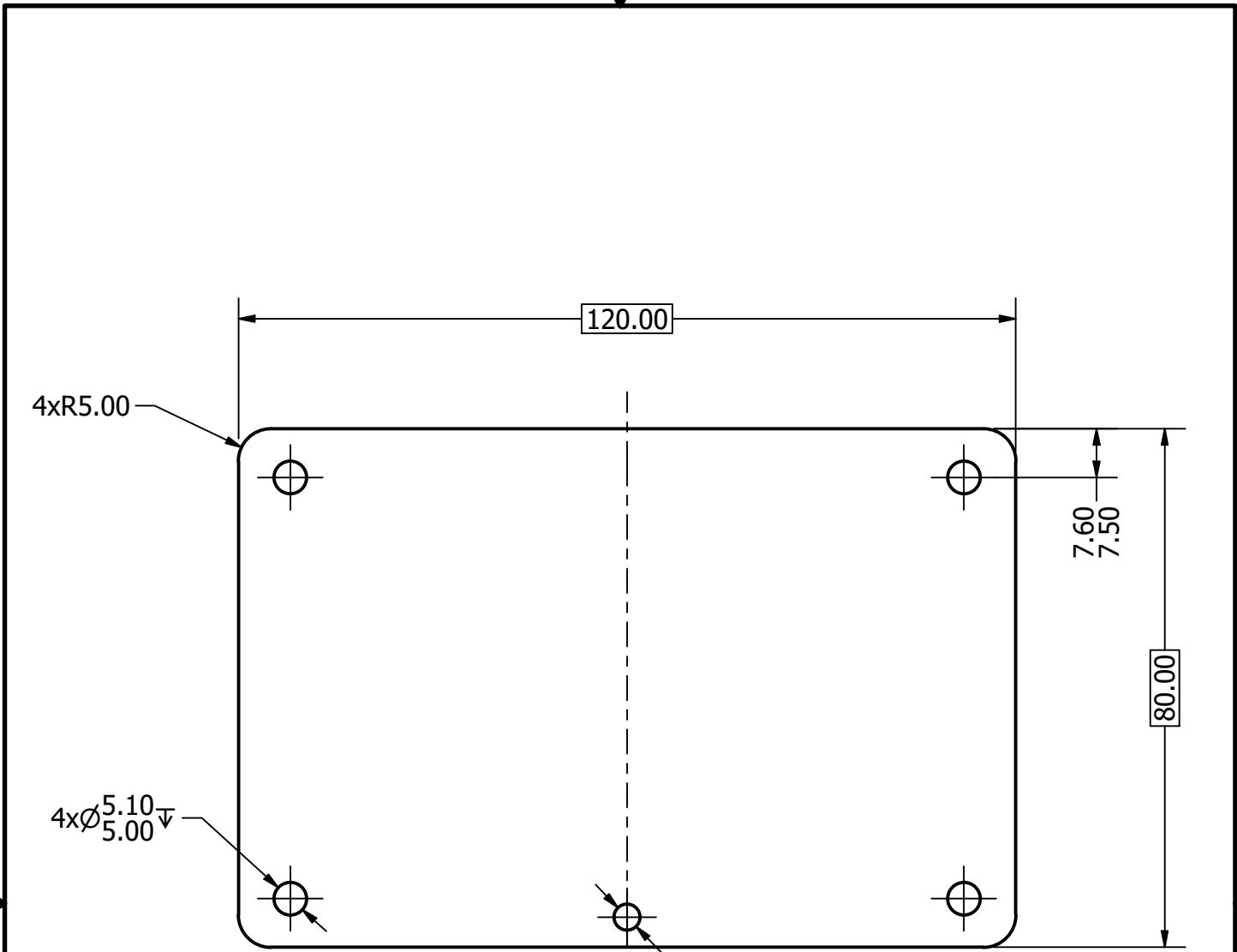
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	SOSTENER NUT		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DWG NO
		A4	mm	REV 1
		ESCALA:	HOJA 10 DE 22	
		1 : 1		



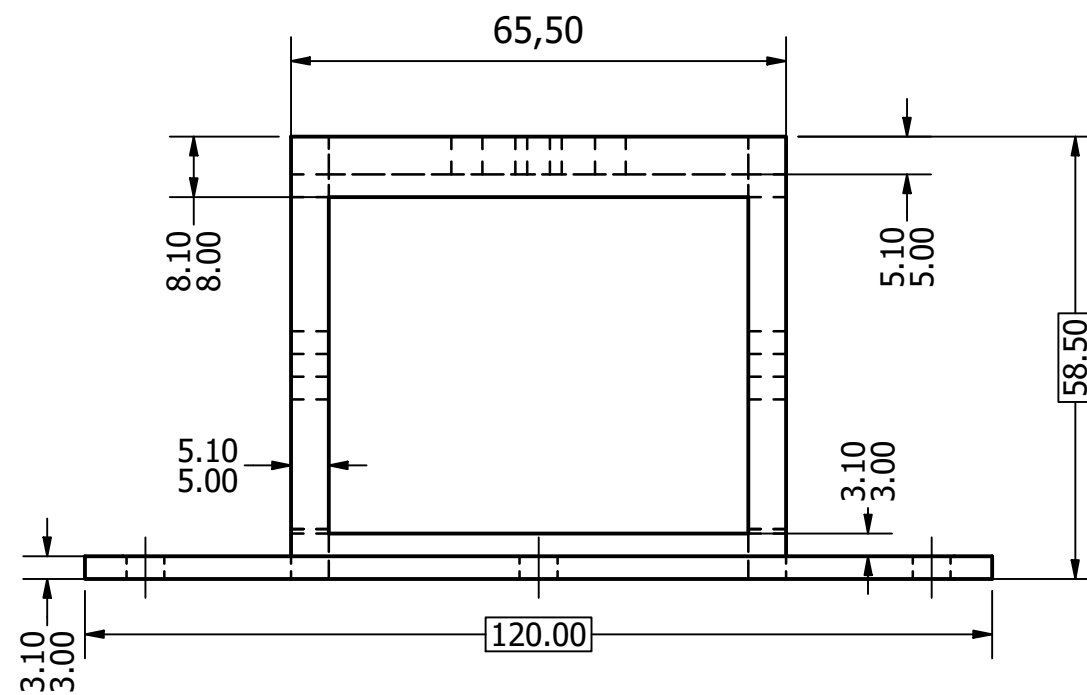
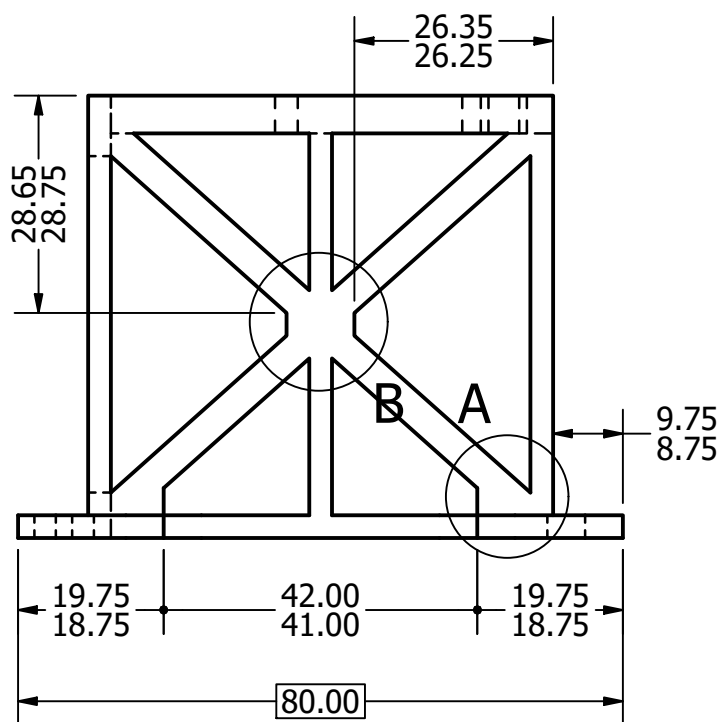
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	UNIÓN BASE-JAULA		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DWG NO
		A4	mm	REV 1
		ESCALA:	1 : 1	HOJA 11 DE 22



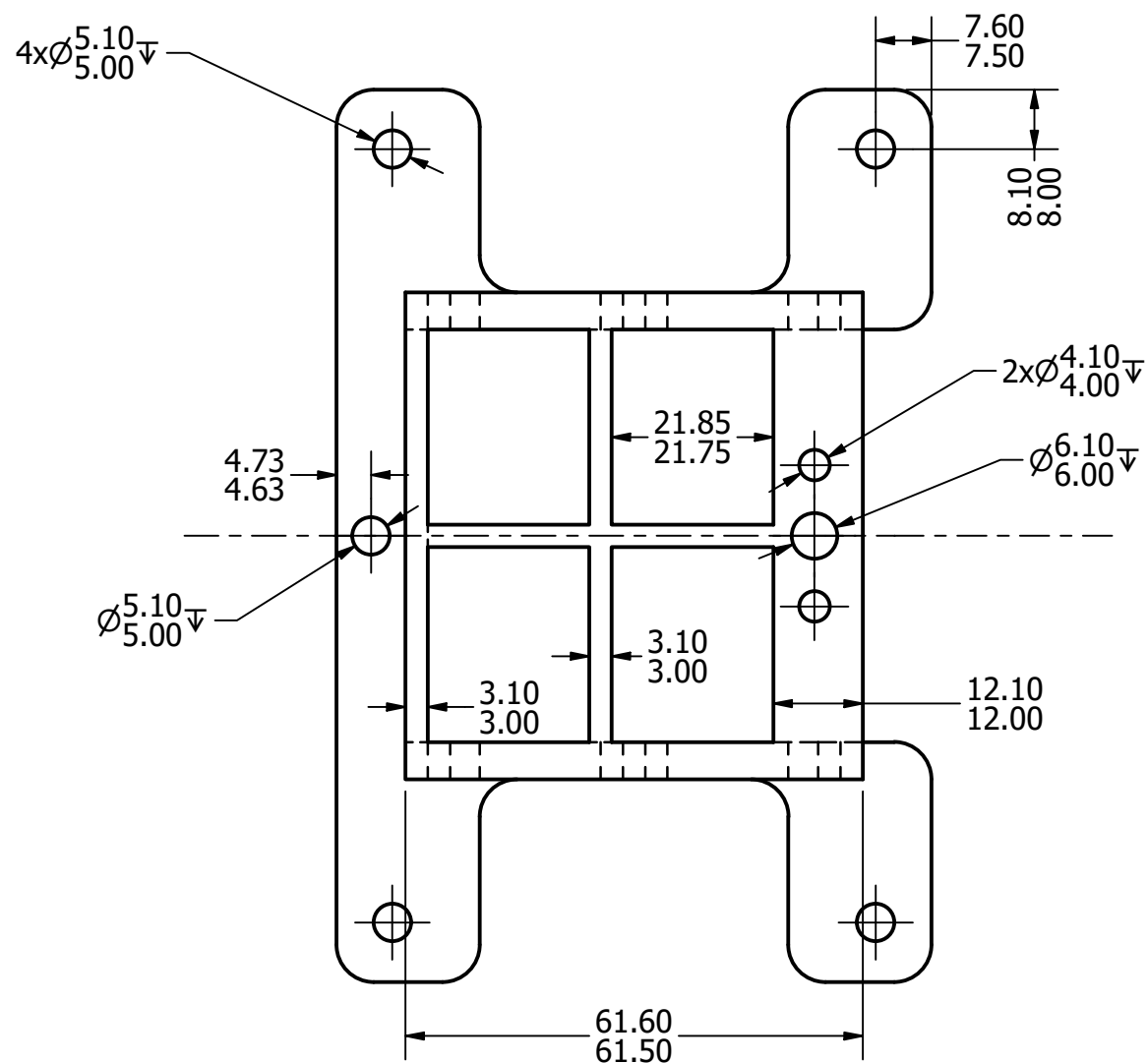
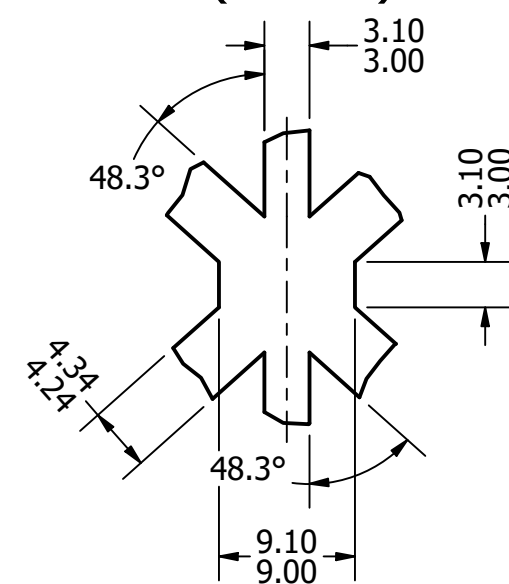
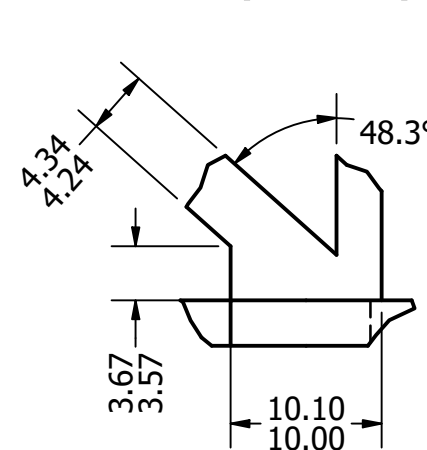
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	BASE JAULA		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO: A4	UNIDADES: mm	DWG NO
		ESCALA: 1 : 1		REV 1
				HOJA 12 DE 22



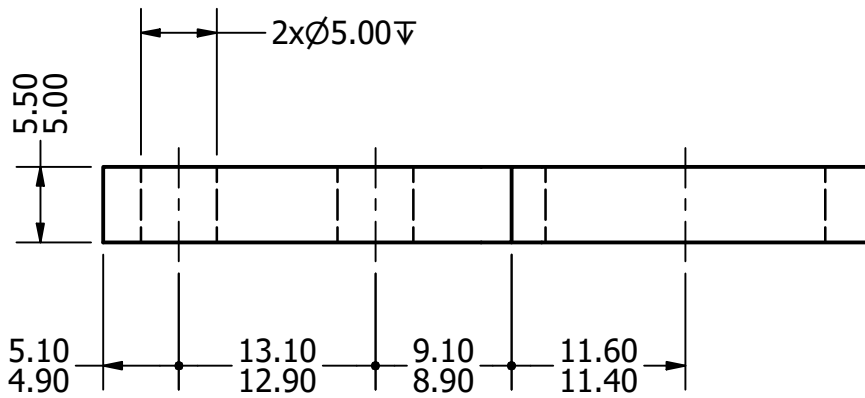
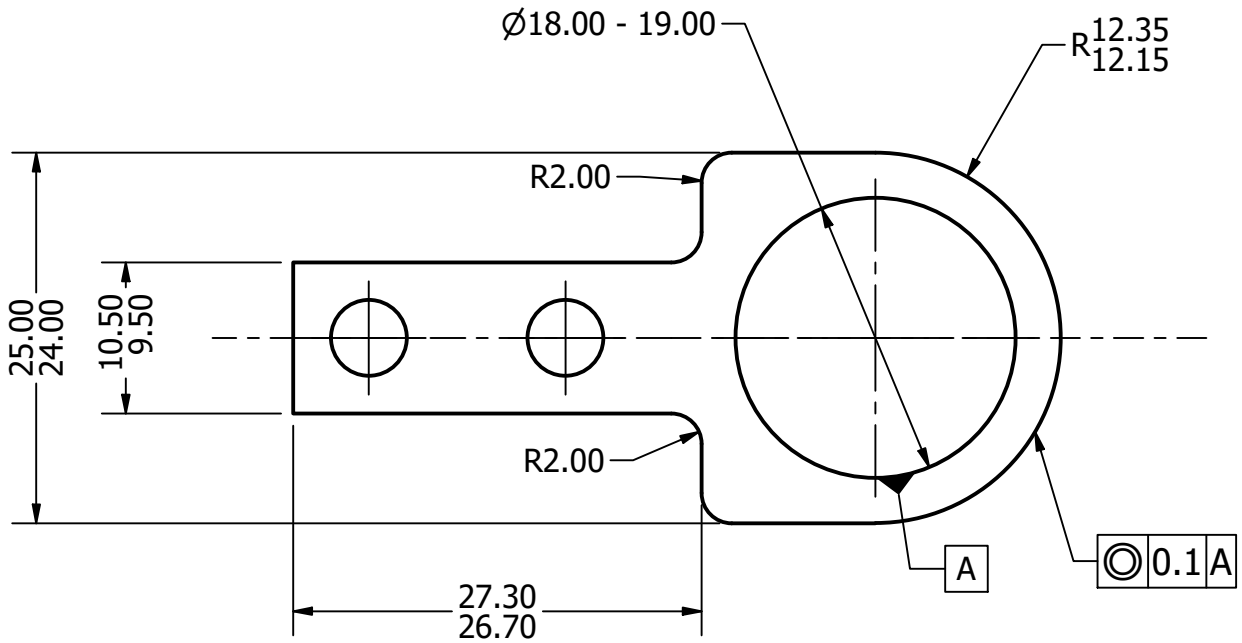
A (2 : 1)

B (2 : 1)



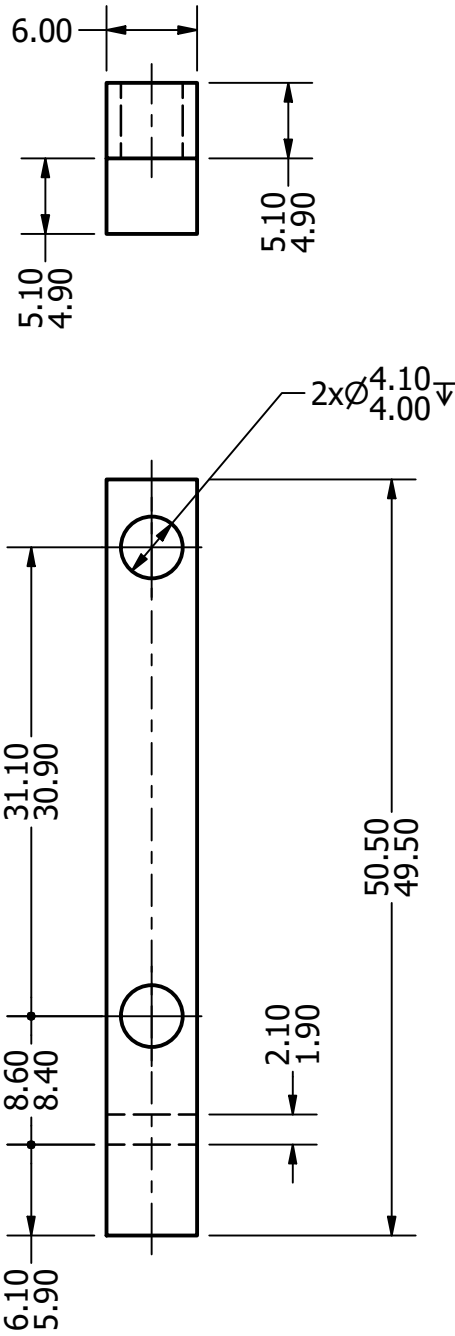
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. Todos los redondeos son de 5 mm.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	JAULA		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO: A3	UNIDADES: mm	DWG NO
		ESCALA: 1 : 1		REV 1
				HOJA 13 DE 22



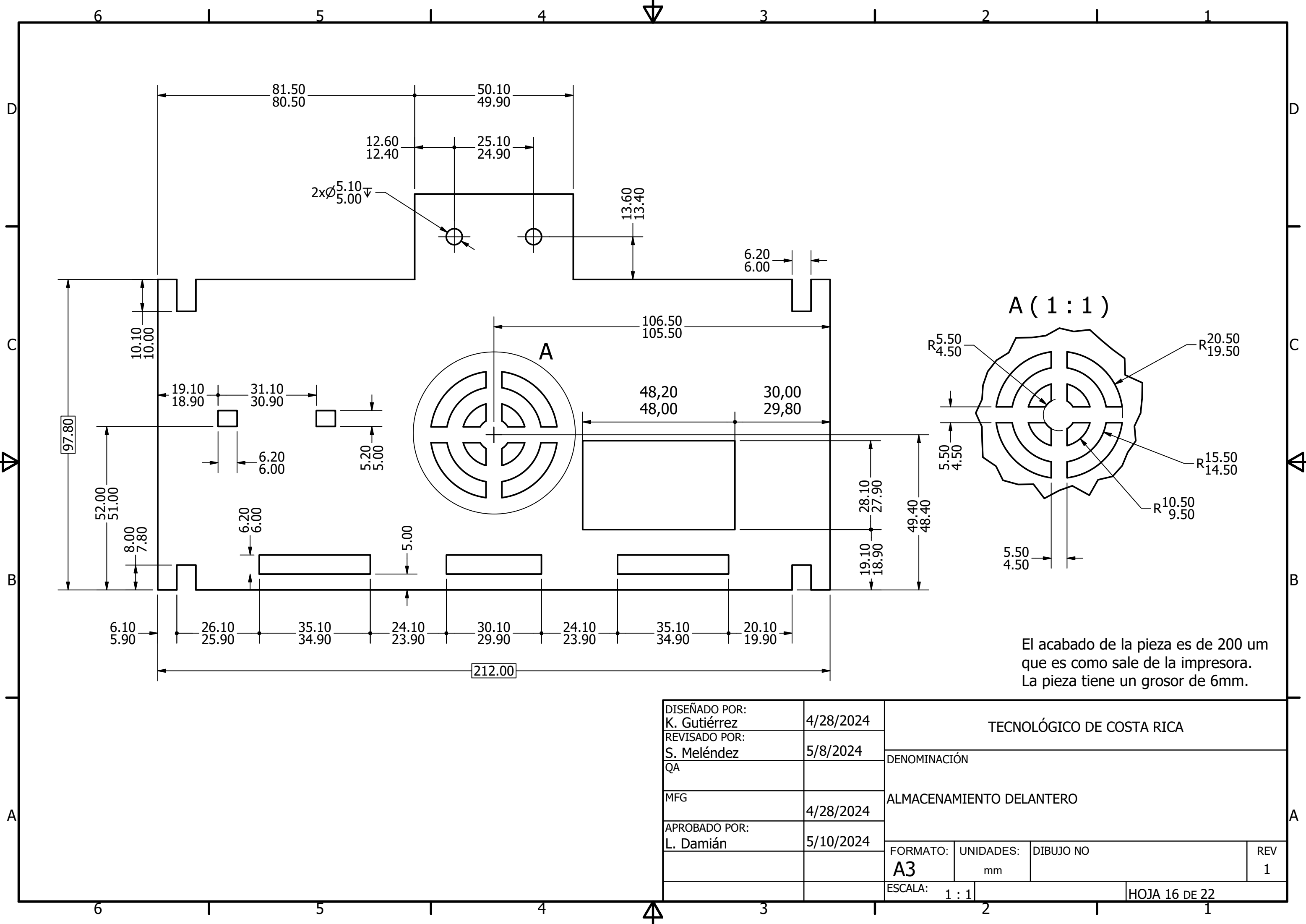
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	SOSTENER SENSOR		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO: A4	UNIDADES: mm	DWG NO
				REV 1
		ESCALA: 2 : 1	HOJA 14 DE 22	



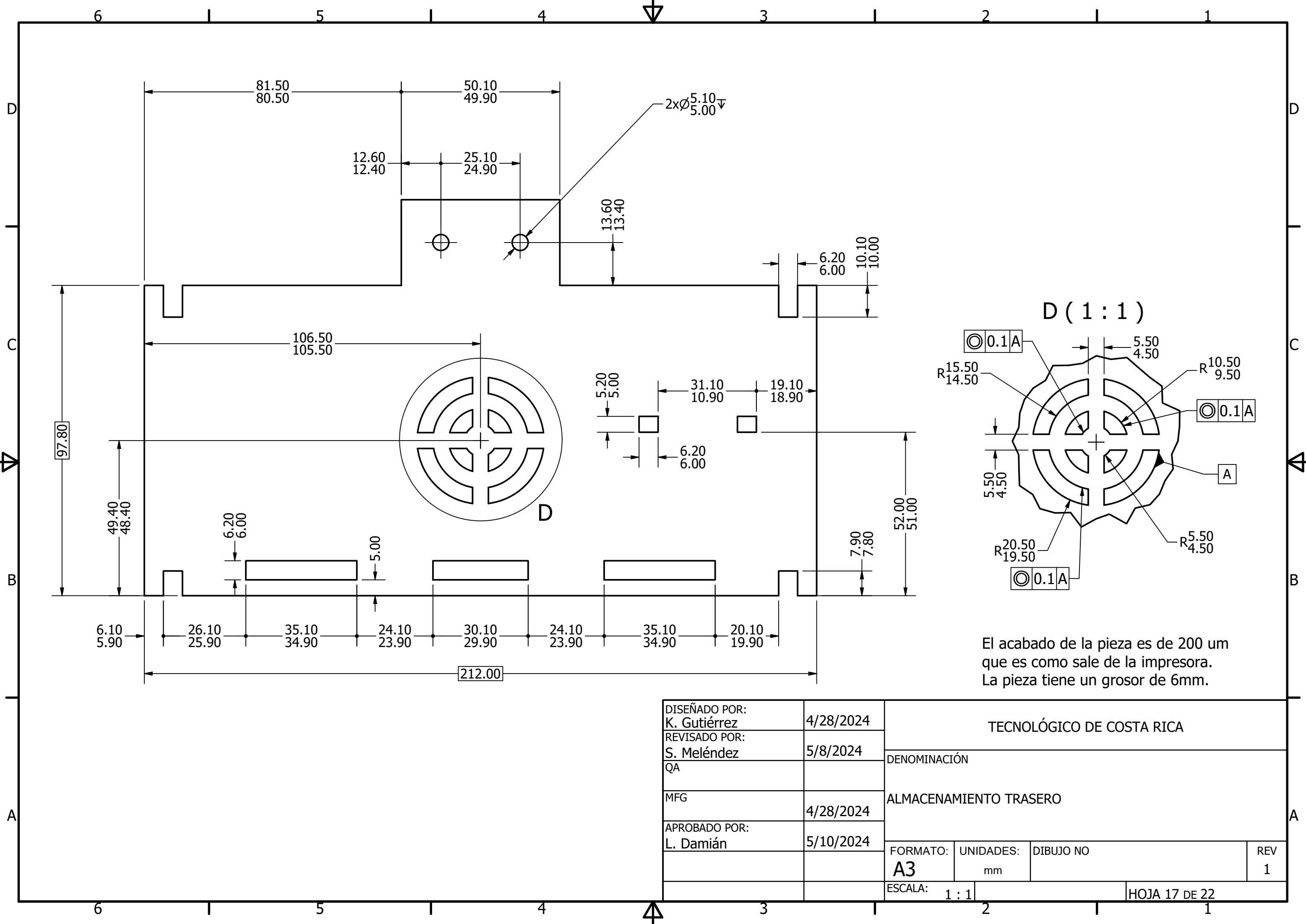
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	AGARRE MOTOR		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DWG NO
		A4	mm	REV 1
		ESCALA:	2 : 1	HOJA 15 DE 22



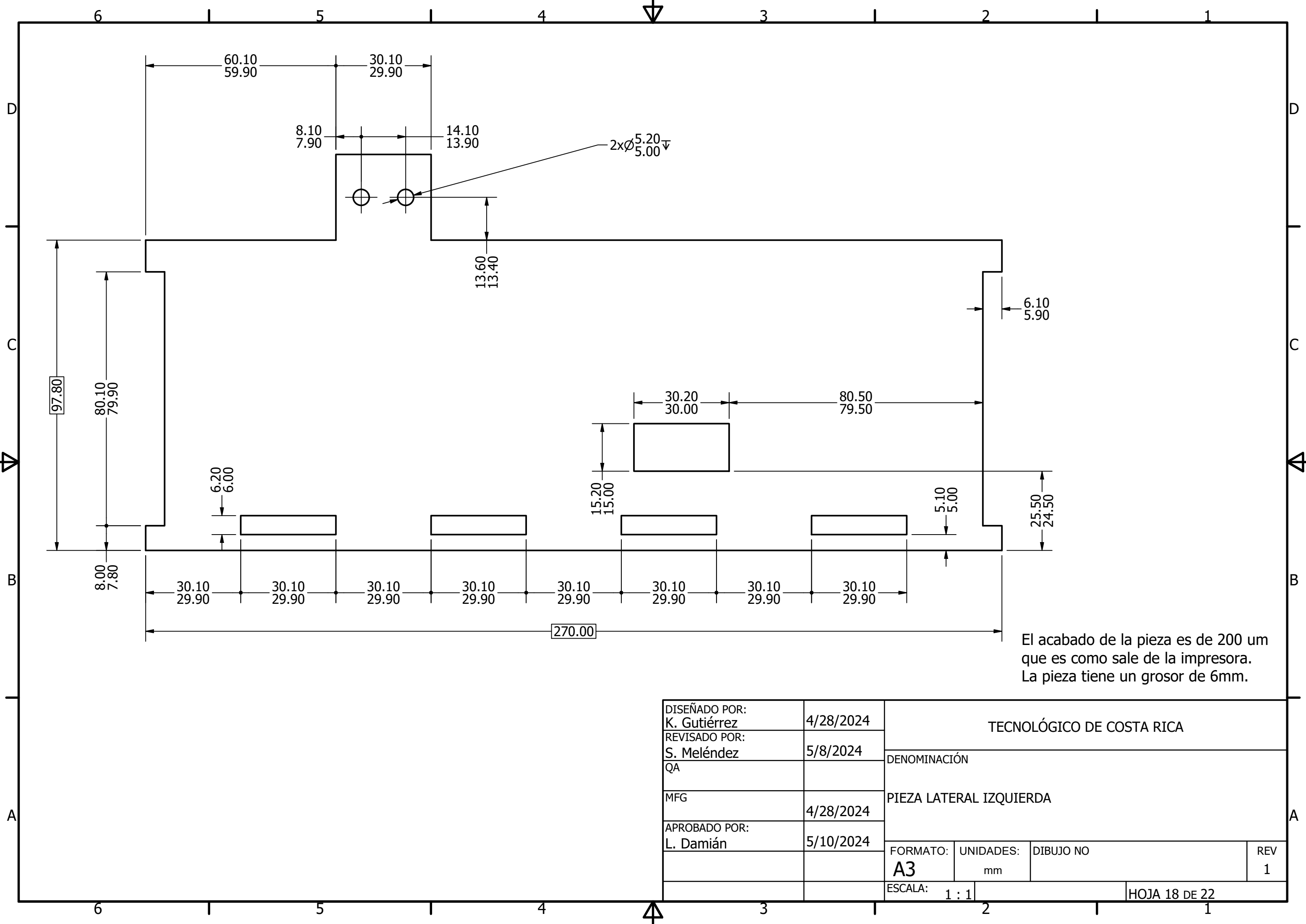
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. La pieza tiene un grosor de 6mm.

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA			
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024				
QA		DENOMINACIÓN			
MFG	4/28/2024	ALMACENAMIENTO DELANTERO			
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024				
		FORMATO: A3	UNIDADES: mm	DIBUJO NO	REV 1
		ESCALA: 1 : 1	HOJA 16 DE 22		



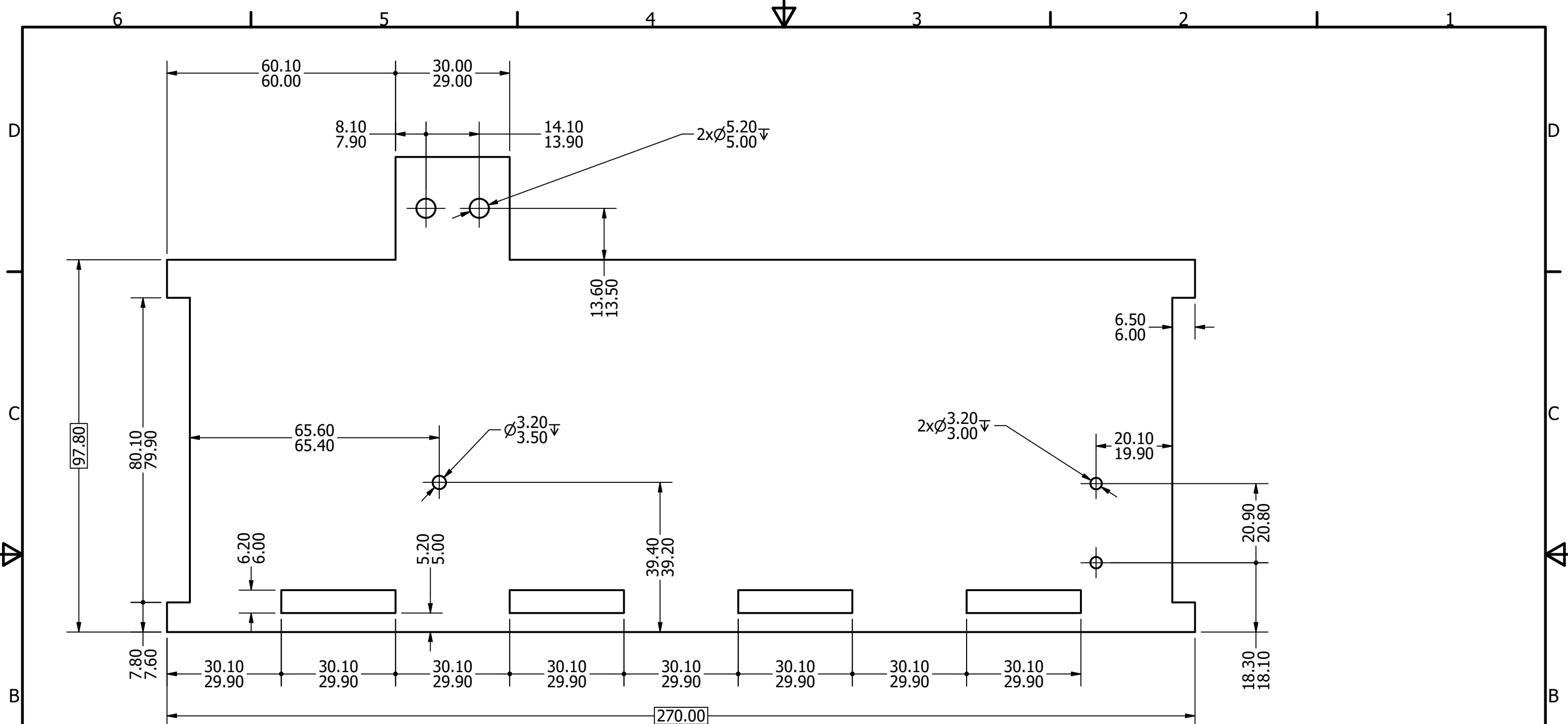
El acabado de la pieza es de 200 μm que es como sale de la impresora. La pieza tiene un grosor de 6mm.

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	ALMACENAMIENTO TRASERO		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DIBUJO NO
		A3	mm	REV 1
		ESCALA: 1:1	HOJA 17 DE 22	



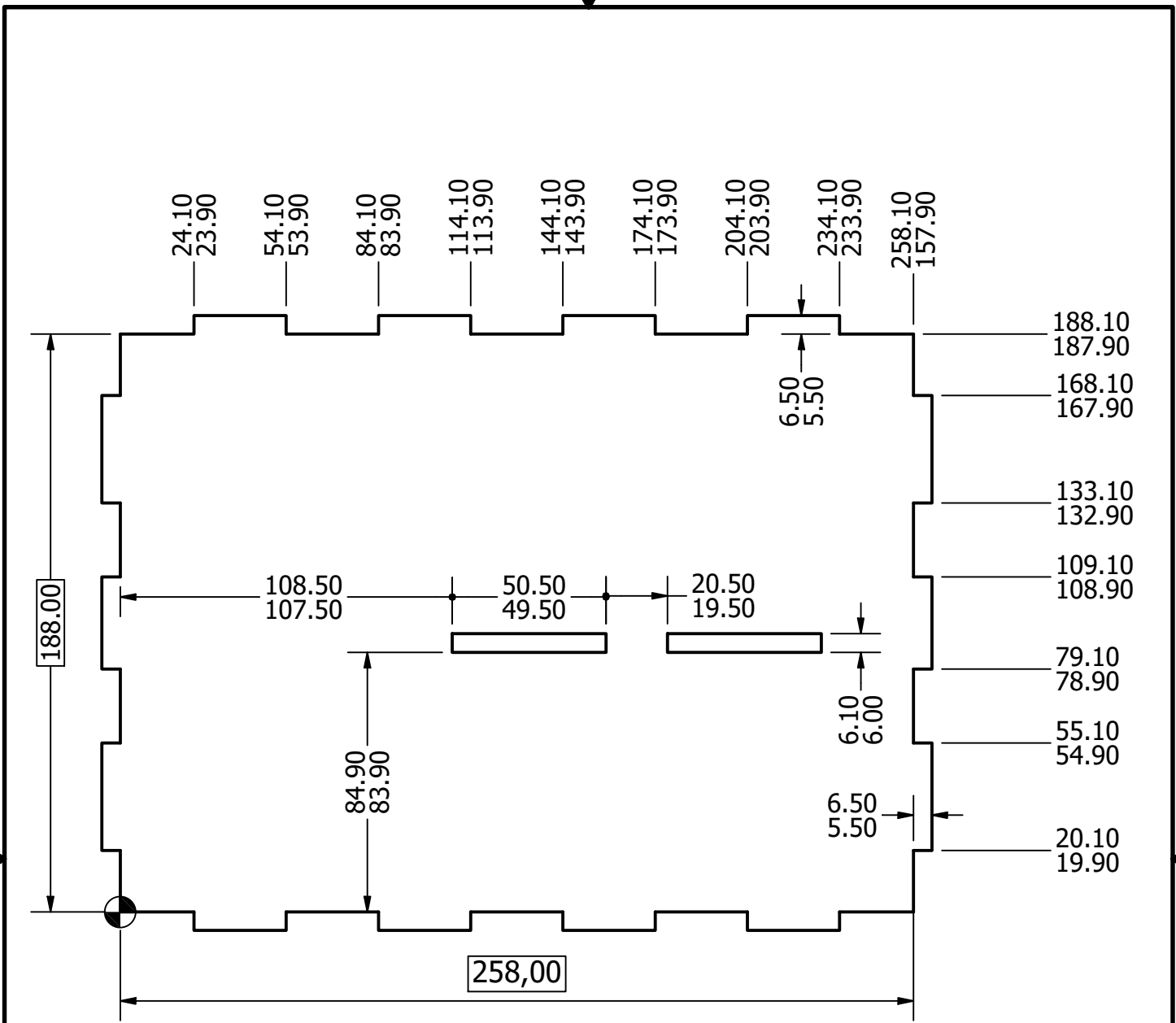
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. La pieza tiene un grosor de 6mm.

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	PIEZA LATERAL IZQUIERDA		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DIBUJO NO
		A3	mm	REV 1
		ESCALA: 1 : 1	HOJA 18 DE 22	



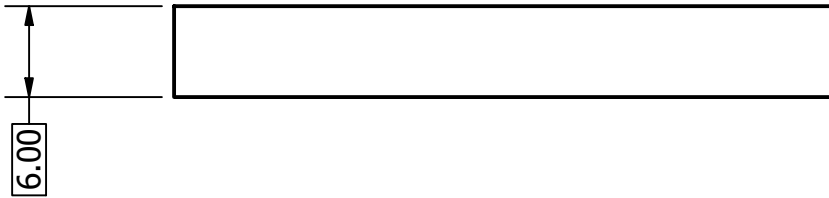
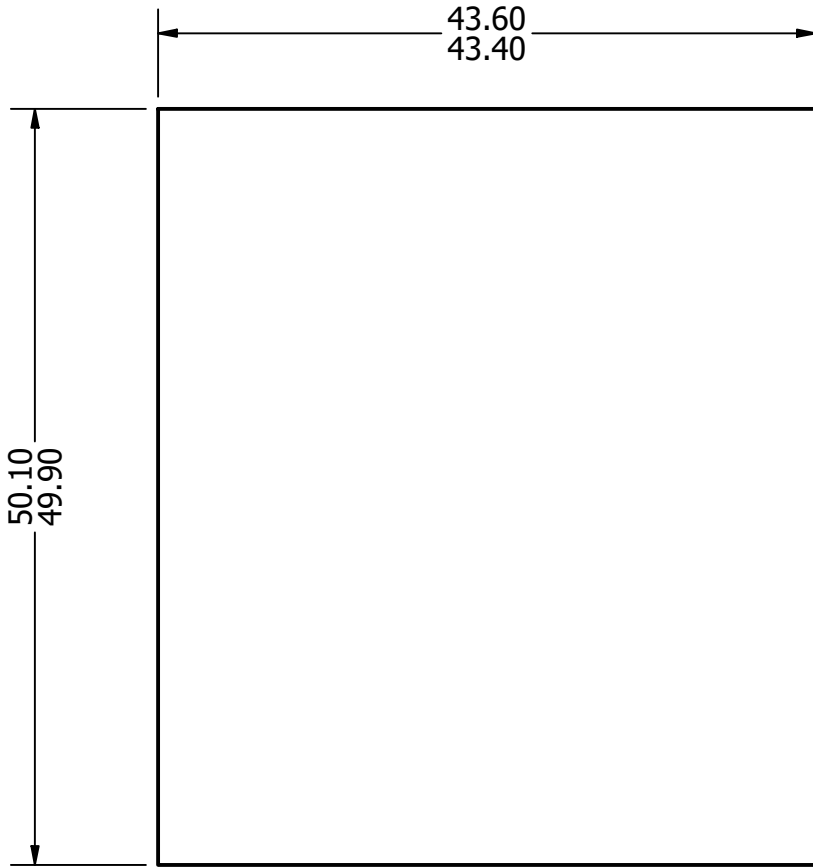
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. La pieza tiene un grosor de 6mm.

DISEÑADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	PIEZA LATERAL DERECHA		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DIBUJO NO
		A3	mm	REV 1
		ESCALA:	1 : 1	HOJA 19 DE 22



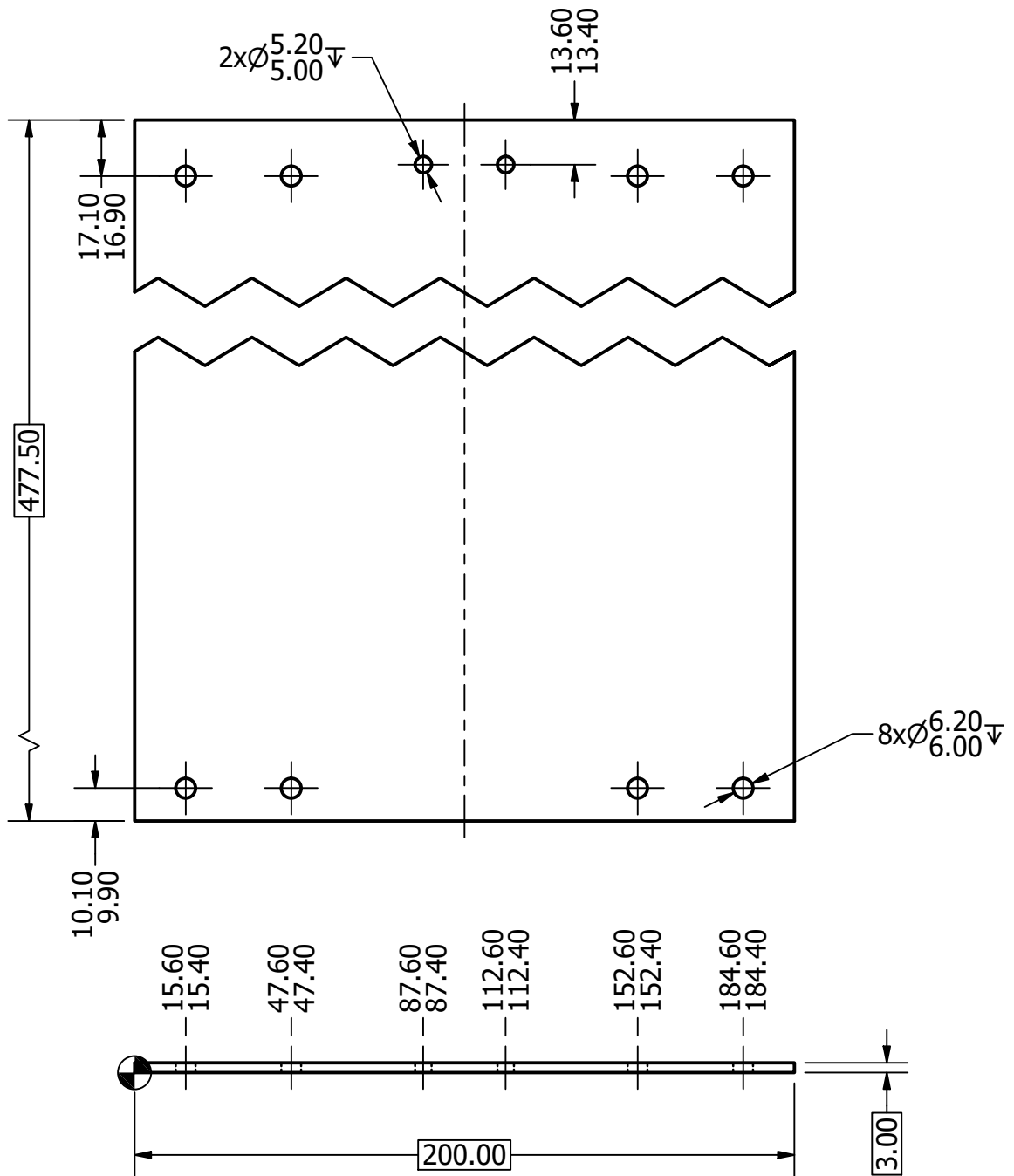
El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora. La pieza tiene un grosor de 6mm.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	BASE ALMACENAMIENTO		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DWG NO
		A4	mm	REV 1
		ESCALA:	1 : 2	HOJA 20 DE 22



El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	PRENSA FUENTES PODER		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO:	UNIDADES:	DWG NO
		A4	mm	REV 1
		ESCALA:	2 : 1	HOJA 21 DE 22



El acabado de la pieza es de 200 um que es como sale de la impresora.

DIBUJADO POR: K. Gutiérrez	4/28/2024	TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		
REVISADO POR: S. Meléndez	5/8/2024			
QA		DENOMINACIÓN		
MFG	4/28/2024	PLACA LATERAL		
APROBADO POR: L. Damián	5/10/2024	FORMATO: A4	UNIDADES: mm	DWG NO
				REV 1
		ESCALA: 1 : 2		HOJA 22 DE 22