



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA PARA EL
DOBLADO DE LÁMINAS DE ACRÍLICO MEDIANTE UN CONTROL DE
TEMPERATURA Y POSICIÓN ANGULAR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingenieros en Mecatrónica

AUTORES: TONY SEBASTIÁN HERRERA FIALLO

DIEGO ANDRÉS CAMINO ÁVILA

TUTOR: BYRON RICARDO ZAPATA CHANCUSIG

Quito – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Tony Sebastián Herrera Fiallo con documento de identificación N.º 1754246476, y Diego Andrés Camino Ávila con documento de identificación N.º 0941447245, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 25 de febrero del 2025

Atentamente,

Tony Sebastián Herrera Fiallo

1754246476

Diego Andrés Camino Ávila

0941447245

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Tony Sebastián Herrera Fiallo, con documento de identificación N.º 1754246476, y Diego Andrés Camino Ávila, con documento de identificación N.º 0941447245; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Dispositivo Tecnológico: "Diseño y construcción de una máquina semiautomática para el doblado de láminas de acrílico mediante un control de temperatura y posición angular", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de febrero del 2025

Atentamente,



Tony Sebastián Herrera Fiallo

1754246476



Diego Andrés Camino Ávila

0941447245

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Byron Ricardo Zapata Chancusig con documento de identificación N° 1723724876, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA PARA EL DOBLADO DE LÁMINAS DE ACRÍLICO MEDIANTE UN CONTROL DE TEMPERATURA Y POSICIÓN ANGULAR, realizado por Tony Sebastián Herrera Fiallo con documento de identificación N.º 1754246476 y Diego Andrés Camino Ávila con documento de identificación N.º 0941447245, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Dispositivo Tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de febrero del 2025

Atentamente,



Ing. Byron Ricardo Zapata Chancusig, Mgs

1723724876

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada reto en este camino lleno de aprendizajes y desafíos, a mi familia que, con su amor, comprensión y apoyo incondicional, ha sido un pilar fundamental durante todo este proceso, a mis compañeros de universidad y a los amigos por los momentos compartidos, las enseñanzas en equipo y la motivación constante para continuar avanzando, al departamento administrativo de la universidad, a los ingenieros y laboratoristas que, con su disposición y profesionalismo, contribuyeron a facilitar cada etapa de este proyecto, al tutor Ricardo Zapata por su guía, paciencia y compromiso, cuya experiencia y consejos han sido esenciales para culminar este trabajo, y de manera especial a mi compañero y amigo Diego Camino, con quien compartí no solo la responsabilidad y el esfuerzo de este proyecto, sino también la dedicación y el empeño que lo hicieron posible, finalmente, un agradecimiento especial a quienes me brindaron apoyo adicional durante este proceso, incluyendo a mis fieles compañeros de cuatro patas, cuya compañía y cariño fueron un aliciente invaluable en este camino.

Tony Sebastián Herrera Fiallo

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de vida, la sabiduría y la fortaleza necesarias para avanzar en mis estudios y culminar este proyecto, superando cada desafío con fe y determinación. Expreso mi gratitud al ingeniero Ricardo Zapata, tutor de esta tesis, por su constante acompañamiento, su valiosa guía y paciencia, por compartir generosamente sus conocimientos, los cuales fueron esenciales para la culminación de este trabajo. Agradezco también al personal del laboratorio por su apoyo y contribución en mi proceso de aprendizaje. A mi familia, que, a pesar de la distancia, ha sido un pilar de amor y fortaleza en cada decisión de mi vida y mi carrera. A mi pareja, quien con su compañía, comprensión y sacrificio me apoyó en cada momento y compartió mis desvelos, siendo un soporte invaluable en los momentos más difíciles. A mi compañero, colega y amigo Tony Herrera, agradezco profundamente su disposición, compromiso y destacada ética de trabajo hicieron de este proyecto una experiencia enriquecedora. A mi grupo de amigos TDO, quienes con su apoyo hicieron más llevadero este proceso, a mi mascota, quien vivirá por siempre en mis recuerdos y mi corazón como un símbolo de compañía y amor incondicional durante todo este recorrido.

Diego Andrés Camino Ávila

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres Mónica Fiallo, Rodrigo Herrera, Carolina Herrera y Tatiana Herrera, quienes con su amor, paciencia y constante apoyo han sido mi mayor inspiración para alcanzar este logro. Es un honor dedicarles este triunfo como reconocimiento a todo lo que han hecho por mí y como símbolo de ser el primer ingeniero en nuestra familia. A mis primos Isaac Rodríguez y Belén Rodríguez, quienes me brindaron su compañía, respaldo y momentos invaluable durante este proceso. A mi compañero y amigo Diego Camino, por ser un pilar fundamental en este proyecto con su esfuerzo. Y a mis amigos de la universidad, quienes con su compañerismo, alegría y solidaridad hicieron de este recorrido una experiencia inolvidable. Finalmente, dedico este logro a Boris Herrera y Chester Herrera, cuya compañía y cariño fueron un consuelo invaluable durante este proceso, y a Patricio Reyes, por su constante disposición, comprensión y apoyo en cada etapa de este camino, siendo un ejemplo de generosidad y dedicación que siempre recordaré con gratitud.

Tony Sebastián Herrera Fiallo

Dedico este trabajo a Dios, quien me ha mostrado el camino hacia la ingeniería, dándome la voluntad y fortaleza para trabajar y estudiar con determinación. A mis padres Raúl Camino Poveda, Cecibel Ávila Paucar y Martha Camino Poveda, quienes han librado una lucha constante desde mi infancia hasta hoy, siendo ejemplo de sacrificio y amor incondicional. A mis hermanos Raúl Camino y Christian Ronquillo, por no abandonarme en los momentos difíciles y por ser siempre un sostén firme en mi vida, ofreciéndome su mano de ayuda cuando más lo necesité. A mi pareja, por ser un apoyo incondicional durante estos siete años, compartiendo mis logros y desafíos con amor y paciencia. A todos mis compañeros de trabajo y jefes que la vida me ha brindado, quienes, con sus palabras de aliento, me impulsaron a no abandonar mis estudios universitarios. A mis amigos de la carrera, por ser un refugio en los momentos difíciles y compañeros en las risas y triunfos. A mi mejor amigo Douglas Cárdenas y a su familia, quienes me acogieron en su hogar como a un hijo más, regalándome afecto y calor familiar. A mi amigo y compañero de tesis Tony Herrera, cuyo compromiso, esfuerzo y apoyo hicieron posible que este proyecto se llevara a cabo con éxito.

Diego Andrés Camino Ávila

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVI
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
JUSTIFICACIÓN	5
OBJETIVOS.....	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
CAPÍTULO I.....	7
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO.....	7
1.1. Acrílico.....	7
1.1.1. Espesores del acrílico y su temperatura maleable.....	8
1.1.2. Propiedades mecánicas del acrílico.....	9
1.1.3. Propiedades térmicas del acrílico.....	10
1.1.4. Propiedades eléctricas del acrílico	10

1.2. Máquinas para el doblado de acrílico	11
1.3. Transferencia de calor en láminas de acrílico	13
1.3.1. Transferencia de calor	13
1.3.2. Conductividad térmica	14
1.3.3. Convección	14
1.3.4. Radiación	15
1.3.5. Coeficiente de transferencia de calor	15
1.3.6. Comportamiento del acrílico frente a la temperatura	17
1.3.7. Métodos de calefacción en la máquina dobladora de acrílico	19
1.3.8. Tipos de enfriamiento para la resistencia eléctrica	20
1.4. Automatización de procesos	21
1.4.1. Diferencia entre Automatización completa y Semi automatización	21
1.5. Control PID	21
1.5.1. Control PID general enfocado al control de temperatura	22
1.6. Norma ISO 13849: Seguridad de las máquinas – Partes del sistema de control relacionadas con la seguridad	23
1.7. Norma IEC 60204-1: Seguridad de las máquinas – Equipos eléctricos de las máquinas	24
1.8. Componentes de seguridad y soporte en sistemas de máquinas térmicas	24
1.8.1. Aislamientos térmicos	24
1.8.2. Fusibles	25
1.8.3. Luces piloto	25
1.8.4. Señaléticas	25
1.9. Componentes electrónicos	25
1.9.1. Microcontrolador ESP32	26
1.9.2. Sensor de temperatura	27
1.9.3. Motor a paso NEMA 17	27
1.9.4. Driver para motor a paso	28
CAPÍTULO II	29
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	29
2.1. Selección de alternativas para máquina en el doblado industrial	29

2.1.1. Máquina de doblado lineal con resistencia eléctrica.....	29
2.1.2. Máquina de doblado con aire caliente	30
2.1.3. Prensa térmica para doblado	30
2.1.4. Calificación de las alternativas para máquina en el doblado industrial	31
2.2. Selección de alternativas para resistencia de calentamiento	32
2.2.1. Resistencia de nicromo	32
2.2.2. Resistencia de niquelina (Cartucho)	33
2.2.3. Resistencia cerámica.....	33
2.2.4. Calificación de las alternativas para resistencia de calentamiento	34
2.3. Selección de alternativas para transmisión de movimiento	35
2.3.1. Piñones y engranajes.....	35
2.3.2. Eslingas y poleas.....	35
2.3.3. Cadena y rueda dentada	36
2.3.4. Calificación de las alternativas para transmisión de movimiento.....	36
2.4. Selección de alternativas para microcontrolador	37
2.4.1. ESP32.....	37
2.4.2. STM32	38
2.4.3. Arduino Mega	38
2.4.4. Calificación de las alternativas para microcontrolador.....	39
CAPÍTULO III.....	40
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	40
3.1. Diseño completo en software CAD	40
3.2. Análisis de cargas.....	43
3.2.1. Cálculo de masa	43
3.3. Cálculo estructural de la mesa	44
3.3.1. Peso total ajustado con margen de seguridad.....	46
3.3.2. Selección del tipo de perfil	46
3.3.3. Sumatoria de Momentos en A.....	47
3.3.4. Sumatoria de momentos en Y	47
3.3.5. Cálculo de Fuerzas Cortantes.....	48
3.3.6. Cálculo del Esfuerzo Cortante (σ).....	50

3.3.7. Cálculo del Factor de Seguridad (FS) de la mesa estructural	50
3.5. Análisis de transmisión de potencia en los piñones	53
3.5.1. Cálculo de los piñones para el motor y ángulo rotatorio	53
3.5.2. Cálculo del torque necesario para girar el sistema.....	55
3.6. Análisis térmico para lámina de acrílico	57
3.6.1. Datos de una lámina de acrílico transparente	57
3.6.2. Cálculo de calor maleable para cada espesor.....	57
3.6.3. Justificación de uso exclusivo de acrílico.....	59
3.7. Análisis eléctrico de la máquina	59
3.7.1. Requerimientos de potencia para la fuente de alimentación en componentes DC 60	
3.7.2. Potencia total requerida de la máquina	61
3.7.3. Corriente del motor.....	61
3.7.4. Corriente de la resistencia de niquelina	62
3.7.5. Esquema eléctrico de la máquina.....	63
3.8. Manejo y control de la máquina.....	66
3.8.1. Diagrama de flujo de la programación ESP32.....	66
3.8.2. Diagrama de flujo de la programación Arduino Mega para pantalla TFT Touch ..	67
3.8.3. Control PID de la temperatura en la resistencia de niquelina	68
3.8.4. Control del motor Nema 23 por Driver TB6600.....	75
3.8.5. Manejo del equipo.....	76
3.8.6. Diagrama de bloques de la pantalla TFT Touch	77
CAPÍTULO IV	79
PRUEBAS Y RESULTADOS	79
4.1. Prueba 1: Ángulo de doblado de tres espesores.....	79
4.1.1. Resultados angulares del doblado de lámina de acrílico	83
4.2. Prueba 2: Tiempo de calentamiento y enfriamiento de tres espesores.....	84
4.3. Costos de construcción de la máquina dobladora de acrílico	84
4.3.1. Costos de elementos mecánicos.....	85
4.3.2. Costos de elementos eléctricos y electrónicos.	86
4.3.3. Costos de mano de obra.	87
4.3.4. Costo total de la máquina.....	87

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS.....	91
ANEXOS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Propiedades mecánicas del acrílico de la marca Vical [12].</i>	9
Tabla 2. <i>Propiedades térmicas del acrílico [12].</i>	10
Tabla 3. <i>Propiedades eléctricas del acrílico [12].</i>	11
Tabla 4. <i>Calificación de alternativas para maquinas en el doblado industrial.</i>	31
Tabla 5. <i>Calificación de alternativas para resistencia de calentamiento.</i>	34
Tabla 6. <i>Calificación de alternativas para transmisión de movimiento.</i>	37
Tabla 7. <i>Calificación de alternativas para el microcontrolador.</i>	39
Tabla 8. <i>Elementos utilizados en la construcción de la máquina.</i>	42
Tabla 9. <i>Cálculo de la masa total de los elementos montados.</i>	45
Tabla 10. <i>Datos del acrílico.</i>	57
Tabla 11. <i>Valores mínimos y máximos para cada espesor.</i>	58
Tabla 12. <i>Tabla de parámetros de control por sintonización Ziegler y Nichols.</i>	73
Tabla 13. <i>Características del modelo Control PID en lazo cerrado.</i>	75
Tabla 14. <i>Resultados angulares del doblado para lámina de acrílico.</i>	83
Tabla 15. <i>Tiempo de calentamiento y enfriamiento.</i>	84
Tabla 16. <i>Tabla de costos elementos generales.</i>	85
Tabla 17. <i>Tabla de costos elementos eléctricos y electrónicos.</i>	86
Tabla 18. <i>Tabla costos de mano de obra</i>	87
Tabla 19. <i>Tabla de costos total.</i>	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Representación del acrílico en plancha [5].</i>	7
Figura 2. <i>Prensa plegadora eléctrica [14].</i>	11
Figura 3. <i>Dobladora de acrílico por aire caliente [15].</i>	12
Figura 4. <i>Prensa térmica neumática modelo SECABO TP10 [16].</i>	12
Figura 5. <i>Máquina de doblado por infrarrojos [16].</i>	13
Figura 6. <i>Tres modos de transferir calor [19].</i>	13
Figura 7. <i>Coeficiente global del acrílico en paredes planas compuestas [20].</i>	16
Figura 8. <i>Red de resistencias térmicas del acrílico [20].</i>	18
Figura 9. <i>Alambre de nicromo [21].</i>	19
Figura 10. <i>Resistencia de niquelina tipo cartucho [23].</i>	20
Figura 11. <i>Control PID clásico para el control de temperatura [27].</i>	22
Figura 12. <i>Pines de la placa del microcontrolador [35].</i>	26
Figura 13. <i>Modelo motor a paso NEMA 23 [37].</i>	28
Figura 14. <i>Controlador TB6600 [38].</i>	28
Figura 15. <i>Máquina dobladora lineal de metacrilato [39].</i>	29
Figura 16. <i>Dobladora manual por conducto de aire [40].</i>	30
Figura 17. <i>Prensa de calor manual [41].</i>	31
Figura 18. <i>Alambre de nicromo por rollo [42].</i>	32
Figura 19. <i>Niquelina tipo cartucho [43].</i>	33
Figura 20. <i>Cerámica termo eléctrico [44].</i>	34
Figura 21. <i>Muestra de un piñón [45].</i>	35
Figura 22. <i>Movimiento por poleas y bandas [46].</i>	36
Figura 23. <i>Movimiento por cadena y rueda dentada [47].</i>	36
Figura 24. <i>Microcontrolador ESP32 CH340 [48].</i>	38
Figura 25. <i>Microcontrolador Blue Pill STM32 ARM [49].</i>	38

Figura 26. <i>Arduino Mega 2560 R3 [50].</i>	39
Figura 27. <i>Vista isométrica del ensamble de la maquina dobladora de acrílico.</i>	40
Figura 28. <i>Vista explosionada del ensamble de la máquina dobladora de acrílico.</i>	41
Figura 29. <i>Datasheet tubo estructural cuadrado [54].</i>	43
Figura 30. <i>Medidas de la estructura.</i>	44
Figura 31. <i>Diagrama de cuerpo libre de la mesa estructural.</i>	44
Figura 32. <i>Diagrama de esfuerzos en la carga concentrada.</i>	48
Figura 33. <i>Diagrama de corte.</i>	49
Figura 34. <i>Diagrama de momentos.</i>	50
Figura 35. <i>Factor de seguridad máxima y mínima.</i>	51
Figura 36. <i>Deformación máxima y mínima.</i>	52
Figura 37. <i>Estructura de la máquina completa.</i>	52
Figura 38. <i>Diseño piñón del motor.</i>	54
Figura 39. <i>Diseño piñón del ángulo rotatorio.</i>	55
Figura 40. <i>Esquema eléctrico de la máquina dobladora de lámina de acrílico.</i>	63
Figura 41. <i>Montaje eléctrico de la máquina.</i>	65
Figura 42. <i>Diagrama de flujo de la ESP32.</i>	66
Figura 43. <i>Diagrama de flujo del Arduino Mega.</i>	67
Figura 44. <i>Entrada y Salida del sistema sobre tiempo en segundos.</i>	68
Figura 45. <i>Temperatura de desviación vs Tiempo.</i>	70
Figura 46. <i>Temperatura ajustada de la toma de datos.</i>	72
Figura 47. <i>Control PID en lazo cerrado del sistema.</i>	74
Figura 48. <i>Diagrama de bloques para la pantalla TFT Touch.</i>	78
Figura 49. <i>Medición con graduador a 25 grados para una lámina de 2 [mm].</i>	79
Figura 50. <i>Medición con graduador a 45 grados para una lámina de 2 [mm].</i>	79
Figura 51. <i>Medición con graduador a 75 grados para una lámina de 2 [mm].</i>	80

Figura 52.	<i>Medición con graduador a 90 grados para una lámina de 2 [mm].</i>	80
Figura 53.	<i>Medición con graduador a 25 grados para una lámina de 3 [mm].</i>	80
Figura 54.	<i>Medición con graduador a 45 grados para una lámina de 3 [mm].</i>	81
Figura 55.	<i>Medición con graduador a 75 grados para una lámina de 3 [mm].</i>	81
Figura 56.	<i>Medición con graduador a 90 grados para una lámina de 3 [mm].</i>	81
Figura 57.	<i>Medición con graduador a 25 grados para una lámina de 5 [mm].</i>	82
Figura 58.	<i>Medición con graduador a 45 grados para una lámina de 5 [mm].</i>	82
Figura 59.	<i>Medición con graduador a 75 grados para una lámina de 5 [mm].</i>	82
Figura 60.	<i>Medición con graduador a 90 grados para una lámina de 5 [mm].</i>	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	<i>Plano de ensamble de la Máquina Dobladora de Lámina de Acrílico.</i>	96
Anexo 2.	<i>Plano de pieza del Tablero.</i>	97
Anexo 3.	<i>Plano de pieza de Bandeja Rotatoria.</i>	98
Anexo 4.	<i>Plano de pieza del Ángulo Rotatorio.</i>	99
Anexo 5.	<i>Plano de pieza del Ángulo Estático.</i>	100
Anexo 6.	<i>Plano de pieza de la Bandeja de Apoyo.</i>	101
Anexo 7.	<i>Plano de pieza de la Bandeja Base.</i>	102
Anexo 8.	<i>Plano de pieza del Ángulo Bandeja de Apoyo.</i>	103
Anexo 9.	<i>Plano de pieza del Ángulo Bandeja Base.</i>	104
Anexo 10.	<i>Plano de pieza de la Mesa.</i>	105
Anexo 11.	<i>Plano de pieza del Panel.</i>	106
Anexo 12.	<i>Plano de pieza de la Tapa del Panel.</i>	107
Anexo 13.	<i>Plano de pieza del Soporte de Termocupla.</i>	108
Anexo 14.	<i>Plano de pieza del Soporte del Motor.</i>	109
Anexo 15.	<i>Plano de pieza del Piñón del Motor.</i>	110
Anexo 16.	<i>Plano de pieza del Piñón de Ángulo Rotatorio.</i>	111
Anexo 17.	<i>Plano de pieza de la Tapa del Tablero.</i>	112

RESUMEN

El presente trabajo muestra el diseño y construcción de una máquina semiautomática para el doblado de láminas de acrílico transparente, enfocada en mejorar la eficiencia del proceso. En el Capítulo 1 se describe el contexto y los fundamentos teóricos, explicando las propiedades del acrílico, los métodos de calentamiento y los componentes necesarios, como los sistemas de control y elementos de seguridad. El Capítulo 2 detalla la comparación de diferentes opciones de componentes y su selección con base en criterios como su funcionalidad y durabilidad. En el Capítulo 3 se explica el proceso de diseño en computadora, la construcción de la máquina y los cálculos necesarios para su estructura y funcionamiento. El Capítulo 4 presenta las pruebas realizadas con distintos espesores de láminas, midiendo el tiempo de calentamiento y el ángulo de doblado, y evaluando los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del desarrollo del prototipo y en recomendaciones se proponen mejoras para futuras versiones de la máquina.

Palabras clave: máquina semiautomática, doblado de acrílico, control de temperatura, posición angular, sistema de control.

ABSTRACT

This work presents the design and construction of a semi-automatic machine for bending transparent acrylic sheets, aiming to improve the uniformity and efficiency of the process. Chapter 1 describes the background and theoretical foundations, explaining the properties of acrylic, heating methods, and the required components, such as control systems and safety elements. Chapter 2 details the comparison of different component options and their selection based on functionality and durability. Chapter 3 explains the computer-aided design, machine construction, and the necessary calculations for its structure and operation. Chapter 4 presents the tests carried out with different thicknesses, measuring heating time and bending angles, and evaluating the results obtained. Finally, Chapter 5 highlights the conclusions, emphasizing the project's benefits for both technical education and production, and proposes improvements for future machine versions. This project aims to provide a practical tool to optimize work in workshops and training laboratories.

Keywords: semi-automatic machine, acrylic bending, temperature control, angular position, control system.

INTRODUCCIÓN

En el entorno industrial actual, la necesidad de procesos de fabricación más eficientes y precisos lleva a la búsqueda de soluciones tecnológicas que optimizan la producción sin aumentar significativamente los costes, donde en el área industrial se encuentra el doblado de láminas acrílicas, un material ampliamente utilizado en campos como la publicidad, la construcción y la producción de productos plásticos, la calidad del proceso de doblado resulta crucial para garantizar que el producto final cumpla con los estándares requeridos de precisión y uniformidad.

El doblado manual siempre ha sido una técnica bastante utilizada, pero tiene muchas limitaciones que dificultan obtener buenos resultados, especialmente cuando se trata de precisión, controlar la temperatura o ajustar bien el ángulo, estos problemas no solo pueden afectar la calidad final del producto, también generan desperdicio de material y hacen que los tiempos de producción sean poco eficientes, frente a estas dificultades, se han empezado a desarrollar máquinas semiautomáticas con sistemas de control más avanzados, lo que se ha convertido en una alternativa muy atractiva, sobre todo para las pequeñas y medianas empresas que no pueden permitirse el costo elevado de los sistemas completamente automatizados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El doblado de láminas de acrílico es un proceso crítico en diversas aplicaciones industriales y caseras [1], sin embargo, las dobladoras manuales o caseras que se utilizan comúnmente presentan diversas problemáticas que afectan tanto la eficiencia como la calidad del producto final, una de las principales dificultades es la falta de control de temperatura de doblado, lo que resulta en piezas que no cumplen con los estándares requeridos para ciertos proyectos, lo cual puede generar desperdicio de material y aumentar los costos de producción, además, estas máquinas suelen generar puntos de tensión en el acrílico, lo que incrementa la probabilidad de ruptura durante el proceso de doblado o en uso posterior, lo que implica un costo adicional en términos de reemplazo de material, a esto se suma que muchas de las máquinas caseras no cuentan con un control adecuado de la temperatura, lo que es esencial para evitar deformaciones indeseadas o quemaduras en el material [2]. Esto hace que el proceso sea menos eficiente y más propenso a fallos. La falta de control en las dobladoras manuales o caseras no solo genera productos de baja calidad, sino que también incrementa los costos de producción debido a la alta tasa de fallas y la necesidad de reponer material dañado.

JUSTIFICACIÓN

El diseño y construcción de una máquina semiautomática para el doblado de láminas de acrílico tiene una gran relevancia tanto en el ámbito industrial como académico, en la actualidad, los métodos manuales o caseros para el doblado de este tipo de material presentan serias limitaciones en cuanto a control y uniformidad, lo que genera productos con errores en las dimensiones y acabados irregulares [3].

El proyecto se justifica al proponer una solución semiautomática en este proceso, garantizando que cada doblado cumpla con parámetros de posición angular y control de temperatura, eliminando la variabilidad asociada al trabajo manual [4]. Además, la máquina que se propone no solo será útil en el sector industrial, donde se requiere mejorar la eficiencia en la producción de productos de acrílico, sino también en el ámbito académico, ya que será una herramienta valiosa en laboratorios de ingeniería mecatrónica, permitiendo a los estudiantes familiarizarse con sistemas de control semiautomáticos aplicados a procesos reales, la implementación de este proyecto permitirá que tanto en entornos educativos como comerciales se logre un doblado de láminas acrílicas más controladas y eficientes, lo que resulta en una contribución significativa al mejoramiento de los procesos productivos y formativos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina semiautomática para el doblado de láminas de acrílico mediante un control de temperatura y posición angular.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los principios y métodos del doblado de láminas de acrílico mediante una revisión bibliográfica que fundamente teóricamente el diseño de la máquina semiautomática.
- Desarrollar un sistema de control térmico y posición angular mediante hardware y software de ingeniería para la integración en la máquina dobladora de acrílico.
- Evaluar el rendimiento y la eficiencia de la máquina mediante pruebas de funcionamiento para la verificación de la calidad del doblado y la consistencia del producto final.

CAPÍTULO I

MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

El presente capítulo aborda diversos temas clave, comenzando con las propiedades del acrílico, incluyendo sus características mecánicas, térmicas y eléctricas, y el análisis de los espesores y temperaturas óptimas para su deformación. Se examinan las diferentes máquinas disponibles para el doblado de láminas de acrílico y se explican los conceptos de automatización en estos procesos, además, se profundiza en los mecanismos de transferencia de calor como la conducción, convección y radiación, seguido de una explicación sobre el control PID aplicado a la regulación de temperatura. También se detallan los componentes de seguridad y soporte esenciales, así como los principales componentes electrónicos, entre ellos el microcontrolador ESP32, los sistemas de control, los sensores y el motor paso a paso.

1.1. Acrílico

El acrílico, conocido químicamente como polimetacrilato de metilo (PMMA, por sus siglas en inglés), es un material plástico ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su transparencia, resistencia a impactos, y su capacidad para ser moldeado fácilmente mediante el uso de calor, presentándose como una opción versátil en aplicaciones que requieren ligereza, rigidez y una apariencia similar al vidrio, pero con menor peso y mayor durabilidad. Su popularidad se debe también a su alta resistencia a los rayos UV, lo que lo convierte en un material idóneo tanto para aplicaciones en interiores como en exteriores, además, su facilidad para ser trabajado mediante procesos de corte, doblado y mecanizado, lo hace un material ideal en la fabricación de productos como paneles decorativos, vitrinas, carcasas protectoras y componentes en el diseño industrial [6]. En la Figura 1, se muestra una representación del material PMMA.

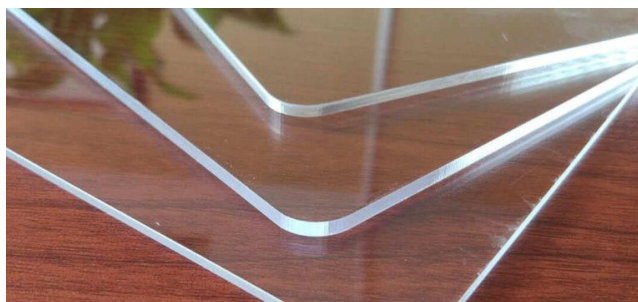


Figura 1. Representación del acrílico en plancha [5].

En la siguiente lista se encuentran las características más reconocidas del acrílico que lo hacen ser ligero, resistente y con una transparencia similar a la del vidrio [6].

- 100% reciclable.
- Transparencia superior al vidrio.
- Ligero.
- Resistente a las condiciones ambientales.
- Alta resistencia a la rotura.
- Resistente a agentes químicos.
- Excelente calidad óptica sin distorsión de imágenes.
- Amplia gama de colores y acabados.
- Termo formable.
- Fácil de mecanizar y cortar.
- Aislante térmico y eléctrico.
- Resistente a la radiación UV, evitando amarilleo.
- No tóxico.
- Bajo mantenimiento y fácil limpieza.

1.1.1. Espesores del acrílico y su temperatura maleable

La maleabilidad del acrílico se alcanza al elevar su temperatura hasta su punto de deflexión térmica, que depende directamente de su espesor. Las siguientes temperaturas se basan en investigaciones y datos experimentales para distintos espesores de acrílico comerciales.

- **Acrílico de 1.5 a 2 mm:** El acrílico de espesores finos, como 1.5 y 2 mm, alcanza su flexibilidad óptima a una temperatura de entre 120 y 140 °C. Este rango permite moldearlo sin fracturas ni deformaciones indeseadas [7].
- **Acrílico de 3 mm:** Para espesores de 3 mm, se recomienda una temperatura de entre 130 y 150 °C. Esta temperatura garantiza una adecuada distribución de calor a lo largo del material, previniendo zonas rígidas [8].
- **Acrílico de 5 [mm]:** El acrílico de 5 mm requiere un rango de temperatura de 135 a 160 °C para su deformación segura. Estudios muestran que esta temperatura asegura que el calor penetre uniformemente [9].
- **Acrílico de 6 a 10 [mm]:** Los espesores entre 6 y 10 mm necesitan un calentamiento entre 140 y 165 °C, debido a su mayor grosor [9].

- **Acrílico de 12 mm o más:** Para estos espesores, la temperatura ideal está entre 150 y 170 °C. Estos valores permiten moldear el material sin riesgo de fractura [10].
- **Temperatura de enfriamiento:** El acrílico recupera su dureza cuando se enfría a temperaturas entre 40 y 60 °C. Investigaciones indican que este rango permite que el material regrese a su rigidez original sin deformaciones internas [11].

1.1.2. *Propiedades mecánicas del acrílico*

Las propiedades mecánicas de una plancha de acrílico de 3.0 mm, como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la elongación, son clave para entender su comportamiento bajo cargas, lo que facilita su aplicación en proyectos que requieren resistencia mecánica y durabilidad estructural. [6].

En la Tabla 1, se observan las propiedades mecánicas de una plancha de acrílico de 3.0 mm (0.118”) de la empresa VICAL.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acrílico de la marca Vical [12].

Propiedad	Valor típico	Tipo de prueba
Resistencia a la tracción kg/cm ² .	700	ASTM D638
Elongación hasta ruptura %.	3	ASTM D638
Módulo de elasticidad kg/cm ² .	31000	ASTM D638
Resistencia al choque (IZOD) Kg cm/cm.	1.5	ASTM D256
Resistencia a la flexión kg/cm ² .	1050	ASTM D790
Resistencia a la compresión kg/cm ² .	1080	ASTM D 695
Resistencia a la rotura kg/cm ² .	630	ASTM D 732
Dureza Rockwell.	M95 - M100	ASTM D 785
Dureza Barcol.	52	ASTM D 2583
Contracción residual (tensión interna).	2%	ASTM D 702

1.1.3. *Propiedades térmicas del acrílico*

Una plancha de acrílico de 3.0 mm posee propiedades térmicas como la conductividad térmica, el coeficiente de dilatación lineal y la temperatura de deflexión térmica, estos parámetros son esenciales para entender su respuesta al calor y asegurar su integridad estructural en aplicaciones que requieren precisión en la expansión o en procesos de calentamiento [12].

En la Tabla 2, se observan las propiedades térmicas de una plancha de acrílico de 3.0 mm (0.118”) de la empresa VICAL.

Tabla 2. Propiedades térmicas del acrílico [12].

Propiedad	Valor típico	Tipo de prueba
Temperatura de formado °C	170 - 190	
°F.	340 - 380	
Temperatura de deflexión °C.	99	ASTM 648
Bajo carga (264 psi) °F.	196	ASTM 648
Máxima recomendada °C.	82	
Temperatura de servicio °F.	180	
Punto Vicat °C.	119	ASTM D 1525
Punto Vicat °F.	246	
Coeficiente de dilatación lineal (cm/cm °C).	7.1 10-5	ASTM D 696
Conductividad térmica (cal cm/cm ² °C seg).	5 10-4	ASTM D177
Flamabilidad (velocidad de propagación de la llama) mm/mon.	28	ASTM D177
Temperatura de autoignición.	910 °F - 490 °C	ASTM D 1929
Calor específico cal/gr °C.	0.35	

1.1.4. *Propiedades eléctricas del acrílico*

La resistividad dieléctrica de una plancha de acrílico de 3.0 mm es una propiedad esencial para su uso en aplicaciones que requieren aislamiento eléctrico, lo que la hace adecuada para

dispositivos que necesitan seguridad en la conducción de electricidad, permitiendo su empleo en entornos donde la estabilidad eléctrica es clave para evitar fallos o riesgos operativos [12].

En la Tabla 3, se observan las propiedades eléctricas de una plancha de acrílico de 3.0 mm (0.118”) de la empresa VICAL.

Tabla 3. Propiedades eléctricas del acrílico [12].

Propiedad	Valor Típico	Tipo de prueba
Resistencia dieléctrica a tiempos cortos (espesor 0.125”) KV/mm.	17-20	ASTM D 149
Resistividad volumétrica ohm cm.	1015	ASTM D 257
Resistividad superficial ohm.	1016	ASTM D 257

1.2. Máquinas para el doblado de acrílico

Existen diferentes tipos de máquinas especializadas para el doblado de láminas de acrílico, diseñadas para aplicar calor de manera controlada a lo largo de una línea específica, entre las más comunes se encuentran los siguientes:

- **Máquina de doblado lineal por resistencia eléctrica:** Se utilizan resistencias eléctricas lineales para generar calor justo en la línea donde se desea realizar el doblez, son ideales para doblar láminas en un solo punto con ángulos específicos, y se utilizan en aplicaciones de bajo a mediano volumen [13].

En la Figura 2, se presenta un ejemplo de una prensa de doblado lineal por resistencia eléctrica.



Figura 2. Resistencia eléctrica [14].

- **Máquina de doblado por aire caliente:** Se aplican calor mediante un flujo controlado de aire caliente sobre una zona específica del material, este tipo de máquina permite un mayor control en la distribución del calor, siendo especialmente útil cuando se requiere doblar acrílico en formas más complejas o curvas continuas [15].

En la Figura 3, se presenta un ejemplo de una máquina de doblado por aire caliente.



Figura 3. Dobladora de acrílico por aire caliente [15].

- **Prensa térmica para doblado:** Combinan el uso de calor y presión para moldear las láminas de acrílico, el calor se distribuye de manera uniforme sobre toda la superficie de la lámina, y con la presión se obtiene la forma deseada, este tipo de máquina es ideal para proyectos que requieren mayor precisión y uniformidad en el doblado [16].

En la Figura 4, se presenta un ejemplo de una prensa térmica neumática modelo SECABO TP10.



Figura 4. Prensa térmica neumática modelo SECABO TP10 [16].

- **Máquina de doblado por infrarrojos:** Utilizan radiación infrarroja para calentar el material sin necesidad de contacto físico, esta tecnología es eficaz para evitar la contaminación durante el proceso de doblado, lo que la hace especialmente útil en industrias con altos estándares de limpieza [17].

En la Figura 5, se presenta un ejemplo de una máquina de doblado por infrarrojos.



Figura 5. Máquina de doblado por infrarrojos [16].

1.3. Transferencia de calor en láminas de acrílico

En los siguientes temas se detalla el concepto general de la transferencia de calor y sus modos, las cuales son: conducción, convección y radiación, además, se abordarán conceptos clave como el coeficiente de transferencia de calor, que mide la eficiencia del proceso, y el comportamiento del acrílico frente a la temperatura, lo que permitirá entender cómo responde este material al calentamiento durante su proceso de doblado.

1.3.1. *Transferencia de calor*

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía térmica se desplaza de una región con mayor temperatura hacia otra con menor temperatura. Este fenómeno ocurre debido a la diferencia de temperatura entre los cuerpos o sistemas involucrados, y puede darse de tres formas principales: conducción, convección y radiación [18].

En la Figura 6, se presenta un ejemplo visual de cada modo de transferir calor.



Figura 6. Tres modos de transferir calor [19].

1.3.2. Conductividad térmica

En la dobladora de acrílico ocurre cuando el calor generado por el alambre o resistencia se transmite directamente a la lámina de acrílico al estar en contacto con el material, lo que provoca un aumento de temperatura que permite el reblandecimiento del acrílico para su doblado, este fenómeno depende de la capacidad del acrílico para conducir el calor, su coeficiente de conductividad térmica y el tiempo de exposición [18].

La conductividad térmica dada por la Ley de Fourier se expresa en la ecuación (1).

$$Q = -k * A * \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde:

- Q : Flujo de calor [W].
- k : Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}\right]$.
- A : Área a través de la cual se transfiere el calor [m^2].
- $\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura a lo largo de la dirección del flujo de calor [$^\circ K/m$].

1.3.3. Convección

En la dobladora de acrílico se produce cuando el aire caliente generado alrededor de la resistencia o alambre calefactor circula y transfiere calor a la superficie del acrílico, este proceso depende de la diferencia de temperatura entre el aire y el acrílico, así como de la velocidad del flujo de aire, en este caso, la eficiencia de la transferencia de calor por convección puede influir en la uniformidad del calentamiento del material [18].

La transferencia de calor por convección dada por la Ley de Enfriamiento de Newton se expresa en la ecuación (2).

$$Q = h * A * (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Donde:

- Q : Flujo de calor [W].
- h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$.
- A : Área de la superficie expuesta al fluido [m^2].
- T_s : Temperatura de la superficie [$^\circ K$ o $^\circ C$].
- T_∞ : Temperatura del fluido lejos de la superficie [$^\circ K$ o $^\circ C$].

1.3.4. Radiación

En la dobladora de acrílico ocurre cuando la resistencia eléctrica emite energía en forma de ondas electromagnéticas que son absorbidas por la superficie del acrílico, calentándolo sin necesidad de contacto directo, este tipo de transferencia depende de la emisividad del material y de la temperatura de la fuente de calor, en el contexto de la dobladora, la radiación contribuye a un calentamiento uniforme del acrílico [18].

La transferencia de calor por radiación dada por la Ley de Stefan-Boltzmann se expresa en la ecuación (3).

$$Q = \sigma * \varepsilon * A * (T_S^4 - T_{\infty}^4) \quad (3)$$

Donde:

- Q : Flujo de calor por radiación [W].
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann $5.67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 * K^4} \right]$.
- ε : Temperatura de la superficie emisora [$^{\circ}K$].
- A : Área de la superficie emisora [m^2].
- T_S : Temperatura de la superficie emisora [$^{\circ}K$].
- T_{∞} : Temperatura del entorno o de los alrededores [$^{\circ}K$].

1.3.5. Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor, o conductividad térmica, mide la capacidad de un material para transmitir calor, siendo mayor su eficiencia cuanto más alto sea este coeficiente, se expresa en $W/m^2 \cdot K$ y refleja la cantidad de calor que fluye por unidad de área por cada grado de diferencia de temperatura entre sus superficies [20].

Este coeficiente es importante en procesos industriales o de diseño, ya que influye en la eficiencia energética y en la capacidad del material para disipar o retener calor según sea necesario, además, el conocimiento del coeficiente de transferencia de calor permite optimizar la selección de materiales para garantizar un rendimiento adecuado bajo condiciones térmicas específicas [20].

Es también esencial en la evaluación del comportamiento térmico de materiales sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento, ayudando a prever su estabilidad dimensional y estructural, en materiales con baja conductividad térmica, como el acrílico, se minimiza la transferencia rápida de calor, lo que es ventajoso en aplicaciones donde se desea evitar

deformaciones o cambios bruscos de temperatura, también es útil en el diseño de sistemas de aislamiento donde se requiere mantener una temperatura constante en un entorno controlado [20].

En la Figura 7, se presenta el comportamiento del coeficiente global en paredes planas compuestas del acrílico.

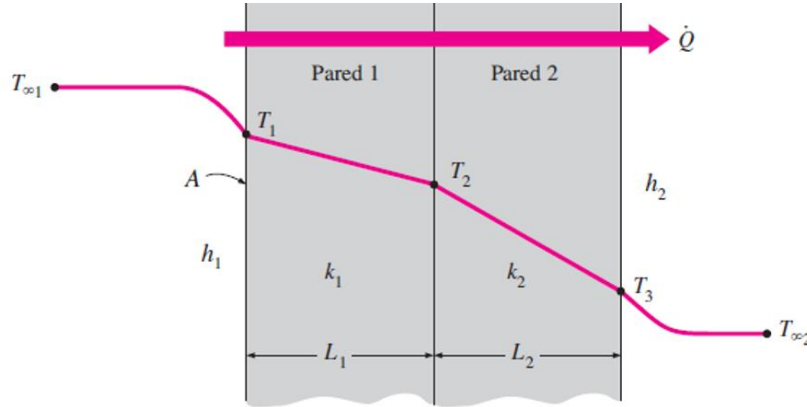


Figura 7. Coeficiente global del acrílico en paredes planas compuestas [20].

La transferencia de calor a través de una pared compuesta tiene como resultado la conductancia térmica total de un sistema compuesto por diferentes materiales con resistencias térmicas en serie. Esta se expresa en la siguiente ecuación (4).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta_{x1}}{k_1} + \frac{\Delta_{x2}}{k_2} + \frac{1}{h_2}} \quad (4)$$

Donde:

- U : Conductancia térmica total $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}]$.
- h_1 : Coeficiente de transferencia de calor por convección en la primera superficie $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}]$.
- h_2 : Coeficiente de transferencia de calor por convección en la segunda superficie $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}]$.
- Δ_{x1} : Espesor de la primera capa de material $[m]$.
- k_1 : Conductividad térmica del primer material $[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}]$.
- Δ_{x2} : Espesor de la segunda capa de material $[m]$.
- k_2 : Conductividad térmica del segundo material $[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}]$.

Esta ecuación permite calcular la conductancia global (U) para la transferencia de calor a través de varias capas de diferentes materiales.

La ecuación (5), presenta el flujo de calor total (Q) de un sistema.

$$Q' = A * U * \Delta T \quad (5)$$

Donde:

- A: Área a través de la cual ocurre la transferencia de calor [m^2].
- U: Conductancia térmica total, calculada previamente [$\frac{W}{m^2 * ^\circ K}$].
- ΔT : Diferencia de temperatura entre las dos superficies [$^\circ K$] o [$^\circ C$].
- Q': Cantidad de calor transferido por unidad de tiempo [W].

Por último, la ecuación (6), se presenta el flujo de calor por unidad de área, es decir, la cantidad de calor transferido a través de una unidad de superficie.

$$q' = U * \Delta T \quad (6)$$

Donde:

- q': Flujo de calor por unidad de área [$\frac{W}{m^2}$].
- U: Conductancia térmica total [$\frac{W}{m^2 * ^\circ K}$].
- ΔT : Diferencia de temperatura entre las dos superficies [$^\circ K$] o [$^\circ C$].

1.3.6. Comportamiento del acrílico frente a la temperatura

El acrílico, siendo un polímero termoplástico, muestra un comportamiento notable frente a la temperatura, ya que a bajas temperaturas tiende a ser rígido y quebradizo, mientras que al aumentar la temperatura se vuelve más flexible y fácil de moldear, su coeficiente de transferencia de calor varía según la temperatura, lo que puede influir en su capacidad para actuar como aislante o transmisor de calor [20].

A medida que el acrílico se calienta y alcanza su temperatura de transición vítrea, aproximadamente entre 100 $^\circ C$ y 115 $^\circ C$, comienza a suavizarse, permitiendo su conformado sin fracturas, esta propiedad es aprovechada en procesos como el termoformado, donde el material se moldea bajo calor controlado, además, al reducir la velocidad de transferencia de calor en comparación con metales u otros materiales, el acrílico puede actuar como una barrera térmica efectiva, lo que es beneficioso en aplicaciones donde se busca proteger componentes sensibles a cambios bruscos de temperatura [20].

En la Figura 8, se presenta el comportamiento de la red térmica del acrílico.

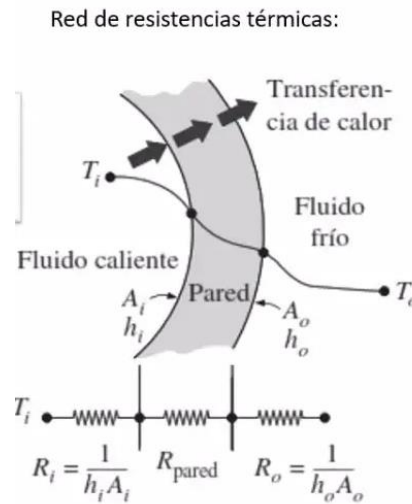


Figura 8. Red de resistencias térmicas del acrílico [20].

La resistencia térmica total (R) en un sistema con paredes compuestas, y se refiere a la transferencia de calor en un cilindro o tubería, donde se consideran las resistencias internas y externas debido a la convección, así como la resistencia térmica de la pared cilíndrica.

En la ecuación (7), se presenta matemáticamente la resistencia térmica total para la transferencia de calor a través de una pared cilíndrica o tubería.

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i * A_i} + \frac{\ln(\frac{D_o}{D_i})}{2\pi * k * L} + \frac{1}{h_o * A_o} \quad (7)$$

Donde:

- R : Resistencia térmica total $[\frac{^{\circ}K}{W}]$.
- R_i : Resistencia térmica interna por convección $[\frac{^{\circ}K}{W}]$.
- R_{pared} : Resistencia térmica de la pared por conducción $[\frac{^{\circ}K}{W}]$.
- R_o : Resistencia térmica externa por convección $[\frac{^{\circ}K}{W}]$.
- h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie interna $[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}K}]$.
- A_i : Área de la superficie interna del cilindro $[m^2]$.
- h_o : Coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie externa $[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}K}]$.
- A_o : Área de la superficie externa del cilindro $[m^2]$.

- D_o : Diámetro externo del cilindro $[m]$.
- D_i : Diámetro interno del cilindro $[m]$.
- k : Conductividad térmica del material de la pared del cilindro $[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}]$.
- L : Longitud del cilindro o tubería $[m]$.
- $\ln(\frac{D_o}{D_i})$: Logaritmo natural de la relación entre el diámetro externo e interno del cilindro.

1.3.7. Métodos de calefacción en la máquina dobladora de acrílico

Las resistencias eléctricas de Nicromo y Niquelina son materiales que generan calor eficiente al conducir electricidad debido a su alta resistencia. El Nicromo, una aleación de níquel y cromo, es resistente a la oxidación y tiene una larga vida útil en aplicaciones de calentamiento continuo. La Niquelina, por su parte, ofrece una resistencia térmica aún mayor, siendo adecuada para procesos de alta demanda de calor [12].

- **El alambre y la cinta de nicromo:** Están formados, en su mayoría, por una combinación de 80% de Níquel y 20% de Cromo. Algunos otros alambres utilizados para aplicaciones similares contienen una pequeña cantidad de hierro, pero esta composición es menos eficiente que la del nicromo, ya que el hierro hace que el material sea más vulnerable a la oxidación. La presencia de Hierro reduce la durabilidad del alambre o cinta, por lo que no se recomienda su uso en grandes hornos industriales, donde su vida útil podría disminuir hasta en un 70% [21].

En la Figura 9, se presenta un método de calefacción para el doblado de acrílico por aleación de níquel y cromo tipo alambre.



Figura 9. Alambre de nicromo [21].

- **Niquelina tipo cartucho:** El níquel y el cromo permiten que el alambre nicromo tolere altas temperaturas sin degradarse rápidamente, lo que lo hace ideal para aplicaciones industriales de calefacción. Aunque otros materiales pueden ofrecer una mayor resistencia a la tracción o ser más económicos, el nicromo es preferido por su capacidad de mantener su integridad estructural a temperaturas extremas, su resistencia a la corrosión y su durabilidad en entornos de trabajo intensivo [22].

En la Figura 10, se muestra otro tipo de resistencia posible para el funcionamiento del doblado de acrílico en transferencia de calor por convección.



Figura 10. Resistencia de niquelina tipo cartucho [23].

1.3.8. Tipos de enfriamiento para la resistencia eléctrica

El sistema de enfriamiento es fundamental para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro de la máquina dobladora de acrílico, ya que el proceso de calentamiento genera altas temperaturas [24]. Los tipos de enfriamiento que podrían implementarse son los siguientes:

- **Ventilación forzada:** Uso de ventiladores para mover aire sobre la resistencia y disipar el calor de manera rápida y efectiva.
- **Disipadores de calor:** Elementos metálicos con aletas que aumentan la superficie de contacto con el aire, facilitando la dispersión térmica.
- **Enfriamiento por convección natural:** Aprovechamiento del flujo de aire natural sin necesidad de elementos mecánicos, ideal para sistemas con menor carga térmica.
- **Enfriamiento líquido:** Uso de radiadores o tubos con líquido refrigerante que absorben el calor generado, aunque requiere un diseño más complejo.

1.4. Automatización de procesos

La automatización ha transformado la industria moderna al permitir que los procesos sean más eficientes, precisos y rápidos, eliminando la necesidad de intervención humana en muchas etapas clave, los sistemas automatizados permiten que máquinas y dispositivos funcionen bajo control programado, reduciendo costos y mejorando la productividad, al mismo tiempo, existen diferentes niveles de automatización, que van desde sistemas completamente automáticos hasta aquellos que requieren cierta interacción humana para su operación [25].

1.4.1. *Diferencia entre Automatización completa y Semi automatización*

En el ámbito de los procesos industriales, se han desarrollado diferentes enfoques tecnológicos que permiten mejorar la eficiencia operativa, dependiendo del grado de intervención humana que se requiera [25]. Existen dos enfoques principales que se utilizan según las necesidades del proceso, los cuales permiten manejar las tareas de manera óptima y ajustar el nivel de control humano involucrado. A continuación, se describirán estos dos enfoques, de una forma general.

- **Automatización Completa:** Se trata de sistemas diseñados para trabajar de forma completamente autónoma, en que las máquinas realizan todas las tareas sin necesidad de intervención humana, este tipo de automatización es perfecta para procesos repetitivos y de gran escala, como las líneas de producción en fábricas, ya que no solo reduce errores, sino que también mejora la eficiencia en el trabajo, tal como se explica en [25].
- **La semi automatización:** Consiste en combinar el uso de máquinas con la supervisión o intervención manual en ciertas etapas, lo cual resulta especialmente útil cuando se requiere flexibilidad debido a que los procesos o la variabilidad del trabajo no pueden ser completamente automatizados, esta característica permite que el sistema se adapte de manera más eficiente a los cambios operativos sin perder el control [25].

1.5. Control PID

Para lograr un control eficaz de la planta, es esencial analizar la función de transferencia del sistema, lo que permite modelar matemáticamente su comportamiento y predecir su respuesta a estímulos, la temperatura, como variable clave para el funcionamiento del equipo, debe ser monitoreada y controlada con precisión, ajustando la función de transferencia para garantizar estabilidad y precisión [26].

La Figura 11, utilizada como ejemplo, muestra el proceso de control de la temperatura a través de un diagrama de bloques.

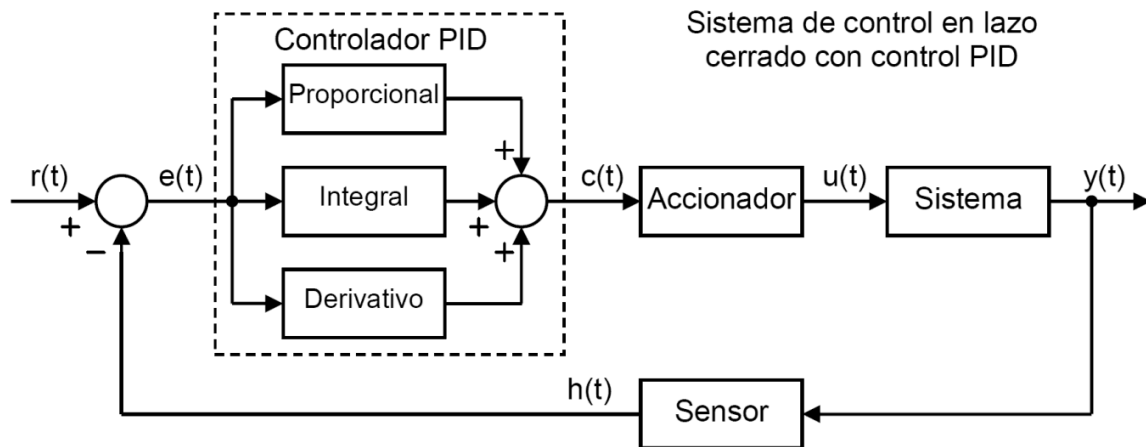


Figura 11. Control PID clásico para el control de temperatura [27].

Una vez determinada la dinámica de la planta, se puede aplicar un controlador PID que actúe como retroalimentación para optimizar tanto la respuesta en el régimen transitorio como en el estacionario.

El funcionamiento de este controlador PID se basa en un modelo matemático que regula las variables del sistema, como se describe en la ecuación (8).

$$PID = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

Donde:

- K_p : Coeficiente de ganancia proporcional.
- T_i : Tiempo asociado a la acción integral en segundos.
- T_d : Tiempo relacionado con la acción derivativa en segundos.

1.5.1. Control PID general enfocado al control de temperatura

El control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) desglosado en sus tres componentes para el control de temperatura es el siguiente:

- **Componente Proporcional (P):** este es el principal contribuyente del control, se basa en la diferencia entre el valor actual de la temperatura y el valor deseado, conocido como "error", el control proporcional ajusta la salida, como la potencia del calentador, en proporción a este error, si la diferencia entre la temperatura actual y la deseada es grande, la acción correctiva será considerable, mientras que si es pequeña, la corrección

también será menor, sin embargo, el control proporcional puede dejar un pequeño error residual, llamado "error en estado estacionario", ya que no actúa hasta que existe una diferencia detectable [28].

- **Componente Integral (I):** Este componente corrige el error acumulado a lo largo del tiempo, cuando la temperatura no llega al valor deseado dentro de un periodo específico, el término integral suma dicho error acumulado y lo emplea para ajustar la salida, eliminando cualquier error permanente o residual que pueda quedar en el dispositivo de control proporcional, su principal ventaja es garantizar que la temperatura alcance con precisión el valor deseado, aunque, si no se ajusta correctamente, puede generar fluctuaciones [28].
- **Componente Derivativo (D):** Este componente se obtiene analizando la tasa de cambio de la temperatura, si esta varía rápidamente, los componentes derivados neutralizan dichos cambios para evitar que el sistema exceda el valor esperado, actúa como un "freno" que suaviza la respuesta, previene fluctuaciones repentinas y garantiza la estabilidad, aunque un uso excesivo puede hacer que el sistema reaccione de forma exagerada a pequeñas variaciones o cambios rápidos [28].

1.6. Norma ISO 13849: Seguridad de las máquinas – Partes del sistema de control relacionadas con la seguridad

La norma ISO 13849 se enfoca en los sistemas de control de máquinas y establece requisitos para garantizar la seguridad, especialmente en relación con los riesgos que estas puedan presentar, en el caso de una máquina dobladora de tubos acrílicos, el proceso comienza con una evaluación de riesgos que identifica posibles peligros, como el riesgo de quemaduras por fallos en el sistema de calefacción o por piezas móviles, además, evalúa las consecuencias de estos riesgos y la probabilidad de que ocurran, permitiendo tomar decisiones informadas sobre las medidas de seguridad que deben implementarse [29].

A continuación, se presenta una lista con los aspectos más relevantes de la norma ISO 13849:

- **Evaluación del riesgo:** Determinar los riesgos vinculados a la máquina y analizar tanto las consecuencias como la probabilidad de ocurrencia de dichos riesgos.
- **Niveles de rendimiento (PL):** Establecer el nivel de desempeño necesario del sistema de control para mitigar los riesgos, considerando el rango desde PLa hasta PLe.

- **Estructura del sistema de control:** Garantizar la redundancia y la capacidad de autoverificación en los componentes clave de seguridad, incluyendo los botones de parada de emergencia y los sensores.
- **Validación:** Comprobar que el sistema de control satisface los criterios de seguridad establecidos y que los riesgos han sido disminuidos a niveles tolerables.

1.7. Norma IEC 60204-1: Seguridad de las máquinas – Equipos eléctricos de las máquinas

La norma IEC 60204-1 define los requisitos esenciales para garantizar un diseño e instalación seguros de los componentes eléctricos en máquinas, entre sus puntos principales se destacan aquellos que aseguran la protección y el correcto funcionamiento del sistema eléctrico [30].

- **Diseño eléctrico:** Garantizar que el sistema eléctrico cumpla con las normas de seguridad necesarias para evitar riesgos como cortocircuitos y descargas eléctricas.
- **Paro de emergencia:** Instalar un botón de parada de emergencia accesible que desconecte completamente la energía de la máquina.
- **Conexión a tierra:** Garantizar que todas las partes metálicas expuestas estén correctamente conectadas a tierra para evitar electrocución.
- **Protección contra sobre corrientes:** Usar fusibles o disyuntores para proteger los circuitos contra sobrecargas.
- **Sistemas de aislamiento:** Instalar interruptores para desconectar la máquina completamente durante el mantenimiento o reparación.
- **Identificación y marcados:** Etiquetar claramente los componentes eléctricos para facilitar el mantenimiento y evitar errores operativos.

1.8. Componentes de seguridad y soporte en sistemas de máquinas térmicas

Para el correcto funcionamiento de la máquina de doblado, es necesario contar con componentes que garanticen tanto la seguridad del usuario como la integridad de las partes mecánicas del proyecto. A continuación, se detallan los componentes necesarios para asegurar el buen desempeño y seguridad de la máquina.

1.8.1. Aislamientos térmicos

Las superficies cercanas al área de calentamiento deben estar recubiertas con materiales aislantes térmicos, como lana de vidrio o mantas de fibra cerámica, para prevenir el contacto accidental con zonas calientes. Este componente reduce el riesgo de quemaduras al operador o

cualquier otra persona que esté cerca de la máquina, ayudando a retener el calor dentro del área de trabajo, lo que mejora la eficiencia energética del sistema [31].

1.8.2. Fusibles

Son dispositivos de seguridad que protegen los circuitos eléctricos ante corrientes excesivas, su funcionamiento se basa en un elemento interno que se funde cuando la corriente supera los niveles seguros, lo que interrumpe el flujo eléctrico para evitar daños mayores, una vez que han cumplido su función de protección, es necesario reemplazarlos, ya que no pueden reutilizarse después de una falla, su uso es esencial para evitar riesgos como sobrecalentamientos o incendios [32].

1.8.3. Luces piloto

Son componentes visuales que permiten al operador monitorear el estado de la máquina de manera rápida y efectiva, estos dispositivos emiten luz cuando el circuito eléctrico está activado, permitiendo identificar condiciones específicas como el encendido, el funcionamiento de los elementos calefactores o posibles fallos, su inclusión mejora la seguridad operativa al proporcionar una señal clara sobre el estado de distintos sistemas, lo que facilita una intervención oportuna en caso de ser necesario, además, son altamente eficientes en términos de consumo energético y poseen una larga vida útil [33].

1.8.4. Señaléticas

Son elementos visuales que se adhieren a la máquina para advertir sobre posibles riesgos y proporcionar instrucciones claras al operador, estas señales suelen utilizar colores llamativos y símbolos universales para indicar zonas de peligro, advertencias de altas temperaturas, instrucciones de uso o recomendaciones de seguridad, su objetivo es mejorar la seguridad y reducir la probabilidad de accidentes al informar de manera directa y permanente sobre los riesgos asociados con el equipo, además, al ser fácilmente visibles y duraderas, ayudan a garantizar que los procedimientos de seguridad sean seguidos correctamente [34].

1.9. Componentes electrónicos

Se detallan los componentes fundamentales para la semiautomatización de la máquina, como el microcontrolador, que facilita el control y monitoreo remoto, el panel de control, que permite al operador ajustar y supervisar parámetros clave, los sensores, que aseguran el control preciso de variables críticas, los dispositivos de medición de posición, que permiten un control exacto

1.9.2. Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura, como los termopares o los RTD, son herramientas esenciales para monitorear y controlar de manera precisa la temperatura en sistemas de calefacción, además estos dispositivos ofrecen retroalimentación instantánea que permite ajustar el suministro de corriente hacia la resistencia eléctrica, asegurando que la temperatura requerida se mantenga estable y evitando posibles sobrecalentamientos [36].

A continuación, se detalla una lista de los tipos de sensores de temperatura que podrían emplearse en una máquina dobladora de acrílico:

- **Termopares:** Son sensores prácticos y resistentes, capaces de medir un amplio rango de temperaturas, lo que los convierte en una opción eficiente para regular el calor en la resistencia utilizada durante el proceso de doblado del acrílico.
- **RTD - Resistencia de Temperatura Dependiente:** Brindan una precisión superior en comparación con los termopares, lo que los hace ideales cuando se necesita un control extremadamente exacto de la temperatura del sistema, aunque presentan la limitación de operar dentro de un rango de temperatura más reducido.
- **Termistores:** Son sensores de temperatura compactos y de rápida respuesta, ideales para monitorear cambios rápidos de temperatura en las proximidades de la zona de doblado, aunque su nivel de precisión puede variar dependiendo del rango de temperaturas en el que se utilicen.
- **Sensores infrarrojos IR:** Permiten medir la temperatura sin contacto, lo cual resulta práctico para evitar el contacto directo con las piezas, son ideales para monitorear la temperatura superficial del acrílico mientras se calienta [36].

1.9.3. Motor a paso NEMA 17

El motor NEMA 23 es un motor paso a paso robusto y potente, ampliamente utilizado en aplicaciones de automatización que demandan un alto torque y precisión, este motor divide el movimiento en pasos discretos, lo que permite un control detallado de la posición y la velocidad, además se integra de manera sencilla con controladores como el driver TB6600, que regula el suministro de corriente y asegura un control preciso del movimiento del motor [37].

Gracias a su diseño robusto, el motor NEMA 23 es adecuado para aplicaciones que requieren mover cargas más pesadas sin comprometer su rendimiento, su alto par de retención asegura que mantenga una posición estable incluso cuando está energizado, evitando deslizamientos y

garantizando un posicionamiento preciso, así mismo para adaptarse a configuraciones que exigen mayor potencia o control especializado, el motor se puede combinar con reductores de velocidad, que aumentan su fuerza de salida, y acoplamientos, que optimizan la transmisión del movimiento hacia otros componentes, haciendo que estas características permitan su uso en una amplia gama de sistemas de automatización y maquinaria industrial, donde la precisión y la fuerza son esenciales [37].

En la Figura 13, se presenta el modelo del motor a paso Nema 23.



Figura 13. Modelo motor a paso NEMA 23 [37].

1.9.4. Driver para motor a paso

El controlador del motor paso a paso, como el TB6600, tiene la función de gestionar y accionar motores paso a paso, como el NEMA 17, interpreta las señales de control enviadas por el microcontrolador y ajusta la potencia de acuerdo con los requerimientos, asegurando movimientos precisos del motor, este control es esencial para sistemas que necesitan un movimiento fino y repetible [38].

En la Figura 14, se muestra el controlador para el motor a paso modelo TB6600.



Figura 14. Controlador TB6600 [38].

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

En este capítulo se analiza las distintas alternativas de componentes necesarios para la edificación de la máquina dobladora semiautomática de acrílico, enfocándose en asegurar que cada componente escogido satisfaga los requerimientos técnicos requeridos para mejorar tanto el desempeño como la eficacia del sistema.

2.1. Selección de alternativas para máquina en el doblado industrial

Seleccionar la dobladora correcta es esencial para garantizar que el proceso de manejo de láminas de acrílico sea eficiente. Esta elección facilita la producción del calor requerido y el control uniforme del ángulo, poniendo énfasis en la calidad y la uniformidad de las piezas. Asimismo, impacta directamente en la efectividad, el manejo de la temperatura y la flexibilidad del equipo.

2.1.1. *Máquina de doblado lineal con resistencia eléctrica*

La máquina de doblado lineal utiliza una resistencia que concentra el calor de manera directa sobre el área de la lámina de acrílico destinada al doblado, permitiendo un control preciso de la temperatura y un proceso eficiente, este tipo de máquina es especialmente adecuada para doblados rectos, aunque presenta limitaciones en cuanto a su versatilidad para formas más complejas, con un costo moderado, se destaca por su precisión y elevada eficiencia en aplicaciones que requieren doblados en líneas simples [39].

En la Figura 15, se presenta una alternativa de máquina industrial para el doblado lineal térmico de la empresa Xlam.

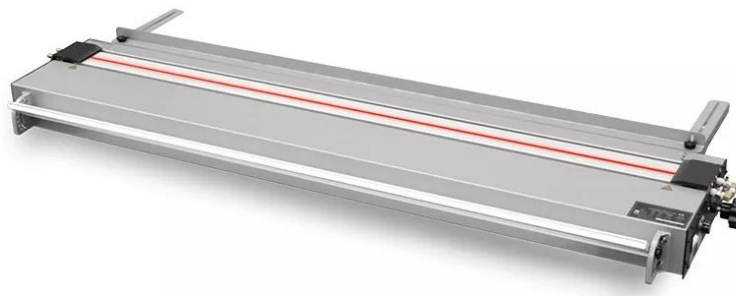


Figura 15. Máquina industrial dobladora lineal de metacrilato [39].

2.1.2. Máquina de doblado con aire caliente

Este tipo de dispositivo utiliza un sistema que expulsa aire caliente, dirigiendo el calor hacia la sección del acrílico que se va a doblar. Esto permite que el material se curve de forma efectiva. Gracias a la regulación del aire, se pueden realizar doblados más intrincados o con formas onduladas, lo que lo hace una opción especialmente adecuada para proyectos que requieren mayor adaptabilidad en el diseño. No obstante, en comparación con el método que emplea resistencias lineales, la supervisión de la temperatura podría no ser tan exacta. Esto podría provocar discrepancias en la consistencia del calor aplicado, afectando así la calidad del doblado final, tal como se indica en [40].

En la Figura 16, se muestra una alternativa de máquina dobladora por conducto de aire caliente de la empresa BLKMA.



Figura 16. Dobladora manual por conducto de aire [40].

2.1.3. Prensa térmica para doblado

Este método utiliza una máquina que combina calor y presión de manera simultánea en el acrílico, asegurando un doblado consistente en toda su área. Esta técnica es particularmente idónea para situaciones en las que es vital conservar un doblado exacto y uniforme a lo largo del material, puesto que la regulación adecuada de temperatura y presión posibilita doblar el acrílico sin provocar alteraciones o defectos, logrando un resultado de excelente calidad y mejorando la eficacia en la creación de componentes [41].

En la Figura 17, se presenta una alternativa de prensa térmica para el doblado de dimensiones 40 x 50 mm de la empresa CPL.



Figura 17. Prensa de calor manual [41].

2.1.4. Calificación de las alternativas para máquina en el doblado industrial

En la Tabla 4, se presenta la calificación de alternativas para las máquinas en el doblado industrial, en la cual se evalúan aspectos como el costo, la eficiencia de doblado, el control de temperatura, la precisión y la versatilidad en las formas, los resultados de esta tabla permiten identificar y ponderar las ventajas y limitaciones de cada opción, mostrando el índice porcentual y el orden de selección de cada alternativa.

Tabla 4. Calificación de alternativas para maquinas en el doblado industrial.

Parámetros	Máquina de doblado lineal	Máquina de doblado con aire caliente	Prensa térmica
Costo	7	6	5
Eficiencia de doblado	9	6	8
Control de temperatura	9	5	7
Precisión de doblado	8	6	9
Versatilidad en formas	6	8	7
Sumatoria	39	31	36
Índice porcentual	0.78	0.62	0.72
Orden de selección	78%	62%	72%

La máquina de doblado lineal con aire caliente, con un índice del 78%, es la mejor opción ya que sobresale en eficiencia de doblado y control de temperatura, aspectos clave para un proceso preciso, aunque su costo es mayor, su rendimiento general y versatilidad justifican la inversión, posicionándola como la alternativa más adecuada para un doblado eficiente y controlado. En cada tabla, las alternativas se califican en una escala de 0 a 10, donde 0 representa el valor mínimo y 10 el valor máximo de puntuación para cada parámetro evaluado.

2.2. Selección de alternativas para resistencia de calentamiento

La implementación de elementos calefactores resulta esencial para garantizar un control preciso de la temperatura durante el proceso de curvado de planchas de acrílico, seleccionar correctamente el tipo de elemento calefactor no solo optimiza la eficiencia del proceso, sino que también asegura la estabilidad térmica necesaria para el sistema, a continuación, se presentan las opciones analizadas.

2.2.1. Resistencia de nicromo

El nicromo, una aleación de níquel y cromo, sobresale por su resistencia a la oxidación y su capacidad de mantener estabilidad térmica incluso a temperaturas elevadas, lo que lo convierte en una opción favorable para aplicaciones prolongadas, ya que soporta altas temperaturas sin deteriorarse con rapidez, sin embargo, su principal desventaja radica en que su respuesta térmica es más lenta en comparación con otros materiales, lo cual puede afectar su desempeño en situaciones que requieren calentamientos rápidos, tal como se menciona en [42].

En la Figura 18, se presenta una alternativa de resistencia por alambre de nicromo que se lo encuentra comercialmente en rollos.



Figura 18. Alambre de nicromo por rollo [42].

2.2.2. Resistencia de niquelina (Cartucho)

Las resistencias tipo cartucho de niquelina destacan por su alta densidad de potencia, lo que facilita alcanzar temperaturas de forma rápida y con un control preciso, su diseño compacto asegura una distribución uniforme del calor en áreas específicas, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren una respuesta térmica veloz, aunque su costo es mayor en comparación con el nicromo, su eficiencia y estabilidad justifican esta diferencia en escenarios industriales donde se necesita un rendimiento confiable, como se menciona en [43].

En la Figura 19, se presenta una alternativa de resistencia por niquelina tipo cartucho, con alimentación AC.



Figura 19. Niquelina tipo cartucho [43].

2.2.3. Resistencia cerámica

Las resistencias cerámicas se caracterizan por su alta durabilidad y su capacidad para mantener un control eficiente de la temperatura, lo que las convierte en una opción adecuada para aplicaciones que requieren una disipación constante y uniforme del calor aplicado al material, además, su diseño aislante minimiza los riesgos de contacto eléctrico, lo cual es útil en entornos industriales donde la seguridad es una prioridad, sin embargo, su costo es más elevado y en comparación con las resistencias de niquelina, su tiempo de respuesta puede ser más lento [44].

En la Figura 20, se presenta una alternativa de resistencia por cerámica con alimentación AC.



Figura 20. Cerámica termo eléctrico [44].

2.2.4. Calificación de las alternativas para resistencia de calentamiento

En la Tabla 5, se muestra la evaluación comparativa de distintas resistencias, entre ellas las de nicromo, cerámica y niquelina, considerando factores clave como el costo, la eficiencia térmica, la durabilidad, el control de temperatura y el nivel de seguridad.

Tabla 5. Calificación de alternativas para resistencia de calentamiento.

Parámetros	Resistencia de Nicromo	Resistencia de Niquelina	Resistencia Cerámica
Costo	6	8	7
Eficiencia de calentamiento	7	9	6
Durabilidad	8	7	9
Control de temperatura	6	9	7
Seguridad	7	8	8
Sumatoria	41	41	37
Índice porcentual	0.68	0.82	0.74
Orden de selección	68%	82%	74%

La resistencia de niquelina tipo cartucho se seleccionó debido a su capacidad para calentarse con rapidez, su eficiencia y su excelente control térmico, características esenciales para aplicaciones industriales que requieren un alto nivel de precisión, aunque su costo es relativamente alto, su rápida respuesta y estabilidad la posicionan como la opción más adecuada para el desarrollo de este proyecto.

2.3. Selección de alternativas para transmisión de movimiento

En un sistema de doblado, resulta esencial disponer de un mecanismo que permita transferir el movimiento del motor hacia la pieza de trabajo con precisión, estabilidad y un funcionamiento fluido, la elección del sistema de transmisión juega un papel crucial, ya que impacta directamente en la exactitud del movimiento y en la durabilidad del equipo.

2.3.1. Piñones y engranajes

Los sistemas de piñones y engranajes se caracterizan por su alta eficiencia en la transmisión de potencia y su capacidad para proporcionar un movimiento sumamente preciso, lo que los hace especialmente adecuados para aplicaciones que requieren un control angular exacto, además, su diseño robusto les permite manejar cargas significativas, sin embargo, presentan un costo elevado y su mantenimiento es más complejo en comparación con otros sistemas de transmisión, como se menciona en [45].

En la Figura 21, se presenta una alternativa de transmisión de movimiento por piñones que ofrecen potencia y precisión al paso.



Figura 21. Transmisión de piñones [45].

2.3.2. Eslingas y poleas

Las eslingas y poleas representan una opción más económica y fácil de instalar, aunque su precisión en el movimiento es menor en comparación con los engranajes debido a la elasticidad inherente de las correas, este tipo de mecanismo resulta adecuado para aplicaciones donde la precisión extrema no es un requisito esencial y la reducción de costos tiene gran importancia, sin embargo, su capacidad de carga es considerablemente limitada, como se menciona en [46].

En la Figura 22, se presenta una alternativa de transmisión de movimiento por poleas por su elasticidad.



Figura 22. Movimiento por poleas y bandas [46].

2.3.3. Cadena y rueda dentada

El mecanismo de cadena y rueda dentada ofrece un equilibrio apropiado entre costo, capacidad para soportar cargas y durabilidad, siendo reconocido por su alta eficiencia en la transmisión de potencia y su mantenimiento sencillo. Aunque no iguala la precisión que proporcionan los engranajes, representa una alternativa adecuada en aplicaciones donde la resistencia a la carga es prioritaria y se busca optimizar los costos asociados al mantenimiento [47].

En la Figura 23, se presenta una alternativa de transmisión de movimiento por cadena y rueda dentada.



Figura 23. Movimiento por cadena y rueda dentada [47].

2.3.4. Calificación de las alternativas para transmisión de movimiento

La Tabla 6 presenta los resultados del análisis de los tres sistemas principales de transmisión: cadena y rueda dentada, piñones y engranajes, y eslingas y poleas, evaluando parámetros clave como costo, precisión, capacidad de carga, mantenimiento y durabilidad.

Tabla 6. Calificación de alternativas para transmisión de movimiento.

Parámetros	Piñones y engranajes	Eslingas y poleas	Cadena y rueda dentada
Costo	6	8	5
Precisión	8	6	9
Capacidad de carga	8	5	9
Mantenimiento	7	8	6
Durabilidad	9	6	8
Sumatoria	38	33	37
Índice porcentual	0.76	0.66	0.74
Orden de selección	76%	66%	74%

Se prioriza la elección de los piñones y engranajes debido a su balance entre costo, durabilidad y capacidad de carga, aunque la cadena y la rueda dentada presentan un mantenimiento más simple y un menor costo, los piñones y engranajes satisfacen los requisitos del proceso de doblado, logrando la puntuación más alta (76%) en la evaluación comparativa gracias a su mayor eficiencia en dicho proceso, las alternativas son calificadas en una escala de 0 a 10, considerando que 0 corresponde al valor mínimo y 10 al máximo para cada parámetro evaluado.

2.4. Selección de alternativas para microcontrolador

El microcontrolador actúa como el cerebro del sistema de control, gestionando tanto sensores como actuadores, su elección determina la capacidad de procesamiento y la adaptabilidad del sistema, permitiendo además la posibilidad de incorporar mejoras o expansiones en el futuro.

2.4.1. ESP32

El ESP32 es un microcontrolador ampliamente reconocido por su conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita la monitorización y el control remoto, su capacidad de procesamiento y versatilidad representan ventajas significativas, especialmente en aplicaciones industriales que demandan monitoreo y control en tiempo real, aunque su costo es superior al de otros microcontroladores, su conectividad inalámbrica y rendimiento lo justifican [48].

En la Figura 24, se presenta una alternativa de microcontrolador mediante una ESP32 CH340 de 30 pines.

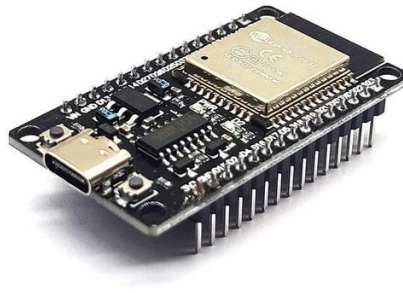


Figura 24. Microcontrolador ESP32 CH340 [48].

2.4.2. *STM32*

El STM32 es conocido por su eficiencia en aplicaciones de tiempo real y su bajo consumo energético, su fiabilidad y costo moderado lo hacen una opción atractiva para proyectos que no requieren conectividad inalámbrica, aunque ofrece un alto poder de procesamiento, carece de las funciones de conectividad del ESP32, lo que limita su aplicación en proyectos donde el acceso remoto es esencial [49].

En la Figura 25, se presenta una alternativa de microcontrolador mediante un ARM STM32F10C8T6.

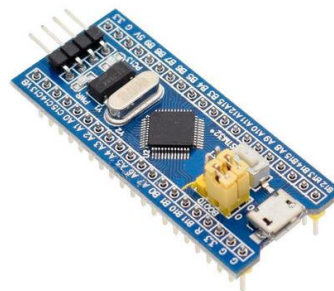


Figura 25. Microcontrolador Blue Pill STM32 ARM [49].

2.4.3. *Arduino Mega*

El Arduino Mega es una opción económica y de fácil programación, comúnmente empleada en proyectos de bajo costo y menor complejidad, sin embargo, presenta limitaciones en su capacidad de procesamiento y conectividad, lo que lo hace menos adecuado para entornos industriales que requieren un control preciso y conexiones avanzadas [50].

En la Figura 26, se presenta una alternativa de microcontrolador mediante un Arduino Mega 2560 R3 CH340, por su amplia conexión.



Figura 26. Arduino Mega 2560 R3 [50].

2.4.4. Calificación de las alternativas para microcontrolador

En la Tabla 7, se muestran los resultados de la comparación entre tres microcontroladores: ESP32, STM32 y Arduino Mega, evaluados según criterios como costo, conectividad, capacidad de procesamiento, facilidad de programación y eficiencia energética.

Tabla 7. Calificación de alternativas para el microcontrolador.

Parámetros	ESP32	STM32	ARDUINO MEGA
Costo	4	6	7
Conectividad	9	5	3
Capacidad de procesamiento	8	7	5
Facilidad de programación	7	6	6
Eficiencia energética	8	7	4
Sumatoria	36	31	25
Índice porcentual	0.72	0.62	0.5
Orden de selección	72%	62%	50%

El ESP32 ha sido elegido el microcontrolador más adecuado gracias a su alto rendimiento en procesamiento y sus opciones de conectividad inalámbrica, lo que permite un monitoreo eficiente y una gestión flexible del sistema usar. Su capacidad de comunicación remota favorece tanto la administración del sistema como su posible ampliación en el futuro. En cada tabla, las distintas alternativas se evalúan en una escala del 0 al 10, donde 0 indica el valor más bajo y 10 representa la máxima puntuación para cada criterio analizado.

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se detalla el proceso del diseño y construcción de la máquina dobladora de acrílico, incluyendo los materiales del ensamblaje y el análisis de esfuerzos en SolidWorks. También se describe el comportamiento térmico de la resistencia de niquelina tipo cartucho y el diseño del sistema de control PID de temperatura para la resistencia de niquelina tipo cartucho, además se presenta el esquema y cálculo eléctrico del sistema junto con su programación y manera de operar la máquina.

3.1. Diseño completo en software CAD

Se muestra una vista isométrica y una vista explosionada de la máquina, donde se detalla la disposición de sus componentes, facilitando el análisis y mantenimiento, permitiendo comprender la interconexión y funcionamiento del diseño.

En la Figura 27, se presenta la vista ensamblada de la máquina semiautomática para el doblado de lámina de acrílico.

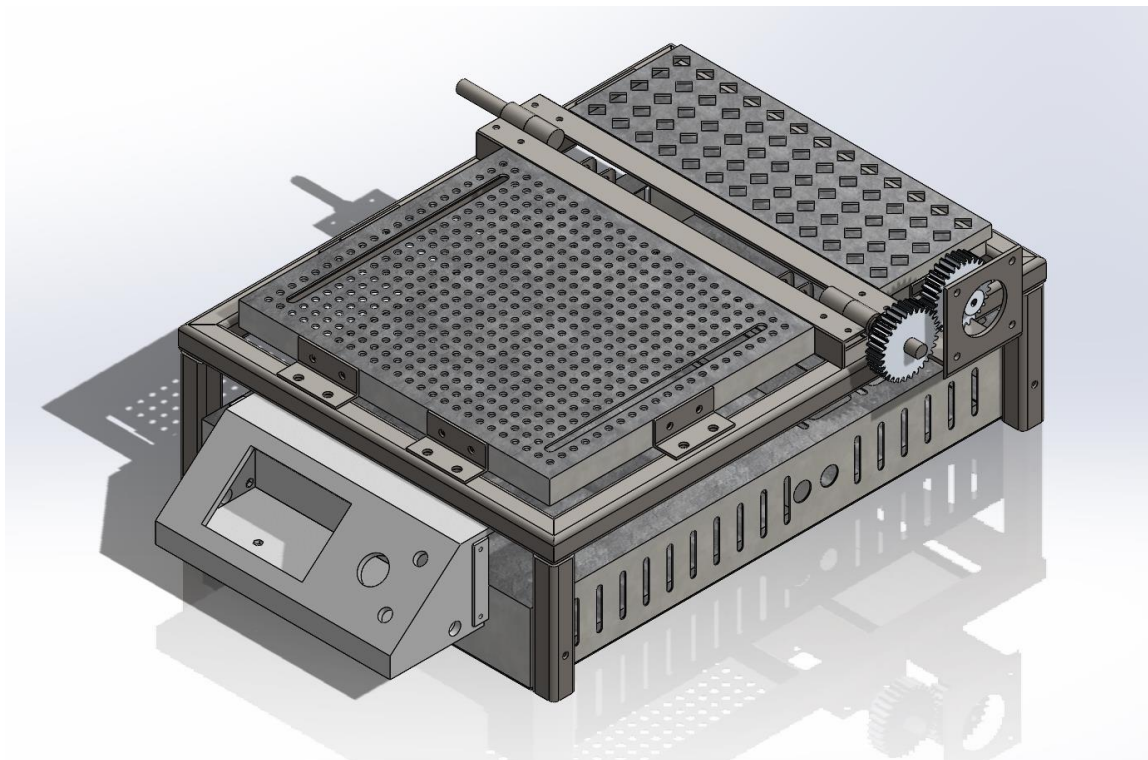


Figura 27. Vista isométrica del ensamblaje de la maquina dobladora de acrílico.

En la Figura 28, se presenta la vista explosionada de todos los componentes que conforman la máquina completa mostrada en la anterior figura.

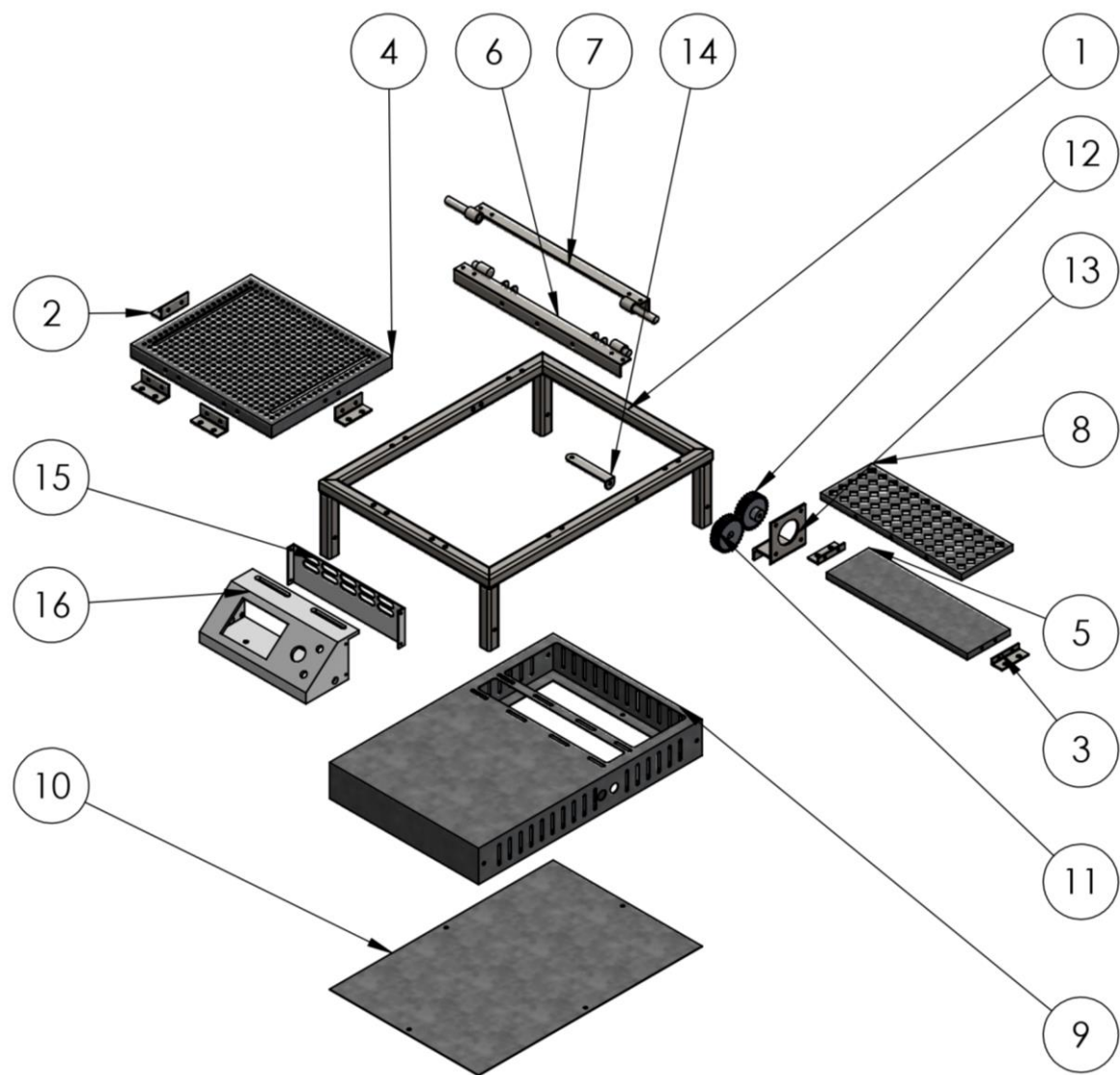


Figura 28. Vista explosionada del ensamble de la máquina dobladora de acrílico.

La vista explosionada del diseño tiene como objetivo facilitar al lector la comprensión de los componentes que conforman la máquina dobladora de acrílico, destacando la disposición y el ensamblaje de cada pieza, lo que permite visualizar cómo interactúan entre sí dentro de la estructura general, esta representación gráfica ofrece claridad sobre la organización del sistema, ayudando a identificar con precisión elementos clave como soportes, bandejas, ejes y componentes de apoyo eléctrico, lo cual resulta especialmente útil para entender el diseño funcional y estructural sin necesidad de manipular físicamente el modelo.

La Tabla 8, presenta una especificación de cada elemento usado en el ensamble con su número de elemento, nombre, material, cantidad y descripción.

Tabla 8. Elementos utilizados en la construcción de la máquina.

N° de elemento	Nombre	Material	Cantidad	Descripción
1	Mesa	ASTM A36	1	Soporte principal, para proporcionar estabilidad.
2	Ángulo Bandeja Base	ASTM A36	4	Soporte para fijar la Bandeja Base.
3	Ángulo Bandeja de Apoyo	ASTM A36	2	Refuerza y sostiene la Bandeja Rotatoria.
4	Bandeja Base	Tol Galvanizado	1	Superficie de trabajo.
5	Bandeja de Apoyo	Tol Galvanizado	1	Soporte secundario.
6	Ángulo Estático	ASTM A36	1	Punto de conexión fija.
7	Ángulo Rotatorio	ASTM A36	1	Permite movimiento rotatorio.
8	Bandeja Rotatoria	Tol Galvanizado	1	Superficie giratoria.
9	Tablero	Tol Galvanizado	1	Base de montaje para componentes eléctricos.
10	Tapa del Tablero	Tol Galvanizado	1	Protege el tablero.
11	Piñón de Ángulo Rotatorio	Aluminio	1	Piñón que se inserta en el eje del Ángulo Rotatorio.
12	Piñón del Motor	Aluminio	1	Piñón que se inserta en el eje del motor Nema 23.
13	Soporte del Motor	ASTM A36	1	Soporte del Motor Nema 23 junto con su piñón.
14	Soporte de Termocupla	Aluminio	1	Soporte de la termocupla tipo K atornillada.
15	Tapa del Panel	PLA	1	Ocultamiento electrónico.
16	Panel	PLA	1	Soporte para electrónica.

3.2. Análisis de cargas

El análisis de cargas es esencial para asegurar la estabilidad estructural de la máquina dobladora, para ello, se calcula la masa total de la estructura utilizando una relación directa basada en la longitud total de los tubos empleados, considerando el peso unitario según el catálogo del material, que es de 1.15 Kg/m, aplicando esta fórmula, se obtiene una masa de 4.6 Kg para 4 metros de tubo utilizados, además, se incluyen las dimensiones principales de la mesa diseñada, fundamentales para calcular los esfuerzos y garantizar la resistencia de la estructura frente a las cargas que se aplicarán durante su funcionamiento.

3.2.1. Cálculo de masa

La masa de la estructura se determinará mediante una regla de tres para la cantidad de metros utilizados, en donde según el catálogo el peso del tubo es de 1.15 Kg/m de tubo.

Se utiliza la fórmula general para determinar la masa total de un conjunto estructural expresada en la ecuación (9):

$$masa = m_{utilizados} * P_{tablas} \quad (9)$$

$$\therefore masa = 4 * 1.15$$

$$masa = 4.6 [Kg]$$

Donde:

- $m_{utilizados}$: Longitud o cantidad de piezas del material [Kg].
- P_{tablas} : Peso por unidad de longitud del material proporcionado en el Datasheet $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Con la anterior ecuación, se calcula el peso propio de la estructura con los datos otorgados por el proveedor, mostrados en la Figura 29, que presenta un Datasheet del tubo cuadrado por la empresa DIPAC, detallando sus dimensiones, peso, por metro y propiedades mecánicas como área transversal, momento de inercia y módulo resistente.

Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	I cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72

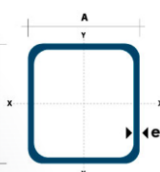


Figura 29. Datasheet tubo estructural cuadrado [54].

Estos datos son fundamentales para el diseño y análisis estructural, permitiendo calcular esfuerzos y garantizar la estabilidad de la estructura.

3.3. Cálculo estructural de la mesa

En la Figura 30, muestra las dimensiones principales de la mesa diseñada, especificando su longitud y ancho. Estas medidas son fundamentales para calcular los esfuerzos y garantizar la estabilidad de la estructura bajo las cargas aplicadas.

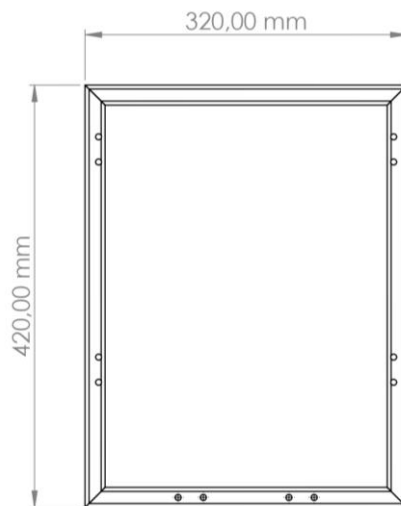


Figura 30. Medidas de la estructura.

En la Figura 31, se muestra el diagrama de cuerpo libre en donde se suministran los puntos de apoyo fijos y los puntos de fuerza aplicados a los laterales, comportándose como una viga para este estudio, mientras que la flecha roja simboliza la gravedad.

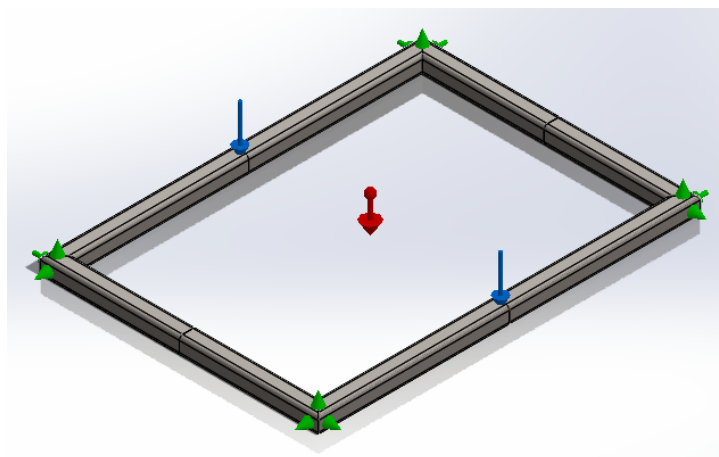


Figura 31. Diagrama de cuerpo libre de la mesa estructural.

En la ecuación (10), se calcula el área de la sección transversal del tubo estructural cuadrado:

$$A = L^2 - (L - 2e)^2 \quad (10)$$

$$A = 20^2 - (20 - 2 * 2)^2$$

$$A = 400 - 16^2 = 400 - 256 = 144 [mm^2]$$

Donde:

- L : Área de la sección transversal del tubo [mm^2].
- L : Longitud del lado externo del tubo [mm].
- e : Espesor de las paredes del tubo [mm].

En la Tabla 9, se presenta el cálculo de la fuerza total de los elementos montados en la estructura, desglosando cada componente según su cantidad, masa individual y la fuerza generada bajo una gravedad de 9.81 m/s².

Tabla 9. Cálculo de la masa total de los elementos montados.

Elemento	Cantidad	Masa Kg	Gravedad m/s ²	Fuerza N
Ángulo Bandeja Base	4	0.113		1.109
Ángulo Bandeja de Apoyo	2	0.041		0.402
Bandeja Base	1	0.785		7.7
Bandeja de Apoyo	1	0.318		3.12
Ángulo Estático	1	0.251		2.462
Ángulo Rotatorio	1	0.26		2.551
Bandeja Rotatoria	1	0.371	9,81	3.64
Piñón de Nudo Macho	1	0.067		0.657
Piñón del Motor	1	0.064		0.628
Motor Nema 23	1	1.05		10.3
Soporte para Motor	1	0.133		1.305
Acople con Prisioneros	1	0.045		0.441
Panel	1	0.095		0.932
Soporte para Sensor de Temperatura	1	0.022		0.216
Peso Total				35,463

3.3.1. *Peso total ajustado con margen de seguridad*

Para determinar las capacidades estructurales de la mesa, se analizaron las fuerzas y el peso total del sistema, considerando un margen de seguridad del 25%.

La ecuación (11), emplea el peso total de carga más un margen de seguridad:

$$P = \text{Peso Total} * (1 + \text{Margen de Seguridad}) \quad (11)$$

$$P = 35.463 [N] * (1 + 0.25)$$

$$P = 44.329 [N]$$

Donde:

- P: Peso total.
- Margen de seguridad: 0.25.

3.3.2. *Selección del tipo de perfil*

El momento máximo viene dado en la Figura 34 de los diagramas de momentos y el esfuerzo máximo por propiedad mecánica en MakeItFrom del acero ASTM A36, la cual es de 290 MPa.

En la ecuación (12), se presenta el módulo de selección W del elemento estructural, que representa la capacidad de la sección para resistir el momento flector.

$$W = \frac{M_{max}}{0.6S_y} \quad (12)$$

$$W = \frac{4654.545 [Nmm]}{0.6 * 250 [N/mm^2]}$$

$$W = 0.031 [cm^3]$$

Donde:

- M_{max} : Momento máximo obtenido de los diagramas de momento [Nmm].
- S_y : Resistencia mecánica del material [N/mm²].

Con el cálculo anterior se puede escoger cualquier tipo a partir de 0.031 cm³. Para este análisis, se escoge un módulo de sección de 0.69 cm³ junto con un momento de inercia de la sección transversal de la viga de 0.69 mm⁴ del Datasheet anterior.

3.3.3. Sumatoria de Momentos en A

La ecuación (13), se utiliza para calcular la reacción en R_B al equilibrar los momentos respecto al punto A. Este procedimiento permite distribuir las fuerzas de manera uniforme en los apoyos, validando que la estructura pueda soportar las cargas aplicadas sin comprometer su estabilidad.

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow -(P * d_1) + (R_B * d_2) = 0 \quad (13)$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow -44.329 * 210 + R_B * 420 = 0$$

$$R_B = \frac{420 * 44.329 * 210}{420} = 22.1645 \text{ [N]}$$

- $\sum M_A = 0$: Indica que la suma de los momentos respecto al punto A debe ser igual a cero para que el sistema esté en equilibrio.
- $P = 44.329 \text{ [N]}$: Fuerza total aplicada al centro del tramo de la estructura.
- $d_1 = 210 \text{ [mm]}$: Distancia desde el punto A hasta el lugar donde actúa la carga P (mitad de la longitud de 420 [mm]).
- R_B : Reacción en el apoyo B.
- $d_2 = 420 \text{ [mm]}$: Longitud total de la estructura, que es la distancia desde el punto A hasta el punto B.

3.3.4. Sumatoria de momentos en Y

La sumatoria de fuerzas en dirección Y se realiza para confirmar el equilibrio de las fuerzas. Esta sumatoria incluye las fuerzas aplicadas y las reacciones en los apoyos (puntos A y B).

Con la ecuación (14), se obtiene la sumatoria de Fuerzas F_y , para poder despejarse y saber su valor:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_A + R_B - P = 0 \quad (14)$$

$$R_B = 22.1645 \text{ [N]}$$

$$P = 44.329 \text{ [N]}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_A + R_B - 44.329 = 0$$

$$R_A = 44.329 - R_B = 44.329 - 22.1645 = 22.1645 \text{ [N]}$$

- $\sum F_y = 0$: Indica que la suma de todas las fuerzas verticales debe ser igual a cero.
- R_A : Reacción en el apoyo A.
- R_B : Reacción en el apoyo B.
- P : Fuerza total aplicada.

En la Figura 32, se presenta el diagrama de esfuerzos en un punto central, donde P1 que es una carga, se apoya en el tubo estructural cuadrado de la Mesa.

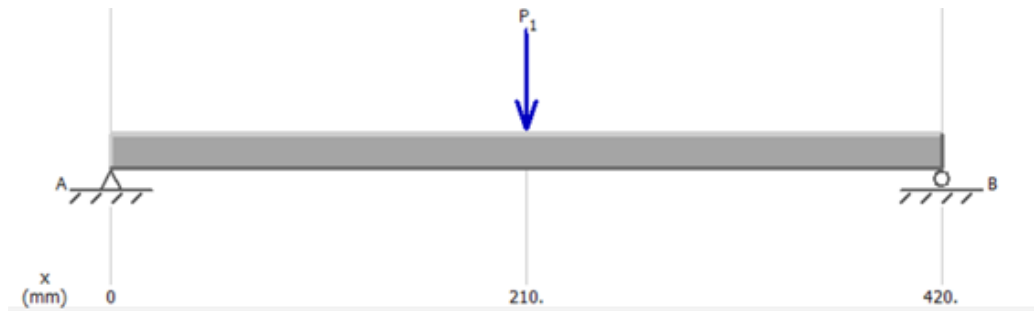


Figura 32. Diagrama de esfuerzos en la carga concentrada.

3.3.5. Cálculo de Fuerzas Cortantes

El análisis de fuerzas cortantes se realiza para determinar los valores de las fuerzas internas que actúan en diferentes puntos de la barra estructural, especialmente bajo las condiciones de carga y apoyos definidos con base a la igualdad siguiente:

Fuerza cortante en un punto = Fuerza en apoyo o carga aplicada en ese tramo

- **Fuerza cortante:** Es la fuerza interna que actúa a lo largo de un tramo de la estructura, provocada por cargas externas o reacciones en los apoyos.
- **Secciones analizadas:** Se divide la barra en secciones según las posiciones de las cargas y los apoyos.

Con los valores obtenidos de la viga se puede realizar una igualación de la fuerza cortante con la del apoyo en el punto A.

- En el extremo izquierdo ($x = 0 \text{ mm}$):
- La fuerza cortante inicial se iguala a la reacción en el apoyo A.

$$V(0) = R_A = +22.1645 \text{ N}$$

- En el punto de carga aplicada ($x = 210 \text{ mm}$):

$$V(210) = R_A - P = 22.1645 - 44.329 = -22.1645 \text{ N}$$

- En el extremo derecho ($x = 420 \text{ [mm]}$):

$$V(420) = -22.1645 \text{ N}$$

- **Diagrama de corte:** El diagrama de corte se construye conectando los valores calculados de fuerza cortante a lo largo de la barra.

En la ecuación (15), muestra los cambios en los valores de V entre las secciones clave:

$$\begin{aligned}(x = 0 \text{ mm}: & + 22.1645 \text{ [N]}) \\(x = 210 \text{ mm}: & - 22.1645 \text{ [N]}) \\(x = 420 \text{ mm}: & - 22.1645 \text{ [N]})\end{aligned}\tag{15}$$

En la Figura 33, se presenta el diagrama de corte correspondiente a la estructura analizada, donde se evidencia la distribución de las fuerzas cortantes a lo largo del eje x.

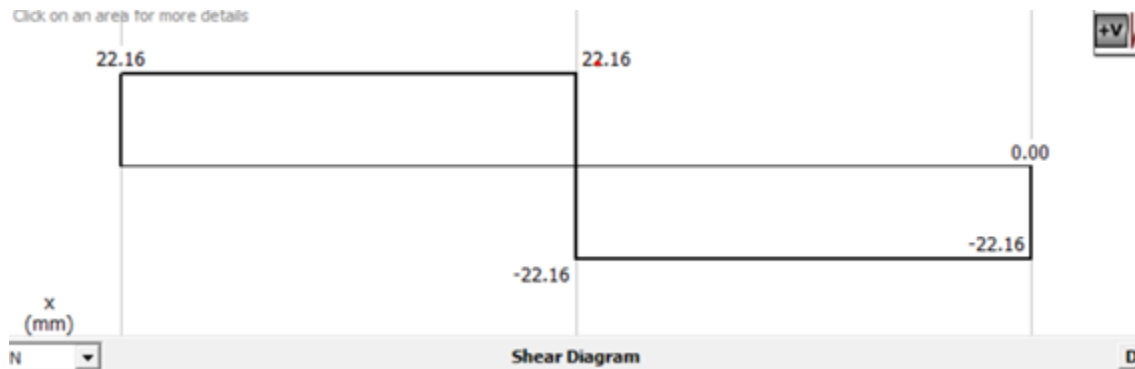


Figura 33. Diagrama de corte.

- **Diagrama de Momentos:** El diagrama de momentos permite visualizar los momentos internos a lo largo de la estructura. El momento máximo ocurre en el punto donde se encuentra la carga aplicada, y se calcula mediante la ecuación (16).

$$\begin{aligned}M_{max} &= R_A \cdot x \\M_{max} &= 22.1645 \cdot 210 = 4654.545 \text{ [Nmm]}\end{aligned}\tag{16}$$

Donde:

- M_{max} : Momento máximo generado en la estructura.
- R_A : Reacción en el apoyo A, previamente calculada.
- x : Distancia desde el punto A hasta la carga aplicada.
- Datos utilizados: $R_A = 22.1645 \text{ [N]}$; $x = 210 \text{ [mm]}$.

En la Figura 34, se presenta el diagrama de momentos flectores correspondiente a la estructura evaluada, el cual refleja la variación de los momentos internos a lo largo del eje x, mostrando cómo estos responden a las fuerzas aplicadas y las condiciones de soporte de la estructura, proporcionando una representación visual del comportamiento estructural en términos de flexión.

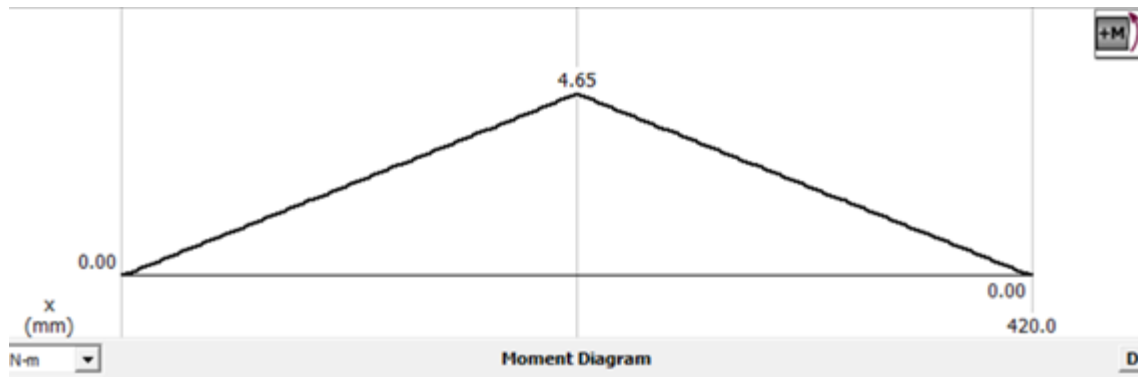


Figura 34. Diagrama de momentos.

3.3.6. Cálculo del Esfuerzo Cortante (σ)

La ecuación (17), presenta el cálculo del esfuerzo cortante τ para poder determinar el factor de seguridad.

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{4654.545 * 10}{6900}$$

$$\sigma = 6.745 [MPa]$$

Donde:

- M : Momento máximo en la sección de la viga [Nmm].
- c : Distancia máxima desde el eje neutro hasta la fibra extrema [mm].
- I : Momento de inercia de la sección transversal de la viga [mm^4].

3.3.7. Cálculo del Factor de Seguridad (FS) de la mesa estructural

La ecuación (18), presenta el cálculo del factor de seguridad para la viga de la mesa.

$$FS = \frac{0.6S_y}{\sigma} \quad (18)$$

$$FS = \frac{0.6 * 250 [MPa]}{6.745 [MPa]}$$

$$FS \approx 22$$

Donde:

- S_y : Límite de fluencia del material [GPa].
- σ : Esfuerzo cortante calculado previamente [GPa].

El Factor de Seguridad obtenido, $FS \approx 22$, refleja que la estructura es significativamente robusta y adecuada para soportar las condiciones de carga actuales y cualquier carga adicional inesperada.

- **Diseño estructural seguro y confiable:** Un FS elevado garantiza que la estructura pueda resistir esfuerzos mucho mayores a los calculados sin comprometer su integridad, asegurando un margen amplio de seguridad para eventos extraordinarios o errores en la estimación de cargas.
- **Robustez y durabilidad:** La estructura no solo cumple con las normativas de diseño estructural, sino que el alto FS contribuye a un diseño robusto y fuerte, lo cual evita deformaciones perceptibles y proporciona una base sólida para las operaciones.
- **Aspecto visual:** Un diseño estructural con un FS elevado también genera confianza visual en los usuarios o supervisores, ya que la estructura no se percibe débil ni propensa a fallas, mejorando la percepción del diseño como una solución profesional y duradera.

En la Figura 35, se presenta el factor de seguridad máximo y mínimo simulado en el análisis estático de SOLIDWORKS.

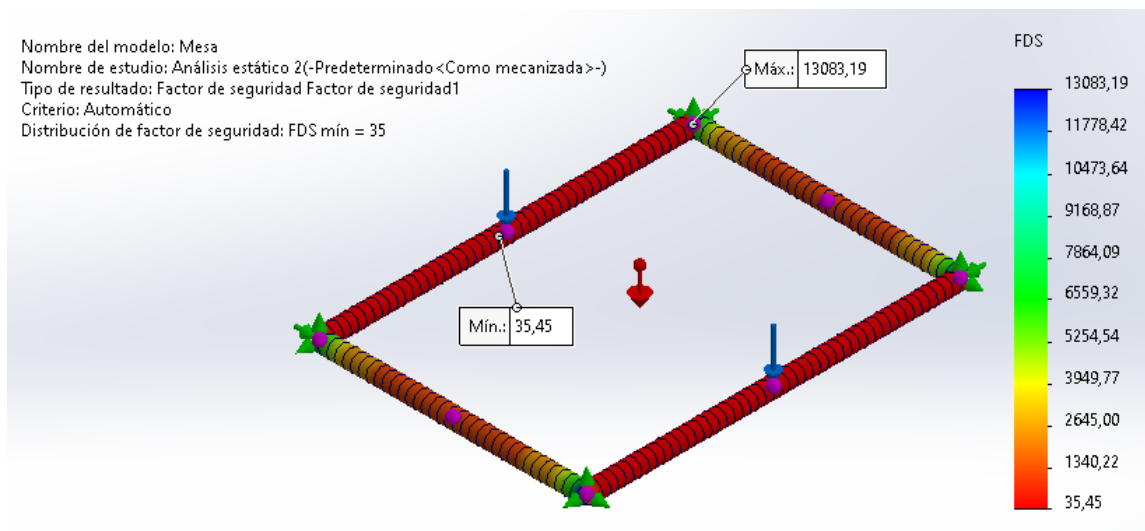


Figura 35. Factor de seguridad máxima y mínima.

La diferencia entre los factores de seguridad se debe en el cálculo manual, en donde se considera el esfuerzo admisible de flexión $0.6S_y$, mientras que la simulación en SolidWorks incluye distribuciones de carga y condiciones de contorno que generan resultados más conservadores o diferentes.

En la Figura 36, se presenta la deformación máxima y mínima de la mesa estructural simulado en el análisis estático de SOLIDWORKS.

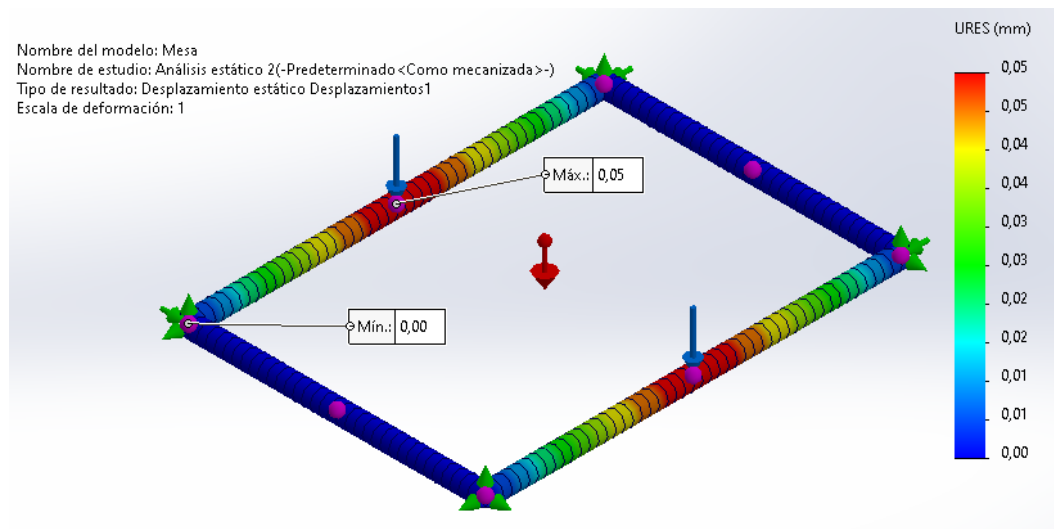


Figura 36. Deformación máxima y mínima.

En la Figura 37, se presenta la máquina dobladora de lámina de acrílico robusta con todos sus elementos ensamblados.

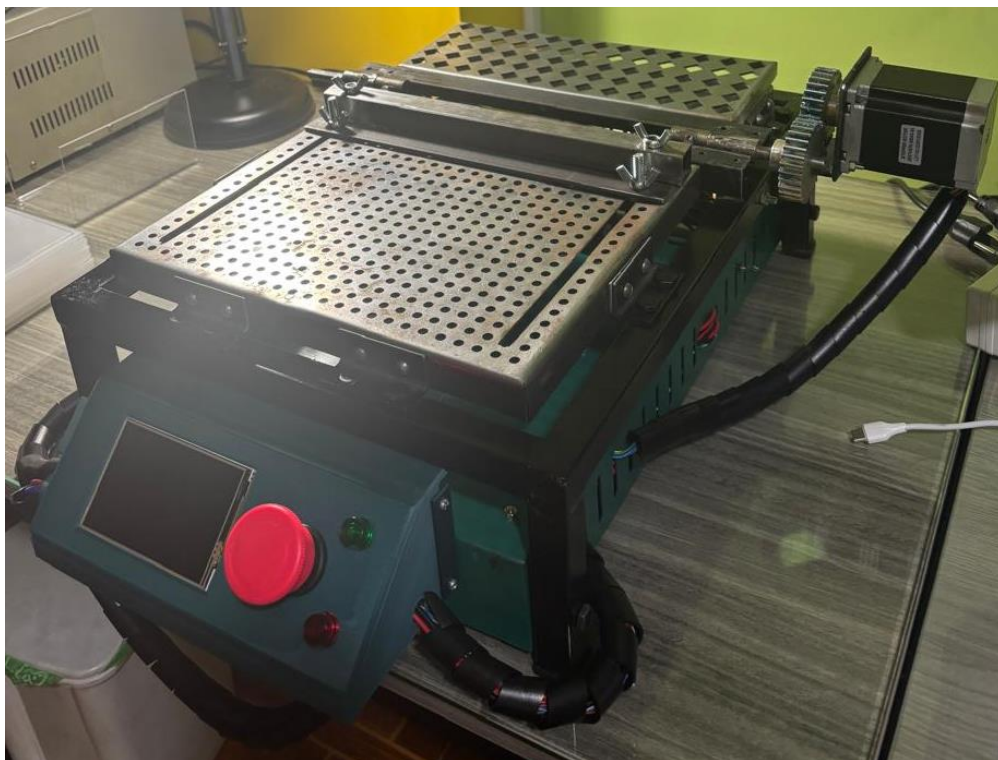


Figura 37. Estructura de la máquina completa.

3.5. Análisis de transmisión de potencia en los piñones

El presente apartado se centra en el análisis y cálculo del torque necesario para que el motor paso a paso utilizado en la máquina dobladora de láminas de acrílico pueda girar la bandeja rotatoria sin ningún problema, considerando que ambos piñones, tanto el del motor como el de la bandeja, tienen un diámetro externo aproximado de 5 cm, lo cual asegura una relación de transmisión de 1:1.

3.5.1. Cálculo de los piñones para el motor y ángulo rotatorio

Se presentan los parámetros y cálculos para el diseño de dos piñones en SolidWorks, utilizando variables como el módulo (M), el número de dientes (N) y el ángulo de presión (a). A partir de estas variables, se calculan dimensiones clave como el diámetro externo (De), primitivo (Dp) e interno (Di), asegurando precisión y eficiencia en el modelo paramétrico.

Estos valores se calculan mediante ecuaciones mecánicas específicas para asegurar que el diseño del piñón cumpla con los estándares requeridos, permitiendo ajustar sus características de forma precisa y eficiente dentro del modelo paramétrico.

En la ecuación (19), se presenta el módulo del piñón utilizado en el sistema de transmisión, en donde $N = 30$, $a = 20^\circ$ y $De = 50 \text{ mm}$, que define la relación entre el paso circular y el número de dientes para garantizar un acoplamiento adecuado.

$$M = \frac{D_e}{(N + 2)} \quad (19)$$

$$M = \frac{50 \text{ [mm]}}{(30 + 2)}$$

$$M = 1.5625 \text{ [mm]}$$

En la ecuación (20), se presenta el diámetro exterior (De) que es el diámetro más grande de la rueda dentada, que incluye la punta de los dientes.

$$D_e = M * (N + 2) \quad (20)$$

$$D_e = 1.5625 \text{ [mm]} * (30 + 2)$$

$$D_e = 50 \text{ [mm]}$$

En la ecuación (21), se presenta el diámetro primitivo (Dp) que es el diámetro de la circunferencia donde se produce el contacto efectivo entre dientes.

$$D_p = M * N \quad (21)$$

$$D_p = 1.5625 \text{ [mm]} * 30$$

$$D_p = 46.875 [mm]$$

En la ecuación (22), se presenta el diámetro interno (Di) la cual representa el diámetro menor que la del primitivo.

$$D_i = D_p - (M * 2.167) \quad (22)$$

$$D_i = 46.875 [mm] - (1.5625 [mm] * 2.167)$$

$$D_i = 43.489 [mm]$$

En la ecuación (23), se presenta la constante C que es un valor ajustado que combina el diámetro exterior (De) y el ángulo de presión (a).

$$C = D_p * 0.93969 \quad (23)$$

$$C = 46.875 [mm] * 0.93969$$

$$C = 44.047 [mm]$$

En la ecuación (24), se presenta el paso circular, es la distancia medida a lo largo de la circunferencia primitiva entre un punto de un diente y el mismo punto en el diente adyacente.

$$P_c = \frac{\pi * D_p}{N} \quad (24)$$

$$P_c = \frac{\pi * 46.875 [mm]}{30}$$

$$P_c = 4.908 [mm]$$

En la ecuación (25), se presenta la altura del diente que es la medida estándar de la altura de los dientes basada en el módulo.

$$H = M * 1.5708 \quad (25)$$

$$H = 1.5625 [mm] * 1.5708 = 2.454 [mm]$$

En la Figura 38, se presenta el diseño del piñón para el eje del motor NEMA 23.

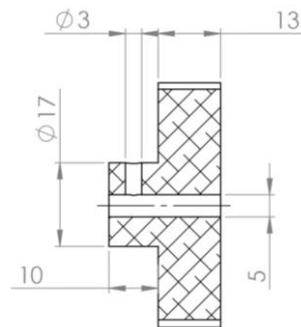


Figura 38. Diseño piñón del motor.

En la Figura 39, se presenta el diseño del piñón para el eje del ángulo rotatorio.

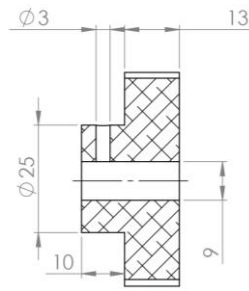


Figura 39. Diseño piñón del ángulo rotatorio.

3.5.2. Cálculo del torque necesario para girar el sistema

Si la bandeja rotatoria y el ángulo están acoplados y rotan como un solo sistema, se debe sumar el peso de ambos para calcular el torque requerido. A continuación, se detalla el cálculo considerando que ambos componentes son tratados como una única masa acoplada.

En la ecuación (26), se calcula el peso total de la bandeja y ángulo rotatorio con las masas proporcionadas en la anterior Tabla 9.

$$F = (m_b + m_a) * g \quad (26)$$

$$F = (0.371 + 0.26) * 9.81$$

$$F = 6.2 \text{ [N]}$$

Donde:

- m_b : Masa de la bandeja rotatoria [Kg].
- m_a : Masa del ángulo rotatorio [Kg].
- g : Gravedad [$\frac{m}{s^2}$].

En la ecuación (27), se calcula el torque gravitacional necesario (T_g) para superar la fuerza gravitatoria y girar el sistema.

$$T_g = F * r \quad (27)$$

$$T_g = 6.2 * 0.025$$

$$T_g = 0.155 \text{ [Nm]}$$

Donde:

- r : Es la distancia desde el eje del piñón hasta su borde exterior, en este caso, se calcula a partir del diámetro del piñón, radio del piñón 0.025 [m] (diámetro de 0.05 [m]).

En la ecuación (28), se calcula la fricción en los ejes y engranajes que puede agregar una carga adicional significativa.

$$\begin{aligned} T_f &= u \cdot F \\ T_f &= 0.1 \cdot 6.2 \\ T_f &= 0.62 [N] \end{aligned} \tag{28}$$

Donde:

- u : Coeficiente de fricción.

En la ecuación (29), se calcula el torque adicional por fricción antes de calcular el torque total con la que gira el sistema.

$$\begin{aligned} T_f &= F_f \cdot r \\ T_f &= 0.62 \cdot 0.025 \\ T_f &= 0.0155 [Nm] \end{aligned} \tag{29}$$

Donde:

- T_f : Torque por fricción [Nm].

En la ecuación (30), se calcula el torque total sumando el torque gravitacional y el torque por fricción.

$$\begin{aligned} T_{Total} &= T_g + T_f \\ T_{Total} &= 0.155 + 0.0155 \\ T_{Total} &= 0.1705 [Nm] \end{aligned} \tag{30}$$

Finalmente, en la ecuación (31), para garantizar un funcionamiento estable, se considera un factor de seguridad de 3.

$$\begin{aligned} T_{seg} &= T_{Total} \cdot 3 \\ T_{seg} &= 0.1705 \cdot 3 \\ T_{seg} &= 0.5115 Nm \end{aligned} \tag{31}$$

Donde:

- T_{seg} : Torque total multiplicado por un factor de seguridad [Nm].

Con el torque calculado, para que el sistema pueda girar sin ningún problema la opción en el mercado es un motor NEMA 23 con un torque de 0.83 Nm, que supera a los 0.5115 Nm.

3.6. Análisis térmico para lámina de acrílico

Con base en el marco teórico que se ha proporcionado, se define un análisis térmico para calcular la transferencia de calor en la dobladora de acrílico transparente, con un enfoque en la convección generada por la resistencia de niquelina tipo cartucho. A continuación se detalla los datos que se necesita y los cálculos a realizar.

3.6.1. Datos de una lámina de acrílico transparente

Para determinar los rangos de temperatura necesarios para que el acrílico sea maleable, se requieren los datos de sus propiedades térmicas y los espesores específicos. En la Tabla 10, se presentan los valores necesarios para calcular los límites máximos y mínimos de temperatura según los espesores de láminas más comunes en el mercado, como se detalla en el marco teórico 1.1.1.

Tabla 10. Datos del acrílico.

Propiedad	Valor
Dimensiones de la lámina: Largo	25 cm
Dimensiones de la lámina: Ancho	14 cm
Densidad del acrílico	1190 Kg/m ³
Temperatura inicial	20 °C
Temperatura de maleabilidad (1.5 a 2 [mm])	120 °C – 140 °C
Temperatura de maleabilidad 3 [mm]	130 °C – 150 °C
Temperatura de maleabilidad 5 [mm]	135 °C – 160 °C

La capacidad calorífica (Cp) específica del acrílico transparente, con un valor de 1470 J/kg·K, representa la cantidad de energía requerida para elevar un grado Kelvin la temperatura de un kilogramo de este material [12].

3.6.2. Cálculo de calor maleable para cada espesor

Se define el volumen de la lámina de acrílico, considerando que este se determina como el producto del área de la lámina y su espesor, lo que permite calcular el espacio tridimensional que ocupa el material en condiciones normales. Además se establece la masa de la lámina de acrílico como el resultado de multiplicar su volumen por la densidad del material, permitiendo así determinar la cantidad de materia presente en la lámina considerando sus propiedades físicas específicas.

En la ecuación (32), presenta el volumen de la lámina (V):

$$V = A * \Delta_x \quad (32)$$

Donde:

- Δ_x : Espesor de la lámina [m].
- A : Área de la lámina [m²].
- V : Volumen de la lámina [m³].

En la ecuación (33), se presenta la masa de la lámina mm de acrílico:

$$m = V * p \quad (33)$$

Donde:

- m : Masa de la lámina [kg].
- p : Densidad del acrílico [kg/m³].

En la ecuación (34), presenta el cálculo del calor necesario (Q) por convección según en el marco teórico 1.3.3:

$$Q = m * C_p * (T_{final} - T_{inicial}) \quad (34)$$

- Q : Calor necesario para calentar la lámina [J].
- C_p : Capacidad calorífica específica del acrílico con un valor de 1470 [J/kgK].
- T_{final} : Temperatura final requerida para la maleabilidad [°C].
- $T_{inicial}$: Temperatura inicial [°C].

En la Tabla 11, se presentan los cálculos detallados para cada espesor de acrílico, incluyendo la masa de la lámina y el calor necesario (en julios) para alcanzar los rangos de temperatura según el espesor y las ecuaciones (32), (33) y (34) mencionadas.

Tabla 11. Valores mínimos y máximos para cada espesor.

Espesor mm	T final min [°C]	T final max [°C]	Masa [Kg]	Calor mínimo [J]	Calor máximo [J]
1,5	120	140	0,062	9183.825	11020.590
2,0	120	140	0,083	12245.100	14694.120
3,0	130	150	0,125	20204.415	23877.945
5,0	135	160	0,208	35204.663	42857.850

6,0	140	165	0,249	44082.360	53266.185
10,0	140	165	0,417	73470.600	88776.975
12,0	150	170	0,499	95511.780	110205

Esta tabla proporciona cálculos esenciales para determinar la cantidad de calor necesaria para calentar láminas de acrílico de distintos espesores hasta su temperatura de maleabilidad, considerando sus propiedades térmicas.

3.6.3. *Justificación de uso exclusivo de acrílico*

Los cálculos y pruebas realizados en este proyecto se enfocan exclusivamente en láminas de acrílico transparente por las siguientes razones:

1. **Propiedades térmicas específicas:** Se consideraron parámetros como la densidad $1190 \frac{kg}{m^3}$ y la capacidad calorífica del acrílico transparente, esenciales para los cálculos de transferencia de calor y los rangos de maleabilidad.
2. **Temperaturas de maleabilidad:** Los rangos de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ están definidos para el acrílico transparente, ya que otros tipos de acrílico pueden requerir ajustes debido a diferencias en sus propiedades térmicas.
3. **Compatibilidad con estándares comerciales:** Los espesores y dimensiones analizados corresponden a los más comunes en láminas de acrílico transparente disponibles en el mercado.
4. **Pruebas validadas:** Las pruebas térmicas y el control PID se realizaron únicamente con acrílico transparente, asegurando que los resultados sean confiables para este material.
5. **Enfoque del diseño:** La máquina está optimizada para trabajar con acrílico transparente en aplicaciones donde su uso es esencial, como señalización o fabricación de piezas decorativas.

3.7. Análisis eléctrico de la máquina

En este apartado se analiza y calcula la potencia y corriente que se necesita en las diferentes secciones de la máquina, así como también el esquema eléctrico total del sistema.

3.7.1. Requerimientos de potencia para la fuente de alimentación en componentes DC

En la ecuación (35), se presenta la potencia total necesaria de los componentes (DC) para asegurar que la fuente de poder pueda suministrar corriente a cada componente.

$$P_{DC} = \sum P_i \quad (35)$$
$$P_{DC} = (2 \cdot V_{fan} \cdot I_{fan}) + (P_{ESP32}) + (P_{Arduino}) + (P_{TFT}) ...$$
$$+ (P_{Stepdown}) + (2 \cdot V_{luz} \cdot I_{luz}) + (P_{NEMA23})$$
$$P_{DC} = 2.16 [W] + 0.264 [W] + 0.75 [W] + 3 [W] + 0.48 [W] + 100.8 [W]$$
$$P_{DC} = 107.454 [W]$$

Donde:

- P_{DC} : Potencia total necesaria para los componentes DC [W].
- P_i : Potencia de cada componente individual [W].
- V_{fan} : Voltaje de los ventiladores [V].
- I_{fan} : Corriente de los ventiladores [A].
- P_{ESP32} : Potencia del ESP32 [W].
- $P_{Arduino}$: Potencia del Arduino Mega [W].
- P_{TFT} : Potencia del Display TFT [W].
- $P_{Stepdown}$: Potencia de los reguladores step-down [W].
- V_{luz} : Voltaje de las luces LED [V].
- I_{luz} : Corriente de las luces LED [A].
- P_{NEMA23} : Potencia del motor NEMA 23 [W].

En la ecuación (36), se presenta la corriente total que consume todos los componentes (DC) con el dato de potencia calculado anteriormente.

$$I_{Total} = \frac{P_{DC}}{V_{fuente}} \quad (36)$$
$$I_{Total} = \frac{107.454 [W]}{24 [V]}$$
$$I_{Total} = 4.477 [A]$$

Donde:

- I_{Total} : Corriente total necesaria para la fuente [A].
- P_{AC-DC} : Potencia total necesaria para los componentes DC [W].

- V_{fuente} : Voltaje de salida de la fuente seleccionada [V].

Como resultado, se obtiene que la potencia mínima requerida para la fuente de poder es 107.454 W y la corriente mínima requerida para la fuente de poder es 4.477 A.

3.7.2. *Potencia total requerida de la máquina*

Para poder calcular la potencia total de la máquina se debe primero identificar los componentes AC y DC para luego poder sumarlos y así obtener la potencia total que se necesita.

En la ecuación (37), se presenta la potencia total de los componentes AC, pero como solo la niquelina es AC, queda una igualación.

$$\begin{aligned} P_{AC} &= P_{niquelina} \\ P_{AC} &= 200 [W] \end{aligned} \tag{37}$$

Donde:

- P_{AC} : Potencia total de los componentes AC [W].
- $P_{niquelina}$: Potencia de la resistencia de niquelina [W].

En la ecuación (38), se presenta la potencia total requerida para la máquina obtenida de la suma de P_{AC} y P_{DC} .

$$\begin{aligned} P_{Total} &= P_{AC} + P_{DC} \\ P_{Total} &= 200 [W] + 107.454 [W] \\ P_{Total} &= 307.454 [W] \end{aligned} \tag{38}$$

Donde:

- P_{Total} : Potencia total requerida para la máquina [W].
- P_{AC} : Potencia total de los componentes AC [W].
- P_{DC} : Potencia total de los componentes DC [W].

Como resultado, se obtiene que la potencia total de la máquina es 307.454 W, donde se recomienda utilizar una fuente de poder que pueda manejar 120 W para los componentes DC y una conexión independiente para la resistencia de niquelina 200 W en AC. Esto asegura un diseño eficiente y seguro.

3.7.3. *Corriente del motor*

Si de la fuente de poder están siendo suministrados 24 V al controlador TB6600, el cálculo de la corriente en el motor Nema 23 se lo proporciona en la siguiente ecuación.

En la ecuación (39), se presenta la potencia consumida por el motor, en donde se despeja la corriente del motor para después ser calculado.

$$P_{motor} = V_{driver} * I_{motor} \quad (39)$$

$$P_{motor} = \frac{P_{motor}}{V_{driver}}$$

$$P_{motor} = \frac{100.8 [W]}{24 [V]}$$

$$P_{motor} = 4.2 [A]$$

Donde:

- P_{motor} : Potencia consumida por el motor [W].
- V_{driver} : Voltaje de alimentación del controlador [V].
- I_{motor} : Corriente efectiva suministrada al motor [A].

Como resultado, se obtiene la corriente efectiva suministrada al motor es 4.2 A. Lo cual asegura que la potencia consumida por el motor sea 100.8 W como corresponde en la sumatoria de potencias de la máquina.

3.7.4. Corriente de la resistencia de niquelina

Si la potencia de la resistencia de niquelina se especifica como 200 W con un voltaje de operación de 110 V en AC.

En la ecuación (40), se presenta el cálculo para la corriente consumida por la resistencia de niquelina.

$$I_{niquelina} = \frac{P_{niquelina}}{V_{niquelina}} \quad (40)$$

$$I_{niquelina} = \frac{200 [W]}{110 [V]}$$

$$I_{niquelina} = 1.818 [A]$$

Donde:

- $I_{niquelina}$: Corriente consumida por la resistencia de niquelina [A].
- $P_{niquelina}$: Potencia de la resistencia de niquelina [W].
- $V_{niquelina}$: Voltaje de operación de la resistencia de niquelina [V].

Como resultado, se obtiene la corriente consumida por la resistencia de niquelina la cual es 1.818 A.

3.7.5. Esquema eléctrico de la máquina

En la Figura 40, se presenta el esquema eléctrico completo de la máquina dobladora de acrílico, donde se incluyen los componentes de potencia como la resistencia de niquelina, el dimmer y los ventiladores de enfriamiento.

Además de los elementos de control como el microcontrolador ESP32, los reguladores de voltaje y el controlador del motor paso a paso, incorporando también sistemas de seguridad como el paro de emergencia y las luces piloto para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

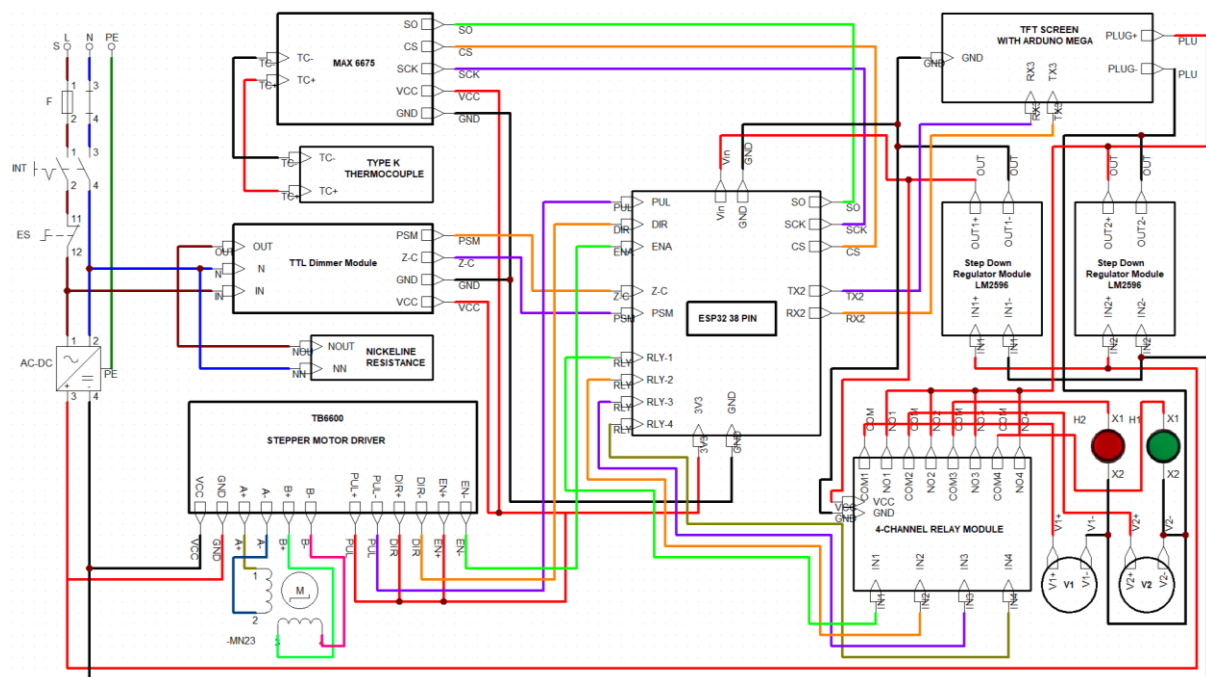


Figura 40. Esquema eléctrico de la máquina dobladora de lámina de acrílico.

- **Fuente de Alimentación:** Es el sistema encargado de convertir la corriente alterna 110 V en AC de la red eléctrica en corriente continua 24 V en DC para alimentar los módulos electrónicos y actuadores, incluye un fusible de protección 10 A contra sobre corriente y un interruptor de encendido, su convertidor AC-DC alimenta componentes como la ESP32, TB6600 y los reguladores LM2596.
- **ESP32 (Microcontrolador Principal):** Actúa como el cerebro del sistema, controla módulos y ejecuta algoritmos de control, gestiona el PID para regular la temperatura, recibe datos del MAX6675, ajusta la potencia del módulo dimmer, coordina el motor

paso a paso a través del TB6600, se comunica con la pantalla TFT y controla el módulo de relés.

- **Sensor de Temperatura MAX6675 y Termocupla Tipo K:** El MAX6675 convierte señales de la termocupla en datos digitales, mide altas temperaturas generadas por la resistencia de nicromo, envía esos datos a la ESP32 para el control de temperatura, asegurando precisión y estabilidad térmica.
- **Módulo Dimmer TTL:** Regula la potencia suministrada a la resistencia de nicromo, controla la generación de calor según el algoritmo PID implementado en la ESP32, mantiene la temperatura deseada ajustando dinámicamente el suministro eléctrico a la resistencia.
- **Resistencia de Niquelina:** Es el elemento calefactor que convierte la energía eléctrica en calor, genera el calor necesario para doblar las láminas de acrílico, su temperatura es regulada por el dimmer y monitoreada por la termocupla para evitar sobrecalentamientos.
- **Driver TB6600 y Motor NEMA 23:** El TB6600 controla el motor NEMA 23 interpretando señales de pulso y dirección de la ESP32, permite movimientos precisos de la tabla rotatoria ajustando el ángulo para el doblado correcto de las láminas de acrílico.
- **Pantalla TFT y Arduino Mega:** La pantalla TFT permite visualizar y modificar parámetros del sistema, el Arduino Mega maneja la pantalla y recibe datos del usuario como ángulo de doblado y espesor de la lámina, estos datos se envían a la ESP32 para ejecutar acciones.
- **Módulo de Relés de 4 Canales:** Actúa como interruptor electrónico para controlar componentes externos, enciende y apaga luces piloto según el estado del sistema, controla los ventiladores de enfriamiento para evitar sobrecalentamiento en el proceso de doblado.
- **Reguladores de Voltaje LM2596:** Reducen y estabilizan la corriente continua para alimentar componentes sensibles, la una es de 24 a 5 V en DC para la ESP32 y la otra es de 24 V a 12 V en DC, aseguran un suministro eléctrico constante y confiable a la ESP32, el MAX6675 y otros módulos electrónicos evitando fluctuaciones dañinas.
- **PCB de ESP32:** Cuenta con borneras distribuidas alrededor para conexiones seguras y organizadas con los módulos y dispositivos de la máquina, facilitando el cableado y el mantenimiento.

- **Luces Piloto (Roja y Verde):** Actúan como indicadores visuales del estado del sistema, la luz roja indica que el sistema está en funcionamiento activo, mientras que la luz verde señala que está en estado de reposo o en modo de enfriamiento tras el uso.
- **Interruptor principal:** Permite encender y apagar manualmente la máquina, asegurando un control directo sobre el suministro eléctrico y el inicio del proceso de doblado, además, en su carcasa se encuentra la ubicación del fusible de protección de 10 A, que previene daños en los componentes eléctricos en caso de sobrecarga o cortocircuito.
- **Paro de emergencia:** Detiene inmediatamente el funcionamiento de todos los sistemas de la máquina en situaciones de emergencia, desconectando el suministro eléctrico a los actuadores y elementos de control para garantizar la seguridad del operador, evitando accidentes y posibles daños al equipo, su activación es sencilla y visible, permitiendo una rápida respuesta ante cualquier eventualidad.
- **Ventiladores:** Los ventiladores conectados al regulador LM2596 convierten 24V DC a 12V DC para un funcionamiento estable, generando flujo de aire en áreas críticas como el controlador del motor y la resistencia de nicromo, su activación es controlada por el ESP32 mediante relés según la temperatura, asegurando eficiencia y protección térmica.

En la Figura 41, se presenta el montaje eléctrico completo de la máquina dobladora de lámina de acrílico.



Figura 41. Montaje eléctrico de la máquina.

3.8. Manejo y control de la máquina

En este apartado se presenta por diagrama de flujo la programación de la ESP32 que maneja todo el proceso de doblado y la programación de la pantalla TFT Touch que presenta al usuario las variables de ángulo y espesor que desea doblar, además se presenta el modelo PID para controlar la temperatura de la resistencia de niquelina tipo cartucho y el cálculo para girar el motor al ángulo que el usuario desea obtener, para finalmente presentar un manual y diagrama del manejo del equipo y de la pantalla.

3.8.1. Diagrama de flujo de la programación ESP32

En la Figura 42, se presenta el diagrama de flujo de la programación para el proceso de doblado en la ESP32.

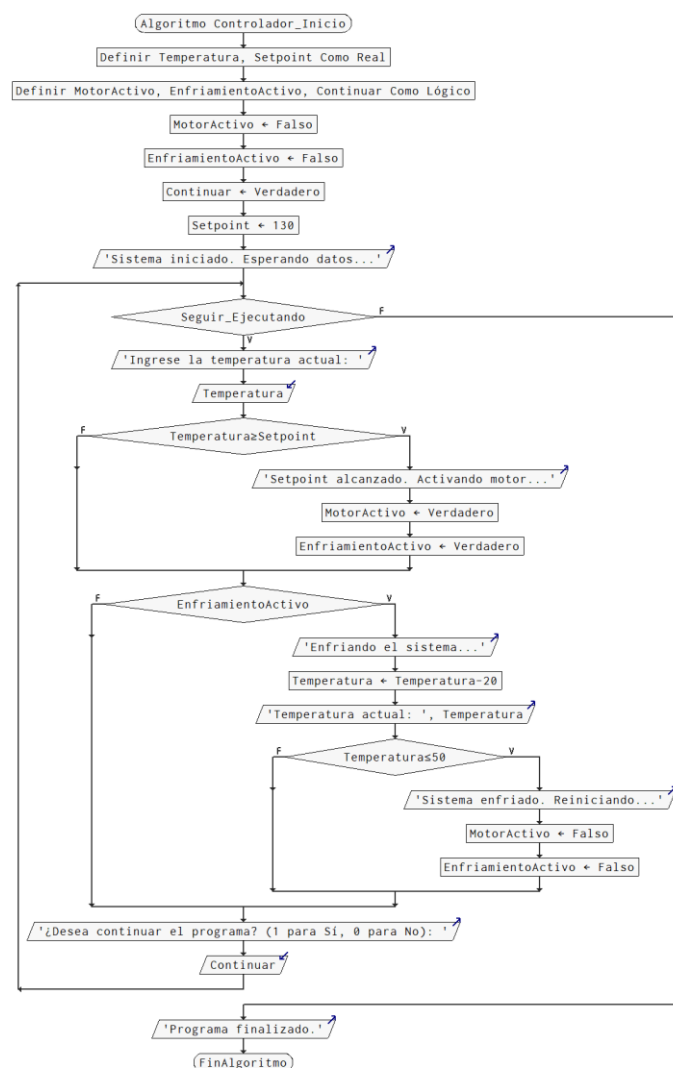


Figura 42. Diagrama de flujo de la ESP32.

3.8.2. Diagrama de flujo de la programación Arduino Mega para pantalla TFT Touch

En la Figura 43, se presenta el diagrama de flujo de la programación para la pantalla TFT Touch que va insertado al microcontrolador Arduino Mega.

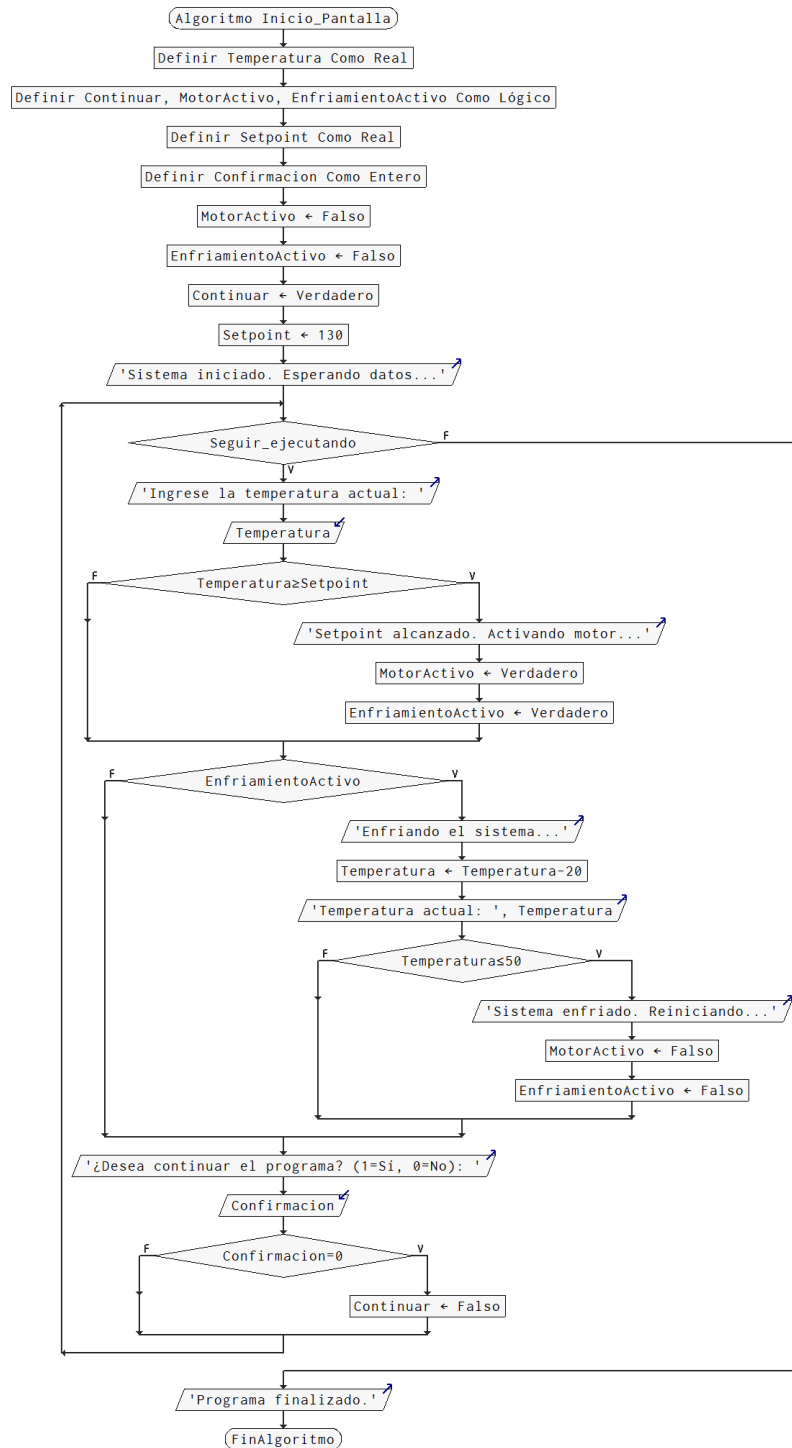


Figura 43. Diagrama de flujo del Arduino Mega.

3.8.3. Control PID de la temperatura en la resistencia de niquelina

En el diseño del control PID para el sistema de calentamiento de la resistencia, se considera que la variable de control $U(s)$ es el porcentaje de la potencia aplicada a la resistencia de niquelina, expresado en un rango de 0 a 100%. Esta selección se debe a que el actuador principal es el Triac, que regula la potencia mediante control por cruce de cero, ajustando el porcentaje de la onda senoidal aplicada. Por lo tanto, el escalón unitario utilizado en el control PID corresponde directamente al porcentaje de la potencia aplicada a la resistencia.

La variable controlada $Y(s)$ representa la temperatura medida por el sensor MAX6675, que sigue una curva de respuesta térmica de un sistema de calentamiento eléctrico. Dado que el comportamiento térmico del sistema es similar a un proceso de primer orden, se modela mediante una función de transferencia de primer orden, donde la temperatura responde a la potencia aplicada. Esto se debe a la acumulación gradual de energía térmica en la resistencia y el material a calentar, lo que genera un retraso inherente en la respuesta debido a la inercia térmica del sistema.

Por estas razones, se establece que:

- $U(s)$: El porcentaje de potencia aplicado, un escalón unitario de 0% a 100%.
- $Y(s)$: La temperatura medida, que sigue una curva de respuesta de primer orden.

En la Figura 44, se presenta la entrada $U1$ cambio escalón unitario del 0 al 100 % de la potencia y la salida $Y1$ de la temperatura medida en $^{\circ}\text{C}$ proporcionados por la toolbox de MATLAB Ident.

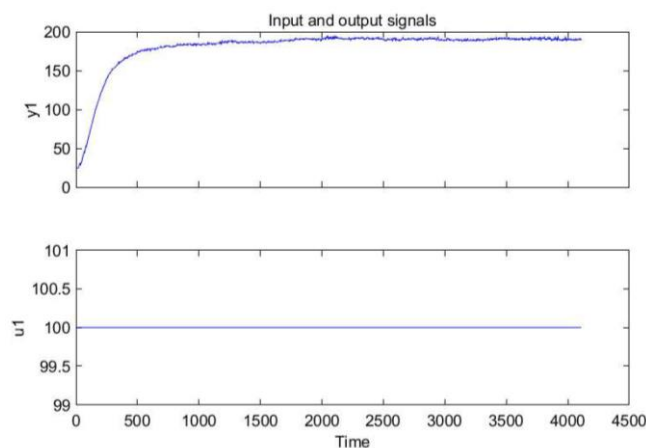


Figura 44. Entrada y Salida del sistema sobre tiempo en segundos.

En el sistema de control, el Triac actúa como un interruptor controlado que ajusta la potencia entregada a la resistencia de niquelina, cuya potencia nominal es de 200 W a 110 V AC. El Triac se controla mediante la técnica de disparo por cruce de cero, modulando el porcentaje de la potencia suministrada al variar el ángulo de disparo dentro del ciclo de la onda senoidal de corriente alterna (AC).

En la ecuación (41), se presenta la relación entre potencia, voltaje y corriente. Cuando se incrementa la potencia mediante el control del Triac, aumenta el voltaje eficaz y la corriente consumida, generando más calor.

$$P_{activa} = V_{rms} * I_{rms} * \cos(\phi) \quad (41)$$

Donde:

- P_{activa} : Potencia activa entregada a la resistencia [W].
- V_{rms} : Voltaje eficaz entregado después del disparo [V].
- I_{rms} : Corriente eficaz consumida [A].
- $\cos(\phi)$: Factor de potencia (aproximadamente 1 para una carga resistiva pura como la resistencia de niquelina).

En la ecuación (42), se presenta la relación directa entre la potencia y la temperatura que se modela como la respuesta temporal del sistema a un escalón unitario de entrada en el dominio del tiempo.

$$T_{(t)} = T_{\infty} * (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (42)$$

Donde:

$T_{(t)}$: Temperatura en el tiempo t [°C].

T_{∞} : Temperatura máxima alcanzada a potencia máxima [°C].

τ : Constante de tiempo térmica del sistema [s].

Para determinar los parámetros de control PID, primero se debe hallar la función de transferencia conociendo el parámetro de ganancia K y constante de tiempo térmica τ .

Por lo tanto en la ecuación (43), se deben pasar los datos experimentales de la temperatura que se tomaron con un tiempo de muestreo de 1 segundo a variables de desviación.

$$T_{desviación} = T_{actual} - T_{inicial} \quad (43)$$

$$T_{desviación} = T_{actual} - 25 [^{\circ}C]$$

Donde:

- $T_{desviación}$: Variables de desviación [$^{\circ}C$].
- T_{actual} : Temperatura que se toma en tiempo real [$^{\circ}C$].
- $T_{inicial}$: Temperatura inicial de los datos [$^{\circ}C$].

En la Figura 45, se presenta la curva de las variables de desviación, iniciando en el primer dato de temperatura en 0 $^{\circ}C$.

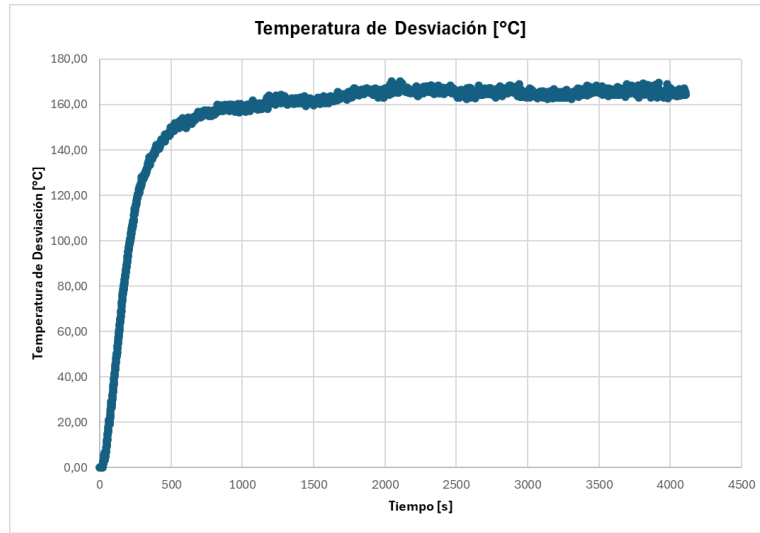


Figura 45. Temperatura de desviación vs Tiempo.

Para calcular la ganancia K, si la constante de tiempo avanza demasiado $t \gg \tau$ se dice en la ecuación (44), que la temperatura final de desviación es igual a $K\Delta_u$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K\Delta_u \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = K\Delta_u(1 - e^{-\infty}) = K\Delta_u(1 - 0) = K\Delta_u \quad (44)$$

Donde:

- $K\Delta_u$: Temperatura final de desviación [$^{\circ}C$].

Por lo que la ganancia del sistema se calcula despejando K como se muestra en la ecuación (45).

$$K = \frac{T_{final\ de\ desviación}}{\Delta_u} \quad (45)$$

$$K = \frac{165.25 [^{\circ}C]}{100 \%}$$

$$K = 1.6525 [^{\circ}C]$$

Donde:

- K : Ganancia del sistema [$^{\circ}C$].
- $T_{final\ de\ desviación}$: Temperatura de desviación [$^{\circ}C$].
- Δ_u : Cambio escalón de 0 a 100 [%].

Cuando la constante de tiempo $t = \tau$, se dice en la ecuación (46), que tau será igual al 63.2% de la ganancia $K\Delta_u$.

$$y'(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = K\Delta_u(1 - e^{-\infty}) = K\Delta_u(1 - 0.368) = K\Delta_u \quad (46)$$

$$y'(t) = 0.632 * K\Delta_u$$

$$y'(t) = 0.632 * 165.25 [^{\circ}C]$$

$$y'(t) = 104.438 [^{\circ}C]$$

Donde:

- $y'(t)$: Representa la derivada de la variable dependiente $y(t)$ con respecto al tiempo, indica la tasa de cambio instantánea de $y(t)$ respecto a t [$^{\circ}C$].
- τ : Constante de tiempo térmica del sistema [s].

En los datos experimentales de Excel, se busca en el tiempo cuando $y'(t) = 104.438$ $^{\circ}C$, teniendo como τ al 63.2% el tiempo de 223 segundos.

Para tener un τ y $y'(t)$ más ajustados para el modelo, se utiliza la ecuación (47), para poder ajustar la temperatura $y'(t)$ con los 223 segundos de τ .

$$y'(t) = K\Delta_u \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (47)$$

$$y'(t) = 1.6525 * 100 \left(1 - e^{-\frac{t}{223}}\right)$$

Donde:

- $y'(t)$: Tasa de cambio de temperatura [$^{\circ}C$].

En la ecuación (48), se presenta el cuadrado del error, donde se restan las variables de desviación por la tasa de cambio de temperatura $y'(t)$ en Excel.

$$e^2 = (T_{desviación} - y'(t))^2 \quad (48)$$

Donde:

- e^2 : Cuadrado del error [$^{\circ}\text{C}$].

Con el error calculado, en la ecuación (49), se presenta la sumatoria del error para luego usar la herramienta de Excel llamada Solver para minimizar el error de τ para tener una planta más precisa.

$$\sum e^2 = 801545.77 \quad (49)$$

Donde:

- $\sum e^2$: Sumatorio del error de todos los datos [a.d.].

Como resultado se obtiene que tau $\tau = 238.69$ y la ganancia $K = 1.6525$, se sustituyen estos valores en la ecuación (50), para obtener la función de transferencia de la planta de primer orden.

$$Y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} U(s) \quad (50)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1.6525}{238.69 s + 1}$$

Donde:

- s : Variable compleja en el dominio de Laplace, indica frecuencia compleja [s^{-1}].

En la Figura 46, se presenta la comparación de curvas de temperatura en donde TempC es la curva sin ajuste como se tomaron los datos y TempCAj es la curva de temperatura ajusta en lazo abierto para la función de transferencia en el dominio del tiempo en segundos.

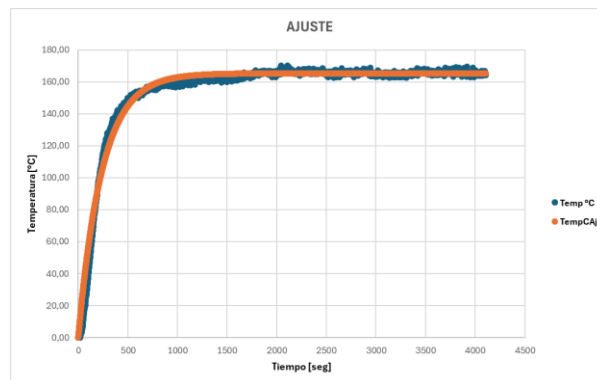


Figura 46. Temperatura ajustada de la toma de datos.

Para encontrar los parámetros de K_p , K_i , K_d , se lo realiza mediante las ecuaciones de sintonización por Ziegler y Nichols como se muestra en la TABLA 12.

Tabla 12. Tabla de parámetros de control por sintonización Ziegler y Nichols.

Controller	K_r	T_n	T_v
P-Controller	$\frac{T_s}{K_s * T_t}$	-	-
PI-Controller	$0,9 * \frac{T_s}{K_s * T_t}$	$3,33 * T_t$	-
PID-Controller	$1,2 * \frac{T_s}{K_s * T_t}$	$2,0 * T_t$	$0,5 * T_t$

En la ecuación (51), se presenta el cálculo para obtener el parámetro K_p para el dato en la programación de la ESP32.

$$K_p = 1.2 \frac{\tau}{KL} \quad (51)$$

$$K_p = 1.2 \frac{238.69}{1.6525 * 1}$$

$$K_p = 144.441$$

Donde:

- K_p : Representa la ganancia proporcional, que determina cuánto se ajusta la salida en función del error instantáneo.

En la ecuación (52), se presenta el cálculo para obtener el parámetro K_i para el dato en la programación de la ESP32.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (52)$$

$$K_i = \frac{K_p}{2L}$$

$$K_i = \frac{144.441}{2 * 1}$$

$$K_i = 72.221$$

Donde:

- K_i : Representa la ganancia integral, que ajusta la salida según la acumulación del error a lo largo del tiempo.

En la ecuación (53), se presenta el cálculo para obtener el parámetro K_d para el dato en la programación de la ESP32.

$$K_d = 0.105K_p * K_d \quad (53)$$

$$K_d = 0.105K_p * 0.5L$$

$$K_d = 144.441 * 0.5 * 1$$

$$K_d = 7.583$$

Donde:

- K_d : Representa la ganancia derivativa, que actúa sobre la tasa de cambio del error.

En la Figura 47, se presenta la respuesta temporal del sistema en lazo cerrado ante una entrada tipo escalón unitario obtenida por la toolbox de MATLAB, mostrando el comportamiento dinámico del sistema controlado mediante un controlador PID.

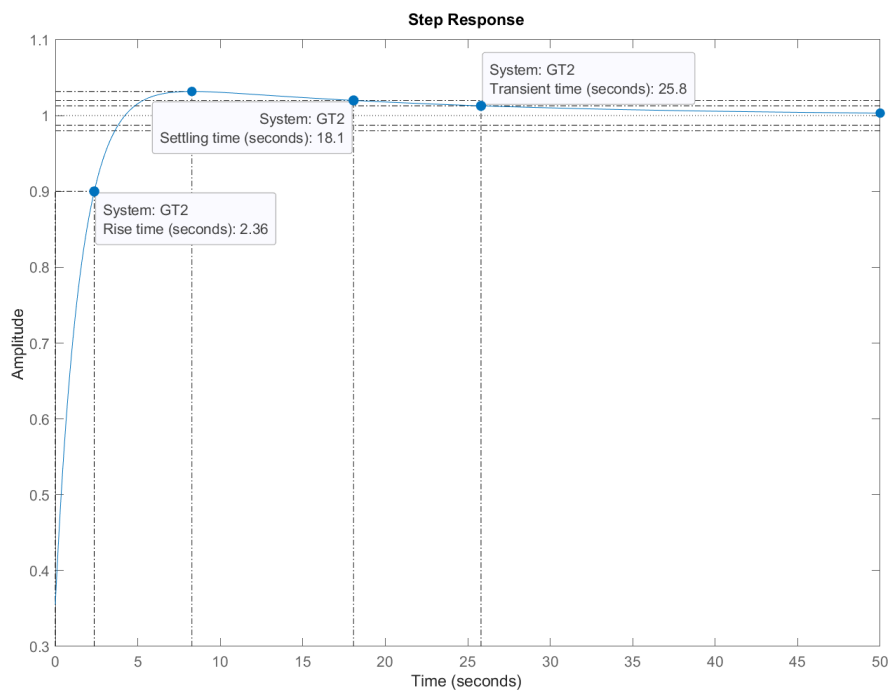


Figura 47. Control PID en lazo cerrado del sistema.

Finalmente, en la Tabla 13, se presentan las características del control PID de la figura anterior en lazo cerrado.

Tabla 13. Características del modelo Control PID en lazo cerrado.

Característica	Valor
Tiempo de subida (RiseTime)	2.36 segundos
Tiempo transitorio (TransientTime)	25 segundos
Tiempo de estabilización (SettlingTime)	18.1 segundos

3.8.4. Control del motor Nema 23 por Driver TB6600

Se presentan las ecuaciones junto con los cálculos para poder controlar el motor con la ayuda del Driver TB6600 y así poder girar el motor con una velocidad rpm y la configuración del controlador es 4600 pasos por revolución.

La ecuación (54), presenta la fórmula para calcular los pasos requeridos para alcanzar un ángulo específico y su ejemplo a 90°.

$$Steps_{Move} = \frac{Angle_{Target} - Current_{Angle}}{360} * Steps_{Revolution} \quad (54)$$

$$Steps_{Move} = \frac{Angle_{Target} - Current_{Angle}}{360} * 4600$$

Donde:

- $Steps_{Move}$: Número de pasos necesarios para mover el motor [pasos].
- $Angle_{Target}$: Ángulo objetivo en grados [°].
- $Current_{Angle}$: Ángulo actual en grados [°].
- $Steps_{Revolution}$: Número de pasos por revolución del motor en configuración microstep [pasos].

La ecuación (55), presenta la frecuencia de paso para la velocidad del motor, en donde la velocidad del motor en rpm determina el tiempo de retardo entre pasos, para un retardo fijo de 2000 μ s.

$$rpm = \frac{60 * 10^6}{delay * Steps_{Revolution}} \quad (55)$$

Donde:

- rpm : Velocidad del motor en revoluciones por minuto [rev/min].

- *delay*: Tiempo de retardo entre pasos [μ s].
- *Steps_{Revolution}*: Número de pasos por revolución del motor [pasos].

3.8.5. Manejo del equipo

El manejo del equipo diseñado en este proyecto, una máquina semiautomática para el doblado de láminas de acrílico involucra el uso adecuado de sus diversos componentes y sistemas integrados para garantizar un funcionamiento seguro, eficiente y preciso.

Este apartado describe las consideraciones necesarias para operar la máquina correctamente desde la preparación inicial hasta la finalización del proceso de doblado.

- **Preparación Inicial:** Antes de operar la máquina, es fundamental realizar una inspección previa de todos los componentes para asegurar que se encuentren en condiciones óptimas, también se debe verificar que la resistencia de niquelina tipo cartucho (110 V, 200 W) esté correctamente instalada y conectada al módulo dimmer que permite regular la potencia entregada de manera proporcional para el control de temperatura. Además, los ventiladores de 12 V deben estar funcionales para garantizar el enfriamiento de la máquina después del proceso de doblado.

El sistema incluye un panel de control compuesto por una pantalla TFT Touch conectada a un Arduino Mega y un ESP32 donde el operador puede ingresar parámetros como el ángulo de doblado y el espesor de la lámina. Es importante encender la máquina verificando que las luces indicadoras (verde y roja) estén operativas. La luz verde indica que la máquina está lista para operar mientras que la luz roja advierte sobre procesos en curso o condiciones específicas del sistema.

- **Configuración de Parámetros:** El operador debe interactuar con la pantalla TFT Touch para configurar los parámetros del proceso. En la primera pantalla se debe presionar el botón "CONTINUAR" (habiendo leído las indicaciones previamente) para proceder a la selección de los parámetros, después en la siguiente etapa el usuario ajustará el ángulo de doblado mediante un deslizador y seleccionará el espesor de la lámina de acrílico entre las opciones disponibles que incluyen valores desde 1.5 mm hasta 12 mm. Una vez definidos estos parámetros se presiona el botón "SIGUIENTE" para confirmar los valores ingresados.
- **Proceso de Doblar:** Cuando se han configurado los parámetros la máquina espera a que la temperatura del acrílico alcance el setpoint definido en función del espesor de la lámina. Este proceso es monitoreado a través del sensor MAX6675 que mide la

temperatura de la resistencia de niquelina, haciendo que el sistema utilice un controlador PID para ajustar dinámicamente la potencia entregada al triac mediante el módulo dimmer asegurando un calentamiento eficiente y uniforme.

Una vez alcanzada la temperatura adecuada se activa un temporizador de un minuto antes de iniciar el movimiento del motor paso a paso NEMA 23. Este motor controlado por un controlador TB6600 que mueve la tabla rotatoria hasta el ángulo configurado, mediante un sistema de pasos (6400 [pasos] por [revolución]).

- **Enfriamiento y Finalización:** Tras completar el doblado el sistema activa automáticamente los ventiladores de enfriamiento, lo que la temperatura del acrílico se reduce hasta niveles seguros evitando deformaciones indeseadas. El sistema supervisa la temperatura en tiempo real y si esta desciende por debajo de 50 °C los ventiladores se apagan automáticamente, además en caso de inactividad prolongada o si no se reciben datos del ESP32 durante un tiempo definido el sistema activa el Watchdog Timer para reiniciar el equipo y garantizar su estabilidad.
- **Seguridad Operativa:** La máquina está equipada con un botón de paro de emergencia que debe ser accesible en todo momento para detener inmediatamente cualquier operación en caso de una situación de riesgo, adicionalmente, se debe asegurar que la máquina esté conectada a una fuente de alimentación adecuada (110 V AC para la resistencia y un regulador LM2596 para los componentes de 12 y 5 V DC).

3.8.6. Diagrama de bloques de la pantalla TFT Touch

En la Figura 48 muestra el flujo de uso de la pantalla táctil TFT de la máquina dobladora de acrílico.

Al encender la máquina, se despliega una pantalla de bienvenida con instrucciones básicas, donde el usuario debe pulsar "Continuar" para avanzar.

Luego, se accede a la pantalla de configuración, donde se seleccionan el ángulo de doblado y el espesor de la lámina. Una vez ajustados los parámetros, se presiona "Siguiente" para confirmar los valores ingresados. En esta fase, si los datos son correctos, se presiona "Ejecutar" para iniciar el proceso de doblado, momento en el que la pantalla muestra el progreso del doblado y la temperatura actual de operación.

Si el usuario desea realizar ajustes antes de la confirmación final, puede pulsar "Cancelar" para regresar a la pantalla de selección de parámetros.

Sin embargo, una vez iniciado el proceso, los valores ya no se pueden cambiar hasta que finalice el ciclo y se regrese automáticamente al inicio.

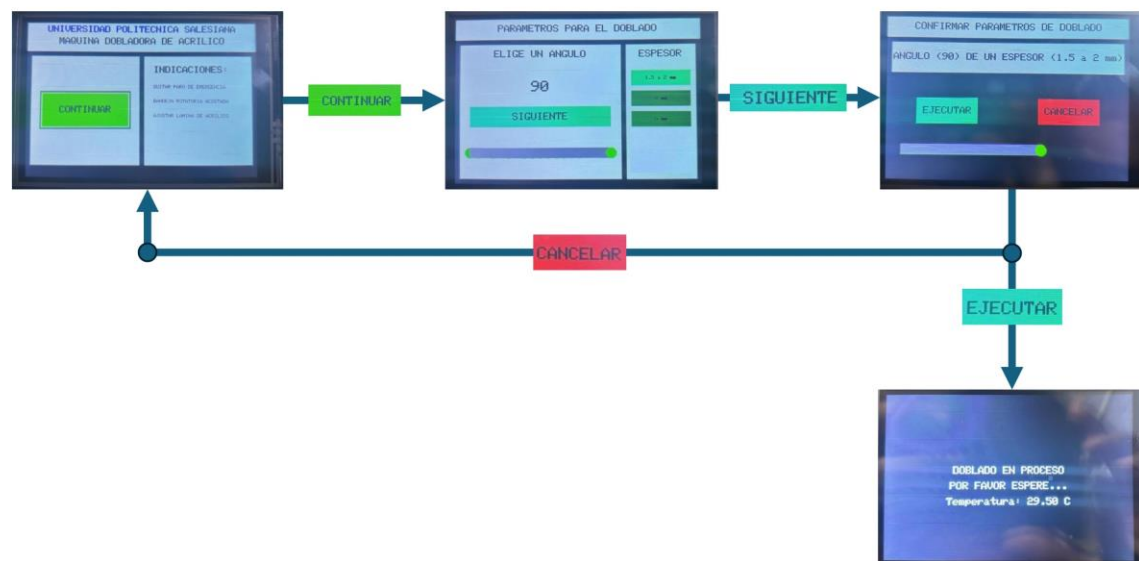


Figura 48. Diagrama de bloques para la pantalla TFT Touch.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo, se lleva a cabo las pruebas angulares a la que la lámina de acrílico de diferentes espesores llega a doblarse, así mismo como las pruebas de tiempo de calentamiento y enfriamiento para cada espesor. Posteriormente, se anexan los costos de construcción mecánica, eléctrica, electrónica y mano de obra de la máquina dobladora de acrílico.

4.1. Prueba 1: Ángulo de doblado de tres espesores

En esta sección se presenta una serie de figuras en donde se evidencia la posición angular a la que llega realmente la lámina de acrílico comparado con el ángulo ideal que se selecciona en la pantalla TFT Touch. En donde se utiliza un graduador digital para tomar el ángulo real.

En la Figura 49, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 2 mm a 25° , obteniéndose un ángulo real de 24.7° .



Figura 49. Medición con graduador a 25 grados para una lámina de 2 mm.

En la Figura 50, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 2 mm a 45° , obteniéndose un ángulo real de 44.6° .

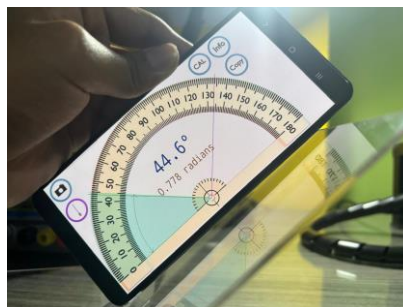


Figura 50. Medición con graduador a 45 grados para una lámina de 2 mm.

En la Figura 51, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 2 mm a 75°, obteniéndose un ángulo real de 76.3°.



Figura 51. Medición con graduador a 75 grados para una lámina de 2 mm.

En la Figura 52, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 2 mm a 90°, obteniéndose un ángulo real de 91.1°.

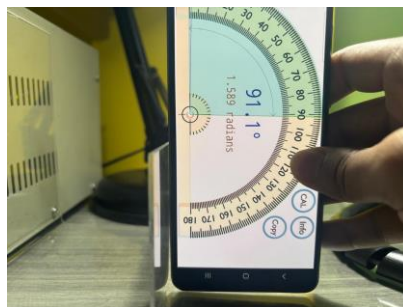


Figura 52. Medición con graduador a 90 grados para una lámina de 2 mm.

Para el espesor de 2 mm, los errores promedio obtenidos durante las pruebas de doblado fueron de 0.53° para un ángulo de 25°, 0.57° para un ángulo de 45°, 0.93° para un ángulo de 75° y 0.63° para un ángulo de 90°, sumando un total de 2.66°.

En la Figura 53, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 3 mm a 25°, obteniéndose un ángulo real de 26.1°.



Figura 53. Medición con graduador a 25 grados para una lámina de 3 mm.

En la Figura 54, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 3 mm a 45° , obteniéndose un ángulo real de 45.5° .

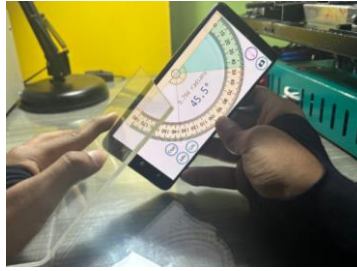


Figura 54. Medición con graduador a 45 grados para una lámina de 3 mm.

En la Figura 55, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 3 mm a 75° , obteniéndose un ángulo real de 75.7° .



Figura 55. Medición con graduador a 75 grados para una lámina de 3 mm.

En la Figura 56, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 3 mm a 90° , obteniéndose un ángulo real de 89.4° .

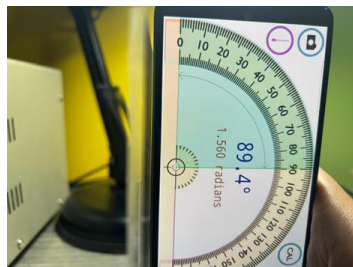


Figura 56. Medición con graduador a 90 grados para una lámina de 3 mm.

Para el espesor de 3 mm, los errores promedio calculados fueron similares a los del espesor de 2 mm, con valores cercanos para cada ángulo de prueba, asegurando errores de 0.53° , 0.57° , 0.93° y 0.63° para los ángulos de 25° , 45° , 75° y 90° , respectivamente, sumando un total de 2.66° .

En la Figura 57, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 5 mm a 25° , obteniéndose un ángulo real de 25.2° .



Figura 57. Medición con graduador a 25 grados para una lámina de 5 mm.

En la Figura 58, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 5 mm a 45° , obteniéndose un ángulo real de 44.6° .



Figura 58. Medición con graduador a 45 grados para una lámina de 5 mm.

En la Figura 59, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 5 mm a 75° , obteniéndose un ángulo real de 74.2° .

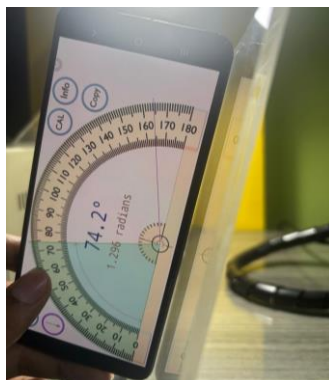


Figura 59. Medición con graduador a 75 grados para una lámina de 5 mm.

En la Figura 60, se presenta la prueba de posición angular real a la que se dobló una lámina de 5 mm a 90° , obteniéndose un ángulo real de 89.8° .

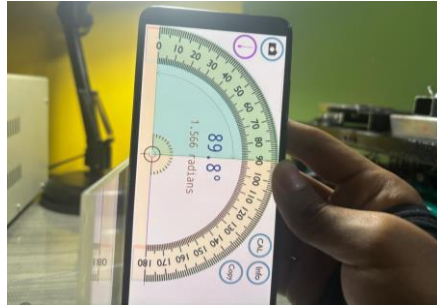


Figura 60. Medición con graduador a 90 grados para una lámina de 5 mm.

En el caso del espesor de 5 mm, los errores promedio reflejan resultados coherentes con los obtenidos en espesores menores, con valores de 0.53° , 0.57° , 0.93° y 0.63° para los ángulos de 25° , 45° , 75° y 90° , respectivamente, sumando un total de 2.66° .

4.1.1. Resultados angulares del doblado de lámina de acrílico

Para las pruebas realizadas, se consideró que el usuario de la máquina dobladora solo puede seleccionar ángulos de doblado en incrementos de 5 grados, por usos de ángulos comerciales. Por lo cual para esta prueba se selecciona 4 ángulos que se usan en la industria normalmente.

La Tabla 14, presenta los resultados de cada espesor de lámina de acrílico transparentes de la prueba anterior.

Tabla 14. Resultados angulares del doblado para lámina de acrílico.

Espesor	Primer ángulo a	Segundo ángulo	Tercer ángulo a	Cuarto ángulo a
mm	25°	a 45°	75°	90°
2	24.7	44.2	76.3	91.1
3	26.1	45.5	75.7	89.4
5	25.2	44.6	74.2	89.8

El error promedio de los ángulos medidos en la máquina dobladora de acrílico es el siguiente:

- **Para el primer ángulo de 25° :** el error promedio es de 0.53° .
- **Para el segundo ángulo de 45° :** el error promedio es de 0.57° .
- **Para el tercer ángulo de 75° :** el error promedio es de 0.93° .
- **Para el cuarto ángulo de 90° :** el error promedio es de 0.63° .

Estos valores indican que las diferencias entre los ángulos objetivo y los resultados obtenidos son mínimas, lo que demuestra un desempeño consistente del sistema de doblado.

4.2. Prueba 2: Tiempo de calentamiento y enfriamiento de tres espesores

En este apartado se describe el tiempo de calentamiento y enfriamiento de láminas de acrílico de diferentes espesores, considerando los valores típicos utilizados en la industria para procesos de doblado, se analiza el tiempo estimado para alcanzar la temperatura adecuada de conformado y el tiempo necesario para que el material se enfríe a una temperatura segura, tomando en cuenta la eficiencia del calentamiento proporcionado por la resistencia eléctrica y la ventilación aplicada, esta información permite ajustar parámetros operativos según el espesor del material para mejorar el rendimiento del proceso y asegurar la calidad en el doblado final.

La Tabla 15, presenta los tiempos registrados de calentamiento y enfriamiento para láminas de acrílico de diferentes espesores.

Tabla 15. Tiempo de calentamiento y enfriamiento.

Espesor mm	Tiempo de calentamiento [minutos]:[segundos]	Tiempo de enfriamiento [minutos]:[segundos]
2	3:15	2:13
3	4:23	2:20
5	5:25	2:45

Los resultados muestran que, aunque el tiempo de calentamiento aumenta con el espesor de la lámina, los tiempos registrados, incluso para espesores mayores, no representan una espera prolongada, ya que el tiempo total, sumando calentamiento y enfriamiento, es relativamente corto, con un máximo de 8 minutos y 10 segundos para las láminas de 5 mm, lo que demuestra que el material doblado está listo en un periodo de tiempo eficiente para el proceso.

4.3. Costos de construcción de la máquina dobladora de acrílico

En este apartado se desglosan los costos de construcción de la máquina dobladora de acrílico en tres secciones: elementos mecánicos, elementos eléctricos y sistemas electrónicos, detallando los componentes principales y el costo total del proyecto.

4.3.1. Costos de elementos mecánicos

La Tabla 15 muestra los costos generales de los componentes mecánicos utilizados en la construcción del prototipo. Estos elementos fueron seleccionados para cumplir con las necesidades estructurales y funcionales del diseño, asegurando un desempeño adecuado del sistema.

Tabla 16. Tabla de costos elementos generales.

Cantidad	Elemento	Precio unitario	Precio Total
		USD	USD
1	Mesa	35.00	25.00
4	Ángulo Bandeja Base	1.00	4.00
2	Ángulo Bandeja de Apoyo	1.00	2.00
1	Bandeja Base	125.00	125.00
1	Bandeja de Apoyo	40.00	40.00
1	Ángulo Estático	25.00	25.00
1	Ángulo Rotatorio	25.00	25.00
1	Bandeja Rotatoria	20.35	20.35
1	Tablero	80.00	80.00
1	Tapa del Tablero	10.00	10.00
1	Piñón de Ángulo Rotatorio	15.00	15.00
1	Piñón del Motor	15.00	15.00
1	Soporte del Motor	15.00	15.00
1	Soporte de Termocupla	1.00	1.00
1	Tapa del Panel	0.50	0.50
1	Panel	5.00	5.00
1	Platina de fijación	3.50	3.50
1	Tubo cuadrado de fijación	4.50	4.50
30	Tornillos M3	0.05	1.50
16	Tornillos M6	0.15	2.40
		Total	429.75

4.3.2. Costos de elementos eléctricos y electrónicos.

En la Tabla 16 se presentan los costos asociados a los materiales eléctricos y electrónicos requeridos para el funcionamiento del prototipo. Estos componentes fueron elegidos por su compatibilidad con el diseño y por aportar el correcto desempeño del sistema.

Tabla 17. Tabla de costos elementos eléctricos y electrónicos.

Cantidad	Elemento	Precio unitario	Precio Total
		USD	USD
1	MAX 6675	7,50	7.50
20	Terminales	3.00	60.00
1	Fusible	0.50	0.50
1	Cable de Poder	2.75	2.75
1	ESP 32 Pin 38	10.25	10.25
1	Módulo Dimmer AC	20.00	20.00
30	Separador M3	0.25	7.50
1	Bornera 5 A	1.50	1.50
1	6 m Cable #14 Verde	3.00	3.00
1	6 m Cable #14 Rojo	3.00	3.00
1	6 m Cable #14 Negro	3.00	3.00
1	3 m cable de UTP	2.00	2.00
1	2 m Cable #14 Azul	1.00	1.00
1	Paro de emergencia	4.50	4.50
2	Ventilador de 40 mm	3.00	6.00
1	PCB del ESP32	10.00	10.00
1	Borneras de 2 canales	5.50	5.50
1	Arduino Mega	27.00	27.0
1	Pantalla TFT Touch	26.50	26.5
2	Luz Piloto de 12 V	1.15	2.30
1	Módulo Relé 4 canales	5.00	5.00
3	Regleta Hembra	1.00	3.00
1	Resistencia Niquelina	20.00	20.00
2	Step Down de 24 V	10.00	20.00

1	Fuente de poder	15.00	15.00
1	Motor NEMA 23	60.00	60.00
1	Controlador TB6600	23.00	23.00
1	Interruptor con enchufe	3.00	3.00
Total			352.80

4.3.3. Costos de mano de obra.

La Tabla 17 incluye los costos estimados de la mano de obra necesaria para el desarrollo del prototipo. Se consideraron las horas de trabajo dedicadas al diseño, ensamblaje y ajustes, utilizando referencias estándar de costos laborales.

Tabla 18. Tabla costos de mano de obra

Horas de trabajo	Trabajo	Precio unitario	Precio Total
Hora		USD	USD
20	Diseño mecánico y simulación	2.00	40.00
35	Diseño eléctrico y electrónico	2.00	70.00
50	Construcción y ensamblaje	1.80	90.00
Total			200.00

4.3.4. Costo total de la máquina.

En la Tabla 18 se resumen los costos totales del proyecto, incluyendo materiales mecánicos, eléctricos y electrónicos, así como la mano de obra. Este desglose general ofrece una visión clara del presupuesto necesario para la fabricación del prototipo.

Tabla 19. Tabla de costos total.

Descripción	Precio unitario USD
Costos de construcción mecánica	429.75
Costos de la construcción eléctrica y electrónica	352.80
Costos de la mano de obra	200.00
Total	982.55

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se presentan las conclusiones principales del proyecto, junto con algunas recomendaciones generales que pueden ser útiles para trabajos similares en el futuro.

CONCLUSIONES

- Este proyecto permitió el desarrollo de una máquina semiautomática para el doblado de láminas de acrílico transparente, con un diseño enfocado en facilitar el trabajo en talleres y pequeñas empresas. La automatización de este proceso permite minimizar el error humano mejorando la calidad del producto, optimizando el tiempo y permitiendo conservar la integridad del material, lo cual contribuye a un mejor aprovechamiento de los recursos y a un flujo de trabajo más eficiente.
- El diseño estructural de la máquina dobladora de acrílico garantiza su resistencia y estabilidad para el proceso de doblado, respaldado por un factor de seguridad teórico de 22 y simulado en SolidWorks de 35, con deformaciones menores a 0.05 mm. Estos valores aseguran que la estructura puede soportar las cargas y las exigencias operativas sin comprometer su integridad.
- Para lograr un calentamiento controlado de la niquelina, que consume una potencia de 200 W, se utilizó un controlador PID con los valores de $K_p=144.44$, $K_i=72.22$ y $K_d=7.58$. Con esta configuración, se obtuvieron tiempos de asentamiento (T_s) de 18.1 segundos y un tiempo de respuesta (T_r) de 2.36 segundos. Estos resultados indican que, aunque el sistema presenta una respuesta relativamente lenta, el controlador PID logra estabilizar la temperatura con un error inferior al 5%, asegurando un control eficiente para el calentamiento del acrílico transparente.
- Las pruebas confirmaron que la máquina permite doblar acrílico de 2 mm, 3 mm y 5 mm en tiempos de 3:15 [min:seg], 4:23 [min:seg] y 5:25 [min:seg], respectivamente, sin daños a la materia prima. Lo cual demuestra un funcionamiento eficiente en relación con el tiempo y a la conservación del acrílico.

RECOMENDACIONES

- Antes de utilizar la máquina, se debe verificar que la tapa giratoria y la estructura principal estén correctamente apoyadas sobre una superficie plana y estable, lo cual evitará movimientos inesperados durante el uso y garantizará un funcionamiento más seguro y fluido.
- Es recomendable realizar pruebas regulares con láminas de acrílico transparente de diferentes tamaños y espesores para identificar posibles ajustes en el tiempo de calentamiento y enfriamiento. Esto contribuirá a mejorar el rendimiento del sistema y a mantener un proceso de doblado más controlado, independientemente de las características del material utilizado.
- Considerar la posibilidad de ajustar los incrementos de ángulo para adaptarse a necesidades específicas. Reducir el intervalo de ajuste podría ampliar las opciones de doblado disponibles, lo que permitiría un uso más versátil de la máquina sin comprometer sus funciones básicas. Además, si en el futuro se busca utilizar la máquina con láminas de otros tipos de acrílico, como los de colores o acabados distintos, sería necesario mejorar los componentes de control de temperatura y reforzar la estructura para mantener un desempeño adecuado con estos materiales más variados.

REFERENCIAS

- [1] S. J. A., "Diseño y automatización de un sistema de control de temperatura para el proceso de termoformado de plásticos," Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2019.
- [2] S. Machines, "Acrylic Bending Machine Overview."
- [3] A. López, "Diseño y Construcción de una Máquina para Doblado de Materiales Termoplásticos," Tesis de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, 2020.
- [4] D. Kim y J. Park, "Control systems for precise bending angles in industrial forming processes," *International Journal of Forming Processes*, vol. 142, no. 7, pp. 1–12, 2020.
- [5] Juanabrild, "Aplicación de las Láminas de Acrílico Transparente | Fullcons," [En línea]. Disponible en: <https://fullcons.com.ec/blog/aplicaciones-del-acrilico-transparente/>. [Accedido: 27 de octubre de 2024].
- [6] D. W. González, A. O. Castañeda, S. C. Esparza, y L. I. López, "POLI(METACRILATO DE METILO): UN TERMOPLÁSTICO BIOCOMPATIBLE. DIVERSAS APLICACIONES," 2021.
- [7] L. A. Smith, "Thermal properties of PMMA and temperature impact on flexibility," *Polymer Journal*, vol. 52, no. 4, pp. 129–136, abr. 2021.
- [8] A. D. Harris y M. L. Kent, "Temperature parameters for acrylic bending," *Journal of Thermoforming Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 45–50, feb. 2022.
- [9] C. Young, "Heat Distribution in Acrylic Sheets," *Thermal Engineering Review*, vol. 29, no. 1, pp. 101–110, ene. 2023.
- [10] T. H. Brown, *Advanced Acrylic Manipulation Techniques*, 3a ed., Pearson, 2019.
- [11] R. F. Lee, "Optimal cooling methods for thermoplastics," *Journal of Industrial Cooling Systems*, vol. 31, pp. 215–222, mayo 2020.
- [12] "Vical Acrílicos," [En línea]. Disponible en: <http://vicalsa.com.ar/propiedades-fisicas.html>. [Accedido: 24 de octubre de 2024].
- [13] K. Patel, "Modern Heat-Forming Techniques for Acrylics," *Heat Engineering Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 34–43, 2019.

- [14] "Máquina plegadora servo completamente eléctrica," PrimaPress, [En línea]. Disponible en: <https://www.prima-press.com/es/LOS-PRODUCTOS/M%C3%A1quina-dobladora>. [Accedido: 24 de octubre de 2024].
- [15] "Herramienta Dobladora De Acrílico 1.25 M Calentadora Pvc," MercadoLibre, [En línea]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.mx>. [Accedido: 24 de octubre de 2024].
- [16] "Prensa térmica serie TP - Secabo TP10," [En línea]. Disponible en: <https://www.secabo.com>. [Accedido: 27 de octubre de 2024].
- [17] A. Brown, "Innovaciones en calefacción por infrarrojos para plásticos," *Rev. Ing. Polímeros*, vol. 41, pp. 58–67, 2021.
- [18] A. Copco, "¿Cómo se transfiere el calor? - Atlas Copco Ecuador," [En línea]. Disponible en: <https://www.atlascopco.com/es-ec/compressors/wiki>. [Accedido: 24 de octubre de 2024].
- [19] "Transferencia de Calor - Concepto, tipos, aislantes y medidas," Concepto.de, [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/transferencia-de-calor/>. [Accedido: 24 de octubre de 2024].
- [20] "Coeficiente de transferencia de calor del acrílico: propiedades y cálculo | POLISANTAFE," [En línea]. Disponible en: <https://polisantafe.com.ar/coeficiente>. [Accedido: 24 de octubre de 2024].
- [21] "Cinta Nicrom 8020, nicromel," [En línea]. Disponible en: <http://www.teii.com.mx/cinta-nicrom.html>. [Accedido: 28 de octubre de 2024].
- [22] "Niquelina Calentador para extrusor 12V 40W – Novatronic," [En línea]. Disponible en: <https://novatronic.com>. [Accedido: 28 de octubre de 2024].
- [23] "Resistencia eléctrica tipo Cartucho," OHMTRONICS, [En línea]. Disponible en: <https://www.ohmtronics.com>. [Accedido: 25 de octubre de 2024].
- [24] G. N. Smith, *Introduction to Industrial Heating Elements*, 2nd ed., London, UK: Wiley, 2017.
- [25] S. A. Sandoval Godoy, A. Covarrubias V., y A. Covarrubias V., Eds., *Rumbo al auto del futuro: innovación, sistemas de calidad y trabajo en la industria automotriz de México*, 1ra ed., México, D.F.: AM Editores, 2017.

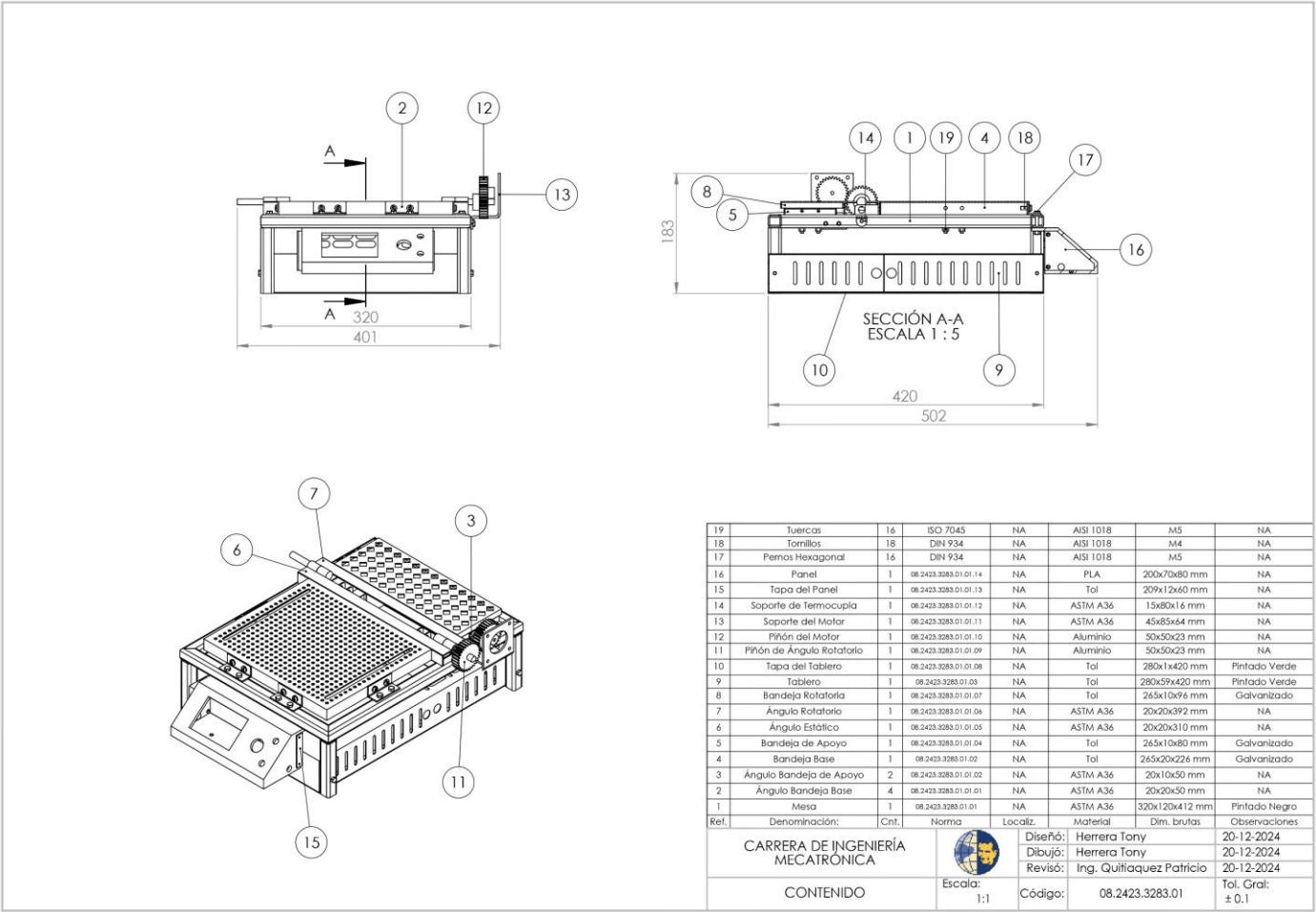
- [26] S. A. C. Giraldo, "Como Hacer un Control PID Arduino de Temperatura," Control Automático Educación, [En línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com>. [Accedido: 25 de octubre de 2024].
- [27] 330ohms, "¿Qué es un control PID?," [En línea]. Disponible en: <https://www.330ohms.com>. [Accedido: 6 de noviembre de 2024].
- [28] J. E. O. Bonilla, "Control PID de un Sistema de Temperatura," Academia.edu, [En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [29] "Norma de seguridad funcional EN ISO 13849-1 (PL)," Pfannenberger, [En línea]. Disponible en: <https://www.pfannenberger.com/es>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [30] Eurolab, "IEC 60204 Seguridad de maquinaria - Equipo eléctrico de máquinas," [En línea]. Disponible en: <https://www.eurolab.net/es>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [31] "Aislantes térmicos | ¿Qué son y para qué sirven?," [En línea]. Disponible en: <https://puertasasturmex.com/blog/aislantes-termicos>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [32] "Fusibles | ¿Qué son, para qué sirven, cómo funcionan, tipos?," [En línea]. Disponible en: <https://sdindustrial.com.mx/blog/fusibles/>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [33] "Indicadores LED - luz indicadora," [En línea]. Disponible en: <https://es.indicatorlight.com/led-indicators/>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [34] "Señales de operación de máquinas," [En línea]. Disponible en: <https://www.bradyid.com.mx/senales-de-seguridad/maquina>. [Accedido: 29 de octubre de 2024].
- [35] L. P. Morales y J. D. Silva, "Real-time Control Using ESP32 in Industrial Systems," *Int. J. Mechatron. Autom.*, vol. 6, no. 2, pp. 84–93, 2019.
- [36] J. B. Aragonés et al., "Sensores de Temperatura," *Journal de Electrónica Aplicada*, 2020.
- [37] "NEMA 23 Motores a pasos – Mouser Ecuador," [En línea]. Disponible en: <https://www.mouser.ec/c/electromechanical>. [Accedido: 11 de diciembre de 2024].
- [38] "TB6600 Stepper Motor Driver," [En línea]. Disponible en: <https://tb6600docs.com>.
- [39] "Dobladora Metacrilato 130 Xlam | Soluciones Digit," [En línea]. Disponible en: <https://www.solucionesdigit.com/accesorios/dobladora-metacrilato>. [Accedido: 10 de noviembre de 2024].

- [40] "Hoja de máquina de doblado Manual," Made-in-China.com, [En línea]. Disponible en: <https://es.made-in-china.com>. [Accedido: 10 de noviembre de 2024].
- [41] "Prensa de calor manual 40x50 con placa desmontable," CPL Fabbrika España, [En línea]. Disponible en: <https://es.cplfabbrika.com>. [Accedido: 10 de noviembre de 2024].
- [42] J. E. Shigley et al., *Mechanical Engineering Design*, 9th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- [43] R. L. Norton, *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*, 6th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2020.
- [44] P. M. Kurowski, *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation*, Schroff Development Corporation, 2019.
- [45] A. Bejan y A. D. Kraus, *Heat Transfer Handbook*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.
- [46] J. H. Black y R. E. Sonntag, *Fundamentals of Machine Design*, Boston, MA, USA: PWS-Kent Publishing, 1990.
- [47] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015.
- [48] D. Shetty y R. A. Kolk, *Mechatronics System Design*, 2nd ed., Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2010.
- [49] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.
- [50] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 12th ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2011.
- [51] J. C. Villajulca, "Empezando: Sintonización PID Cuantitativa (Ziegler y Nichols)," Instrumentación y Automatización Industrial, [En línea]. Disponible en: <https://instrumentacionycontrol.net>. [Accedido: 13 de diciembre de 2024].

ANEXOS

ANEXO 1

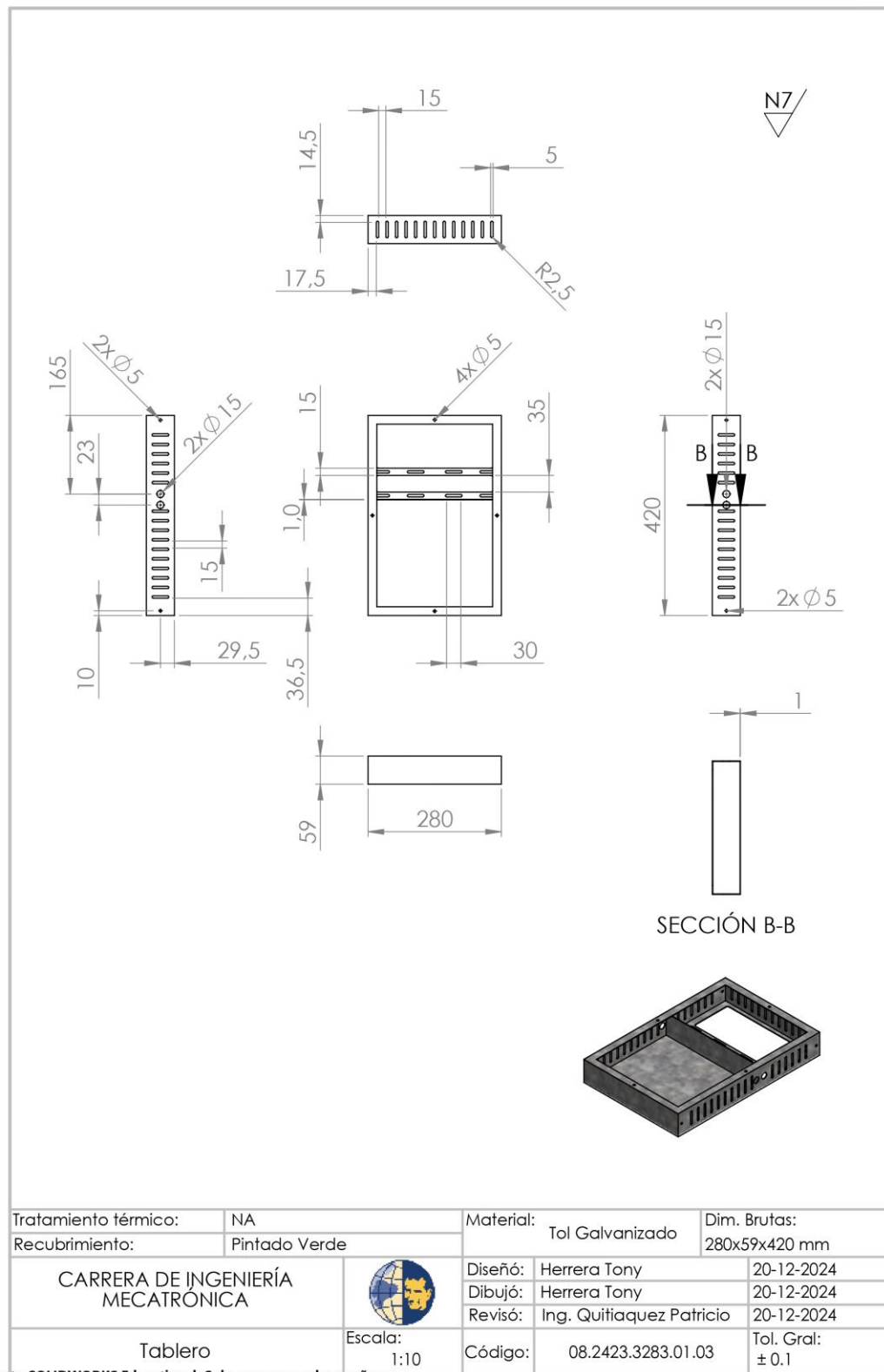
El Anexo 1, presenta la vista explosionada del ensamble completo de la máquina.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

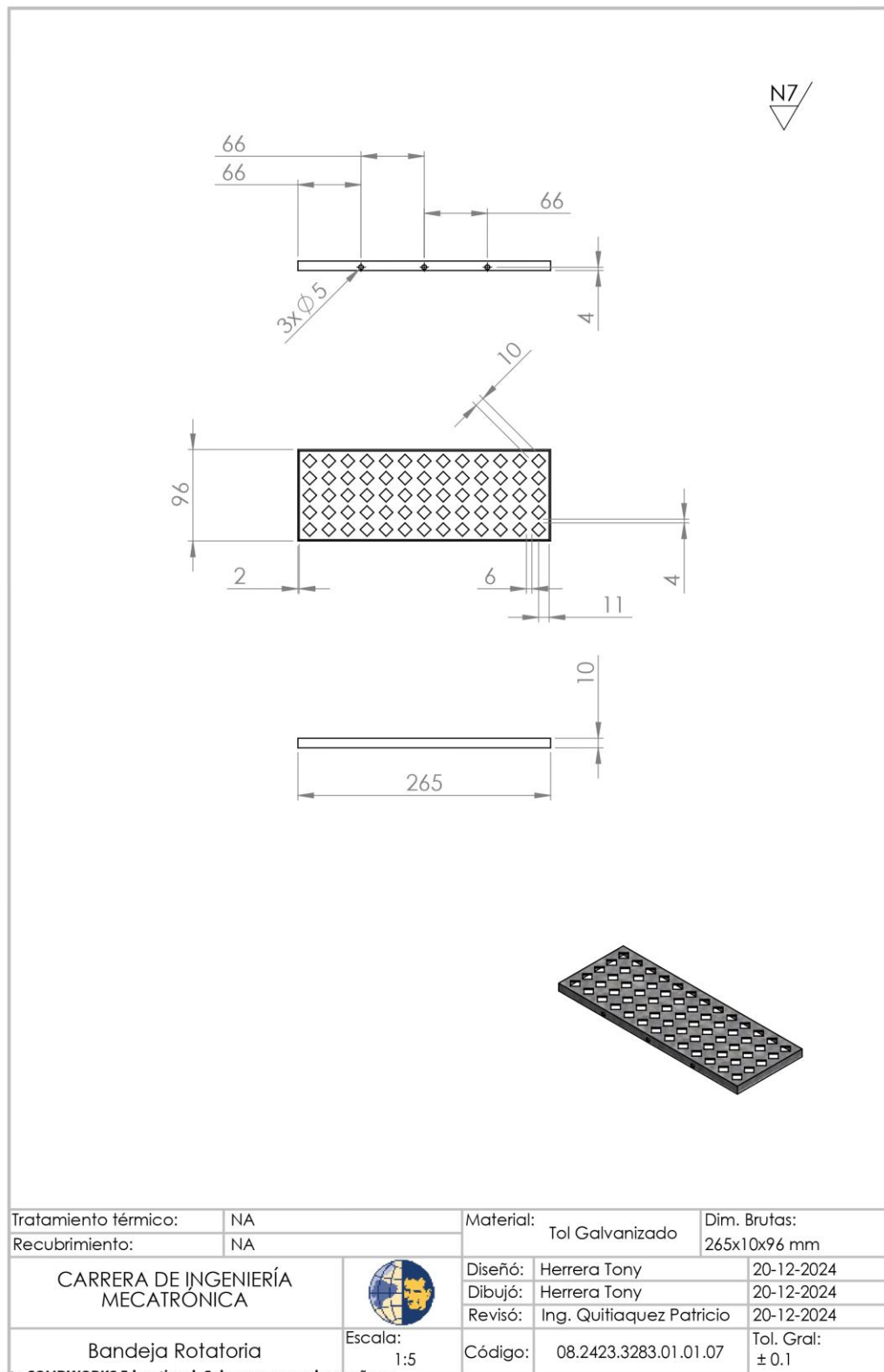
ANEXO 2

El Anexo 2, presenta el plano de pieza del Tablero eléctrico donde se insertan la mayoría de los componentes electrónicos.



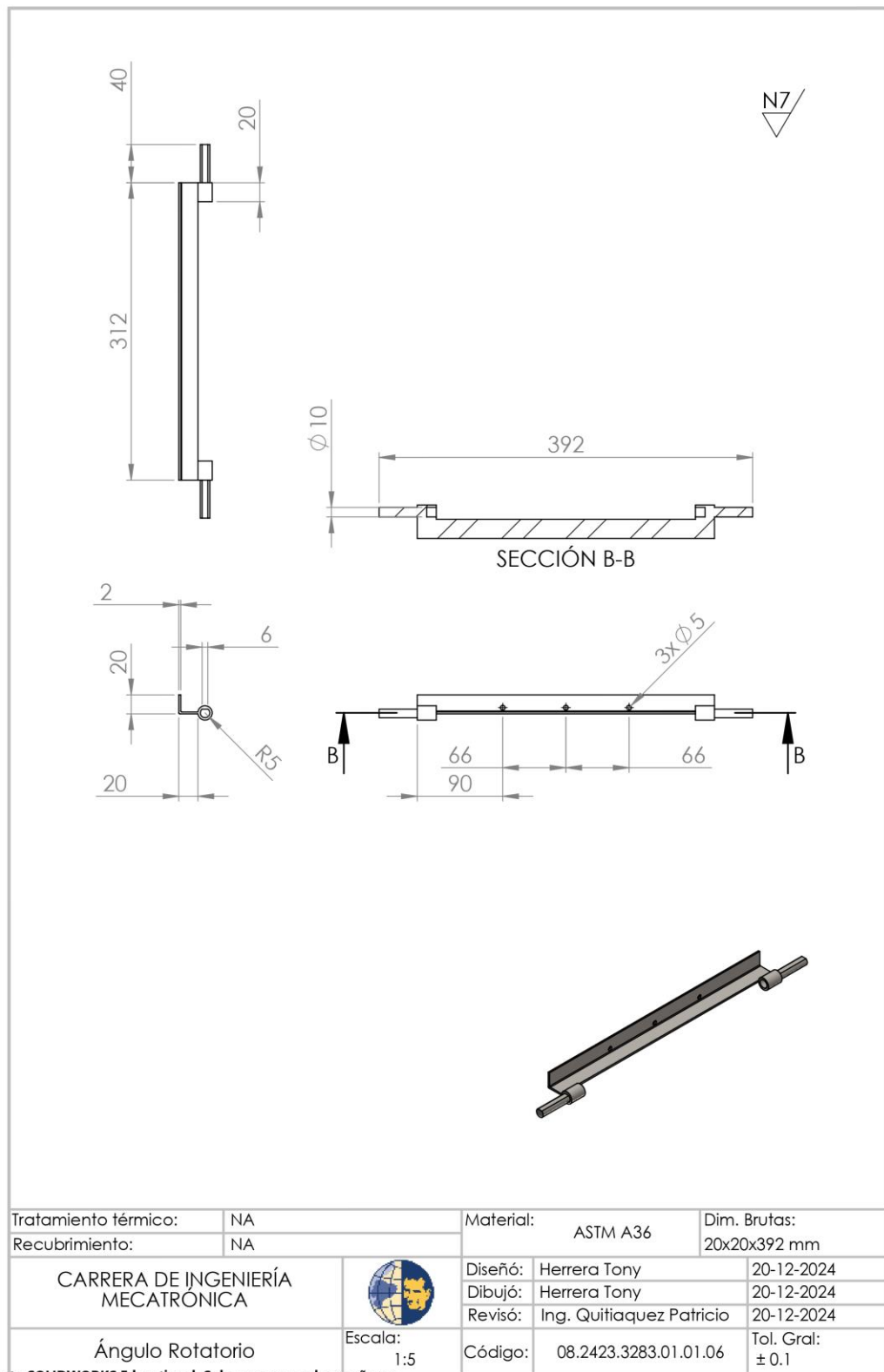
ANEXO 3

El Anexo 3, presenta el plano de pieza de la Bandeja Rotatoria que rota junto con el Ánulo Rotatorio.



ANEXO 4

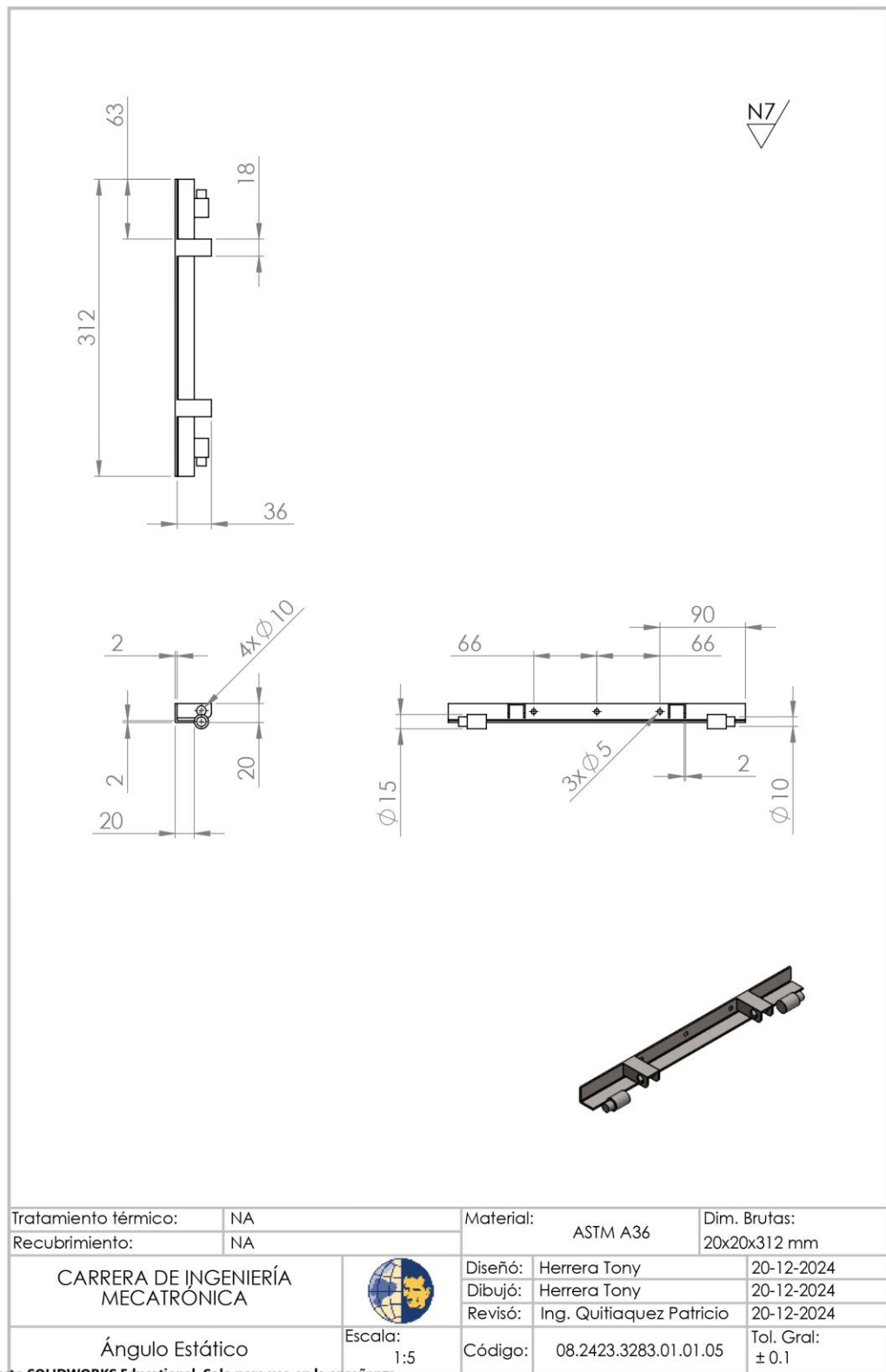
El Anexo 4, presenta el plano de pieza del Ángulo Rotatorio que gira junto con la Bandeja Rotatoria.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

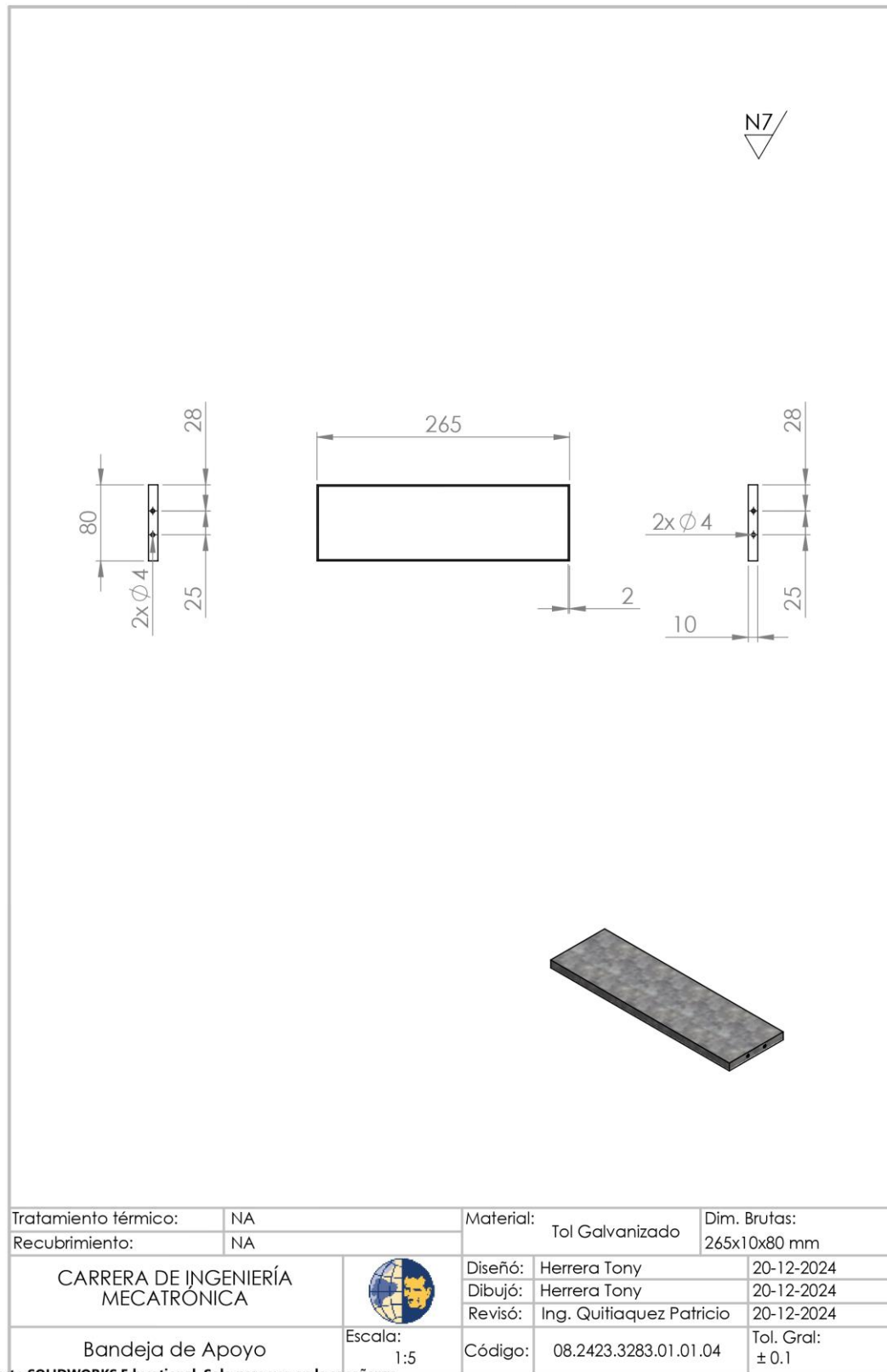
ANEXO 5

El Anexo 5, presenta el plano de pieza del Ángulo Estático que tiene conexión con el Ángulo Rotatorio por sus bisagras unidas.



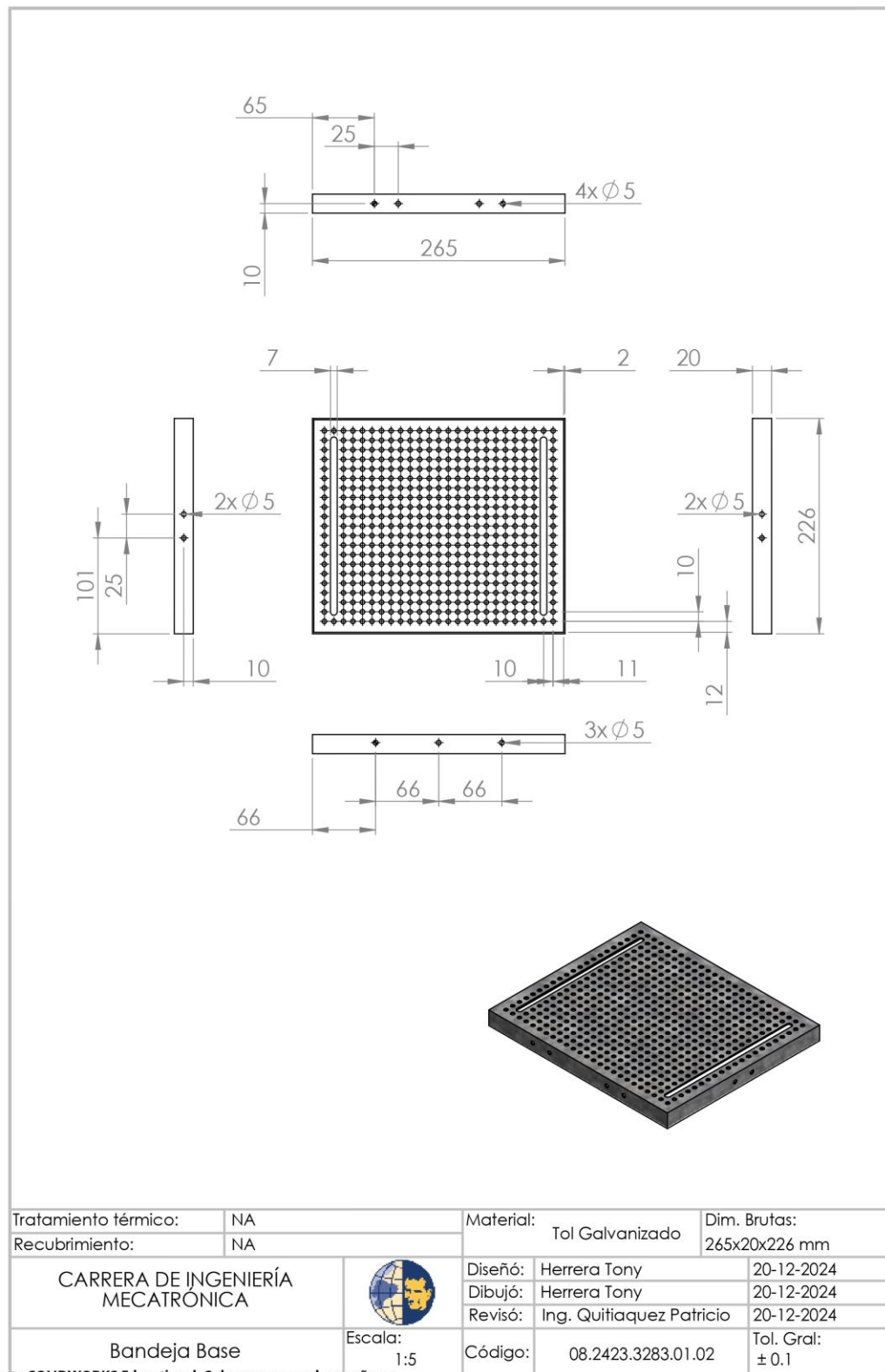
ANEXO 6

El Anexo 6, presenta el plano de pieza de la Bandeja de Apoyo para la Bandeja Rotatoria.



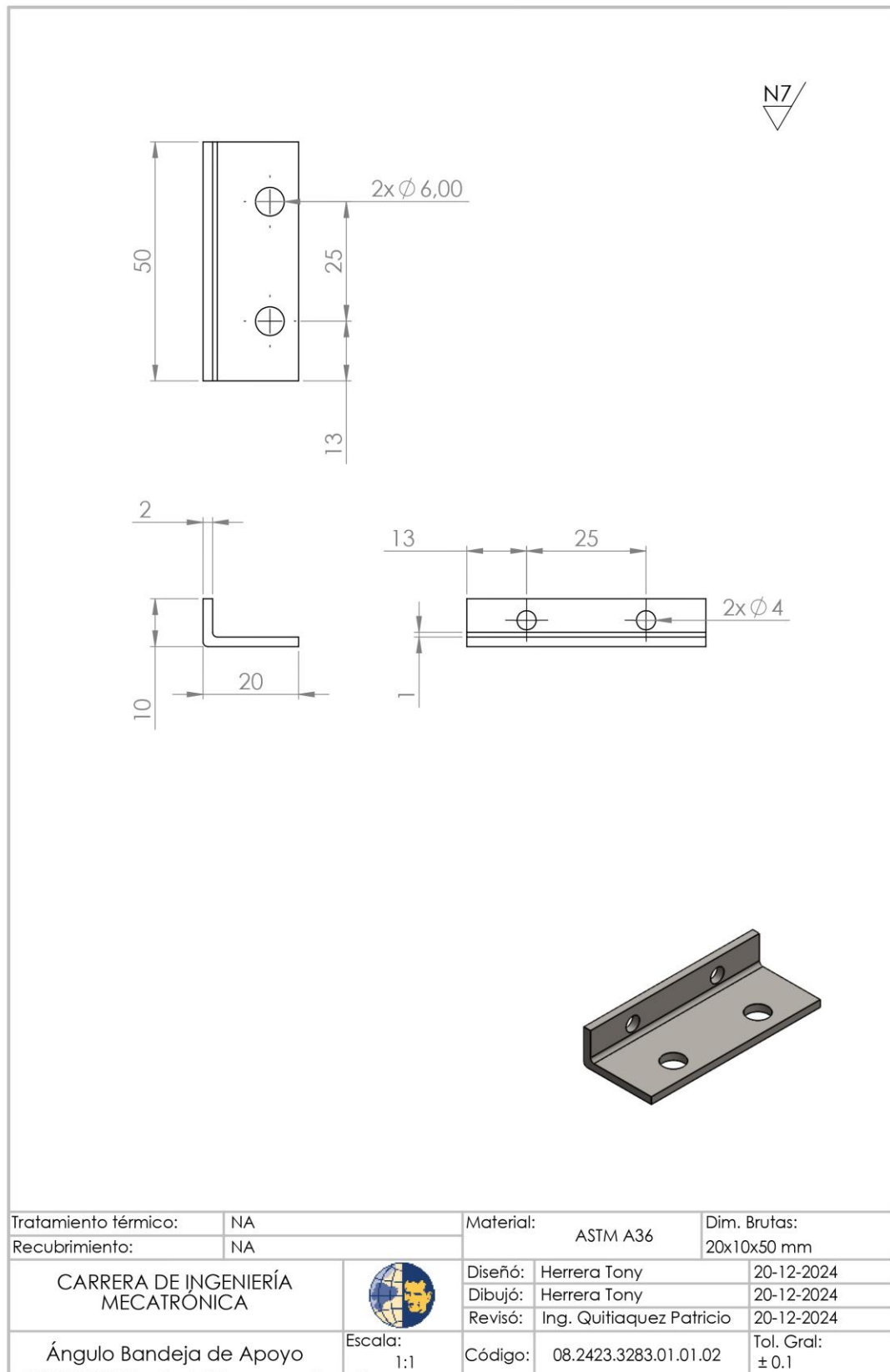
ANEXO 7

El Anexo 7, presenta el plano de pieza de la Bandeja Base donde se ajusta y apoya el material de acrílico transparente.



ANEXO 8

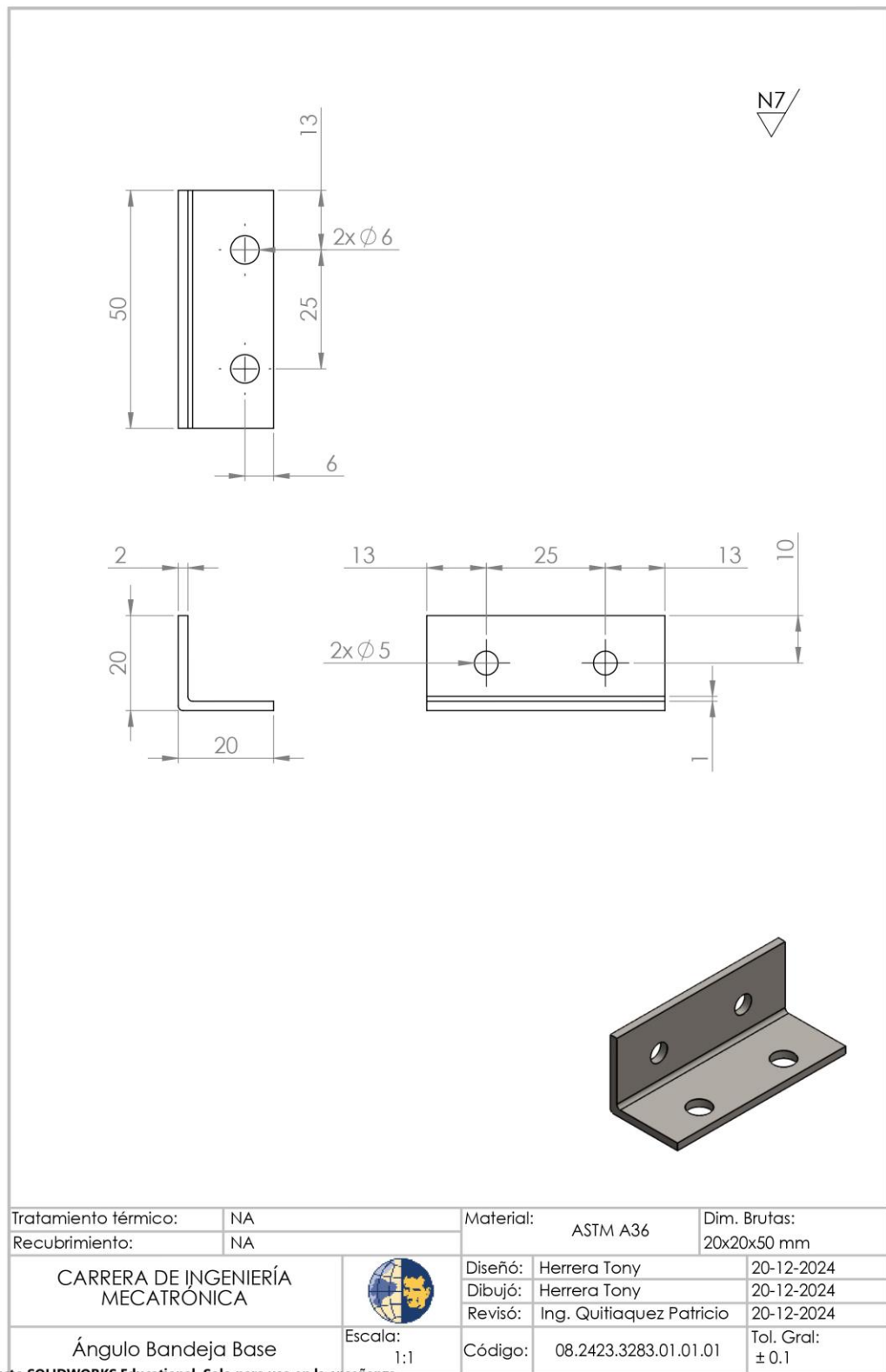
El Anexo 8, presenta el plano de pieza del Ángulo Bandeja de Apoyo.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

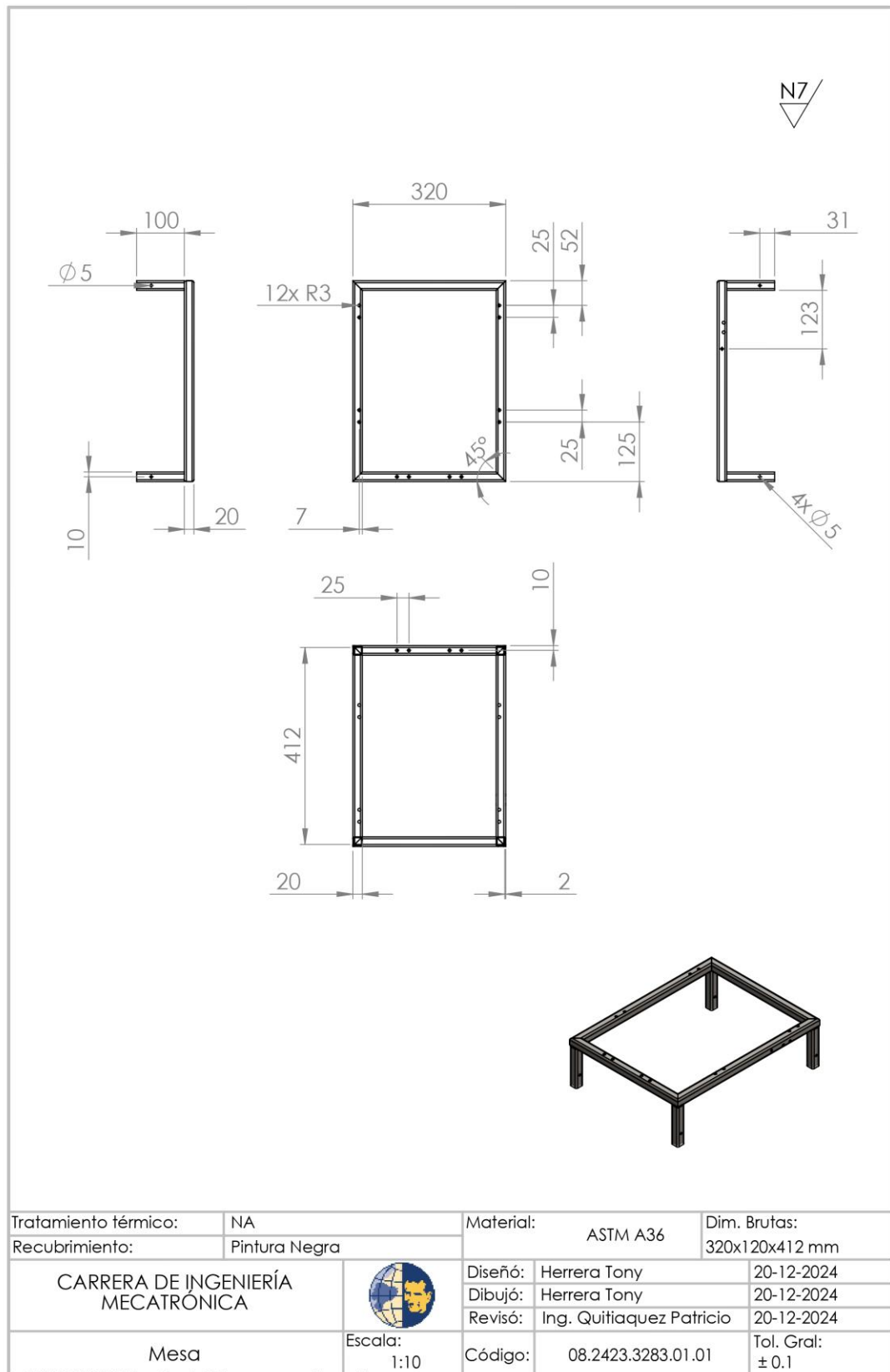
ANEXO 9

El Anexo 9, presenta el plano de pieza del Ángulo Bandeja Base, la cual son soportes para la misma.



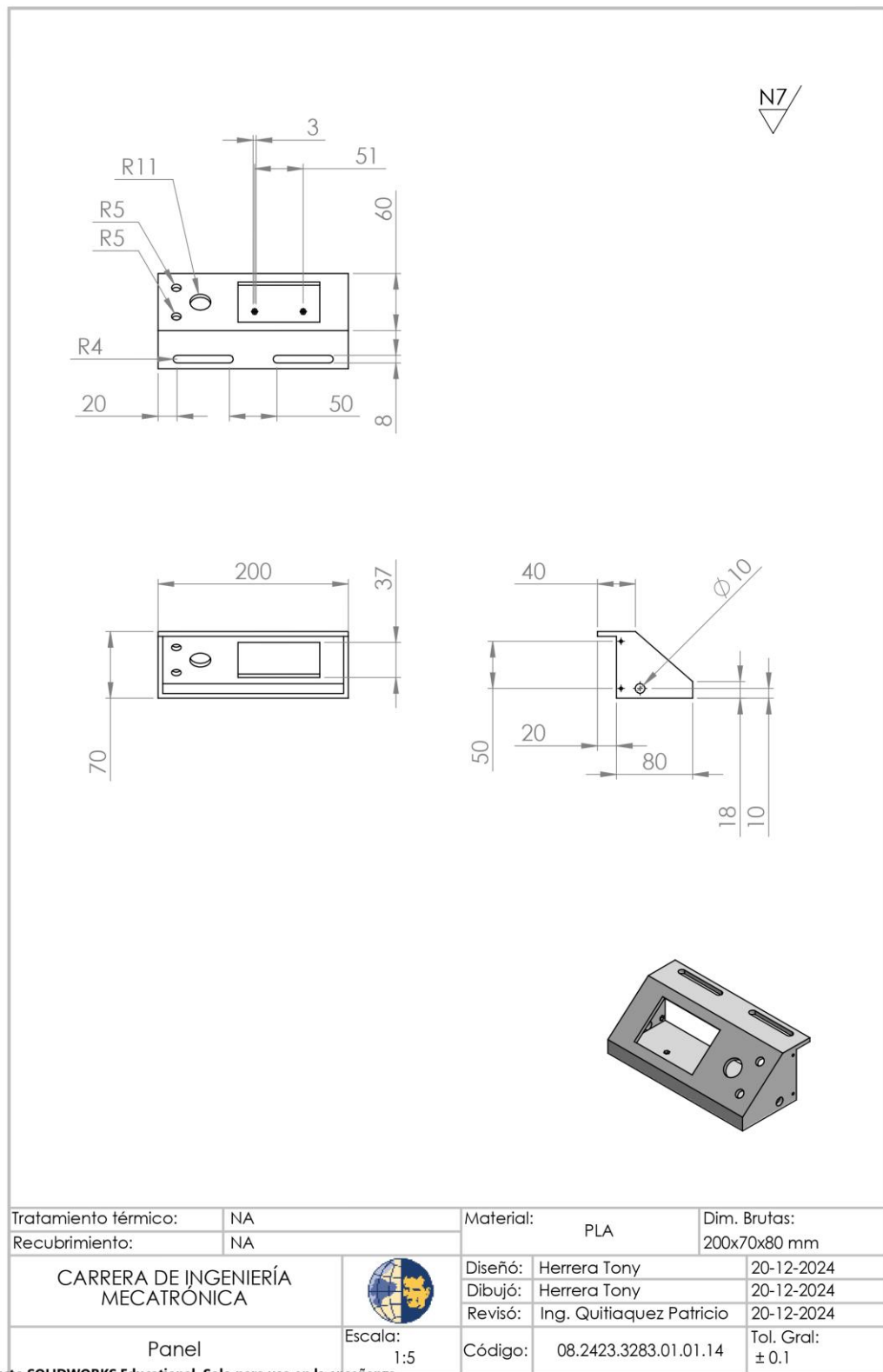
ANEXO 10

El Anexo 10, presenta el plano de pieza de la Mesa estructural del tubo cuadrado.



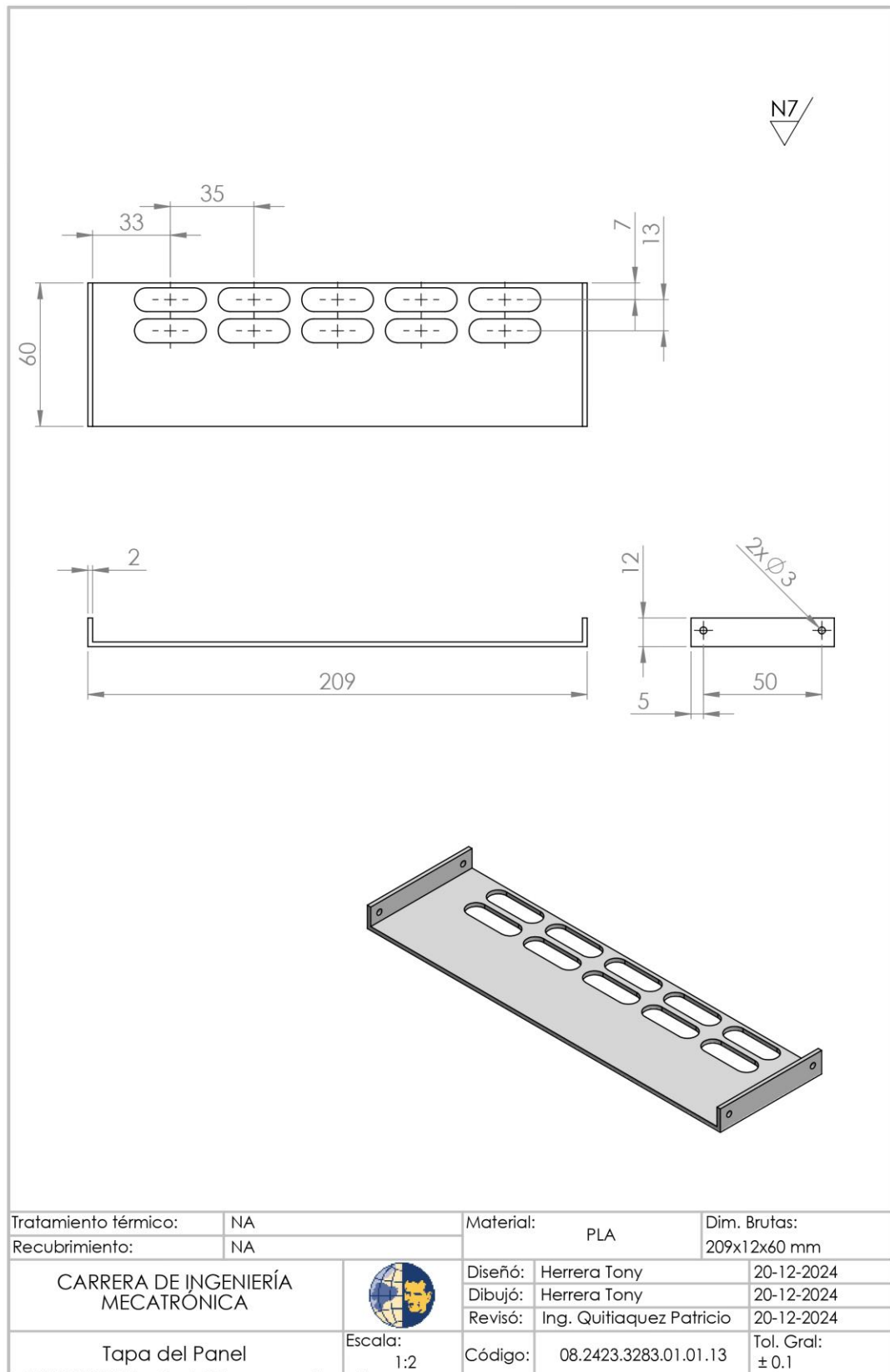
ANEXO 11

El Anexo 11, presenta el plano de pieza del Panel donde se instalan luces piloto, pantalla y paro de emergencia.



ANEXO 12

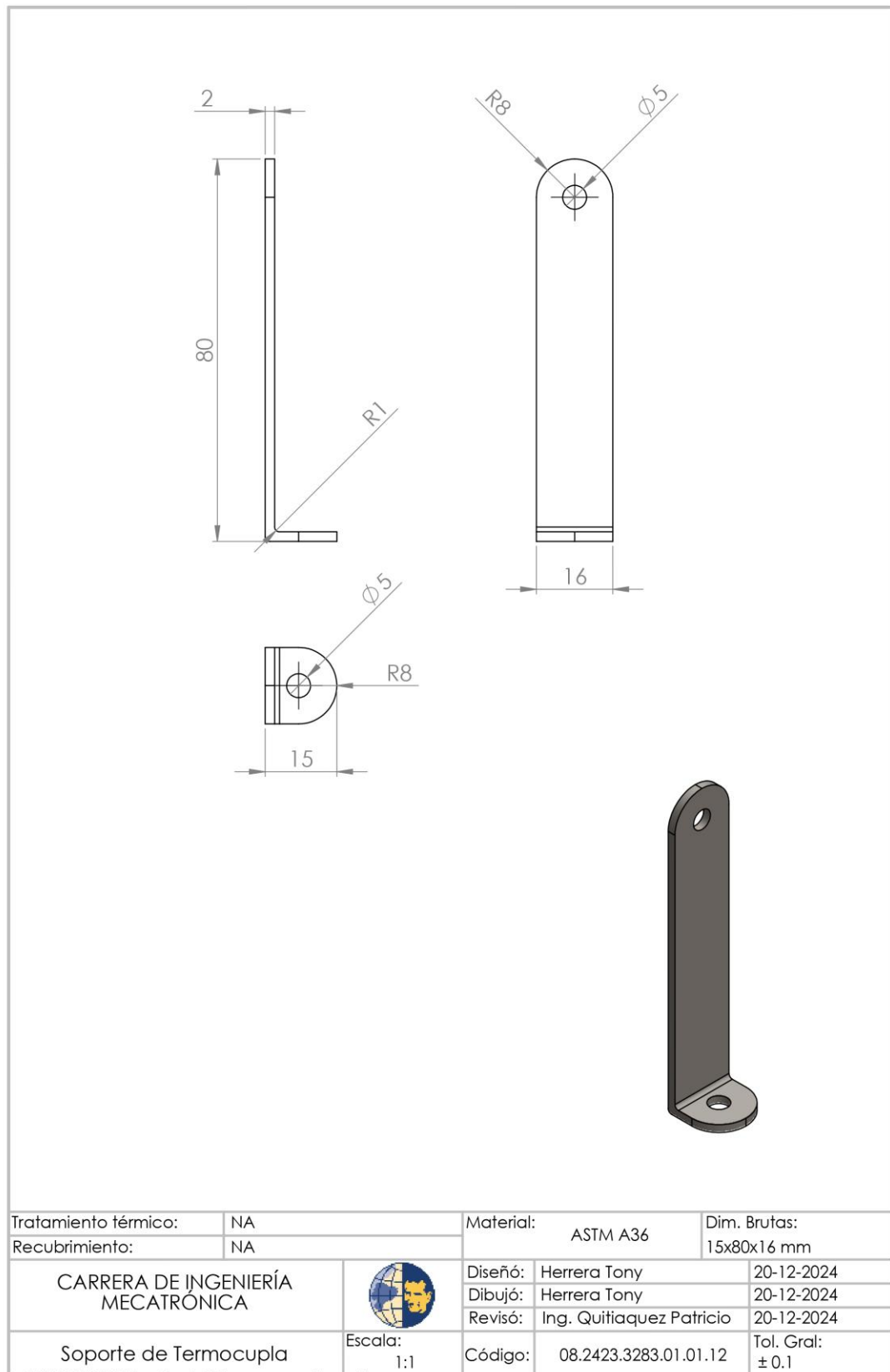
El Anexo 12, presenta el plano de pieza de la Tapa del Panel.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

ANEXO 13

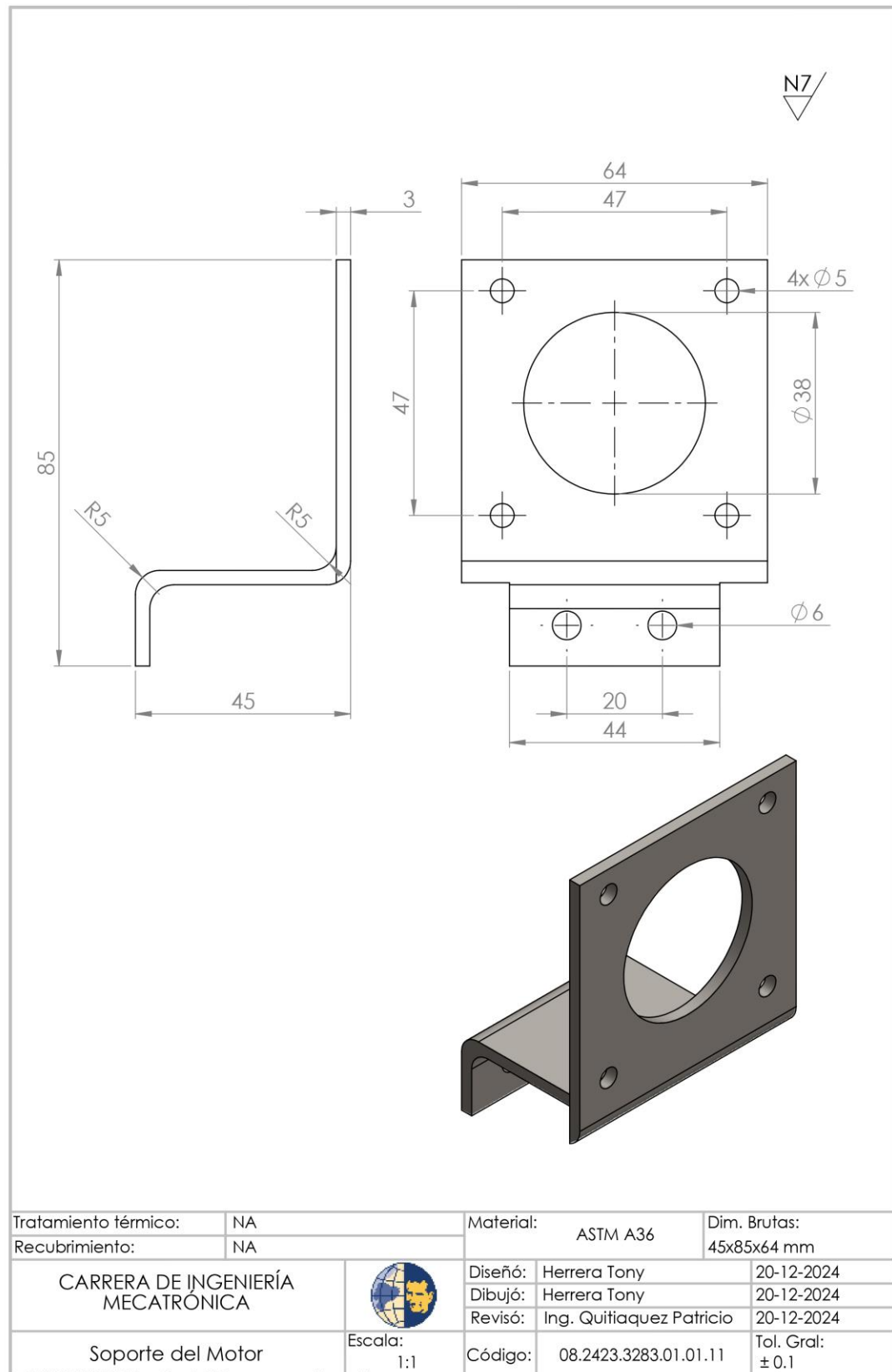
El Anexo 13, presenta el plano de pieza del Soporte de Termocupla.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

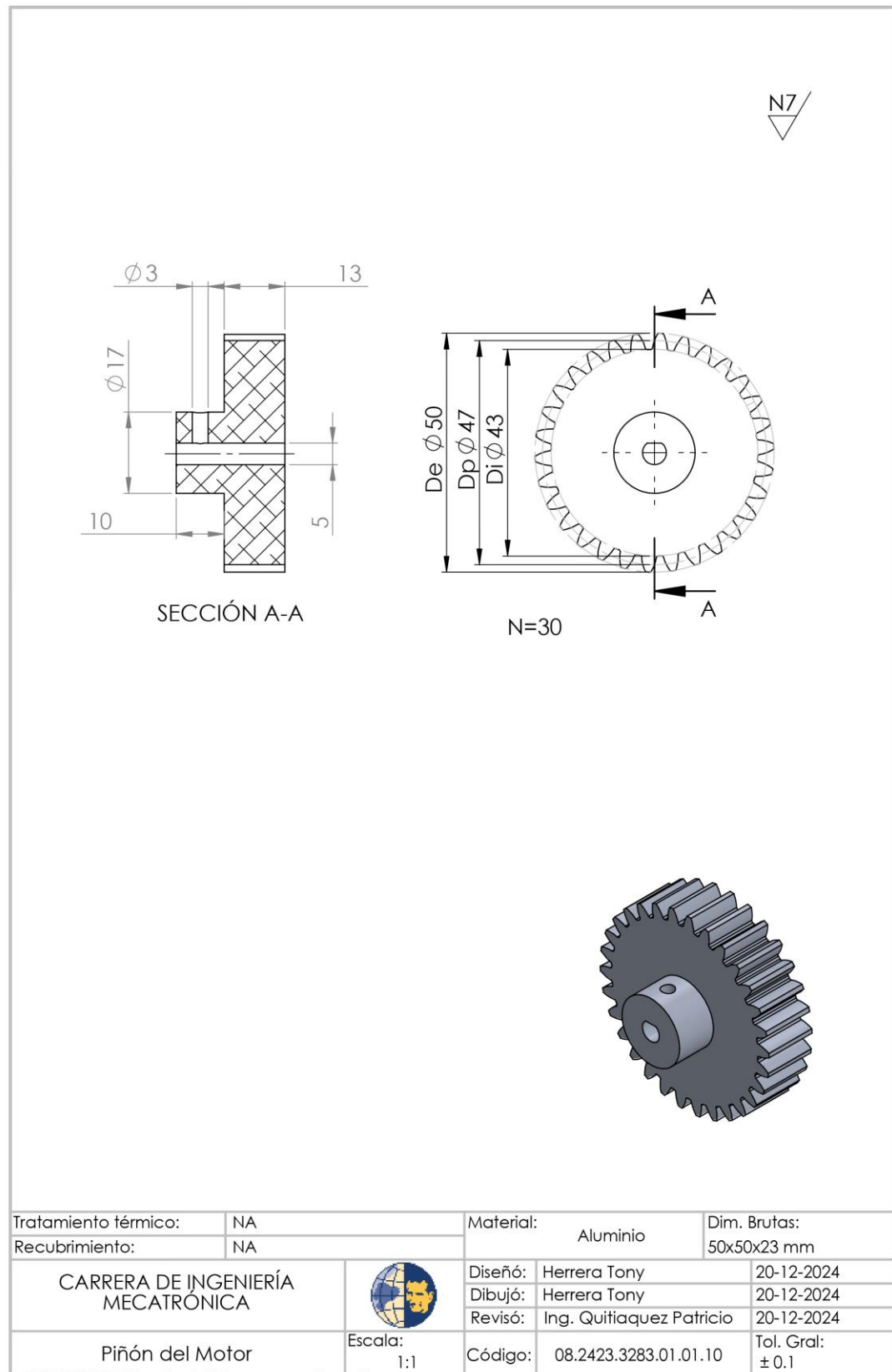
ANEXO 14

El Anexo 14, presenta el plano de pieza del Soporte del Motor NEMA 23.



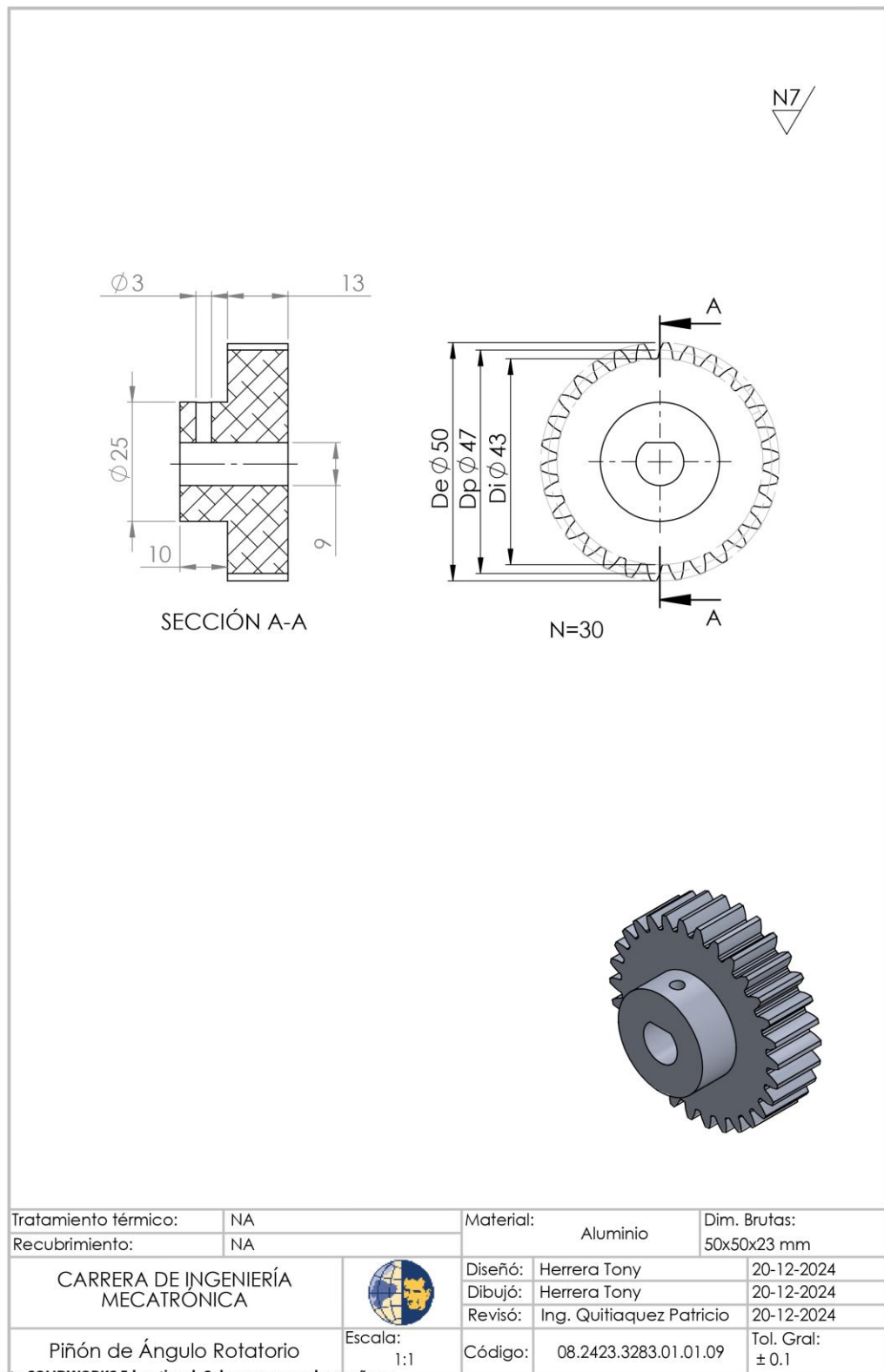
ANEXO 15

El Anexo 15, presenta el plano de pieza del Piñón del Motor que se acopla al eje del motor.



ANEXO 16

El Anexo 16, presenta el plano de pieza del Piñón de Ángulo Rotatorio que se acopla al eje del Ángulo Rotatorio.



ANEXO 17

El Anexo 17, presenta el plano de pieza de la Tapa del Tablero para proteger los componentes electrónicos internos.

