

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera Ingeniería Mecatrónica



Diseño Mecánico y de Control de Órdenes de Trabajo del  
Sistema Automatizado de Calibración Dimensional de Bloques  
del Laboratorio Costarricense de Metrología

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

Kevin Morales Paz

Cartago, 24 de noviembre 2021



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

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, 24 de noviembre 2021



---

Kevin Morales Paz

Céd: 117010580

**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: Kevin Morales Paz

Proyecto: Diseño Mecánico y de Control de Órdenes de Trabajo del Sistema Automatizado de Calibración Dimensional de Bloques del Laboratorio Costarricense de Metrología.

ROGER STUART  
MELENDEZ  
POLTRONIERI  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por  
ROGER STUART  
MELENDEZ POLTRONIERI  
(FIRMA)  
Fecha: 2021.11.18  
17:53:55 -06'00'

---

Ing. Roger Meléndez Poltronieri, MAIE, MGP

Asesor

Cartago, 24 de noviembre 2021

**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: Kevin Morales Paz

Proyecto: Diseño Mecánico y de Control de Órdenes de Trabajo del Sistema Automatizado de Calibración Dimensional de Bloques del Laboratorio Costarricense de Metrología.

Miembros del jurado evaluador

**JUAN LUIS CRESPO  
MARIÑO (FIRMA)** Firmado digitalmente por JUAN  
LUIS CRESPO MARIÑO (FIRMA)  
Fecha: 2021.11.24 17:31:31  
-06'00'

---

Dr. -Ing. Juan Luis Crespo Mariño

Jurado

**JUAN CARLOS  
BRENES TORRES  
(FIRMA)** Firmado digitalmente por JUAN  
CARLOS BRENES TORRES (FIRMA)  
Fecha: 2021.11.24 17:08:34  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Jurado

**ANA MARIA  
MURILLO  
MORGAN (FIRMA)** Firmado digitalmente por ANA  
MARIA MURILLO MORGAN (FIRMA)  
Fecha: 2021.11.24 15:42:02 -06'00'

---

Ing. Ana María Murillo Morgan

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, 24 de noviembre 2021

## Resumen

El proceso de calibración dimensional mediante bloques patrón del Laboratorio Costarricense de Metrología es altamente dependiente de la intervención humana, tanto en la ejecución de órdenes de trabajo como en los movimientos requeridos para realizar el barrido de mediciones que permiten generar el certificado de calibración. En el presente proyecto, se realizó un diagnóstico del proceso de calibración, esto con el fin de sentar las bases que permitieron llevar a cabo la metodología de diseño de ingeniería. En este sentido, se establecieron las necesidades del laboratorio, se seleccionó un concepto de solución y se llevó a la fase de construcción de primer prototipo funcional. La propuesta de solución es capaz de ejecutar la secuencia de movimientos de calibración con una precisión mayor a 0.1 mm en ambos ejes de movimiento. Adicionalmente, la solución gestiona las órdenes de trabajo de hasta 122 bloques patrón, disminuyendo el tiempo de calibración por bloque a menos de 10 minutos, garantizando la integridad de estos últimos, en concordancia con lo establecido con la normativa aplicable, tal y como fue validado. Por último, se encontró que el proyecto es rentable al realizar un análisis de flujos netos de efectivo.

**Palabras clave:** Metrología, bloques patrón, control de órdenes de trabajo, semi-automatización de calibración dimensional.

## **Abstract**

The dimensional gauge block calibration process developed by the Costa Rican Metrology Laboratory (LCM), is highly dependent on human interaction, this for the execution of the work orders as well for the movements required in order to obtain all the measurements needed to emit the calibration certificate. In this project, a diagnosis of the calibration process was made, contributing on stablishing the basis needed for implementing the engineering design methodology. In this sense, the necessities of the laboratory were collected, a proposal of design was selected and its prototype was built up. The solution is capable of executing up to 122 gauge block work orders. In addition, the prototype moves in the plane required for the gauge block comparator to go over all the measuring positions with a minimum precision of 0.1 mm, as it was validated. Finally, a net cash flows analysis encountered that the project is economically feasible.

**Keywords:** Metrology, gauge blocks, work order control, dimensional calibration semi-automation.

# AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo brindado en estos años, por ser un pilar en mi vida, y siempre aconsejarme de la mejor manera.

A todos mis amigos, que estuvieron presentes para mí en los momentos difíciles y de éxito, tanto dentro como fuera de la universidad, su apoyo y compañía fueron indispensables para mantenerme motivado y alegre.

Al Ing. Leonardo Rojas Rapso por abrirme las puertas del LCM, por la confianza y ayuda brindada desde el primer momento del desarrollo del proyecto.

A todo el cuerpo docente del Área Académica de Ingeniería Mecatrónica por su dedicación y esfuerzo en la formación de profesionales con gran calidad técnica, pero sobretodo con ética y altos valores de trabajo.

Al Ing. Roger Meléndez Poltronieri por su guía durante el último año de mi carrera, sus aportes, consejos y cercanía fueron críticos en el éxito de este proyecto.

A Johanna Muñoz, Juan Carlos Brenes y Fabián Coto, profesionales que me ayudaron a crecer tanto académica como personalmente durante mi paso por el ITCR, muy agradecido por su guía, enseñanza y las oportunidades brindadas.

---

# LISTA DE CONTENIDOS

<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	4
1.1.1 Objetivo general . . . . .	4
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	4
1.2 Estructura del documento . . . . .	5
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1 Metrología . . . . .	7
2.1.1 Metrología mecánica . . . . .	8
2.1.2 Calibración dimensional mediante bloques patrón . . . . .	9
2.1.3 Normativa aplicable en Costa Rica: INTE/ISO/IEC 17025:2017	10
2.1.4 Conceptos metrológicos básicos . . . . .	14
2.2 Análisis mecánico mediante simulación de elementos finitos . . . . .	15
2.2.1 Base conceptual . . . . .	16
2.2.2 Preprocesado . . . . .	17
2.2.3 Resultado . . . . .	17
<b>3 Metodología</b>	<b>19</b>
3.1 Metodología de diseño . . . . .	19
3.1.1 Identificar las necesidades del cliente . . . . .	20
3.1.2 Establecer especificaciones objetivo . . . . .	21
3.1.3 Generar conceptos de producto o solución . . . . .	23
3.1.4 Seleccionar concepto(s) de producto . . . . .	26
3.1.5 Probar concepto(s) de producto . . . . .	27

3.1.6	Especificaciones finales . . . . .	29
3.2	Documentación del seguimiento de la metodología de diseño . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Diagnóstico</b>	<b>31</b>
4.1	Planeamiento y atención de órdenes de trabajo . . . . .	31
4.2	Proceso de calibración dimensional . . . . .	34
4.3	Oportunidades de mejora . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Diseño de la propuesta de solución</b>	<b>52</b>
5.1	Identificar necesidades del cliente . . . . .	53
5.1.1	Categorización y jerarquización de necesidades . . . . .	57
5.1.2	Reflexión de la fase . . . . .	57
5.2	Establecer especificaciones objetivo . . . . .	58
5.2.1	Definición de métricas . . . . .	58
5.3	Determinación de valores objetivo . . . . .	59
5.3.1	Reflexión de la fase . . . . .	65
5.4	Generar conceptos de solución . . . . .	65
5.4.1	Reflexión de la fase . . . . .	76
5.5	Seleccionar conceptos de solución . . . . .	78
5.5.1	Nivel de filtrado . . . . .	80
5.5.2	Nivel de evaluación . . . . .	80
5.5.3	Reflexión de la fase . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Mecanismo para la ejecución automática de la secuencia de calibración</b>	<b>82</b>
6.1	Diseño mecánico para el recorrido por las posiciones de la secuencia de calibración . . . . .	83
6.2	Diseño mecánico para el accionamiento de la bomba de vacío . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Mecanismo para la ejecución semiautomática de las órdenes de trabajo</b>	<b>97</b>
7.1	Diseño mecánico . . . . .	97
7.2	Desarrollo programático . . . . .	108
7.2.1	Selección del sistema computacional . . . . .	108
7.2.2	Descripción de la funcionalidad de sistema de control de órdenes de trabajo . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Validación de la propuesta de solución</b>	<b>116</b>
8.1	Mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración . . . . .	118
8.1.1	Rango y precisión de los movimientos de la secuencia de calibración	118
8.1.2	Accionador del pedal . . . . .	123
8.2	Sistema de control del mecanismo de alojamiento de bloques . . . . .	124
8.2.1	Movimiento a posiciones de atención de órdenes de trabajo . . . . .	124
8.2.2	Aseguramiento de la posición absoluta mediante sensor infrarrojo	129
8.3	Establecer especificaciones finales . . . . .	130
8.4	Reflexión de la fase . . . . .	136

<b>9</b>	<b>Impacto de la propuesta de solución</b>	<b>137</b>
9.1	Salud ocupacional . . . . .	137
9.2	Calidad del servicio . . . . .	139
9.3	Divulgación del desarrollo . . . . .	139
9.4	Aprovechamiento del recurso humano . . . . .	140
9.5	Perspectiva económica clásica . . . . .	141
<b>10</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>146</b>
10.1	Conclusiones . . . . .	146
10.2	Recomendaciones . . . . .	149
	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>152</b>
	<b>Apéndice A: Simulaciones de esfuerzos para las piezas críticas del diseño mecánico de la propuesta de solución</b>	<b>157</b>
A.1	Mecanismo para la ejecución automática de la secuencia de calibración	157
A.1.1	Acople rígido de aluminio . . . . .	157
A.1.2	Soporte para pedal y servomotor . . . . .	159
A.2	Mecanismo para la ejecución semiautomática de las órdenes de trabajo	160
A.2.1	Base inferior del disco giratorio . . . . .	160
A.2.2	Acople entre stepper y base inferior . . . . .	161
	<b>Apéndice B: Planos Mecánicos</b>	<b>163</b>
	<b>Apéndice C: Desarrollo programático</b>	<b>178</b>

---

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Relación lógica entre conceptos metrológicos utilizada en la estandarización de mediciones. . . . .	7
2.2	Errores límite y tolerancias según ISO 3650. . . . .	10
2.3	Presupuesto de incertidumbre para el proceso de calibración dimensional mediante bloques patrón. . . . .	12
2.4	Condiciones para la presencia de par galvánico. . . . .	13
2.5	Representación gráfica de la repetibilidad. . . . .	15
2.6	Representación gráfica de la reproducibilidad. . . . .	15
2.7	Representación gráfica de elementos finitos. . . . .	16
3.1	Metodología de diseño de ingeniería utilizada en el proyecto. . . . .	20
3.2	Método de cinco pasos para la generación de conceptos. . . . .	24
3.3	Representación de caja negra. . . . .	25
4.1	Ilustración paso N <sup>o</sup> 1 del proceso de calibración dimensional . . . . .	35
4.2	Ilustración paso N <sup>o</sup> 2 del proceso de calibración dimensional . . . . .	35
4.3	Ilustración de las plantillas metálicas del comparador de bloques . . . . .	36
4.4	Ilustración paso N <sup>o</sup> 3 del proceso de calibración dimensional . . . . .	36
4.5	Ilustración paso N <sup>o</sup> 4 del proceso de calibración dimensional . . . . .	37
4.6	Ilustración paso N <sup>o</sup> 6 del proceso de calibración dimensional . . . . .	38
4.7	Ilustración de las marcas en los bloques según el tamaño nominal . . . . .	38
4.8	Ilustración paso N <sup>o</sup> 9 del proceso de calibración dimensional . . . . .	39
4.9	Ilustración paso N <sup>o</sup> 11 del proceso de calibración dimensional . . . . .	40
4.10	Ilustración paso N <sup>o</sup> 12a del proceso de calibración dimensional . . . . .	41
4.11	Ilustración paso N <sup>o</sup> 12b del proceso de calibración dimensional . . . . .	41
4.12	Ilustración del equipo TESA MODUL y sus diales . . . . .	42
4.13	Ilustración paso N <sup>o</sup> 13 del proceso de calibración dimensional . . . . .	42
4.14	Ilustración paso N <sup>o</sup> 14 del proceso de calibración dimensional . . . . .	43
4.15	Ilustración paso N <sup>o</sup> 15 del proceso de calibración dimensional . . . . .	43
4.16	Ilustración paso N <sup>o</sup> 16 del proceso de calibración dimensional . . . . .	44

4.17	Ilustración paso N <sup>o</sup> 20 del proceso de calibración dimensional . . . . .	45
4.18	Ilustración paso N <sup>o</sup> 21 del proceso de calibración dimensional . . . . .	46
4.19	Ilustración paso N <sup>o</sup> 22 del proceso de calibración dimensional . . . . .	46
4.20	Diagrama del proceso de atención de órdenes de trabajo de calibración dimensional . . . . .	48
4.21	Bandejas de almacenamiento de bloques del LD . . . . .	49
5.1	Representación de caja negra del proyecto. . . . .	66
5.2	Descomposición funcional del proyecto. . . . .	67
5.3	Propuesta 1 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	72
5.4	Propuesta 2 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	73
5.5	Propuesta 3 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	73
5.6	Propuesta 4 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	74
5.7	Propuesta 5 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	74
5.8	Propuesta 6 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	75
5.9	Propuesta 7 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	75
5.10	Propuesta 8 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.	76
6.1	Mecanismo de palanca del comparador de bloques para la ejecución de la secuencia de calibración. . . . .	83
6.2	Mecanismo para el recorrido por las posiciones de la secuencia de calibración. . . . .	84
6.3	Base lateral derecha del mecanismo de secuencia. . . . .	85
6.4	Base lateral izquierda del mecanismo de secuencia. . . . .	85
6.5	Barra metálica lisa de 8mm. . . . .	86
6.6	Motor a pasos Nema 17. . . . .	86
6.7	Soporte tipo L para motor a pasos Nema 17. . . . .	87
6.8	Base de sujeción del mecanismo de secuencia. . . . .	88
6.9	Base para stepper, tuerca y rodamientos lineales. . . . .	89
6.10	Barra roscada. . . . .	89
6.11	Acople flexible de aluminio. . . . .	89
6.12	Tuerca de latón. . . . .	90
6.13	Rodamiento lineal. . . . .	90
6.14	Rodamiento de montaje tipo <i>pillow</i> . . . . .	91
6.15	Acople rígido de aluminio. . . . .	91
6.16	Pedal de accionamiento de la bomba de vacío. . . . .	93
6.17	Servomotor utilizado para el accionamiento de pedal. . . . .	93
6.18	Soporte para pedal y servomotor. . . . .	94
6.19	Mecanismo diseñado para la ejecución de la secuencia de calibración. .	95
7.1	Mecanismo de ordenamiento de bloques para la gestión de órdenes de trabajo. . . . .	98
7.2	Rueda de bola. . . . .	99
7.3	Base superior del disco giratorio para el alojamiento de bloques. . . . .	99
7.4	Placa de acero inoxidable. . . . .	101
7.5	Base inferior del disco giratorio. . . . .	102

7.6	Sensor infrarrojo tipo <i>slotted</i> . . . . .	103
7.7	Soporte ajustable del sensor infrarrojo. . . . .	104
7.8	Acople entre stepper y base inferior del disco giratorio. . . . .	104
7.9	Base de alojamiento de stepper y reposo del plato giratorio. . . . .	105
7.10	Base de alojamiento de stepper y reposo del plato giratorio (corte transversal). . . . .	106
7.11	Tapa de la base de alojamiento del motor a pasos. . . . .	107
7.12	Diagrama de flujo del sistema de control de órdenes de trabajo. . . . .	110
7.13	Interfaz de usuario de ingreso de datos de servicio (1 de 2). . . . .	111
7.14	Interfaz de usuario de ingreso de datos de servicio (2 de 2). . . . .	111
7.15	Interfaz de usuario para la gestión de órdenes de trabajo y ejecución de la secuencia de calibración. . . . .	112
7.16	Hoja de cálculo con las posiciones angulares de los bloques en el mecanismo de ordenamiento. . . . .	113
7.17	Informe de indicadores de desempeño generado. . . . .	114
8.1	Diseño mecánico para la ejecución de la secuencia de calibración y la atención de órdenes de trabajo. . . . .	117
8.2	Mediciones del rango de movimiento del eje X para la plantilla de mayor tamaño. . . . .	120
8.3	Mediciones del rango de movimiento del eje X para la plantilla de menor tamaño. . . . .	121
8.4	Mediciones del rango de movimiento del eje Y. . . . .	122
8.5	Plantilla circular para la validación del movimiento rotacional del mecanismo giratorio de ordenamiento de bloques. . . . .	125
8.6	Interfaz de usuario del código para validación de giro. . . . .	126
9.1	Flujos netos de efectivo. . . . .	144
A.1	Simulación de esfuerzos para el acople rígido. . . . .	158
A.2	Simulación de esfuerzos para el soporte del servomotor y el pedal. . . . .	159
A.3	Simulación de esfuerzos para la placa inferior del disco giratorio. . . . .	161
A.4	Simulación de esfuerzos para el acople del disco giratorio. . . . .	162

---

# LISTA DE TABLAS

3.1	Valores de importancia utilizados para las necesidades y especificaciones.	21
3.2	Escala de desempeño relativo utilizada para la evaluación de conceptos.	27
5.1	Necesidades establecidas para el proyecto. . . . .	58
5.2	Métricas establecidas para el proyecto. . . . .	59
5.3	Especificaciones definidas para el desarrollo del proyecto. . . . .	64
5.4	Opciones conceptuales para cada subproblema . . . . .	70
5.5	Filtrado de conceptos. . . . .	80
5.6	Tabla de evaluación de conceptos. . . . .	81
7.1	Tabla de medidas del conjunto de bloques. . . . .	100
8.1	Condiciones de prueba de la propuesta de solución . . . . .	119
8.2	Resultados de movimiento rotacional del experimento de narrativa de código . . . . .	127
8.3	Resultados de movimiento rotacional del experimento de narrativa de código con corrección de ángulo . . . . .	128
8.4	Especificaciones finales de la propuesta de solución. . . . .	131
9.1	Estimación de costos directos de la propuesta de solución. . . . .	142
9.2	Estimación de costos indirectos de la propuesta de solución. . . . .	142
9.3	Costos hundidos del sistema. . . . .	143

---

# LISTA DE ACRÓNIMOS

- CCSS** Caja Costarricense del Seguro Social
- CENAM** Centro Nacional de Metrología de México
- CGPM** Conferencia General de Pesas y Medidas
- DMF** Departamento de Metrología Física
- INMETRO** Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia do Brasil
- INTECO** Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
- INTECO** Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
- INTI** Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina
- LCM** Laboratorio Costarricense de Metrología
- LD** Laboratorio de Dimensional
- MEIC** Ministerio de Economía Industria y Comercio
- MRC** Metrology Research Centre of Canada
- NIST** National Institute of Standards and Technology of USA
- SGC** Sistema de Gestión de la Calidad
- SIM** Sistema Interamericano de Metrología
- UCR** Universidad de Costa Rica

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto fue desarrollado en el *Laboratorio Costarricense de Metrología* (LCM), el cual fue creado en el año 2002 mediante la Ley 8279 Sistema Nacional para la Calidad, como un órgano de desconcentración máxima en materia metrológica, con personalidad jurídica instrumental para el desarrollo de sus labores, el cual se rige por normas nacionales e internacionales aplicables, y está adscrito al *Ministerio de Economía Industria y Comercio* (MEIC) [1].

Dentro de la cartera de servicios que brinda el LCM, se encuentran los servicios de calibración para la diseminación de la trazabilidad de unidades de medición, ensayos de aptitud (para el personal que realice mediciones como parte de sus labores profesionales), estudios de comparación interlaboratoriales, capacitación en tópicos metrológicos, y servicios de verificación de reconocimientos [2]. Todos los servicios de calibración cuentan con trazabilidad documentada hacia patrones nacionales e internacionales, los cuales son mantenidos de acuerdo con los lineamientos establecidos por la *Conferencia General de Pesas y Medidas* (CGPM), y soportadas por el *Sistema de Gestión de la Calidad* (SGC) conforme a la normativa internacional

INTE/ISO/IEC 17025:2017 [3].

El proyecto se enmarca específicamente en el *Departamento de Metrología Física* (DMF) del LCM, el cual abarca los Laboratorios de Dimensional, Temperatura, Masas y Balanzas, Volumen, Densidad, Viscosidad, Presión, Acústica y Humedad. La propuesta de diseño se desarrolló puntualmente en el *Laboratorio de Dimensional* (LD), cuyo objetivo principal es “calibrar equipos, patrones secundarios y primarios de laboratorios metrológicos de Costa Rica, referentes a mediciones dimensionales asociadas a la magnitud de longitud y sus submúltiplos” [4].

Según lo especificado por el cliente, el Ingeniero Leonardo Rojas Rapso, encargo del LD, aproximadamente entre el 70 % y 80 % de la carga de trabajo del LD proviene del proceso de calibración dimensional mediante bloques. En síntesis, el proceso de calibración dimensional consiste en comparar las mediciones de longitud entre un bloque patrón y un bloque calibrando. Estas mediciones se realizan entre las caras de medición de los bloques, en los puntos medios (centro de las caras de los bloques patrón y calibrando), y en los extremos (4 esquinas del bloque calibrando), y son tomadas por un equipo comparador de bloques. Existen otros métodos de calibración dimensional, no obstante, el LD realiza estas calibraciones utilizando el equipo comparador de bloques, el cual es el activo disponible para tal fin, que es adecuado para el nivel de exactitud de las calibraciones del LD, que llega incluso hasta bloques patrón tipo K o 00. Los bloques patrón de grado K son propios de laboratorios primarios, tienen las menores tolerancias a nivel nacional [5, p. 4].

El equipo comparador de bloques, que fue adquirido en el año 1998, a pesar de su antigüedad, continua siendo muy fiable. Sin embargo, el proceso es altamente dependiente de la presencia e intervención de un funcionario, el cual debe ajustar el equipo, buscar, suministrar y acomodar los bloques dentro del comparador, realizar la secuencia de calibración (mediante una palanca con 2 grados de libertad), además de supervisar el correcto almacenamiento de los datos en el software de medición del LD.

Este proceso es lento ya que la calibración de un solo bloque puede tardar hasta una hora. Este aspecto es aún más crítico tomando en cuenta que el orden de magnitud de las órdenes de trabajo para cada cliente ronda las decenas de bloques, solo hay un equipo comparador de bloques, y solo un funcionario disponible para este fin. La lentitud de este proceso se puede explicar debido a varios factores: el funcionario debe estar altamente vigilante de la toma de datos, este debe tener un alto grado de concentración y cuidado para la correcta y segura ejecución de la secuencia de calibración y órdenes de trabajo, todo esto aunado al conjunto de tiempos de espera debido a la necesidad de estabilización térmica para asegurar la validez de las calibraciones realizadas por el LD.

Por lo tanto, el problema identificado y tratado en este proyecto es la alta dependencia humana del proceso de calibración dimensional, que consume gran parte del tiempo del recurso humano disponible en el LD. En el presente proyecto, se expondrá el diseño mecánico que posibilita la automatización de la secuencia de calibración, así como un mecanismo de organización de bloques que, mediante un sistema de control de órdenes de trabajo, permite acercar al equipo comparador la pareja de bloques adecuada según el avance de la atención del conjunto. El sistema de control de órdenes de trabajo brindará al usuario indicadores de desempeño que anteriormente no se medían de forma automática en el LD, lo cual, según el cliente, serán de gran beneficio para el análisis y la gestión de los procesos dentro del DMF.

El sistema mecánico diseñado para la ejecución de los movimientos de la secuencia de calibración, unido al sistema de control (este último elaborado por el equipo interdisciplinario del LD, correspondiente a un desarrollo fuera del alcance del presente proyecto), es capaz de ejecutar el proceso de calibración dimensional mediante bloques, con lo cual, se disminuye el grado de intervención humana, y con ello los tiempos de calibración, así como los riesgos de lesión y malestares del funcionario debido a la realización de labores repetitivas asociadas al proceso de

calibración.

El mecanismo de ordenamiento de bloques que es gestionado por el sistema de control de órdenes de trabajo, dota al LD de un espacio seguro, organizado y práctico para el acomodo de los bloques patrón y calibrando, facilita la selección y suministro de bloques al equipo comparador, así como disminuye los tiempos de espera por estabilización térmica y de gestión de las órdenes de trabajo. Todo lo mencionado anteriormente se traduce en una mejora de la calidad del servicio brindado por el LD, ya que se da un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, en este caso, de los activos y del recurso humano, lo que permite al personal del LD dedicarse al resto de sus labores con mayor grado de atención, evaluar la extensión de servicios, así como ejercer labores investigativas dentro del LCM.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema para la automatización de la secuencia de movimiento y planificación de órdenes de trabajo de calibración dimensional.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

1. Diagnosticar el proceso de toma de datos mediante la secuencia de movimientos de la calibración manual de bloques dimensionales y la planificación que se establece para llevar a cabo la calibración de un conjunto de bloques.
2. Desarrollar un sistema computacional de control que sea capaz de gestionar un mecanismo que permita planificar el proceso de calibración de un conjunto de bloques de forma eficiente y segura.
3. Diseñar un sistema mecánico capaz de llevar a cabo la secuencia de movimientos

del proceso de calibración y de la planificación de la orden de trabajo de forma precisa, eficiente y segura.

4. Validar el funcionamiento de los diseños mecánico y de control de planificación mediante pruebas de concepto en condiciones ordinarias de trabajo en el LCM.

## 1.2 Estructura del documento

A continuación, se describe brevemente la estructura a seguir en el documento. Inicialmente, en el capítulo 1, se contextualiza el problema y el alcance del proyecto. En el capítulo 2 se exponen los conceptos teóricos, normativos y tecnológicos relacionados con el proyecto. En el capítulo 3 se expone la metodología de diseño de ingeniería, que es la base del proceso intelectual e ingenieril del proyecto. Seguidamente, el capítulo 4 presentará al lector el proceso de calibración dimensional y de atención de órdenes de trabajo dentro del LD. El capítulo 5, se describe el proceso de diseño al implementar la metodología planteada, esto hasta llegar al concepto ganador de la propuesta de solución, cuyos sistemas mecánico y de control, serán explicados a detalle en los capítulos 6 y 7. Seguidamente, en el capítulo 8, se describe la fase de validación de la propuesta de solución. El análisis del impacto de la propuesta de solución se presenta en el capítulo 9. Finalmente, se presentan las principales conclusiones y recomendaciones en miras de subsecuentes desarrollos en el capítulo 10.

El principal aporte de ingeniería del presente proyecto fue dotar al LD de un sistema semi-automático para el proceso de calibración dimensional, lo cual mejora la calidad del servicio brindado y permite un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, tanto materiales como humanos.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

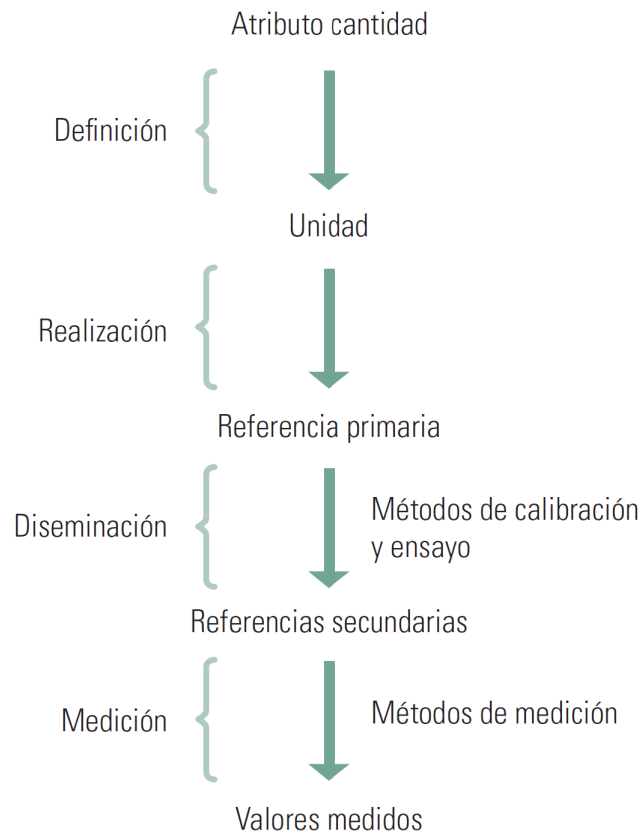
## MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exponen los conceptos teóricos, normativos y tecnológicos relacionados de forma estrecha con el desarrollo del proyecto. Primeramente, se tratará el tema de Metrología, realizando un enfoque en la Calibración Dimensional, así como la normativa vigente en Costa Rica. Seguidamente, se expondrán los factores de influencia en las variaciones dimensionales de los bloques utilizados para calibración. Adicionalmente, se introducirán los conceptos estadísticos de repetibilidad y reproducibilidad, de suma importancia para asegurar la validez de las calibraciones asistidas por la propuesta de solución.

Por último, se explican los principios y recomendaciones relativas a las simulaciones mecánicas de esfuerzos mediante elementos finitos, herramienta que será utilizada para evaluar la robustez del diseño mecánico de la propuesta de solución.

## 2.1 Metrología

Según [6], la metrología es la ciencia de la medición, e incluye aquellos aspectos experimentales y teóricos a cualquier nivel de incertidumbre, dentro de cualquier área científica o tecnológica. La metrología tiene sus raíces en la física, pero no es exclusiva de esta. En la Figura 2.1, se muestra la relación lógica entre los estándares, medición y cantidades.



**Figura 2.1:** Relación lógica entre conceptos metrologógicos utilizada en la estandarización de mediciones [6]

La Figura 2.1 presenta la cadena lógica entre una propiedad conceptualizada y el valor medido de esta propiedad, donde se observa la trazabilidad respecto a referencias primarias y secundarias. Un estándar en este contexto significa la referencia de la unidad de una cantidad, o lo que se conoce como patrón. Un patrón es material

de referencia, instrumento de medición, medida materializada o sistema de medición destinado a definir, reproducir, preservar o realizar una unidad.

Una cantidad, tal y como establece [6], es un atributo de un cuerpo, sustancia o fenómeno, que puede ser distinguido de forma cualitativa y determinado cuantitativamente. Un objeto se compara respecto a la cantidad correspondiente, mediante una serie de operaciones con los miembros de un conjunto de estándares, de los cuales hay diversos tipos. El patrón primario es un tipo especial de estándar, es aquel designado o ampliamente conocido que presenta las más elevadas cualidades metrológicas, cuyo valor se establece sin hacer referencia a otros patrones de la misma magnitud.

Un valor medido corresponde al resultado numérico que se obtiene de la aplicación de un método de medición a un objeto. Esta medida debe contar con **trazabilidad**, la cual se define como la característica del resultado de una medición que permite relacionarse con una referencia por medio de una sucesión ininterrumpida y documentada de calibraciones, donde cada una de estas influye en la incertidumbre final del resultado medido [7].

### 2.1.1 Metrología mecánica

Dentro de las unidades comprendidas por la metrología mecánica se encuentran **dimensional**, masa, densidad, fuerza, presión, flujo y volumen. Este estudio se enfocará en dimensional, en la cual, la unidad de longitud es diseminada por medio de la calibración de bloques patrón de alto grado de exactitud mediante un interferómetro. Estos bloques a su vez, son capaces de calibrar otros bloques de menor exactitud, hasta llegar a instrumentos de uso comercial e industrial de uso común.

### 2.1.2 Calibración dimensional mediante bloques patrón

El método para calibrar bloques patrón de grado K (00), 0 y 1 utilizado en el LD es el método de comparación mecánica, en el cual se usa un equipo comparador de bloques [8]. Los bloques patrón se rigen bajo la normativa ISO 3650:1998, y pueden fabricarse principalmente en los siguientes materiales [9]:

- Acero de alta aleación: tiene una dureza de al menos 800 HV, son estables dimensionalmente a lo largo del tiempo, y cuentan con el mayor coeficiente de dilatación térmico de entre los materiales utilizados para bloques patrón.
- Carburo de tungsteno: son cerca de 10 veces más resistentes al desgaste que los bloques de acero, tienen una dureza mínima de 1400 HV. Son adecuados para un uso frecuente, además, cuentan con excelentes propiedades de adherencia. Su coeficiente de expansión térmico es el más bajo de los materiales para bloques patrón, menos de la mitad que sus pares de acero y cerámica.
- Cerámica: estos bloques ofrecen una resistencia excelente al desgaste y rayaduras, tienen una dureza mínima de 1400 HV, son insensibles a la corrosión, y su coeficiente de expansión térmico es cercano al del acero. Específicamente, están hechos de óxido de zirconio estabilizado.

La clase o grado de los bloques, anteriormente mencionado, se refiere a la precisión que tiene el bloque patrón, a saber:

- Clase 2: utilizados como bloques patrón estándar en puestos de control en producción, generalmente para calibración de equipos o ajuste de máquinas.
- Clase 1: utilizados como bloques patrón de transferencia para calibres e instrumentos de medida en puestos de control de producción.
- Clase de tolerancia 0: están destinados a laboratorios de calibración u otros puestos de medida climatizados, fungen de referencia a nivel de empresa.

- Clase de precisión K (reemplazo de clase 00): son bloques patrón referencia destinados a laboratorios metrológicos nacionales. Se emplean para calibrar bloques principalmente.

Los máximos errores permitidos según la clase del bloque patrón se muestran en la Figura 2.2. Los datos mostrados responden a la normativa ISO 3650, no obstante, existen equivalentes para sistema inglés. Nótese que, a lo largo del documento se mencionan bloques patrón y calibrando, esto para referirse a bloques patrón de referencia y patrón calibrando, respectivamente, esto por comodidad y facilidad de entendimiento.

Longitudes nominales	Clase K		Clase 0		Clase 1		Clase 2	
	Errores límites de longitud en cualquier punto respecto a la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud	Errores límites de longitud en cualquier punto respecto a la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud	Errores límites de longitud en cualquier punto respecto a la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud	Errores límites de longitud en cualquier punto respecto a la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud
<b>Errores límite y tolerancias según ISO 3650</b>								
mm	$\pm t_e$ $\mu\text{m}$	$t_v$ $\mu\text{m}$	$\pm t_e$ $\mu\text{m}$	$t_v$ $\mu\text{m}$	$\pm t_e$ $\mu\text{m}$	$t_v$ $\mu\text{m}$	$\pm t_e$ $\mu\text{m}$	$t_v$ $\mu\text{m}$
$0,5 \geq l_n \leq 10$	0,2	0,05	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
$10 < l_n \leq 25$	0,3	0,05	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
$25 < l_n \leq 50$	0,4	0,06	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
$50 < l_n \leq 75$	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1	0,35
$75 < l_n \leq 100$	0,6	0,07	0,3	0,12	0,6	0,2	1,2	0,35
$100 < l_n \leq 150$	0,8	0,08	0,4	0,14	0,8	0,2	1,6	0,4
$150 < l_n \leq 200$	1	0,09	0,5	0,16	1	0,25	2	0,4
$200 < l_n \leq 250$	1,2	0,1	0,6	0,16	1,2	0,25	2,4	0,45
$250 < l_n \leq 300$	1,4	0,1	0,7	0,18	1,4	0,25	2,8	0,5
$300 < l_n \leq 400$	1,8	0,12	0,9	0,2	1,8	0,3	3,6	0,5
$400 < l_n \leq 500$	2,2	0,14	1,1	0,25	2,2	0,35	4,4	0,6
$500 < l_n \leq 600$	2,6	0,16	1,3	0,25	2,6	0,4	5,0	0,7
$600 < l_n \leq 700$	3	0,18	1,5	0,3	3	0,45	6,0	0,7
$700 < l_n \leq 800$	3,4	0,2	1,7	0,3	3,4	0,5	6,5	0,8
$800 < l_n \leq 900$	3,8	0,2	1,9	0,35	3,8	0,5	7,5	0,9
$900 < l_n \leq 1000$	4,2	0,25	2,0	0,4	4,2	0,6	8	1

**Figura 2.2:** Errores límite y tolerancias según ISO 3650 [9]

### 2.1.3 Normativa aplicable en Costa Rica: INTE/ISO/IEC 17025:2017

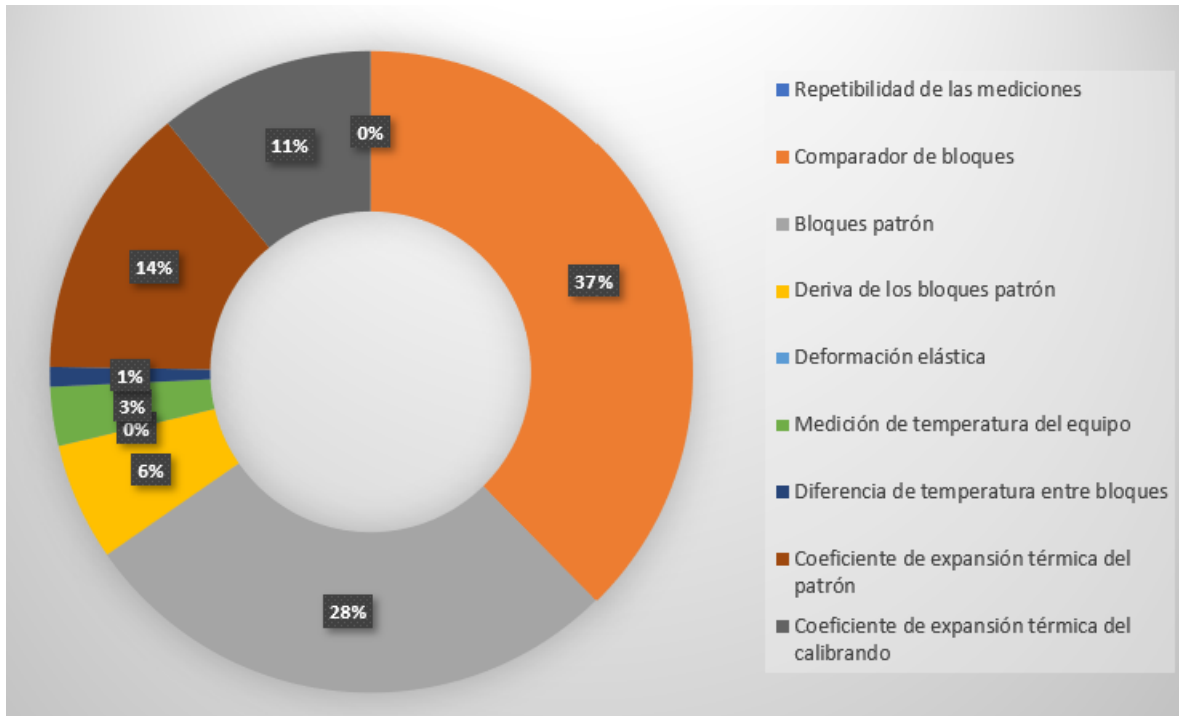
La normativa en cuestión, denominada “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”, es la normativa aplicable en Costa Rica en

términos de laboratorios de calibración, revisada y adaptada por *Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica* (INTECO). Esta norma tiene como fin que los laboratorios sean capaces de demostrar su competencia y que emiten resultados válidos [7].

La norma establece requisitos generales, de estructura, recursos, proceso y gestión; entre ellos se rescatan declaraciones de conformidad, aseguramiento de la validez de los resultados, manipulación de ítems de calibración, validación de métodos, trazabilidad metrológica, entre otros.

### **2.1.3.1 Factores de influencia en el proceso de calibración dimensional**

El proceso de calibración dimensional del LD es sometido de forma periódica a un estudio interno de aseguramiento de la calidad. Dentro de los resultados encontrados para el año 2021 se destaca el **presupuesto de incertidumbre**, el cual, indica de forma cuantitativa el peso porcentual que tiene cada factor de influencia dentro de la incertidumbre final reportada en el certificado de calibración para un cliente. Este presupuesto se puede observar en la Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Presupuesto de incertidumbre para el proceso de calibración dimensional mediante bloques patrón. Fuente: Elaboración propia con base en [10]

Como se observa, la mayor componente de incertidumbre es aportada por el equipo comparador de bloques, mientras que ni la deformación plástica, ni la repetibilidad de mediciones aportan a este rubro (en el caso del año 2021). Es importante señalar que el presente proyecto tiene como meta no influir de forma perjudicial en el peso de la repetibilidad de las mediciones, tampoco en aspectos relacionados a la temperatura, que en conjunto tienen un peso del 29 %. Por este motivo, se mencionará el principio de expansión térmica. Otro dato digno de notar es que los bloques patrón *per se* aportan un 28 % a la incertidumbre, por lo cual, la preservación de su integridad es vital. En este sentido, se mencionará brevemente el concepto de par galvánico más adelante.

La **expansión térmica** afecta a la mayoría de los materiales, es un fenómeno donde se modifican las dimensiones de un cuerpo debido a un cambio de temperatura [11]. Al aumentar la temperatura, la velocidad de las partículas internas del material también lo hace, con lo cual, la distancia de separación entre estas incrementa. El término

expansión térmica lineal hace referencia al cambio de dimensión de un sólido, y está descrito por la ecuación 2.1.

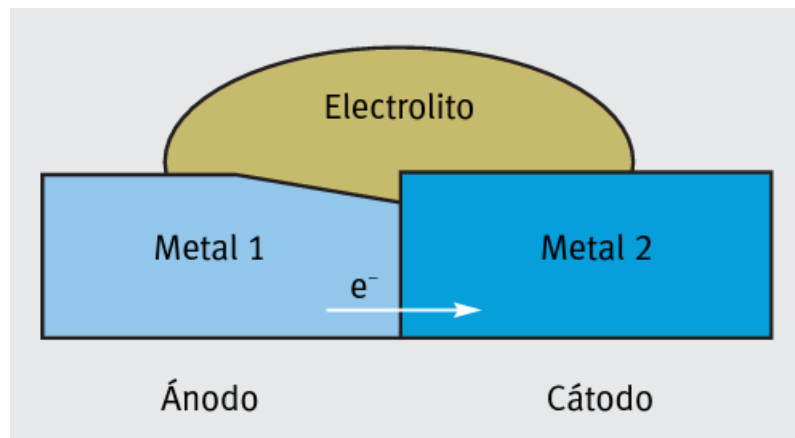
$$\Delta L = L - L_0 = \alpha \cdot L_0 \cdot (T - T_0) \quad (2.1)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión lineal, es una constante que depende de forma exclusiva del material.

En cuanto a la escogencia del material que aloja a los bloques patrón, debe tenerse especial cuidado especialmente en el caso de los bloques de acero inoxidable, esto debido a la existencia del fenómeno de corrosión por **par galvánico**. Tal y como se establece en [12], para que exista par galvánico deben cumplirse 3 condiciones:

- Diferentes potenciales de corrosión de los metales dentro de un sistema.
- Unión física entre los dos metales.
- Película de humedad eléctricamente conductora (electrolito), que haga contacto con ambos metales.

Estos requisitos se representan en la Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Condiciones para la presencia de par galvánico [12]

Las reacciones electroquímicas que se producen son similares a las que se pueden producir en el metal aislado, no obstante, el ataque corrosivo en el ánodo se acelera

enormemente. Por ende, se puede concluir el mantener contacto entre acero inoxidable y otro metal, es riesgoso si no se conoce a detalle cómo mitigar este fenómeno, ya que este último puede acelerar la corrosión.

## **2.1.4 Conceptos metrológicos básicos**

### **2.1.4.1 Exactitud**

Tal y como se establece en [6], la exactitud se refiere a la concordancia del resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

### **2.1.4.2 Precisión**

Por otra parte, la precisión hace referencia a la concordancia entre varias mediciones del mismo mensurando.

### **2.1.4.3 Repetibilidad**

Según [6] y [13] el término repetibilidad se refiere a la proximidad de la concordancia entre resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, al cumplir con las siguientes condiciones de repetibilidad:

- Mismo procedimiento de medición.
- Mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones.
- Mismo observador.
- Mismo lugar.
- Repetición en un período corto de tiempo.

La repetibilidad puede expresarse de forma cuantitativa mediante las características de la dispersión de resultados. De forma gráfica, la repetibilidad se observa como lo mostrado en la Figura 2.5.



**Figura 2.5:** Representación gráfica de la repetibilidad [13]

#### 2.1.4.4 Reproducibilidad

Este concepto hace referencia a la proximidad de la concordancia de resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo condiciones de medición cambiantes. Estas condiciones pueden ser el principio de medición, el observador, el instrumento de medición, el patrón de referencia, el lugar y condiciones de uso, y el tiempo. Gráficamente, la reproducibilidad puede ser visualizada como en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Representación gráfica de la reproducibilidad [13]

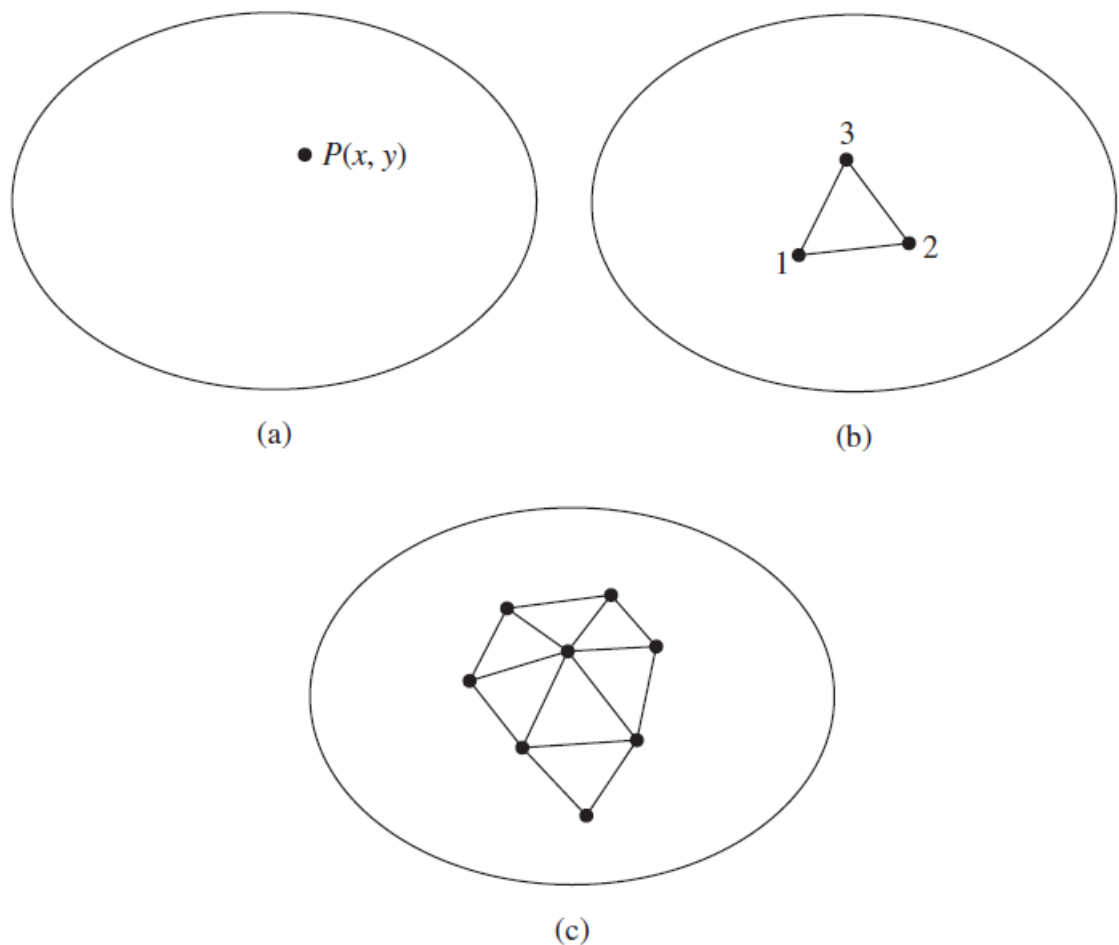
## 2.2 Análisis mecánico mediante simulación de elementos finitos

El método de elementos finitos es una técnica computacional utilizada para obtener la solución aproximada de problemas de valor límite en ingeniería [14]. Un problema de valor límite es aquel problema matemático donde una o más variables dependientes

deben cumplir con una ecuación diferencial y una serie de condiciones de frontera.

### 2.2.1 Base conceptual

La Figura 2.7 representa un volumen de material con una serie de características conocidas. El volumen representa el dominio del problema de valor límite. En cada punto del volumen se desea determinar una variable  $V(x, y)$ , lo anterior simplificando a un caso bidimensional. Existe una ecuación que gobierna el comportamiento de la variable  $V$  en cada punto del volumen.



**Figura 2.7:** Representación gráfica de elementos finitos [14]. (a) Dominio bidimensional. (b) Elemento finito de 3 nodos. (c) Mallado parcial de un elemento finito

En la Figura 2.7 (b) se muestra un elemento finito de 3 nodos, que *no* es un elemento diferencial. Un nodo es un punto específico donde el valor de la variable de campo se calcula de forma explícita. Los valores de la variable de campo en puntos internodales se calculan mediante interpolaciones utilizando los puntos nodales calculados. Las funciones de interpolación están predeterminadas, son funciones conocidas de variables independientes que describen la variación de la variable de campo dentro de un elemento finito.

Entre más fino sea el mallado mejores son las aproximaciones. Incluso, si las funciones de interpolación satisfacen ciertos requisitos matemáticos, una solución de elementos finitos puede converger a la solución exacta del problema.

### 2.2.2 Preprocesado

Se requiere una serie de pasos para formular un análisis de elementos finitos de un problema físico, por ejemplo:

- Definir el dominio geométrico del problema.
- Definir las propiedades del material.
- Seleccionar y generar el mallado.
- Definir las restricciones físicas o condiciones de frontera.
- Definir las cargas.

### 2.2.3 Resultado

Durante la fase de ejecución del estudio, el software de elementos finitos ensambla las ecuaciones algebraicas que gobiernan el problema, resuelve en forma matricial y obtiene los valores primarios de las variables de campo. Los valores calculados son

sustituidos en reversa para obtener variables derivadas y de esta forma obtener fuerzas de reacción, esfuerzos o flujos de calor, según la aplicación.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## METODOLOGÍA

En el presente capítulo se explica la metodología de diseño implementada para la ejecución del proyecto, abordando las fases que la conforman y cómo estas se adaptan a la solución *ad hoc* diseñada para el LD.

### 3.1 Metodología de diseño

Tomando como base lo expresado en [15, p. 16-18], el diseño se puede entender como el conjunto de planteamientos y acciones requeridas para concretar y hacer posible una idea. Por lo tanto, para llevar a buen puerto el desarrollo del proyecto requerido por el LD, es necesario establecer una metodología de diseño que permita ordenar las actividades intelectuales y de desarrollo de las ideas. Para este fin, el desarrollo del presente proyecto se basará en la metodología descrita por [16, pp. 16-18], cuyas fases se muestran en la Figura 3.1.

Para efectos del presente proyecto, se focalizará la metodología de diseño en las primeras 6 fases que están altamente interrelacionadas, las cuales se detallarán a

continuación. Cabe destacar que cada una de las fases debe someterse a reflexión una vez finalizadas, además, la metodología es de carácter iterativo, con lo cual el flujo de trabajo no es exclusivo hacia adelante, al contrario, se desea analizar y realizar cambios o ajustes en etapas previas en caso de ser requerido.

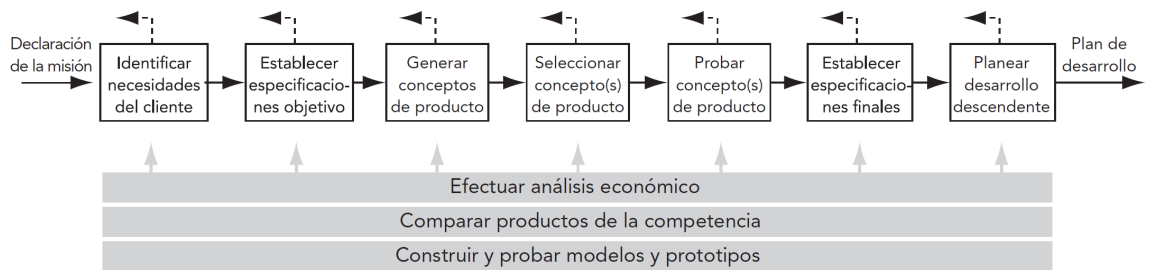


Figura 3.1: Metodología de diseño seguida. Fuente: [16, p. 16]

### 3.1.1 Identificar las necesidades del cliente

En esta fase se pretende establecer un listado claro, conciso, ordenado y jerarquizado de los deseos del cliente para la solución de ingeniería que solicita. Este listado se elabora tomando como base las entrevistas con el cliente, con lo cual, la información obtenida debe ser tratada con sumo cuidado, de tal forma que no se malinterprete o modifique lo establecido por el cliente. Una vez colectado e interpretado el conjunto de enunciados o necesidades, se realiza una categorización, ya que es común que exista una similitud o coincidencia en algunas de estas necesidades, por lo cual es factible agruparlas y enunciar una necesidad primaria que las abarque. Las necesidades que estén relacionadas mediante una **necesidad primaria**, y que brinden un grado de detalle mayor respecto a las primarias se denominan **necesidades secundarias**. Si el grado de detalle es aún mayor, se puede recurrir a la definición de **necesidad terciaria**.

Posteriormente, se envía un formulario titulado “Formulario de Jerarquización de Necesidades” al cliente, el cual compila todo el listado de necesidades extraído y brinda la oportunidad al cliente de brindar realimentación respecto a lo interpretado así como

la posibilidad de calificar cada necesidad según la escala que se muestra a continuación:

**Tabla 3.1:** Valores de importancia utilizados para las necesidades y especificaciones.

Valor	Descripción
1	Es indeseable
2	No es importante
3	Es deseable
4	Es importante
5	Es imprescindible

De esta forma, el proceso de diseño será guiado tomando en cuenta la importancia de cada necesidad para el cliente, lo cual permitirá tomar decisiones lo más objetivas posibles, intentando suprimir al máximo cualquier tipo de sesgo por parte del diseñador.

Dentro del proceso de reflexión de esta fase se pueden incluir aspectos como la evaluación de sesgos identificados en las comunicaciones con el cliente, cuestionarse si los individuos entrevistados son todos los involucrados en el proceso que puedan aportar información valiosa, entre otros.

### 3.1.2 Establecer especificaciones objetivo

Tomando como insumo el listado de necesidades producto de la fase anterior, se desea establecer un mecanismo que permita evaluar si una solución cumple con lo solicitado por el cliente. Tal y como se menciona en [16, pp. 17], las especificaciones “son la traducción de las necesidades del cliente en términos técnicos”. El objetivo de esta etapa consiste en generar un listado de especificaciones para el producto o solución a desarrollar. Cada especificación consta de una o varias métricas con sus respectivos valores marginales e ideales. Las especificaciones no deben decir cómo se va a resolver una necesidad, es decir, no deben impregnar sesgos respecto al método de solución.

- **Métrica:** que es una expresión cuantificable de un atributo que debe poseer el producto o solución, según la lista de necesidades declaradas por el cliente. El establecimiento de métricas adecuadas para cada necesidad permitirá evaluar de

forma objetiva el grado de cumplimiento de un concepto solución en cada uno de los aspectos requeridos por el cliente.

- **Valor o valores objetivo:** se refiere al establecimiento de los valores que ha de tener la métrica para considerar que la necesidad, expresada como métrica, se ha cumplido, o bien, qué grado de cumplimiento presenta. Los valores objetivo, como se mencionó anteriormente, se dividen en valores meta y valores marginales. Los valores meta son los valores deseables que deberían alcanzarse, mientras que los marginales son menos restrictivos, siendo válidos aún, el cliente aprueba que se tomen como tal.

En el caso de las métricas, debe existir al menos una por cada necesidad, y se busca que esta o el conjunto de ellas respondan de forma directa y completa a la necesidad correspondiente. Las métricas deben ser medibles, incluir su unidad de medida, deben ser viables e incluir su importancia, asociada a la necesidad que cubren, según la escala presentada anteriormente en la Tabla 3.1.

Es menester recalcar que estos valores objetivo no se reportan como valores exactos, sino como rangos. La determinación de los valores objetivo es un proceso iterativo, está sujeto a cambios fundamentados por ejemplo por las pruebas realizadas a un prototipo o el costo que implicaría asegurar estos valores cuando el beneficio no justifica esta inversión. Para la determinación de los valores objetivo el diseñador debe apoyarse en una búsqueda interna y externa de información, por ejemplo entrevistas al cliente, normativa aplicable, manuales de procesos, entre otros, de tal forma que cada uno de los valores objetivo estén justificados.

Para esta etapa, [16, pp. 93-101] se brindan una serie de recomendaciones, como por ejemplo no utilizar métricas que puedan incluir algún tipo de componente subjetiva, como lo son aquellas cuya evaluación dependa de la realización de encuestas. Por otro lado, se debe evitar el uso de especificaciones con métricas binarias, exceptuando el caso del cumplimiento de normas o estándares o casos cuya naturaleza de la métrica

así lo amerite. Una opción para no binarizar el cumplimiento de normas, estándares o pruebas, es establecer como métrica el número de puntos obtenidos por categoría o en total.

En cuanto a la reflexión propia de esta fase, se puede evaluar la validez de las métricas seleccionadas y sus valores objetivo, la correspondencia de las especificaciones con el listado de necesidades, si se consultaron las normas o estándares aplicables al proyecto en desarrollo, así como si se detecta algún tipo de sesgo en las especificaciones, por ejemplo el favorecimiento *a priori* de una tecnología de solución sobre otra. Además, se debe verificar que el cliente tiene conocimiento y aprueba el listado de especificaciones generado a esta altura del desarrollo del proyecto.

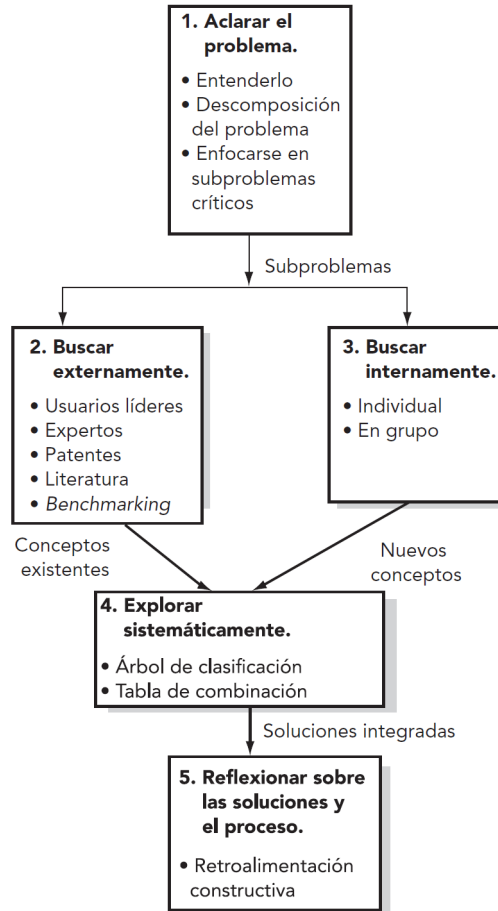
### 3.1.3 Generar conceptos de producto o solución

Tal y como se indica en [16, pp. 93-101], “un concepto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto”, es decir, describe de forma concisa la manera en que la solución va a satisfacer el listado de necesidades. El objetivo de esta fase es obtener un conjunto de conceptos de solución que atiendan lo requerido por el cliente y que puedan ser comparados en un futuro proceso de selección. El primer insumo requerido para llevar a cabo esta fase es el conjunto de necesidades y especificaciones, el cual guiará el proceso de exploración y selección de los conceptos válidos para ser comparados; he aquí la importancia y la correlación con las fases anteriores.

Para llevar a cabo esta fase de la metodología de diseño se plantea la división de esta en cinco etapas, tal y como se aprecia en la Figura 3.2.

A continuación se describirán brevemente cada uno de los cinco pasos mostrados en la Figura 3.2.

1. **Aclarar el problema:** consiste en desarrollar un entendimiento general del problema y a partir de este punto, dividirlo en subproblemas, es decir, llevar a



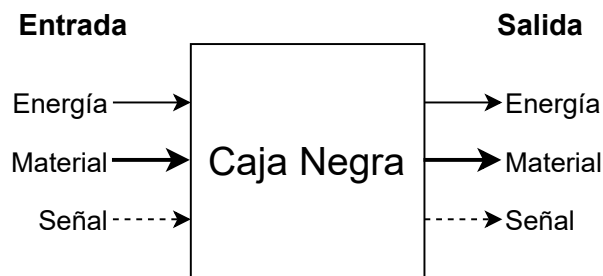
**Figura 3.2:** Método de cinco pasos para la generación de conceptos. Fuente [16, p. 122]

cabo una descomposición funcional. Una forma de estructurar esta descomposición funcional se muestra en la Figura 3.3, que muestra la representación de “Caja Negra”. Como se observa, en este nivel descriptivo se aborda el problema funcionalmente en términos de energía, material y señales. Seguidamente, se procede a dividir esta caja negra en aquellos elementos que en conjunto e interconectados son capaces de realizar la tarea requerida por el cliente. El objetivo de este paso es dividir un problema complejo en un conjunto de subproblemas más sencillos y claramente definidos.

2. **Buscar externamente:** en este paso se desea recopilar soluciones existentes a los subproblemas identificados. Algunos de los principales sujetos de información para este paso son los expertos (con aporte de conceptos o directrices de

redireccionamiento de la búsqueda), involucrados en el proceso productivo o sabedores del mercado, además, se consultan fuentes de información tales como patentes, literatura publicada, así como comparación de productos relacionados.

3. **Buscar internamente:** constituye el uso del conocimiento personal y del equipo de trabajo, así como de su creatividad. Comúnmente puede contener una actividad de lluvia de ideas, esto con la finalidad de obtener un conjunto basto de opciones de solución, las cuales se pueden representar de alguna forma gráfica o física en caso de que esto ayude a un mejor análisis y comprensión.
4. **Explorar sistemáticamente:** este paso ayuda al equipo de desarrollo a organizar el conjunto de fragmentos de conceptos y los prepara de tal forma que sea práctico y sencillo visualizar las posibles combinaciones de estos. Se agrupan los fragmentos de conceptos según el subproblema que atacan. Cabe destacar que la organización de los fragmentos en una tabla de combinación de conceptos permite identificar y facilitar las combinaciones posibles y viables.
5. **Reflexionar sobre las soluciones y el proceso:** debe cuestionarse la profundidad de la exploración, la forma en que se realizó la descomposición del problema, la existencia de sesgos en la búsqueda de conceptos, entre otros.



**Figura 3.3:** Representación de caja negra. Adaptado de: [16, p. 124]

### 3.1.4 Seleccionar concepto(s) de producto

En esta fase de la metodología de diseño en ingeniería, se busca seleccionar el concepto ganador que será llevado a prototipo y fase de pruebas. Por concepto ganador se entiende aquel conjunto de *fragmentos de conceptos*, cuya combinación, se encontró, tiene un mayor grado de cumplimiento de aquello requerido por el cliente, que fue expuesto, y para lo cual se establecieron criterios cuantificables. Además de los criterios mencionados, factores como costo, complejidad o disponibilidad tecnológica deben ser tomados en cuenta. Este proceso de selección de conceptos se puede llevar a cabo en 2 niveles, los cuales se describen a continuación.

1. **Nivel de filtrado:** aquí, se comparan, de forma general, los conceptos de producto de las combinaciones viables de los fragmentos de concepto obtenidos en la fase de diseño anterior. Para tal efecto, se establece un concepto como referencia, el cual no destaca especialmente del resto, pero sus características se pueden ubicar como promedio dentro del conjunto. Estas características o criterios de selección provienen de las necesidades y los factores mencionados anteriormente. A continuación, se debe calificar con  $+$ ,  $-$  o  $0$ , a cada uno de los conceptos en cada uno de los criterios, en caso de que estos sean mejores, peores o similares, respectivamente, al concepto referencia. Seguidamente, se cuentan los  $+$  y  $-$ , para encontrar el balance del concepto. Los conceptos con mejor puntuación pasan al siguiente nivel o pueden combinarse. Los conceptos con peor balance no avanzan de nivel.
2. **Nivel de evaluación:** una vez filtrado el conjunto de conceptos de solución, se realiza una selección más exhaustiva. Para esto, cada concepto será calificado para cada criterio del 1 al 5, siendo 1 una calificación que indica una falencia respecto al concepto referencia, y un 5 un indicador de un punto muy favorecedor respecto a la referencia (ver Tabla 3.2). Adicionalmente, cada criterio tendrá

un peso ponderado, según la importancia que haya indicado el cliente para dicho criterio en fases anteriores. De esta forma, el resultado obtenido tomará en cuenta tanto el desempeño de cada concepto en cada criterio, así como la criticidad de este para el adecuado cumplimiento de lo requerido y solicitado por el cliente. Al finalizar este proceso, se habrán identificado los mejores conceptos solución (según los criterios establecidos).

**Tabla 3.2:** Escala de desempeño relativo utilizada para la evaluación de conceptos.

Calificación	Desempeño Relativo
1	Notablemente inferior que la referencia
2	Ligeramente inferior que la referencia
3	Igual que la referencia
4	Ligeramente superior que la referencia
5	Notablemente superior que la referencia

En cuanto a la reflexión de esta fase, se debe examinar que efectivamente los criterios de selección responden a lo establecido por el cliente y no a sesgos o aspectos subjetivos del diseñador o algún miembro del equipo.

### 3.1.5 Probar concepto(s) de producto

En el contexto del desarrollo del presente proyecto, una vez obtenidos los conceptos con mejor resultado en la evaluación de la fase de selección, se elige el concepto ganador para realizar la primera iteración de un prototipo funcional, esto por aspectos tanto económicos como temporales. El objetivo de esta fase es validar el funcionamiento de la propuesta de solución, esto mediante el establecimiento de una serie de pruebas que evaluarán el nivel de cumplimiento del proyecto con respecto a lo requerido por el cliente.

Existen diversas estrategias de validación de una solución, como lo son las simulaciones, las pruebas de concepto, y los prototipos funcionales. La primera de ellas permite emular el funcionamiento de una propuesta de solución mediante

herramientas computacionales, las cuales permiten modelar los fenómenos eléctricos, mecánicos, aerodinámicos, entre otros, según la aplicación del caso de estudio. Debido a la naturaleza del modelado de los sistemas en *software* de simulación, donde difícilmente es posible incorporar al estudio todos los factores de influencia, o se realizan una serie de simplificaciones o asunciones, los resultados obtenidos con ellas son aproximados, inexactos y deben ser contrastados, cuando es posible, por su homólogo modelo experimental, con el fin de evaluar la desviación del modelado respecto al comportamiento real del fenómeno.

Para el presente proyecto, se utilizarán simulaciones de esfuerzos mecánicos basados en herramientas computacionales que incorporan análisis de elementos finitos, esto con el objetivo de evaluar los componentes críticos del diseño mecánico.

Las pruebas de concepto por su parte, consisten en la validación de una implementación física o virtual de los distintos fragmentos de concepto que componen a la propuesta de solución [17]. El nivel de realidad es tal que en la futura implementación completa, la validez de los resultados no se ve alterada. En el caso del presente proyecto, se realizarán distintas pruebas de concepto para validar el funcionamiento de los componentes del diseño, esto como antesala a la prueba de la primera iteración de prototipo funcional.

La tercera opción de validación es la de prototipo funcional, en la cual, se implementa la propuesta de solución de forma completa (dentro del alcance del proyecto), lo cual permite observar la interrelación de los distintos sistemas que lo componen y así evaluar su funcionamiento. Dentro de esta etapa es posible identificar oportunidades de mejora así como aspectos no considerados durante las fases anteriores, los cuales afectan el grado de cumplimiento de las especificaciones de la propuesta de solución. Para la solución propuesta en el presente proyecto, se plantea realizar, en adición a lo mencionado, una prueba del primer prototipo funcional, el cual se desea permita validar la funcionalidad para su operación en el LD. No

obstante, debido a que es, por motivos temporales y presupuestarios, la primera iteración de prototipo funcional, se espera tenga aspectos que mejorar, y también sea la base para establecer las especificaciones finales de lo obtenido concerniente al alcance del presente proyecto.

Para las validaciones mencionadas anteriormente debe establecerse una metodología que garantice la validez de los resultados e interpretaciones del funcionamiento del prototipo . Comúnmente, se recurre a un estudio de DOE, tomando en cuenta los factores de influencia del concepto ganador y cómo pueden variar estos e interactuar en el ambiente y condiciones de uso para las cuales está destinado. En este estudio debe verificarse el cumplimiento de las especificaciones establecidas, así como justificar la modificación de alguna de ellas, tal y como se explica en la siguiente fase.

Para esta sección, igualmente, es menester realizar un proceso de reflexión, con el fin de evaluar si se examinó de forma adecuada el cumplimiento de las especificaciones, si el conjunto de pruebas es representativo y atiende a la naturaleza del problema, entre otros aspectos.

### **3.1.6 Especificaciones finales**

Al construir y probar el prototipo del concepto ganador pueden aflorar factores o complicaciones no tomadas en cuenta o identificadas previamente, lo cual puede ocasionar el requerir una modificación de los valores objetivo de las especificaciones de la solución. Este refinamiento, generalmente, se ve afectado por las llamadas *concesiones*, que son aquellas relaciones inversas entre dos o más especificaciones, inherentes al concepto seleccionado [16, p. 124]. Las concesiones comúnmente se dan en términos de aspectos técnicos en desalineamiento con aspectos de costo.

En la contraparte, puede darse el caso de que el prototipo exceda las aspiraciones previas, y haya que ajustar los valores objetivo para contemplar esta mejora. Lo anterior atiende a lo advertido al inicio del presente capítulo, que es el carácter iterativo y

reflexivo de la metodología de diseño seleccionada.

## **3.2 Documentación del seguimiento de la metodología de diseño**

En los capítulos 5, 6, 7 y 8, se documentará de forma explícita cada una de las fases del proceso de diseño según lo descrito en el Capítulo 3. Esto permitirá al lector comprender todas las fases de desarrollo del proyecto, así como las decisiones de diseño tomadas.

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## DIAGNÓSTICO

En el presente capítulo se presentan los resultados del diagnóstico del proceso de calibración dimensional mediante bloques, así como la metodología de atención de órdenes de trabajo dentro del LD. Este diagnóstico tiene como objetivo comprender de forma integral todo el proceso que se sigue en el LD desde que ingresa una orden de trabajo de calibración, pasando por su ejecución, hasta llegar a la finalización de esta, esto con la finalidad de identificar los *cuernos de botella* del proceso, las oportunidades de mejora, y cómo el alcance del presente proyecto se interrelaciona con ello.

### 4.1 Planeamiento y atención de órdenes de trabajo

A continuación, se expone el procedimiento seguido en el LD para la recepción, planeamiento y ejecución de órdenes de trabajo de los clientes que acuden a sus servicios. La información aquí presentada es un compilado de las visitas al LD, reuniones semanales y el manual propio del laboratorio [8].

1. Primeramente, un cliente solicita el servicio de calibración al LD, el laboratorio

evalúa si está en la capacidad de calibrar la totalidad del conjunto de bloques solicitado por el cliente. El LD calibra bloques mediante el método de comparación mecánica, el intervalo métrico va desde 0.5 mm hasta 100 mm, y el inglés desde 0.05 in hasta 4 in. Otro aspecto que considera el encargado a la hora de aceptar o rechazar una orden de trabajo es el grado de los bloques a calibrar. Los bloques que se calibran en el LD son de grado K (00), 0 y 1, según la normativa ISO 3650:1998 [18], por ende, si el cliente solicita la calibración de bloques de grado menor, esta no se procesa, ya que la red de laboratorios secundarios a nivel nacional tiene la capacidad de realizar estas calibraciones.

2. Se verifica que la información suministrada por el cliente es suficiente, entre ella los puntos de medición requeridos (centro a centro o desviación de caras), rango de la calibración, máximo error permitido, entre otros.
3. Una vez realizado el pago del servicio por parte del cliente, se procede a ubicar en un *software* tipo calendario la orden de trabajo respectiva, siguiendo el orden de llegada de las solicitudes. Teniendo la fecha de inicio de calibración (2 días después de que arribó el conjunto al LD [8, p. 8], y se le brindó un comprobante de recibido), se le reporta al cliente el tiempo estimado en el cual se entregará su conjunto de bloques calibrado. Típicamente, el LD calibra alrededor de 17 bloques por semana, debido a que solo se dispone de un funcionario para atender todas las labores del LD, que entre otras actividades, destacan aseguramiento metrológico y de calidad de resultados, calibraciones de *verniers* y micrómetros, gestión del LD, reuniones, capacitaciones, consejos técnicos. Por ende, el tiempo de atención de la orden de trabajo depende del número de bloques a calibrar, dada esta capacidad instalada actual. A modo de contextualización, el conjunto típico de bloques contiene 87 unidades, requiriendo su atención entre un mes o mes y medio.

4. Se limpian los bloques uno por uno, con toallas de papel que no desprendan residuos y con alcohol con grado de pureza mayor al 70 %, esto para quitar residuos de vaselina, aceite o polvo, los cuales alteran los resultados de las mediciones.
5. Seguidamente, el encargado del LD revisa el equipo completo, esto con el fin de verificar que esté en buen estado para ser calibrado, se debe realizar una inspección visual del estado físico de los bloques para determinar la presencia de ralladuras, golpes, rebabas u oxidación en caso de que aplique, según el material de los bloques [8, p. 7].
6. Una vez chequeado lo anterior, se procede a introducir los datos necesarios del servicio de calibración al software adaptado del LD [19], basado en el software original TESA (dotado por el fabricante del comparador de bloques). Entre los datos requeridos para los bloques de referencia se encuentran la identificación, el número de bloques, la composición del juego, norma, unidades, material, coeficiente de expansión térmica  $\alpha$ , fabricante, número de inventario o serie. Para cada bloque se ingresa su identificación, el valor nominal y la desviación central del bloque calibrado.
7. Asimismo, el encargado debe anotar en una bitácora datos tales como la fecha de inicio del servicio, número de certificado, cliente, descripción del equipo a calibrar, entre otros.
8. Antes de dar inicio al proceso de calibración, debe verificarse que los instrumentos y patrones tengan certificados de calibración vigentes, que las conexiones del equipo TESA MODUL, al igual que el resto de los accesorios del equipo, sean adecuadas (encender el equipo una hora antes de calibrar); así como limpiar los palpadores, la plataforma del comparador y las plantillas.
9. Verificar que dentro del LD la humedad relativa es de  $(55 \pm 5)$  %, y que la temperatura es de  $(20 \pm 1)$  °C [20] [8, p. 6].

10. Se comienzan a calibrar los bloques con mayor valor nominal, progresando de forma descendente [8].
11. Se debe reportar cualquier anomalía causante de trabajo no conforme, para tomar las previsiones del caso y evaluar posibles causas.
12. Al finalizar, los encargados principal y secundario, deben firmar el certificado de calibración del equipo, esto para control cruzado y aseguramiento del contenido.

## 4.2 Proceso de calibración dimensional

A continuación se describen los pasos y consideraciones más relevantes del proceso de calibración dimensional, obtenidas a través de diversas entrevistas con el cliente durante las visitas al LD, sesiones semanales, así como los manuales de calibración del LD y de TESA [8] [21]. El equipo utilizado es un comparador de bloques marca TESA, disponible en el LD [22].

1. Verificar que la cabeza de medición esté en su posición más elevada, esto se controla con la palanca de ajuste de movimiento vertical grueso.



**Figura 4.1:** Fotografía explicativa del paso número 1 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

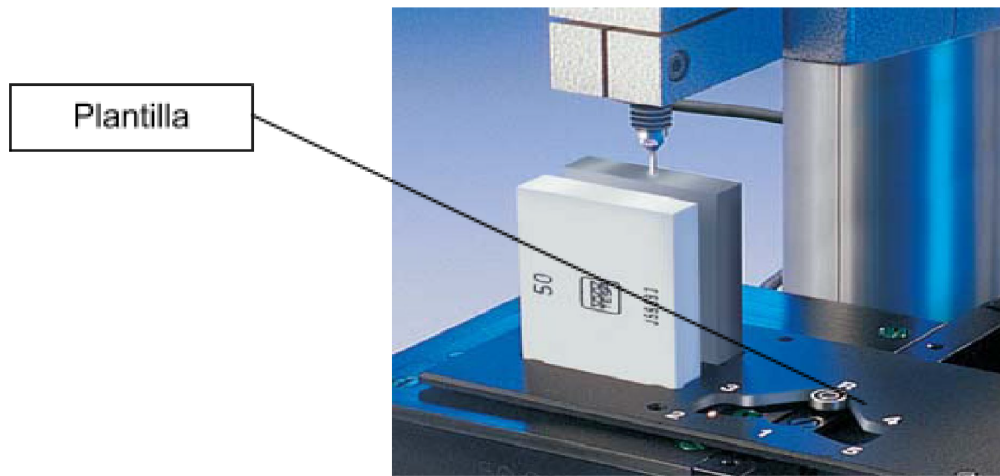
2. Accionar la bomba de vacío (utilizando el pedal para este fin), la cual retrae el palpador de medición, protegiéndolo así de cualquier contacto con los bloques, lo que ocasionaría una ralladura o la posible deformación de los palpadores.



**Figura 4.2:** Fotografía explicativa del paso número 2 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

3. Colocar una de las dos plantillas metálicas en la base del comparador de bloques (ver plantilla en Figuras 4.3 y 4.4). Estas plantillas tienen los orificios con la forma de los bloques, ya que ahí serán alojados estos, además, sirven de guía mecánica para el movimiento del comparador en las 6 posiciones de la secuencia

de calibración. La plantilla solo tiene una forma correcta de instalarse, en la cual los pines de la base del comparador entran en los orificios de la plantilla metálica, dando rigidez a su montaje. La escogencia de la plantilla depende del tamaño de los bloques a calibrar; siendo la de menor rango de movimiento la utilizada para bloques de 10 mm o menos, y la de mayor rango, en caso de bloques mayores de 10 mm.

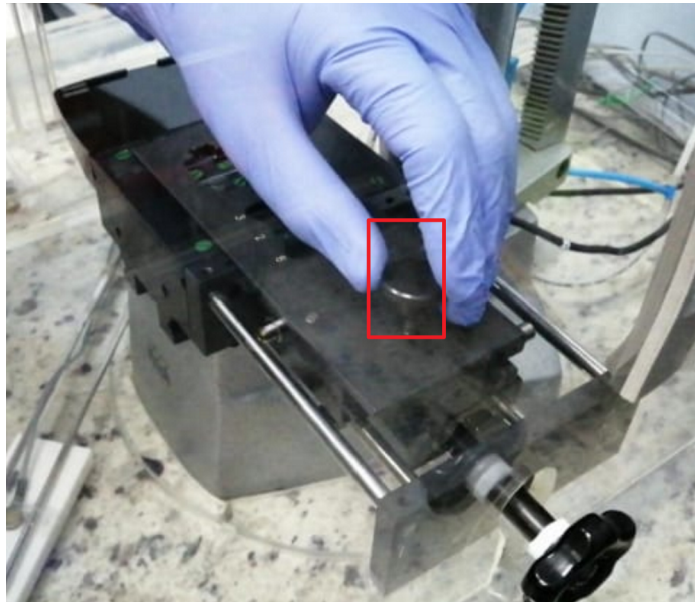


**Figura 4.3:** Identificación de la plantilla metálica en el equipo comparador de bloques [8, p. 12]



**Figura 4.4:** Fotografía explicativa del paso número 3 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

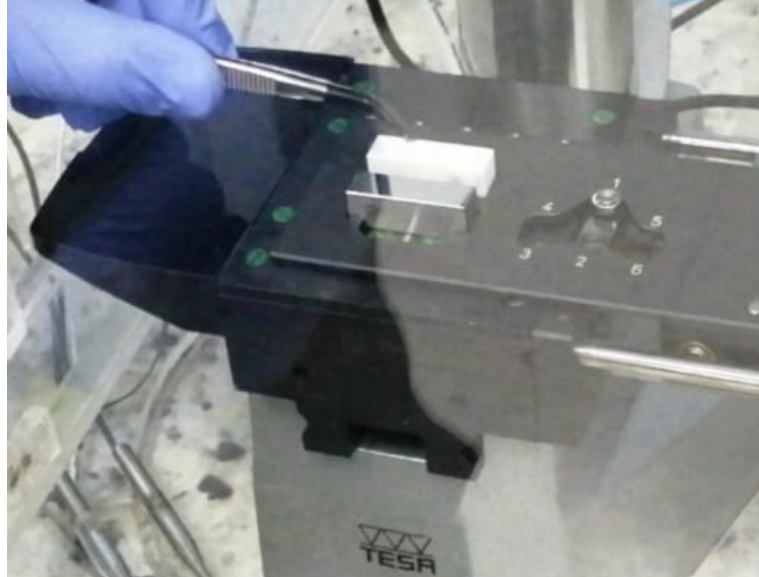
4. Colocar el seguro roscado que fija la plantilla metálica a la base del comparador.  
El par de apriete debe ser ejercido con los dedos de la mano del operario.



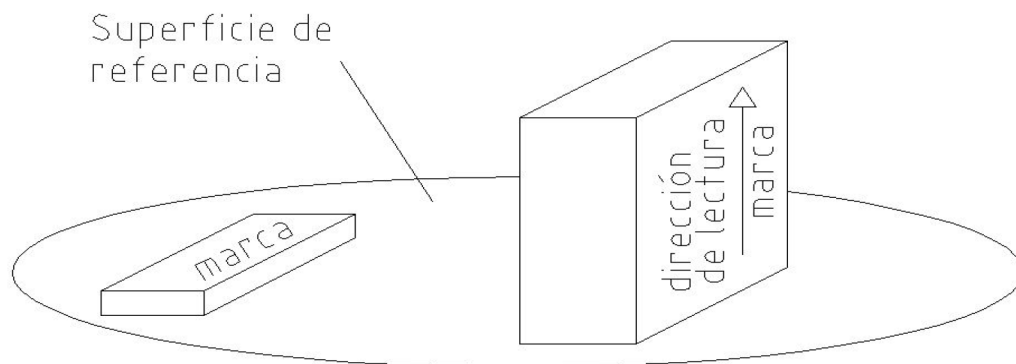
**Figura 4.5:** Fotografía explicativa del paso número 4 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

5. Verificar con la palanca de movimiento que tanto el movimiento en el eje Y (adelante-atrás según perspectiva del operario), como el del eje X (izquierda-derecha según perspectiva del operario), sean fluidos y suaves para alcanzar todas las posiciones de calibración.
6. Ahora, se procede a colocar los bloques en el comparador. El bloque patrón se coloca al fondo de la plantilla, mientras que el bloque calibrando se sitúa en el espacio del frente de la plantilla. Cabe destacar que deben colocarse las caras de medición paralelas al plano de la mesa de trabajo (caras que están pulidas), de tal forma que la orientación de lectura de la inscripción numérica del bloque esté rotada  $90^\circ$  de forma antihoraria respecto a la orientación de lectura típica, esto desde la perspectiva de un operario al frente del comparador de bloques. En el caso de bloques de 6 mm en adelante la cara de la inscripción numérica no es ninguna cara de medición, no obstante, para bloques menores a 6 mm, una de

las caras de medición sí tiene la inscripción numérica (donde especifica la medida nominal). Esta diferenciación se aprecia de forma más clara en la Figura 4.7. Se debe tomar en cuenta que los bloques con un valor nominal inferior a 25 mm se manipulan utilizando pinzas con puntas no metálicas, en caso contrario, se manipulan utilizando guantes.



**Figura 4.6:** Fotografía explicativa del paso número 6 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

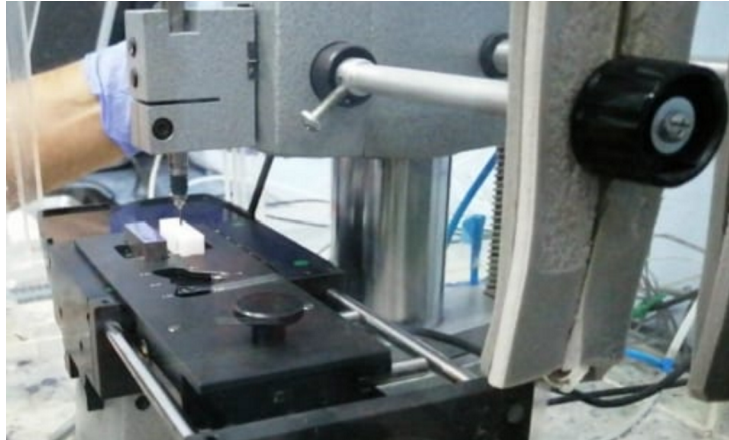


**Figura 4.7:** Ubicación de las caras de medición y las marcas en bloques según la longitud nominal [8, p. 3]

7. Corroborar que el movimiento es fluido y sin obstrucciones en todo el movimiento

de la plantilla.

8. Fijar la posición N° 1 en la plantilla, en la cual, el palpador está alineado con el centro de las caras de medición del bloque patrón. (Ver Figura 4.6)
9. Utilizar la palanca de ajuste de movimiento vertical grueso para bajar el cabezal de medición lo más cerca posible del bloque patrón sin tocarlo.



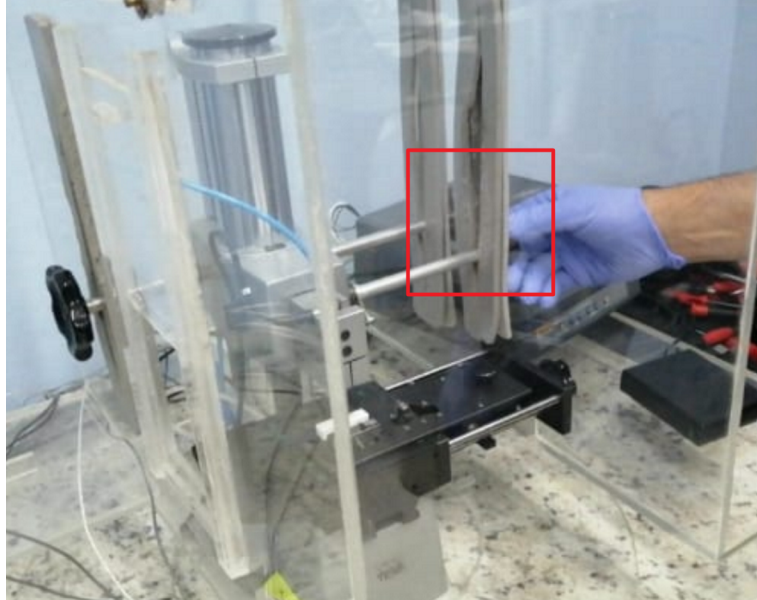
**Figura 4.8:** Fotografía explicativa del paso número 9 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

10. Se presiona nuevamente el pedal para desactivar la bomba de vacío y que de esta forma el palpador quede expuesto.
11. Observar el indicador luminoso del equipo TESA MODUL, el cual indica si el acercamiento realizado con el ajuste grueso fue excesivo o insuficiente. En el caso de que el indicador luminoso esté encendido en el sector izquierdo, significa que el palpador aún no ha hecho contacto o este es insuficiente (ver Figura adjunta). En cambio, si el palpador está en contacto con el bloque, y está ejerciendo fuerza excesiva (mayor a 5 N según entrevistas con el cliente), el sector derecho del indicador luminoso estará encendido.



**Figura 4.9:** Fotografía explicativa del paso número 11 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

12. Según lo observado anteriormente, el operario procede a mover la palanca del lado derecho del comparador (ver Figura 4.10), la cual controla el movimiento vertical fino, esto con el fin de hacer mayor o menor contacto con el bloque patrón, según lo explicado anteriormente. El operario debe girar esta palanca hasta que el indicador luminoso no muestre encendidos ninguno de los LEDs que componen los sectores izquierdo y derecho de este. En cambio, ahora la pantalla de 7 segmentos tipo Digital Tube LED debe mostrar cifras (ver Figura 4.11).



**Figura 4.10:** Fotografía explicativa del paso número 12 del proceso de calibración dimensional (1 de 2). Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.11:** Fotografía explicativa del paso número 12 del proceso de calibración dimensional (2 de 2). Fuente: Elaboración propia

13. En la Figura 4.12, se identifican cada uno de los diales del equipo, los cuales se utilizarán para los siguientes pasos. En la perilla derecha de la segunda fila del equipo TESA MODUL, seleccionar el símbolo “+”, esto habilitará que la perilla izquierda de la segunda fila haga un ajuste muy delicado al palpador superior (que está montado en el cabezal de medición).

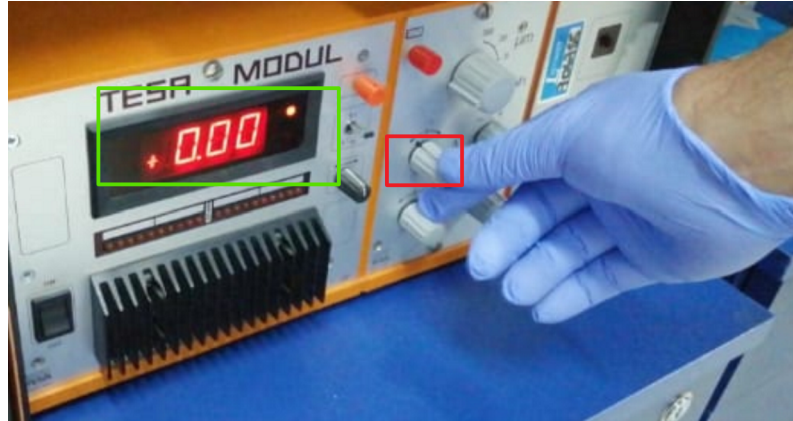


**Figura 4.12:** Identificación de las funciones de los diales del equipo TESA MODUL. Fuente: [8, p. 11]



**Figura 4.13:** Fotografía explicativa del paso número 13 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

14. Con el dial o perilla izquierda de la segunda fila del equipo TESA MODUL, se debe ajustar el palpador hasta que el display muestre “0.00”.



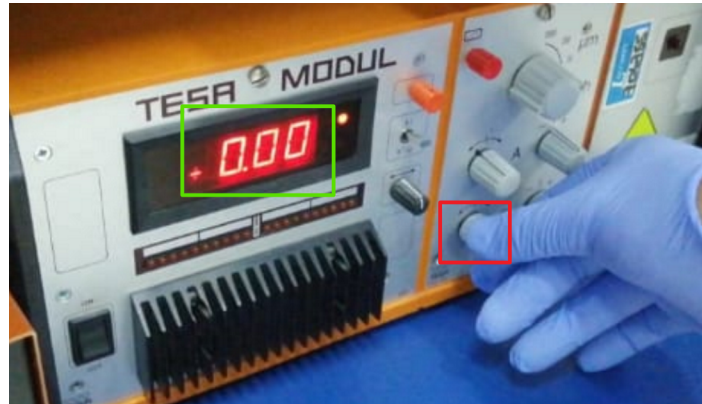
**Figura 4.14:** Fotografía explicativa del paso número 14 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

15. Nuevamente, utilizando la perilla de la derecha de la segunda fila del equipo TESA MODUL, se coloca en la posición central, etiquetada como “0”, que está entre los símbolos “+” y “-”. Esto habilitará al dial izquierdo de la tercera fila el mover el palpador inferior del comparador de bloques.



**Figura 4.15:** Fotografía explicativa del paso número 15 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

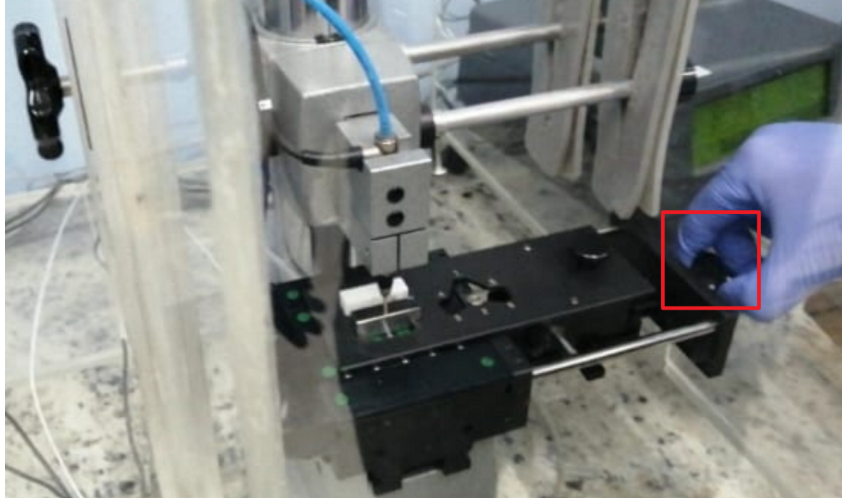
16. Igualmente, debe rotarse el dial izquierdo de la tercera fila del equipo TESA MODUL hasta que el display muestre “0.00”.



**Figura 4.16:** Fotografía explicativa del paso número 16 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

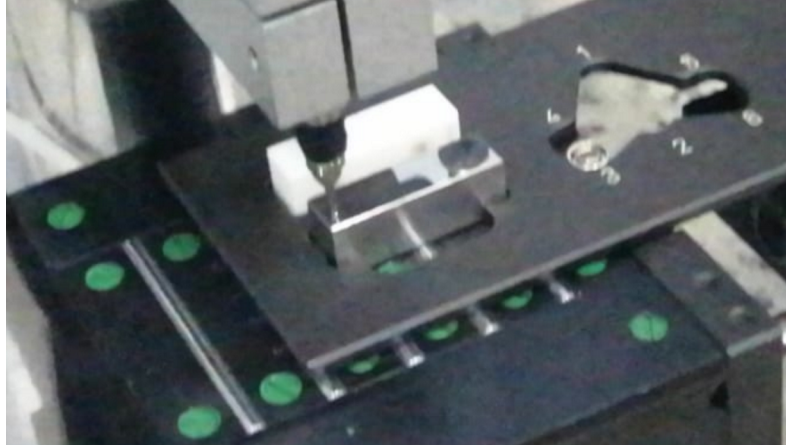
17. Repetir los pasos del 13 al 16. Verificar que ambos palpadores estén en “0.00”.
18. A partir de este punto comienza la toma de mediciones para la calibración de los bloques. En la posición en que se encuentra el palpador superior, se está midiendo el centro del bloque patrón, correspondiente a la posición N<sup>o</sup> 1 de la plantilla metálica.
19. Cabe destacar que en cualquier movimiento del cabezal de medición (que soporta al palpador superior), es necesario accionar la bomba de vacío, para que el palpador ingrese y se eviten daños a este por choques con el operario o con los bloques. Por ende, para proceder a la posición N<sup>o</sup> 2 de la plantilla metálica, según la secuencia de calibración, es necesario presionar el pedal que activa la bomba de vacío.
20. Una vez activa la bomba de vacío, se utiliza la palanca de movimiento de la plantilla metálica (la cual se señala en la figura adjunta), para la ejecución de la secuencia de calibración. En este caso, la siguiente posición es la posición N<sup>o</sup> 2, correspondiente al centro del bloque calibrando. En cuanto al movimiento de la palanca de movimiento de la plantilla metálica, esta tiene 2 movimientos, uno lineal hacia la izquierda o derecha del operario que se encuentra frente al

comparador, o un movimiento rotacional, que mueve la plantilla hacia el fondo o al frente. La rotación horaria de esta palanca provoca que la plantilla metálica se desplace hacia el fondo (en la dirección de las posiciones 1, 4 y 5), caso contrario de la rotación antihoraria (en dirección de las posiciones 2, 3 y 6).



**Figura 4.17:** Fotografía explicativa del paso número 20 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

21. Una vez se encuentra la plantilla en la posición correcta según la secuencia de calibración (en este caso la posición N<sup>o</sup> 2 ), se vuelve a presionar el pedal de la bomba de vacío, esto para desactivarla, lo que causará que el palpador haga contacto con el bloque calibrando en el área de interés. En el caso de la posición N<sup>o</sup> 2 el punto de contacto es el centro, pero para las posiciones 3, 4, 5 y 6, los puntos de contacto son esquinas (lo que permite determinar paralelismo y grado del bloque calibrando), tal y como se muestra en la figura adjunta.



**Figura 4.18:** Fotografía explicativa del paso número 21 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

22. Una vez desactivada la bomba de vacío, se esperan alrededor de 30 segundos mientras la medición que se muestra en el display LED 7 segmentos se estabilice. Tal y como se muestra en la figura adjunta, el display muestra una cifra en micrómetros, correspondiente a la diferencia entre el bloque patrón y calibrando, para la corrida actual. Si esta diferencia es positiva, como se muestra a continuación, su significado es que el bloque calibrando mide más que el patrón, y viceversa.



**Figura 4.19:** Fotografía explicativa del paso número 22 del proceso de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

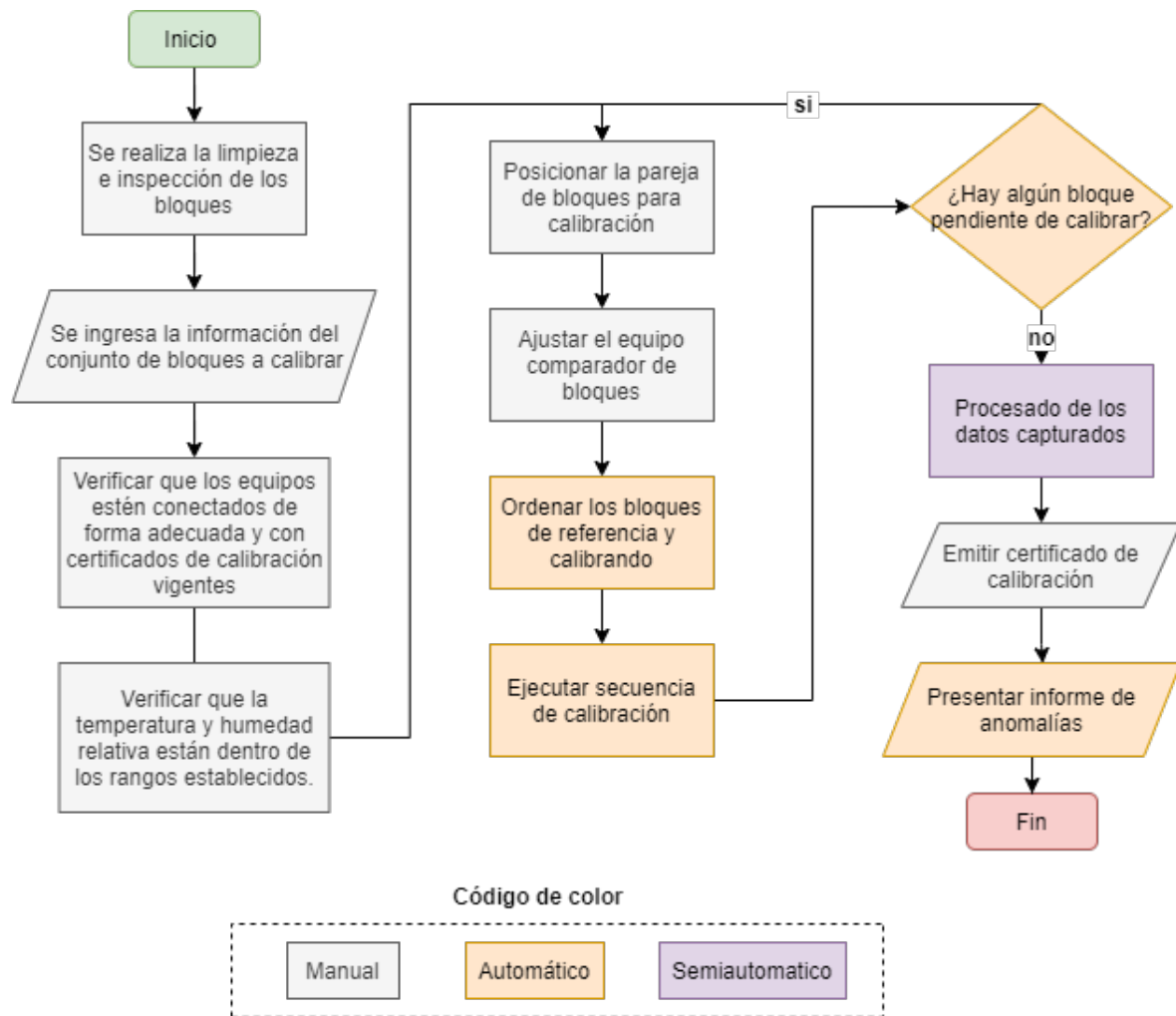
23. El almacenamiento de las mediciones está automatizado mediante un software desarrollado en por el equipo de trabajo del LD. Este software guarda cada

medición en el orden preestablecido según la secuencia de calibración seleccionada. Hay 2 opciones de secuencia de calibración, y 2 opciones de repetición de toma de datos. La primera opción de secuencia de calibración es de “centro a centro”, es decir, solo se pasan por las posiciones N<sup>o</sup> 1 y N<sup>o</sup> 2 de la plantilla metálica de movimiento. La segunda opción de secuencia de calibración es “desviación de las caras”, en la cual se recorren las 6 posiciones de la plantilla de movimiento, ya que incluye además de los centros, las 4 esquinas del bloque calibrando. Por otra parte, las 2 opciones de repetición de toma de datos corresponden a realizar la secuencia de calibración 3 o 5 veces o corridas. Por lo tanto, los pasos siguientes dependerán de las opciones descritas, pero igualmente se regirán por todos los lineamientos planteados anteriormente.

24. Una vez concluida la calibración, se genera un archivo tipo hoja de cálculo con las mediciones colectadas, y un certificado de calibración al cliente, emitido por el LD.

### 4.3 Oportunidades de mejora

Según los procesos descritos anteriormente, se elaboró un diagrama de flujo que sintetiza las fases esenciales de estos. En la Figura 4.20 se utilizó un código de color que indica, incorporando el alcance del presente proyecto, cuáles procesos serán manuales, automáticos o semiautomáticos.



**Figura 4.20:** Diagrama del proceso de atención de órdenes de trabajo de calibración dimensional. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4.20, los procesos de ingresar al sistema de control los bloques que serán calibrados, así como la preparación de los bloques y del equipo para iniciar la calibración, seguirán siendo ejecutados por el funcionario. Se desea que el encargado del LD deba ingresar los bloques de un cliente en una sola ocasión, en las subsiguientes se desea que el funcionario seleccione el conjunto previamente almacenado, el sistema de control de órdenes de trabajo de la propuesta de solución lo interpretará y ejecutará según lo establecido de conformidad con los procesos descritos anteriormente.

Para la etapa de ordenar los bloques de referencia y calibrando se plantea un cambio sustancial. Actualmente, después de limpiarse y examinarse los bloques, se colocan en

2 bandejas de acero inoxidable (ver Figura 4.21), esto para que la estabilización térmica entre el conjunto sea más efectiva. No obstante, para cada pareja de bloques que se desee calibrar, el operario debe buscar en cada bandeja, según su valor nominal, cuáles son los bloques correspondientes, lo cual puede ser tedioso especialmente en bloques cuya variación de tamaño es mínima, por ende, a simple vista no es fácil identificarlos.



**Figura 4.21:** Bandejas de almacenamiento de bloques del LD. Fuente: Elaboración propia

Una vez el funcionario encuentra cuál es la pareja de bloques, los pone en una sola bandeja durante 10 minutos aproximadamente, esto para que se dé un proceso de equiparación térmica. Luego, el funcionario debe trasladarlos hasta el comparador de bloques, usando guantes o pinzas. El comparador se encuentra en una mesa de trabajo ubicada a 1.5 m aproximadamente, lo cual trae dos desventajas: primeramente, la temperatura dentro y en los alrededores cercanos al comparador es distinta de donde se almacenan las bandejas (cambios sutiles son especialmente críticos tal y como se abordó en el Capítulo 2), con lo cual, el tiempo de estabilización requerido al colocar los bloques en el comparador es mayor; y segundo, existe un riesgo de caída al transportar los bloques entre ambas mesas de trabajo.

Por estos motivos, se observó la necesidad de parte del LD, de contar con un mecanismo para el almacenamiento y ordenamiento de los bloques, el cual favorezca la uniformidad térmica entre los bloques en las cercanías del comparador, así como la

búsqueda eficiente de las parejas de bloques a calibrar, problema que será abordado en la propuesta de solución. Aspectos relativos al orden de ejecución de la orden de trabajo serán tomados en cuenta, y serán descritos en los capítulos 5 y 7.

En el caso de la colocación de los bloques al equipo comparador, es una operación compleja, ya que el espacio de trabajo dentro del comparador es muy limitado, y la acción no trivial, ya que implica una sujeción de los bloques, un desplazamiento y giro de estos, y su posterior liberación en el espacio correspondiente en la plantilla. Por estos motivos, esta operación la seguirá realizando el funcionario de forma manual.

Tal y como se mencionó en el punto 3 del proceso de atención de órdenes de trabajo, el ritmo de calibración es limitado debido a que el funcionario requiere realizar diversas labores dentro del LD, lo cual, aunado a la alta demanda del servicio de calibración dimensional, genera tiempos de espera más elevados para los clientes. Adicionalmente, el encargado del LD reporta que las operaciones repetitivas de la secuencia de calibración generan fatiga en el desempeño de sus labores. En el presente proyecto, se atacarán estos aspectos, diseñando un mecanismo que permita automatizar la ejecución de la secuencia de calibración, descrita en los pasos 19 y 20 del proceso de calibración. De esta forma, el funcionario no debe ejecutar estos movimientos metódicos, liberando tiempo para la realización del resto de actividades del LD. Cabe destacar que el sistema de control que gestionará este mecanismo es realizado por el equipo de trabajo del LD y no es parte del alcance del presente proyecto.

Cabe destacar que dentro del diseño mecánico que se presentará, se incorpora también lo descrito en el paso 19 del proceso de calibración, el cual establece que el pedal de accionamiento de la bomba debe ser pulsado con el fin de proteger al palpador del comparador de bloques, acción crítica para la correcta ejecución de la secuencia de calibración.

Según el punto 11 del proceso de atención de órdenes de trabajo, el funcionario debe reportar cualquier anomalía que surja en el proceso de calibración. Dentro de

estas anomalías se tiene que el resultado de la calibración arroje el veredicto de que un bloque esté fuera de clase, es decir, el error máximo de la clase a la que pertenece fue superado. El sistema de control de órdenes de trabajo tomará en cuenta esta necesidad, ya que el aumento en la cantidad de bloques con resultado “fuera de clase”, puede ser un indicador de falta de calibración o mantenimiento del equipo de medición, un problema con el sistema automatizado de ejecución de la secuencia de movimiento, entre otros. Por este motivo, tal y como se observa en la Figura 4.21, el bloque de salida del informe de anomalías es incorporado al alcance del proyecto.

En síntesis, el proceso de calibración dimensional del LD será semiautomático, tomando en cuenta la descomposición y las justificaciones planteadas anteriormente.

---

---

# CAPÍTULO 5

---

## DISEÑO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En el presente capítulo, se expondrá la implementación de la metodología de diseño, descrita en el Capítulo 3, en el proceso creativo, investigativo, ingenieril y de desarrollo del proyecto, el cual, por su naturaleza, es un proyecto mecatrónico que abarca diversas áreas del conocimiento, las cuales serán especificadas y justificadas a lo largo del capítulo. El proyecto cuenta con dos áreas claramente definidas que son, el Diseño Mecánico y el Sistema de Control de Órdenes de Trabajo, la interrelación entre ellas es elevada y se considera es de alto valor agregado mostrar el proceso de diseño de todos los elementos que componen el proyecto bajo un mismo hilo conductor, en términos de aplicación de la metodología, lo cual, dará una visión completa y clara de las decisiones tomadas para obtener la propuesta de solución. El capítulo abarcará las fases de diseño hasta la obtención del concepto ganador, cuyo desarrollo será explicado en los capítulos 6 y 7, y cuya validación será presentada en el capítulo 8.

## 5.1 Identificar necesidades del cliente

Para esta fase, se tomó como insumo una serie de reuniones con el cliente, buscando escuchar de forma atenta sus planteamientos e ideas, para después, sintetizar sus deseos evitando malinterpretaciones o sesgos de ambas partes, por lo cual, el listado de necesidades fue mostrado y aprobado por el cliente, esto como método de verificación de que la información colectada y documentada sea congruente con lo requerido por este. A continuación, se enuncian y se justifican las necesidades identificadas para el presente proyecto:

- **La calibración semiautomática será igual o más rápida que su equivalente manual:** en el presente proyecto se desea mejorar el aprovechamiento de los recursos disponibles en el LCM, tanto de los activos como de recurso humano, por este motivo, se desea que la incorporación de un sistema semi automatizado de órdenes de trabajo, así como el diseño de un prototipo mecánico de ejecución de la secuencia de calibración, agilicen el proceso de calibración y lo hagan cuan independiente sea posible según los recursos económicos y temporales disponibles.
- **El sistema mecánico de automatización de secuencia de movimientos se desplaza por todas las posiciones de la secuencia de calibración para ambas plantillas de movimiento:** según el tamaño de los bloques a calibrar se debe utilizar una de dos plantillas metálicas disponibles para realizar la secuencia de calibración (estos bloques serán descritos en secciones posteriores). El sistema mecánico debe ser capaz de desplazarse en todo el espacio del plano requerido por ambas plantillas, con una precisión adecuada en sus movimientos.
- **El sistema mecánico de automatización de secuencia de movimientos se puede instalar y desmontar de forma sencilla, rápida e intuitiva:** esto debido a que, si en el laboratorio se desean realizar pruebas o calibraciones

de bloques de forma manual, el proceso de desmontaje y posterior montaje del sistema sea ágil, sencillo y rápido.

- **El sistema mecánico de automatización de secuencia de movimientos conmuta el estado de la bomba de vacío del comparador de bloques:** esto porque la bomba de vacío es imprescindible para el desplazamiento seguro del cabezal de medición entre las posiciones de la secuencia de calibración. La bomba de vacío es la encargada de ocultar el palpador, cuando está activa, y con esto, se suprime el riesgo de golpe o daño del palpador durante el movimiento de la secuencia de calibración. El estado de la bomba se controla a través de un pedal. Cabe destacar que se desea seguir utilizando este pedal como método de conmutación de la bomba de vacío, con la finalidad de que el modo manual de operación de la ejecución de la secuencia de calibración siga estando disponible para el usuario.
- **El sistema de órdenes de trabajo se comunica con el sistema de medición automatizado:** el sistema de órdenes de trabajo debe comunicarse con el sistema de medición con el fin de conocer el momento en que un bloque terminó su calibración, esto para que el sistema de órdenes de trabajo acerque la siguiente pareja de bloques que continúan en la cola de calibración.
- **El sistema de órdenes de trabajo requiere la menor intervención posible por parte del operario a lo largo del proceso de calibración:** dado que uno de los fines principales del desarrollo del proyecto es liberar tiempo del funcionario del LCM que realiza el largo y repetitivo proceso de calibración dimensional, se desea que este interactúe con el sistema automatizado la menor cantidad de ocasiones posible, dentro del alcance del presente proyecto.
- **El sistema de órdenes de trabajo reconoce el conjunto de bloques a calibrar al ser ingresado por el usuario:** es decir, el sistema de órdenes de

trabajo es capaz de extraer del software de medición o de alguna otra fuente el conjunto de bloques para la calibración actual, mediante una inserción manual por bloques, número de serie, número de cliente o número de certificado.

- **El sistema de órdenes de trabajo permite la pausa y reanudación del proceso de calibración del conjunto de bloques del cliente:** es decir, el usuario puede enviar una señal al sistema de control de órdenes de trabajo, y que este guarde el último bloque calibrado, esto para pausar la orden de trabajo, y posteriormente, poder retomar la calibración en este punto (por ejemplo, al día siguiente).
- **El sistema de órdenes de trabajo indica al usuario el momento en el que es necesario realizar el cambio de la plantilla de movimiento:** dado que hay 2 plantillas metálicas que dirigen el movimiento de la secuencia de calibración según el tamaño de los bloques, el hecho que el sistema notifique al usuario cuando es necesario el cambio de estas, implica una disminución en el número de intentos fallidos de posicionamiento de bloques, especialmente en el caso de usuarios poco experimentados. Además del tiempo perdido que implican los intentos fallidos de acomodo de bloques en el comparador, estos también tienen un riesgo inherente en cuanto a posibilidad de caída o golpe. Por otra parte, disminuye el grado de distracción de los funcionarios del LCM en cuanto a la intervención que deben dedicar al proceso de calibración dimensional, haciendo de esta forma el proceso más práctico y fluido.
- **El sistema de órdenes de trabajo permite modificar el tiempo de estabilización entre calibración de bloques:** dados los nuevos diseños mecánico y de control que se incorporarán en el presente proyecto, el fenómeno de estabilización térmica alrededor y dentro de comparador de bloques sufrirá una variación respecto al montaje original del sistema. Para garantizar al LCM

la flexibilidad requerida para el aseguramiento de la validez de las mediciones realizadas, se debe dotar al sistema de la posibilidad de modificar el tiempo de estabilización térmica de cada bloque de la orden de trabajo.

- **El sistema de órdenes de trabajo indica el avance del proceso de calibración del conjunto de bloques, el tiempo actual de la corrida e indicadores de desempeño:** esto con la finalidad de que el usuario tenga conocimiento del progreso de la orden de trabajo, así como una visión global del desempeño del sistema en pro de la gestión de la cola de órdenes de trabajo de los clientes y el monitoreo de la actividad del LD.
- **El mecanismo de organización de bloques aloja al conjunto de bloques calibrando y patrón para un determinado cliente:** un mecanismo capaz de almacenar de forma ordenada e intuitiva los 2 conjuntos de bloques favorecerá la rapidez con la que los bloques son calibrados; adicionalmente, el hecho de que este mecanismo se encuentre cercano al comparador minimizará los riesgos de daño físico para los bloques. El funcionario no tendrá que buscar en las bandejas de bloques los números de serie requeridos de entre todo el conjunto de bloques, sino que podrá disponer de las parejas de bloques (referencia y calibrando), en una ubicación lo más cercana posible al comparador de bloques, estando estas parejas juntas y ordenadas de forma práctica y útil para la ejecución de las órdenes de trabajo por parte del funcionario.
- **El mecanismo de organización de bloques presenta condiciones que favorecen la homogeneidad térmica del conjunto de bloques y protegen su integridad:** según lo establecido por el cliente, así como lo expuesto en el Marco Teórico, al realizar el proceso de calibración de un conjunto de bloques, se desea la mayor homogeneidad en las condiciones del proceso, con lo cual, el mecanismo organizador de bloques debe permitir la

equiparación térmica entre el conjunto de bloques respecto a las condiciones del LD. De igual forma, el mecanismo de ordenamiento de bloques no debe generar ralladuras, golpes o corrosión en los bloques.

- **El mecanismo de organización de bloques mueve estos cerca del comparador según la orden de trabajo:** con el fin de agilizar la calibración del conjunto de bloques y minimizar el riesgo de daños de estos.

### 5.1.1 Categorización y jerarquización de necesidades

Para simplificar la comprensión integral del conjunto de necesidades establecidas por el cliente, estas se agrupan identificando la necesidad primaria de la que provienen. Adicionalmente, se añade la calificación de importancia que estableció el cliente para cada necesidad, según el formulario de jerarquización que le fue suministrado. Todo lo anterior se muestra en la Tabla 5.1.

### 5.1.2 Reflexión de la fase

Al observar la tabla 5.1, es cognoscible que las necesidades identificadas son críticas para el cliente, esto ya que la importancia brindada por él es elevada, lo cual da indicios de una adecuada interpretación y síntesis de lo expresado en las sesiones de entrevista. Además, el listado de necesidades fue presentado al cliente en etapas iniciales del proyecto, esto para contar con su aprobación así como realimentación respectiva. Por otra parte, se considera que el sujeto de información es el adecuado y suficiente, ya que el cliente es el encargado del LD y el único responsable de las calibraciones dimensionales, siendo un experto en esta área.

Otro aspecto a destacar del listado de necesidades presentado es que no se identifican sesgos no filtrados de parte de lo enunciado por el cliente, ni por aportación propia, que influyan en la generación o selección de conceptos en las siguientes etapas de diseño.

**Tabla 5.1:** Necesidades establecidas para el proyecto.

No.	Necesidades Interpretadas	Importancia
1.	<b>El sistema mecánico para la automatización de la secuencia de calibración posibilita la ejecución del proceso de medición de los bloques</b>	
1.1	El sistema mecánico de automatización de secuencia de movimientos se desplaza por todas las posiciones de la secuencia de calibración para ambas plantillas de movimiento	5
1.2	El sistema mecánico de automatización de secuencia de movimientos conmuta el estado de la bomba de vacío del comparador de bloques	5
2.	<b>La solución disminuye el tiempo de calibración de un conjunto de bloques y la intervención humana requerida</b>	
2.1	La calibración semiautomática será igual o más rápida que su equivalente manual	5
2.2	El sistema de órdenes de trabajo requiere la menor intervención posible por parte del operario a lo largo del proceso de calibración	4
2.3	El mecanismo de organización se mueve por todo el conjunto de bloques para acercarlos al comparador según la orden de trabajo	3
3.	<b>El mecanismo de almacenamiento aloja de forma ordenada, segura y efectiva el conjunto de bloques</b>	
3.1	El mecanismo de organización de bloques aloja al conjunto de bloques calibrando y patrón para un determinado cliente	4
3.2	El mecanismo de organización de bloques presenta condiciones que favorecen la homogeneidad térmica del conjunto de bloques y protegen su integridad	3
4.	<b>El sistema de órdenes de trabajo interactúa con el sistema de control de secuencia de movimientos y con el usuario con fines de configuración y despliegue de información</b>	
4.1	El sistema de órdenes de trabajo se comunica con el sistema de medición automatizado	5
4.2	El sistema de órdenes de trabajo reconoce el conjunto de bloques a calibrar al ser ingresado por el usuario	4
4.3	El sistema de órdenes de trabajo permite la pausa y reanudación del proceso de calibración del conjunto de bloques del cliente	5
4.4	El sistema de órdenes de trabajo indica al usuario el momento en el que es necesario realizar el cambio de la plantilla de movimiento	4
4.5	El sistema de órdenes de trabajo indica el avance de la calibración del conjunto de bloques, el tiempo actual de la corrida e indicadores de desempeño	3
4.6	El sistema de órdenes de trabajo permite modificar el tiempo de estabilización entre calibración de bloques	5
5.	<b>La solución permite al usuario volver al modo manual de calibración de forma práctica</b>	
5.1	El sistema mecánico de automatización de secuencia de movimientos se puede instalar y desmontar de forma sencilla, rápida e intuitiva	4

## 5.2 Establecer especificaciones objetivo

### 5.2.1 Definición de métricas

Una vez listado el conjunto de necesidades, se deben establecer especificaciones que permitan medir el grado de cumplimiento de la propuesta de solución. Como se mencionó en el Capítulo 3, las especificaciones se componen de métricas y valores objetivos, las primeras son las que definen qué se medirá y los segundos qué rango de valores son admisibles. A continuación, en la Tabla 5.2, se proponen las métricas seleccionadas para cada necesidad, para tal efecto, se toma como referencia el número correspondiente a cada necesidad, mostrado en la tabla 5.1.

**Tabla 5.2:** Métricas establecidas para el proyecto.

No.	No. Necesidad	Métrica	Unidad	Imp.
1	1.1	Rango de movimiento en el eje X	mm	5
2	1.1	Rango de movimiento en el eje Y	mm	5
3	1.1	Precisión del movimiento en el eje X	mm	5
4	1.1	Precisión del movimiento en el eje Y	mm	5
5	1.2	Rango de movimiento del pulsador del pedal	mm	5
6	1.2	Fuerza del pulsador del pedal	N	5
7	2.1	Tiempo de calibración por bloque	min	5
8	2.1	Número de bloques calibrados por semana	Cantidad	5
9	2.2	Número de intervenciones diarias	Cantidad	4
10	2.2	Tiempo destinado para intervenciones diarias	min	4
11	2.3	Recorrido del mecanismo por la totalidad del conjunto de bloques	Binaria	3
12	3.1	Cantidad de parejas de bloques almacenadas	Cantidad	4
13	3.2	Diferencia de temperatura promedio entre bloques y entorno	°C	3
14	3.2	Número de bloques con algún daño por conjunto	Binaria	3
15	4.1	Porcentaje de señales recibidas por el sistema de órdenes de trabajo	%	5
16	4.2	Porcentaje de acierto de bloques identificados de la orden de trabajo	%	4
17	4.3	Cantidad de métodos de pausa/reanudación disponibles	Cantidad	5
18	4.4	Cantidad de indicadores de cambio de plantilla	Cantidad	4
19	4.5	Resolución del indicador de avance	%	3
20	4.5	Indicadores de desempeño	Lista	3
21	4.6	Rango de tiempo de estabilización configurable	min	5
22	5.1	Cantidad de herramientas estándar requeridas	Cantidad	4
23	5.1	Tiempo de montaje/desmontaje del sistema mecánico	min	4
24	5.1	Razón de tiempo de montaje/desmontaje inicial y entrenado	Adimensional	4

### 5.3 Determinación de valores objetivo

Al analizar las métricas identificadas y coleccionar la información pertinente de las entrevistas con el cliente, se obtienen los valores marginales e ideales, los cuales serán justificados a continuación (cualquier otra fuente de información adicional en esta determinación será indicada de forma explícita).

1. En el caso del eje X, que se extiende de izquierda a derecha según la perspectiva del usuario, el rango de movimiento debe ser de al menos 34 mm, según las mediciones realizadas a las plantillas metálicas (cuyo dimensionamiento completo se presenta posteriormente). En el caso del valor ideal, es conveniente brindar un mayor rango de movimiento en caso de requerir algún ajuste el sistema, con lo cual, se agrega una recorrido adicional de seguridad del 10 %.
2. Para el movimiento en el eje Y, que se extiende desde el frente hacia el fondo según la perspectiva del funcionario, el rango mínimo requerido es de 25 mm,

según las mediciones realizadas.

3. Se plantea como especificación inicial un valor meta de 0.25 mm de precisión del movimiento en el eje X, y el doble de este como valor marginal, esto para que el sistema sea capaz de moverse entre las 6 distintas posiciones de forma precisa.
4. Los valores meta y marginales mantienen consistencia con respecto al eje X.
5. Al realizar mediciones experimentales se determinó que el rango de movimiento del dispositivo que accione el pedal debe ser de 6 mm, si se desea accionarlo en el extremo de este, donde la fuerza a ejercer por el dispositivo de accionamiento del pedal es la menor, y por ende, el consumo energético también. No obstante, el transductor puede ubicarse en una posición que requiera menos de 6 mm de carrera, donde el brazo de palanca es menor, con lo cual, se requiere más fuerza del pulsador.
6. Al realizar pruebas experimentales con masas calibradas del DMF, se determinó que la fuerza mínima con la cual el pedal es accionado es de 1.77 N (correspondiente a 180 g).
7. Según se informó, la calibración de un bloque puede tardar hasta una hora, por ende, este límite se considerará como valor marginal de tiempo de calibración. Dado que hay tiempos de estabilización dentro de la calibración que deben respetarse, la velocidad de actuación del sistema mecánico de ejecución de la secuencia no se desea sea elevada (debido a lo delicado del equipo y bloques utilizados), la disminución de tiempo por bloque se plantea alrededor de un 20 %.
8. En cuanto al número de bloques calibrados por semana, se espera sea una métrica reveladora en cuanto al valor agregado del sistema automatizado, ya que gran parte de la carga laboral del personal del LCM dedicado a calibraciones debe verse

reducida. Según declaró el encargado del LD, se tiene la expectativa de agilizar el proceso de ejecución de las órdenes de trabajo en al menos un 25 %, e idealmente más de un 33 %, es decir, un tercio del actual ritmo de trabajo. Actualmente, el LD tiene la capacidad de calibrar alrededor de 17 bloques semanalmente.

9. En el caso del número de intervenciones del operario por calibración, se desea que el operario, idealmente, solo intervenga al inicio del proceso de calibración, una vez que realice el montaje de los bloques dentro del mecanismo de acomodo, procederá a dar la señal de inicio al sistema automatizado. El resto de las intervenciones serán para quitar y poner los bloques en los respectivos espacios del comparador (no asociados al sistema de órdenes de trabajo), para dar pausa o reanudar el proceso de calibración. Por ende, el valor marginal será menor de 6 intervenciones, es decir, tomando una señal de inicio, dos de pausa y dos de reanudación (al dividir la jornada laboral diaria en 2 bloques), en un caso de operación discontinua diaria.
10. Por otra parte, para el tiempo de intervención, se establece como valor meta un minuto (en el caso de un sistema altamente práctico, sencillo e intuitivo), y un valor marginal de diez minutos, en caso de requerir alguna configuración o especificación adicional.
11. Al reconocer el conjunto de bloques, el sistema de control de órdenes de trabajo acercará el bloque correspondiente a la posición menos distante del comparador de bloques. Se desea que el mecanismo realice este proceso para la totalidad del conjunto de bloques, con lo cual, el cumplimiento debe ser total, y una solución que no cumpla con lo anterior se considera indeseable.
12. Según las entrevistas con el cliente, la máxima cantidad de bloques que los clientes del LD solicitan calibrar es de 112, por ende, este se establece como el valor marginal. No obstante, existen conjuntos de bloques de hasta 130 unidades, por tanto, el sistema debe ser flexible y adaptable a un cambio de esta naturaleza.

13. En cuanto a la diferencia de temperatura entre los bloques y el entorno, se plantea que esta sea de máximo 1 °C, esto según la normativa ISO 1:1975 [20]. Internamente en el LD, a este parámetro se le denota como  $\delta\theta$ , según su procedimiento de calibración [8, p. 11]
14. Con respecto al número de bloques con algún tipo de daño a su integridad, el LD es tajante, y se establece que ningún bloque puede sufrir daños, por ende, esta métrica es binaria.
15. Dado que la comunicación entre dos sistemas de naturaleza computacional es vulnerable ante distorsiones, ruido, interferencias, entre otros fenómenos tanto eléctricos como electromagnéticos, se solicita de parte del LD, que el porcentaje de señales recibidas de forma adecuada por el sistema de órdenes de trabajo, provenientes del sistema de medición, sea de al menos el 95%. Es decir, a lo sumo, el usuario deberá intervenir en el 5% de la cantidad de posicionamientos del mecanismo de ordenamiento de bloques a lo largo de la ejecución de una orden de trabajo. No obstante, se desea que este porcentaje sea del 100 % en el caso ideal, ya que el grado de intervención del usuario disminuye.
16. Ya que se desea disminuir al máximo el tiempo dedicado por el usuario para la ejecución de la orden de trabajo, se plantea que el mínimo porcentaje de acierto corresponde a 95 %, con lo cual, el usuario solo requiere, en el peor de los casos, adicionar, eliminar o modificar un 5 % del listado de bloques de la orden de trabajo. Es cognoscible, además, que el valor meta de esta métrica corresponde a un 100 %.
17. Como valor marginal se establece un método de paro/reanudación disponible. En cuanto al valor meta, se establecen 4 o más métodos, que corresponden a 2 opciones de distinta naturaleza (por ejemplo, de accionamiento físico o digital), con funcionalidad de paro y reanudación separada.

18. En el caso marginal, solo se solicita un indicador, no obstante, para el valor meta corresponde a 2 o más de estos, para que de esta forma el operario se percate con mayor facilidad de la necesidad de cambio de plantilla.
19. En cuanto a la resolución del indicador de avance de la orden de trabajo se establece como valores objetivo la distinción por bloque, como valor marginal la resolución para 112 bloques, y como valor ideal la distinción para 130 bloques, manteniendo consistencia con lo descrito anteriormente.
20. El conjunto de indicadores de desempeño requeridos por el cliente son: tiempo de calibración por bloque, cantidad de bloques calibrados por mes y número de bloques por conjunto con resultado de calibración indicativo de bloque fuera de clase. Esto último hace referencia a la condición que se da cuando el error máximo permitido para un bloque calibrando se supera, según el grado al que pertenece. Un aumento en este indicador podría dar indicios de necesidad de calibración del equipo o ser un punto a destacar para un cliente, por ello, es de gran utilidad [8, p. 21].
21. Según la experiencia del personal del LD, el tiempo de estabilización térmica se encuentra entre 3 y 5 minutos, sin embargo, se puede incorporar un mayor margen, siendo este, de hasta 15 minutos, en caso de que la interacción humana con los bloques o el comparador haya sido elevada, o bien así, se esté presentando alguna irregularidad en el sistema de control de condiciones de temperatura y humedad dentro del laboratorio.
22. Para la cantidad de herramientas estándar requeridas se tomará como valor marginal menor de 5 (tomando en cuenta al menos 2 tipos de desatornilladores, alguna herramienta de sujeción y algún tipo de llave), mientras que el valor meta es menor a 3.

23. En cuanto al tiempo de montaje/desmontaje, se considera deseable (valor marginal), que este no supere el 50 % del tiempo que tarda la calibración manual de un bloque, esto tomando en consideración tiempo de montaje mecánico, así como puesta en marcha del sistema de control. El valor meta del tiempo de montaje/desmontaje se define como la mitad (o menos), que el valor marginal.
24. Para la razón de tiempo inicial y de uso entrenado, se espera que el tiempo que tarde un mismo operario la primera vez que realiza el montaje o desinstalación del sistema sea 25 % mayor respecto de estas mismas acciones al estar familiarizado con el equipo. Una razón mayor a 5 indicaría que el proceso no es lo suficientemente intuitivo para los usuarios.

Para sintetizar y facilitar la rápida referencia al conjunto de especificaciones se genera la Tabla 5.3 que se muestra a continuación.

**Tabla 5.3:** Especificaciones definidas para el desarrollo del proyecto.

No.	Métrica	Unidad	Imp.	Valor marginal	Valor ideal
1	Rango de movimiento en el eje X	mm	5	>34	>37
2	Rango de movimiento en el eje Y	mm	5	>25	>28
3	Precisión en el movimiento del eje X	mm	5	<0.5	<0.25
4	Precisión en el movimiento del eje Y	mm	5	<0.5	<0.25
5	Rango de movimiento del pulsador del pedal	mm	5	>4	>6
6	Fuerza pulsador del pedal	N	5	>1	>2
7	Tiempo de calibración por bloque	min	5	<60	<48
8	Número de bloques calibrados por semana	Bloques	5	>21	>23
9	Número de intervenciones diarias	Intervenciones	4	<7	<3
10	Tiempo de intervenciones diarias	min	4	<10	<1
11	Recorrido del mecanismo por la totalidad del conjunto de bloques	Binaria	3	Pasa	Pasa
12	Cantidad de parejas de bloques almacenadas	Parejas	4	>112	>130
13	Diferencia de temperatura entre bloques y entorno	°C	3	<1	<0.5
14	Número de bloques con daño por conjunto	Binaria	3	Pasa	Pasa
15	Porcentaje de señales recibidas	% Señales	5	>95	100
16	Porcentaje de acierto de bloques identificados	% Acierto	4	>95	100
17	Cantidad de métodos de pausa/reanudación	% Acierto	5	>1	>4
18	Cantidad de indicadores de cambio de plantilla	Indicadores	4	>1	>2
19	Resolución del indicador de avance	%	3	<0.91	<0.77
20	Indicadores de desempeño	Lista	3	Tiempo calibración por bloque	Tiempo calibración por bloque Bloques calibrados por mes Bloques fuera de clase
21	Rango de tiempo de estabilización	min	5	>5	>15
22	Cantidad de herramientas requeridas	Herramientas	4	<5	<3
23	Tiempo de montaje/desmontaje	min	4	<30	<15
24	Razón de tiempo inicial/entrenado	Adimensional	4	<5	<1.25

### 5.3.1 Reflexión de la fase

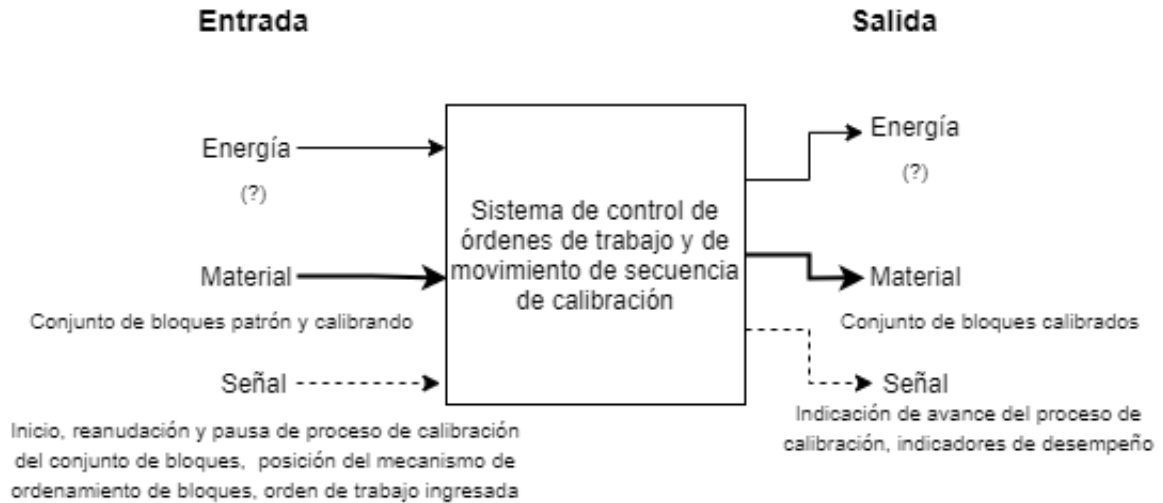
Al analizar el conjunto de especificaciones establecidas, no se encuentra la presencia de componentes subjetivas que pongan en compromiso la validez de las métricas o los valores objetivo, es decir, la forma en la que se evaluarán los conceptos de solución propuestos. Adicionalmente, se utilizaron métricas binarias solamente en aquellos casos donde el cumplimiento de una necesidad no tiene grados intermedios aceptables para considerarse una solución válida, como son los casos de las especificaciones 11 y 14.

Además, se demostró la aplicación de la normativa y los procedimientos concernientes a esta etapa de diseño, como lo son ISO 1:1975 [20], INTE/ISO/IEC 17025:2017 en términos de imparcialidad de toda actividad de un laboratorio como el LD [7, p. 4-8] y el procedimiento de calibración de bloques patrón del LD [8].

En el estudio de esta fase, cada una de las necesidades cuenta con al menos una métrica objetiva y cuantificable que permitirá evaluar el grado de cumplimiento de esta. En añadidura, el cliente fue consultado durante toda esta fase de diseño, esto para dar respaldo a los requerimientos de la propuesta de diseño que será presentada.

## 5.4 Generar conceptos de solución

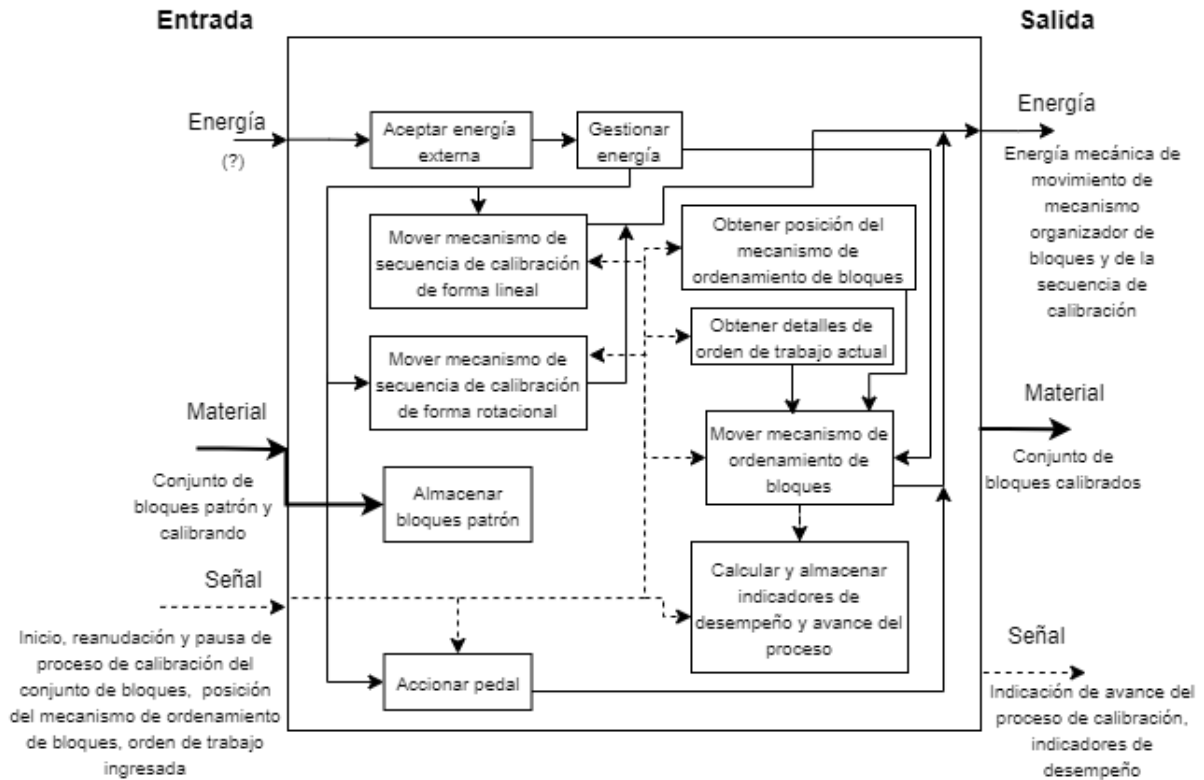
En la presente etapa, tal y como se explicó en el capítulo 3, se comienza con la representación de “caja negra”, la cual es útil para mostrar en términos de energía, material y señales, qué elementos interactúan en el proyecto. Lo anterior se muestra en la Figura 5.1



**Figura 5.1:** Representación de caja negra del proyecto. Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la representación de “caja negra”, se tiene que la entrada de energía se refiere a aquella necesaria para que el sistema pueda operar. En lo que respecta al material, es aquel que sufre algún tipo de proceso o interacción con el sistema, en este caso, un proceso de medición y una interacción de alojamiento. Las señales de entrada son aquellas que van a permitir el funcionamiento del sistema. En lo que respecta a las salidas, el sistema es el encargado de mover tanto el mecanismo de alojamiento de bloques, así como el mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración, con lo cual, el tipo de energía de salida es del tipo mecánica. Por otra parte, el material de salida corresponde a los bloques que ingresaron pero con la condición de “calibrados”. En cuanto a las señales de salida, estas son congruentes con lo descrito en las especificaciones del proyecto.

Seguidamente, en la Figura 5.2, se muestra la descomposición funcional en bloques del proyecto, donde cada bloque representa un subproblema. Esta descomposición permite dividir un problema complejo en varios sencillos interconectados, o también llamados fragmentos de solución. Este paso permite simplificar y guiar la búsqueda de conceptos.



**Figura 5.2:** Descomposición funcional del proyecto. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se explica cada uno de los fragmentos de conceptos mostrados en la Figura 5.2, además, se mencionan las opciones de conceptos consideradas producto de la búsqueda interna y externa.

- Para el subproblema de “aceptar energía externa”, se consideran las opciones de energía eléctrica y neumática, no obstante, al consultar con el LD, este no cuenta con un sistema de aire comprimido instalado, con lo cual, la opción neumática queda descartada. No obstante, para la ramificación de energía eléctrica, se identificaron las opciones de alimentación de corriente directa, como es el caso de un banco de baterías, así como alimentación de corriente alterna proveniente de la instalación eléctrica del LCM. En este subproblema, se busca dotar al sistema de la energía requerida para su correcto funcionamiento dentro del LD.

- En cuanto al fragmento de “gestionar energía”, se tomó en cuenta que los actuadores, sensores y sistemas de control requieren operar a distintos niveles de tensión, con lo cual, se identificaron las opciones de regulador de tensión, convertidor de nivel, así como un convertidor de cuatro cuadrantes. Cabe destacar que la naturaleza eléctrica es claramente la norma en este apartado, esto debido a la justificación proveída en el subproblema anterior.
- Para el subproblema de “mover mecanismo de secuencia de calibración de forma lineal”, se consideran 2 opciones ampliamente utilizadas en la industria [23], que corresponden a sistemas basados en motor a pasos, uno con transmisión de movimiento mediante poleas y banda dentada, y otro mediante barra roscada. Los conceptos propios de este subproblema deben permitir el movimiento de los bloques a lo largo del eje X con el fin de realizar la totalidad de la secuencia de calibración.
- Para el caso del subproblema de “mover mecanismo de secuencia de calibración de forma rotacional”, se consideran las opciones de motor a pasos y servomotor, las cuales presentan la ventaja de poseer un control de posición. Este fragmento busca girar el dial que mueve el eje Y de la secuencia de calibración.
- En el fragmento “almacenar bloques patrón”, se tomó en cuenta la elevada cantidad de parejas de bloques que se desean ordenar y se realizó una lluvia de ideas, la cual dio como resultado (filtrado a opciones válidas), la identificación de 2 opciones, que son un sistema de bandas transportadoras, y un mecanismo giratorio de uno o varios niveles. Ambos mecanismos deben moverse según la orden de trabajo que se encuentra en ejecución, acercando los bloques listos para calibrar al equipo comparador.
- Los subproblemas de “obtener detalles de orden de trabajo actual”, y “calcular y almacenar indicadores de desempeño y avance del proceso”, pueden ser

abordados por un solo sistema computacional, denominando “gestionar órdenes de trabajo”. Dentro de las opciones consideradas se encuentran PXI (módulo de control industrial de National Instruments [24]), la utilización del computador del LD al incorporar módulos de entrada y salida como los disponibles en [25] [26], un computador de bajo coste habilitado para prototipado de la serie Raspberry Pi, y un sistema PSoC, que es un dispositivo programable embebido con entradas y salidas tanto digitales como analógicas [27]. Se desea que estos sistemas gestionen los datos de las órdenes de trabajo, interpreten las señales de los sensores, controlen los actuadores del sistema, y brinden al usuario los indicadores requeridos.

- Para el fragmento “accionar pedal”, se consideran las opciones de actuador solenoide y servomotor, que se desea pulsen el pedal con el fin de activar la bomba de vacío que protege al palpador superior.
- Para el caso de “obtener posición del mecanismo de ordenamiento”, se establecen como opciones los sensores infrarrojos, los finales de carrera, y un dispositivo encoder, esto para conocer la posición del mecanismo de alojamiento de bloques, con el objetivo de dotar al sistema de control de esta información y que este mueva el mecanismo según corresponda en la orden de trabajo.
- El fragmento “mover mecanismo de ordenamiento de bloques” tiene la función de mover el mecanismo de alojamiento de bloques según lo indique el sistema de control de órdenes de trabajo, con la precisión requerida para favorecer la disminución del tiempo de calibración por bloque. Dado que este movimiento debe ser preciso, se toman como opciones un motor a pasos y un servomotor.

Las opciones de fragmentos de conceptos mencionadas anteriormente se resumen en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4:** Opciones conceptuales para cada subproblema

<b>Subproblema</b>	<b>Concepto</b>
Aceptar energía	Alimentación CD Alimentación CA
Gestionar energía	Regulador de tensión Convertidor de nivel Convertidor de 4 cuadrantes
Movimiento lineal de secuencia	Stepper con poleas y banda dentada Stepper con barra roscada
Movimiento rotacional de secuencia	Stepper Servomotor
Almacenar bloques patrón	Bandas transportadoras Mecanismo giratorio
Gestionar órdenes de trabajo	PXI Raspberry Pi Computador con módulos E/S PSoC
Accionar pedal	Actuador solenoide Servomotor
Obtener posición del mecanismo de ordenamiento	Encoder Final de carrera Sensor infrarrojo
Mover mecanismo de ordenamiento de bloques	Stepper Servomotor

Dado que se requiere enfocar el análisis de la fase de selección de conceptos en aquellos subproblemas que varíen de forma significativa el funcionamiento de la propuesta de solución, se realiza una preselección de los fragmentos de conceptos que abordan los subproblemas de “aceptar energía” y “gestionar energía”. Las fragmentos de conceptos que solucionan estos subproblemas brindan al sistema la energía eléctrica requerida para su funcionamiento.

En cuanto al subproblema “aceptar energía”, se deben tomar en cuenta las necesidades 1.1, 1.2, 2.2 y 2.3 enunciadas en la Tabla 5.1. Ya que para contar con alimentación CD en el LD (corriente directa), se requiere una batería, lo que implica que se incurriría en un gasto elevado. Ya que se necesita que el sistema opere al menos durante una jornada laboral completa, la batería debería contar con gran capacidad de almacenamiento energético para alimentar a todos los componentes de la propuesta de solución, lo cual aumenta su costo. Por otra parte, dado que la

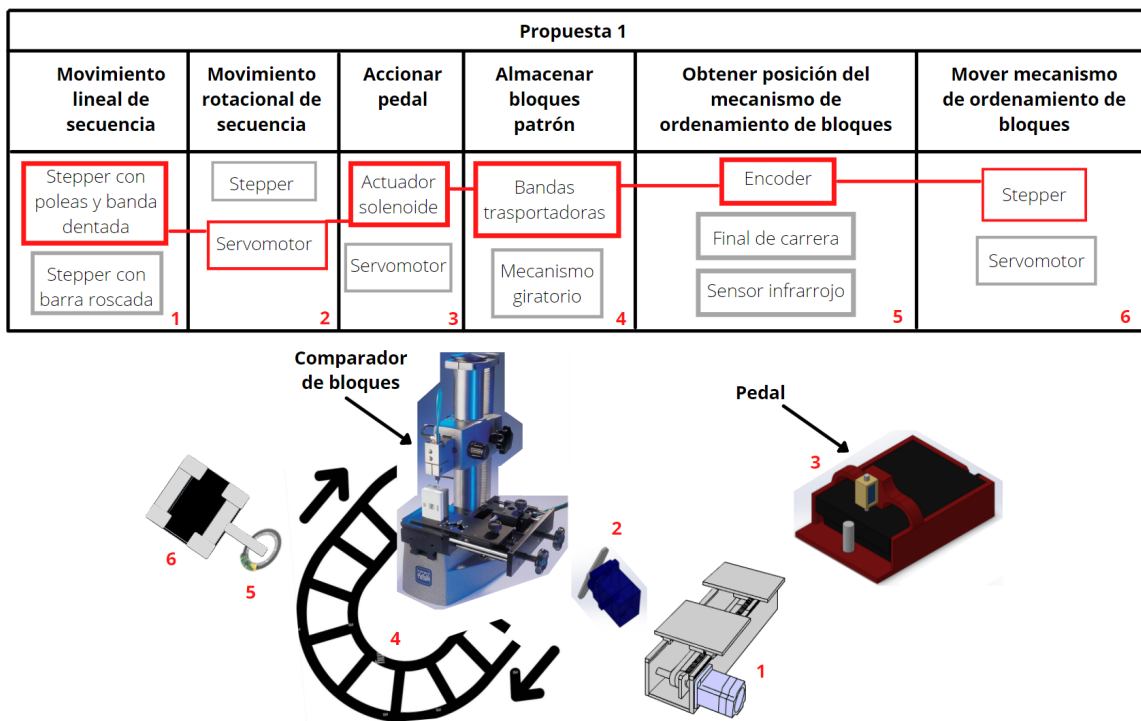
propuesta de solución no requiere ser trasladada dentro ni fuera del LD, la portabilidad que aportaría una batería no es valiosa en este caso. En el supuesto de un eventual apagón energético el LD cuenta con dispositivos UPS, los cuales brindan alimentación CA por un tiempo limitado (mediante su reserva almacenada en baterías), esto para apagar y poner en modo seguro los sistemas computacionales o tecnológicos que dependan de esta fuente energética. En adición, el trabajar con alimentación CA se abre un abanico de opciones de conversión energética, tal y como se menciona a continuación. Por los motivos mencionados anteriormente, el subproblema de “aceptar energía” será abordado con CA.

En relación con lo comentado anteriormente, el subproblema de “gestionar energía” deberá atender de igual forma a lo requerido en las necesidades 1.1, 1.2, 2.2 y 2.3, posibilitando el movimiento de los actuadores, así como la lectura correcta de las entradas del sistema computacional del control de órdenes de trabajo. Al evaluar las opciones planteadas en la Tabla 5.4 para el subproblema en cuestión, y realizando un estudio de mercado local (consultando los principales proveedores de artículos electrónicos del país), se determinó que el convertidor de cuatro cuadrantes tiene disponibilidad limitada. No obstante, los convertidores de nivel (requeridos por gran cantidad de sistemas de control en su interfaz de potencia o acondicionamiento de señales), así como los reguladores de tensión (utilizados para conversión CD-CD según requerimientos de los sensores o actuadores), tienen alta disponibilidad y bajo costo, con lo cual se seleccionan ambos para formar parte del concepto ganador. Cabe destacar que las fuentes de alimentación que tienen como entrada CA, tienen un regulador de tensión incorporado, con lo cual son aptas para el desarrollo del proyecto.

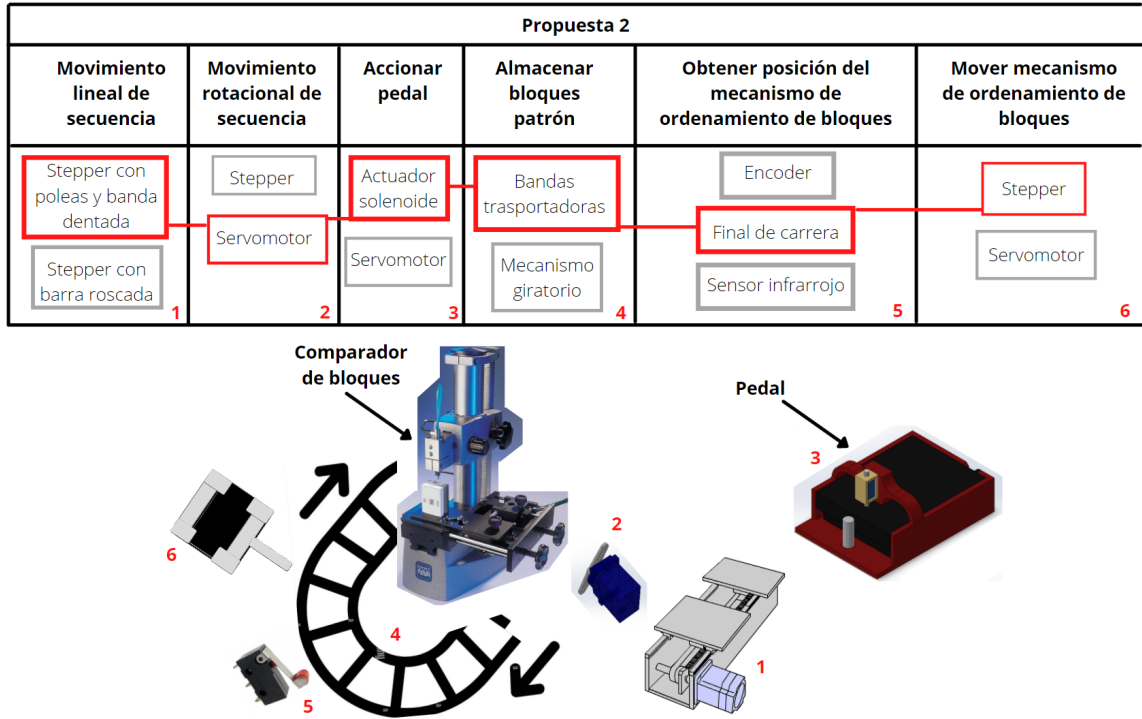
El subproblema de “gestionar órdenes de trabajo” conlleva la elección del sistema computacional que realizará el control del mecanismo de ordenamiento de bloques, el cual debe tener la capacidad de interpretar y procesar datos, según la ejecución de la orden de trabajo y las entradas del sistema, así como gestionar las salidas que

controlarán el o los actuadores del mecanismo. Dado que el desempeño de este fragmento de concepto no debe verse alterado por la elección del resto de componentes de la propuesta de solución, se realizará la selección de este de forma individual en la siguiente sección.

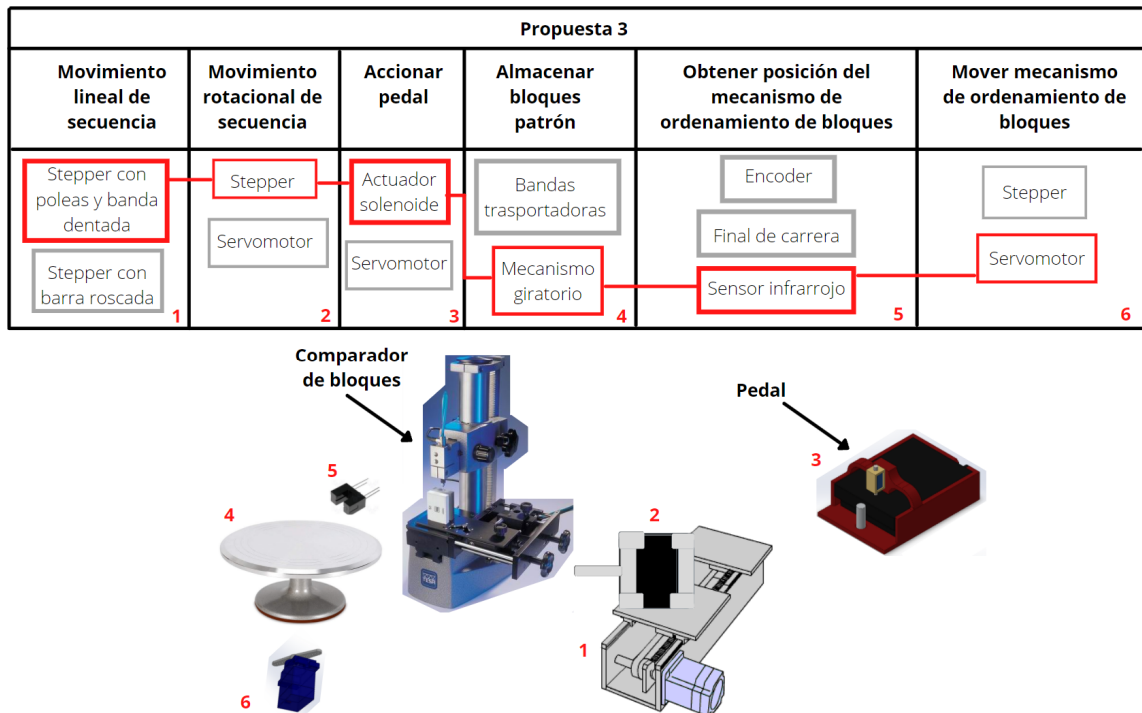
A continuación, se muestran las combinaciones válidas de fragmentos de concepto que se considera aportan diversidad, y sobretodo valor agregado en cuanto a exploración de opciones que cumplan con lo requerido por el cliente. Cabe destacar que la disposición de los elementos así como algunos de ellos son aporte propio, no obstante, el resto de imágenes requeridas fueron tomadas de [28][29][30][31][32][33][34], esto para mejorar la claridad visual de los conceptos.



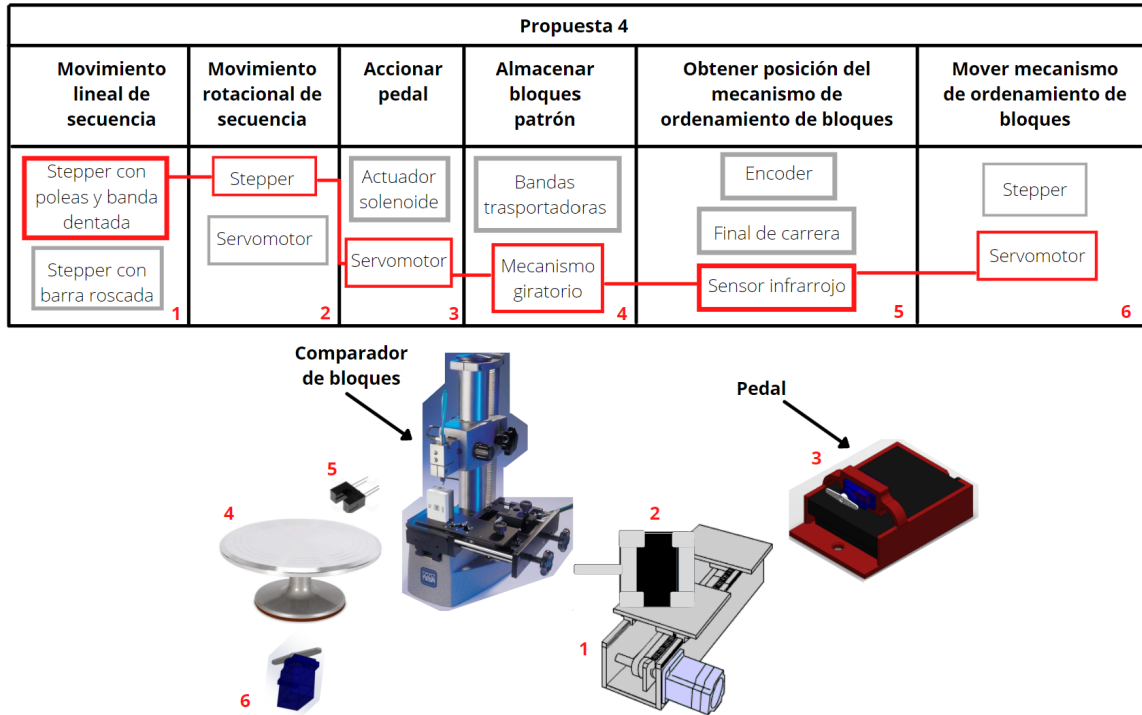
**Figura 5.3:** Propuesta 1 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo. Fuente: Elaboración propia



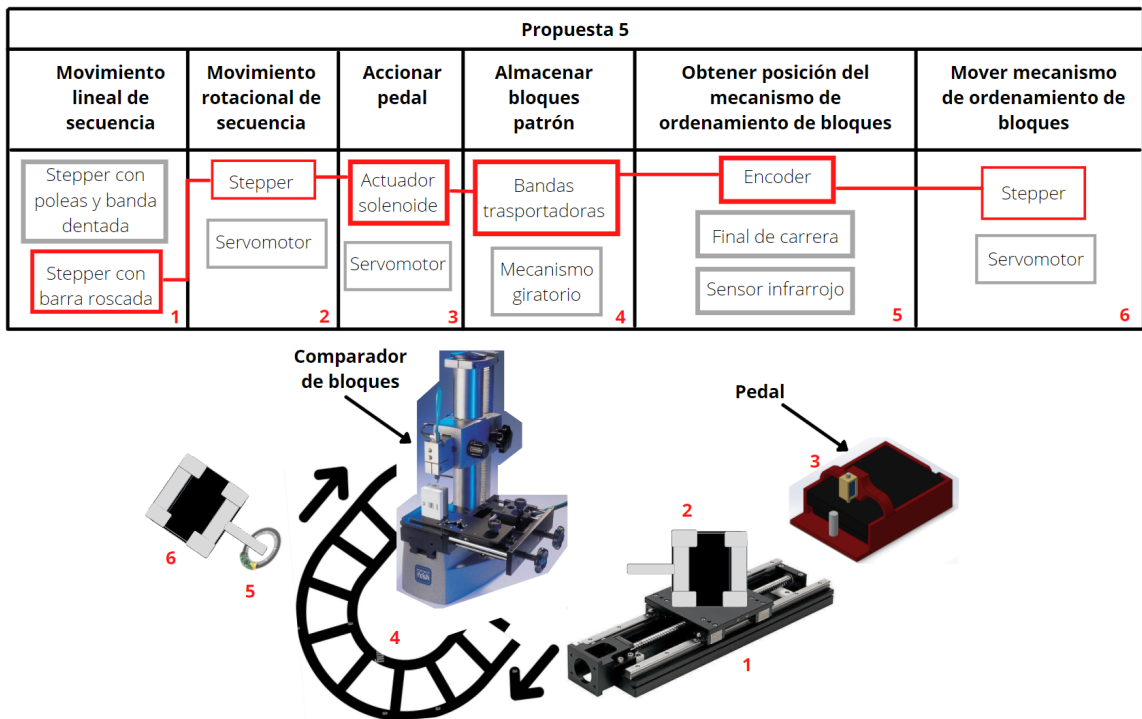
**Figura 5.4:** Propuesta 2 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia



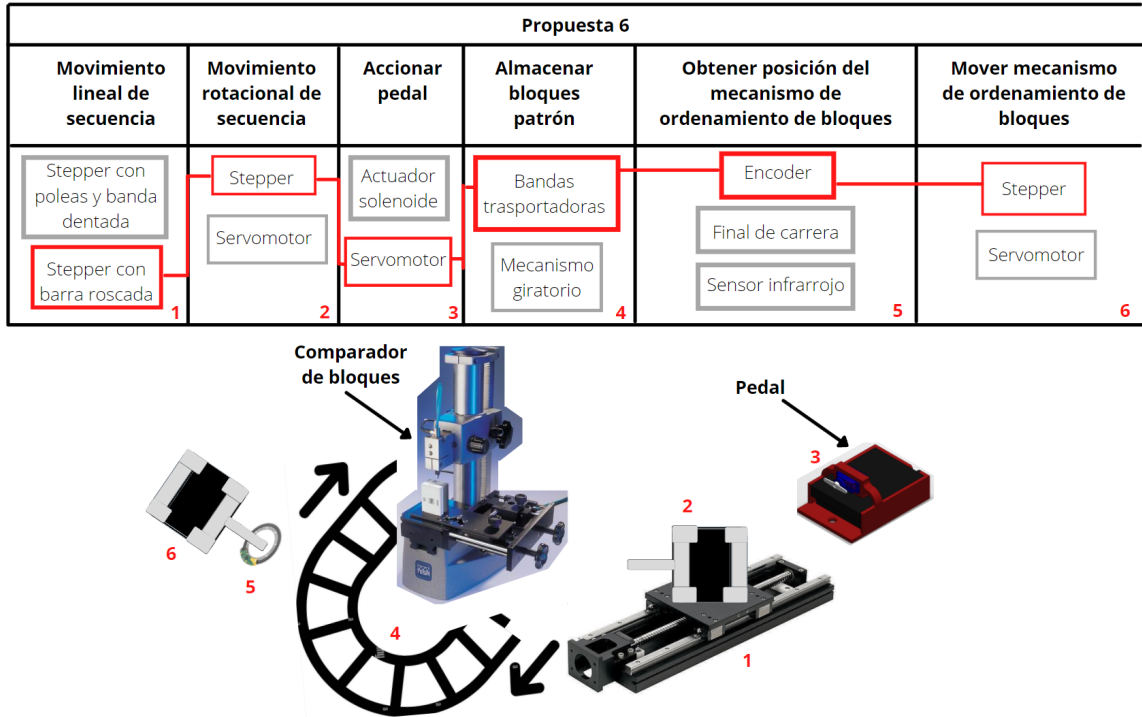
**Figura 5.5:** Propuesta 3 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia



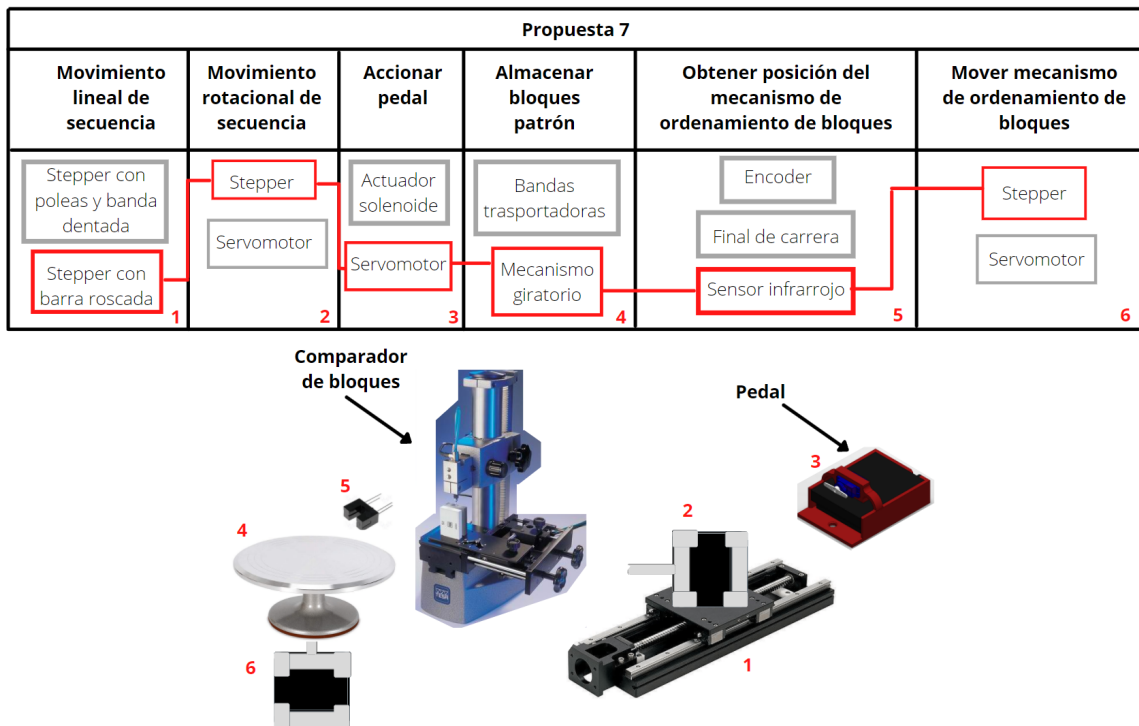
**Figura 5.6:** Propuesta 4 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia



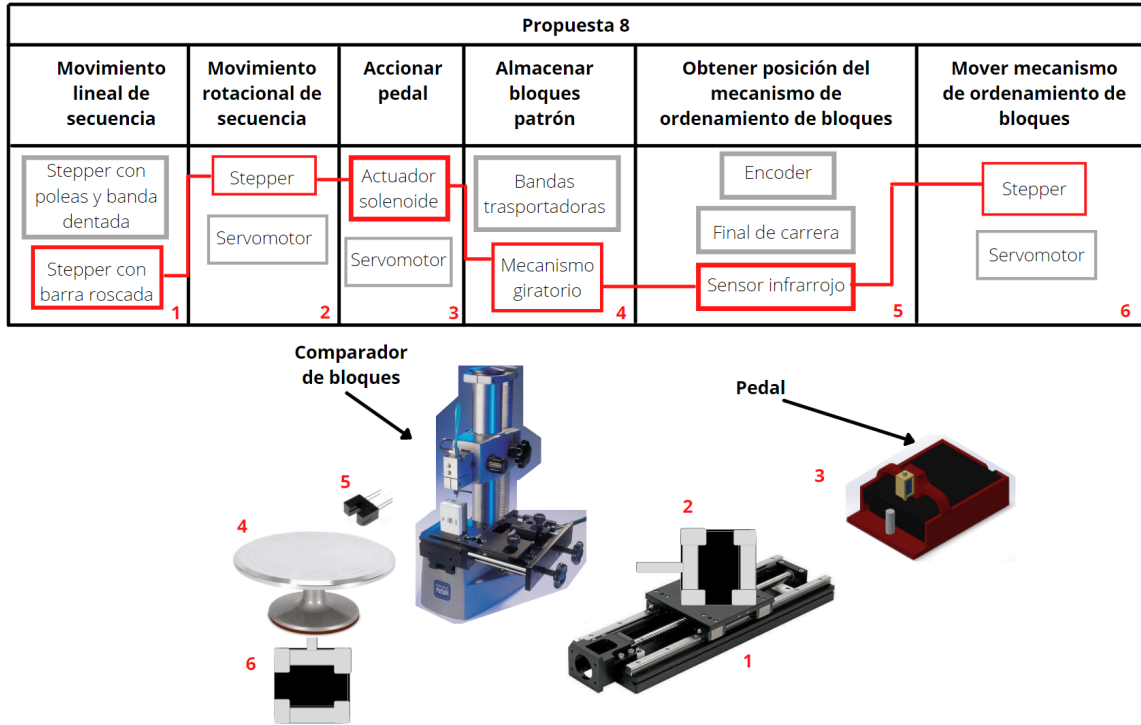
**Figura 5.7:** Propuesta 5 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.8:** Propuesta 6 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.9:** Propuesta 7 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.10:** Propuesta 8 de mecanismo de ejecución de secuencia y órdenes de trabajo. Fuente: Elaboración propia

### 5.4.1 Reflexión de la fase

Al analizar el conjunto de conceptos considerados y cómo fueron combinados, se considera hay varios aspectos notables. Uno de ellos es que tecnologías u opciones por ejemplo neumáticas o que implicaran el uso de baterías, fueron descartadas debido a la disponibilidad en el LD, así como un elevado costo de adquisición en caso de optar por ellas.

La preselección de los conceptos de “aceptar energía” y “gestionar energía” se realizó en esta fase ya que dentro de las distintas propuestas de diseño, las opciones de fragmentos de conceptos para estos subproblemas no modifican cómo se desempeñan el resto de subconceptos, ya que su interacción se limita a si posibilita o no el movimiento y accionamiento de estos, con lo cual no se encuentra pertinente elaborar un conjunto elevado de propuestas tomando en cuenta estas combinaciones de nulo

valor agregado.

Adicionalmente, es adecuado destacar que la descomposición funcional mostrada es una de múltiples posibles para el problema planteado. En relación con esta descomposición, tal y como se comentó, se sintetizaron varios subproblemas en “gestionar órdenes de trabajo”, ya que las funciones asociadas a ellos están altamente interrelacionadas, lo cual se discutirá en la siguiente sección.

En cuanto a la combinación de fragmentos de conceptos, se centralizó el cruzamiento en la generación de propuestas donde la interacción entre elementos sea congruente y se explore el conjunto de opciones para cada subproblema. Para tal efecto, se fraccionó la combinación de subconceptos en 3 subsistemas, correspondientes a “accionar pedal”, “secuencia de calibración” y “orden de trabajo”, esto para simplificar el proceso de exploración de todo el espacio de propuestas de solución. Lo anterior sirvió de guía para el proceso de combinación que dio como resultado el conjunto de propuestas de las Figuras 5.3, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, y 5.10.

Dentro de los descartes de combinaciones que se evaluaron, destaca que la opción de servomotor no es compatible con la naturaleza de movimiento continuo de la banda transportadora, por este motivo no se incorporaron dentro del grupo de propuestas de solución. Otro caso corresponde a que la combinación del uso de un servomotor con un sensor tipo encoder no es válida, ya que por su construcción y funcionamiento, el servomotor cuenta con un circuito de realimentación que permite conocer el ángulo del eje, con lo cual, el encoder no agrega valor a esta unión.

En miras de la fase ulterior, la etapa de “generar conceptos de solución” aporta el conjunto de propuestas de solución que serán evaluadas según criterios factibilidad y requerimientos del cliente.

## 5.5 Seleccionar conceptos de solución

En la presente fase, se desea determinar el concepto de solución más adecuado de entre las propuestas planteadas, que dé solución satisfactoria y se acople al problema de estudio, así como las posibilidades tecnológicas, económicas y temporales del equipo de desarrollo y del LD. Este concepto será el seleccionado para desarrollarse como primer prototipo funcional, el cual, dada la naturaleza iterativa de todo proceso de diseño ingenieril, está expuesto a oportunidades de mejora e iteraciones futuras. A continuación, se enlistan los criterios de selección escogidos, su respectiva justificación, así como la puntuación de importancia que será utilizada posteriormente en el Nivel de Evaluación.

- Costo de implementación: el proyecto está limitado por un presupuesto establecido por el LD, en este caso un aproximado de \$ 800, con lo cual, la adquisición de la totalidad de los componentes de la propuesta de solución no deben superar este monto. El LD ha sufrido recortes de presupuesto debido a un conglomerado de factores que afectan la salud financiera de las arcas del Estado Costarricense, con lo cual, el cumplimiento de este criterio es crítico, por tal motivo se le asigna una puntuación de 5.
- Disponibilidad de componentes: debido a que los procesos de compra o solicitud de servicios, por ejemplo de mecánica de precisión, son lentos debido a la tramitología que requiere su aprobación dentro del LD, aunado al tiempo limitado para la de todas las fases de ejecución del proyecto, se requiere que los componentes seleccionados estén disponibles en el mercado nacional para entrega pronta. Ya que no se puede prescindir de ningún componente debido a que se requiere entregar un primer prototipo funcional, la puntuación otorgada a este criterio es 5.
- Repetibilidad de movimientos: atendiendo a las necesidades 1.1, 1.2 y 2.3 de la Tabla 5.1, se requiere que los conceptos aporten la capacidad en cuanto a rango,

fuerza, torque, así como precisión en los movimientos tanto de la secuencia de calibración como en la ejecución de órdenes de trabajo. Dado que este criterio es decisivo en cuanto a la validez de las calibraciones del LD, lo cual también fue expresado en la importancia reportada por el cliente, la puntuación corresponde a 5.

- **Tiempo de desarrollo:** este criterio incorpora matices relacionados a la complejidad de implementación de un concepto, ya que es mandatorio que el proyecto se lleve a cabo en no más de 16 semanas. La puntuación para este criterio es de 5 ya que implica la culminación exitosa o no del presente proyecto.
- **Durabilidad:** este criterio toma en cuenta lo establecido en las necesidades 2.2 y 5.1 de la Tabla 5.1, ya que busca justipreciar a los conceptos en términos de cuánto ajuste requieren, el tiempo que le toma al funcionario realizar ese ajuste, así como si el sistema requerirá inspecciones periódicas más o menos frecuentes según la naturaleza de la solución. Este criterio toma en cuenta la robustez del sistema así como la conservación de sus funciones a lo largo del tiempo, por ejemplo en aspectos como desgaste mecánico, rozamiento, entre otros. Según lo establecido por el cliente, la puntuación es de 4.
- **Conformidad térmica:** este criterio aloja a lo expresado en las necesidades 2.1, 2.3, 3.1 y 3.2 de la Tabla 5.1, hace referencia a indagar sobre cuáles conceptos de solución favorecen la estabilidad térmica entre el conjunto de bloques y el entorno controlado del LD, según lo mencionado anteriormente respecto a las normativas aplicables [20] [7] [8]. Dado que este criterio incorpora varias necesidades, se establece su puntuación como la mayor de las necesidades que cubre, es decir 5.

### 5.5.1 Nivel de filtrado

Una vez esclarecidos los criterios que guiarán la selección de conceptos a niveles de filtrado y evaluación, se procede a comparar las propuestas de solución. Cabe destacar que la Propuesta 3 fue seleccionada como concepto referencia, ya que posee características que la hacen una solución intermedia en cuanto a prestaciones dentro del grupo considerado.

**Tabla 5.5:** Filtrado de conceptos.

No. Propuesta	Costo de implementación	Disponibilidad de componentes	Repetibilidad de movimientos	Tiempo de desarrollo	Conformidad térmica	Durabilidad	Evaluación Neta	Posición	¿Continuar?
1	-	-	-	-	-	0	-5	8	No
2	-	0	0	0	-	-	-3	7	No
3	0	0	0	0	0	0	0	4	Sí
4	+	+	0	0	0	0	2	3	Sí
5	-	-	0	0	-	+	-2	6	No
6	-	0	0	0	-	+	-1	5	No
7	0	+	+	+	0	+	4	1	Sí
8	0	0	+	+	0	+	3	2	Sí

De la Tabla 5.5, se conservan 4 propuestas de solución que avanzarán al nivel de evaluación, que corresponden al concepto referencia (propuesta 3), y a 3 propuestas (4, 7 y 8), que en términos generales, aportan cualidades favorables respecto al concepto referencia.

### 5.5.2 Nivel de evaluación

Tomando en cuenta los conceptos de las propuestas 3, 4, 7 y 8, así como las puntuaciones asignadas a cada criterio, se construye la Tabla 5.6, donde se tasan las propuestas mediante un método ponderado, lo cual permitirá identificar el concepto ganador que será llevado a prototipo, esto tomando en cuenta no solamente en qué aspectos es mejor, sino la importancia de estos para el cliente. La escala de calificación utilizada corresponde con lo descrito en el Capítulo 3, específicamente la Tabla 3.2.

Tal y como se observa en la Tabla 5.6 el concepto seleccionado o concepto ganador corresponde a la Propuesta 7, ya que se determinó que tiene las mejores características

**Tabla 5.6:** Tabla de evaluación de conceptos.

Criterios de Selección	Peso (%)	Propuesta 3		Propuesta 4		Propuesta 7		Propuesta 8	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Costo de implementación	17	3	0,51	4	0,68	3	0,51	2	0,34
Disponibilidad de componentes	17	3	0,51	4	0,68	5	0,85	4	0,68
Repetibilidad de movimientos	17	3	0,51	3	0,51	5	0,85	5	0,85
Tiempo de desarrollo	17	3	0,51	3	0,51	4	0,68	4	0,68
Conformidad térmica	17	3	0,51	3	0,51	3	0,51	3	0,51
Durabilidad	15	3	0,45	3	0,45	4	0,6	4	0,6
Total		3		3,34		4		3,66	
Lugar		4		3		1		2	
¿Seleccionar?		No		No		Sí		No	

según los requerimientos del cliente, dentro de las opciones consideradas. En los capítulos 6 y 7 se detallará el desarrollo del concepto en sus dos grandes áreas, que son la secuencia de calibración y el sistema de control de órdenes de trabajo.

### 5.5.3 Reflexión de la fase

Al valorar la fase de selección de conceptos, se evidenció que los criterios de selección fueron elegidos tomando en cuenta los requerimientos del cliente establecidos en las necesidades, así como criterios ligados a los recursos disponibles para la realización del proyecto. No se identificaron sesgos ni componentes subjetivas que desvíen la selección de conceptos del curso marcado por la metodología de diseño.

Cabe destacar que en la fase de filtrado no se combinaron conceptos que avanzaron de nivel, ya que previamente se realizó una amplia combinación de fragmentos de conceptos (aquellas combinaciones válidas), explorando múltiples combinaciones de propiedades de las propuestas de solución.

---

---

## CAPÍTULO 6

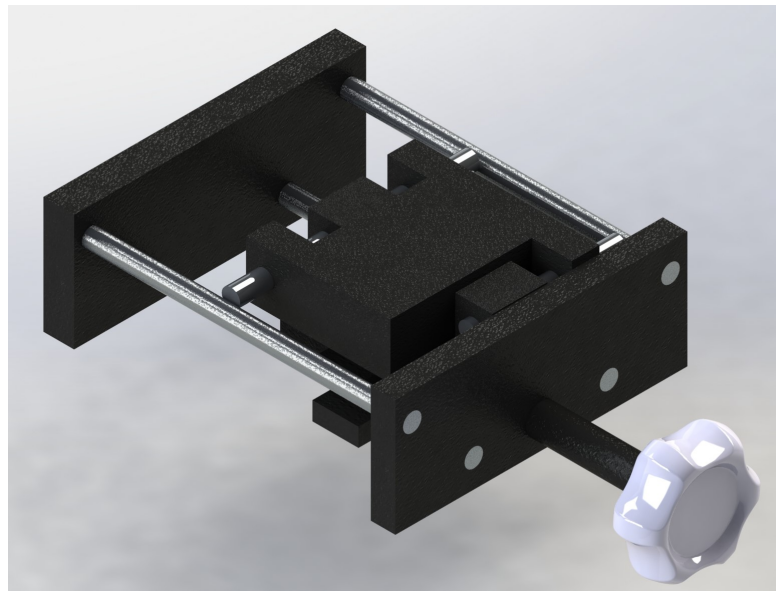
---

# MECANISMO PARA LA EJECUCIÓN AUTOMÁTICA DE LA SECUENCIA DE CALIBRACIÓN

En el presente capítulo, se incluye el desarrollo del concepto ganador relativo al mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración. Para esto, se explicarán las consideraciones de diseño, se detallarán los componentes requeridos y se explicará el funcionamiento del mecanismo. Adicionalmente, se indicarán las piezas críticas las cuales serán examinadas por medio de simulación de esfuerzos de elementos finitos, con el fin de determinar la confiabilidad de su operación ante las condiciones de trabajo.

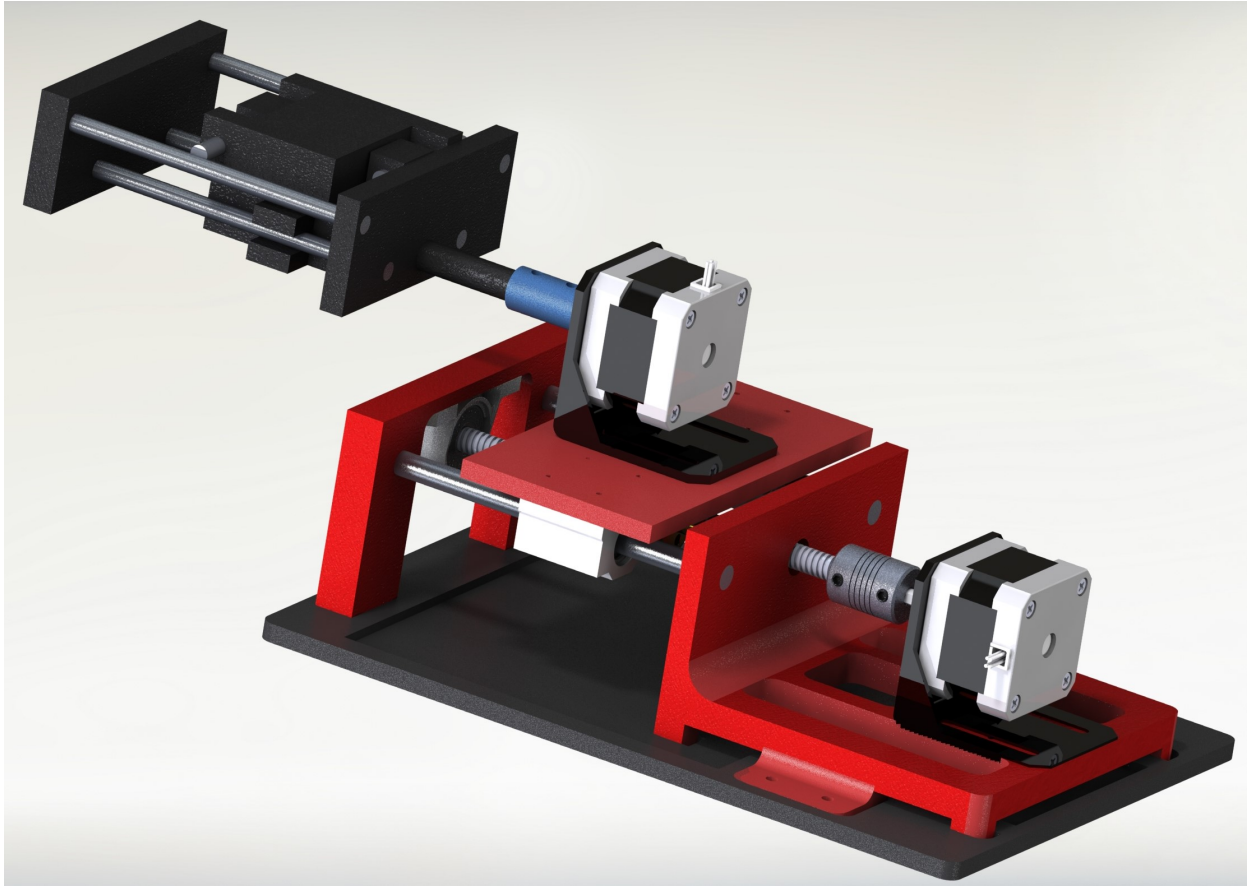
## 6.1 Diseño mecánico para el recorrido por las posiciones de la secuencia de calibración

Como se explicó en el Capítulo 4, la propuesta de solución debe mover de forma lineal y rotacional la palanca que posiciona los bloques en las 6 posiciones de medición. El mecanismo del comparador de bloques que se mueve mediante la palanca se muestra en la Figura 6.1.



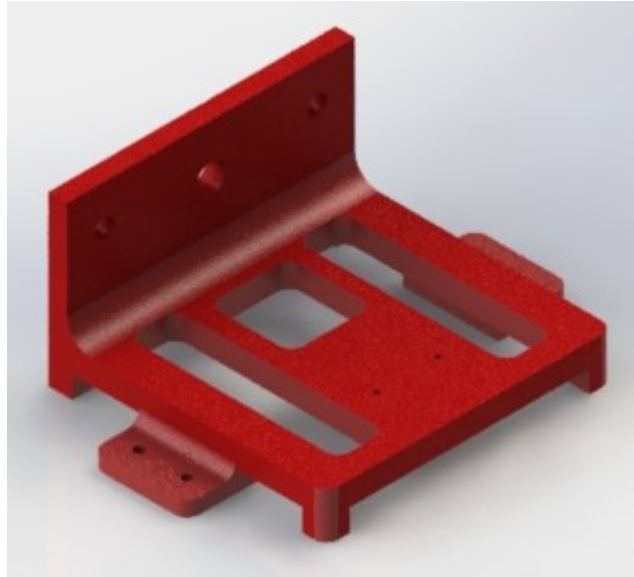
**Figura 6.1:** Mecanismo de palanca del comparador de bloques para la ejecución de la secuencia de calibración. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se determinó en la fase de selección de conceptos, el mecanismo para el recorrido por las posiciones de la secuencia de calibración será implementado mediante un sistema de movimiento lineal (utilizando barra roscada), y un movimiento rotacional mediante un motor a pasos acoplado al dial mostrado en la Figura 6.1. El mecanismo diseñado para el recorrido por las posiciones de la secuencia de calibración se muestra en la Figura 6.2, su funcionamiento y componentes se describen a continuación.



**Figura 6.2:** Mecanismo para el recorrido por las posiciones de la secuencia de calibración. Fuente: Elaboración propia

Para el sistema de movimiento lineal se diseñaron 2 soportes laterales, los cuales se muestran en las Figuras 6.3 y 6.4, los cuales tienen la función de alojar los extremos de las barras lisas que darán soporte al *carrito* que se desplazará de forma lineal. Las barras lisas utilizadas se pueden observar en la Figura 6.5. Como se puede atender en las Figuras 6.2 y 6.3, la base lateral derecha es la encargada además de fijar el soporte de uno de los motores a pasos. El motor a pasos que moverá el carrito lineal y su soporte, se muestran en las Figuras 6.6, y 6.7, respectivamente.



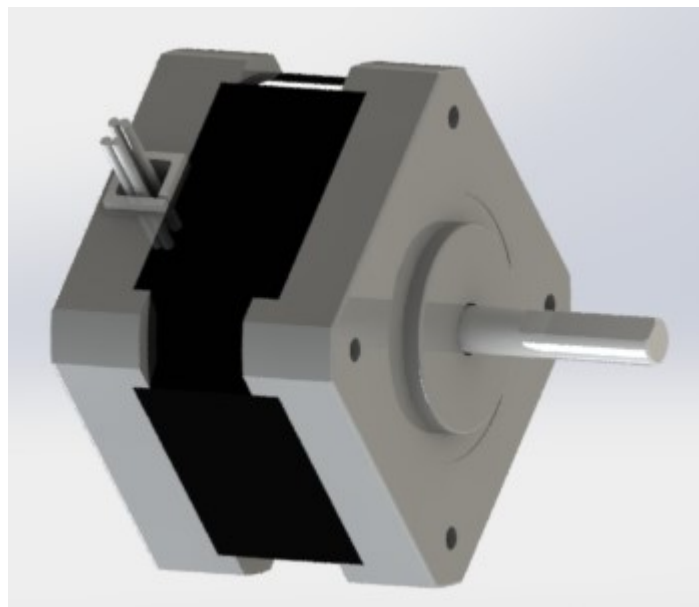
**Figura 6.3:** Base lateral derecha del mecanismo de secuencia. Fuente: Elaboración propia



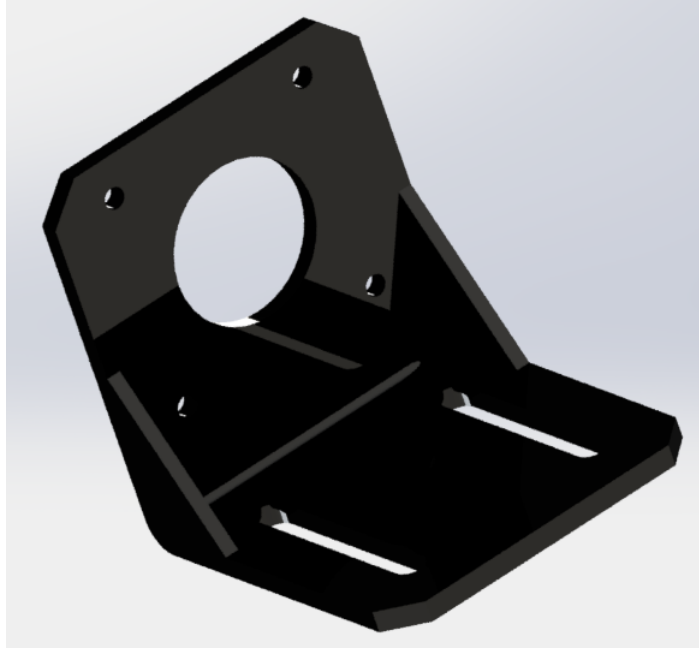
**Figura 6.4:** Base lateral izquierda del mecanismo de secuencia. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.5:** Barra metálica lisa de 8mm. Fuente: Elaboración propia

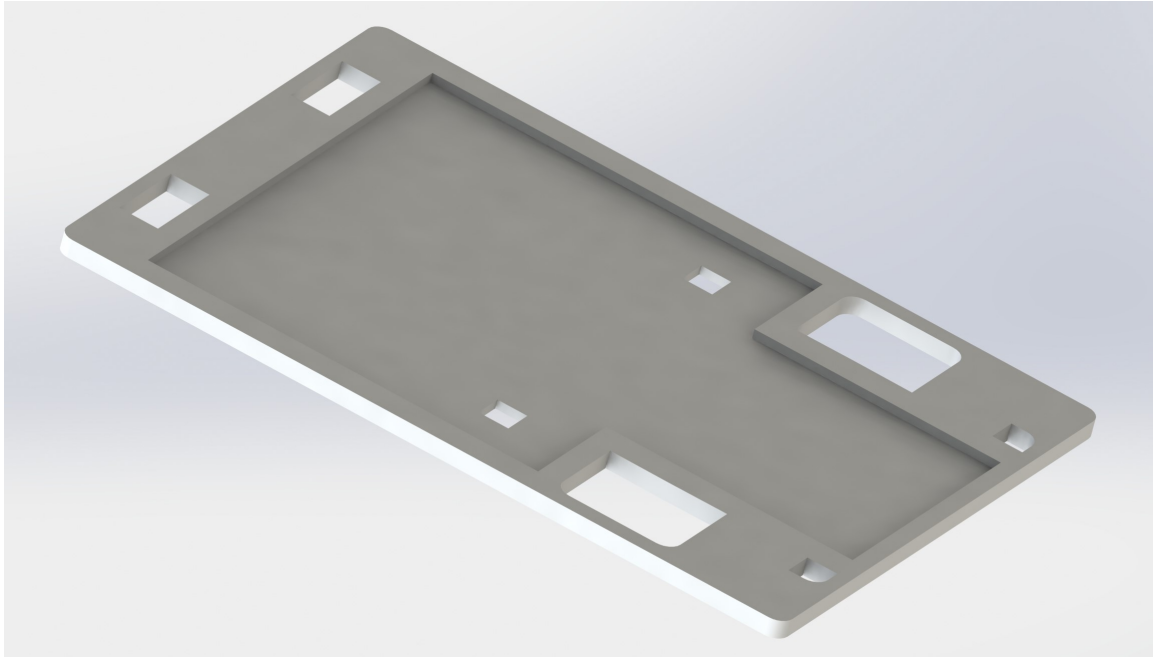


**Figura 6.6:** Motor a pasos. Fuente: Basado en [35]



**Figura 6.7:** Soporte tipo L para motor a pasos Nema 17. Fuente: Basado en [36]

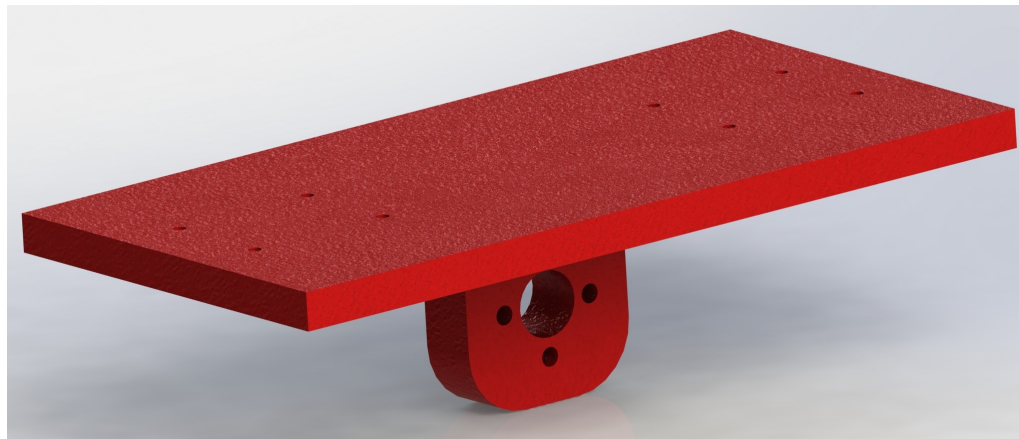
Debido a que el movimiento lineal del *carrito* así como el deslizamiento de la palanca del comparador de bloques tienen fricción, se incorpora a la base lateral derecha una prevista para sujeción atornillada en ambos extremos, esto para evitar un movimiento indeseado respecto a la mesa de trabajo del mecanismo durante su funcionamiento. No obstante, debido a que actualmente la mesa de trabajo tiene un sobre de granito, estas salientes de sujeción atornilladas quedarán como prevista, con lo cual, se optó por una estrategia de sujeción mediante cinta doble cara de alta resistencia. No obstante, al observar las bases laterales derecha e izquierda, es evidente que el área de sujeción que está en contacto con la mesa de trabajo es escasa. Por este motivo, se diseñó una placa que calza con las bases laterales, fija su posición, y adicionalmente provee de gran superficie de sujeción con la mesa de trabajo. Esta placa se muestra en la Figura 6.8



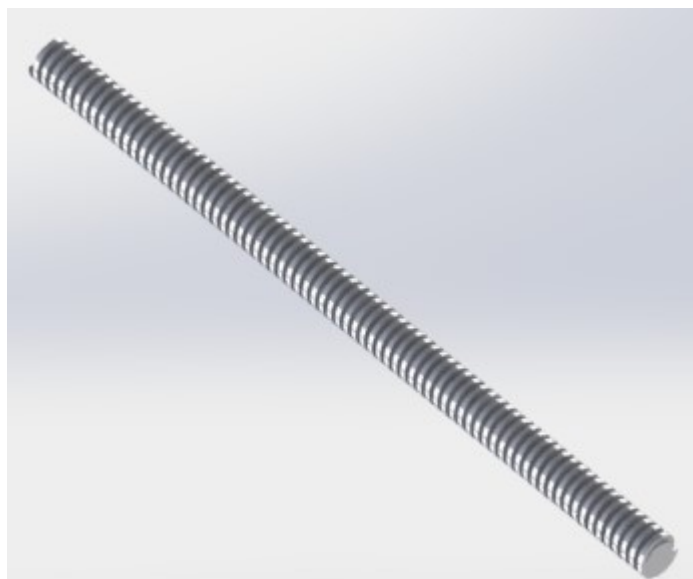
**Figura 6.8:** Base de sujeción del mecanismo de secuencia. Fuente: Elaboración propia

Al consultar las especificaciones de la cinta doble cara de alta resistencia adquirida y utilizada, se identificó que esta posee una fuerza de sujeción de  $52 \text{ kg}/\text{m}^2$  [37]. Para la base de sujeción, se tiene un área de contacto con la mesa de trabajo de  $0.06 \text{ m}^2$ , con lo cual, la sujeción obtenida se estima en 3.1 kg, lo que equivale a 30 N aproximadamente, muy superior a cualquier fuerza de rozamiento presente en el sistema.

El motor a pasos encargado de mover de forma lineal el *carrito* (mostrado en la Figura 6.9), debe estar unido a la barra roscada mediante un acople que permita la transmisión de movimiento sin generar esfuerzo adicional en los ejes (por ejemplo por un alineamiento no perfecto), por tal motivo se seleccionó un acople flexible de aluminio. La barra roscada y el acople flexible se muestran en las Figuras 6.10 y 6.11, respectivamente.



**Figura 6.9:** Base para stepper, tuerca y rodamientos lineales. Fuente: Elaboración propia

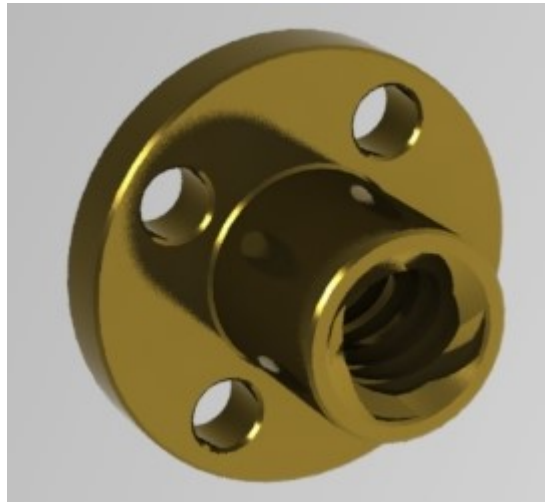


**Figura 6.10:** Barra roscada. Fuente: Elaboración propia

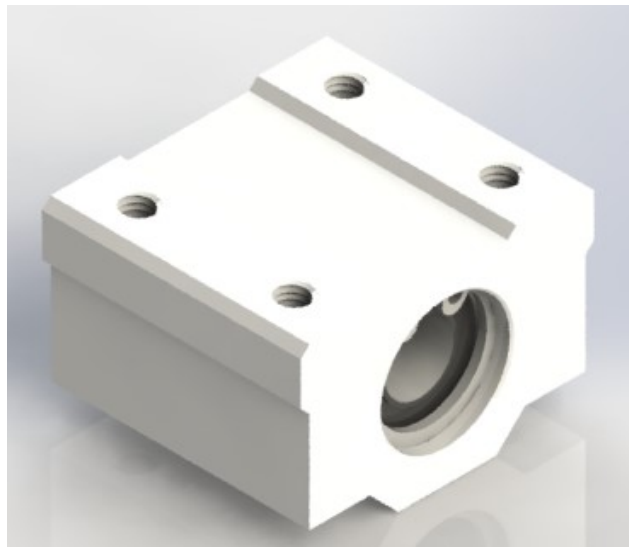


**Figura 6.11:** Acople flexible de aluminio. Fuente: Basado en [38]

La conversión del movimiento rotacional de la barra roscada, en movimiento lineal que será transferido a la base de la Figura 6.9, es posible gracias a la tuerca de latón de la Figura 6.12. Dado que esta tuerca está fija unida a la base del *carrito*, y a través de ella está girando la barra roscada, la única posibilidad mecánica de movimiento es el lineal, guiado por las barras lisas. Estas barras lisas se deslizan dentro de rodamientos lineales, como los mostrados en la Figura 6.13.



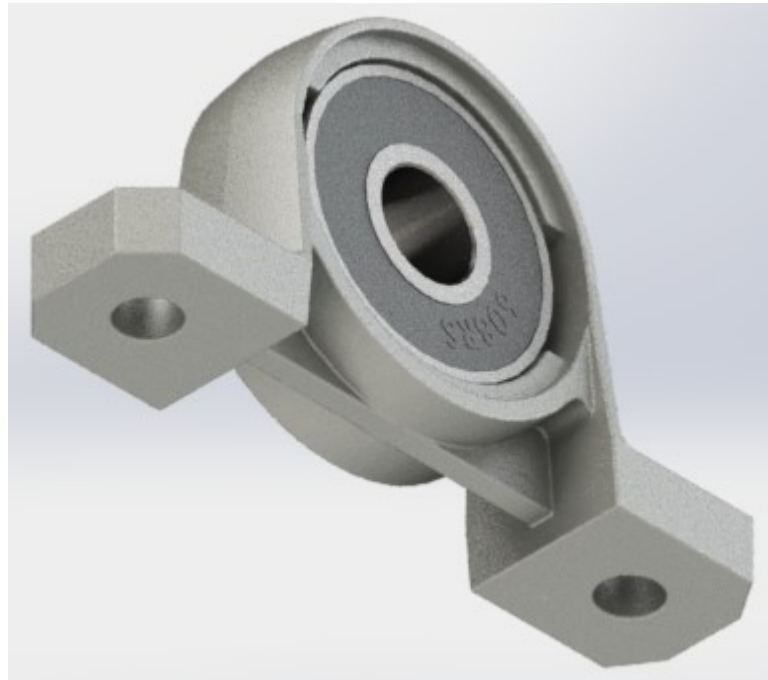
**Figura 6.12:** Tuerca de latón. Fuente: Basado en [39]



**Figura 6.13:** Rodamiento lineal. Fuente: Basado en [40]

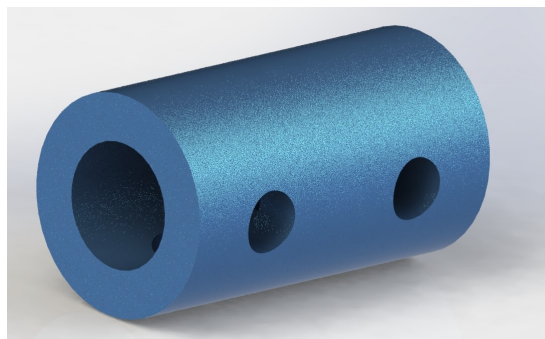
La barra roscada a su vez, reposa en el otro extremo del mecanismo en un cojinete

de montaje tipo *pillow*, como el representado en la Figura 6.14. Este cojinete está atornillado a la base lateral izquierda de la Figura 6.4, mostrada anteriormente.



**Figura 6.14:** Rodamiento de montaje tipo *pillow*. Fuente: Basado en [41]

Tal y como se mostró en la Figura 6.2, el encargado de mover rotacionalmente la palanca del comparador de bloques, lo cual provoca que los bloques situados en la plantilla se muevan hacia el fondo o frente de la mesa de trabajo (según perspectiva del usuario), es el motor a pasos que se encuentra sobre el *carrito*. Este motor está unido a la palanca del comparador mediante un acople rígido, mostrado en la Figura 6.15.



**Figura 6.15:** Acople rígido de aluminio. Fuente:Elaboración propia

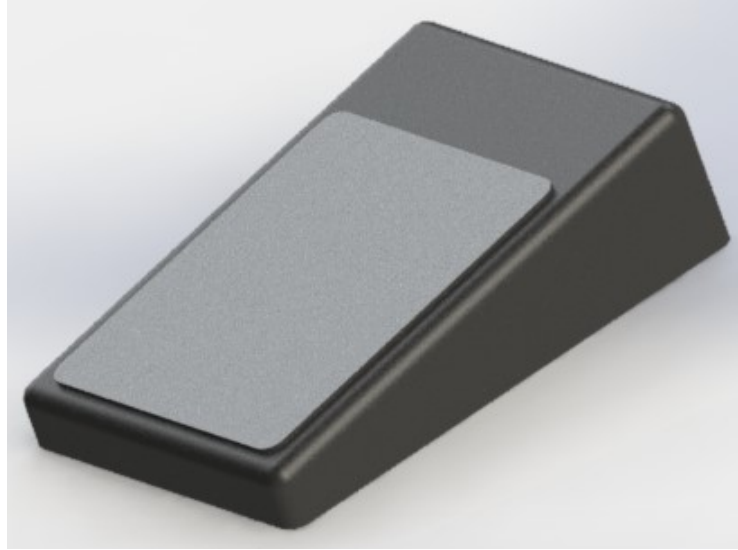
Debido a que el carrito es el encargado de transmitir el movimiento lineal a la palanca del comparador, el acople entre la palanca y el servomotor del carrito no puede ser flexible, ya que esto permitiría la elongación o contracción de este, dependiendo del sentido del movimiento lineal, lo cual impactaría de forma grave en la repetibilidad de los movimientos del mecanismo.

Dado que la unión de los ejes de la palanca y el motor a pasos que está sobre el *carrito* se da de forma imperfecta, y este acople transmite los movimientos lineal y rotacional al comparador, se identifica este componente como crítico, lo que lo hace candidato para realizarle un estudio de esfuerzo mediante elementos finitos utilizando el software SolidWorks. El proceso de simulación se encuentra en el Capítulo 11, y dio como resultado que el componente soporta las cargas aplicadas durante el funcionamiento bajo las condiciones de trabajo, esto con un factor de seguridad de 9.

A continuación, se muestra el diseño del mecanismo para el accionamiento de la bomba de vacío, el cual es indispensable para ejecutar los movimientos de la secuencia de calibración, tal y como se explicó en los capítulos anteriores.

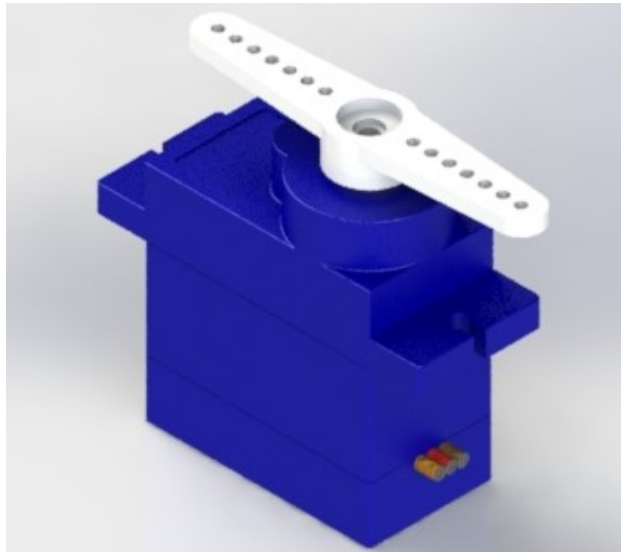
## **6.2 Diseño mecánico para el accionamiento de la bomba de vacío**

El equipo comparador de bloques dispone de un pedal como el mostrado en la Figura 6.16, el cual controla el accionamiento de la bomba de vacío que oculta y protege al palpador.



**Figura 6.16:** Pedal de accionamiento de la bomba de vacío. Fuente: Basado en [42]

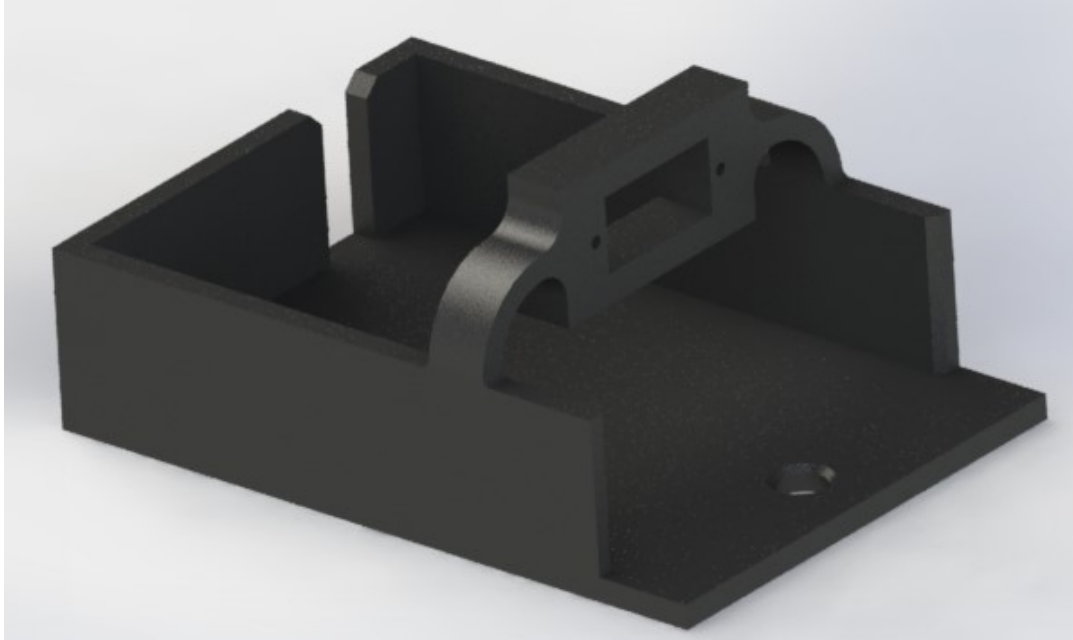
Tal y como se determinó en la fase de selección de conceptos, se escogió un servomotor para presionar el pedal de accionamiento de la bomba de vacío. Esto es posible gracias al acople de una pieza *horn* al eje del servomotor (pieza blanca de la Figura 6.17), la cual es capaz de presionar el pedal al girar el servomotor.



**Figura 6.17:** Servomotor utilizado para el accionamiento de pedal. Fuente: Basado en [43]

Para sujetar al servomotor sobre el pedal se diseñó la pieza mostrada en la Figura

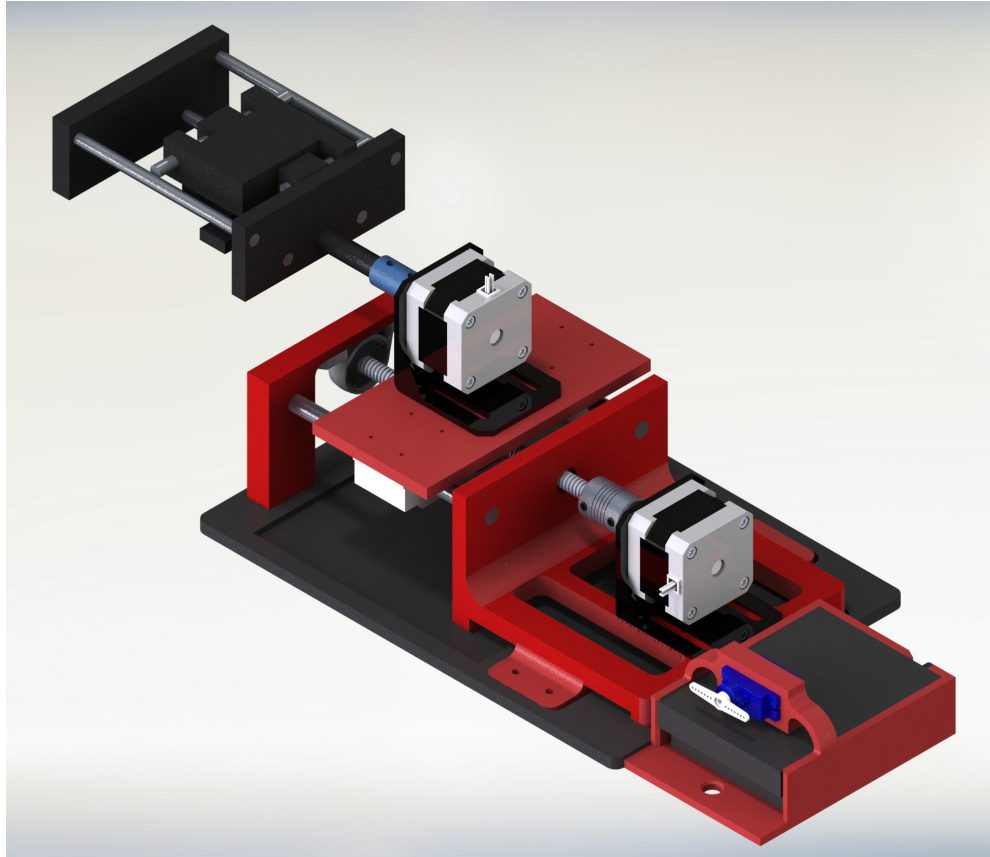
6.18. Esta pieza se elaboró de tal forma que el pedal entre debajo del servomotor, impidiendo que se mueva respecto a este último. El servomotor se atornilla para evitar un movimiento indeseado. Adicionalmente, se incorporó un agujero donde puede insertarse un pin, esto para fijar la posición del pedal y que este no se salga del soporte.



**Figura 6.18:** Soporte para pedal y servomotor. Fuente: Elaboración propia

Dado que el accionamiento de la bomba es crítico para no dañar los bloques patrón, el movimiento del servomotor debe ser robusto al presionar el pedal. Por este motivo, se simuló el conjunto de cargas que experimenta la pieza de soporte del servomotor, con el fin de descartar cualquier tipo de fractura o daño durante el funcionamiento habitual del mecanismo. Este análisis se encuentra detallado en el Capítulo 11, dando como resultado un factor de seguridad de 3 y una deflexión máxima de 0.21 mm.

A continuación, en la Figura 6.19, se muestra el mecanismo completo de ejecución de la secuencia de calibración diseñado. Es preciso indicar que algunos componentes pueden mostrarse en distinto color, esto para facilitar la visualización del mecanismo.



**Figura 6.19:** Mecanismo diseñado para la ejecución de la secuencia de calibración. Fuente: Elaboración propia

Las piezas diseñadas fueron impresas en 3D con filamento ABS, ya que los esfuerzos a los que están sometidos no son de un orden de magnitud no soportado por este tipo de material, tal y como se demostró en las simulaciones disponibles en el Capítulo 11. Aunado a esto, la precisión del sistema no se ve perjudicada por la utilización de manufactura aditiva, tal y como se demostrará en el Capítulo 8. Es menester recalcar que, cuando fue posible y válido, se removió material sobrante, esto con el fin de ahorrar filamento de impresión 3D, disminuir el peso del mecanismo, así como disminuir los tiempos de manufactura, los cuales son críticos para el plazo de desarrollo del prototipo del presente proyecto. Piezas que fueron diseñadas tomando en cuenta lo anterior se muestran en las Figuras 6.3 y 6.8, las cuales tienen vaciados y cavidades para tales fines.

Para observar una muestra del movimiento del sistema por todas las posiciones de la secuencia de calibración, así como el accionamiento del pedal de la bomba de vacío, es posible observar un extracto de vídeo [aquí](#). En el vídeo se observa una corrida de calibración de caras laterales con los bloques patrón de mayor dimensión nominal (100 mm). La calibración para este valor nominal es especialmente crítica ya que, como se observa en el vídeo, los bloques patrón se apoyan sobre su cara rectangular de menor área, con lo cual, cualquier vibración del mecanismo diseñado puede provocar que los bloques se caigan del comparador, dañándolos de forma irreversible. Además, por el tamaño de los bloques, se utiliza la plantilla metálica de movimiento más grande, lo que posibilita observar la conformidad del diseño con lo requerido para la secuencia de calibración. La validación detallada del sistema se muestra en el Capítulo 8.

---

---

# CAPÍTULO 7

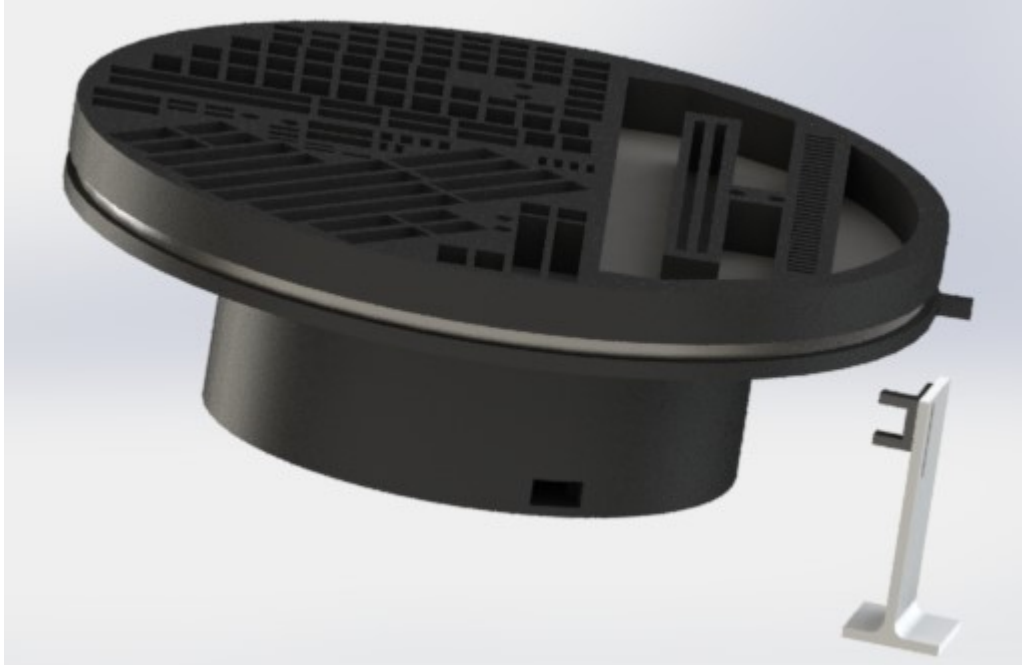
---

## MECANISMO PARA LA EJECUCIÓN SEMIAUTOMÁTICA DE LAS ÓRDENES DE TRABAJO

A continuación, se describe el mecanismo de ordenamiento de bloques diseñado, el cual, tal y como se mencionó anteriormente, es el encargado de alojar a las parejas de bloques para el proceso de calibración, con el fin de facilitar la ejecución de las órdenes de trabajo del LD, así como agilizar la equiparación térmica entre los bloques y las cercanías del equipo comparador.

### **7.1 Diseño mecánico**

En la Figura 7.1 se muestra el mecanismo de ordenamiento diseñado, cuyos componentes, decisiones de diseño y aspectos destacables serán explicados seguidamente.



**Figura 7.1:** Mecanismo de ordenamiento de bloques para la gestión de órdenes de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se indicó en la fase de selección de conceptos, el mecanismo de ordenamiento de bloques seleccionado tiene forma circular, cuya intención es girar sobre su propio eje para que de esta forma los bloques a calibrar sean acercados al comparador de bloques según el orden de atención del conjunto. Como se evidencia en la Figura 7.1, este plato giratorio está conformado por 3 piezas circulares, las cuales descansan sobre una base, también circular, mediante rodines de bolas (ver Figura 7.2), esto para que todo el peso de la estructura giratoria superior sea transferido a las paredes de esta base y no al motor que se encarga de hacer girar el sistema.



**Figura 7.2:** Rueda de bola. Fuente: Basado en [44]

La base superior (ver Figura 7.3), es la pieza que tiene los intersticios que alojarán a las 122 parejas de bloques que tiene capacidad de calibrar el LD. Cada intersticio está hecho de acuerdo a las dimensiones de los bloques, tomando en cuenta una leve expansión de la cavidad para el fácil acomodo de estos, así como para evitar rayones.



**Figura 7.3:** Base superior del disco giratorio para el alojamiento de bloques. Fuente: Elaboración propia

La pieza de alojamiento superior está impresa en plástico ABS, esto tomando en

cuenta la ligereza del material, posibilidad de manufactura en el LD, costos, así como su validez de uso tal y como se indica en [5, p. 11], donde se establece que para almacenar bloques que serán sometidos a calibración, es adecuado el uso de un contenedor de plástico.

El dimensionamiento de los bloques que aloja el mecanismo se puede encontrar en la Tabla 7.1, donde se indican las dimensiones de los 112 bloques de los conjuntos estandarizados [45], así como 10 bloques con los que dispone el LD, los cuales fueron comprados por separado para atender necesidades específicas de clientes.

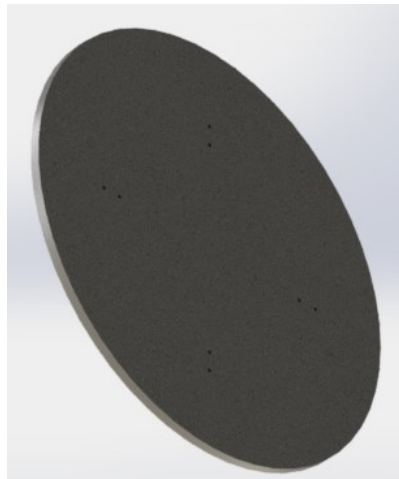
**Tabla 7.1:** Tabla de medidas del conjunto de bloques.

Origen	Valor Nominal	Paso	Cantidad
Set estándar	1.0005	-	1
	1.001 - 1.009	0.001	9
	1.01 - 1.49	0.01	49
	0.5 - 24.5	0.5	49
	25 - 100	25	4
Compra individual	1.6 - 1.9	0.1	4
	30 - 90, excluyendo 50	10	6

El acomodo de las cavidades que alojan a los bloques se realizó de tal forma que se sacara máximo provecho al espacio, tanto de la mesa de trabajo, como tomando en cuenta las capacidades de manufactura aditiva de las impresoras del LD. La posición de cada uno de los intersticios de los bloques está almacenada en un documento de texto, el cual será consultado por el sistema de control de órdenes de trabajo, esto para posteriormente mover el plato giratorio a la posición angular adecuada según el siguiente bloque a calibrar. Además de las cavidades para los bloques, se agregaron espacios para las 2 plantillas metálicas de la secuencia de movimiento, así como para la brocha de limpieza de los bloques, elementos que no tenían un espacio adecuado y ordenado para su almacenamiento.

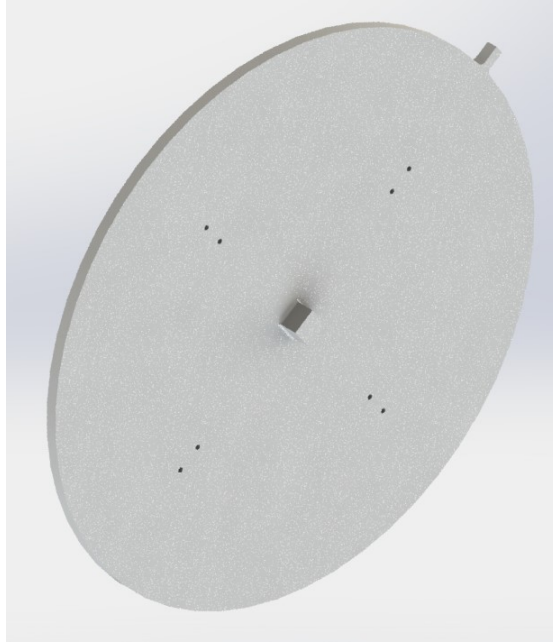
Como se observó en la Figura 7.3, la pieza de alojamiento de bloques tiene intersticios pasantes, esto ya que los bloques se desea descansen sobre una superficie

metálica, lo cual, según el criterio experto del encargado del LD, mejora la incertidumbre de las calibraciones realizadas, factor que ha comprobado a lo largo de 4 años de experiencia de servicio en el laboratorio. El principio que justifica la efectividad del contacto de los bloques a una misma superficie es el de conducción térmica, concepto que fue expuesto en el capítulo 2. Por ende, la pieza inferior en la cual todos los bloques reposan, se cortó en acero inoxidable, que es indispensable para evitar tanto la corrosión del mecanismo como de los bloques. El acabado solicitado al proveedor es pulido, ya que debe asegurarse no rayar ningún bloque patrón. Esta pieza metálica se encuentra en el medio del plato giratorio, y se muestra en la Figura 7.4.



**Figura 7.4:** Placa de acero inoxidable. Fuente: Elaboración propia

Por último, respecto a las piezas del mecanismo giratorio superior, se encuentra la pieza mostrada en la Figura 7.5, la cual es la que recibirá el rotacional a través de un eje ubicado en la parte baja. Esta pieza trasladará el movimiento rotacional a las 2 piezas superiores mencionadas anteriormente ya que estas se encuentran atornilladas. El eje de perfil cuadrado que sobresale de la pieza inferior entrará en un acople que transmite el movimiento rotacional del motor a pasos al mecanismo giratorio en forma de disco. El acople entre la base inferior y el motor a pasos se muestra en la Figura 7.8.



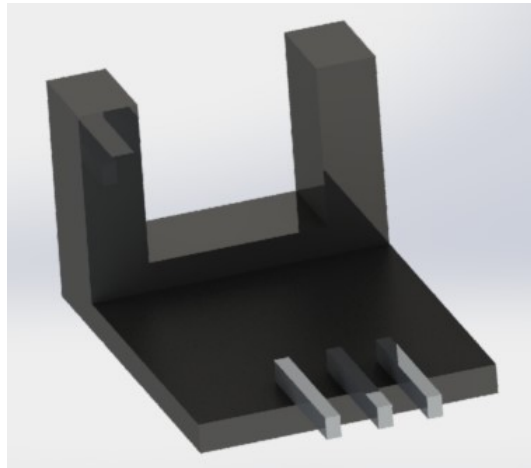
**Figura 7.5:** Base inferior del disco giratorio. Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el eje saliente de la base inferior no recibirá el peso de la estructura de disco giratorio, solo deberá lidiar con la inercia rotacional de esta, ya que la estructura giratoria reposará sobre las paredes circulares de la base de alojamiento, mostrada en la Figura 7.9. Dado que la distribución de los bloques en el disco giratorio no es simétrica, el centro de gravedad no reside en el centro geométrico de la estructura, lo cual genera un torque que ocasionaría el vuelco del plato. No obstante, dado que este plato reposa sobre rodines, estos reciben una fuerza normal que responde a este acomodo no simétrico, cancelando en la sumatoria de momentos, al torque que amenaza con volcar en disco.

Al realizar la simulación de esfuerzos sobre esta pieza crítica para el funcionamiento del sistema, se determinó que cuenta con un factor de seguridad de 14 (ver Capítulo 11). Es importante mencionar que este eje saliente cuenta con un redondeado en su base, esto con el fin de minimizar los concentradores de esfuerzos presentes en la pieza.

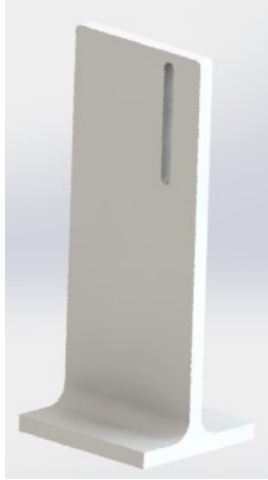
En añadidura, tal y como es evidente en las Figuras 7.1 y 7.5, la base inferior tiene una saliente lateral rectangular, el cual tiene un propósito de control para la ejecución

de órdenes de trabajo. Debido a que el sistema debe situarse angularmente en la posición que acerque la pareja de bloques a calibrar al equipo comparador, el sistema debe conocer su posición absoluta respecto a este último. Tal y como se determinó en la fase de selección de conceptos, para obtener esta posición absoluta se utiliza un sensor infrarrojo tipo *slotted*, el cual conmuta su estado en el momento que algún objeto entra en su cavidad. En este caso, el objeto que entra en la cavidad del sensor (mostrado en la Figura 7.6), es la saliente rectangular de la base inferior.

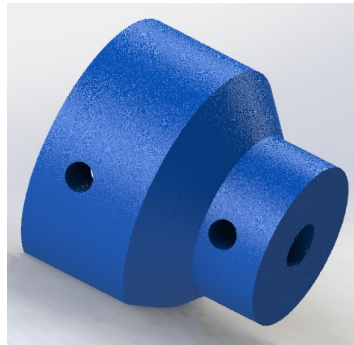


**Figura 7.6:** Sensor infrarrojo tipo *slotted*. Fuente: Elaboración propia

El sensor infrarrojo está montado en una base diseñada para tal fin (ver Figura 7.7), la cual permite un ajuste de la altura a la cual se ubica el sensor, esto mediante la incorporación de un *ojo chino*.



**Figura 7.7:** Soporte ajustable del sensor infrarrojo. Fuente: Elaboración propia

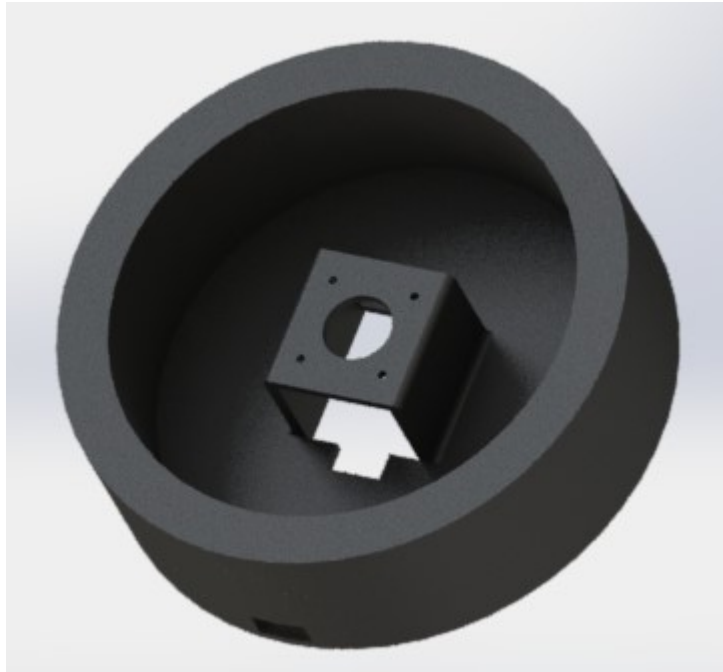


**Figura 7.8:** Acople entre stepper y base inferior del disco giratorio. Fuente: Elaboración propia

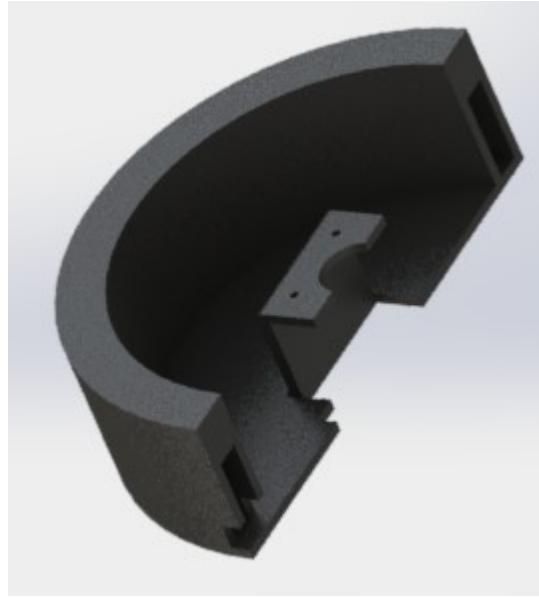
En cuanto al acople entre el motor y la base inferior del disco giratorio (Figura 7.8), cabe destacar que se incorporó un chaflán en la zona de cambio de radio, esto con el objetivo de suprimir concentradores de esfuerzos en la pieza que transmite el movimiento rotacional. Uno de sus extremos huecos tiene la forma del eje del motor a pasos, y su ajuste es a presión, con el fin de que el giro sea transmitido íntegramente; mientras que el otro extremo hueco tiene sección cuadrada donde entra el eje de la base superior. Al realizar el análisis de esfuerzos mediante simulación en SolidWorks (ver Capítulo 11), se encontró que el factor de seguridad para este acople es de 2.

Ahora, se procede a describir la base que recibe el peso del plato giratorio y funge de soporte para el motor a pasos, la cual se muestra en la Figura 7.9. Las paredes

circulares de esta base son las que reciben a los rodines en su recorrido de trayectoria también circular. Estas paredes son lo suficientemente anchas para que los rodines de bolas circulen de forma adecuada, esto sin sacrificar el ahorro de material ni el peso de la pieza, ya que internamente estas paredes no son rellenas, exceptuando la zona cercana al contacto con los rodines y la mesa de trabajo, tal y como se esclarece en la Figura 7.10. Esta base permite sujetar el motor a pasos mediante cuatro tornillos, lo cual permite que el eje de giro del plato giratorio y del motor a pasos estén alineados, evitando el uso de bandas, engranes u otro mecanismo que agrega complejidad y margen de error adicional a la propuesta de solución.

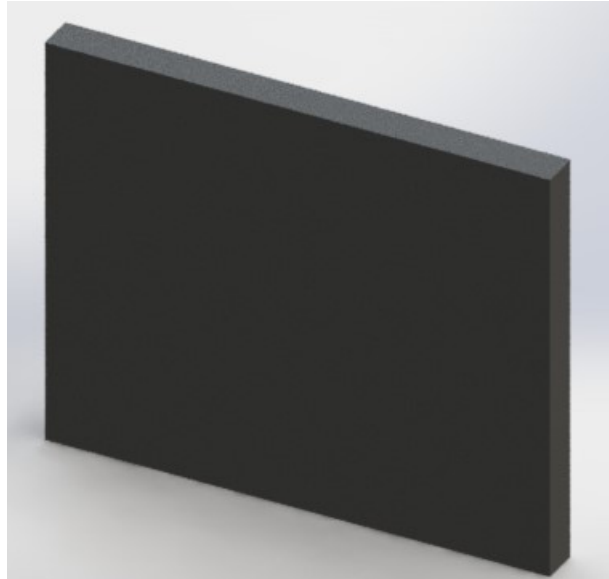


**Figura 7.9:** Base de alojamiento de stepper y reposo del plato giratorio. Fuente: Elaboración propia



**Figura 7.10:** Base de alojamiento de stepper y reposo del plato giratorio (corte transversal). Fuente: Elaboración propia

Una vez atornillado el motor a pasos, se procede a colocar la tapa diseñada para cubrir el espacio por donde entra el motor. Esta tapa se muestra en la Figura 7.11. Mediante esta tapa el motor no queda suspendido, lo cual evita que la pieza que lo soporta sufra esfuerzos mecánicos. Además, en caso de que parte del peso del plato giratorio recaiga sobre el motor a pasos (caso que es indeseado y bajo condiciones de diseño se suprimió al máximo esta posibilidad), esta tapa sirve de apoyo de tal forma que el soporte del motor no falle, ya que el peso se trasladaría a la mesa de trabajo mediante la tapa. Es destacable que la base de alojamiento tiene una pestaña alrededor del orificio de la tapa, la cual permite quitar la tapa con facilidad (ver Figura 7.9).



**Figura 7.11:** Tapa de la base de alojamiento del motor a pasos. Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el diseño mostrado fue estructurado de tal forma que el montaje sea sencillo, se utilice solamente el material necesario asegurando la funcionalidad de los mecanismos y se aproveche al máximo el espacio disponible en la mesa de trabajo. Dentro de las consideraciones adicionales tomadas en cuenta está que las piezas de las Figuras 7.5 y 7.8, no fueron diseñadas como una sola pieza, esto anticipando el caso de que se requiera cambiar el acople con el motor, debido a fractura o desgaste de este, con lo cual, no es necesario manufacturar toda la pieza de la base inferior, la cual es grande en comparación del acople.

## 7.2 Desarrollo programático

### 7.2.1 Selección del sistema computacional

Para desarrollar el sistema de control que procese la información del conjunto de bloques, monitoree el proceso de calibración (para obtener indicadores de desempeño), lea e interprete la entrada del sensor infrarrojo y controle el motor a pasos, se seleccionó el *hardware* adecuado bajo los criterios detallados seguidamente, dentro de las opciones contempladas enunciadas en el Capítulo 3: PXI, computador del LD con módulos de entrada y salida (E/S) National Instruments (NI), Raspberry Pi 4 y un sistema PSoC de Cypress.

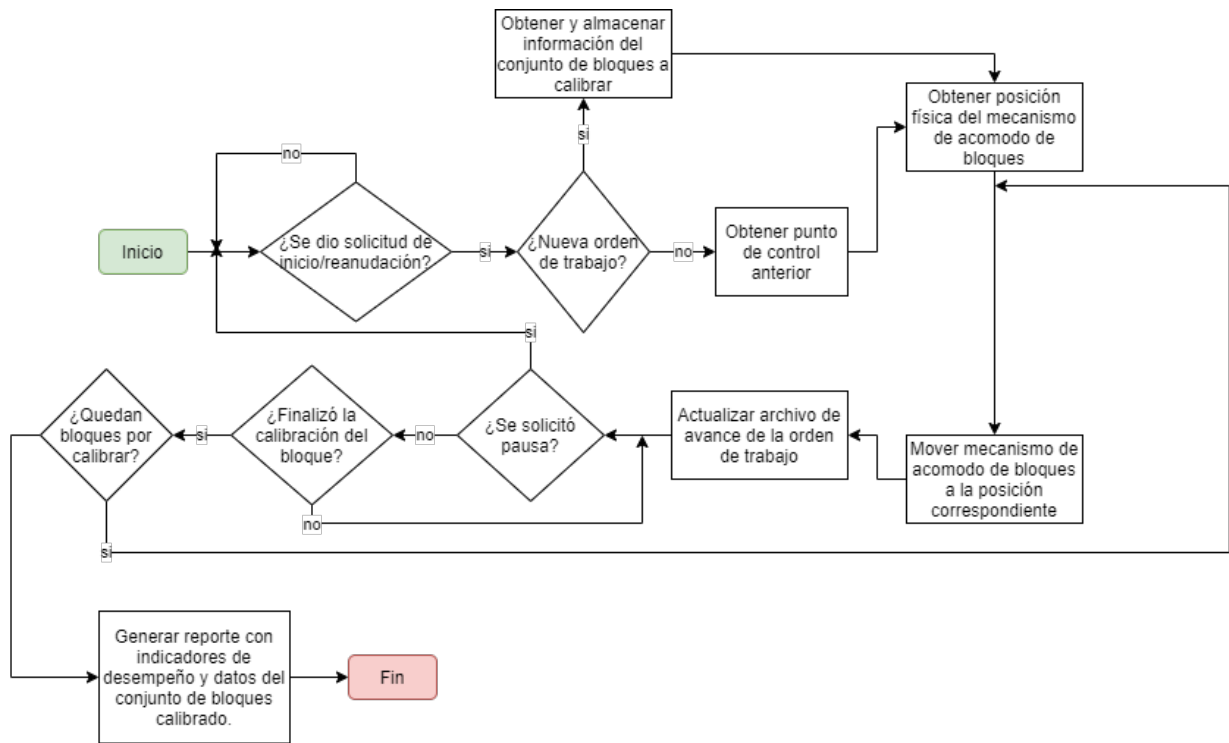
1. Método de programación: se tomaron en consideración sistemas del fabricante National Instruments tales como el PXI y los módulos de E/S digitales ya que el LD cuenta con licenciamiento corporativo de LabVIEW, además de que el sistema de captura de datos que se usa actualmente fue programado en dicho entorno. En cuanto al dispositivo PSoC este cuenta con una interfaz de programación propia llamada PSoC Designer [27], donde se programa adicionalmente en C. En el caso de la Raspberry Pi, es programable mediante Python, lo cual, es de gran ventaja ya que es *software* libre, y se ha tenido gran interacción con este lenguaje a lo largo del período de estudios.
2. Sistema dedicado al proceso: se desea por parte del cliente que el sistema computacional escogido esté embebido en el proceso de calibración dimensional. Por este motivo, debe tomarse en consideración que para controlar el mecanismo de secuencia de calibración (sistema de control desarrollado por el equipo del LD, fuera del alcance de este proyecto), se requieren al menos 16 pines de E/S adicionales a los requeridos para el sistema de control de órdenes de trabajo, es decir 7 pines más. Este aspecto es importante ya que los módulos de E/S de NI aumentan considerablemente de precio conforme se solicitan más pines. Hay que

tomar en consideración adicionalmente los 3 puertos USB requeridos para los equipos de medición TESA Modul, Vaisala y Fluke, indispensables para la toma de datos necesarios para emitir el certificado de calibración.

3. Interfaz de usuario con recursos disponibles en el LD: el cliente busca interactuar de forma sencilla con el sistema de control, tal y como lo hace con el sistema de adquisición de datos actualmente. Debido a ello, la Raspberry Pi sobresale como potencial *hardware* seleccionado, ya que ofrece la conexión a un monitor por medio de HDMI, en el cual se puede visualizar la interfaz de usuario programada en Python utilizando la biblioteca Tkinter integrada. En cuanto al PSoC, en su operación individual, ofrece opciones de pantalla LCD u OLED poco atractivas.
4. Disponibilidad inmediata a nivel nacional: según la búsqueda de mercado realizada, el sistema PSoC debe ser importado de proveedores extranjeros, por ejemplo el mexicano Mouser Electronics, lo cual adiciona plazos de contacto y transporte indeseados. En el caso de los sistemas NI, en el período de búsqueda, los dispositivos no se encuentran disponibles para venta en línea, con lo cual, se debe contactar a un representante de ventas para solicitar la cotización y planificar la logística subsiguiente.
5. Costo de adquisición: aunado a todo lo anterior, el costo representa una limitante no sujeta a modificaciones ni negociaciones. El sistema PSoC es muy económico, no obstante no es accesible de forma rápida a nivel nacional. En cuanto a los sistemas NI, estos tienen un costo más elevado, alrededor de \$ 620 el módulo PXI. En el caso de la Raspberry Pi, el mercado costarricense es capaz de suplir la necesidad a un costo moderado, no excesivamente distante del costo internacional promedio, alrededor de los \$ 145, lo cual está dentro de las capacidades presupuestarias del LD, y se alinea con lo mencionado en los criterios anteriores, por este motivo fue elegida para este desarrollo.

### 7.2.2 Descripción de la funcionalidad de sistema de control de órdenes de trabajo

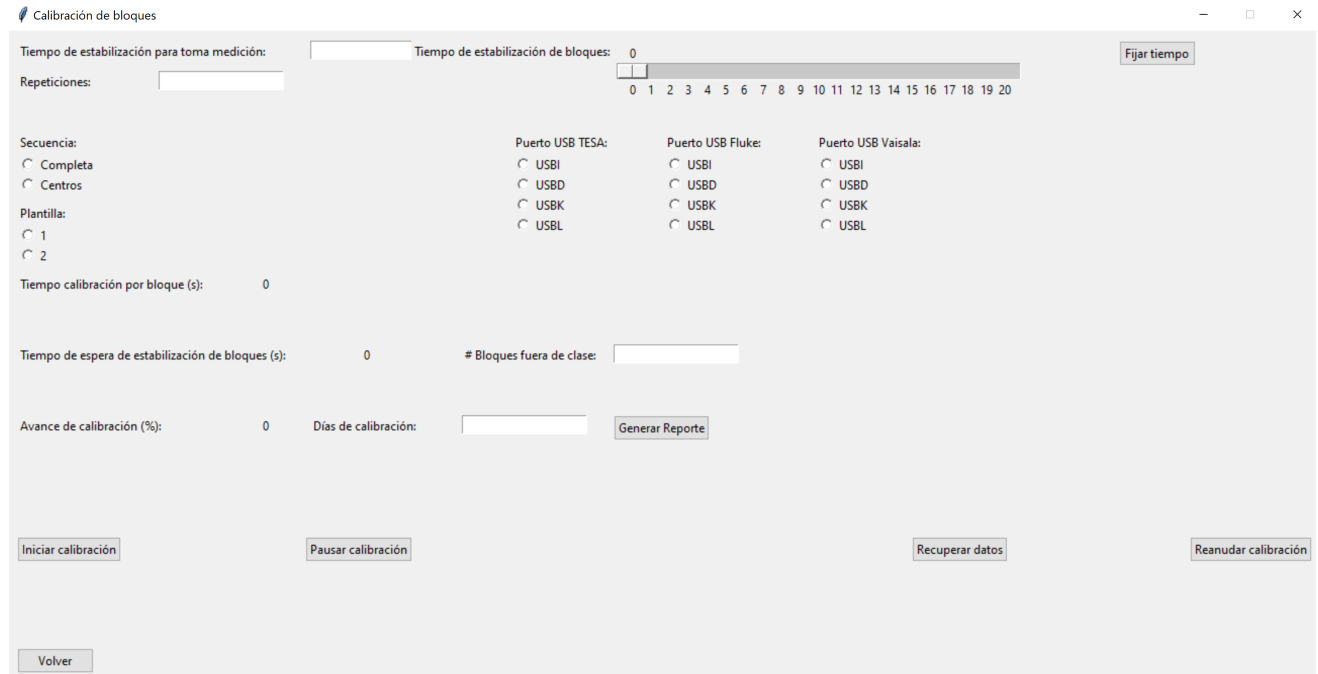
A continuación se realiza una descripción a nivel de funcionalidad y de lógica del sistema de control desarrollado. El detalle a nivel de código se puede consultar en el Capítulo 11, el cual se encuentra comentado para entendimiento del lector. El sistema de control programado sigue el flujo de operación especificado en la Figura 7.12.



**Figura 7.12:** Diagrama de flujo del sistema de control de órdenes de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se muestra en la Figura 7.12, el sistema aguarda por una señal de inicio o reanudación, que llega al dar click al botón correspondiente en la interfaz de usuario (ver Figura 7.15). El sistema obtiene de una hoja de cálculo almacenada de forma local, el conjunto de bloques de la calibración actual (el cual fue ingresado o seleccionado por el usuario, ver Figuras 7.13 y 7.14). En el caso de que se reanude una orden de trabajo, el sistema de control accede a un documento de texto denominado “actual”, donde se almacena el valor nominal de la última pareja de bloques calibrada.





**Figura 7.15:** Interfaz de usuario para la gestión de órdenes de trabajo y ejecución de la secuencia de calibración [46]

En caso de requerir acercar la primera pareja de bloques de todo el conjunto o que se dé una reanudación del proceso, se da la orden al mecanismo giratorio de moverse hasta la posición de *home*, esto utilizando la señal de entrada digital del sensor infrarrojo destinada para tal fin. Este paso es requerido en estos casos ya que se debe encontrar la posición absoluta del disco giratorio, para a partir de este punto, ejecutar los movimientos deseados. Dependiendo de la cantidad de pasos dados por el *stepper* hasta llegar a *home*, se realiza una corrección angular proporcional a esta cantidad, tomando en cuenta los hallazgos inerciales que se documentaron en el Capítulo 8.

Seguidamente, el sistema procederá a moverse hasta la posición angular aproximada a la que se encuentra el siguiente bloque a calibrar. Para ello, se inicia la orden de trabajo por los bloques de mayor longitud nominal, tal y como lo establece el procedimiento del LD [8]. El sistema de control busca el bloque actual en una hoja de cálculo que almacena las posiciones angulares de los bloques en el mecanismo de ordenamiento. Un fragmento de esta hoja de cálculo se muestra en la Figura 7.16

	A	B	C
1	Valor Nominal (mm)	Posición angular (grados)	Posición Angular (steps clockwise desde home)
2	20	201,6	112
3	20,5	201,6	112
4	21	201,6	112
5	21,5	189	105
6	22	189	105
7	22,5	189	105
8	23	93,6	52
9	23,5	178,2	99
10	24	178,2	99
11	24,5	156,6	87
12	25	115,2	64
13	<b>30</b>	156,6	87
14	<b>40</b>	115,2	64
15	50	135	75
16	<b>60</b>	124,2	69
17	<b>70</b>	145,8	81
18	75	189	105
19	<b>80</b>	82,8	46
20	<b>90</b>	124,2	69
21	100	135	75

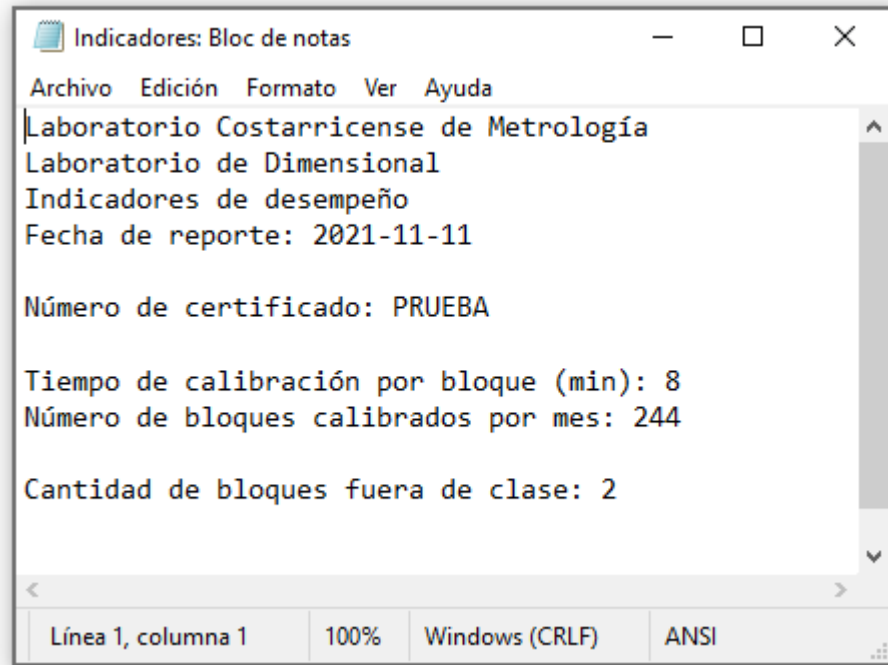
**Figura 7.16:** Hoja de cálculo con las posiciones angulares de los bloques en el mecanismo de ordenamiento. Fuente: Elaboración propia

Una vez acercada la pareja de bloques al equipo comparador, se inhabilita el motor, y se inicia una cuenta regresiva con el tiempo de estabilización definido por el usuario, configurable mediante el *slider* disponible en la interfaz gráfica de usuario visible en la Figura 7.15. Mientras este tiempo no haya transcurrido, la secuencia automática de calibración no deberá ser iniciada. Este tiempo puede extenderse hasta 20 minutos si el usuario lo desea.

Después de que el usuario ingresa los bloques al comparador y transcurrió el tiempo de estabilización (mostrado en la interfaz de la Figura 7.15), se debe presionar el botón de inicio de secuencia automática (programada por el equipo del LD para controlar el mecanismo diseñado que recorre las 6 posiciones de calibración). Una vez finalizada la toma de datos de la pareja de bloques, el sistema de control de órdenes de trabajo modifica el archivo de texto que almacena el último bloque calibrado. Posteriormente, se revisa si quedan más bloques por calibrar en el conjunto ingresado por el usuario, y de ser el caso repite el proceso; si no es así, se da por finalizada la orden de trabajo.

Después de que el encargado del LD calcula los resultados de las calibraciones de los bloques, puede ingresar al sistema de control aquellos bloques fuera de clase, para

que sean almacenados en el historial del LD. Si lo desea, puede presionar el botón de generar reporte, lo cual generará un archivo de texto con los indicadores de desempeño actuales, como el que se muestra en la Figura 7.17.



**Figura 7.17:** Informe de indicadores de desempeño generado [46]

El sistema de control de órdenes de trabajo fue incorporado al código del sistema semiautomatizado de calibración dimensional (elaborado por el equipo del LD), esto con el fin de gestionar el proceso de calibración desde una sola interfaz de usuario centralizada, tal y como se observó en las Figuras 7.13, 7.14 y 7.15.

Para observar una muestra del movimiento del mecanismo giratorio al ordenársele desplazarse a una posición de *steps* solicitada, así como atender a la orden de girar hasta la posición de *home*, se puede acceder al siguiente fragmento de [vídeo](#). Nótese que la diferencia entre los sonidos al realizar los movimientos de *gohome*, y moverse a un ángulo definido, se deben a que la estrategia de movimiento es distinta, el primero de ellos toma decisiones cada paso que da (al monitorear el sensor infrarrojo), mientras que en el segundo caso, se dan una cantidad definida de pasos de forma continua. Estas

discrepancias se traducen en frecuencia de ejecución de pasos, y por ello, en el sonido que generan.

---

---

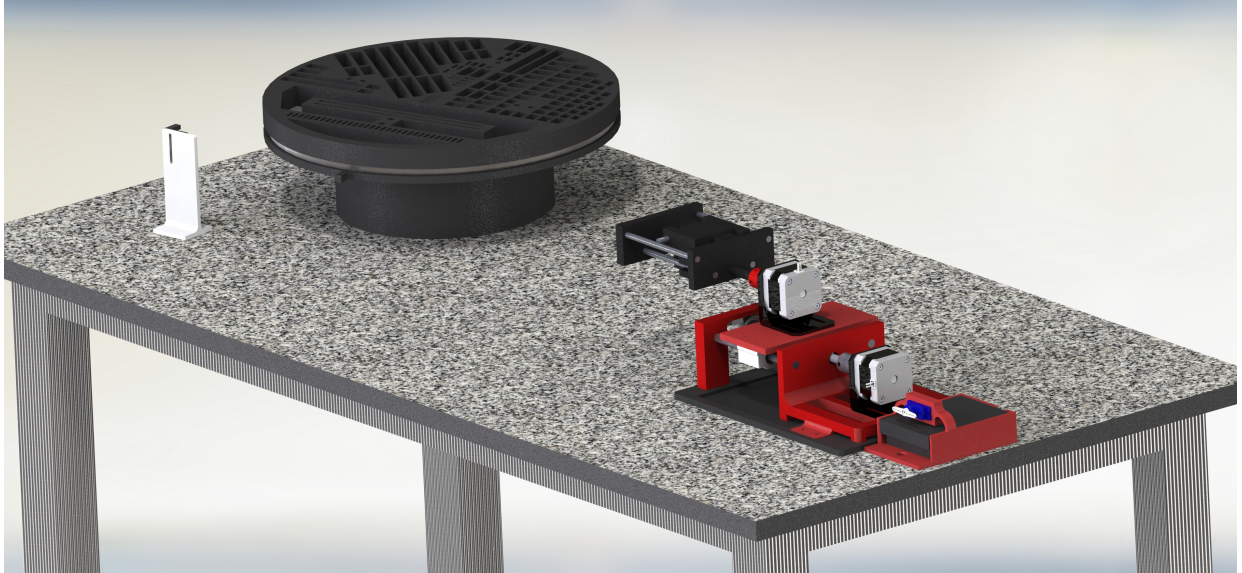
# CAPÍTULO 8

---

## VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En el presente capítulo, se expondrán las estrategias de validación implementadas para prototipo de la propuesta de solución, alineadas con la fase de prueba de conceptos de la metodología de diseño utilizada [16]. Dada la naturaleza del proyecto, y tomando en cuenta la recomendación normativa [7, p. 17], se plantea una validación modular de la funcionalidad de cada uno de los principales componentes del concepto ganador, los cuales son: mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración, accionador de pedal y sistema de control del mecanismo de alojamiento de bloques. Las estrategias de validación incorporadas fueron diseñadas de conformidad con la normativa INTE/ISO/IEC 17025:2017 [7, p. 8], cuyos aspectos aplicables serán descritos a lo largo del capítulo según corresponda.

En la Figura 8.1 se muestra el diseño elaborado (aquellos componentes tangibles de forma visual), el cual, fue puesto a prueba mediante las validaciones que se comentan más adelante.



**Figura 8.1:** Diseño mecánico para la ejecución de la secuencia de calibración y la atención de órdenes de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Se identificó que la validación de los procesos dentro del LD debe regirse bajo los puntos establecidos por la normativa [7, p. 13-15], aquellos aplicables se enuncian a continuación:

1. Debe evaluarse el sesgo y la precisión utilizando patrones de referencia: por este motivo se realizaron corridas de calibración utilizando los patrones del laboratorio, con el fin de reproducir de forma fehaciente la operación a futuro del prototipo en el LD.
2. Debe demostrarse la robustez del método a través de la variación de parámetros controlados: debido a ello se probó el movimiento del mecanismo para las dos plantillas metálicas, variando el rango de giro de los motores, así como el modo de paso de estos. Es importante recalcar que ni la temperatura ni la humedad serán variadas, ya que estas condiciones están controladas dentro del LD y obedecen a lo dictado por las normativas y el manual de calibración [20] [7] [8]. No obstante, se reportará su valor en las pruebas realizadas, de tal forma que se tenga trazabilidad de la forma más precisa posible de las condiciones y métodos seguidos para la

validación.

3. El método debe cumplir con las características de desempeño requeridas por el cliente, en este caso el LD, como por ejemplo el rango de medición, precisión de los movimientos, entre otras.

A continuación, se describen las estrategias de validación específicas para cada uno de los tres componentes principales del prototipo de solución mencionados anteriormente.

## **8.1 Mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración**

Con el fin de dar validez a las calibraciones que se efectuarán con el sistema semiautomático de ejecución de la secuencia de medición, se plantea un estudio de repetibilidad y de reproducibilidad, se realizará una evaluación del rango de movimiento y su precisión, lo cual, es requerido para recorrer las seis posiciones de la secuencia de calibración, aspectos que se explicarán a continuación.

### **8.1.1 Rango y precisión de los movimientos de la secuencia de calibración**

En este experimento, se programaron tres secuencias simples de movimiento, dos de ellas buscan abarcar todo el rango de movimiento del eje X, esto para cada una de las dos plantillas metálicas; la tercera secuencia apunta a la verificación del movimiento del eje Y (que no cambia entre plantillas). Estas pruebas buscan determinar el correcto desplazamiento por todo el rango de movimiento requerido, así como la precisión con la que opera, esto en concordancia con el punto 4 referente a normativa enunciado anteriormente.

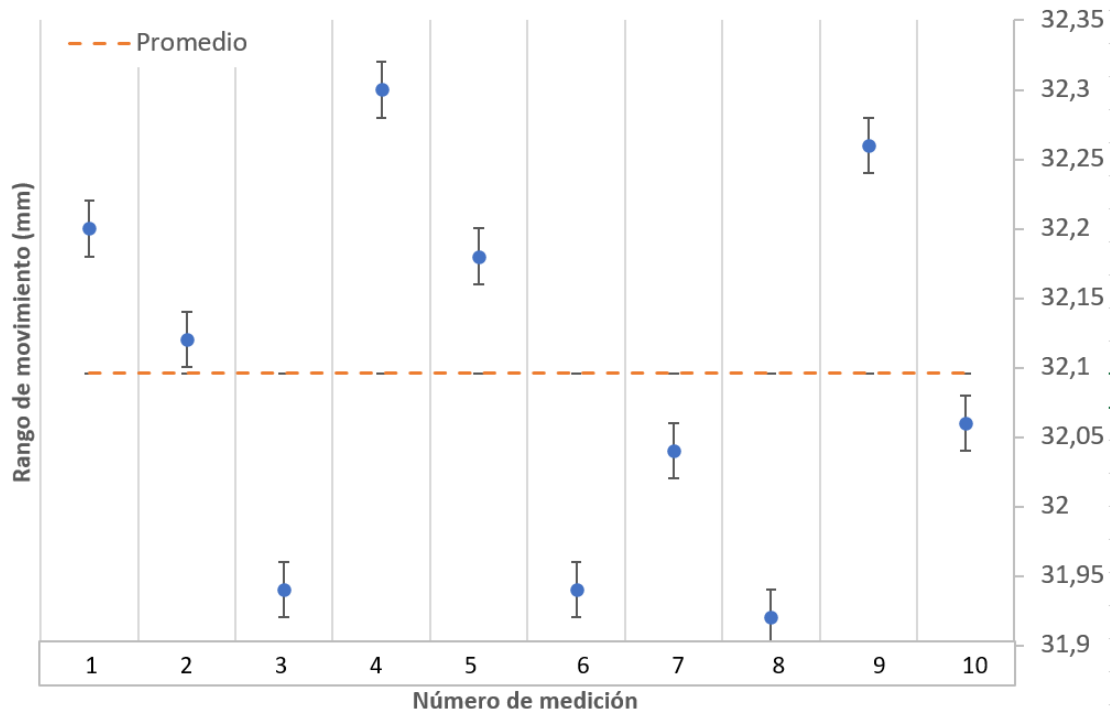
Para medir los rangos de movimiento de ambos ejes, se utiliza un *vernier*, el cual, medirá la distancia entre dos caras del mecanismo, una cara fija y otra que se desplaza. Los resultados de estas pruebas se muestran en las Figuras 8.2, 8.3 y 8.4. La reproducibilidad se incorpora al realizar la conexión y desconexión de los actuadores en cada corrida, alternar la persona que da inicio a la secuencia de movimiento (con ayuda de una colaboradora del equipo del LD, responsable de dar inicio a la segunda mitad de cinco mediciones de cada subrutina), así como la fluctuación de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, esto durante el día de pruebas de validación (ver Tabla 8.1).

**Tabla 8.1:** Condiciones de prueba de la propuesta de solución

Número de medición	1	2	3
Hora del día	10 am	2 pm	4 pm
Temperatura del LD ( $\pm 0.01$ °C)	20.68	20.50	20.34
Temperatura del disco giratorio ( $\pm 0.001$ °C)	20.906	20.886	20.872
Humedad relativa ( $\pm 0.01$ %)	54.57	53.86	53.11
Presión atmosférica ( $\pm 0.01$ hPa)	878.97	878.93	878.68

Cabe destacar que las mediciones reportadas en la Tabla 8.1 se realizaron con los instrumentos: higrómetro Vaisala y termómetro Fluke 1529 Chub E-4.

La repetibilidad se evalúa en las pruebas ya que se mide la misma característica, con el mismo instrumento, supervisadas por el mismo observador (en este caso el autor del presente proyecto), dentro del mismo laboratorio.



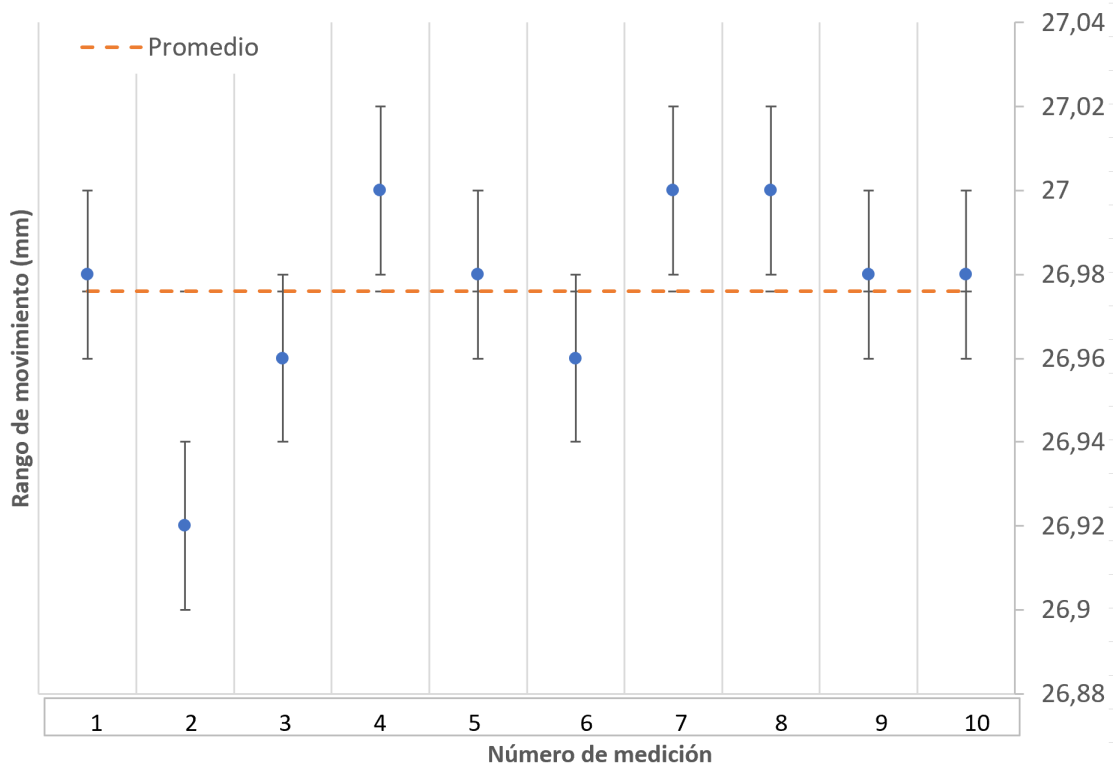
**Figura 8.2:** Mediciones del rango de movimiento del eje X para la plantilla de mayor tamaño. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se muestra en la Figura 8.2, el rango de movimiento para la plantilla de mayor tamaño es consistente y se encuentra dentro de las especificaciones establecidas para la propuesta de solución (especificaciones 1 y 3 de la Tabla 5.3). La máxima diferencia entre movimientos es de 0.38 mm, la desviación estándar es de 0.14, lo cual, indica que los movimientos son repetibles dentro de lo requerido por el cliente. El valor promedio del rango de movimiento, en este caso es de 32.10. La incertidumbre de medición mostrada corresponde a 0.02 mm, considerando el instrumento utilizado, que es un vernier disponible en el LD. De los datos obtenidos, se establece que el rango de movimiento para la plantilla de menor tamaño es de  $(32.11 \pm 0.19)$  mm. La incertidumbre reportada fue calculada tomando en cuenta la incertidumbre estadística para varias mediciones [47].

Es de suma importancia resaltar que se realizaron 10 medidas ya que, según [47], la cantidad de repeticiones depende la estabilidad del fenómeno en estudio. Dado que

esta propuesta de solución *ad hoc* se validará por primera vez, se seleccionó la categoría de inestable, para la cual se recomiendan al menos 6 mediciones, no obstante, para tener un rango de seguridad, se establecen 10. Este principio fue aplicado en todos los experimentos, a menos que se indique lo contrario.

Ya que se dispone con la posibilidad de variar el modo de paso con el que se controlan los motores a pasos, y observando los resultados obtenidos para la plantilla de menor tamaño, se cambia el modo de paso a *half step*, consiguiendo los resultados que se muestran en la Figura 8.3.

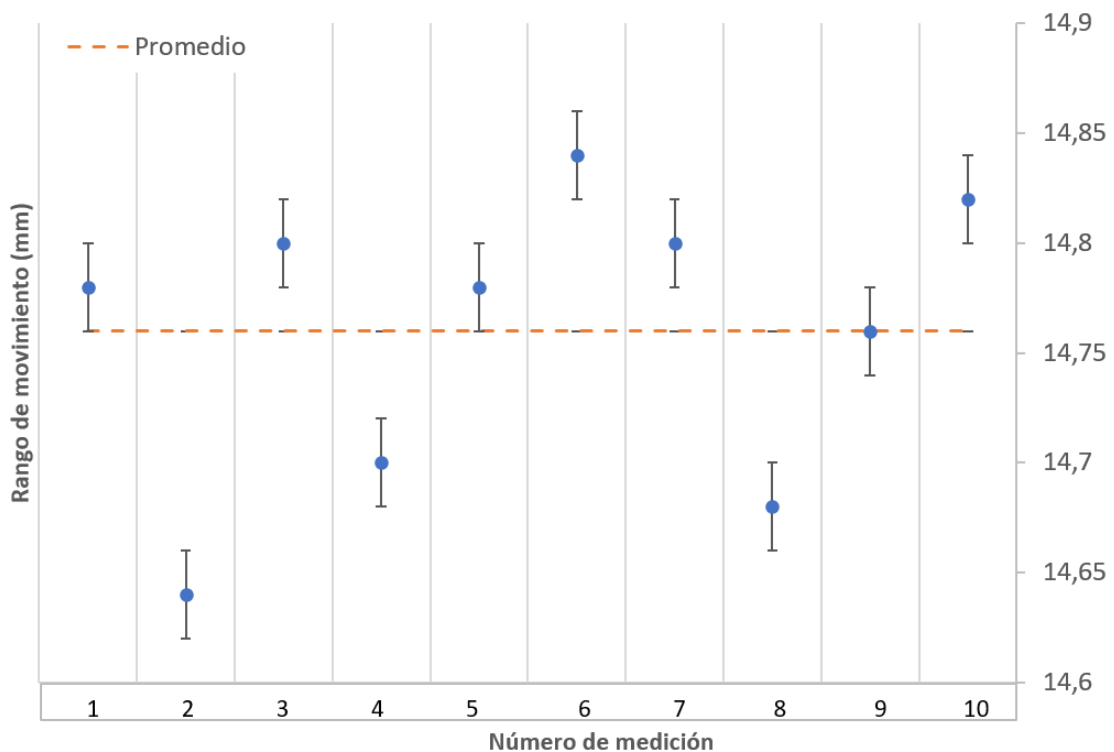


**Figura 8.3:** Mediciones del rango de movimiento del eje X para la plantilla de menor tamaño. Fuente: Elaboración propia

En el caso de la plantilla de menor tamaño, se determina que el movimiento es de igual forma consistente, y se encuentra dentro de las especificaciones establecidas (5.3), mostrando incluso una mejoría en la precisión alcanzada gracias al uso de *half step*. La máxima diferencia entre movimientos es de 0.08 mm, la desviación estándar es de 0.02,

lo cual, indica que los movimientos son altamente repetibles. El valor promedio del rango de movimiento, en este caso es de 26.98. De los datos obtenidos, se establece que el rango de movimiento para la plantilla de mayor tamaño es de  $(26.98 \pm 0.04)$  mm. La incertidumbre reportada fue calculada tomando en cuenta la incertidumbre estadística para varias mediciones [47].

Seguidamente, en la Figura 8.4, se muestran los resultados para el movimiento en el eje Y del mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración.



**Figura 8.4:** Mediciones del rango de movimiento del eje Y. Fuente: Elaboración propia

Según lo observado en la Figura 8.4, el rango de movimiento del eje Y es adecuado y preciso, cumpliendo con lo establecido dentro de las especificaciones 2 y 4 5.3). La máxima diferencia entre movimientos es de 0.20 mm, la desviación estándar es de 0.07, lo que significa que los movimientos son altamente repetibles. El valor promedio del rango de movimiento es de 14.76. La incertidumbre de medición mostrada corresponde a 0.02 mm, considerando el instrumento utilizado, que es un vernier disponible en el

LD. De los datos obtenidos, se establece que el rango de movimiento para el eje Y es de  $(14.76 \pm 0.10)$  mm. La incertidumbre reportada fue calculada tomando en consideración la incertidumbre estadística para varias mediciones [47].

Cabe destacar que este conjunto de experimentos se realizó con el mecanismo acoplado al equipo comparador de bloques, ya que en esta condición operará a futuro el prototipo. Adicionalmente, tal y como se demostró con los datos presentados anteriormente, se puede concluir que la propuesta de solución cumple con las especificaciones 1, 2, 3 y 4.

### 8.1.2 Accionador del pedal

Para evaluar el correcto funcionamiento del servomotor, encargado del accionamiento del pedal que conmuta la bomba de vacío, lo cual, es crítico para la preservación de la integridad de los bloques y el equipo comparador [7, p. 3-4], se propuso un experimento que consta de tres iteraciones. En cada iteración, se realiza el montaje del servomotor en su pieza de soporte, que comprende el ingresar y asegurar el pedal en el soporte, así como conectar el circuito de control al servomotor. Una iteración se realizó en la mañana, otra pasada la mitad del día, y la última en la tarde; se registraron los valores de humedad relativa y temperatura (ver Tabla 8.1), con el fin de descartar la influencia de estas variables en la efectividad del mecanismo [7, p. 7]. En cada iteración, se da señal de accionamiento un total de cinco veces; cada señal de accionamiento hace girar el eje del servomotor hasta la posición donde se espera realice la conmutación de la bomba.

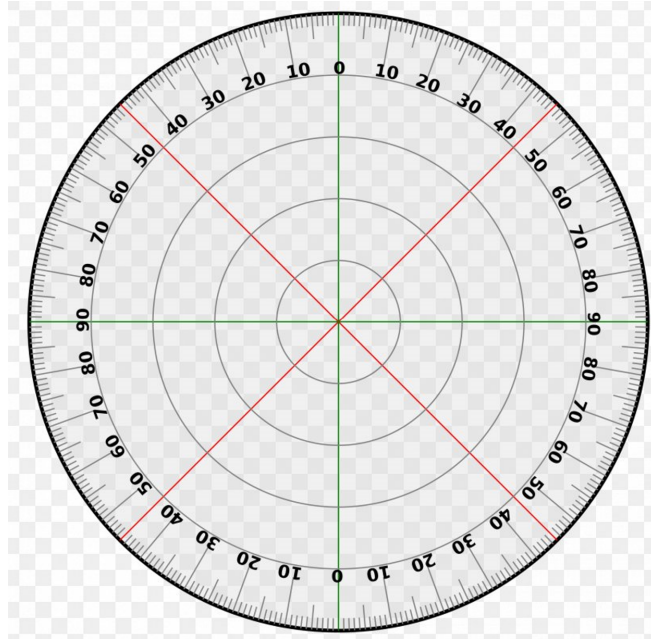
Al realizar las 15 corridas, todas resultaron exitosas con una condición *pasa*, ya que se logró accionar la bomba de vacío, de la misma forma como se observó en el vídeo presentado anteriormente en el Capítulo 6. Además, para el conjunto de corridas del experimento, al obtener un 100% de efectividad, no se observa dependencia en la efectividad del mecanismo por la variación de los factores tales como hora, temperatura

ni humedad relativa, con lo cual, la solución es robusta en cuanto a la variación de estos parámetros. Esto permite corroborar el cumplimiento de las especificaciones número 5 y 6 de la Tabla 5.3.

## **8.2 Sistema de control del mecanismo de alojamiento de bloques**

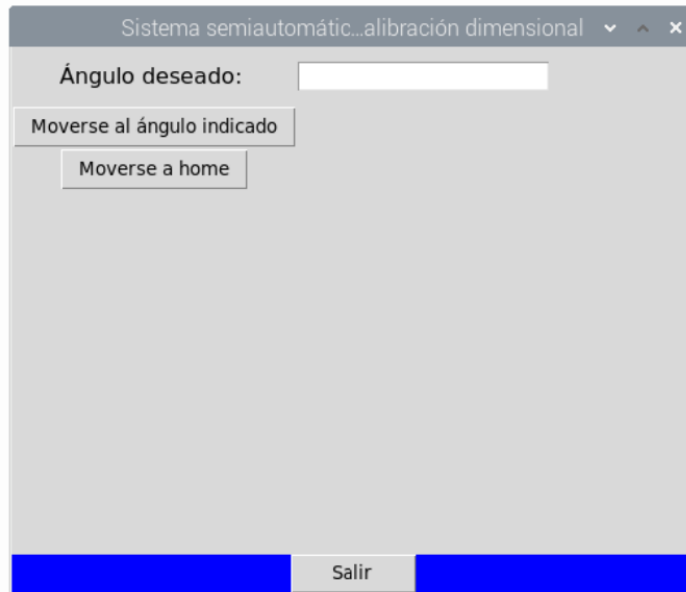
### **8.2.1 Movimiento a posiciones de atención de órdenes de trabajo**

Para la presente validación se empleó *narrativa de código*, donde se establece cuál es la salida esperada ante una entrada específica. Para comprobar que el mecanismo giratorio de ordenamiento de bloques recorre la totalidad del conjunto de bloques, y es capaz de moverse adecuadamente a una posición angular dada, se ejecutó un experimento de barrido de movimiento. Para este experimento se utilizó la plantilla circular mostrada en la Figura 8.5.



**Figura 8.5:** Plantilla circular para la validación del movimiento rotacional del mecanismo giratorio de ordenamiento de bloques. Fuente: Elaboración propia

El experimento consiste en ingresar al sistema una serie de ángulos de posicionamiento y que éste se desplace según corresponda al ángulo indicado. Al eje del motor se le adicionó un pequeño indicador plástico, esto para tener una referencia del ángulo absoluto del motor. Para hacer más eficiente este conjunto de pruebas se elaboró un código de prueba con interfaz de usuario, la cual, se muestra en la Figura 8.6.



**Figura 8.6:** Interfaz de usuario del código para validación de giro. Fuente: Elaboración propia

Se escogieron cuatro ángulos de prueba, espaciados de forma equidistante  $90^\circ$ , de tal forma que se cubra la totalidad de la circunferencia del mecanismo, y por ende, todo el conjunto de bloques almacenados. Los ángulos seleccionados se muestran en la Figura 8.5 en color verde. El proceso llevado a cabo fue ingresar el ángulo deseado en la interfaz de usuario, para posteriormente presionar el botón de moverse al ángulo indicado. Para cada posición se realizaron 3 iteraciones con el fin de evaluar la repetibilidad del movimiento. Tomando como base el aprendizaje de la validación del movimiento del eje X de la secuencia de calibración, se utilizó un modo de paso *half step*, con el objetivo de mejorar la precisión del movimiento. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.2.

**Tabla 8.2:** Resultados de movimiento rotacional del experimento de narrativa de código

Iteración	Ángulo solicitado	Ángulo medido ( $\pm 3^\circ$ )
1	90	96
2		93
3		93
1	180	186
2		186
3		186
1	270	276
2		276
3		276
1	360	366
2		369
3		366

Como se observa en la Tabla 8.2, los resultados obtenidos son muy valiosos para comprender la interacción del sistema de control con la naturaleza mecánica del mecanismo giratorio de ordenamiento de bloques que controla. Como se muestra en los resultados, existe un sobregiro al moverse a cada una de las posiciones requeridas. Esto se debe a la inercia rotacional del mecanismo de ordenamiento de bloques, en la cual contribuye en gran medida la placa de acero inoxidable solicitada por el cliente. La incertidumbre de medición de los ángulos se estableció tomando en cuenta el grosor de la pieza plástica y su visibilidad en la escala de la plantilla de la Figura 8.5.

Este efecto no había sido observado anteriormente en pruebas preliminares del sistema de control, ya que, por motivos de aprobación de presupuesto de parte del LCM, efectución del pago al proveedor, y tiempo de manufactura del disco de acero inoxidable, no fue posible contar con este último con mayor anticipación. No obstante, los resultados arrojados en la Tabla 8.2 son un insumo que permitió modificar el desarrollo programático en pro de la precisión de los movimientos rotacionales.

Tal y como se visualiza en la Tabla 8.2, la tendencia de sobregiro es ligeramente creciente conforme aumenta el ángulo deseado, con lo cual, se implementó una función lineal de compensación en la programación del sistema de atención de órdenes de

trabajo. La función se muestra en la Ecuación 8.1:

$$A = 0.025 \cdot D \quad (8.1)$$

donde A es el ángulo de ajuste para un determinado ángulo deseado D, dado  $D \in [0,360]^\circ$ . El objetivo de esta implementación es disminuir la cantidad de pasos que el motor a pasos tiene que dar teóricamente para llegar a una posición dada, tomando en consideración el sobregiro estimado. Al realizar esta incorporación, se obtuvieron los resultados de la Tabla 8.3.

**Tabla 8.3:** Resultados de movimiento rotacional del experimento de narrativa de código con corrección de ángulo

Iteración	Ángulo solicitado	Ángulo medido ( $\pm 3^\circ$ )
1	90	90
2		90
3		93
1	180	183
2		180
3		183
1	270	270
2		270
3		273
1	360	357
2		360
3		357

Tal y como se demuestra en la Tabla 8.3, el hallazgo de la fase de validación permitió realizar una mejora del desempeño del sistema de control de ejecución de órdenes de trabajo. Es menester recalcar además que, este tipo de hallazgos son de gran plusvalía en comparación con estimaciones de modelos analíticos, ya que factores como la fricción, no linealidades del comportamiento del motor, entre otras, hacen que el montaje y prueba del primer prototipo funcional muestren el comportamiento más cercano a la operación de la propuesta de solución. En adición, esta mejora corrobora el cumplimiento al seguir la metodología de diseño de ingeniería, que tal y como se

mencionó, tiene un carácter iterativo y de realimentación continua innegable.

A modo de conclusión de esta prueba de validación, se demostró el cumplimiento de la especificación número 11 definida en la Tabla 5.3. Es importante mencionar que el posicionamiento se asegura con un margen de error de  $\pm 3^\circ$ , lo cual es válido para orientar al usuario para la búsqueda del bloque, la cual está asistida por identificadores impresos en el mecanismo de ordenamiento de bloques, además de que se indica su valor nominal en la pantalla de interfaz de usuario.

## 8.2.2 Aseguramiento de la posición absoluta mediante sensor infrarrojo

Ya que los giros del mecanismo de ordenamiento de bloques deben tener una referencia absoluta, se llevó a cabo un experimento para corroborar el correcto funcionamiento del sensor infrarrojo que detecta la saliente del disco giratorio. Esta saliente le indica al sistema de control cuál es la posición  $\theta$ , o como se le denomina en el código *home*. A pesar de que este experimento no está ligado de forma directa a una especificación, si lo está de forma indirecta con la especificación número 11, la cual acaba de ser validada en la subsección anterior, ya que, si la referencia del movimiento es errónea, este también lo será.

Se propuso un experimento que consta de 15 iteraciones divididas en grupos de 5. En cada iteración, se realiza la conexión del sensor infrarrojo a la Raspberry Pi, se reinicia el entorno de programación Python y se da la orden de moverse hasta *home*, utilizando el botón de la interfaz de usuario de la Figura 8.6. Un grupo de iteraciones se realizó en la mañana, otro pasada la mitad del día, y el último en la tarde; se registraron los valores de humedad relativa y temperatura (ver Tabla 8.1), con el fin de descartar la influencia de estas variables en la efectividad de la determinación de la posición absoluta [7, p. 7].

Al realizar las 15 iteraciones, todas resultaron exitosas con una condición *pasa*, ya

que el sistema logró identificar el paso de la saliente del disco giratorio dentro de la cavidad del sensor infrarrojo, de la misma forma en que pudo observarse en el vídeo presentado anteriormente en el Capítulo 7. Además, para el conjunto de corridas del experimento, al obtener un 100% de efectividad, no se observa dependencia en la efectividad del sistema de determinación de posición absoluta por la variación de los factores tales como hora, temperatura, presión atmosférica ni humedad relativa, con lo cual, la solución es robusta en cuanto a la variación de estos parámetros. Esto permite respaldar el cumplimiento de la especificación número 11 de la Tabla 5.3.

### **8.3 Establecer especificaciones finales**

Tomando en cuenta el conjunto de pruebas descrito anteriormente, se procede a sintetizar en la Tabla 8.4 las especificaciones finales de la propuesta de solución desarrollada. Cada uno de los valores será justificado de forma adecuada según corresponda más adelante. La columna denominada “cumplimiento” hace referencia a qué condición obtiene la propuesta de solución respecto a las especificaciones iniciales, siendo así: no conforme (no cumple con los valores objetivo definidos), marginal (cumple con el valor marginal pero no con el ideal), o ideal (cumple con el valor ideal o lo supera).

**Tabla 8.4:** Especificaciones finales de la propuesta de solución.

No.	Métrica	Unidad	Imp.	Cumplimiento	Valor obtenido
1	Rango de movimiento en el eje X	mm	5	Ideal	>43
2	Rango de movimiento en el eje Y	mm	5	Ideal	>28
3	Precisión en el movimiento del eje X	mm	5	Ideal	<0.04
4	Precisión en el movimiento del eje Y	mm	5	Ideal	<0.10
5	Rango de movimiento del pulsador del pedal	mm	5	Ideal	>8
6	Fuerza pulsador del pedal	N	5	Ideal	>13
7	Tiempo de calibración por bloque	min	5	Ideal	<10
8	Número de bloques calibrados por semana	Bloques	5	Ideal	>30
9	Número de intervenciones diarias	Intervenciones	4	Marginal	<7
10	Tiempo de intervenciones diarias	min	4	Marginal	<10
11	Recorrido del mecanismo por la totalidad del conjunto de bloques	Binaria	3	Ideal	Pasa
12	Cantidad de parejas de bloques almacenadas	Parejas	4	Marginal	122
13	Diferencia de temperatura entre bloques y entorno	°C	3	Marginal	<0.55
14	Número de bloques con daño por conjunto	Binaria	3	Ideal	0
15	Porcentaje de señales recibidas	% Señales	5	Ideal	100
16	Porcentaje de acierto de bloques identificados	% Acierto	4	Ideal	100
17	Cantidad de métodos de pausa/reanudación	% Acierto	5	Marginal	3
18	Cantidad de indicadores de cambio de plantilla	Indicadores	4	Marginal	1
19	Resolución del indicador de avance	%	3	Marginal	<0.82
20	Indicadores de desempeño	Lista	3	Ideal	Tiempo calibración por bloque Bloques calibrados por mes Bloques fuera de clase
21	Rango de tiempo de estabilización	min	5	Ideal	>15
22	Cantidad de herramientas requeridas	Herramientas	4	Marginal	3
23	Tiempo de montaje/desmontaje	min	4	Ideal	<15
24	Razón de tiempo inicial/entrenado	Adimensional	4	Marginal	<2

1. Al realizar la medición del rango máximo alcanzable por el prototipo, se obtuvo un valor de 43 mm aproximadamente.
2. Dado que la conversión de movimiento rotacional a lineal para el eje Y se efectúa internamente en el mecanismo del comparador de bloques, y el motor tiene un rango de giro continuo, este rango es ilimitado para el diseño propuesto, pero limitado a lo requerido para las plantillas metálicas de movimiento.
3. Tal y como se demostró en las pruebas explicadas anteriormente, la precisión obtenida para el eje X corresponde a 0.04 mm al utilizar el control tipo *half step* para el motor a pasos.
4. Tal y como se demostró en las pruebas explicadas anteriormente, la precisión obtenida para el eje Y corresponde a 0.10 mm.
5. En este caso se tomó en consideración la longitud de la pieza que acciona el pedal, correspondiente al *horn* acoplado al eje del servomotor, así como la altura

del actuador respecto del pedal.

6. Al revisar la hoja de datos del servomotor utilizado [48], el fabricante estima el torque máximo en  $1.8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ . Al calcular el equivalente de este torque con el brazo de palanca del montaje del prototipo, correspondiente a  $0.75 \text{ cm}$ , este torque disminuye a  $1.35 \text{ kg}$ . Al realizar la conversión, se obtienen aproximadamente  $13 \text{ N}$  de fuerza, lo cual supera ampliamente lo requerido para accionar el pedal.
7. Al realizar corridas de calibración de prueba, tal y como la mostrada en el vídeo presentado en el Capítulo 6, se estima el tiempo de calibración por bloque en menos de 10 minutos, no obstante este puede variar dependiendo del tiempo de estabilización fijado por el encargado del LD.
8. Al discutir con el encargado del LD los resultados de las validaciones y corridas de prueba de calibraciones, se estimó en conjunto una disminución del tiempo de atención de órdenes de trabajo ligeramente menor a la mitad del tiempo actual del LD, debido a esto, y estableciendo un margen de seguridad, se establece al menos 30 bloques por semana como especificación final.
9. En cuanto a las intervenciones diarias se establecen menos de 7, esto tomando en consideración pausas y reanudaciones a lo largo del día en los tiempos de descanso del funcionario y al dar inicio o final a su jornada laboral.
10. Dado que el funcionario solo debe cambiar las parejas de bloques, dar inicio a la calibración y establecer tiempos de estabilización, y de ser necesario, agregar o modificar la orden de trabajo, se consensuó un tiempo de intervención menor a 10 minutos.
11. Tal y como se demostró en la fase de pruebas para el mecanismo de ordenamiento de bloques, este recorre la totalidad de los bloques patrón.

12. Según se estableció en la Tabla 7.1, el mecanismo de ordenamiento de bloques es capaz de almacenar la totalidad de los bloques que posee actualmente el LD.
13. Con base en los datos tomados durante la validación del prototipo (Tabla 8.1), y partiendo de la tesis de que la temperatura del disco giratorio es la misma que la de los bloques (después de 24 h de equiparación térmica y la aprobación de esta afirmación por parte del encargado del LD), la diferencia promedio de temperatura con respecto al ambiente controlado del LD es de  $0.53^{\circ}$  aproximadamente. Es menester recalcar la decisión de diseño programático tomada para favorecer estos resultados, en ella, se inhabilita el motor que controla el disco giratorio cuando este no se está moviendo, ya que, según se observó y se indica en [49], la temperatura de este puede aumentar considerablemente, y con ello irradiar calor a los bloques, lo cual es totalmente indeseado. No obstante, gracias a este factor tomado en cuenta, el motor no afecta la temperatura de los bloques, tal y como se comprobó en la Tabla 8.1.
14. Durante todo el período de desarrollo y prueba de la propuesta de solución ningún bloque dimensional fue dañado. Se tomaron decisiones de diseño en ese sentido, tales como la altura de la pieza de almacenamiento de bloques, la estrategia de control de pasos tipo *half step* para la disminución de la vibración en el movimiento del mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración, el acabado solicitado para el disco de acero inoxidable, entre otras.
15. Dado que se integró un solo código en conjunto con el equipo de desarrollo de la programación para la secuencia de calibración del LD, se utilizan variables globales dentro de la implementación programática, con lo cual el sistema de control de órdenes de trabajo siempre es capaz de acceder a ellas, ya que estas no deben ser comunicadas por un hardware o sistema externo.
16. Tal y como se explicó en el Capítulo 7, el conjunto de bloques es leído directamente

de un documento tipo hoja de cálculo seleccionado por el usuario, o en su defecto, ingresado por él, con lo cual, el desarrollo programático es capaz de leer esta información siempre y cuando no existan errores de ingreso de datos por parte del usuario, variable que está fuera de control del presente desarrollo.

17. Según la interfaz de usuario mostrada en el Capítulo 7, se tienen botones independientes de inicio, reanudación y pausa del proceso de atención de órdenes de trabajo.
18. Según fue programado y explicado en el Capítulo 7, se muestra la plantilla requerida para el bloque actual en la interfaz de usuario en el monitor conectado a la Raspberry Pi.
19. Dado que el sistema de control tiene acceso a la variable global que indica la finalización de calibración de cada pareja de bloques, y el mecanismo de ordenamiento almacena 122 bloques, la resolución mínima es de  $1/122$ , es decir 0.82 % aproximadamente.
20. El sistema de control monitorea el proceso de calibración de las parejas de bloques, iniciando el conteo de tiempo en el momento en que el usuario presiona el botón de iniciar o reanudar. Este tiempo se muestra en la interfaz de usuario, tal y como se exhibió en el Capítulo 7. En cuanto a los bloques calibrados por mes, cada vez que el usuario guarde o seleccione un conjunto de bloques, el programa agregará el número de bloques a una hoja de cálculo, identificándolos mediante número de certificado. Para el indicador de bloques fuera de clase, se requiere que el usuario digite el número de certificado y el valor nominal de los bloques fuera de clase (información que se puede obtener hasta que el encargado del LD realice los cálculos de error e incertidumbre utilizando sus plantillas de cálculo según corresponda). Una vez requeridos los indicadores de desempeño, el usuario selecciona la opción de generar reporte y el sistema guarda el reporte con estos

valores de forma local en la Raspberry Pi.

21. Tal y como se mostró en el Capítulo 7, se incorporó un *slider* en la interfaz de usuario, el cual permite variar el tiempo de estabilización térmica deseado hasta 20 minutos, lo que limita el momento en que puede iniciar la siguiente secuencia de calibración.
22. Para realizar el montaje o desmontaje del sistema mecánico se requieren las siguientes herramientas: llave Allen, desatornillador Phillips y alicate de punta fina (preferiblemente).
23. Durante la prueba del prototipo se requirió desarmar y armar en repetidas ocasiones el sistema, esto para realizar alineaciones de ejes, cambiar motores, ajustar distancias de los soportes, entre otros. Tomando en consideración estas experiencias, se consensuó un tiempo de montaje/desmontaje de alrededor de 10 minutos.
24. Dentro de los retos que trae consigo acoplar la propuesta de solución al dial del comparador de bloques, es alinear de forma adecuada los ejes, ya que si esto no se ejecuta de la forma correcta los movimientos en los ejes X y Y se dificultan en gran medida, debido a la acumulación de esfuerzos en piezas que no están diseñadas para tales condiciones. Por este motivo, una vez realizado el ajuste de posiciones del prototipo y el comparador de bloques, se marcó con cinta adhesiva la posición de este último, con el fin de que los subsecuentes montajes fueran llevados a cabo con mayor facilidad, logrando con ello una disminución de tiempo de montaje de al menos 10 minutos. Por ende, al suprimir este tiempo montaje, la razón de tiempo inicial por tiempo entrenado asciende hasta 2 aproximadamente.

## 8.4 Reflexión de la fase

En esta fase se demostró nuevamente el carácter iterativo de la metodología de diseño en varios aspectos, por ejemplo el ajuste necesario identificado para el sistema de control al validar el movimiento rotacional, el cual, se vio afectado por la inercia del disco giratorio. Otro ejemplo a destacar es el cambio de 2 de los motores a paso por modelos de otro fabricante, ya que los anteriores se calentaban de forma indeseada, lo cual puede afectar a la equiparación térmica de los bloques con el ambiente controlado del LD. Al realizar este cambio de motores, los nuevos modelos instalados no se calientan de forma perceptible, lo cual, adicionado a la barrera de acrílico que incorporará el encargado del LD, disminuyen significativamente el impacto térmico que el sistema semiautomatizado pueda tener.

Adicionalmente, se brindó la tabla de especificaciones finales, la cual muestra el cumplimiento del 100 % de las necesidades establecidas por el cliente, obteniendo la condición de cumplimiento ideal el 58 % de ellas. Cada una de estas especificaciones fue justificada basándose en los resultados de las pruebas de validación así como en los capítulos de diseño.

La repetibilidad de las distintas prestaciones de la propuesta de solución fue evaluada utilizando un conjunto significativo y justificado de iteraciones, mientras que la reproducibilidad fue justipreciada al variar las condiciones de prueba en la medida de lo posible, no dejando de lado el reporte oportuno de las condiciones del LD que permiten dar trazabilidad no sólo de las pruebas realizadas, sino bajo qué circunstancias se llevaron a cabo.

---

---

# CAPÍTULO 9

---

## IMPACTO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En el presente capítulo se realiza un estudio de las diferentes aristas desde las cuales el proyecto impacta al LD, a la comunidad costarricense y al entorno metrológico y científico. Para mostrar las distintas perspectivas del beneficio que trae el proyecto desarrollado, el análisis se dividirá en secciones, de tal forma que se estructure el contenido de la forma en que su comprensión sea más sencilla bajo el hilo conductor del impacto de la propuesta de solución.

### **9.1 Salud ocupacional**

Según las entrevistas y visitas realizadas al LD durante el diagnóstico del proceso de calibración dimensional, el cliente indicó que uno de los motivadores para solicitar a la administración la ejecución del presente proyecto, es la fatiga experimentada por su persona al realizar a lo largo de todo el año, por gran cantidad de horas diarias,

movimientos repetitivos al mover la palanca de la secuencia así como el ingreso constante de datos al sistema de medición.

Este tipo de movimientos reiterados que involucran a la mano y a la muñeca, pueden ser causantes de trastornos como el síndrome del túnel carpiano [50]. Esta afectación implica una presión excesiva en el nervio mediano, causando entumecimiento, debilidad, daño muscular u hormigueo en la mano y dedos de la persona afectada.

Otro ejemplo de afectación a la integridad física del funcionario puede darse en la espalda o zona lumbar, debido a las posturas que adopta el trabajador al inclinarse para ingresar datos al computador o al realizar los movimientos de la secuencia de calibración, ya que la mesa de trabajo donde se encuentra el comparador no es una estación de trabajo diseñada según criterios ergonómicos, incluso, no cuenta con silla que pueda ser adecuadamente situada donde pueda realizar con comodidad parte de estas labores.

Estos aspectos influyen a mediano o largo plazo en la salud del trabajador, lo cual es invaluable, no obstante, también se traducen a costos para el laboratorio, como por ejemplo de seguro médico (costo hundido con *Caja Costarricense del Seguro Social* (CCSS)), o también días de incapacidad. Tomando en cuenta el salario mínimo de un profesional licenciado [51], estimando un período de incapacidad de 1 semana al año (escenario conservador), el costo asociado se estima en ₡155 138.

La propuesta de solución busca minimizar la interacción del usuario con el equipo comparador de bloques y el sistema de control, lo cual, generaría un efecto colateral respecto a los aspectos mencionados anteriormente. De esta forma, existe conformidad con el concepto de salud ocupacional [52], la cual establece la protección de la salud de los trabajadores mediante estrategias de prevención y eliminación de factores y condiciones que atentan contra la salud y seguridad.

## 9.2 Calidad del servicio

Mediante la futura implementación en el LD del sistema desarrollado, se espera, según los resultados de la validación, que el LD pueda disminuir el tiempo de atención de órdenes de trabajo, con lo cual, los clientes deberán aguardar menos para recibir sus conjuntos de bloques calibrados, y por ende, los clientes de los demás elementos que recibe el LD también, como lo son reglas, verniers o micrómetros. Esto es un claro indicador de la mejora en la prestación de los servicios para el LCM.

Otro aspecto beneficioso de la propuesta de solución, es el riesgo disminuido en cuanto a posibles daños a los bloques patrón por amenaza de caída. Anteriormente, tal y como se mencionó, las parejas de bloques se encontraban en bandejas en una mesa de trabajo distinta de la del comparador de bloques, esto a 1.5 m de distancia. Ahora, gracias al acomodo y el aprovechamiento del espacio de la mesa de trabajo, se tienen los bloques a calibrar a menos de 15 cm del equipo comparador, disminuyendo así en gran medida el riesgo comentado previamente. Para el LD asegurarle a los clientes la preservación de la integridad de sus equipos es un aspecto crítico, el cual se traduce, en parte, como la prestación de un servicio confiable y de calidad.

## 9.3 Divulgación del desarrollo

Después de realizar los ajustes y mejoras requeridas para implementar prototipo para su utilización en el LD, así como cuando esté aprobada la validación del procedimiento modificado para el método de calibración dimensional (proceso interno del LCM), se desea elaborar un *paper* del sistema semiautomático con el que contará el LD, el cual sería elaborado por el equipo de desarrollo del proyecto. Se busca publicar este artículo en la Revista de Ingeniería de la *Universidad de Costa Rica* (UCR) [53], de tal forma que la comunidad estudiantil y del entorno costarricense tengan acceso a este tipo de desarrollos tecnológicos frutos del sistema de educación superior público, que viene a

beneficiar a un ente de aseguramiento de calidad industrial e investigativa como lo es el LCM.

Adicionalmente, se considerará la posibilidad de participar con el presente desarrollo en alguna de las conferencias o simposios organizados por el *Sistema Interamericano de Metrología* (SIM), lo cual dará visibilidad a Costa Rica como impulsor de la mejora de servicios de calibración en América. A modo de contextualización, únicamente el *Centro Nacional de Metrología de México* (CENAM), *National Institute of Standards and Technology of USA* (NIST), *Metrology Research Centre of Canada* (MRC), *Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina* (INTI) e *Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia do Brasil* (INMETRO), cuentan con métodos de calibración dimensional mediante interferometría, el resto de países lo hacen mediante comparación mecánica directa, como es el caso de Costa Rica. Por ende, el dar exposición a este proyecto abre la puerta del conocimiento y la reproducción del proyecto en países que utilicen métodos de calibración por comparación mecánica directa, un paso en pro de la comunidad metrológica internacional.

## 9.4 Aprovechamiento del recurso humano

Tal y como se mencionó anteriormente, el servicio de calibración de bloques representa cerca del (70 - 80) % de los servicios solicitados al LD. Bajo un panorama conservador, consensuado con el cliente, se estima que él dedica al menos 4 horas diarias a este tipo de servicios, es decir, alrededor de 89 horas al mes, lo cual, anualmente ronda las 1068 horas.

Tomando, como estimación moderada, la disminución de esta dedicación por parte del encargado del LD, un porcentaje del 40 %, el cliente liberaría cerca de 430 horas anuales dedicadas a la ejecución de movimientos repetitivos y al ingreso de datos. Esto,

se traduce monetariamente a ₡1 667 701, según las horas liberadas y la lista de salarios mínimos [51], siendo esta estimación igualmente conservadora, ya que se toma como base un salario mínimo, lo cual no es el caso de retribución del LD.

A pesar de que estas horas laborales seguirán siendo retribuidas de igual forma al funcionario, el valor agregado se encuentra en que este recurso humano institucional que está siendo costado de forma onerosa, podrá dedicarse a actividades tales como mejora y extensión de servicios, e incluso investigación, lo cual contribuye a la evolución del LCM en un papel tan importante como ser garante y líder a nivel nacional del área metrológica.

## 9.5 Perspectiva económica clásica

En esta sección, se analiza desde la perspectiva económica el conjunto de inversiones requeridas para el desarrollo del proyecto, y cómo estas interactúan con sus contrapesos, equivalentes a los beneficios monetarios debido a la puesta en servicio del prototipo desarrollado por un período de 6 años.

A continuación, en las Tablas 9.1, 9.2 y 9.3, se presentan los distintos costos asociados al proyecto.

Los costos indirectos mostrados en la Tabla 9.2, y gran parte de los costos hundidos de la Tabla 9.3, fueron estimados mediante el juicio experto del encargado del LD. Estos costos fueron aproximados para el período de evaluación de 6 años mencionado anteriormente. Otro conjunto de estos costos fue investigado, reportando de esta forma precios según el mercado actual, como por ejemplo el set de bloques patrón. En cuanto al costo de operación de la Tabla 9.2, según el estudio interno de cargas en el consumo eléctrico del LCM, el LD representa un costo mensual aproximado de \$ 300; tomando en consideración este aspecto, se añade de forma preliminar un aumento por la operación del prototipo de un 10 % a este rubro, lo que equivale a \$ 30 mensuales.

**Tabla 9.1:** Estimación de costos directos de la propuesta de solución.

Componente	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo total (\$)
Filamento ABS (kg)	2.5	24.95	62.38
Motor Nema 17 34mm	3	21.95	65.85
Driver 8825 stepper	3	4.95	14.85
Nema 17 L bracket	2	2.95	5.90
Acople flexible de ejes 5 mm	2	5.95	11.90
Barra roscada y tuerca M8x500x2	1	10.95	10.95
Barra lisa 8 mm (500 mm largo)	1	4.95	4.95
Rodamiento de bolas montaje pillow	1	2.95	2.95
Rodamiento lineal	2	3.95	7.90
Sensor slotted infrarrojo	1	2.49	2.49
N20 Ball caster	4	2.75	11.00
Porta fusibles en línea	4	0.49	1.96
Fusibles 2A	4	0.25	1.00
Fuente de alimentación 12 VDC 10A	1	24.95	24.95
Jumper kit	1	6.20	6.20
Convertidor Step Down	1	1.95	1.95
Kit de soldadura y multímetro	1	38.95	38.95
Kit heat shrink	1	9.95	9.95
PCB de prototipado	2	4.95	9.90
Kit jumpers macho-hembra	1	2.49	2.49
Kit jumpers macho-macho	1	2.49	2.49
Protoboard grande	1	24.95	24.95
Mini protoboard	2	1.95	3.90
Raspberry Pi 4 (8GB)	1	145	145
Adaptador 5V 3A tipo C	1	5.95	5.95
Cable HDMI a micro HDMI	1	5.95	5.95
Case Raspberry Pi 4	1	23.95	23.95
MicroSD 32GB	1	11.95	11.95
Cinta doble cara ultra resistente 1.5 m	1	8.90	8.90
Tornillería variada	- - -	- - -	6.00
Terminales eléctricas tipo anillo	1	4.70	4.70
Cable alimentación AC	1	4.53	4.53
Disco de acero inoxidable 2 mm	1	39.06	39.06
<b>Total</b>			593.7
<b>Total con impuestos (11% por retención del 2%)</b>			659.01

**Tabla 9.2:** Estimación de costos indirectos de la propuesta de solución.

Descripción	Subtotal (\$)
Administración de compras (15%)	98.85
Envío de componentes (5%)	32.95
Operación del sistema	360
Mantenimiento del sistema	50
<b>Total</b>	541.8

**Tabla 9.3:** Costos hundidos del sistema.

<b>Descripción</b>	<b>Subtotal (\$)</b>
Comparador de bloques (valor actual)	15600
Equipo de medición de temperatura Fluke	6215
Equipo de medición de condiciones del LD Vaisala	3104
Conjunto de 122 bloques patrón clase 00	9550
Impresora 3D Prusa i3 MK3S+	839
<b>Total</b>	<b>35308</b>

Es importante destacar que el licenciamiento del Software CAD Solidworks fue obtenido mediante XpertCAD como parte de un programa de capacitación puesto a disposición por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, lo cual permitió desarrollar el presente proyecto de conclusión de etapa académica.

En cuanto al costo de desarrollo asociado a las horas dedicadas al proyecto de parte del estudiante, se toma como base el salario mínimo de un licenciado [51]. Para el proyecto, el estudiante dedicó aproximadamente 30 h semanales, de las cuales, cerca de un 40 % fueron dedicadas a diseño y fabricación del prototipo. Al tomar en cuenta las 16 semanas de desarrollo, se estima que costear este tiempo a un profesional externo costaría alrededor de ₡1 861 620.

Por otra parte, al consultarle al cliente por la cantidad de servicios de calibración de bloques patrón que atiende el LD por año, se determinó, según el histórico del año 2020, que se calibran alrededor de 500 bloques anualmente. De estos 500 bloques, aproximadamente, el 90 % son solicitudes de calibración de centro a centro, que tiene un costo de \$ 20 por bloque, según la última aprobación en La Gaceta [54]. El restante 10 % requiere calibración de variación de longitud o también llamado desviación de caras, servicio que tiene un costo de \$ 40 por bloque. Es decir, anualmente, el LD factura \$ 11000 por concepto de calibraciones dimensionales.

Tomando en consideración los beneficios económicos anteriormente citados, un plazo de evaluación de 10 años, una tasa de costo de capital del 10 %, un impuesto sobre

la renta del 30 % y una depreciación bajo el método de la línea recta, se obtienen los indicadores mostrados en la Figura 9.1, relativos a flujos netos de efectivo.

CALIBRACIÓN DIMENSIONAL SEMIAUTOMÁTICA MEDIANTE BLOQUES PATRÓN											
EVALUACION DE PROYECTOS											
FLUJOS NETOS DE EFECTIVO (\$)											
AÑOS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>INVERSION INICIAL</b>											
Equipamiento	39 394,80										
Total Inversion Inicial	39 394,80										
<b>BENEFICIOS</b>											
Venta Servicios		11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00
Horas liberadas de recurso humano		2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00	2 906,00
<b>GASTOS VARIABLES INCREM</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>											
Equipo de medición		624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40
Total de gastos		624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40
<b>UTILIDAD ANTES DE IMP.</b>		13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60	13 281,60
<b>IMPUESTO DE RENTA</b>		3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48	3 984,48
<b>UTILIDAD DES/IMPUES.</b>		9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12	9 297,12
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>											
Equipo de medición		624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40	624,40
<b>VALORES DE RESCATE</b>											
Activos Fijos Equipo de Medición											18 675,00
Impacto en Renta											-5 602,50
<b>FLUJO NETO EFECTIVO</b>	<b>-39 394,80</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>9 921,52</b>	<b>22 994,02</b>
FNE descontados (10%)	<b>\$66 003,46</b>										
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	<b>\$26 608,66</b>										
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	<b>22,962%</b>										
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	<b>1,68</b>										

Figura 9.1: Flujos netos de efectivo. Fuente: Elaboración propia

En este caso, se obtuvo un VAN de \$ 26 609, el cual es positivo, lo que indica que se genera un beneficio sobre la inversión realizada. Este indicador mide los flujos de ingresos y egresos para un determinado período de evaluación e indica si, al descontar la inversión inicial, existe una ganancia, como lo es en este caso [55]. Adicionalmente, se calculó la Tasa Interna de Retorno (TIR), que se define como la tasa de interés cuando el VAN es 0. En este caso se tiene un TIR de 22.96 %, lo cual es mayor a la tasa de descuento del 10 %, es decir, la inversión es aconsejable.

Por ende, es válido concluir que la inversión realizada para el desarrollo del proyecto está justificada también por su factibilidad económica en el plazo de estudio. Actualmente, según investigación reportada por el experto del LD, los equipos comparadores de bloques nuevos que funcionan bajo el principio de comparación directa, tal y como el que tiene el LD, cuestan alrededor de \$ 45 000. Las diferencias de estos comparadores respecto al equipo TESA UPC actual es su software actualizada, además de que cuentan con un ajuste de altura del palpador servo-asistido. Es decir, en el mercado actual no existe un equipo que cuente con la

ejecución de la secuencia de calibración automática, ni un dispositivo de atención de órdenes de trabajo, lo que corrobora el aporte a la comunidad metrológica del presente proyecto.

---

---

# CAPÍTULO 10

---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se enuncian las principales conclusiones obtenidas tras la elaboración del presente proyecto, con el fin de comprender los principales aportes de la propuesta de solución y evidenciar el cumplimiento de los objetivos planteados. Adicionalmente, se presenta una serie de recomendaciones identificadas durante el desarrollo del proyecto, las cuales, destapan futuras mejoras y senderos de avance respecto a lo alcanzado con el proyecto presentado; estas recomendaciones, en primera instancia y no de forma exclusiva, están dirigidas al personal del LD para que se analice la factibilidad de expandir el desarrollo según las necesidades del LCM.

### 10.1 Conclusiones

- Se diagnosticó el proceso de calibración dimensional del LD y se delimitó el alcance de la propuesta de solución, de esta forma se atacó aquellos aspectos críticos para

el cliente, que además eran factibles tanto de forma temporal como presupuestaria.

- Los deseos del cliente expresados como necesidades fueron traducidos a una serie de métricas con sus respectivos valores objetivo mensurables, claros y delimitados, lo cual permitió evaluar de forma cuantitativa y objetiva el conjunto de conceptos de solución explorados.
- El diseño mecánico de ejecución de la secuencia de calibración se mueve a lo largo de las 2 plantillas metálicas, tanto para el eje X como para el eje Y, permitiendo alcanzar las 6 posiciones de calibración con una precisión de 0.04 mm y 0.10 mm respectivamente, lo cual asegura la repetibilidad de los movimientos y la validez de las calibraciones.
- Se diseñó un mecanismo de ordenamiento de bloques el cual es capaz de almacenar los 122 bloques con los que cuenta el LD, así como sus respectivas parejas, favoreciendo así la rapidez de ejecución de órdenes de trabajo, ya que se mejoran aspectos de orden y equiparación térmica del conjunto de bloques respecto al entorno controlado del LD.
- El diseño mecánico se demostró es confiable para las condiciones de trabajo a las que será sometido, obteniendo un factor de seguridad global mínimo de 2, esto al evaluar el comportamiento de las piezas críticas, al ser sometidas a esfuerzos sobredimensionados en comparación con el funcionamiento normal del sistema.
- El diseño no compromete la integridad de ningún bloque patrón ya que decisiones de diseño tales como estrategia de paso, materiales seleccionados o dimensionamiento mecánico, fueron tomadas con el fin de suprimir riesgos que atenten la preservación de las características de los bloques.
- El diseño mecánico elaborado tomó en consideración aspectos de facilidad de montaje/desmontaje sin sacrificar en ningún momento la funcionalidad del

sistema, logrando así un tiempo de montaje/desmontaje menor a 10 minutos, utilizando solamente 3 herramientas de uso común.

- El sistema de control de órdenes de trabajo es capaz de posicionarse hasta acercarse a la pareja de bloques a calibrar al equipo comparador con una precisión de  $3^\circ$ , esto mediante la determinación de la posición absoluta del disco giratorio mediante un sensor infrarrojo carente de desgaste mecánico de bajo costo.
- Se logró integrar un único sistema de control del proceso de calibración con interfaz gráfica de usuario, que permite gestionar la atención de órdenes de trabajo, la ejecución de la secuencia de calibración, y el reporte de resultados.
- Se validó el funcionamiento de la propuesta de solución siguiendo estrategias que evaluaron la repetibilidad y reproducibilidad de los movimientos ejecutados por el sistema, reportando, según la normativa, las condiciones del laboratorio durante el período de pruebas, esto con el fin de facilitar la reproducción de estos experimentos según sea requerido a futuro para la validación interna del cambio de procedimiento de calibración de bloques dimensionales del LD.
- La naturaleza iterativa de la metodología de diseño seguida permitió realizar ajustes tomando en consideración los hallazgos obtenidos de la fase de validación del primer prototipo funcional, como por ejemplo el ajuste angular debido a la inercia rotacional del mecanismo giratorio de ordenamiento de bloques.
- La implementación del prototipo disminuiría la dependencia humana del proceso de calibración dimensional, liberando así al encargado del LD al menos 20 h semanales, las cuales podrán ser dedicadas a investigación, aseguramiento de la calidad, extensión de servicios, entre otras.
- Se estima que se logró reducir el tiempo de calibración por bloque a menos de 10 min, esto gracias a la ejecución automática de la secuencia de calibración,

y a la incorporación del mecanismo de ordenamiento de bloques que favorece la búsqueda efectiva de las parejas de bloques y la equiparación térmica entre bloques y el ambiente del LD. El impacto esperado equivale a un aumento cercano al 50 % en la cantidad de bloques calibrados mensualmente por el LD.

- La propuesta de solución desarrollada tendría un impacto en la calidad del servicio brindado por el LD, haciéndolo más competente a través de la disminución de tiempos de espera para los clientes. Adicionalmente, abre la posibilidad de la divulgación científica a nivel nacional e internacional del proyecto elaborado.
- La propuesta de solución disminuiría los riesgos reportados por el cliente en cuanto a labores repetitivas que generan fatiga durante su jornada laboral, interviniendo de forma positiva en la salud ocupacional del funcionario.
- Se implementó el primer prototipo funcional del sistema semiautomatizado de calibración dimensional cumpliendo los límites presupuestarios establecidos (\$ 800), ya que se invirtió una suma menor a los \$ 700.
- La propuesta de solución es económicamente viable, ya que el VAN obtenido para un estudio a 10 años es de \$ 26 609. En adición, se obtuvo 22.96 % de TIR, porcentaje mayor que la tasa de descuento, lo cual lo hace rentable, ya que su retorno de inversión es equiparable a tipos de interés elevados en el mercado. El proyecto logra 1.68 veces el cubrimiento de los FNE descontados de la inversión inicial.

## 10.2 Recomendaciones

- Tal y como se identificó en el Capítulo 4, los procesos de cambiar los bloques y ajustar la altura del palpador continúan siendo procesos manuales, con lo cual,

se puede evaluar la factibilidad de automatizar estos procesos con el fin de automatizar de forma completa el proceso de calibración dimensional.

- Se puede evaluar la implementación de una estrategia de control de mayor complejidad la cual mejore la precisión de la rotación del mecanismo giratorio de ordenamiento de bloques.
- El pedal de accionamiento de la bomba de vacío puede reemplazarse a corto o mediano plazo por otro dispositivo cuya vida útil no dependa del desgaste mecánico de sus componentes internos.
- Si se detecta una sobrecarga o desviación del correcto funcionamiento caracterizado en el presente proyecto, el prototipo debe ser puesto fuera de servicio hasta que se validen nuevamente sus prestaciones [7, p. 9].
- Se debe engrasar y limpiar el prototipo de forma periódica con el fin de preservar su funcionalidad así como la integridad de sus elementos.
- Sería de valor agregado para el LD elaborar un manual de uso del prototipo, enfocado a su uso cotidiano, ajustes comunes o mantenimiento básico. Este no se elaboró debido a las limitaciones de recurso temporal del equipo de trabajo.
- Es recomendable realizar revisiones periódicas mediante los métodos de validación descritos o aquellos oportunos establecidos por el LD, para asegurar que se siguen satisfaciendo los requerimientos de diseño a lo largo del tiempo de operación [7, p. 13].
- Se debe colocar una barrera de acrílico que separe al equipo comparador de bloques del mecanismo de ejecución de la secuencia de calibración, esto para mitigar al máximo la influencia térmica de los actuadores sobre los bloques, tal y como fue señalado por el juicio experto del encargado del LD.

- Se recomienda evaluar la generación del informe con los indicadores de desempeño en un formato no editable.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LCM, “Laboratorio Costarricense de Metrología ¿Quiénes somos?.” <https://lcm.go.cr/index.php/lacomet/general/quienes-somos>. Último Acceso: 29/06/21.
- [2] I. López, B. Calderón, A. Quesada, and D. Arias, “LACOMET, diez años al servicio de la calidad.” <https://www.lcm.go.cr/documentosweb/lacomet/historia/LACOMET%20Historia%20y%20proyeccion.pdf>. Último Acceso: 02/06/21.
- [3] LCM, “Servicios Metrológicos.” <https://lcm.go.cr/servicios/servicios-metrologicos>. Último Acceso: 02/06/21.
- [4] LCM, “Metrología Física.” <https://lcm.go.cr/departamentos/metrologia-fisica/>. Último Acceso: 02/06/21.
- [5] National Physical Laboratory, *Care and Use of Gauge Blocks*. Department for Business, Energy and Industrial Strategy, Teddington, United Kingdom, 1 ed., 2017. Good Practice Guide No. 149.
- [6] A. Escamilla, *Metrología y sus aplicaciones*. México: Grupo Editorial Patria, 1 ed., 2014. Instituto Politécnico Nacional.
- [7] INTECO, ed., *INTE/ISO/IEC 17025:2017 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*, 2, ISO/IEC, 12 1975.
- [8] Laboratorio Costarricense de Metrología, *Calibración de bloques patrón*. LCM, San Pedro, San José, Costa Rica, 5 ed. Código GS-DI-PR-04.
- [9] TESA Technology, *Patrones de longitudes y de ángulos*. Renens, Suiza.
- [10] Laboratorio Costarricense de Metrología, “Presupuesto de incertidumbre del proceso de calibración dimensional mediante bloques patrón.” Laboratorio de Dimensional, 2021.

- [11] C. A. Jiménez, “Temperatura y expansión térmica.” `chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frepositoriotec.tec.ac.cr%2Fbitstream%2Fhandle%2F2238%2F10177%2FTemperatura%2520y%2520expansi%25C3%25B3n%2520t%25C3%25A9rmica.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&clen=391107`. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Física.
- [12] Euro Inox: The European Stainless Steel Development Association, “El acero inoxidable en contacto con otros materiales metálicos.” `chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.bonnet.es%2FEuroInox%2FContact_with_Other_SP.pdf&clen=788059&chunk=true`, 2010. Serie Materiales y sus Aplicaciones, Vol 10.
- [13] Y. Portuondo and J. Portuondo, “La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medicIÓN.” `chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F4455%2F445543770014.pdf&clen=97087`, 5 2010. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- [14] D. Hutton, *Fundamentals of finite element analysis*. New York: McGrawHill, 1 ed., 2004.
- [15] B. Uribe, “Fabricacion de horno electrico para curado y formacion de manguera para la empresa nitta moore,,” Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2011.
- [16] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., quinta ed., 2013.
- [17] J. L. Crespo, “Módulo 1. sesión 7: Validación de conceptos. el carácter iterativo de la metodología. notas de clase de diseño de sistemas mecatrónicos,” Junio 2021.
- [18] ISO/IEC, *ISO 3650:1998 Geometrical Product Specifications - Length standards - Gauge blocks*, 1998.
- [19] L. D. Rodriguez, “Proyecto dimensional.” LabVIEW Software Application, 8 2019.
- [20] ISO, *ISO 1:1975 Standard Reference Temperature For Industrial Length Measurements*, 1, 4 1975.
- [21] TESA Brown & Sharpe SA, *Calibrating gauge blocks with the UPC gauge block measuring set-up*. TESA, Renens, Switzerland, 018601 ed. Order No. 16.60044.
- [22] TESA Technology, “TESA UPC - for Comparative Measurement.” Gauge Block Comparators.
- [23] S. Vorndran and S. Jordan, “Advances in precision motorized positioning systems: Selection criteria.” <https://www.pi-usa.us/en/tech-blog/advances-in-precision-motorized-positioning-systems-selection-criteria/>.

- [24] National Instruments, “Módulo pxi de e/s digital.” <https://www.ni.com/es-cr/shop/hardware/products/pxi-digital-io-module.html>.
- [25] National Instruments, “Módulo de entrada de voltaje y corriente de la serie c.” <https://www.ni.com/es-cr/shop/hardware/products/c-series-voltage-and-current-input-module.html>.
- [26] National Instruments, “Módulo de salida de voltaje de la serie c.” <https://www.ni.com/es-cr/shop/hardware/products/c-series-voltage-output-module.html>.
- [27] Infineon + Cypress, “An75320 - getting started with psoc 1.” <https://www.cypress.com/documentation/application-notes/an75320-getting-started-psoc-1>.
- [28] Oriental motor, “Belt and pulley system.” <https://www.orientalmotor.com/applications/belt-pulley-system.html>.
- [29] Alamy Vector, “Ilustración de contorno vectorial de icono de cinta transportadora circular sin fin.” <https://c8.alamy.com/compes/2bmccyp/ilustracion-de-contorno-vectorial-de-icono-de-cinta-transportadora-circular-sin-fin-2bmccyp.jpg>.
- [30] RLS AksIM, “Off-axis rotary absolute magnetic encoder module.” <https://www.rls.si/eng/aksim-rotary-absolute-encoder-module>.
- [31] Iberobotics, “Final de carrera con rueda - 5a 250vac -1 conmutado.” <https://www.iberobotics.com/producto/final-carrera-rueda-5a-250vac-1-conmutado/>.
- [32] C. Layosa, “Strengths & limitations: Belt drive vs. ball screw actuators.” <https://us.misumi-ec.com/blog/strengths-limitations-belt-drive-vs-ball-screw-actuators/>, Marzo 2020.
- [33] TRUSPEED Controllers, “5 mm slotted opto-coupler track sensor.” <https://www.truspeed.co.uk/products/5mm-slotted-opto-coupler-track-sensor>.
- [34] KODA, “Measuring instrument for monitoring of end measures tesa upc.” <http://www.koda.ua/eng/products/desc.html?id=267>.
- [35] J. Henry, “Nema17 x 33.” <https://grabcad.com/library/nema17-x-33-1>, 7 2021.
- [36] G. Fernández, “Soporte 90 para motor stepper nema 17.” <https://grabcad.com/library/soporte-90-para-motor-stepper-nema-17-1>, 10 2020.
- [37] tesa POWERBOND, “Cinta doble cara extra peso 1.9 cm x 1.5 m.” <https://cr.epaenlinea.com/cinta-doble-cara-extra-peso-1-9-cm-x-1-5-m.html>.

- [38] M. Pourmirzaei, “Aluminium flexible coupling (5mm-8mm).” <https://grabcad.com/library/aluminium-flexible-coupling-5mm-8mm-1>, 7 2021.
- [39] M. Pourmizaei, “Lead screw nut pitch 2mm diameter 8mm.” [https://grabcad.com/library/lead-screw-nut\\_pitch-2mm\\_diameter-8mm-1](https://grabcad.com/library/lead-screw-nut_pitch-2mm_diameter-8mm-1), 7 2021.
- [40] M. Lin, “Scs8uu linear bearing.” <https://grabcad.com/library/scs8uu-linear-bearing-1>, 7 2021.
- [41] A. Nesterov, “Kp08 8mm zinc-aluminum alloy pillow block bearing.” <https://grabcad.com/library/kp08-8mm-zinc-aluminum-alloy-pillow-block-bearing-1>, 11 2016.
- [42] D. Porter, “Foot switch.” <https://grabcad.com/library/foot-switch-1>, 4 2014.
- [43] S. Torshin, “Tower pro / sg90 / micro servo.” <https://grabcad.com/library/tower-pro-sg90-micro-servo-2>, 10 2019.
- [44] G. Wankhade, “Caster ball wheel.” <https://grabcad.com/library/caster-ball-wheel-2>, 10 2020.
- [45] Mitutoyo, *Steel Gauge Block Set 1 mm Base*. Sakado, Japón, 2015. Exactitud según ISO 3650.
- [46] K. Morales and I. Aley, “Desarrollo programático para el sistema semiautomatizado de calibración dimensional mediante bloques patrón.” Código conjunto del equipo de trabajo del LD, 11 2021.
- [47] A. M. Murillo, “Introducción, teoría de mediciones y determinación del error. notas de clase de sensores y actuadores,” Febrero 2020.
- [48] T. Pro, “Micro servo sg90.” <https://ullisroboterseite.de/projekte-teedipper/SG90%20%20g%20Micro%20Servo.pdf>. Datasheet.
- [49] “42 mm high torque hybrid stepping motor.” <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/324/C140-A+datasheet.jpg>. Model XY42STH34-0354A Datasheet.
- [50] MedlinePlus, “Síndrome del túnel carpiano.” <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000433.htm>.
- [51] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de Costa Rica, “Lista de salarios mínimos.” <https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>.
- [52] Poder Judicial República de Costa Rica, “Salud ocupacional.” <https://ghsaludocupacional.poder-judicial.go.cr/>.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [53] UCR, “Revista de ingeniería.” <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria>, 2021.
- [54] “La dirección del laboratorio costarricense de metrología,” *La Gaceta*, p. 17, 5 2021.
- [55] M. Puga, “Van y tir.” `chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Faccioneduca.org%2Fadmin%2Farchivos%2Fclases%2Fmaterial%2Fvalor-actual-neto-y-tasa-interna-de-retorno-van-y-tir_1563977885.pdf&clen=112451&chunk=true`. Universidad ARTURO PRAT del Estado de Chile, Departamento de Auditoría y Sistemas de Información, Asignatura de Fundamentos Básicos de Finanzas.

---

# APÉNDICE A: SIMULACIONES DE ESFUERZOS PARA LAS PIEZAS CRÍTICAS DEL DISEÑO MECÁNICO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En este apéndice se muestran las simulaciones realizadas mediante el *software* SolidWorks, se describen las consideraciones del estudio de esfuerzos, así como los resultados obtenidos.

## **A.1 Mecanismo para la ejecución automática de la secuencia de calibración**

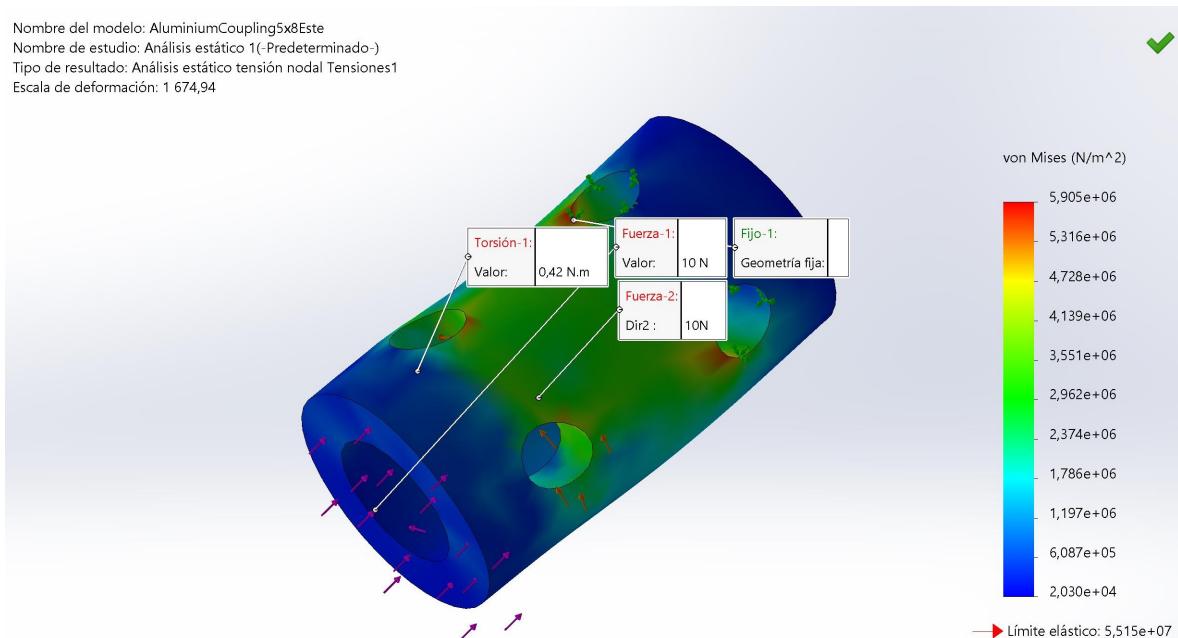
### **A.1.1 Acople rígido de aluminio**

Tal y como se mencionó en el Capítulo 6, el acople de la Figura 6.15, que une la palanca del comparador de bloques con el motor a pasos, el cual, transmite los movimientos en X y Y del sistema, es una pieza crítica. Para evaluar si este componente soporta las condiciones máximas a las que puede ser expuesto, esto en un escenario de

mayor esfuerzo que su operación normal, se agregaron las siguientes cargas:

- **Fuerza axial:** debido a la transmisión del movimiento del eje X, se determinó una fuerza de 10 N que simboliza la fricción del mecanismo de ejecución de secuencia y la palanca del comparador de bloques.
- **Fuerza normal:** para representar un desalineamiento de los ejes que une. Se estima en 10 N ya que es una condición que, por el alineamiento de montaje, no debería darse en gran orden de magnitud.
- **Torque:** transmitido a través de los tornillos de fijación, se utilizó el máximo torque del motor a pasos según el fabricante [49].
- **Soportes:** definidos en los restantes 2 agujeros del acople, ya que por medio de ellos se transmite el movimiento entre ejes.

El estudio realizado se muestra en la Figura A.1.



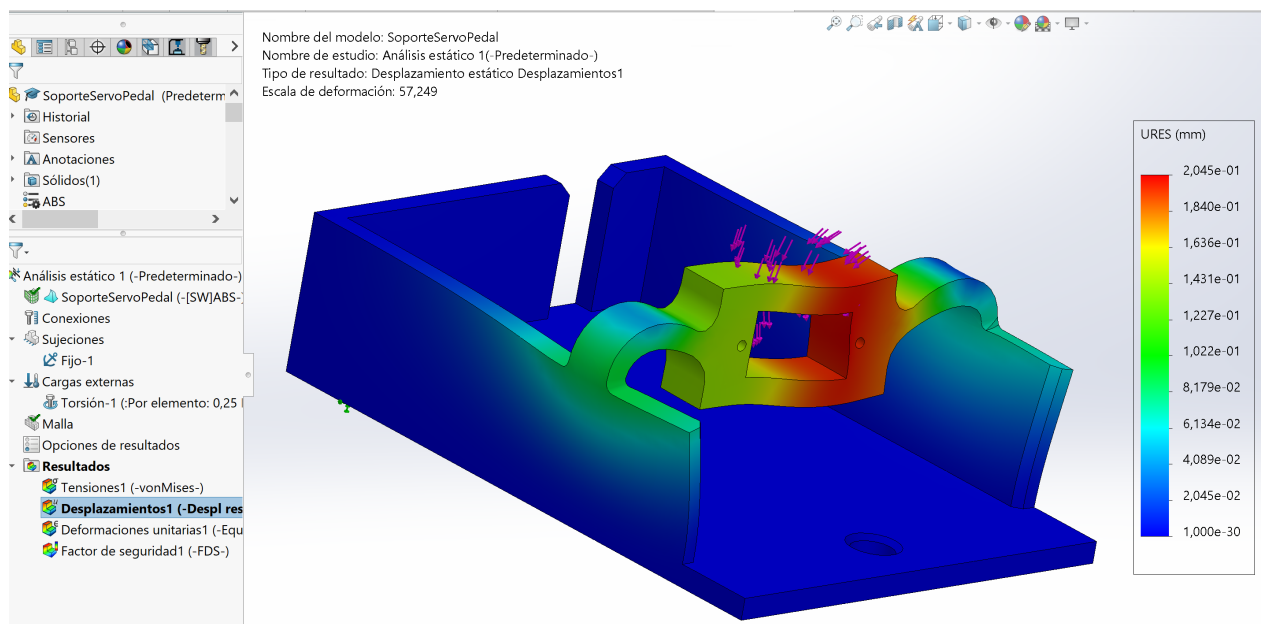
**Figura A.1:** Simulación de esfuerzos para el acople rígido. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la Figura A.1, el acople muestra concentradores de esfuerzos en los orificios de los tornillos de fijación, como es de esperar según la geometría de la

pieza. No obstante, al comparar el esfuerzo simulado Von Mises, con el límite estático de la pieza (hecha de aluminio 6061), se encuentra un factor de seguridad superior a 9, con lo cual, la pieza soporta esfuerzos mayores a aquellos generados por las condiciones de funcionamiento normal.

### A.1.2 Soporte para pedal y servomotor

La pieza de la Figura 6.18 es crítica debido a la importancia que tiene para la preservación de la integridad de los bloques el que se accione de forma correcta la bomba de vacío. Esta bomba es accionada mediante el servomotor que aloja el soporte en cuestión. Debido a que este soporte cuenta con “brazos” suspendidos que sostienen al servomotor, es relevante analizar el efecto del torque del motor sobre estos, con el fin de descartar rupturas durante el servicio. El torque máximo para un servomotor SG-90, corresponde a 0.25 N·m. Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la Figura A.2.



**Figura A.2:** Simulación de esfuerzos para el soporte del servomotor y el pedal. Fuente: Elaboración propia

Según la simulación de elementos finitos, el máximo desplazamiento o deflexión del

soporte es de 0.21 mm, y como fue previsto, se da en los “brazos” suspendidos. El factor de seguridad para esta pieza es de 3.3, lo que garantiza una operación segura en condiciones normales de funcionamiento.

## A.2 Mecanismo para la ejecución semiautomática de las órdenes de trabajo

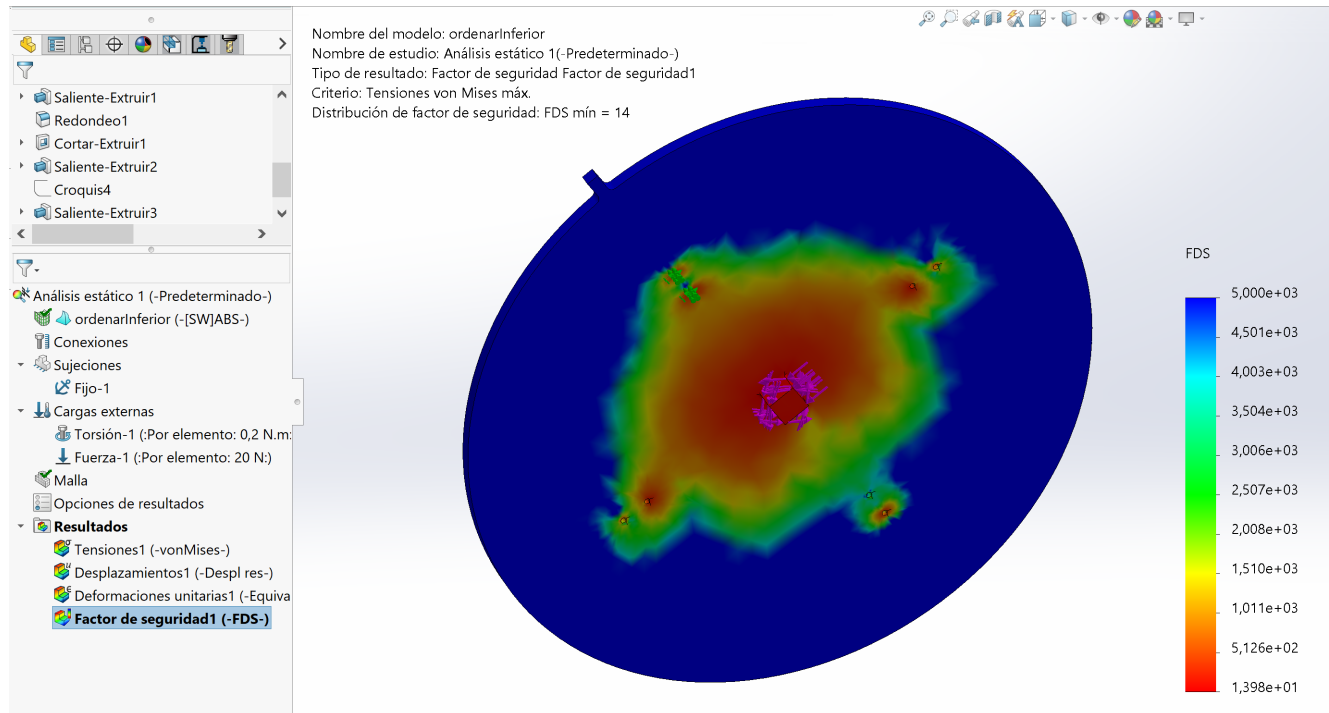
### A.2.1 Base inferior del disco giratorio

En la pieza de la Figura 7.5, se evaluaron las siguientes cargas:

- **Fuerza transversal:** incorpora el efecto simulado de un intento de vuelco del disco giratorio, esfuerzo que recaería sobre el eje de perfil cuadrado en caso de no absorberlo los rodines. Se estima como dos terceras partes del peso aproximado del disco.
- **Torque:** se utilizó el máximo torque del motor a pasos, según reporta su fabricante. En este caso, el modelo NEMA17 x33, utilizado para mover el disco giratorio, tiene un torque máximo de 0.2 N·m.
- **Soportes:** se definieron las cavidades de los tornillos de acoplamiento como restricción de movimiento, ya que estos transmiten la inercia rotacional de todo el subensamble que contiene a los bloques.

Al observar los resultados (ver Figura A.3), estos son congruentes con el comportamiento previsto, ya que el eje de perfil cuadrado se encontró como la zona crítica, con un factor de seguridad mínimo de 14. Adicionalmente, los orificios de los tornillos que unen el disco giratorio también se identificaron zonas de mayor acumulación de esfuerzos. Cabe destacar que la obtención satisfactoria de estos

indicadores, en parte, se debe al redondeo realizado entre el eje saliente y la placa, lo cual disminuye las concentraciones de esfuerzo en caras perpendiculares.



**Figura A.3:** Simulación de esfuerzos para la placa inferior del disco giratorio. Fuente: Elaboración propia

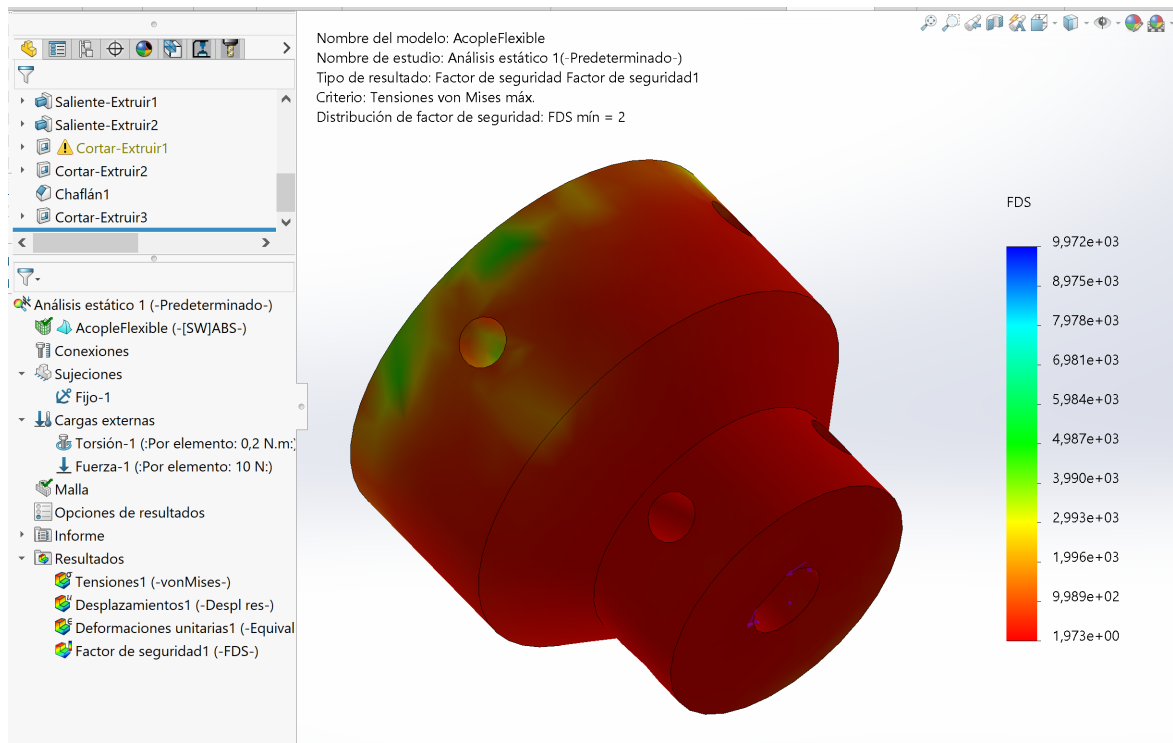
## A.2.2 Acople entre stepper y base inferior

Tal y como se mencionó en el Capítulo 7, el acople de la Figura 7.8, que une el disco giratorio con el motor a pasos que lo controla, es un elemento crítico para el funcionamiento del sistema de órdenes de trabajo. Para evaluar si este componente soporta las condiciones máximas a las que puede ser expuesto, esto en un escenario de mayor esfuerzo que su operación normal, se agregaron las siguientes cargas:

- **Fuerza axial:** en caso de que se derive parte del peso del disco al acople. Esta situación está controlada ya que el peso del disco recae sobre los rodines, no obstante, se desea realizar un análisis de caso crítico, con lo que se agrega cerca de un tercio del peso del disco, equivalente a 10 N.

- **Torque:** transmitido a través del eje de perfil cuadrado, se utilizó el máximo torque del motor a pasos según el fabricante. En este caso, el modelo NEMA17 x33, utilizado para mover el disco giratorio, tiene un torque máximo de  $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ .
- **Soportes:** se define como rígido en la cavidad donde entra el eje del motor a pasos, el cual entra a presión.

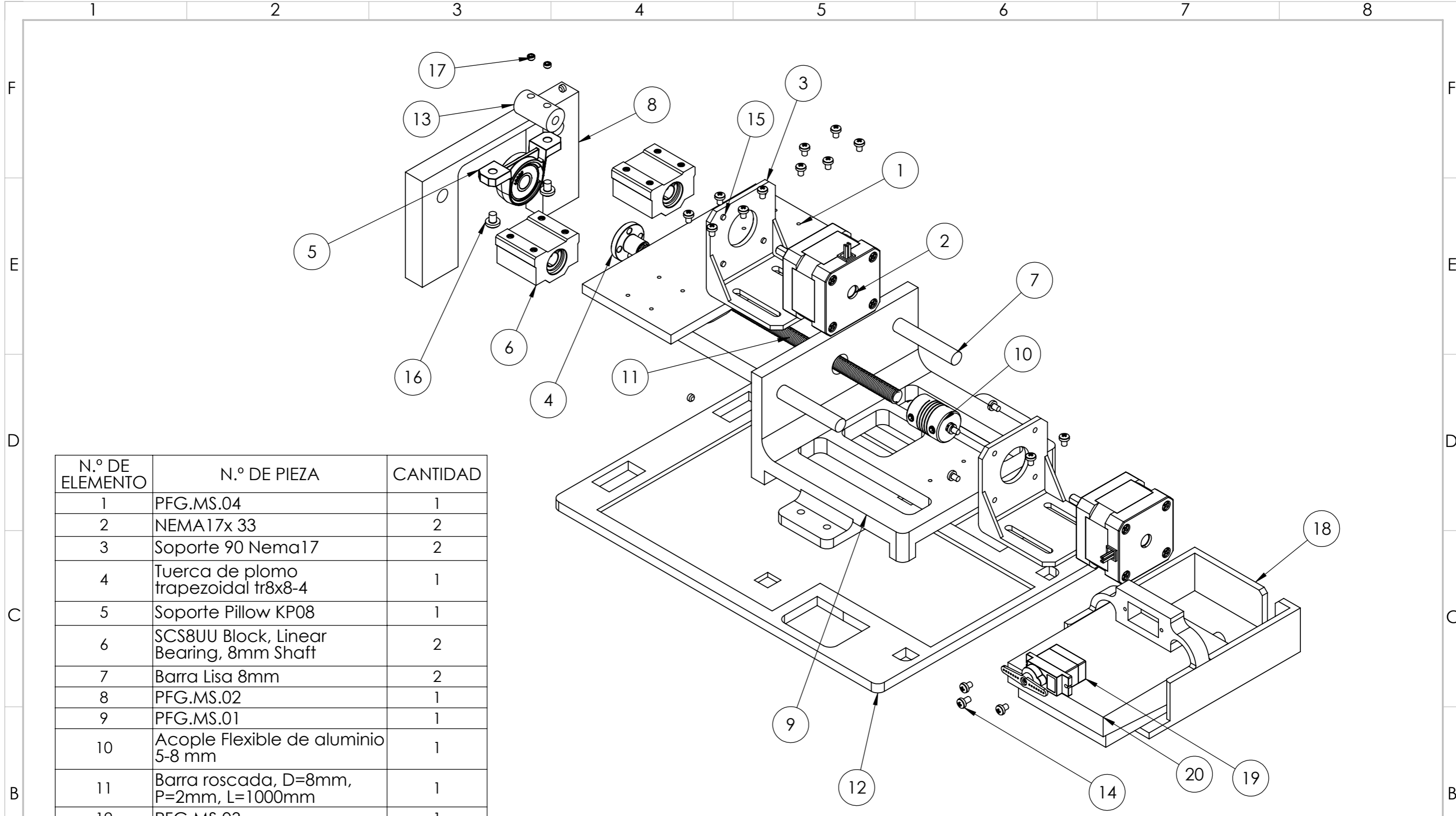
En la Figura A.4, se muestran los resultados del estudio realizado. En este caso, la pieza posee un factor de seguridad mínimo de 2, esto al ser sometida a esfuerzos superiores a los de su operación, con lo cual, se determina que esta soportará las cargas durante su funcionamiento típico sin inconvenientes.



**Figura A.4:** Simulación de esfuerzos para el acople del disco giratorio. Fuente: Elaboración propia

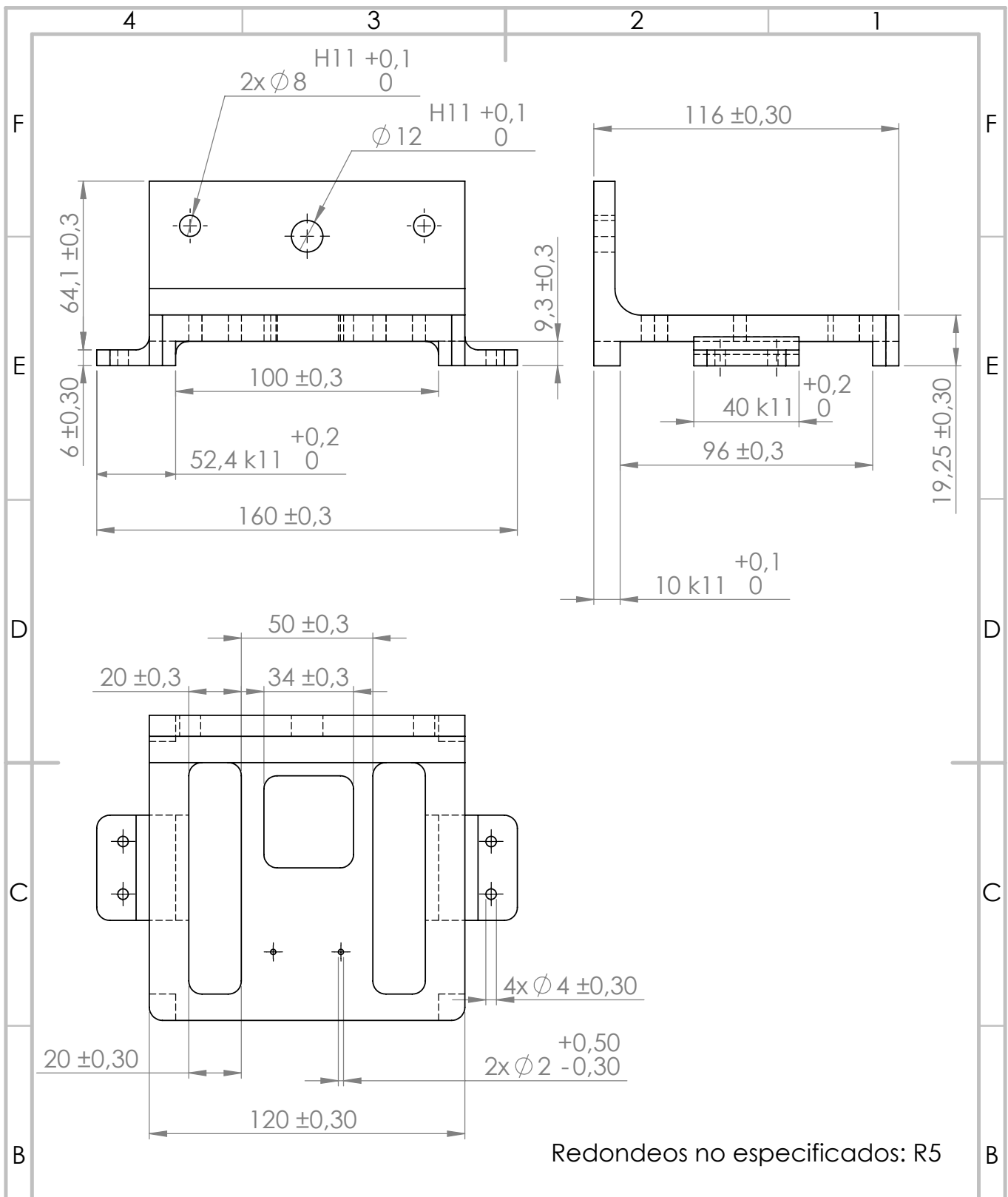
---

## APÉNDICE B: PLANOS MECÁNICOS

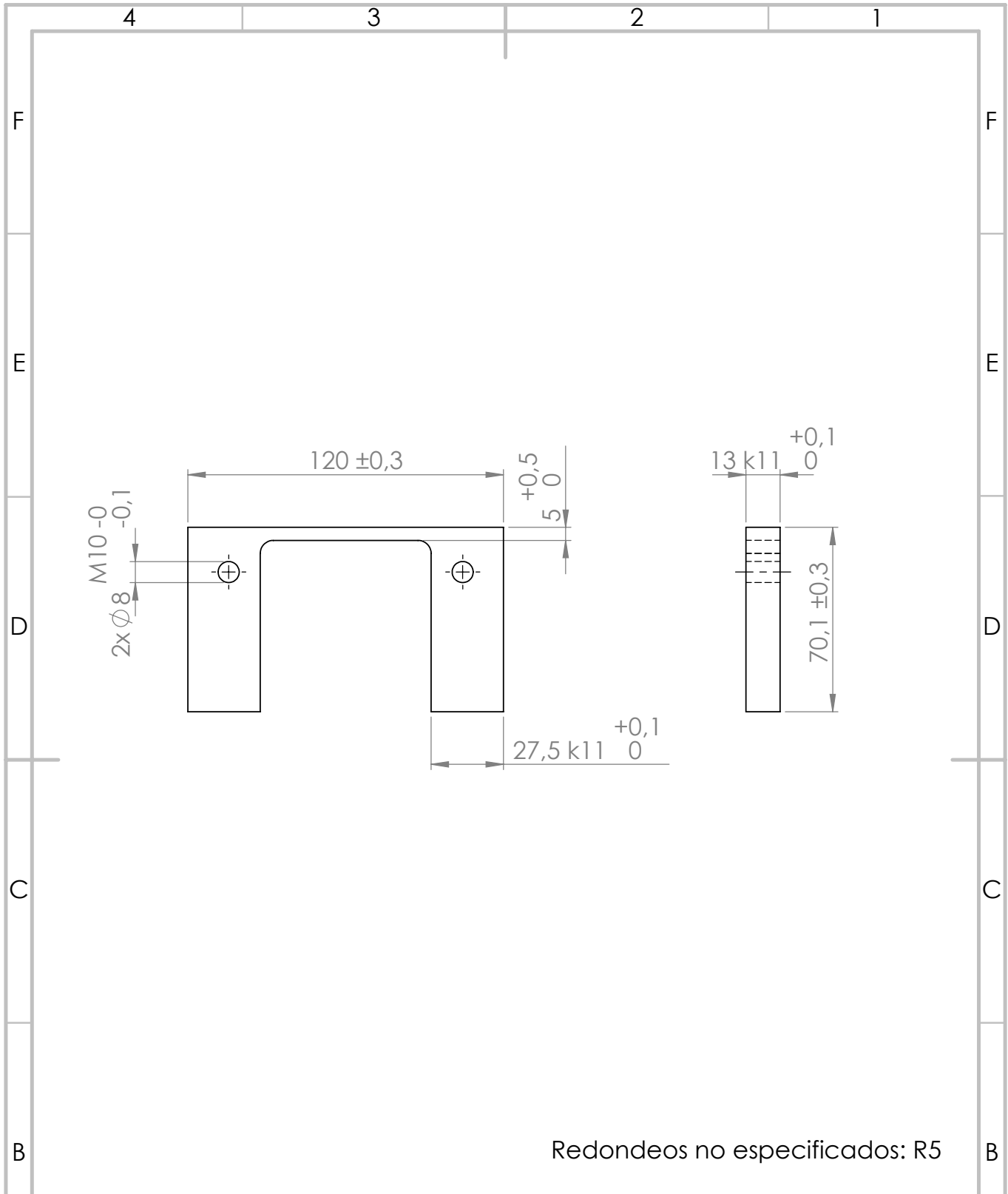


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	PFG.MS.04	1
2	NEMA17x 33	2
3	Soporte 90 Nema17	2
4	Tuerca de plomo trapezoidal tr8x8-4	1
5	Soporte Pillow KP08	1
6	SCS8UU Block, Linear Bearing, 8mm Shaft	2
7	Barra Lisa 8mm	2
8	PFG.MS.02	1
9	PFG.MS.01	1
10	Acople Flexible de aluminio 5-8 mm	1
11	Barra roscada, D=8mm, P=2mm, L=1000mm	1
12	PFG.MS.03	1
13	Acople rígido 5x8 mm	1
14	ISO 7045 - M3 x 5 - Z - 5N	1
15	ISO 7045 - M3 x 4 - Z - 4N	22
16	ISO 7045 - M4 x 5 - Z - 5N	2
17	ISO 4026 - M4 x 2.5-N	5
18	PFG.MS.05	1
19	SG90 Microservo	1
20	Pedal	1

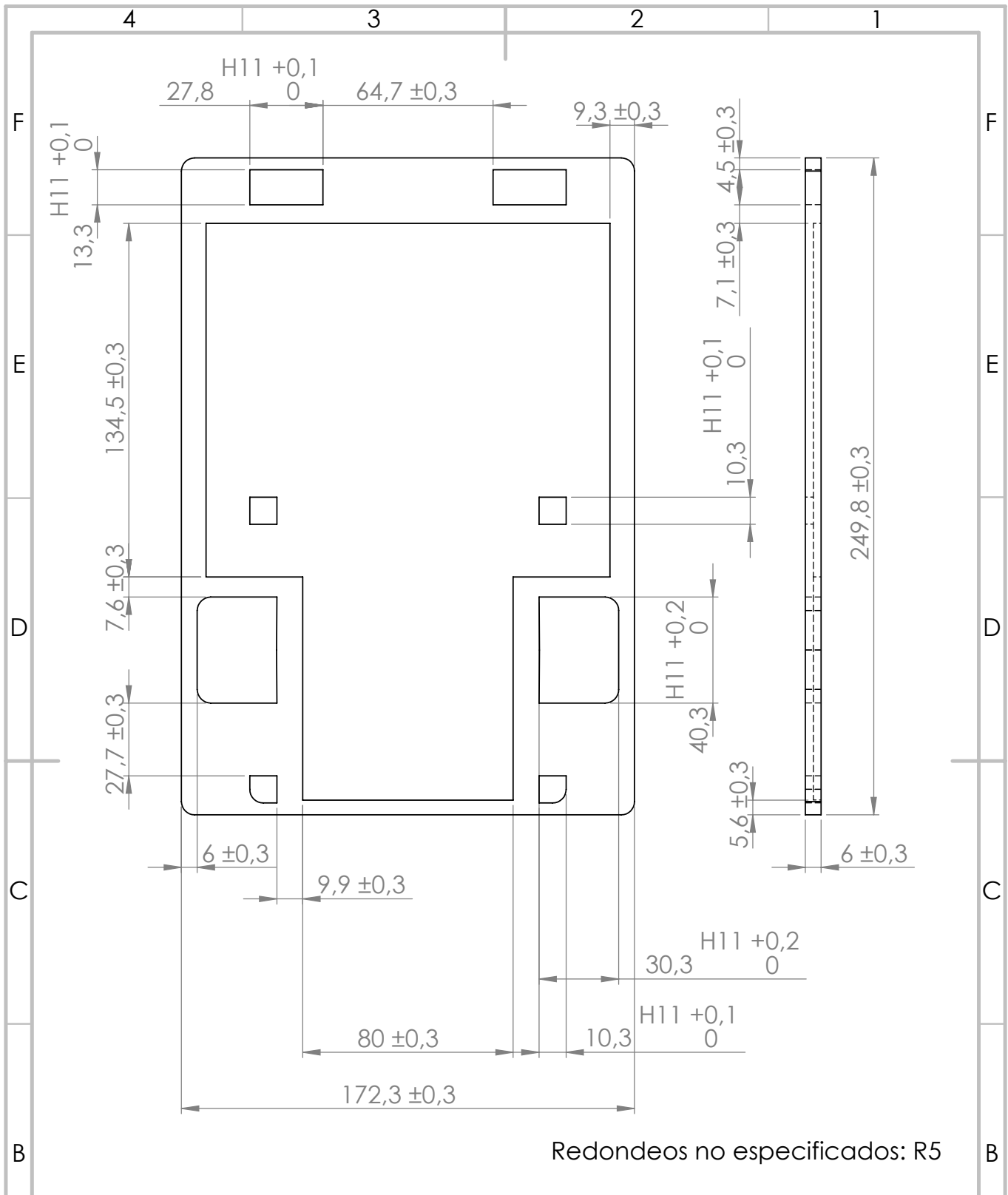
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ. Kevin M.		FIRMA		FECHA 27/10/21		ACABADO GENERAL: --	
VERIF. XXXXX		APROB. XXXXX		FABR. XXXXX		MATERIAL: --	
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±, .X ±, .XX ±, .XXX ±, ANGULAR: ±°		TOLERANCIA EN: --		PESO: -- gramos	
DESIGNACIÓN: <b>Ensamble de secuencia</b>				DENOMINACIÓN: <b>PFG.MS.EXP</b>			
PROYECTO: Semiautomatización de Calibración dimensional				ESCALA: <b>1:2</b>		FORMATO: <b>A3</b>	
UNIDADES: mm				HOJA 1 DE 14			



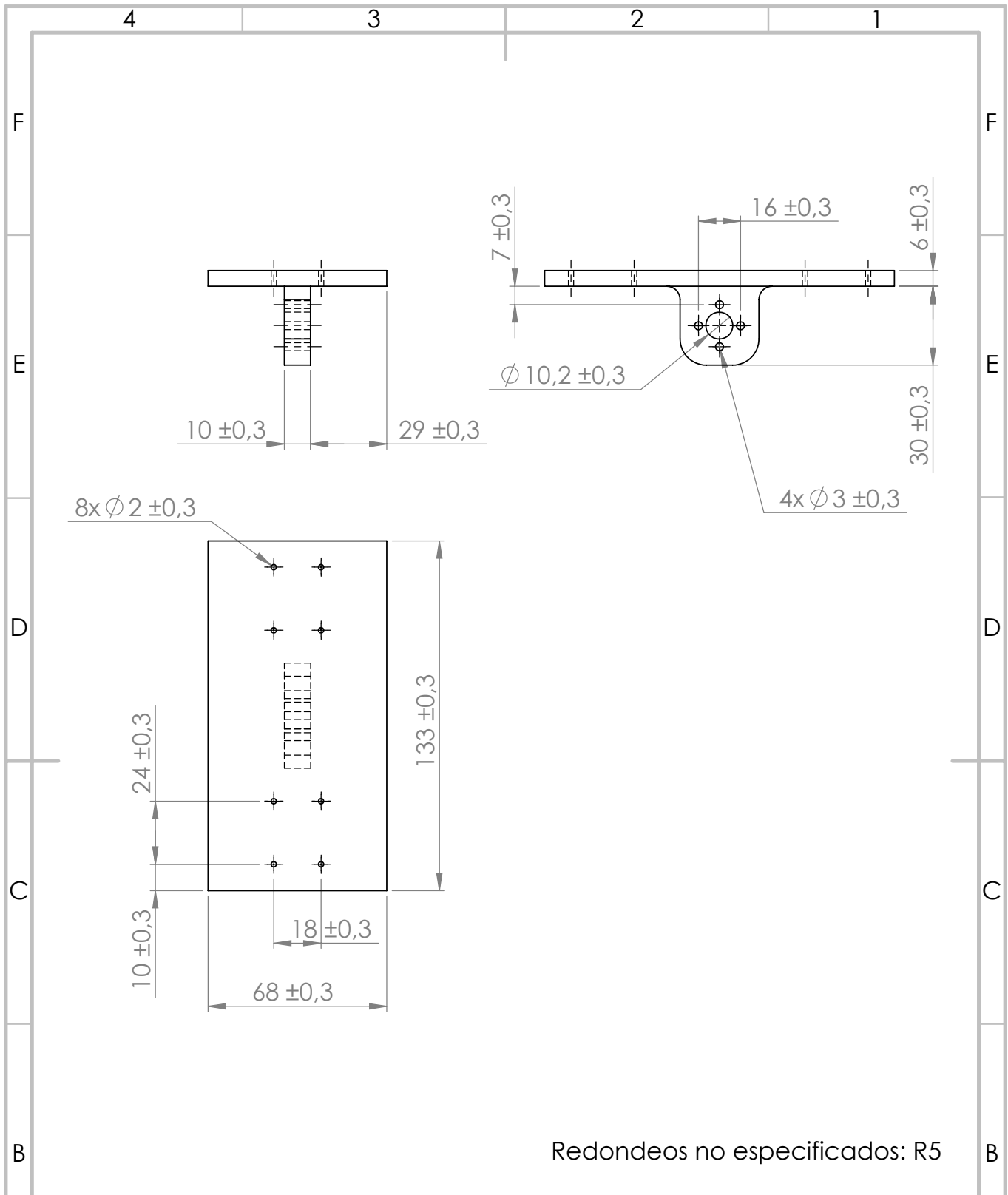
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	Kevin M.	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
VERIF.	XXXXX		3/10/21	N11	Base lateral derecha	PFG.MS.01	
APROB.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:			
FABR.	LD		d/m/año	ABS			
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°	mm	mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:2	A4
				PESO: 166 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 2 DE 14	



<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
VERIF.	XXXXX		3/10/21	N11	Base lateral izquierda	PFG.MS.02	
APROB.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:			
FABR.	LD		d/m/año	ABS			
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± . X ± . XX ± . XXX ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:2	A4
				PESO: 54 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 3 DE 14	

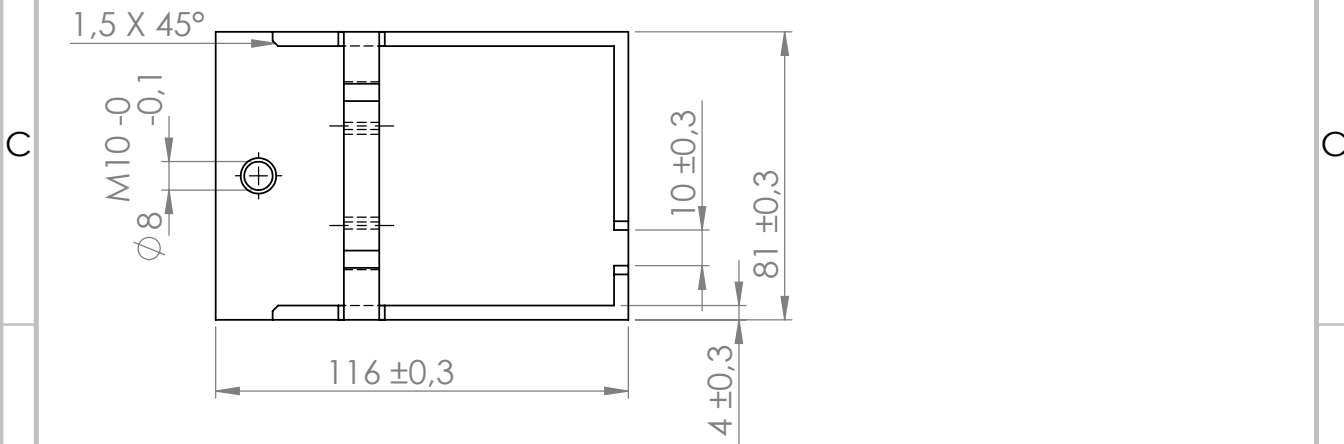
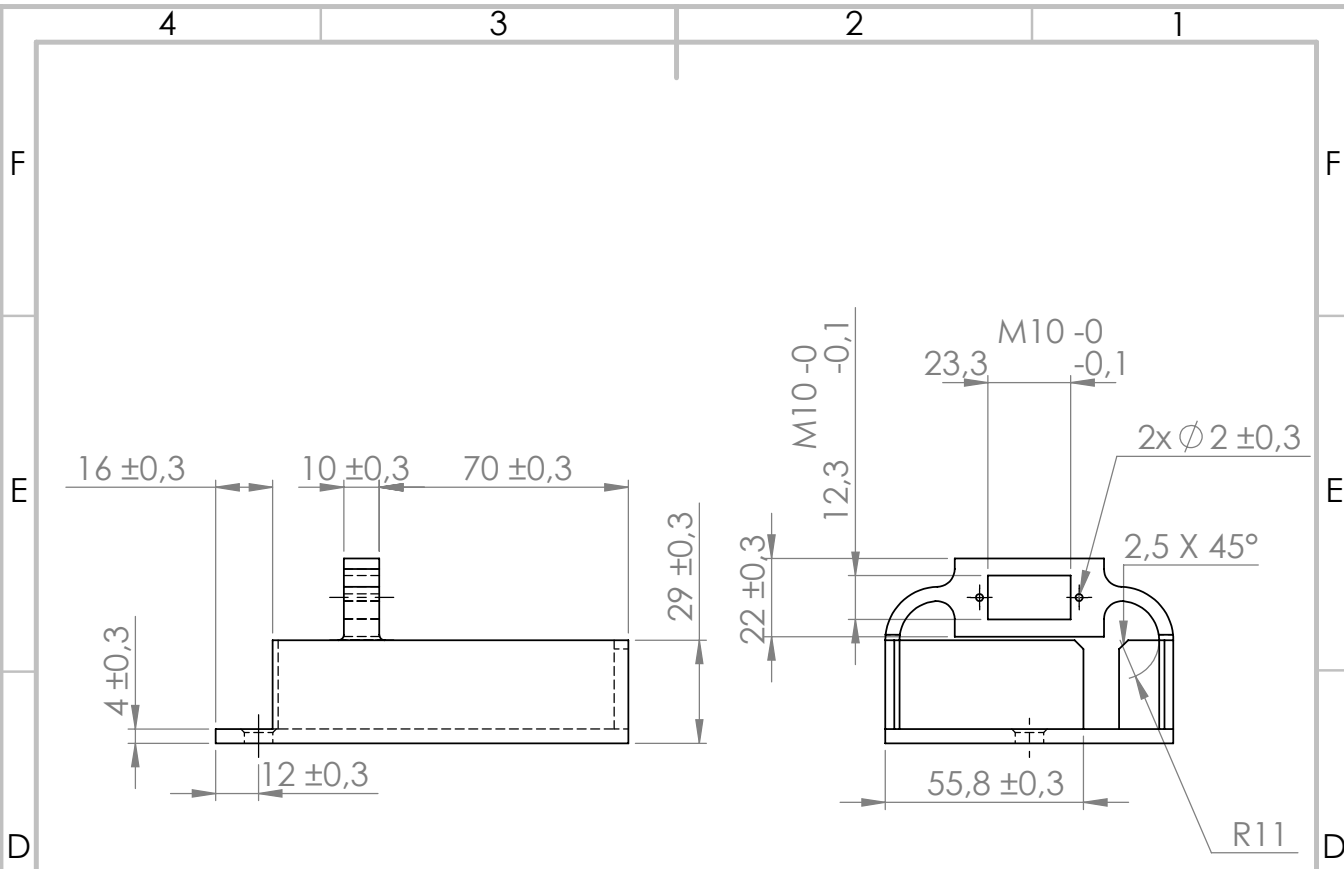


<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:					
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>					
NOMBRE: Kevin M.		FIRMA:		FECHA: 3/10/21		ACABADO GENERAL: N11		DESIGNACIÓN: Base de sujeción		DENOMINACIÓN: PFG.MS.03	
VERIF. XXXXX		FIRMA:		FECHA: d/m/año		MATERIAL: ABS		PROYECTO: Semiautomatización Calibración Dimensional		ESCALA: 1:2	
APROB. XXXXX		FIRMA:		FECHA: d/m/año		TOLERANCIAS: LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ±		TOLERANCIA EN: mm		FORMATO: A4	
FABR. LD		FIRMA:		FECHA: d/m/año		ANGULAR: ±°		PESO: 158 gramos		UNIDADES: mm	
SISTEMA:		PRIMER CUADRANTE		TOLERANCIA EN: mm		PROYECTO: Semiautomatización Calibración Dimensional		ESCALA: 1:2		FORMATO: A4	
PESO: 158 gramos		UNIDADES: mm		ESCALA: 1:2		FORMATO: A4		HOJA 4 DE 14			



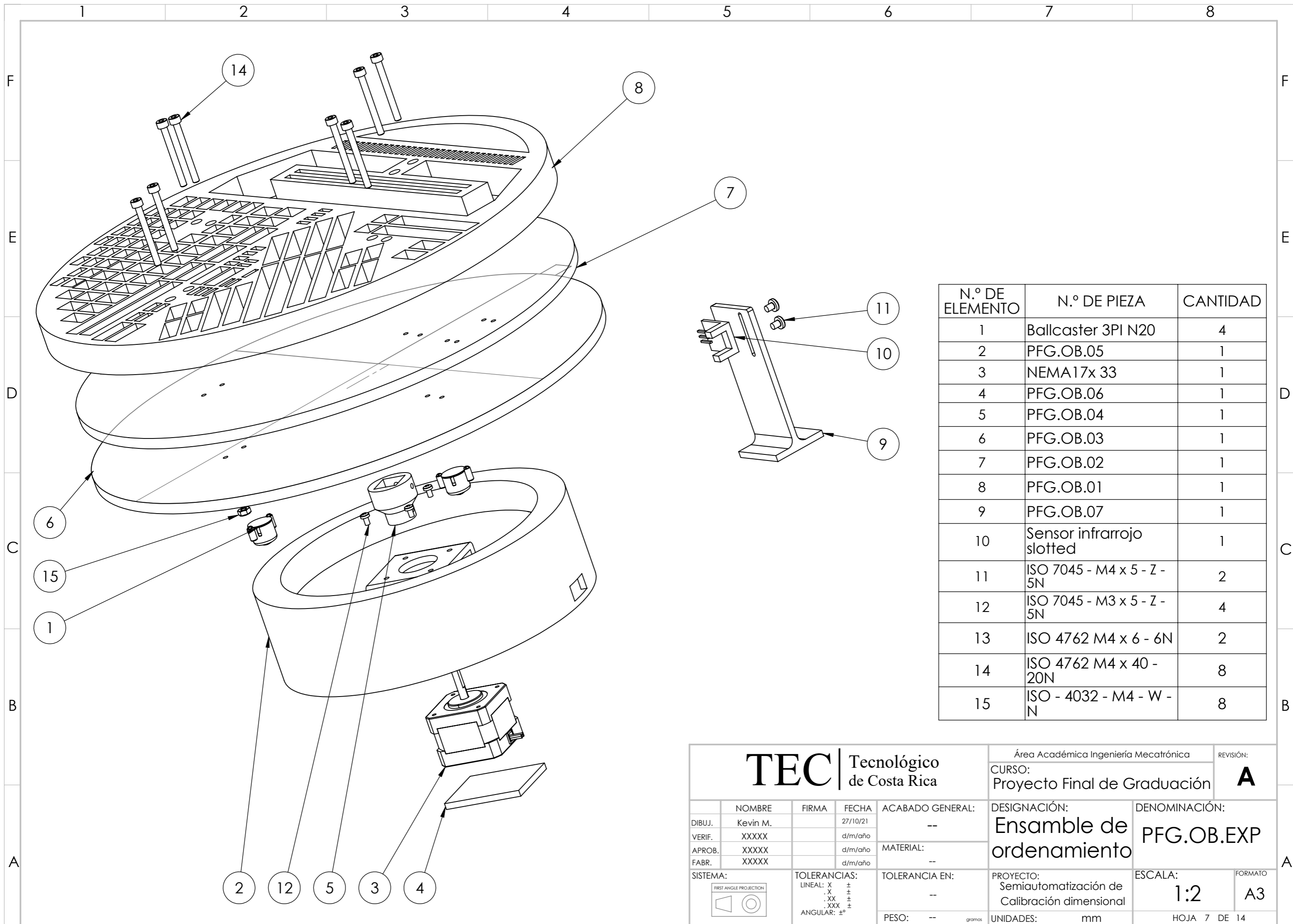
Redondeos no especificados: R5

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
NOMBRE		FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
DIBUJ. Kevin M.			3/10/21	N11	Carrito lineal	PFG.MS.04	
VERIF. XXXXX			d/m/año	MATERIAL:			
APROB. XXXXX			d/m/año	ABS			
FABR. LD			d/m/año				
A	SISTEMA:		TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
			LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°	mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:2	A4
				PESO: 63 <small>gramos</small>	UNIDADES: mm	HOJA 5 DE 14	



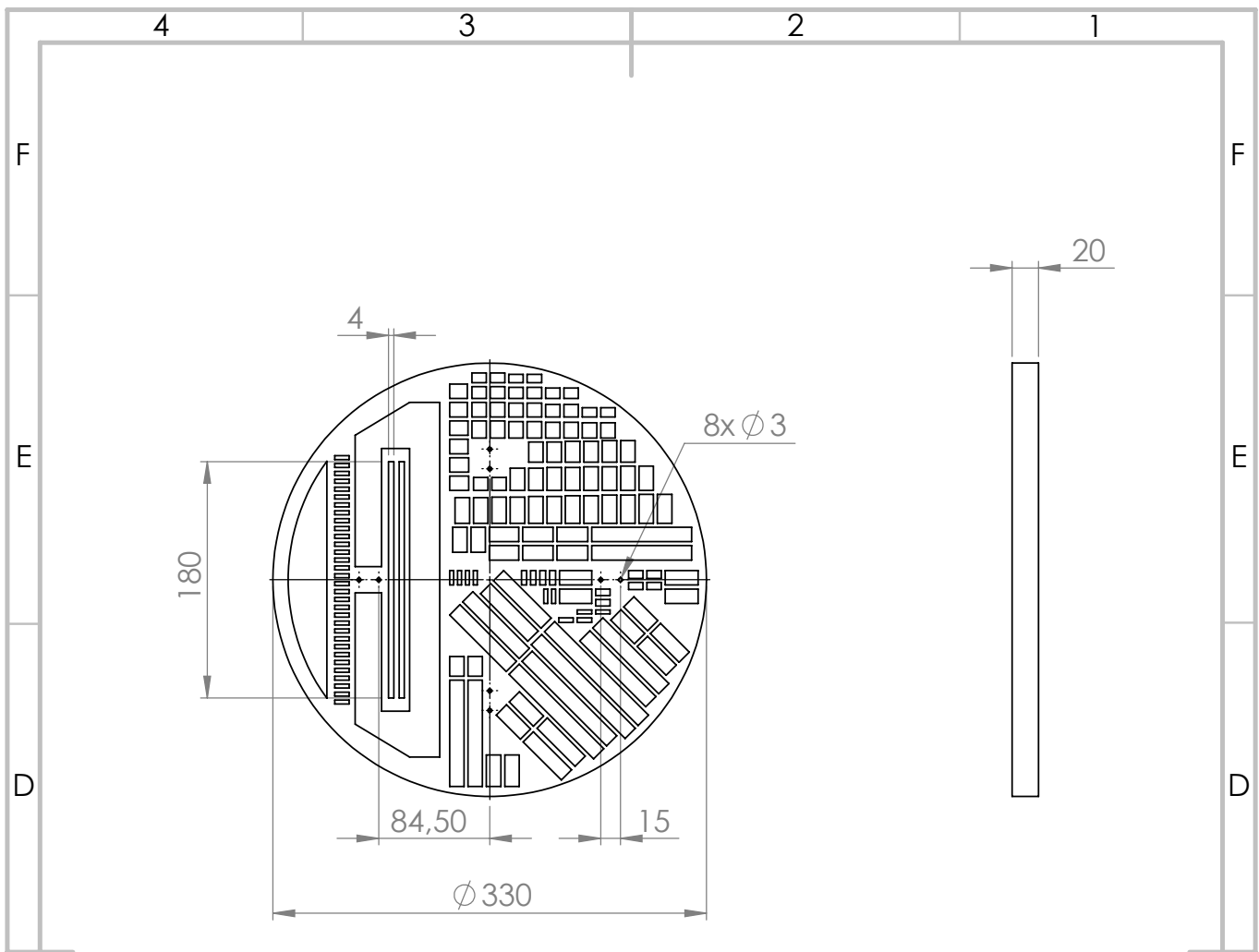
Redondeos no especificados: R5

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
VERIF.	XXXXX		3/10/21	N11	Soporte pedal y servomotor	PFG.MS.05	
APROB.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:			
FABR.	LD		d/m/año	ABS			
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:2	A4
				PESO: 74 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 6 DE 14	



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Ballcaster 3PI N20	4
2	PFG.OB.05	1
3	NEMA17x 33	1
4	PFG.OB.06	1
5	PFG.OB.04	1
6	PFG.OB.03	1
7	PFG.OB.02	1
8	PFG.OB.01	1
9	PFG.OB.07	1
10	Sensor infrarrojo slotted	1
11	ISO 7045 - M4 x 5 - Z - 5N	2
12	ISO 7045 - M3 x 5 - Z - 5N	4
13	ISO 4762 M4 x 6 - 6N	2
14	ISO 4762 M4 x 40 - 20N	8
15	ISO - 4032 - M4 - W - N	8

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:					
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>					
DIBUJ. Kevin M.		FIRMA		FECHA 27/10/21		ACABADO GENERAL: --		DESIGNACIÓN: <b>Ensamble de ordenamiento</b>		DENOMINACIÓN: <b>PFG.OB.EXP</b>	
VERIF. XXXXX		APROB. XXXXX		FABR. XXXXX		MATERIAL: --		PROYECTO: Semiautomatización de Calibración dimensional		ESCALA: <b>1:2</b>	
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±, .X ±, .XX ±, .XXX ±, ANGULAR: ±°		TOLERANCIA EN: --		PESO: -- gramos		UNIDADES: mm		FORMATO: <b>A3</b>	
								HOJA 7 DE 14			



Intersticios con dimensionamiento según Tabla 7.1  
(incorporando 1 mm de lado)

Tabla 7.1: Tabla de medidas del conjunto de bloques.

Origen	Valor Nominal	Paso	Cantidad
Set estándar	1.0005	-	1
	1.001 - 1.009	0.001	9
	1.01 - 1.49	0.01	49
	0.5 - 24.5	0.5	49
	25 - 100	25	4
Compra individual	1.6 - 1.9	0.1	4
	30 - 90, excluyendo 50	10	6

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

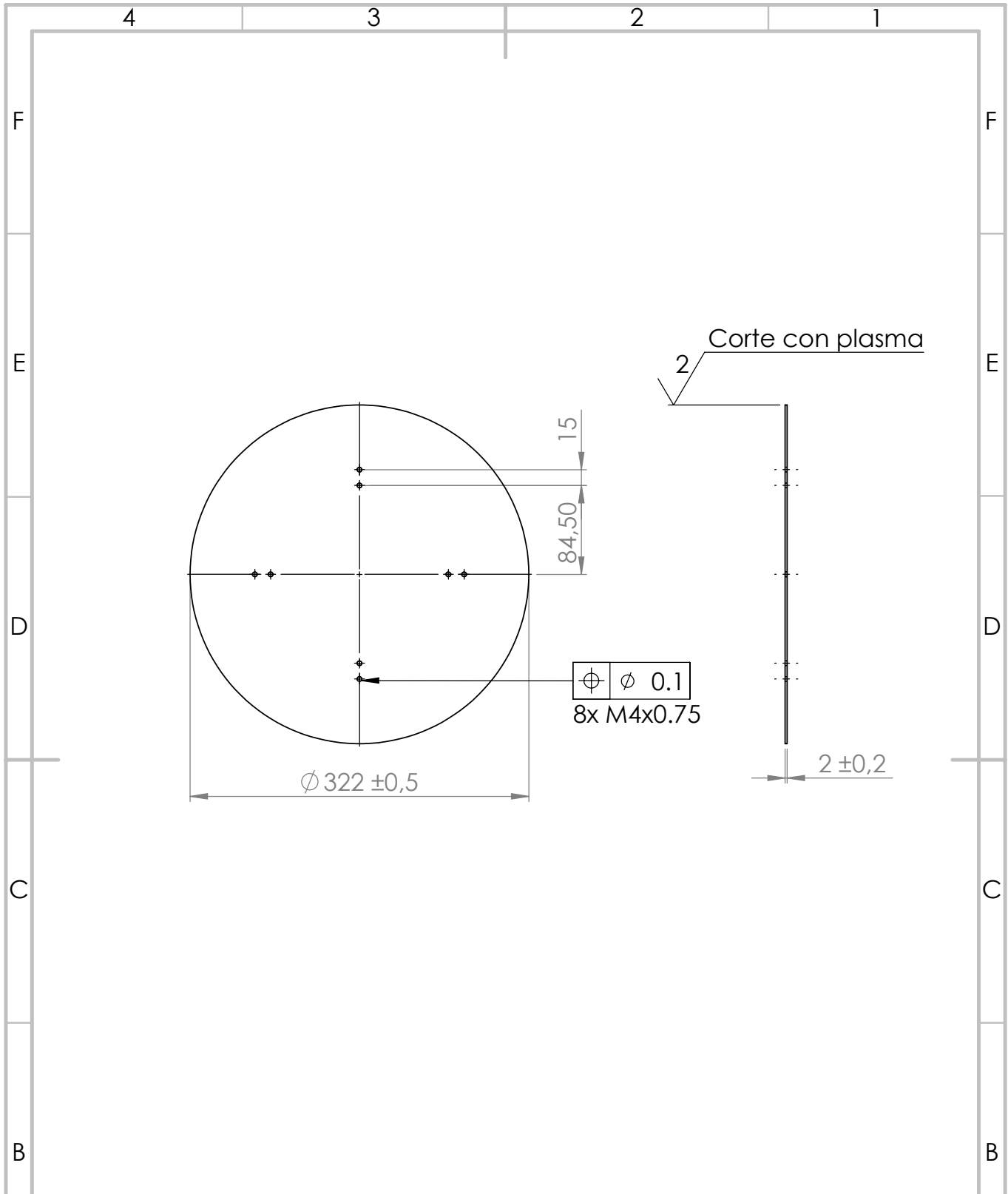
Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

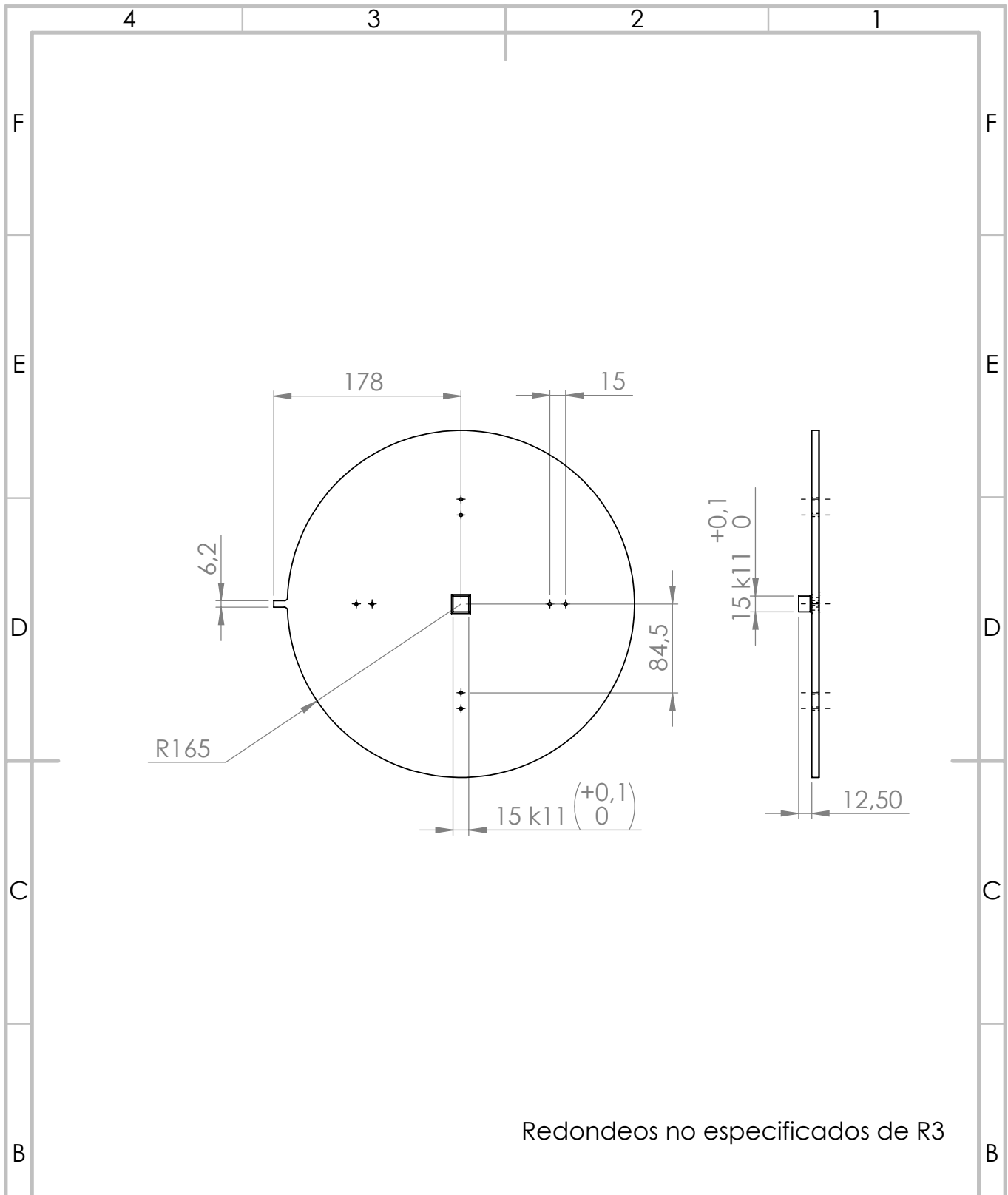
CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

**A**

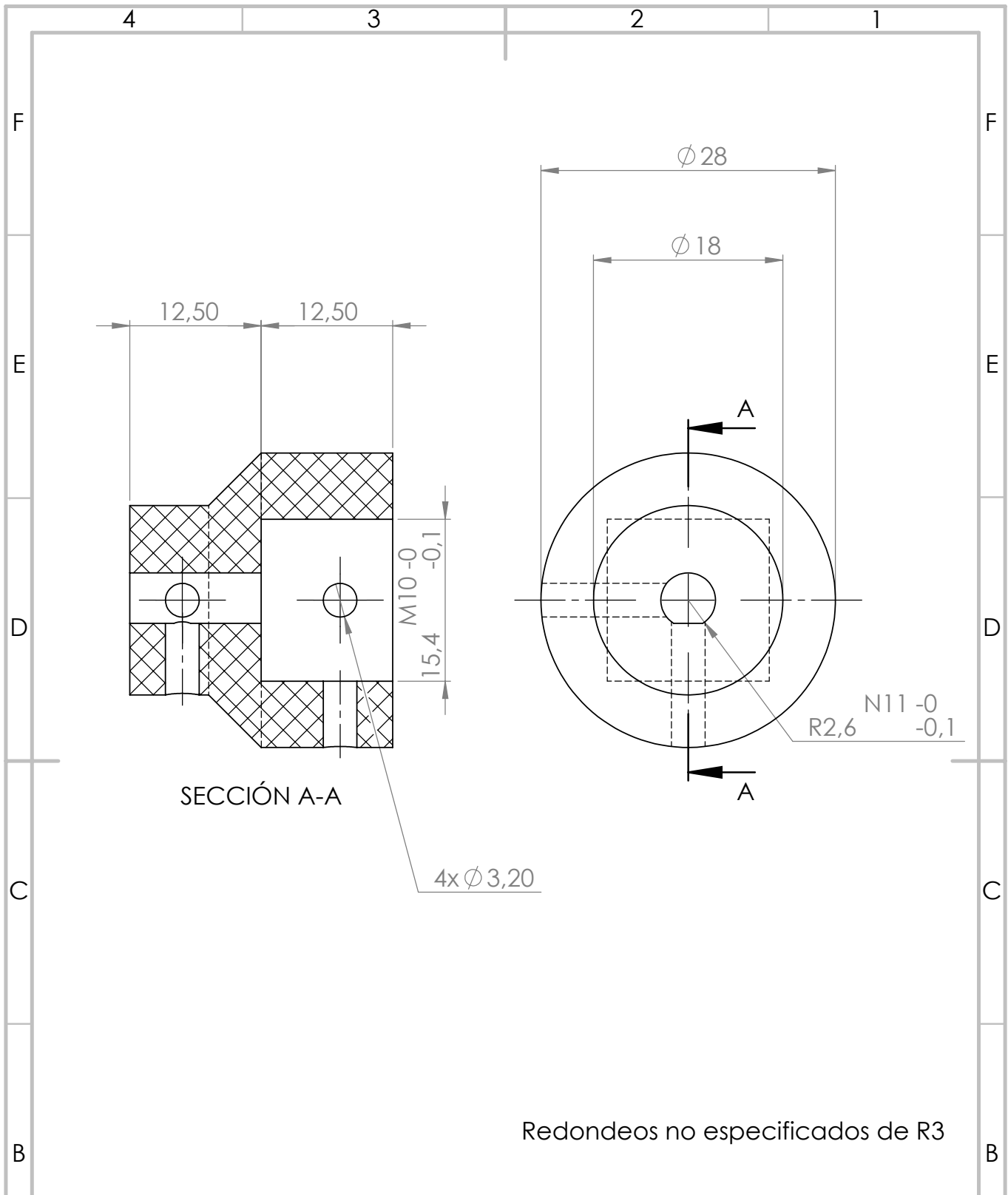
DIBUJ.	NOMBRE Kevin M.	FIRMA	FECHA 3/10/21	ACABADO GENERAL: N11	DESIGNACIÓN: Base superior de ordenamiento	DENOMINACIÓN: PFG.OB.01
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL: ABS		
APROB.	XXXXX		d/m/año			
FABR.	LD		d/m/año	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: Semiautomatización Calibración Dimensional	ESCALA: 1:5
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ± 0.3 .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		TOLERANCIA EN: mm	PESO: 795 gramos	UNIDADES: mm	FORMATO A4
						HOJA 8 DE 14



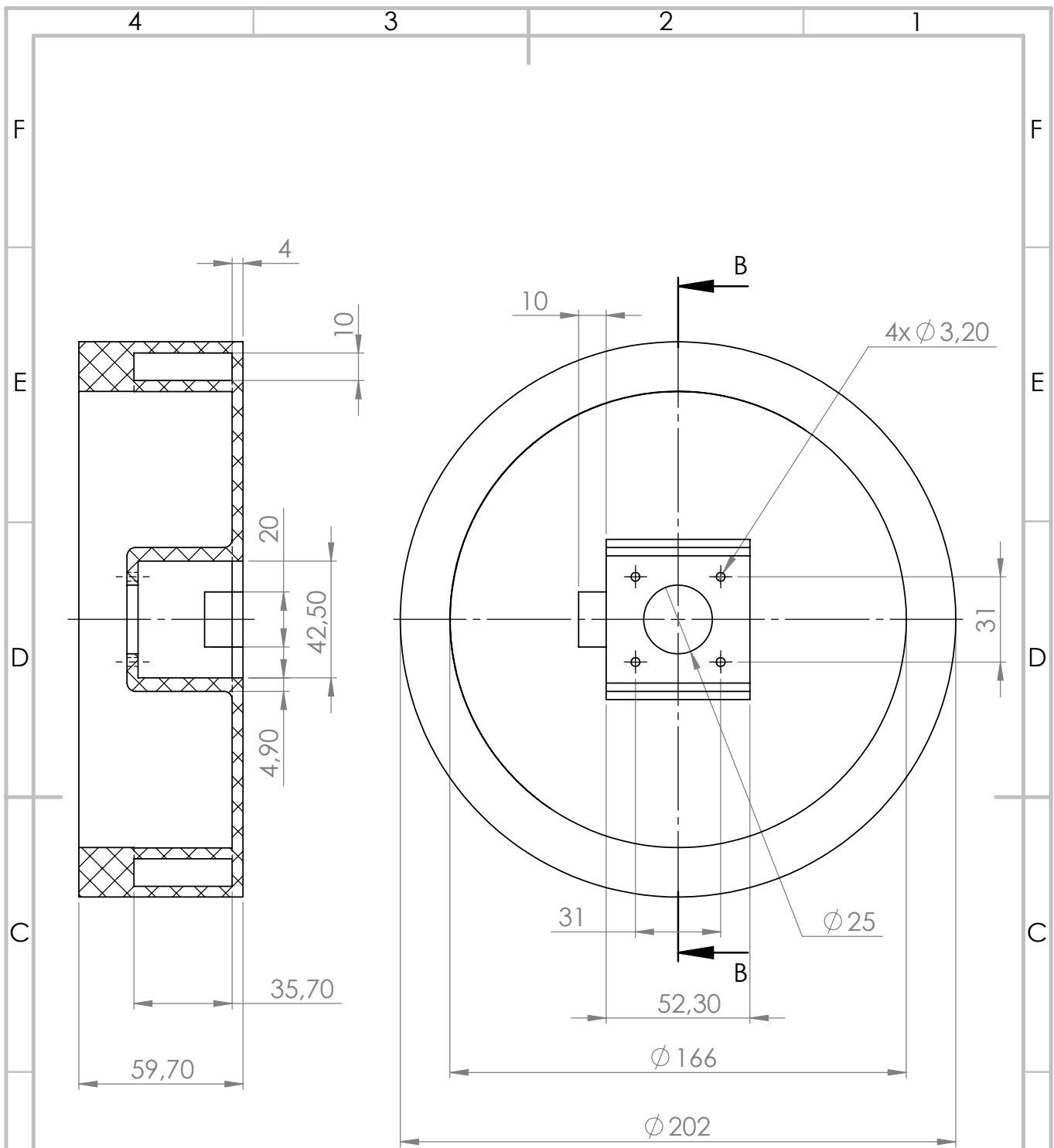
<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
VERIF.	XXXXX		3/10/21	N2/N3	Disco de equiparación térmica	PFG.OB.02	
APROB.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:			
FABR.	LD		d/m/año	Inox 304			
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± 0.3 .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:5	A4
				PESO: 1302 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 9 DE 14	



<h1 style="margin: 0;">TEC</h1> <p style="margin: 0;">Tecnológico de Costa Rica</p>				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:		
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		A		
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:		
DIBUJ.	Kevin M.		3/10/21	N11	Base inferior de ordenamiento	PFG.OB.03		
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL: ABS				
APROB.	XXXXX		d/m/año					
FABR.	LD		d/m/año					
A	SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		PROYECTO:	
			LINEAL: X ± 0,3 .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		mm		SEMIAUTOMATIZACIÓN CALIBRACIÓN DIMENSIONAL	
					PESO: 613 <small>gramos</small>		UNIDADES: mm	
							ESCALA: 1:5	
							FORMATO: A4	
							HOJA 10 DE 14	



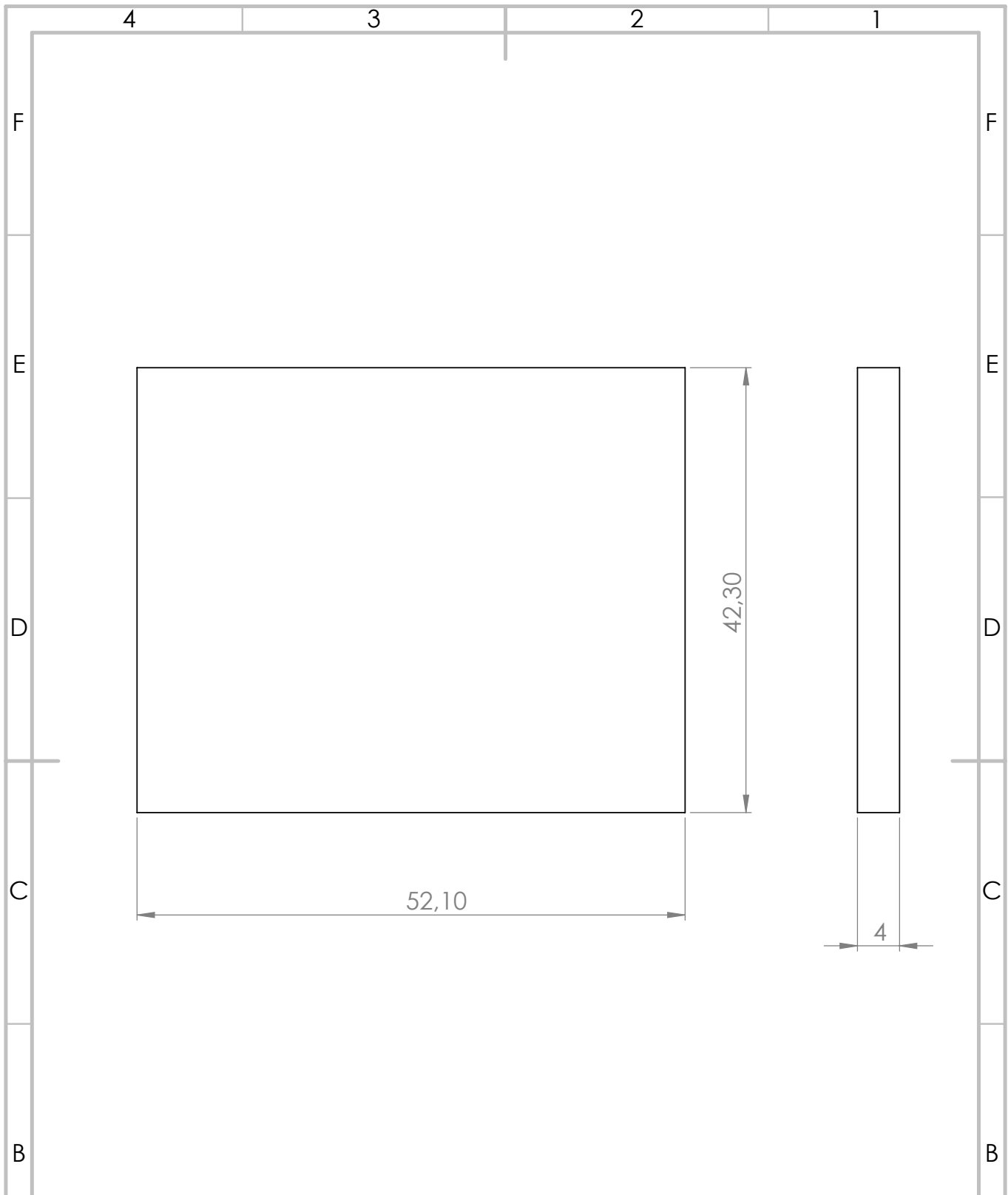
 <b>Tecnológico de Costa Rica</b>				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE Kevin M.	FIRMA	FECHA 3/10/21	ACABADO GENERAL: <b>N11</b>	DESIGNACIÓN: Acople motor - disco	DENOMINACIÓN: PFG.OB.04	
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL: ABS			
APROB.	XXXXX		d/m/año				
FABR.	LD		d/m/año				
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± 0,3 . X ± . XX ± . XXX ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	<b>2:1</b>	<b>A4</b>
				PESO: 9 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 11 DE 14	



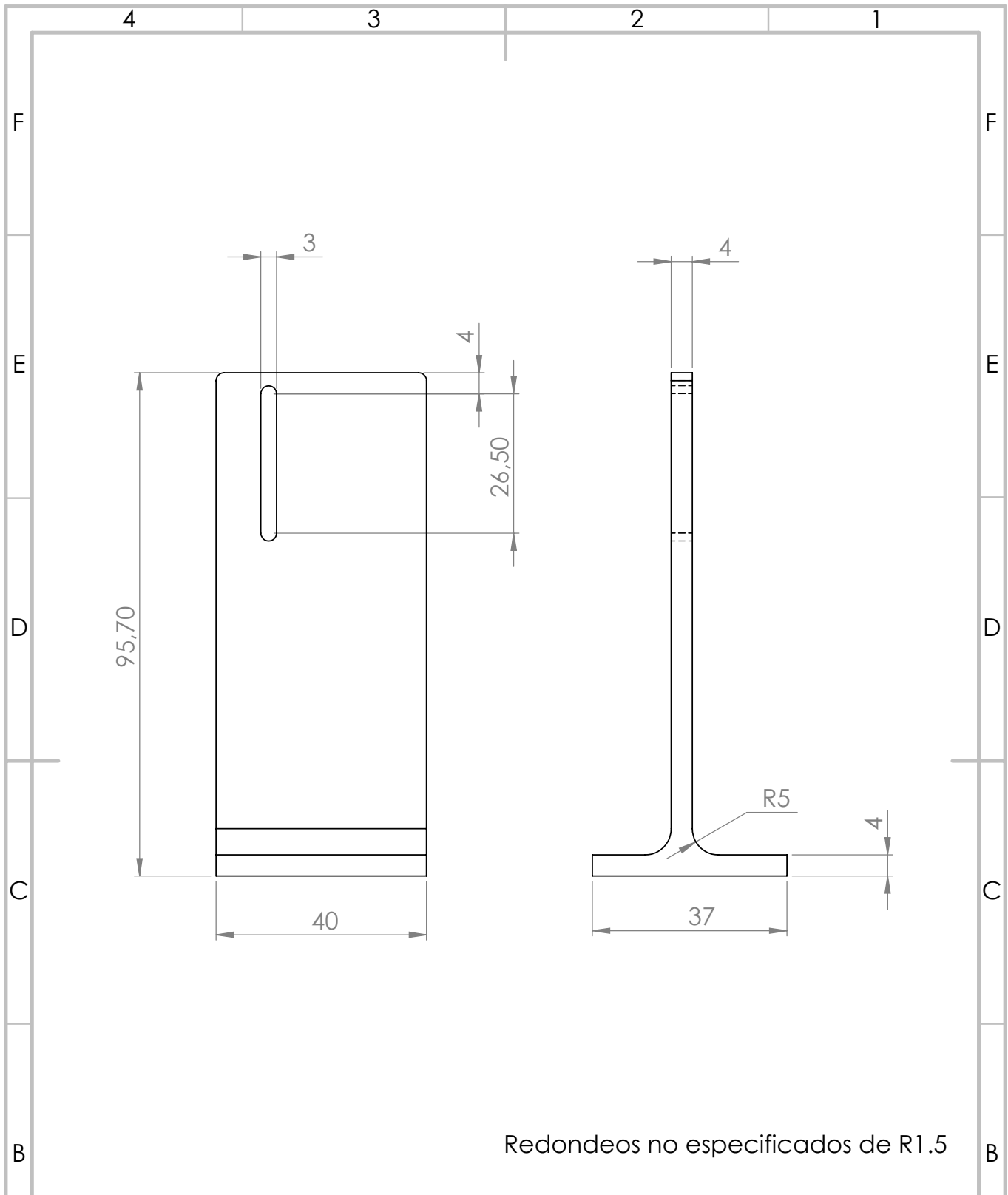
SECCIÓN B-B  
ESCALA 1 : 2

Redondeos no especificados de R3

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
VERIF.	Kevin M.		3/10/21	N11	Base de alojamiento y reposo del disco	PFG.OB.05	
APROB.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:			
FABR.	LD		d/m/año	ABS			
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± 0,3 .X ± ± .XX ± ± .XXX ± ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:2	A4
				PESO: 527 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 12 DE 14	



<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
DIBUJ.	Kevin M.		3/10/21	N11	Tapa del stepper	PFG.OB.06	
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL: ABS			
APROB.	XXXXX		d/m/año				
FABR.	LD		d/m/año				
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± 0,3 .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	2:1	A4
				PESO: 9 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 13 DE 14	



Redondeos no especificados de R1.5

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica Ingeniería Mecatrónica		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:	
VERIF.	XXXXX		3/10/21	N11	Soporte de sensor infrarrojo	PFG.OB.07	
APROB.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:			
FABR.	LD		d/m/año	ABS			
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± 0.3 .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		mm	Semiautomatización Calibración Dimensional	1:1	A4
				PESO: 21 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 14 DE 14	

---

# APÉNDICE C: DESARROLLO PROGRAMÁTICO

A continuación, se presenta el código del sistema semiautomatizado de calibración dimensional realizado para el LD. Es importante recalcar que al haber integrado un solo desarrollo programático con el equipo del LD, esto para integrar una sola interfaz de usuario con la atención de las órdenes de trabajo, toma de datos y la ejecución de la secuencia de calibración (estas últimas 2 funcionalidades programadas por la estudiante de Ingeniería Electrónica Isela Aley), se agrega la totalidad del código; haciendo la salvedad de que la autoría propia de este código es únicamente aquellas secciones relacionadas a las órdenes de trabajo y su interfaz.

```

1 from tkinter import *
2 from tkinter import ttk
3 import xlr
4 from tkinter import filedialog
5 import time
6 from datetime import date
7 import RPi.GPIO as GPIO #Biblioteca para el control de los motores a pasos y el servomotor
8 from RpiMotorLib import RpiMotorLib #Biblioteca para motores a pasos
9 from RpiMotorLib import rpservolib #Biblioteca para servomotor
10 from time import sleep #Biblioteca para sleep
11 import serial #Biblioteca para configuración y adquisición de datos de dispositivos seriales
12 import openpyxl #Biblioteca para hojas de datos
13 from openpyxl import load_workbook #Biblioteca para cargar excel ya existente
14 import smtplib, ssl
15
16 ##### Creación de ventana #####
17
18 window=Tk()
19 window.title("Calibración de bloques") #Nombre de la ventana
20 window.resizable(0,0) #No permite cambiar dimensiones de la venta
21
22 window.geometry("1300x670") #Tamaño de la ventana
23
24 ##### Creación de hoja de datos - Secuencia completa #####
25
26 def HojaDatosCom():
27
28     hoja = wb.active #Activar hoja
29
30     encabezado1=[] #Creación de lista vacía para guardar encabezado 1
31     encabezado1=["", "", "", ""]
32     for i in range(int(repeticiones.get())): #Se harán espacios para cada medición
33         encabezado1.append("Medición #"+str(i+1))
34         for j in range(6):
35             encabezado1.append("")
36
37     encabezado1.append("Medición Final")
38
39     hoja.append(encabezado1) #Crea la fila del encabezado 1 con los títulos
40
41     encabezado2=[] #Creación de lista vacía para guardar encabezado 2
42     encabezado2=["Número de bloque", 'Fecha', 'Hora', 'Identificación del bloque', 'Valor nominal del bloque (mm o pulg)']
43
44     for i in range(int(repeticiones.get())): #Se harán espacios para los valores de cada medición
45         encabezado2.append("Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
46         encabezado2.append("Valor del Calibrando en posición 2 (Centro) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
47         encabezado2.append("Valor del Calibrando en posición 3 (esquina) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
48         encabezado2.append("Valor del Calibrando en posición 4 (esquina) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
49         encabezado2.append("Valor del Calibrando en posición 5 (esquina) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
50         encabezado2.append("Valor del Calibrando en posición 6 (esquina) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
51         encabezado2.append("Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
52
53     encabezado2.append("Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (µm o µpulg)")
54
55     encabezado2.append("Temperatura del Patrón durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
56     #Encabezado para temperaturas al inicio de la secuencia
57     encabezado2.append("Temperatura del Calibrando durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
58     encabezado2.append("Temperatura ambiente dentro de la cámara durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
59     encabezado2.append("Temperatura del Calibrador de bloques durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
60
61     encabezado2.append("Temperatura del Patrón durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
62     #Encabezado para temperaturas al final de la secuencia
63     encabezado2.append("Temperatura del Calibrando durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
64     encabezado2.append("Temperatura ambiente dentro de la cámara durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
65     encabezado2.append("Temperatura del Calibrador de bloques durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
66
67     encabezado2.append("Humedad Relativa Promedio Vaisala (%)") #Encabezado para promedio de humedad relativa
68
69     hoja.append(encabezado2) #Crea la fila del encabezado 2 con los títulos
70
71 ##### Creación de hoja de datos - Secuencia centros #####
72
73 def HojaDatosCen():
74
75     hoja = wb.active #Activar hoja
76
77     encabezado1=[] #Creación de lista vacía para guardar encabezado 1
78     encabezado1=["", "", "", ""]
79     for i in range(int(repeticiones.get())): #Se harán espacios para cada medición
80         encabezado1.append("Medición #"+str(i+1))
81         encabezado1.append("")
82
83     encabezado1.append("Medición Final")
84
85     hoja.append(encabezado1) #Crea la fila del encabezado 1 con los títulos
86
87     encabezado2=[] #Creación de lista vacía para guardar encabezado 2
88     encabezado2=["Número de bloque", 'Fecha', 'Hora', 'Identificación del bloque', 'Valor nominal del bloque (mm o pulg)']
89
90     for i in range(int(repeticiones.get())): #Se harán espacios para los valores de cada medición
91         encabezado2.append("Valor del Patrón medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
92         encabezado2.append("Valor del Calibrando medición #"+str(i+1)+" (µm o µpulg)")
93         encabezado2.append("Valor del Patrón medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (µm o µpulg)")
94         encabezado2.append("Valor del Calibrando medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (µm o µpulg)")
95         encabezado2.append("Temperatura del Patrón durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
96         #Encabezado para temperaturas al inicio de la secuencia
97         encabezado2.append("Temperatura del Calibrando durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
98         encabezado2.append("Temperatura ambiente dentro de la cámara durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
99         encabezado2.append("Temperatura del Calibrador de bloques durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)")
100
101     encabezado2.append("Temperatura del Patrón durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
102     #Encabezado para temperaturas al final de la secuencia
103     encabezado2.append("Temperatura del Calibrando durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
104     encabezado2.append("Temperatura ambiente dentro de la cámara durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
105     encabezado2.append("Temperatura del Calibrador de bloques durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #"+str(int(repeticiones.get())+1)+" (°C)")
106
107     encabezado2.append("Humedad Relativa Promedio Vaisala (%)") #Encabezado para promedio de humedad relativa
108
109     hoja.append(encabezado2) #Crea la fila del encabezado 2 con los títulos

```

```

encabezado2.append('Valor del Patrón medicion #'+str(int(repeticiones.get()+1))+ ' (µm o µgug))
87
88 encabezado2.append('Temperatura del Patrón durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)')
89 #Encabezado para temperaturas al inicio de la secuencia
90 encabezado2.append('Temperatura del Calibrando durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)')
91 encabezado2.append('Temperatura ambiente dentro de la cámara durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)')
92 encabezado2.append('Temperatura del Calibrador de bloques durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #1 (°C)')
93
94 encabezado2.append('Temperatura del Patrón durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #'+str(int(repeticiones.get()+1))+ ' (°C)')
95 #Encabezado para temperaturas al final de la secuencia
96 encabezado2.append('Temperatura del Calibrando durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #'+str(int(repeticiones.get()+1))+ ' (°C)')
97 encabezado2.append('Temperatura ambiente dentro de la cámara durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #'+str(int(repeticiones.get()+1))+ ' (°C)')
98 encabezado2.append('Temperatura del Calibrador de bloques durante la toma del Valor del Patrón en posición 1 (Centro) medición #'+str(int(repeticiones.get()+1))+ ' (°C)')
99
100 encabezado2.append('Humedad Relativa Promedio Vaisala (%)')
101 #Encabezado para promedio de humedad relativa
102
103 hoja.append(encabezado2) #Crea la fila del encabezado 2 con los títulos
104
105 ##### Movimientos del órdenes de trabajo#####
106 def obtenerAnguloBloque(valorNominalBloques[dato]): #funcion para extraer el angulo al que debe moverse el disco
107     global desired
108     #loc = ("C:\Users\Del\OneDrive - Estudiantes ITCR\Proyecto Final de Graduacion\Avance\Progra")
109     #path al archivo de posiciones
110     loc = ("C:\Users\Ubicaciones") #path al archivo de posiciones
111     ubicaciones = xlrd.open_workbook(loc)
112     sheetUbicaciones = ubicaciones.sheet_by_index(0)
113     sheetUbicaciones.cell_value(0, 0)
114     for i in range(sheetUbicaciones.nrows): #recorre las ubicaciones de ordenamiento hasta encontrar el valor nominal
115         if sheetUbicaciones(i,0)==valorNominalBloques[dato]:
116             desired=sheetUbicaciones(i,2) #extrae la posicion en steps requerida
117             gire(posicionStep, desired) #Muévase a esa posición angular
118
119
120 def gohome():
121     sensorOut=GPIO.input(slotted_pin)
122     steps=0 #Define el contador de steps en 0
123     while sensorOut ==0:
124
125         sensorOut=GPIO.input(slotted_pin)
126         #Cuando no esté en home avance
127         motor3.motor_go(True, #Clockwise
128             "Full", #Tipo de step
129             1, #Cantidad de steps
130             .1, #Delay del step (s)
131             False, #No imprimir salida
132             .05) #Delay inicial (s)
133         steps+=1 #Suma el paso que dio
134         #Corregimos la posición proporcionalmente al recorrido
135         #esto debido a la inercia encontrada
136         devolverse=0.025*steps #Estimar cuánto devolverse
137         devolverse=round(devolverse, 0) #Redondea a número entero
138         for count in range(devolverse):
139             motor3.motor_go(True, #Clockwise
140                 "Full", #Tipo de step
141                 1, #Cantidad de steps
142                 .1, #Delay del step (s)
143                 False, #No imprimir salida
144                 .05) #Delay inicial (s)
145         #global posicionStep
146         posicionStep=0 #Defino la posición home como angulo 0
147         return posicionStep
148
149 def gire(posicionStep, desired):
150     #global listo
151     listo=0
152     if desired > posicionStep: #Si debe moverse en sentido horario
153         required=desired-posicionStep
154         compensar=required*0.025#Compensar pasos por inercia del disco
155         compensar=round(compensar,0)
156         #La cantidad de pasos debe ser un número entero
157         avanzar=required-compensar
158         for a in range(avanzar):
159             motor3.motor_go(True, #Clockwise
160                 "Full", #Tipo de step
161                 1, #Cantidad de steps
162                 .1, #Delay del step (s)
163                 False, #No imprimir salida
164                 .05) #Delay inicial (s)
165         #global posicionStep
166         posicionStep=posicionStep+required
167         print(posicionStep)
168         #se actualiza la posicion
169         #global listo
170         listo=1 #Finalizó de moverse
171     elif desired < posicionStep: #si debe moverse en sentido antihorario
172         required=posicionStep-desired
173         compensar=required*0.025#Compensar pasos por inercia del disco
174         compensar=round(compensar,0)
175         #La cantidad de pasos debe ser un número entero
176         avanzar=required-compensar
177         for a in range(avanzar):
178             motor3.motor_go(False, #Counter Clockwise
179                 "Full", #Tipo de step
180                 1, #Cantidad de steps
181                 .1, #Delay del step (s)

```

```

182         False, #No imprimir salida
183         .05) #Delay inicial (s)
184     #global posicionStep
185     posicionStep=posicionStep-required
186     #se actualiza la posicion
187     #global listo
188     listo=1 #Finalizó de moverse
189 elif desired == posicionStep:
190     #global listo
191
192     listo=1 #Ya estaba en la posicion deseada
193 else:
194     #global listo
195     listo=1 #En caso de que no atienda ninguno
196     #de los casos anteriores no se mueva
197
198     return posicionStep, listo
199
200 def openfilename(): #Abre el buscador de archivos
201     filename = filedialog.askopenfilename(title ='Cargar archivo') #Busca la imagen en carpeta
202     return filename
203
204 def angle2steps(angle):
205     steps=int(angle/1.8) #Convierte la posición deseada en pasos del stepper
206     return steps
207
208 ##### Configuración de entradas/salidas #####
209
210 GPIO_pins1 = (22, 27, 17) #pines de modo para el motor1
211 direction1 = 9 #pin de dirección para el motor1
212 step1 = 11 #pin de step para el motor1
213
214 GPIO_pins2 = (5, 6, 13) #pines de modo para el motor2
215 direction2 = 20 #pin de dirección para el motor2
216 step2 = 21 #pin de step para el motor2
217
218 EN_pin = 24 #pin de enable
219
220 GPIO_pins3 = (14, 15, 18) #Pines de modo de paso
221 direction3 = 19 #Pin de sentido de giro
222 step3 = 16 #Pin de dar paso
223 motor3 = RpiMotorLib.A4988Nema(direction3, step3, GPIO_pins3, "A4988") #Parámetros del motor
224
225 mymotortest1 = RpiMotorLib.A4988Nema(direction1, step1, GPIO_pins1, "A4988") #Parámetros del motor1
226 mymotortest2 = RpiMotorLib.A4988Nema(direction2, step2, GPIO_pins2, "A4988") #Parámetros del motor2
227
228 GPIO.setup(EN_pin, GPIO.OUT)
229 GPIO.output(EN_pin, GPIO.LOW) #Enable debe estar en LOW
230
231 slotted_pin = 4 #Pin para el sensor infrarrojo
232 GPIO.setmode(GPIO.BCM) #Numeración Broadcom
233 GPIO.setup(slotted_pin, GPIO.IN) #Se define como entrada el sensor
234
235 posicionStep=0 #Variable de posición angular del disco
236 required=0 #Variable de pasos requeridos par llegar
237 #a la posicion deseada
238 listo=0 #Variable que determina cuando terminó
239
240 gohome() #gire el disco hasta home porque se inició el programa
241
242 ##### Creación de hoja de datos - Información de servicio #####
243
244 def guardarInfo():
245     wb = openpyxl.Workbook()
246     hoja = wb.active
247     hoja.title = "Datos de calibración"
248     hoja1 = wb.create_sheet("Información de servicio")
249
250     folioUsado=selectorFolio()
251     materialUsado=selectorMaterial()
252     gradoUsado=selectorGrado()
253     usuarioUsado=selectorUsuario()
254     revisorUsado=selectorRevisor()
255
256     hoja1.append(('Información general',''))
257     hoja1.append(('Fecha de calibración:', time.strftime("%d/%m/%y")))
258     hoja1.append(('Nº de Certificado LCM:', numeroCertificado.get()))
259     hoja1.append(('Duración de la calibración:',))
260     hoja1.append(('Folios de Bitacora utilizados:', 'de '+folio1.get()+ ' a '+folio2.get()))
261     hoja1.append(('Referencia de datos:', folioUsado+' '+folio1.get()+ ' a '+folio2.get()))
262     hoja1.append(('Solicitante:', solicitante.get()))
263     hoja1.append(('Número de certificado:', 'LCM '+numeroCertificado.get()))
264     hoja1.append(('Número de solicitud:', numeroSolicitud.get()))
265     hoja1.append(('Dirección del solicitante:', direccionSolicitante.get()))
266     hoja1.append(('Lugar de la calibración:', "Laboratorio de Metrología Dimensional - LCM"))
267     hoja1.append((" ", ))
268
269     hoja1.append(('Información del calibrando', ''))
270     hoja1.append(('Objeto a calibrar:', 'Juego de bloques patrón'))
271     hoja1.append(('Cantidad de bloques o instrumentos:', cantidadBloques.get()))
272     hoja1.append(('Marca del instrumento:', marca.get()))
273     hoja1.append(('Nº de Serie del instrumento:', numeroSerie.get()))
274     hoja1.append(('Material:', materialUsado))
275     hoja1.append(('Modelo:', modelo.get()))
276     hoja1.append(('Grado declarado:', gradoUsado))
277

```

```

277 hoja1.append(('Identificacion interna:', identInterna.get()))
278 hoja1.append(('Coeficiente de expansión:', coefExp.get()))
279 hoja1.append(", ")
280
281 hoja1.append(('Responsable de la calibración:', usuarioUsado))
282 hoja1.append(('Responsable de la revisión:', revisorUsado))
283 hoja1.append(", ")
284
285 hoja1.append(('Patrón a utilizar para la calibración:', patron.get()))
286 hoja1.append(('Material de los bloques del Cliente:', materialUsado))
287 hoja1.append(('Material de los bloques del Patrón:', materialPatron.get()))
288
289 ##### Guardar datos en documento para datos de búsqueda #####
290
291 wb2 = load_workbook(filename = 'DatosBusqueda.xlsx')
292 work_sheet = wb2.active # Get active sheet
293 work_sheet.append([numeroCertificado.get(), numeroSerie.get(), solicitante.get()])
294
295 wb2.save('DatosBusqueda.xlsx')
296
297
298 wb.save(numeroCertificado.get()+'.xlsx')
299
300 ##### Creación de variables #####
301
302 secEscogida= IntVar()
303 planEscogida= IntVar()
304 escogerFolio= IntVar()
305 escogerUnidades= IntVar()
306 escogerMaterial= IntVar()
307 escogerGrado= IntVar()
308 escogerUsuario= IntVar()
309 escogerRevisor= IntVar()
310 escogerUSBTESA= IntVar()
311 escogerUSBFluke= IntVar()
312 escogerUSBVaisala= IntVar()
313
314 ##### Funciones de interaz #####
315
316 def irCalibra():
317     FrameInfo.pack_forget()
318     FrameBloques.pack_forget()
319     FrameCalibra.pack(side="top", fill="both", expand=True)
320
321 def irBloques():
322     FrameInfo.pack_forget()
323     FrameCalibra.pack_forget()
324     FrameBloques.pack(side="top", fill="both", expand=True)
325
326 def irInfo():
327     FrameBloques.pack_forget()
328     FrameCalibra.pack_forget()
329     FrameInfo.pack(side="top", fill="both", expand=True)
330
331 def obtenerSecuencia():
332     Secuencia=secEscogida.get()
333     Plantilla=planEscogida.get()
334     return Secuencia,Plantilla
335
336 def crearHoja(Repeticiones):
337     Secuencia,Plantilla=obtenerSecuencia()
338     if Secuencia==1 and Plantilla==1: #Realiza secuencia completa1
339         HojaDatosCom(Repeticiones)
340     if Secuencia==1 and Plantilla==2: #Realiza secuencia completa2
341         HojaDatosCom(Repeticiones)
342     if Secuencia==2: #Realiza secuencia centros
343         HojaDatosCen(Repeticiones)
344
345 def enviarAlarma():
346     import smtplib, ssl
347
348     port = 465 # For SSL
349     smtp_server = "smtp.gmail.com"
350     sender_email = "alarma.calibracion@gmail.com" # Correo del que se envía alarma
351     receiver_email = "Irojas@lcm.go.cr" # Correo que recibe notificación
352     password = "alarmaLCM2021"
353     message = """
354     Subject: Notificacion calibracion
355
356     Proceso de calibracion termino exitosamente."""
357
358     context = ssl.create_default_context()
359     with smtplib.SMTP_SSL(smtp_server, port, context=context) as server:
360         server.login(sender_email, password)
361         server.sendmail(sender_email, receiver_email, message)
362
363 def selectorSecuencia():
364
365     global BloqueActual
366     global dato
367     global identificacionBloque
368     global valorNominalBloque
369
370
371 listaMediciones=[]
372 numerocertificado=numeroCertificado.get()

```

```

373 cantidadbloques=cantidadBloques.get()
374 tiempoestabilizacion=tiempoEstabilizacion.get()
375 Repeticiones=repeticiones.get()
376
377 wb = load_workbook(filename = wb.save( numerocertificado+'.xlsx'))
378 hoja = wb.active
379
380 Secuencia,Plantilla=obtenerSecuencia()
381 DatoPresVaisala, DatoTempVaisala, DatoHumeVaisala=DatosVaisala(serVaisala) #Llama función Vaisala
382 MedicionTemp1, MedicionTemp2, MedicionTemp3, MedicionTemp4=DatosFluke(serFluke)
383
384 if Secuencia==1 and Plantilla==1: #Realiza secuencia completa1
385     listaMediciones=Completa1(tiempoestabilizacion, Repeticiones)
386 if Secuencia==1 and Plantilla==2: #Realiza secuencia completa2
387     listaMediciones=Completa2(tiempoestabilizacion, Repeticiones)
388 if Secuencia==2: #Realiza secuencia centros
389     listaMediciones=Centros(tiempoestabilizacion, Repeticiones)
390
391 MedicionTemp5, MedicionTemp6, MedicionTemp7, MedicionTemp8=DatosFluke(serFluke)
392 DatoPresVaisala1, DatoTempVaisala1, DatoHumeVaisala1=DatosVaisala(serVaisala) #Llama función Vaisala
393 PromedioHumedad=(DatoHumeVaisala+DatoHumeVaisala1)/2
394
395 listaDatos=[]
396
397 listaDatos.append(BloqueActual) #Número de bloque
398 listaDatos.append(time.strftime("%d/%m/%y")) #Fecha
399 listaDatos.append(time.strftime("%H:%M:%S")) #Hora
400 listaDatos.append(identificacionBloques[dato]) #Identificación del bloque
401 listaDatos.append(valorNominalBloques[dato]) #Valor Nominal del bloque
402
403 tamaño=len(listaMediciones)
404
405 for i in range (tamaño):
406     listaDatos.append(listaMediciones[i])
407
408 listaDatos.append(MedicionTemp1)
409 listaDatos.append(MedicionTemp2)
410 listaDatos.append(MedicionTemp3)
411 listaDatos.append(MedicionTemp4)
412 listaDatos.append(MedicionTemp5)
413 listaDatos.append(MedicionTemp6)
414 listaDatos.append(MedicionTemp7)
415 listaDatos.append(MedicionTemp8)
416
417 listaDatos.append(PromedioHumedad)
418
419 if BloqueActual==1:
420     crearHoja(Repeticiones)
421     hoja.append(listaDatos)
422 elif BloqueActual==int(cantidadbloques):
423     hoja.append(listaDatos)
424     hoja1 = wb.active
425     primerafecha=sheet_ranges['B2'].value
426     primerafecha=primerafecha.split('/')
427     dia1=primerafecha[0]
428     mes1=primerafecha[1]
429     ultimafecha=time.strftime("%d/%m/%y")
430     ultimafecha=ultimafecha.split('/')
431     dia2=ultimafecha[0]
432     mes2=ultimafecha[1]
433     meses=mes2-mes1
434     dias=dias2-dias1+30*meses
435     hoja1["B4"]=dias
436     wb.save( numerocertificado+'.xlsx')
437     enviarAlarma()
438 elif BloqueActual!=1 and BloqueActual==int(cantidadbloques):
439     hoja.append(listaDatos)
440
441 BloqueActual=BloqueActual+1
442 dato=dato+1
443
444 def pausarCalibracion():
445
446     global BloqueActual
447     global dato
448     global identificacionBloque
449     global valorNominalBloque
450
451
452     wb4 = openpyxl.Workbook()
453     work_sheet = wb4.active
454     work_sheet.title = "Hoja1"
455
456     work_sheet.append(['Número de certificado', numeroCertificado.get()])
457     work_sheet.append(['Cantidad de bloques', cantidadBloques.get()])
458     work_sheet.append(['Tiempo de estabilización', tiempoEstabilizacion.get()])
459     work_sheet.append(['Repeticiones', repeticiones.get()])
460
461     work_sheet.append(['Bloque actual', BloqueActual])
462     work_sheet.append(['Dato', dato])
463
464     work_sheet["D1"]='Identificación de los bloques'
465     work_sheet["E1"]='Valor nominal de los bloques'
466
467

```

```

468 for i in range(int(cantidadBloques.get())):
469     work_sheet["D"+str(i+2)]=identificacionBloque[i]
470     work_sheet["E"+str(i+2)]=valorNominalBloque[i]
471
472 wb4.save('DatosPausa.xlsx')
473
474 def reanudarCalibracion():
475     gohome() #
476     global BloqueActual
477     global dato
478     global identificacionBloque
479     global valorNominalBloque
480
481     wb5 = load_workbook(filename = 'DatosPausa.xlsx')
482     sheet_ranges = wb5['Hoja1']
483
484     numerocertificado=sheet_ranges['B1'].value
485     cantidadbloques=sheet_ranges['B2'].value
486     tiempoestabilizacion=sheet_ranges['B3'].value
487     Repeticiones=sheet_ranges['B4'].value
488
489     wb = load_workbook(filename = wb.save(numerocertificado+'.xlsx'))
490     hoja = wb.active
491
492     Secuencia,Plantilla=obtenerSecuencia()
493     DatoPresVaisala, DatoTempVaisala, DatoHumeVaisala=DatosVaisala(serVaisala) #Llama función Vaisala
494     MedicionTemp1, MedicionTemp2, MedicionTemp3, MedicionTemp4=DatosFluke(serFluke)
495
496     if Secuencia==1 and Plantilla==1: #Realiza secuencia completa1
497         listaMediciones=Completa1(tiempoestabilizacion, Repeticiones)
498     if Secuencia==1 and Plantilla==2: #Realiza secuencia completa2
499         listaMediciones=Completa2(tiempoestabilizacion, Repeticiones)
500     if Secuencia==2: #Realiza secuencia centros
501         listaMediciones=Centros(tiempoestabilizacion, Repeticiones)
502
503     MedicionTemp5, MedicionTemp6, MedicionTemp7, MedicionTemp8=DatosFluke(serFluke)
504     DatoPresVaisala1, DatoTempVaisala1, DatoHumeVaisala1=DatosVaisala(serVaisala)
505         #Llama función Vaisala
506     PromedioHumedad=(DatoHumeVaisala+DatoHumeVaisala1)/2
507
508     listaDatos=[]
509
510     listaDatos.append(BloqueActual) #Número de bloque
511     listaDatos.append(time.strftime("%d/%m/%y")) #Fecha
512     listaDatos.append(time.strftime("%H:%M:%S")) #Hora
513     listaDatos.append(identificacionBloques[dato]) #Identificación del bloque
514     listaDatos.append(valorNominalBloques[dato]) #Valor Nominal del bloque
515
516     tamaño=len(listaMediciones)
517
518     for i in range (tamaño):
519         listaDatos.append(listaMediciones[i])
520
521     listaDatos.append(MedicionTemp1)
522     listaDatos.append(MedicionTemp2)
523     listaDatos.append(MedicionTemp3)
524     listaDatos.append(MedicionTemp4)
525     listaDatos.append(MedicionTemp5)
526
527     listaDatos.append(MedicionTemp6)
528     listaDatos.append(MedicionTemp7)
529     listaDatos.append(MedicionTemp8)
530
531     listaDatos.append(PromedioHumedad)
532
533     if BloqueActual==1:
534         crearHoja(Repeticiones)
535         hoja.append(listaDatos)
536     elif BloqueActual==int(cantidadbloques):
537         hoja.append(listaDatos)
538         wb.save(numerocertificado+'.xlsx')
539         enviarAlarma()
540     elif BloqueActual!=1 and BloqueActual!=int(cantidadbloques):
541         hoja.append(listaDatos)
542
543     BloqueActual=BloqueActual+1
544     dato=dato+1
545
546 def recuperarDatos():
547     wb5 = load_workbook(filename = 'DatosPausa.xlsx')
548     sheet_ranges = wb5['Hoja1']
549
550     global BloqueActual
551     global dato
552     global identificacionBloque
553     global valorNominalBloque
554
555     numerocertificado=sheet_ranges['B1'].value
556     cantidadbloques=sheet_ranges['B2'].value
557     tiempoestabilizacion=sheet_ranges['B3'].value
558     Repeticiones=sheet_ranges['B4'].value
559     BloqueActual=sheet_ranges['B5'].value
560     dato=sheet_ranges['B6'].value
561
562     fila1=2
563

```

```

564 ident=""
565 valorN=""
566
567 while ident != None:
568     ident=sheet_ranges['D'+str(fila1)].value
569     if ident != None:
570         identificacionBloque.append(ident)
571         fila1=fila1+1
572
573 fila2=2
574
575 while valorN != None:
576     valorN=sheet_ranges['E'+str(fila2)].value
577     if valorN != None:
578         valorNominalBloque.append(valorN)
579         fila2=fila2+1
580
581 def selectorFolio():
582     if escogerFolio.get()==1: #Folio1
583         folioUsado='LRR-DI-01-FOLIOS'
584     if escogerFolio.get()==2: #Folio2
585         folioUsado='ORA-DI-01-FOLIOS'
586     if escogerFolio.get()==3: #Folio3
587         folioUsado='ILH-DI-03-FOLIOS'
588     if escogerFolio.get()==4: #Otro
589         folioUsado=nuevoFolio.get()
590     return folioUsado
591
592 def selectorUnidades():
593     if escogerUnidades.get()==1: #Unidad1
594         unidadesUsadas='mm'
595     if escogerUnidades.get()==2: #Unidad2
596         unidadesUsadas='pulg'
597     return unidadesUsadas
598
599 def selectorMaterial():
600     if escogerMaterial.get()==1: #Material1
601         materialUsado='Acero'
602     if escogerMaterial.get()==2: #Material2
603         materialUsado='Ceramicos'
604     if escogerMaterial.get()==3: #Material3
605         materialUsado='Carbono-Tungsteno'
606     if escogerMaterial.get()==4: #Material4
607         materialUsado='Carbono-Cromo'
608     return materialUsado
609
610 def selectorGrado():
611     if escogerGrado.get()==1: #Grado1
612         gradoUsado='00 o K'
613     if escogerGrado.get()==2: #Grado2
614         gradoUsado='0'
615     if escogerGrado.get()==3: #Grado3
616         gradoUsado='1'
617     if escogerGrado.get()==4: #Grado4
618         gradoUsado='2'
619     return gradoUsado
620
621
622 def selectorUsuario():
623     if escogerUsuario.get()==1: #Usuario1
624         usuarioUsado='Leonardo Rojas Rapso'
625     if escogerUsuario.get()==2: #Usuario2
626         usuarioUsado='Olman Ramos Alfaro'
627     if escogerUsuario.get()==3: #Usuario3
628         usuarioUsado='Ignacio López Hidalgo'
629     if escogerUsuario.get()==4: #Usuario4
630         usuarioUsado='Luis Chaves Santacruz'
631     if escogerUsuario.get()==5: #Usuario5
632         usuarioUsado='Francisco Sequeira'
633     if escogerUsuario.get()==6: #Usuario6
634         usuarioUsado='Luis Damian Rodriguez'
635     if escogerUsuario.get()==7: #Usuario7
636         usuarioUsado='Marcela Prendas Peña'
637     if escogerUsuario.get()==8: #Usuario8
638         usuarioUsado='Fernando Andrés Monge'
639     if escogerUsuario.get()==9: #Otro
640         usuarioUsado=nuevoUsuario.get()
641     return usuarioUsado
642
643
644 def selectorRevisor():
645     if escogerRevisor.get()==1: #Usuario1
646         revisorUsado='Leonardo Rojas Rapso'
647     if escogerRevisor.get()==2: #Usuario2
648         revisorUsado='Olman Ramos Alfaro'
649     if escogerRevisor.get()==3: #Usuario3
650         revisorUsado='Ignacio López Hidalgo'
651     if escogerRevisor.get()==4: #Usuario4
652         revisorUsado='Luis Chaves Santacruz'
653     if escogerRevisor.get()==5: #Usuario5
654         revisorUsado='Francisco Sequeira'
655     if escogerRevisor.get()==6: #Usuario6
656         revisorUsado='Luis Damian Rodriguez'
657     if escogerRevisor.get()==7: #Usuario7
658         revisorUsado='Marcela Prendas Peña'
659

```

```

659 if escogerRevisor.get() == 8: #Usuario8
660     revisorUsado='Fernando Andrés Monge'
661 if escogerRevisor.get() == 9: #Otro
662     revisorUsado=nuevoRevisor.get()
663 return revisorUsado
664
665 def selectorUSBTESA():
666     if escogerUSBTESA.get() == 1: #USBTESA1
667         usbtesaUsado='USB1'
668     if escogerUSBTESA.get() == 2: #USBTESA2
669         usbtesaUsado='USB2'
670     if escogerUSBTESA.get() == 3: #USBTESA3
671         usbtesaUsado='USB3'
672     if escogerUSBTESA.get() == 4: #USBTESA4
673         usbtesaUsado='USB4'
674     return usbtesaUsado
675
676 def selectorUSBFluke():
677     if escogerUSBFluke.get() == 1: #USBFluke1
678         usbflukeUsado='USB1'
679     if escogerUSBFluke.get() == 2: #USBFluke2
680         usbflukeUsado='USB2'
681     if escogerUSBFluke.get() == 3: #USBFluke3
682         usbflukeUsado='USB3'
683     if escogerUSBFluke.get() == 4: #USBFluke4
684         usbflukeUsado='USB4'
685     return usbflukeUsado
686
687 def selectorUSBVaisala():
688     if escogerUSBVaisala.get() == 1: #USBVaisala1
689         usbvaisalaUsado='USB1'
690     if escogerUSBVaisala.get() == 2: #USBVaisala2
691         usbvaisalaUsado='USB2'
692     if escogerUSBVaisala.get() == 3: #USBVaisala3
693         usbvaisalaUsado='USB3'
694     if escogerUSBVaisala.get() == 4: #USBVaisala4
695         usbvaisalaUsado='USB4'
696     return usbvaisalaUsado
697
698 def agregarDato():
699     global identificacionBloque
700     global valorNominalBloque
701     global count
702
703     tabla.insert(parent=" ", index="end", iid = count, text=" ", values=(count+1, valorNominal.get(), serie.get()))
704     count += 1
705     identificacionBloque.append(serie.get())
706     valorNominalBloque.append(valorNominal.get())
707     valorNominal.delete(0, END)
708     serie.delete(0, END)
709     return identificacionBloque, valorNominalBloque
710
711 def buscarDatos():
712     wb3 = load_workbook(filename = 'DatosBusqueda.xlsx')
713     sheet_ranges = wb3['Hoja1']
714     fila=2
715     cer=""
716     ser=""
717     emp=""
718
719     while cer != None:
720         cer= sheet_ranges['A'+str(fila)].value
721         if cer == certificadoAnterior.get():
722             val1= sheet_ranges['A'+str(fila)].value
723             val2= sheet_ranges['B'+str(fila)].value
724             val3= sheet_ranges['C'+str(fila)].value
725             print("Número de certificado anterior:", val1, ' Número de serie del juego de bloques:', val2, ' Empresa:', val3)
726
727             fila=fila+1
728
729     while ser != None:
730         ser= sheet_ranges['B'+str(fila)].value
731         if ser == numeroSerie.get():
732             val1= sheet_ranges['A'+str(fila)].value
733             val2= sheet_ranges['B'+str(fila)].value
734             val3= sheet_ranges['C'+str(fila)].value
735             print("Número de certificado anterior:", val1, ' Número de serie del juego de bloques:', val2, ' Empresa:', val3)
736
737             fila=fila+1
738
739     while emp != None:
740         emp= sheet_ranges['C'+str(fila)].value
741         if emp == solicitante.get():
742             val1= sheet_ranges['A'+str(fila)].value
743             val2= sheet_ranges['B'+str(fila)].value
744             val3= sheet_ranges['C'+str(fila)].value
745             print("Número de certificado anterior:", val1, ' Número de serie del juego de bloques:', val2, ' Empresa:', val3)
746
747             fila=fila+1
748
749     certificadoAnterior.delete(0, END)
750
751 def cargarDatos():
752     global identificacionBloque
753     global valorNominalBloque
754

```

```

754 wb1 = load_workbook(filename = archivoCargar.get()+'.xlsx')
755 sheet_ranges = wb1['Calibración de Longitud Central']
756 fila1=3
757 ident=""
758 valorN=""
759
760 while ident != None:
761     ident=sheet_ranges['D'+str(fila1)].value
762     if ident != None:
763         identificacionBloque.append(ident)
764         fila1=fila1+1
765
766 fila2=3
767
768 while valorN != None:
769     valorN=sheet_ranges['E'+str(fila2)].value
770     if valorN != None:
771         valorNominalBloque.append(valorN)
772         fila2=fila2+1
773
774 archivoCargar.delete(0,END)
775 return identificacionBloque, valorNominalBloque
776
777 def limpiarDatos():
778     global identificacionBloque
779     global valorNominalBloque
780     global count
781
782     tabla.delete(*tabla.get_children())
783
784     identificacionBloque=[]
785     valorNominalBloque=[]
786     count=0
787
788 def show_values():
789     global esperaBloques
790     esperaBloques=w1.get() #almacena para ser consultado el tiempo de espera
791     #de estabilización de los bloques
792     print (w1.get()) # muestra el valor seleccionado en el slider de
793     # tiempo de estabilización del bloque
794
795 def crear_reporte():
796     f= open("Indicadores.txt","w+")
797     f.write("Laboratorio Costarricense de Metrología \n")
798     f.write("Laboratorio de Dimensional \n")
799     f.write("Indicadores de desempeño \n")
800     today = date.today()
801     f.write("Fecha de reporte: %s\r\n" % today)
802     f.write("Número de certificado: %s\r\n" % numeroCertificado.get())
803
804     f.write("Tiempo de calibración por bloque (min): %d\n" % 8.65)
805     #minutos=tiempoCorrida/60
806     #f.write("Tiempo de calibración por bloque: %d\r\n" % minutos)
807
808     bloquespormes=int(cantidadBloques.get())*30/(int(cantidaddías.get()))
809     f.write("Número de bloques calibrados por mes: %d\r\n" % bloquespormes)
810     f.write("Cantidad de bloques fuera de clase: %s\r\n" % fueraClase.get())
811
812     f.close()
813
814 def DatosTESA():
815
816     usbtesaUsado=selectorUSBTESA() #USB al que está conectado el TESA
817     serTESA=serial.Serial('/dev/tty'+usbtesaUsado, baudrate=1200, bytesize=serial.SEVENBITS, parity=serial.PARITY_EVEN,
818     ###USB EN INTERFAZ
819     stopbits=serial.STOPBITS_TWO, xonxoff=True, timeout=0.5)
820     #Configuración de puerto
821
822     detenerse=0 #Constante para while que captura dato
823     def recv(serial): #Definición de una función para recibir datos
824         while True:
825             data=serial.read(30) #Lectura de 30 bytes
826             if data == "":
827                 continue
828             else:
829                 break
830             sleep(0.02)
831         return data
832     while detenerse == 0:
833         data=recv(serTESA) #Llamada de la función
834         if data != b"": #Comparación de datos recibidos, vacío hasta que se de la medición
835             medicion=float(data) #Pasando de string a float
836             MedicionBloque=medicion #Guardando dato en lista
837             detenerse = 1 #Condición para salir del while
838     return MedicionBloque
839
840 ##### Captura de datos Fluke #####
841
842 def DatosFluke():
843
844     usbflukeUsado=selectorUSBFluke() #USB al que está conectado el Fluke
845     serFluke=serial.Serial('/dev/tty'+usbflukeUsado, baudrate=9600, bytesize=serial.EIGHTBITS, parity=serial.PARITY_NONE,
846     stopbits=serial.STOPBITS_ONE, xonxoff=True, timeout=0.5) #Configuración de puerto
847
848     serFluke.write(b'READ?1\r\n') #Envío de instrucción para capturar dato de temperatura 1

```

```

850 serFluke.write(b'READ?2\r\n') #Envío de instrucción para capturar dato de temperatura 2
851 serFluke.write(b'READ?3\r\n') #Envío de instrucción para capturar dato de temperatura 3
852 serFluke.write(b'READ?4\r\n') #Envío de instrucción para capturar dato de temperatura 4
853
854
855 detenerse=0 #Constante para while que captura dato
856
857 MedicionTemp1=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de temperatura 1
858 MedicionTemp2=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de temperatura 2
859 MedicionTemp3=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de temperatura 3
860 MedicionTemp4=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de temperatura 4
861
862
863 def recv(serial): #Definición de una función para recibir datos
864     while True:
865         data=serial.read(32) #Lectura de 32 bytes
866         if data == "":
867             continue
868         else:
869             break
870         sleep(0.02)
871     return data
872
873 while detenerse == 0:
874     data=recv(serFluke) #Llamada de la función
875     if data != b"": #Comparación de datos recibidos, vacío hasta que se de la medición
876         todas=data.split() #Separar los 4 datos en una lista
877         MedicionTemp1=float(todas[0]) #Guardando temperatura 1 en lista
878         MedicionTemp2=float(todas[1]) #Guardando temperatura 2 en lista
879         MedicionTemp3=float(todas[2]) #Guardando temperatura 3 en lista
880         MedicionTemp4=float(todas[3]) #Guardando temperatura 4 en lista
881         detenerse = 1 #Condición para salir del while
882     return MedicionTemp1, MedicionTemp2, MedicionTemp3, MedicionTemp4
883
884 ##### Captura de datos Vaisala #####
885
886 def DatosVaisala(serVaisala):
887
888     usbvaisalaUsado=selectorUSBVaisala() #USB al que está conectado el Vaisala
889     serVaisala=serial.Serial('/dev/tty'+usbvaisalaUsado, baudrate=4800, bytesize=serial.SEVENBITS,
890         parity=serial.PARITY_EVEN, stopbits=serial.STOPBITS_ONE, timeout= 0.5) #Configuración de puerto
891     #serVaisala=serial.Serial('/dev/ttyAMA0', baudrate=4800, bytesize=serial.SEVENBITS, parity=serial.PARITY_EVEN, stopbits=serial.STOPBITS_ONE, timeout= 0.5)
892     #serVaisala=serial.Serial('/dev/ttyUSB0', baudrate=19200, bytesize=serial.EIGHTBITS, parity=serial.PARITY_NONE, stopbits=serial.STOPBITS_ONE, timeout= 0.5)
893
894     #serVaisala.write(b'RUN\r\n')
895     #serVaisala.write(b'R\r\n')
896     #serVaisala.write(b'form "P=" 4.2 P " " U6 \t "T=" t " " U3 \t "RH=" 4.2 rh " " U5 \r\n')
897     #serVaisala.write(b'form 4.2 P " " \t 4.2 t " " \t 4.2 rh " " \r\n')
898
899
900 serVaisala.write(b'SEND\r\n') #Envío de instrucción para capturar datos del Vaisala
901
902 detenerse=0 #Constante para while que captura dato
903
904 DatoPresVaisala=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de presión atmosférica
905 DatoTempVaisala=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de temperatura ambiente
906 DatoHumeVaisala=0 #Creación de variable para almacenar mediciones de humedad relativa
907
908 def recv(serial): #Definición de una función para recibir datos
909     while True:
910         data=serial.read(30)
911         if data == "":
912             continue
913         else:
914             break
915         sleep(0.02)
916     return data
917
918 while detenerse == 0:
919     data=recv(serVaisala) #Llamada de la función
920     if data != b"": #Comparación de datos recibidos, vacío hasta que se de la medición
921         todos=data.split() #Separar los 4 datos en una lista
922         DatoPresVaisala=float(todos[1]) #Guardando presión atmosférica en lista
923         DatoTempVaisala=float(todos[2]) #Guardando temperatura en lista
924         DatoHumeVaisala=float(todos[3]) #Guardando humedad relativa en lista
925         detenerse = 1 #Condición para salir del while
926     return DatoPresVaisala, DatoTempVaisala, DatoHumeVaisala
927
928
929 FrameInfo=Frame(window) #Crea el frame donde estará la información de servicio
930 FrameBloques=Frame(window) #Crea el frame donde estarán los datos de los bloques
931 FrameCalibra=Frame(window) #Crea el frame donde se realizará el proceso de calibración
932
933
934 servo_pin = 26 #Pin que envía la señal al servomotor
935
936 def ActivaPedal(servo_pin):
937
938     myservotest = rpiservolib.SG90servo("servoone", 50, 2, 12) #Parámetros del servomotor
939
940     myservotest.servo_move(servo_pin, 2.3, .5, False, .01) #Movimiento a posición 2.3
941     myservotest.servo_move(servo_pin, 7.5, .5, False, .01) #Movimiento a posición 7.5
942
943 def Completa1(tiempoestabilizacion, Repeticiones):
944     global t1=time.time() #finaliza el conteo de espera de bloques
945     tic=time.perf_counter() #Toma el tiempo inicial

```

```

945 for i in range(int(Repeticiones)):
946
947     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
948     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
949     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
950     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
951     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del patrón en posición 1 (centro)
952     print(MedicionBloque)
953
954     mymotortest1.motor_go(True, "Half", 416, .005, False, 2)
955                               #Mov de 1 a 2
956
957     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
958     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
959     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
960     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
961     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 2 (esquina)
962     print(MedicionBloque)
963
964     mymotortest1.motor_go(False, "Half", 94, .005, False, 2) #Mov1 de 2 a 3
965     mymotortest2.motor_go(False, "Full", 400, .005, False, 1) #Mov2 de 2 a 3
966     mymotortest1.motor_go(True, "Half", 181, .005, False, 1) #Mov3 de 2 a 3
967
968     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
969     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
970     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
971     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
972     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 3 (esquina)
973     print(MedicionBloque)
974
975     mymotortest1.motor_go(False, "Half", 181, .005, False, 2) #Mov de 3 a 4
976
977     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
978     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
979     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
980     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
981     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 4 (esquina)
982     print(MedicionBloque)
983
984     mymotortest2.motor_go(True, "Full", 800, .005, False, 2) #Mov de 4 a 5
985
986     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
987     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
988     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
989     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
990     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 5 (esquina)
991     print(MedicionBloque)
992
993     mymotortest1.motor_go(True, "Half", 177, .005, False, 2) #Mov de 5 a 6
994
995
996     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
997     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
998     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
999     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1000     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 6 (esquina)
1001     print(MedicionBloque)
1002
1003     mymotortest1.motor_go(False, "Half", 177, .005, False, 2) #Mov de 6 a 5
1004     mymotortest2.motor_go(False, "Full", 400, .005, False, 1) #Mov de 5 a Esp2
1005     mymotortest1.motor_go(False, "Half", 330, .005, False, 1) #Mov de Esp2 a 1
1006
1007     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
1008     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1009     ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
1010     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1011     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del patrón en posición 1 (centro)
1012     print(MedicionBloque)
1013
1014     mymotortest1.motor_go(True, "Half", 208, .005, False, 2)
1015                               #Mov de 1 a HOME
1016
1017     ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
1018     obtenerAnguloBloque(valorNominalBloques[dato]) #Moverse a la siguiente pareja de bloques
1019     toc=time.perf_counter()           #Toma el tiempo final
1020     global tiempoCorrida=toc-tic      #retorna el tiempo de corrida en segundos
1021     global t0=time.time()             #inicia el conteo de espera de bloques
1022     return listaMediciones, tiempoCorrida, t0
1023
1024
1025     ##### Secuencia completa - Plantilla2 #####
1026
1027 def Completa2(tiempoestabilizacion, Repeticiones):
1028     global t1=time.time()             #finaliza el conteo de espera de bloques
1029     tic=time.perf_counter()           #Toma el tiempo inicial
1030     for i in range(int(Repeticiones)):
1031
1032         ActivaPedal(servo_pin)           #Baja palpador
1033         sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1034         ActivaPedal(servo_pin)           #Sube palpador
1035         MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1036         print(MedicionBloque)
1037         listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del patrón en posición 1 (centro)
1038
1039     mymotortest1.motor_go(True, "Half", 416, .005, False, 2) #Mov de 1 a 2
1040

```

```

1041 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1042 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1043 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1044 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1045 print(MedicionBloque)
1046 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 2 (esquina)
1047
1048 mymotortest1.motor_go(False, "Half", 96, .005, False, 2) #Mov1 de 2 a 3
1049 mymotortest2.motor_go(False, "Full", 337, .005, False, 1) #Mov2 de 2 a 3
1050 mymotortest1.motor_go(True, "Half", 182, .005, False, 1) #Mov3 de 2 a 3
1051
1052 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1053 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1054 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1055 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1056 print(MedicionBloque)
1057 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 3 (esquina)
1058
1059 mymotortest1.motor_go(False, "Half", 183, .005, False, 2)
1060 #Mov de 3 a 4
1061
1062
1063 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1064 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1065 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1066 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1067 print(MedicionBloque)
1068 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 4 (esquina)
1069
1070 mymotortest2.motor_go(True, "Full", 683, .005, False, 2) #Mov de 4 a 5
1071
1072 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1073 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1074 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1075 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1076 print(MedicionBloque)
1077 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 5 (esquina)
1078
1079 mymotortest1.motor_go(True, "Half", 178, .005, False, 2) #Mov de 5 a 6
1080
1081 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1082 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1083 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1084 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1085 print(MedicionBloque)
1086 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 6 (esquina)
1087
1088 mymotortest1.motor_go(False, "Half", 178, .005, False, 2) #Mov de 6 a 5
1089 mymotortest2.motor_go(False, "Full", 342, .005, False, 1) #Mov de 5 a Esp2
1090 mymotortest1.motor_go(False, "Half", 332, .005, False, 1) #Mov de Esp2 a 1
1091
1092 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1093 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1094 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1095 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1096 print(MedicionBloque)
1097 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del patrón en posición 1 (centro)
1098
1099 mymotortest1.motor_go(True, "Half", 208, .005, False, 2) #Mov de 1 a HOME
1100
1101 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1102 obtenerAnguloBloque(valorNominalBloques[dato]) #Moverse a la siguiente pareja de bloques
1103 toc=time.perf_counter() #Toma el tiempo final
1104 global tiempoCorrida
1105 tiempoCorrida=toc-tic #retorna el tiempo de corrida en segundos
1106 global t0=time.time() #inicia el conteo de espera de bloques
1107 return listaMediciones, tiempoCorrida, t0
1108
1109 ##### Secuencia centros #####
1110
1111 def Centros(tiempoestabilizacion, Repeticiones):
1112     global t1=time.time() #finaliza el conteo de espera de bloques
1113     tic=time.perf_counter() #Toma el tiempo inicial
1114     for i in range(int(Repeticiones)):
1115
1116         #Se inicia en 1 y con palpador arriba
1117
1118         ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1119         sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1120         ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1121         MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1122         print(MedicionBloque)
1123         listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del patrón en posición 1 (centro)
1124
1125     mymotortest1.motor_go(True, "Half", 406, .005, False, 2)
1126     #Movimiento de punto1 a punto2
1127
1128     ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1129
1130     sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1131     ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1132     MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1133     print(MedicionBloque)
1134     listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 2 (esquina)
1135

```

```

1136 mymotortest1.motor_go(False, "Half", 406, .005, False, 2)
1137
1138 #Movimiento de punto2 a punto1
1139
1140 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1141 sleep(int(tiempoestabilizacion)) #Tiempo de estabilización
1142 ActivaPedal(servo_pin) #Sube palpador
1143 MedicionBloque=DatosTESA(serTESA) #Llama función TESA
1144 print(MedicionBloque)
1145 listaMediciones.append(MedicionBloque) #Valor del calibrando en posición 2 (esquina)
1146
1147 mymotortest1.motor_go(True, "Half", 203, .005, False, 2)#Movimiento de punto1 a HOME
1148
1149 ActivaPedal(servo_pin) #Baja palpador
1150 obtenerAnguloBloque(valorNominalBloques[dato]) #Moverse a la siguiente pareja de bloques
1151 toc=time.perf_counter() #Toma el tiempo final
1152 global tiempoCorrida
1153 tiempoCorrida=toc-tic #retorna el tiempo de corrida en segundos
1154 global t0=time.time() #inicia el conteo de espera de bloques
1155 return listaMediciones, tiempoCorrida, t0
1156
1157 ##### Frame Información de servicio #####
1158
1159 FrameInfo.pack(side="top", fill="both", expand=True) #Empieza el frame de información
1160
1161 Label(FrameInfo, text="Información servicio",font=(100)).place(x=10, y=10)
1162
1163 Label(FrameInfo, text="Información general",font=(100)).place(x=10, y=70)
1164
1165 Label(FrameInfo, text="Número de certificado: ").place(x=10, y=100)
1166 numeroCertificado=Entry(FrameInfo)
1167 numeroCertificado.place(x=160, y=100)
1168
1169 Label(FrameInfo, text="Solicitante: ").place(x=10, y=130)
1170 solicitante=Entry(FrameInfo)
1171 solicitante.place(x=160, y=130)
1172
1173 Label(FrameInfo, text="Número de solicitud: ").place(x=350, y=100)
1174 numeroSolicitud=Entry(FrameInfo)
1175 numeroSolicitud.place(x=500, y=100)
1176
1177 Label(FrameInfo, text="Dirección del solicitante: ").place(x=350, y=130)
1178 direccionSolicitante=Entry(FrameInfo)
1179 direccionSolicitante.place(x=500, y=130)
1180
1181 Label(FrameInfo, text="Folios de bitacora utilizados: de ").place(x=10, y=160)
1182 folio1=Entry(FrameInfo, width=5)
1183 folio1.place(x=190, y=160)
1184 Label(FrameInfo, text="a ").place(x=230, y=160)
1185 folio2=Entry(FrameInfo, width=5)
1186 folio2.place(x=250, y=160)
1187
1188 Label(FrameInfo, text="Referencia de datos: ").place(x=10, y=190)
1189 Radiobutton(FrameInfo, text="LRR-DI-01-FOLIOS", variable=escogerFolio,value=1, command=selectorFolio).place(x=10, y=210)
1190 Radiobutton(FrameInfo, text="ORA-DI-01-FOLIOS", variable=escogerFolio,value=2, command=selectorFolio).place(x=10, y=230)
1191 Radiobutton(FrameInfo, text="LH-DI-03-FOLIOS", variable=escogerFolio,value=3, command=selectorFolio).place(x=10, y=250)
1192 Radiobutton(FrameInfo, text="Otro:", variable=escogerFolio,value=4, command=selectorFolio).place(x=10, y=270)
1193 nuevoFolio=Entry(FrameInfo)
1194 nuevoFolio.place(x=160, y=270)
1195
1196 Label(FrameInfo, text="Información del calibrando",font=(100)).place(x=10, y=330)
1197
1198 Label(FrameInfo, text="Cantidad de bloques: ").place(x=10, y=360)
1199 cantidadBloques=Entry(FrameInfo)
1200 cantidadBloques.place(x=160, y=360)
1201
1202 Label(FrameInfo, text="Identificación interna: ").place(x=10, y=390)
1203 identInterna=Entry(FrameInfo)
1204 identInterna.place(x=160, y=390)
1205
1206 Label(FrameInfo, text="Número de serie: ").place(x=10, y=420)
1207 numeroSerie=Entry(FrameInfo)
1208 numeroSerie.place(x=160, y=420)
1209
1210 Label(FrameInfo, text="Marca: ").place(x=350, y=360)
1211 marca=Entry(FrameInfo)
1212 marca.place(x=500, y=360)
1213
1214 Label(FrameInfo, text="Modelo: ").place(x=350, y=390)
1215 modelo=Entry(FrameInfo)
1216 modelo.place(x=500, y=390)
1217
1218 Label(FrameInfo, text="Coeficiente de expansión: ").place(x=350, y=420)
1219 coefExp=Entry(FrameInfo)
1220 coefExp.place(x=500, y=420)
1221
1222 Label(FrameInfo, text="Unidades: ").place(x=10, y=450)
1223 Radiobutton(FrameInfo, text="mm", variable=escogerUnidades,value=1, command=selectorUnidades).place(x=10, y=470)
1224 Radiobutton(FrameInfo, text="pulg", variable=escogerUnidades,value=2, command=selectorUnidades).place(x=100, y=470)
1225
1226 Label(FrameInfo, text="Material: ").place(x=10, y=500)
1227 Radiobutton(FrameInfo, text="Acero", variable=escogerMaterial,value=1, command=selectorMaterial).place(x=10, y=520)
1228 Radiobutton(FrameInfo, text="Ceramicos", variable=escogerMaterial,value=2, command=selectorMaterial).place(x=10, y=540)
1229 Radiobutton(FrameInfo, text="Carbono-Tungsteno", variable=escogerMaterial,value=3, command=selectorMaterial).place(x=10, y=560)
1230 Radiobutton(FrameInfo, text="Carbono-Cromo", variable=escogerMaterial,value=4, command=selectorMaterial).place(x=10, y=580)
1231

```

```

1232 Label(FrameInfo, text="Grado declarado: ").place(x=350, y=500)
1233 Radiobutton(FrameInfo, text="00 o K", variable=escogerGrado,value=1, command=selectorGrado).place(x=350, y=520)
1234 Radiobutton(FrameInfo, text="0", variable=escogerGrado,value=2, command=selectorGrado).place(x=350, y=540)
1235 Radiobutton(FrameInfo, text="1", variable=escogerGrado,value=3, command=selectorGrado).place(x=350, y=560)
1236 Radiobutton(FrameInfo, text="2", variable=escogerGrado,value=4, command=selectorGrado).place(x=350, y=580)
1237
1238 Label(FrameInfo, text="Patrón a utilizar: ").place(x=740, y=100)
1239 patron=Entry(FrameInfo)
1240 patron.place(x=860, y=100)
1241
1242 Label(FrameInfo, text="Material del patrón: ").place(x=740, y=130)
1243 materialPatron=Entry(FrameInfo)
1244 materialPatron.place(x=860, y=130)
1245
1246 Label(FrameInfo, text="Usuario: ").place(x=740, y=180)
1247 Radiobutton(FrameInfo, text="Leonardo Rojas Rapso", variable=escogerUsuario,value=1, command=selectorUsuario).place(x=740, y=200)
1248 Radiobutton(FrameInfo, text="Olman Ramos Alfaro", variable=escogerUsuario,value=2, command=selectorUsuario).place(x=740, y=220)
1249 Radiobutton(FrameInfo, text="Ignacio López Hidalgo", variable=escogerUsuario,value=3, command=selectorUsuario).place(x=740, y=240)
1250 Radiobutton(FrameInfo, text="Luis Chaves Santacruz", variable=escogerUsuario,value=4, command=selectorUsuario).place(x=740, y=260)
1251 Radiobutton(FrameInfo, text="Francisco Sequeira", variable=escogerUsuario,value=5, command=selectorUsuario).place(x=740, y=280)
1252 Radiobutton(FrameInfo, text="Luis Damian Rodriguez", variable=escogerUsuario,value=6, command=selectorUsuario).place(x=740, y=300)
1253 Radiobutton(FrameInfo, text="Marcela Prendas Peña", variable=escogerUsuario,value=7, command=selectorUsuario).place(x=740, y=320)
1254 Radiobutton(FrameInfo, text="Fernando Andrés Monge", variable=escogerUsuario,value=8, command=selectorUsuario).place(x=740, y=340)
1255 Radiobutton(FrameInfo, text="Otro:", variable=escogerUsuario,value=9, command=selectorUsuario).place(x=740, y=360)
1256 nuevoUsuario=Entry(FrameInfo)
1257 nuevoUsuario.place(x=795, y=360)
1258
1259 Label(FrameInfo, text="Revisor: ").place(x=950, y=180)
1260 Radiobutton(FrameInfo, text="Leonardo Rojas Rapso", variable=escogerRevisor,value=1, command=selectorRevisor).place(x=950, y=200)
1261 Radiobutton(FrameInfo, text="Olman Ramos Alfaro", variable=escogerRevisor,value=2, command=selectorRevisor).place(x=950, y=220)
1262 Radiobutton(FrameInfo, text="Ignacio López Hidalgo", variable=escogerRevisor,value=3, command=selectorRevisor).place(x=950, y=240)
1263 Radiobutton(FrameInfo, text="Luis Chaves Santacruz", variable=escogerRevisor,value=4, command=selectorRevisor).place(x=950, y=260)
1264 Radiobutton(FrameInfo, text="Francisco Sequeira", variable=escogerRevisor,value=5, command=selectorRevisor).place(x=950, y=280)
1265 Radiobutton(FrameInfo, text="Luis Damian Rodriguez", variable=escogerRevisor,value=6, command=selectorRevisor).place(x=950, y=300)
1266 Radiobutton(FrameInfo, text="Marcela Prendas Peña", variable=escogerRevisor,value=7, command=selectorRevisor).place(x=950, y=320)
1267 Radiobutton(FrameInfo, text="Fernando Andrés Monge", variable=escogerRevisor,value=8, command=selectorRevisor).place(x=950, y=340)
1268 Radiobutton(FrameInfo, text="Otro:", variable=escogerRevisor,value=9, command=selectorRevisor).place(x=950, y=360)
1269 nuevoRevisor=Entry(FrameInfo)
1270 nuevoRevisor.place(x=1005, y=360)
1271
1272 ttk.Button(FrameInfo, text='Crear hoja de datos', command=guardarInfo).place(x=900, y=610) #Boton para crear hoja de datos
1273
1274 ttk.Button(FrameInfo, text='Siguiente', command=irBloques).place(x=1200, y=610) #Boton para ir a frame de bloques
1275
1276 ##### Frame Bloques #####
1277
1278 tabla = ttk.Treeview(FrameBloques, height=20)
1279 tabla.pack()
1280
1281 tabla['columns']= ('Número de Bloque','Número de Serie', 'Valor Nominal Bloque')
1282 tabla.column("#0", width=0, stretch=NO)
1283 tabla.column("Número de Bloque",anchor=CENTER, width=150)
1284 tabla.column("Número de Serie",anchor=CENTER, width=150)
1285 tabla.column("Valor Nominal Bloque",anchor=CENTER, width=150)
1286
1287 tabla.heading("#0",text="",anchor=CENTER)
1288 tabla.heading("Número de Bloque",text="Número de Bloque",anchor=CENTER)
1289 tabla.heading("Número de Serie",text="Número de Serie",anchor=CENTER)
1290 tabla.heading("Valor Nominal Bloque",text="Valor Nominal Bloque",anchor=CENTER)
1291
1292 valorNominalLabel=Label(FrameBloques,text="Número de Serie")
1293 valorNominalLabel.place(x=530, y=450)
1294
1295 serieLabel=Label(FrameBloques,text="Valor Nominal Bloque")
1296 serieLabel.place(x=660, y=450)
1297
1298 valorNominal= Entry(FrameBloques)
1299 valorNominal.place(x=530, y=470)
1300
1301 serie= Entry(FrameBloques)
1302 serie.place(x=660, y=470)
1303
1304 Label(FrameBloques, text="Número de certificado anterior: ").place(x=920, y=30)
1305 certificadoAnterior=Entry(FrameBloques)
1306 certificadoAnterior.place(x=1105, y=30)
1307
1308 Label(FrameBloques, text="Nombre de archivo a cargar: ").place(x=920, y=120)
1309 Label(FrameBloques, text="(Sugerencia=Los nombres de archivo son el número de certificado)").place(x=920, y=140)
1310 archivoCargar=Entry(FrameBloques)
1311 archivoCargar.place(x=1105, y=120)
1312 Label(FrameBloques, text=".xlsx").place(x=1230, y=120)
1313
1314
1315
1316 global identificacionBloque
1317 global valorNominalBloque
1318 global count
1319
1320 identificacionBloque=[]
1321 valorNominalBloque=[]
1322 count=0
1323
1324
1325 global BloqueActual
1326 global dato
1327 global avanceOrden

```

```

1327 global tiempoCorrida
1328 #global esperaBloques      #tiempo de estabilización de bloque cerca del comparador
1329 #tiempoCorrida=DoubleVar()
1330 #tiempoCorrida.set(0.00)
1331 tiempoCorrida=0
1332
1333
1334 #esperaBloques = DoubleVar()
1335 #esperaBloques.set(0.00)
1336 esperaBloques=0      #Inicializamos el valor
1337 BloqueActual=1
1338 avanceOrden=0      #inicializa el avance de la orden de trabajo
1339 dato=0
1340
1341 #button
1342 Input_button = Button(FrameBloques,text = "Agregar dato",command= agregarDato)
1343 Input_button.pack()
1344 Input_button.place(x=610, y=550)
1345
1346 ttk.Button(FrameBloques, text='Buscar datos', command=buscarDatos).place(x=920, y=60)      #Boton para crear hoja de datos
1347
1348 ttk.Button(FrameBloques, text='Cargar datos', command=cargarDatos).place(x=920, y=170)      #Boton para crear hoja de datos
1349
1350 ttk.Button(FrameBloques, text='Limpiar datos', command=limpiarDatos).place(x=920, y=230)      #Boton para crear hoja de datos
1351
1352 ttk.Button(FrameBloques, text='Siguiente', command=irCalibra).place(x=1200, y=610)      #Boton para ir a frame de calibración
1353
1354 ttk.Button(FrameBloques, text='Volver', command=irInfo).place(x=10, y=610)      #Boton para ir a frame de información
1355
1356 ##### Frame Calibración #####
1357
1358 Label(FrameCalibra, text="Tiempo de estabilización para toma medición: ").place(x=10, y=10)
1359 tiempoEstabilizacion=Entry(FrameCalibra)
1360 tiempoEstabilizacion.place(x=300, y=10)
1361
1362 Label(FrameCalibra, text="Tiempo de estabilización de bloques: ").place(x=400, y=10)
1363 w1 = Scale(FrameCalibra, from_=0, to=20,length= 400, tickinterval=1, orient=HORIZONTAL).place(x=600, y=10)
1364 #w1.set(5)
1365 ttk.Button(FrameCalibra, text='Fijar tiempo', command=show_values).place(x=1100, y=10)
1366
1367 Label(FrameCalibra, text="Repeticiones: ").place(x=10, y=40)
1368 repeticiones=Entry(FrameCalibra)
1369 repeticiones.place(x=150, y=40)
1370
1371 Label(FrameCalibra, text="Secuencia: ").place(x=10, y=100)
1372 Radiobutton(FrameCalibra, text="Completa", variable=secEscogida,value=1, command=obtenerSecuencia).place(x=10, y=120)
1373 Radiobutton(FrameCalibra, text="Centros", variable=secEscogida,value=2, command=obtenerSecuencia).place(x=10, y=140)
1374
1375 Label(FrameCalibra, text="Plantilla: ").place(x=10, y=170)
1376 Radiobutton(FrameCalibra, text="1", variable=planEscogida,value=1, command=obtenerSecuencia).place(x=10, y=190)
1377 Radiobutton(FrameCalibra, text="2", variable=planEscogida,value=2, command=obtenerSecuencia).place(x=10, y=210)
1378
1379 Label(FrameCalibra, text="Tiempo calibración por bloque (s): ").place(x=10, y=240)
1380 Label(FrameCalibra, text=tiempoCorrida).place(x=250, y=240)
1381
1382 Label(FrameCalibra, text="Tiempo de espera de estabilización de bloques (s): ").place(x=10, y=310)
1383 Label(FrameCalibra, text=esperaBloques).place(x=350, y=310)
1384
1385 Label(FrameCalibra, text="# Bloques fuera de clase: ").place(x=450, y=310)
1386 fueraClase=Entry(FrameCalibra)
1387 fueraClase.place(x=600, y=310)
1388
1389 Label(FrameCalibra, text="Avance de calibración (%): ").place(x=10, y=380)
1390 Label(FrameCalibra, text=avanceOrden).place(x=250, y=380)
1391
1392 Label(FrameCalibra, text="Días de calibración: ").place(x=300, y=380)
1393 cantidaddias=Entry(FrameCalibra)
1394 cantidaddias.place(x=450, y=380)
1395
1396 ttk.Button(FrameCalibra, text='Generar Reporte', command=crear_reporte).place(x=600, y=380)
1397 #Boton para ir a frame de calibración
1398
1399 Label(FrameCalibra, text="Puerto USB TESA: ").place(x=500, y=100)
1400 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBI", variable=escogerUSBTESA,value=1, command=selectorUSBTESA).place(x=500, y=120)
1401 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBD", variable=escogerUSBTESA,value=2, command=selectorUSBTESA).place(x=500, y=140)
1402 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBK", variable=escogerUSBTESA,value=3, command=selectorUSBTESA).place(x=500, y=160)
1403 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBL", variable=escogerUSBTESA,value=4, command=selectorUSBTESA).place(x=500, y=180)
1404
1405 Label(FrameCalibra, text="Puerto USB Fluke: ").place(x=650, y=100)
1406 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBI", variable=escogerUSBFluke,value=1, command=selectorUSBFluke).place(x=650, y=120)
1407 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBD", variable=escogerUSBFluke,value=2, command=selectorUSBFluke).place(x=650, y=140)
1408 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBK", variable=escogerUSBFluke,value=3, command=selectorUSBFluke).place(x=650, y=160)
1409 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBL", variable=escogerUSBFluke,value=4, command=selectorUSBFluke).place(x=650, y=180)
1410
1411 Label(FrameCalibra, text="Puerto USB Vaisala: ").place(x=800, y=100)
1412 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBI", variable=escogerUSBVaisala,value=1, command=selectorUSBVaisala).place(x=800, y=120)
1413 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBD", variable=escogerUSBVaisala,value=2, command=selectorUSBVaisala).place(x=800, y=140)
1414 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBK", variable=escogerUSBVaisala,value=3, command=selectorUSBVaisala).place(x=800, y=160)
1415 Radiobutton(FrameCalibra, text="USBL", variable=escogerUSBVaisala,value=4, command=selectorUSBVaisala).place(x=800, y=180)
1416
1417 ttk.Button(FrameCalibra, text='Iniciar calibración', command=selectorSecuencia).place(x=10, y=500)
1418 #Boton para ir a frame de calibración
1419
1420 ttk.Button(FrameCalibra, text='Pausar calibración', command=pausarCalibracion).place(x=295, y=500)
1421 #Boton para parar secuencia

```

```
1422
1423 ttk.Button(FrameCalibra, text='Recuperar datos', command=pausarCalibracion).place(x=895, y=500)
1424                                     #Boton para parar secuencia
1425
1426 ttk.Button(FrameCalibra, text='Reanudar calibración', command=selectorSecuencia).place(x=1170, y=500)
                                     #Boton para reanudar secuencia

ttk.Button(FrameCalibra, text='Volver', command=irBloques).place(x=10, y=610)
                                     #Boton para ir a frame de bloques

ttk.Button(window, text='Salir', command=quit).pack(side=BOTTOM)#Boton de salir

window.mainloop()
```