

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
AUTOMÁTICA INDUSTRIAL



**UNIVERSITAS**  
*Miguel Hernández*



"Estudio y fabricación de maquinaria destinada  
al bobinado de filamento plástico"

**TRABAJO FIN DE GRADO**

Octubre - 2024

AUTOR: Carlos Sánchez Peral

DIRECTOR: Higinio Alavés Mañogil

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1.INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1.1.Motivación.....	12
1.2. Estado actual del mercado industrial.....	13
1.3. Requerimientos.....	14
<b>2. FABRICACIÓN DE FILAMENTOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 Elementos de la línea de producción.....	17
2.1.1 Secado de pellets.....	17
2.1.2 Extrusora.....	17
2.1.3 Bañeras.....	18
2.1.4 “ <i>Puller</i> ” (rodillos).....	18
2.1.5 Acumulador.....	19
2.1.6 Bobinadora.....	21
2.2 Patrones de bobinado.....	25
2.2.1 Patrón Circunferencial.....	27
2.2.2 Patrón Orto-Cíclico.....	28
<b>3. PRIMER PROTOTIPO.....</b>	<b>30</b>
3.1. Diseño.....	30
3.1.1. Estructura.....	31
3.1.2. Giro de bobina (porta-bobinas).....	32
3.1.3. Cabezal de guiado del hilo.....	39
3.1.4. Pinza.....	43
3.1.5 Electrónica/Electricidad.....	46
3.1.6 Software.....	50
3.2. Fabricación.....	56
3.2.1 Estructura.....	56
3.2.2 Piezas 3D.....	58
3.2.3 Cuadro eléctrico.....	61
3.2.4 Neumática.....	66
3.2.5 Otros elementos.....	68
3.3. Test.....	69
3.3.1 Consideraciones previas.....	69
3.3.2. Variación límites de la bobina.....	70

3.3.3. Variación del paso.....	75
3.3.4 Variación de la tensión del hilo.....	77
3.3.5 Posición del cabezal: Fuera de la bobina.....	81
3.3.6 Patrón orto-cíclico. ....	83
3.4 Observaciones del primer prototipo. ....	85
<b>4. SEGUNDO PROTOTIPO. ....</b>	<b>88</b>
4.1 Diseño.....	88
4.1.1 Nuevo giro de bobina. ....	90
4.1.2 Nuevo cabezal de guiado del hilo.....	92
4.1.3 Botonera. ....	93
4.2. Fabricación. ....	94
4.2.1 Nuevo carro porta – bobinas.....	94
4.2.2 Discos de aluminio. ....	96
4.2.3 Nuevo cabezal. ....	97
4.2.4 Pinza. ....	98
4.2.5 Finales de carrera Inductivos.....	99
4.2.6 Botonera. ....	100
4.2.7 Aspecto final.....	101
4.3 Test.....	102
4.3.1 Desviación lateral .....	102
4.4. Observaciones del segundo prototipo.....	105
<b>5.CONCLUSIONES. ....</b>	<b>107</b>
5.1 Producto final. ....	107
5.2 Factor de relleno. ....	109
5.3 Futuros trabajos. ....	113
5.4 Reflexión final. ....	114
<b>6.BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>115</b>
<b>7.ANEXOS. ....</b>	<b>116</b>
7.1 Esquema eléctrico.....	116
7.2 Planos.....	116
7.3 Código. ....	116

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Filamentos empleados y sus características básicas .....	59
Tabla 2. Relación recorrido/error.....	74
Tabla 3. Equivalencias de Par en servomotor.....	78
Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de la posición del cabezal.....	83
Tabla 5. Parámetros válidos tras las primeras pruebas .....	85
Tabla 6. Comparativa valores T.....	109
Tabla 7. Comparativa factores de relleno .....	112





# INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bobinas enrolladas aleatoriamente.....	10
Figura 2. Bobinas enrolladas correctamente .....	11
Figura 3. Imágenes de máquinas presentes en el mercado actual .....	13
Figura 4. Criterios de selección de una bobina válida. ....	14
Figura 5. Línea de extrusión de filamento .....	16
Figura 6. Vista explicativa de una extrusora. Fuente: <a href="http://www.interempresas.net">www.interempresas.net</a> . ....	17
Figura 7. Funcionamiento de un “Puller” .....	18
Figura 8. Recreación para diámetro de 3mm.....	19
Figura 9. Recreación para diámetro de 1.75mm.....	19
Figura 10. Acumulador actualmente en uso .....	20
Figura 11. Funcionamiento de un polipasto. Fuente: <a href="http://nachotec-tecnologias1.blogspot.com">nachotec-tecnologias1.blogspot.com</a> . .....	20
Figura 12. Distancia del acumulador .....	21
Figura 13. Bobinadora Actualmente en uso.....	22
Figura 14. Distintos cabezales de guiado del hilo .....	22
Figura 15. Selector de paso actual .....	23
Figura 16. Patrones de bobinado más comunes. Fuente: <a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> .....	26
Figura 17. Patrón orto cíclico [4].....	26
Figura 18. Descripción gráfica del bobinado circunferencial.....	27
Figura 19. Vista en sección del bobinado circunferencial. Fuente: Wikipedia.....	28
Figura 20. Aspecto del patrón orto-cíclico .....	28
Figura 21. a) Patrón orto-cíclico vista lateral b) Patrón orto-cíclico vista frontal Fuente: Wikipedia.....	29
Figura 22. Diseño 3D completo del primer prototipo .....	30
Figura 23. Perfil empleado para la estructura. Fuente: <a href="http://adajusa.es">adajusa.es</a> .....	31
Figura 24. Medidas del perfil empleado. Fuente: <a href="http://adajusa.es">adajusa.es</a> .....	31
Figura 25. Formación de la estructura de aluminio .....	32
Figura 26. Componentes del sistema porta bobinas .....	33
Figura 27. Dibujo explicativo del sistema porta bobinas .....	33
Figura 28. Indicación de medidas de diámetro y carrera para un cilindro neumático....	34
Figura 29. Servomotor 90ST-M02430.....	35
Figura 30. Driver (controlador) incorporado del servomotor.....	35

Figura 31. Tensión empleada para bobinar.....	35
Figura 32. Cálculo del par en una bobina.....	36
Figura 33. Ubicación del servomotor en la estructura.....	37
Figura 34. Pieza de unión entre el servomotor y la bobina .....	37
Figura 35. Vista en sección del disco porta-bobinas. ....	37
Figura 36. Conjunto motor, acople y porta-bobinas .....	37
Figura 37. Sistema de anclaje de la bobina mediante cilindro neumático.....	38
Figura 38. Diseño completo del sistema de giro y anclaje de la bobina.....	38
Figura 39. Vista lateral y general del diseño del soporte de carro .....	39
Figura 40. Conjunto del cabezal de guiado del hilo. ....	39
Figura 41. Soporte de perfiles y motor. ....	39
Figura 42. Vista general del cabezal. ....	40
Figura 43. Conjunto motor nema 17 y driver de bucle abierto.....	40
Figura 44. Husillo y guías lineales empleadas para eje de subida del carro. ....	40
Figura 45. Husillo empleado BK12.....	41
Figura 46. Conjunto motor nema 23 y driver de bucle cerrado.....	41
Figura 47. Ejes de desplazamiento del cabezal .....	42
Figura 48. Vista lateral del sistema de guiado del hilo.....	42
Figura 49. Posición del cabezal tangente al inicio de la bobina .....	43
Figura 50. Posición del cabezal tangente al final de la bobina.....	43
Figura 51. Diseño de pinza. a)Vista general. b)Pinza abierta c)Pinza cerrada .....	44
Figura 52. Visión completa del conjunto del cabezal.....	45
Figura 53. Visión completa de la bobinadora. ....	45
Figura 54. Esquema de conexiones del cuadro eléctrico.....	46
Figura 55. Controllino MAXI empleado .....	46
Figura 56. IDE de Arduino .....	46
Figura 57. Convertidor PWM a Voltaje Analógico .....	47
Figura 58. Modelo de electroválvula seleccionada .....	47
Figura 59. Funcionamiento de un controlador para motor a pasos .....	48
Figura 60. Magnetotérmico empleado 10A.....	48
Figura 61. Filtro EMI empleado.....	48
Figura 62. Zumbador 2000hz .....	49
Figura 63. Diagrama de flujo del funcionamiento de la bobinadora. ....	51
Figura 64. Representación del punto de tangencia.....	53

Figura 65. Variación de la fuerza en función de la posición del hilo. ....	54
Figura 66. Perfiles de aluminio cortados .....	56
Figura 67. Unión de perfiles mediante escuadra atornillada .....	57
Figura 68. Estructura principal .....	57
Figura 69. Subestructuras .....	57
Figura 70. Conjunto de piezas diseñadas para la bobinadora.....	58
Figura 71. Distintos números de perímetros para una misma pieza. Fuente: Prusa.....	59
Figura 72. Distintos porcentajes de relleno para una misma pieza .....	60
Figura 73. Impresora 3D empleada. ....	60
Figura 74. Diseño 3D de pieza de soporte del carro.....	61
Figura 75. Aplicación de la pieza en la máquina. ....	61
Figura 76. Cuadro vacío con canaletas de distribución .....	62
Figura 77. Cuadro eléctrico con sus componentes .....	63
Figura 78. Pieza de anclaje para convertor PWM.....	63
Figura 79. Piezas de anclaje para fuente de alimentación .....	63
Figura 80. Terminales crimpados. ....	64
Figura 81. Bornas de conexión .....	64
Figura 82. Cuadro eléctrico completo. ....	65
Figura 83. Detalles de conexiones del cuadro. ....	65
Figura 84. Detalles de elementos del cuadro eléctrico. ....	66
Figura 85. Detalle del convertidor DAC. ....	66
Figura 86. Válvula mecánica .....	67
Figura 87. Reguladores de caudal en la pinza. ....	67
Figura 88. Regulador de caudal empleado. ....	67
Figura 89. Prototipo 1 completo.....	68
Figura 90. Máquina montada lista para realizar test.....	68
Figura 91. Representación gráfica de los límites de una bobina .....	70
Figura 92. Explicación recorrido del cabezal .....	71
Figura 93. Resultados con recorrido de 44mm.....	71
Figura 94. Resultados con recorrido de 48mm.....	72
Figura 95. Resultados con recorrido de 50mm.....	72
Figura 96. Resultados con recorrido de 52mm.....	73
Figura 97. Resultados con recorrido de 53mm.....	73
Figura 98. Relación recorrido/error bobinado .....	74

Figura 99. Resultados con paso 1.75mm.....	75
Figura 100. Resultados con paso 1.77mm.....	75
Figura 101. Resultados con paso 1.79mm.....	76
Figura 102. Comparativa par real- teórico .....	78
Figura 103. Resultados con tensión baja.....	79
Figura 104. Resultados con tensión alta.....	80
Figura 105. Posición del cabezal dentro y fuera de la bobina respectivamente.....	81
Figura 106. Comparativa cabezal dentro - fuera de la bobina.....	82
Figura 107. Resultados del primer prototipo.....	85
Figura 108. Vista general del segundo diseño .....	88
Figura 109. Vista en planta del segundo diseño .....	89
Figura 110. Vista lateral del segundo diseño .....	89
Figura 111. Nuevo sistema Porta - bobinas .....	90
Figura 112. Sistema de acople de bobinas.....	90
Figura 113. Vista general del nuevo diseño.....	91
Figura 114. Nueva pieza soporte porta - bobinas.....	91
Figura 115. Vista Superior del nuevo diseño.....	91
Figura 116. a).Vista General b).Vista Frontal c).vista en sección de los nuevos discos.....	92
Figura 117. a)Cabezal antiguo b)Cabezal nuevo.....	92
Figura 118. Detalle de polea auxiliar.....	93
Figura 119. a)Vista general botonera b)Vista en sección .....	93
Figura 120. Guías lineales para nuevo carro .....	94
Figura 121. Cilindro neumático del porta - bobinas.....	95
Figura 122. Porta-bobinas abierto .....	95
Figura 123. Porta-bobinas cerrado .....	95
Figura 124. Bocetos de ambos discos porta-bobinas.....	96
Figura 125. Proceso de torneado del disco de aluminio.....	96
Figura 126. Resultado final de los discos .....	97
Figura 127. Nuevo cabezal para el segundo prototipo .....	97
Figura 128. Dibujo cilindro empleado.....	98
Figura 129. Pinza y polea empleadas en el segundo prototipo.....	98
Figura 130. Final de carrera inductivo.....	99
Figura 131. Botonera del segundo prototipo .....	100
Figura 132. Explicación del desfase lateral .....	102

Figura 133. Bobinas con desfase lateral .....	103
Figura 134. Bobinas con desfase lateral (menor). .....	103
Figura 135. Bobinas perfectamente ajustadas. ....	104
Figura 136. Bobinas realizadas por el segundo prototipo. ....	105
Figura 137. Comparativa de tamaño entre patrón aleatorio y patrón circunferencial. .	109
Figura 138. Comparativa gráfica de medidas T tomadas. ....	110



## 1.INTRODUCCIÓN.

Dada la creciente demanda de filamentos plásticos condicionada por el aumento del uso de sistemas de modelado por deposición fundida o impresoras 3D [1], surge la necesidad de crear un producto nuevo para la empresa *3D Filaments*. Esta empresa posee como actividad principal la producción de filamento en bobinas para impresión 3D de venta al público. Estas bobinas almacenan 1 kg de plástico empleando filamento de 1,75mm de grosor. El material extruido puede ser PLA o PETG, ambos son materiales plásticos de características similares fabricados en la empresa, los cuales abarcan la mayor parte del mercado de la impresión 3D. Actualmente las bobinas producidas en *3D Filaments* presentan un enrollado aleatorio y sin ningún tipo de orden, lo que genera un mal aprovechamiento del volumen disponible. Esta problemática provoca que el filamento ocupe un espacio excesivo y en ocasiones, sobrepase los límites de la bobina. Además, genera problemas a la hora de deshacer el carrete, por no hablar del acabado estético que en ocasiones deja mucho que desear. Este acabado se muestra en la *Figura 1*.



*Figura 1. Bobinas enrolladas aleatoriamente*

Son muchas las empresas de filamento que bobinan el hilo de manera eficiente, obteniendo un enrollado más óptimo y con un mejor aspecto, logrando así una ventaja competitiva frente al resto de proveedores. En la época que vivimos, donde el cliente puede elegir decenas de marcas de filamento, este, tiende a decantarse por una bobina visualmente bien bobinada y con mejor aspecto. Para solventar este problema, se pretende renovar el producto, el cual consiste en bobinas de filamento cuyo hilo es enrollado de manera eficiente, siguiendo un patrón ordenado y predecible. De esta manera se reduce el espacio empleado por el hilo, evitando que rebose por los laterales, manteniendo el tamaño original de la bobina y aumentando la compatibilidad con las impresoras del mercado actuales. La mejora del acabado estético es una consecuencia de la mejora del

enrollado, debido a esto, se produce un salto cualitativo en la imagen del producto. El resultado final pretende ser una bobina cuyas medidas son 200mm de diámetro y 61mm de grosor, capaz de albergar 1 Kg de filamento de forma óptima. Tal como muestra la *Figura 2*.



*Figura 2. Bobinas enrolladas correctamente*

Para ello se pretende fabricar una máquina que permita enrollar el hilo en las bobinas de forma óptima, proporcionando un bobinado de menor volumen para el mismo peso. El funcionamiento de la maquina es a priori sencillo, un cabezal guía el hilo conforme gira la bobina, siguiendo un patrón concreto para obtener un bobinado óptimo al finalizar la bobina. Para realizar este proceso deben tenerse en cuenta el diámetro del hilo, el ancho de la bobina, velocidad de giro y tensión del hilo entre otros.

Esta máquina estará constituida principalmente por una estructura modular de perfilaría de aluminio y piezas de impresión 3D que sirven de soporte para servomotores, husillos y todos los elementos mecánicos pertinentes para realizar un movimiento controlado. Todos los componentes electrónicos serán conectados a un PLC basado en Arduino que gestiona todas las acciones y movimientos de la bobinadora. Esta máquina estará situada en una línea de producción y trabajará 16 horas diarias bajo el control de los operarios de la fábrica.



## 1.1.Motivación.

Las dos principales razones por las que se decide realizar la máquina y no comprarla es el coste y la compatibilidad con la línea de producción. Una bobinadora nueva suele rondar los 40.000 euros, mientras que la fabricación propia puede rondar unos 3.000 euros sólo materiales (sin contar horas de ingeniería), lo que supone un ahorro de 37.000 euros. Dado que se pretende fabricar una máquina para cada una de las 4 líneas de producción, el ahorro total se multiplica por 4 y asciende a 148.000 euros.

Por otro lado, las bobinadoras disponibles en el mercado se encuentran diseñadas para operar en conjunto con el resto de las máquinas de la línea del fabricante, esto implica que, para garantizar un bobinado óptimo es preciso adquirir líneas de producción nuevas y completas de un mismo proveedor. Esta situación conlleva un desperdicio de recursos, ya que el resto de los elementos de la línea actual funcionan correctamente. Por lo tanto, resulta fundamental desarrollar un sistema de enrollado que no dependa de elementos externos a la propia bobinadora. Es decir, un sistema independiente y autónomo.

Otra ventaja de la fabricación propia es la mejora constante de la máquina, que permite modificar sus componentes en función de las necesidades y crear así un sistema totalmente personalizado y adaptado a las necesidades específicas de la empresa. Por último, cabe explicar más en detalle los beneficios obtenidos al realizar un bobinado eficiente.

- 1) Optimización del espacio disponible[2]: Un bobinado de filamento eficiente permite maximizar la cantidad de material utilizado en relación con un espacio dado. Logrando una mayor densidad de material que minimiza los espacios vacíos. Por ello, el filamento queda perfectamente emplazado en el interior de la bobina, con un margen suficiente para evitar su salida del carrete, sobre todo en las capas más externas de la bobina.
- 2) Estética mejorada: Un enrollado eficiente mejora la apariencia visual del producto y contribuye significativamente a una percepción de calidad positiva, que influye en la imagen de marca y en la opinión del cliente.
- 3) Bobinado homogéneo: En el caso de la impresión 3D, las bobinas son introducidas en impresoras que irán desenrollando el filamento a medida que esta imprime, por ello, es importante que el filamento pueda desenrollarse de manera ordenada y predecible para evitar tirones, nudos, o movimientos bruscos durante la impresión.



## 1.2. Estado actual del mercado industrial.

La cuota de mercado de la producción de filamento PLA y otros elementos como extrusoras y bobinadoras, está dominada principalmente por China, el principal productor mundial de filamentos para impresión 3D. Muchas de las empresas de esta nacionalidad están a la vanguardia en la innovación de tecnologías de bobinado.

Marcas como “Friend machinery Co.”, “Shongu plastic machinery Corp.” o “Aifuer machinery Co.” Fabrican y venden líneas completas de producción de filamento, o componentes de la línea por separado, entre ellos, bobinadoras. Todas ellas con los elementos y sistemas más actuales del mercado.

Estas bobinadoras, aseguran realizar un bobinado óptimo sin cruzamientos, es el resultado perseguido en este proyecto. Según se ha observado en los modelos de estos fabricantes, las máquinas están altamente automatizadas, permitiendo la operación continua y reduciendo la necesidad de intervención manual.

El uso de sensores y sistemas de control automático garantizan que el filamento es enrollado de manera uniforme y sin tensiones excesivas, evitando enredos y asegurando un desenrollado suave durante la impresión. Por otro lado, el empleo de motores paso a paso y sistemas de control de movimiento precisos, permiten un control exacto de la velocidad y guiado del filamento durante el proceso de bobinado. Esto da lugar a bobinas de alta calidad, el objetivo de este proyecto es estar a la altura de los acabados obtenidos por estas bobinadoras industriales. La *Figura 3* muestra varios de los modelos más actuales de estos sistemas de bobinado.



*Figura 3. Imágenes de máquinas presentes en el mercado actual*

### 1.3. Requerimientos.

Para poder evaluar el correcto funcionamiento de la bobinadora construida en este proyecto se han establecido una serie de requerimientos que deben cumplirse para dar por válido su funcionamiento.

- 1- Cumplir con los criterios de bobinado. Es decir, realizar bobinas siguiendo un patrón concreto, de manera que el hilo presente un patrón de líneas paralelas y sin cruzamientos. Una bobina finalizada no debe poseer una variación de más de 2 capas entre el punto más alto y el más bajo de esta, además, la última capa bobinada debe estar al menos a 8mm del borde de la bobina. En la *Figura 4* se muestran los criterios a seguir de manera gráfica.

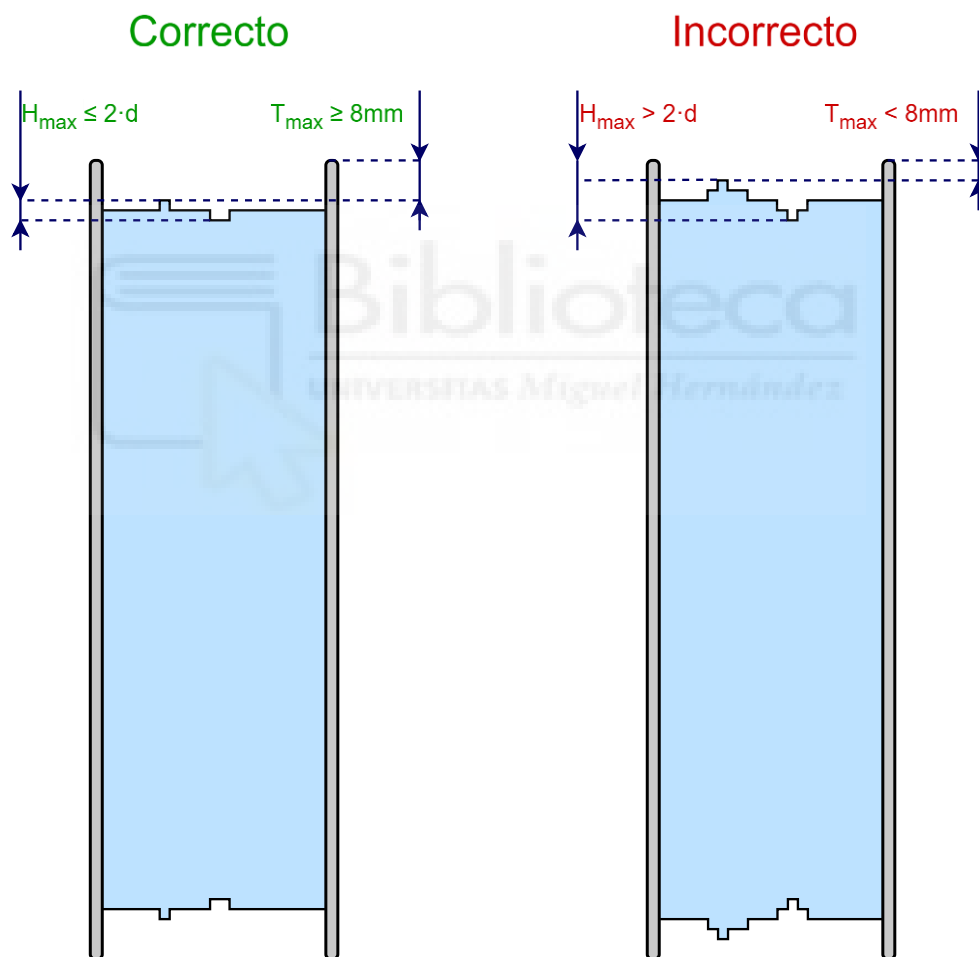


Figura 4. Criterios de selección de una bobina válida.

- 2- Tasa de éxito. La máquina debe tener como objetivo un porcentaje de éxito del 90% mínimo, es decir, al menos 9 de cada 10 bobinas han de ser válidas. Las bobinas que no presenten un bobinado correcto serán desechadas, aunque el

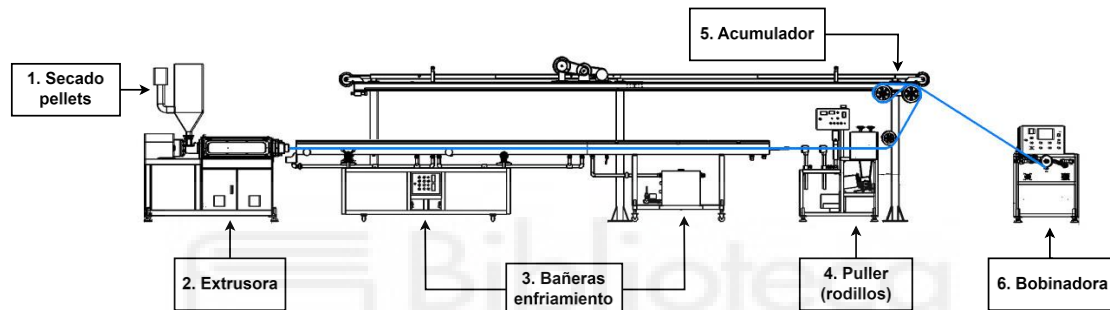
filamento esté en óptimas condiciones, por ello cabe reducir al máximo esta tasa de fallo.

- 3- Facilidad de reparación. El diseño de la máquina debe facilitar su mantenimiento, permitiendo un acceso rápido y sencillo al operario. Se pretende que todas las piezas sean accesibles y permitan su cambio con facilidad sin herramientas especiales.
- 4- Usabilidad del sistema. Los operarios realizan las tareas de cambio de bobina, introducción de nueva bobina o identificación de los problemas. Por ello la experiencia con la máquina por parte de los operarios ha de ser positiva, además de intuitiva. El resultado del bobinado debe ser íntegramente responsabilidad de la máquina, reduciendo así el componente humano que en ocasiones puede dar lugar a fallo, además de producir mayor estrés en los turnos de trabajo. Para ello, el número de botones/ parámetros que el operario ha de controlar manualmente será el mínimo posible.



## 2. FABRICACIÓN DE FILAMENTOS.

Previo a este proyecto, es conveniente comprender el proceso de creación de filamentos y que elementos contribuyen en la formación del producto final. La fabricación de filamentos plásticos es un proceso determinado por diversas etapas, partiendo de pellets de plástico como materia prima, se obtiene filamento de sección circular con un diámetro de 1,75mm. Existen en el mercado filamentos de grosor 2.85mm, pero representan una minoría respecto al tamaño estándar de 1,75mm. La empresa 3DFils, únicamente produce filamentos de 1,75mm para PLA y PETG, por tanto, este proceso se centrará únicamente en el grosor de filamento estándar. La *Figura 5* muestra las diferentes etapas que contribuyen en el proceso de producción de filamento.



*Figura 5. Línea de extrusión de filamento*

Todos estos elementos actúan en conjunto y son imprescindibles para un producto de calidad.

1. Secado de pellets. Se elimina la humedad de los pellets de plástico para poder extruir correctamente.
2. Extrusora. Funde y une los pellets formando un material plástico y maleable que es expulsado en forma de hilo por una boquilla circular.
3. Bañeras de enfriamiento. El filamento pasa por unos tanques de agua que lo enfrían hasta temperatura ambiente para aportar rigidez y permitir su manipulación.
4. Puller. Dos rodillos encargados de “tirar” del filamento extruido a una determinada velocidad para obtener una extrusión de grosor constante.
5. Acumulador. Conjunto de poleas móviles por las que pasa el filamento y sirve de almacenaje de hilo entre cambios de bobina.
6. Bobinadora. Máquina dedicada a enrollar el filamento en carretes para su posterior distribución.

## 2.1 Elementos de la línea de producción.

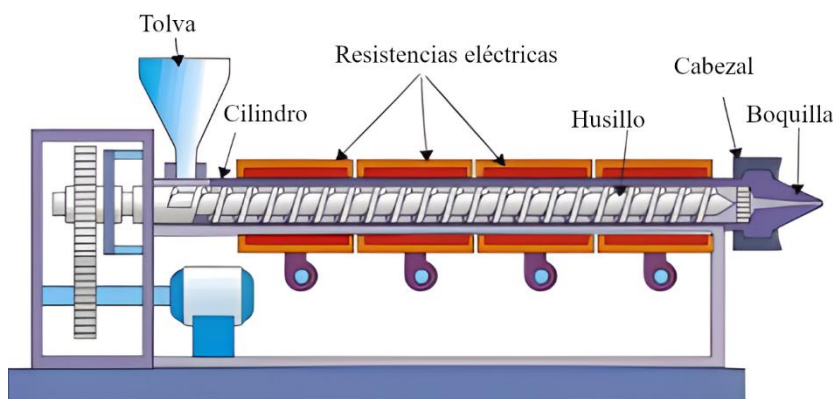
Con el fin de comprender mejor la dinámica del hilo en el bobinado, es preciso indagar en las distintas partes de la línea de producción y su influencia en el filamento ya que, a lo largo de este documento, algunas de ellas serán mencionadas.

### 2.1.1 Secado de pellets.

Los pellets de plástico son un material propenso a absorber humedad, las moléculas de agua se unen a las moléculas de los pellets ocasionando micro roturas internas que debilitan la propia estructura del filamento. Si esta materia prima presenta porcentajes de humedad superiores al 0.06% en masa, la calidad del producto final será afectada. El filamento presentará una textura rugosa con ciertos bultos, además de variaciones en el diámetro, lo que proporciona un filamento inestable en términos de grosor y acabados. Por ello, es necesario el uso de secadoras industriales, compuestas por unas calderas donde se introducen los pellets y se hace atravesar por su interior un flujo aire caliente (en torno a 65°) durante 4 horas. Así, el agua contenida en su interior es evaporada, reduciendo la humedad hasta niveles inferiores al 0.06% este porcentaje indica la relación en masas entre agua y pellets. Dando por finalizado el proceso de secado de pellets.

### 2.1.2 Extrusora.

Este elemento en su conjunto funde y une los pelles creando un material maleable, siendo expulsado por una boquilla. El conjunto de extrusión es mostrado en el boceto de la *Figura 6*.



*Figura 6. Vista explicativa de una extrusora. Fuente: [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net).*

Primeramente, se introducen los pellets ya secados en el interior de una tolva, a continuación, el husillo introduce el material dentro de un cilindro a presión donde son calentados y fundidos entre sí. En el proceso de calentado se produce la fusión de los

polímeros, obteniendo un material homogéneo y maleable. Este material es expulsado por una boquilla circular de 3mm de diámetro a una temperatura aproximada de 205°C para PLA y 215°C para PETG , generando así un flujo continuo de filamento plástico de sección circular.

### 2.1.3 Bañeras.

Esta fase está compuesta por dos balsas de 2m de longitud cada una, las cuales se encuentran llenas de agua, su función principal es refrigerar el filamento hasta temperatura ambiente para poder manipularlo. El filamento es introducido en uno de los extremos de la balsa, saliendo por el extremo opuesto; del mismo modo se atraviesa la segunda balsa. El motivo por el cual son necesarias dos temperaturas es debido al enfriamiento progresivo, necesario para evitar problemas de rigidez y estabilidad del filamento.

Cada bañera tiene una temperatura de consigna:

- 1) Primera bañera: Esta alberga agua a 50°-65° dependiendo del material a extruir. De esta manera se consigue reducir la temperatura del hilo de 205° a 50°.
- 2) Segunda bañera: Compuesta por agua a temperatura ambiente (generalmente 25°) que reduce la temperatura del filamento de 50° a 25°. Llegados a esta temperatura, el filamento ya es rígido y permite su manipulación.

### 2.1.4 “Puller” (rodillos).

Este elemento se sitúa inmediatamente después de la segunda bañera, su propósito es controlar en todo momento el grosor del filamento. Su funcionamiento es el mostrado en la *Figura 7*. Se trata de dos rodillos motorizados que tiran del filamento a una determinada velocidad para controlar su grosor.

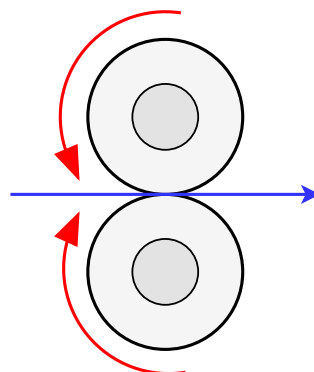
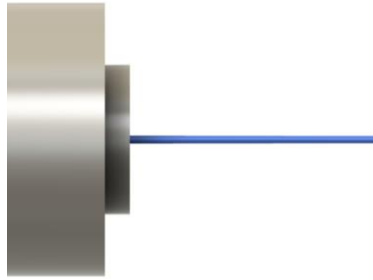
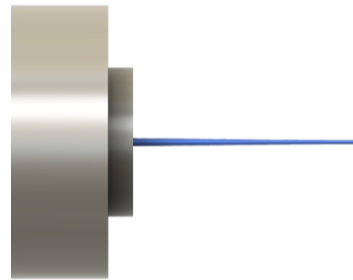


Figura 7. Funcionamiento de un “Puller”

A diferencia de lo que se suele creer, el grosor del filamento no viene determinado directamente por el grosor de la boquilla de la extrusora, si no por la velocidad a la que el filamento es tirado por los rodillos o “*Puller*”. Si la extrusora presenta una boquilla de 3mm, esta permite producir filamentos de grosor igual o inferior a 3mm, este rango puede ser controlado con alta precisión gracias a la velocidad de los rodillos. Como se observa en la *Figura 8* y *Figura 9* el diámetro del filamento a la salida de la extrusora puede variar.



*Figura 8. Recreación para diámetro de 3mm.*



*Figura 9. Recreación para diámetro de 1.75mm.*

Esto significa que, si se reduce la velocidad de los rodillos, el grosor del filamento aumentará; en cambio si aumenta la velocidad de los rodillos, el grosor será reducido.

Para controlar en todo momento la velocidad de giro del “*Puller*”, este incorpora un sensor láser que mide el grosor del filamento a razón de 15 veces por segundo. Este sensor incorpora toda la lógica y configuración de los parámetros PID para generar una señal de 0-10V que define la velocidad de giro del “*Puller*” y garantizar un diámetro estable. El diámetro de consigna es configurado en el propio sensor, en este caso 1.75mm.

### **2.1.5 Acumulador.**

Debido a que la extrusión no puede detenerse y el hilo ha de ser extruido a una velocidad constante sin producirse alteraciones en su velocidad, el acumulador permite almacenar filamento durante el proceso de cambio de bobina. Este elemento es el mostrado en la *Figura 10*.



Figura 10. Acumulador actualmente en uso

En el cambio de bobina, se produce una parada del hilo durante el tiempo empleado en cambiar de bobina e introducir una nueva.

La función principal del acumulador es almacenar el hilo producido durante este cambio; el sistema consiste en una serie de poleas dispuestas de manera similar a un polipasto (Figura 11).

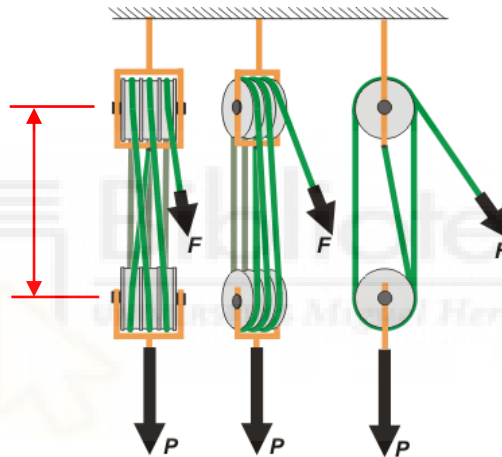


Figura 11. Funcionamiento de un polipasto. Fuente: nachotecnologias1.blogspot.com.

Está compuesto por dos ejes, uno fijo y otro móvil desplazable de manera horizontal sobre una viga, cada eje posee 8 poleas cada uno. En el transcurso de un cambio de bobina, el filamento se detiene y es entonces cuando el eje móvil del acumulador comienza a desplazarse, almacenando así el filamento extruido.

Como se muestra en la Figura 12, a medida que la distancia  $d$  aumenta, también aumenta el hilo almacenado. En este caso una distancia aproximada de 2 veces “ $d$ ” por cada par de poleas. Puesto que existen 8 pares de poleas, la distancia de filamento almacenada será aproximadamente 16 veces la distancia recorrida por el eje del acumulador.



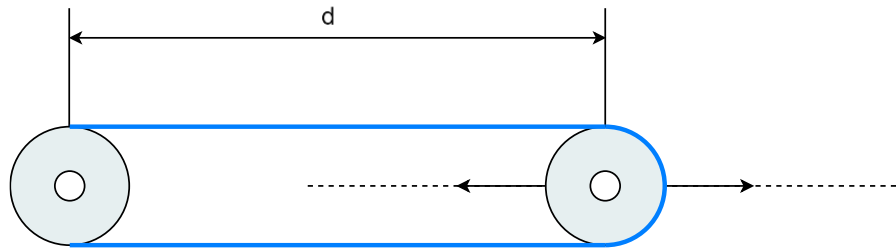


Figura 12. Distancia del acumulador

No obstante, el acumulador contiene un límite de metros capaz de almacenar, si son excedidos, el hilo se descolgará y deberá ser introducido de nuevo en el acumulador.

En un funcionamiento normal, raras veces ocurre este fenómeno, si ocurre, es debido a un despiste o fallo de funcionamiento.

Este sistema cuenta con un sistema de control de tensión del hilo que permite ajustar la tensión de manera que sea ligeramente inferior a la tensión que aplica la bobinadora al enrollar, así se asegura una correcta recogida del filamento en el acumulador cuando está siendo bobinado. Si la fuerza ejercida por el acumulador fuera mayor que la bobinadora, esta no podría bobinar ya que no tiene fuerza suficiente.

### 2.1.6 Bobinadora.

Esta máquina es responsable de almacenar el filamento en bobinas para su posterior venta, es el último paso de la fabricación de filamentos y debe realizarse de manera óptima. Se emplean bobinas de 200mm de diámetro para almacenar 334 metros de filamento (1kg). Las bobinas giran sobre su propio eje y un cabezal móvil va guiando el filamento de lado a lado. Estas máquinas incorporan un odómetro, cuando se alcanzan los metros deseados, la máquina detiene su giro y emite una señal sonora para indicar el cambio de bobina. Este cambio de bobina debe realizarse antes que el acumulador llegue a su límite de almacenamiento, de no ser así, el filamento perderá toda la tensión y saldrá de las poleas.

### **Bobinadora Actualmente en uso y comparativa respecto máquinas actuales.**

La bobinadora presente en la fábrica no está diseñada para ejecutar un bobinado óptimo. La *Figura 13* muestra el sistema de bobinado actual.



*Figura 13. Bobinadora Actualmente en uso*

El cabezal que guía el hilo consiste en una polea situada a unos 20cm de la bobina, esta configuración no aporta un bobinado válido ya que, entre otros, se encuentra muy alejado de la bobina, además de no presentar la suficiente precisión debido a holguras y brazos de palanca muy largos. Así, se produce un enrollado prácticamente aleatorio, ocupando un volumen desproporcionado que en ocasiones provoca el desprendimiento involuntario del filamento.

Al analizar el cabezal mostrado previamente respecto a máquinas de última generación, se aprecian ciertas diferencias, las cuales pueden observarse en la *Figura 14*.



*Figura 14. Distintos cabezales de guiado del hilo*

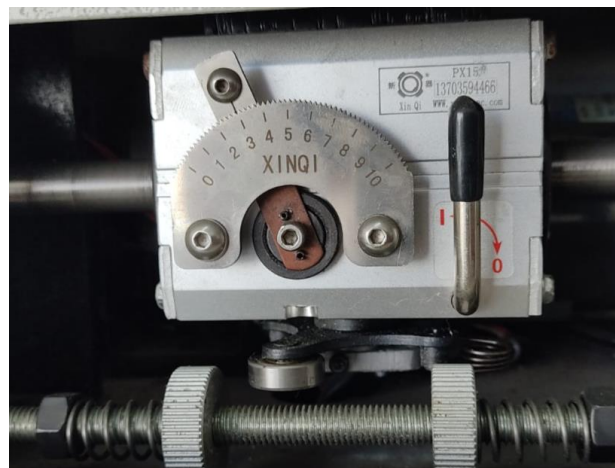
Las imágenes anteriores representan sistemas de bobinado actuales, todos ellos aseguran un bobinado óptimo, cada uno emplea un sistema de guiado del hilo diferente: el primer sistema consiste en un tubo introducido en la bobina lo más próximo posible al filamento, la segunda imagen presenta un tubo, pero más corto y sin ser introducido en la bobina, la

tercera, posee una pletina de acero en forma de “u” que actúa de la misma manera que el tubo. Aun así se puede observar que todos tienen 3 elementos en común:

- 1) La distancia entre el cabezal y la bobina es de unos pocos centímetros; los cabezales “b” y “c” se encuentran a 2-3cm del borde de la bobina, mientras que la imagen “a” entra directamente dentro de esta. Se intuye que es muy importante que el cabezal se encuentre lo más próximo posible a la bobina.
- 2) Todos los cabezales tienen la medida justa para introducir el hilo (aproximadamente 2mm), de esta manera el filamento no presenta “holgura” dentro del cabezal y es guiado de forma muy precisa.
- 3) Presentan un ligero ángulo de inclinación: este ángulo mantiene la dirección natural del filamento proveniente del acumulador, el cual se encuentra elevado unos 2m respecto al suelo. De esta manera se evita forzar el filamento o doblarlo.

Por otro lado, el movimiento del cabezal de los modelos más actuales es digital, estas máquinas poseen pantallas que permiten controlar todos los parámetros de la bobinadora (incluyendo paso, velocidad, dimensiones de la bobina, entre otros), el cabezal está controlado por un motor a pasos o servomotor, que permite controlar con gran precisión la posición del cabezal y la velocidad de giro de la bobina.

La bobinadora usada actualmente presenta un husillo accionado por una polea cuyo paso es variable mecánicamente mediante una ruleta en saltos de 0.2mm, la *Figura 15* muestra el selector de paso empleado actualmente.



*Figura 15. Selector de paso actual*

Este selector de paso con una precisión de 0.2mm es otro indicativo de por qué presenta un bobinado tan errático, ya que no permite ajustar el paso de manera precisa.

Además, la máquina empleada actualmente posee un embrague electrónico, que permite el movimiento de dos ejes distintos para realizar un cambio de bobina más rápido. Este elemento, junto con las poleas de su interior y unos ejes de 40mm de diámetro aportan mucha inercia al giro de las bobinas lo que dificulta la capacidad para controlar la tensión y velocidad.

Tras este análisis general comprendiendo el proceso de extrusión, bobinado y los sistemas empleados, se intuye que la máquina de la fábrica puede estar fallando debido a distintos factores, quizá no es un único elemento el que esté fallando, si no el conjunto de elementos que dificultan el enrollado y provoca que este no bobine de la manera deseada.



## 2.2 Patrones de bobinado.

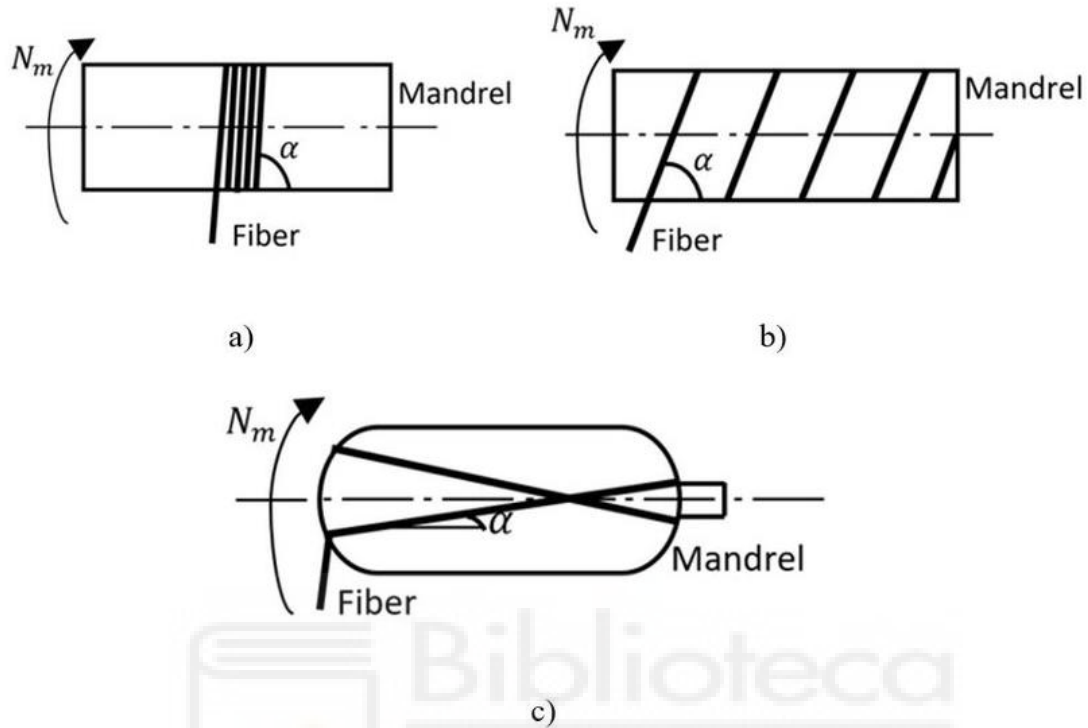
El filamento debe ser enrollado de manera ordenada, optimizando el espacio y evitando cruzamientos. Para ello es de vital importancia emplear un método de bobinado que asegure el enrollado. Un patrón de bobinado puede describirse como una forma de enrollado de filamento de manera predecible, que sigue una serie de movimientos y presenta una forma definida y ordenada.

Al no realizar un patrón de bobinado determinado, se produce un enrollado aleatorio donde el filamento no sigue ningún orden y tiende a ocupar más espacio. Por consiguiente y dadas las dimensiones de la bobina, el filamento emplea prácticamente la totalidad de la bobina, sin dejar cierto margen, pudiendo ocasionar que el filamento se desprenda involuntariamente de la bobina.

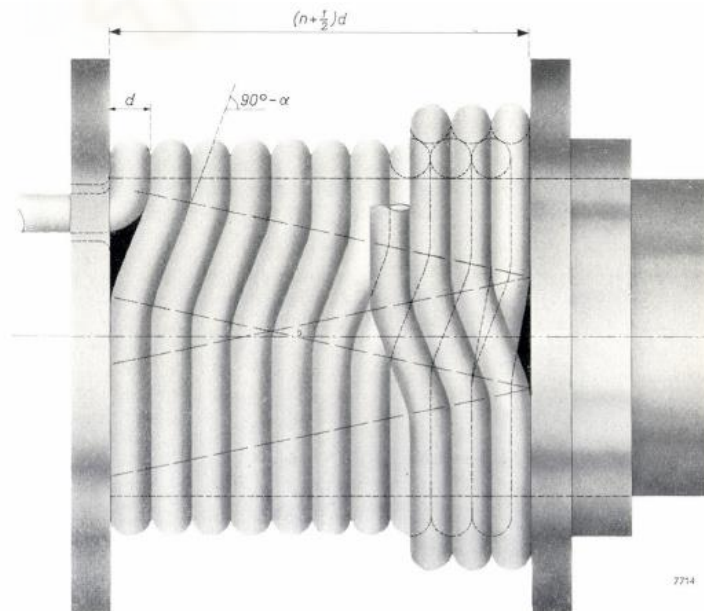
Para solventar este problema debe ejecutarse un bobinado que presente mínimos espacios vacíos y asegure una buena calidad final además de poseer repetibilidad a lo largo de las bobinas. El movimiento que realiza el cabezal puede variar en función del patrón de movimiento empleado, existen distintos patrones de bobinado, los tres primeros patrones son los más comunes:

- 1) **Patrón circunferencial o aro (“Hoop”):** [2][3] *Figura 16a*. Se obtiene girando la bobina mientras se aporta hilo mediante un cabezal cuyo avance es muy similar al grosor del filamento. Esto proporciona un ángulo de enrollado ( $\alpha$ )prácticamente perpendicular al eje de rotación. Este ángulo se puede apreciar en la *Figura 16* y *Figura 18*.
- 2) **Patrón helicoidal:** [2][3] *Figura 16b*. Este método es muy similar al circunferencial, su diferencia es que el avance es mucho mayor al diámetro del filamento, lo cual genera un ángulo de enrollado mayor respecto al circunferencial.
- 3) **Patrón polar:** [2][3] *Figura 16c*. El filamento se desplaza de un polo a otro, mientras el brazo del mandril gira sobre un eje longitudinal. Este sistema es muy comúnmente empleado en la formación de bidones presurizados formados por fibra de vidrio o similares. En este caso, no es válido, aun así, se ha mencionado debido a su popularidad en otros ámbitos.

4) **Patrón orto-cíclico:** [4] *Figura 17.* Presenta características similares al patrón circunferencial, a excepción de su avance, el cual se realiza en una fracción de revolución, dejando el resto de vuelta completamente normal al eje de rotación.



*Figura 16. Patrones de bobinado más comunes. Fuente: www.researchgate.net*



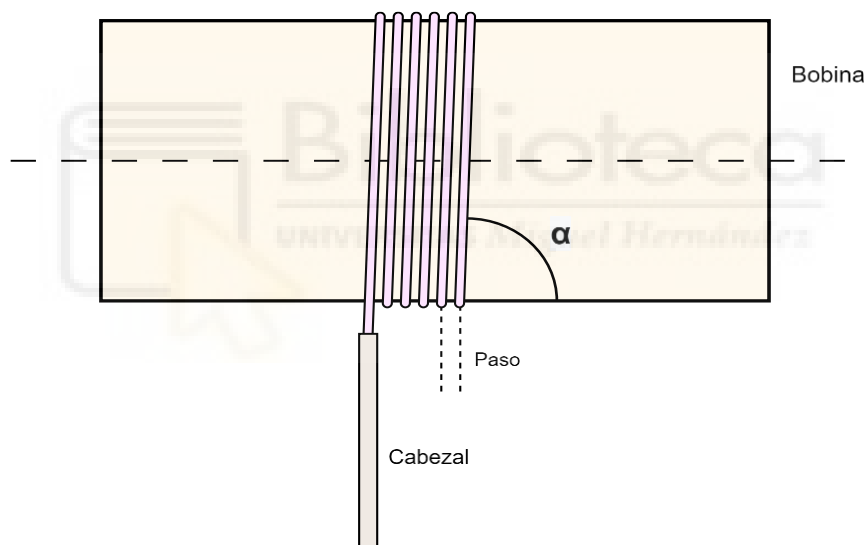
*Figura 17. Patrón orto cíclico [4].*

Para este caso se van a estudiar los patrones circunferencial y orto-cíclico, los cuales coinciden con el acabado que se desea obtener. Cada patrón de bobinado es adecuado

bajo unas condiciones concretas. En este caso se detallan los dos métodos mencionados para el bobinado de filamento en carretes. Ambos métodos poseen la misma dinámica general de movimiento, el filamento es enrollado vuelta tras vuelta; una capa de filamento es completada cuando se alcanza el extremo del carrete; luego, se inicia una nueva capa sobre la capa anterior, donde el cabezal se desplaza en dirección opuesta hasta llegar al otro extremo de la bobina. Este proceso continúa hasta el final de la bobina.

### 2.2.1 Patrón Circunferencial.

Para formar este patrón, se coloca el cabezal normal al eje de rotación de la bobina [2], tal como muestra la *Figura 18*. El punto de alimentación del filamento se desplaza de lado a lado de manera continua y así distribuye uniformemente el material sobre la bobina. El paso del enrollado es la distancia lateral que recorre el cabezal en una vuelta, conocido también como distancia ' $p$ ', está determinado por el diámetro del hilo.



*Figura 18. Descripción gráfica del bobinado circunferencial.*

Al emplear un movimiento de cabezal continuo, el hilo bobinado adquiere cierto ángulo ( $\alpha$ ), el cual se aprecia en la figura previa. Para la siguiente capa se aplicará el mismo ángulo, pero de sentido contrario (por tanto, el ángulo entre dos capas es igual a dos veces el ángulo de una capa), este comportamiento también puede apreciarse en la *Figura 19*.



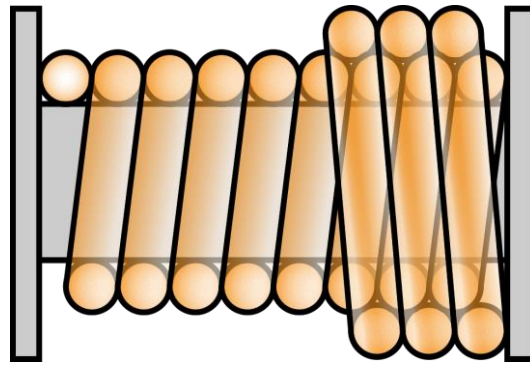


Figura 19. Vista en sección del bobinado circunferencial. Fuente: Wikipedia.

### 2.2.2 Patrón Orto-Cíclico.

Es un patrón muy similar al tipo circunferencial, en este caso se realizan movimientos discretos en cada revolución de la bobina. Es decir, en cada revolución el cabezal se moverá una distancia ' $p$ ' mostrada en la *Figura 20* en el transcurso de una fracción de revolución, el resto de la revolución el cabezal se mantiene fijo.

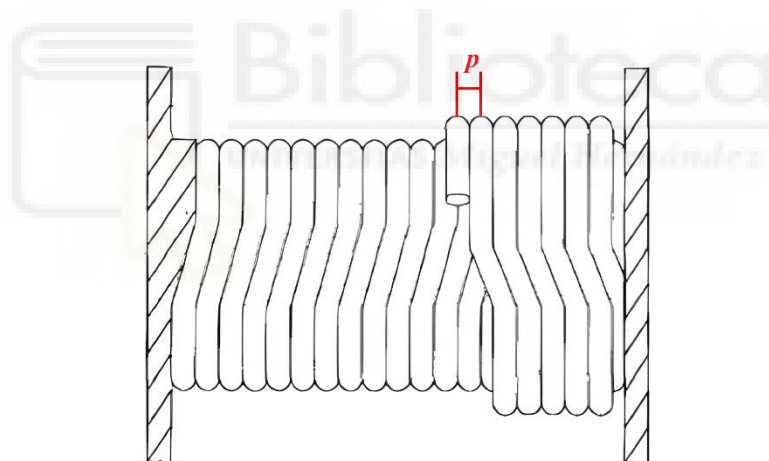


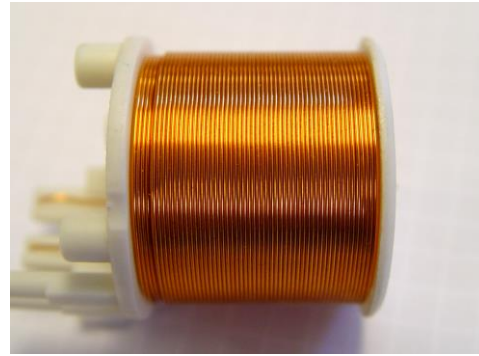
Figura 20. Aspecto del patrón orto-cíclico

De esta manera se obtiene un hilo que únicamente es desplazado en un momento determinado llamado "crossover" [4]. Para el resto de vuelta, el filamento reposa sobre los surcos de las vueltas inferiores. Dejándonos una apariencia de hilo totalmente perpendicular al eje de rotación. La *Figura 21* muestra un ejemplo de este patrón aplicado a una bobina de cobre.





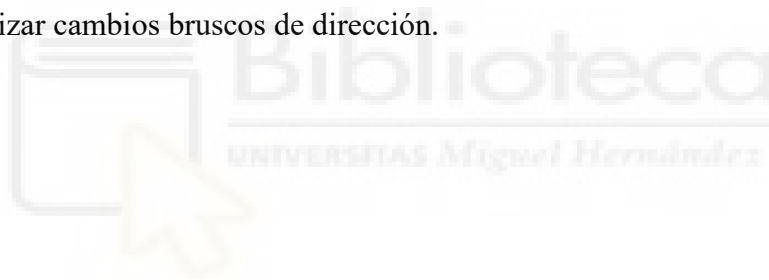
a



b

Figura 21. a) Patrón orto-cíclico vista lateral b) Patrón orto-cíclico vista frontal Fuente: Wikipedia

Este patrón inicialmente puede parecer más sencillo ya que permite estudiar vuelta por vuelta el movimiento “discreto”, donde cada vuelta está firmemente definida al igual que los cambios de dirección. Este patrón debe probarse en la práctica para observar su efectividad, ya que, este método está enfocado a hilo de cobre para la formación de bobinas, altavoces y micrófonos [5], dado que presenta mayor rigidez respecto al plástico y permite realizar cambios bruscos de dirección.



### 3. PRIMER PROTOTIPO.

#### 3.1. Diseño.

Una vez explicados los conceptos básicos del funcionamiento de una máquina bobinadora sus métodos de bobinado, se procede a mostrar un primer diseño de la máquina. Este diseño parte del funcionamiento de las bobinadoras ya existentes. Se trata de un cabezal móvil que aporta filamento de lado a lado de la bobina, además de poseer un segundo eje que le permite ascender conforme es bobinado.

Por otro lado, la bobina es acoplada a un motor que le hace girar a una velocidad determinada, incluye además un sistema neumático que permite acoplar o desacoplar la bobina. Es la combinación de estos dos movimientos (giro de bobina y movimiento de cabezal) lo que permite un bobinado de hilo según el patrón deseado.

Todo este sistema se encuentra apoyado sobre una estructura cúbica de perfilera en aluminio. La máquina está formada principalmente por perfiles de aluminio y piezas diseñadas e impresas en 3D. El diseño completo se muestra en la *Figura 22*.



*Figura 22. Diseño 3D completo del primer prototipo*

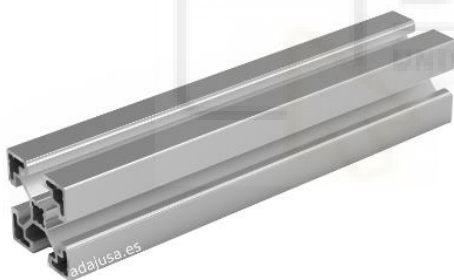
El sistema de enrollado no solo proporciona la capacidad de enrollar filamento plástico, sino que también es una herramienta para el estudio y prueba de patrones de bobinado,

así como distintas configuraciones y pruebas. A continuación, se desglosan todas las partes del diseño, justificando la solución adoptada.

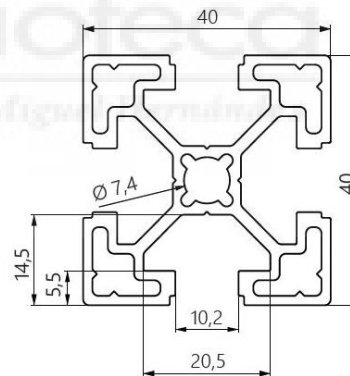
### 3.1.1. Estructura.

Las estructura de las máquinas del mercado actual están compuestas por perfiles de acero y chapa soldada, es la opción más robusta, aunque no la más adecuada para este caso ya que, al tratarse de un prototipo es muy probable un cambio o mejora en la estructura durante el proceso de desarrollo, por ello es interesante buscar un sistema que permita realizar cambios con relativa facilidad a la vez que proporcionar dureza y rigidez en toda la estructura.

Debido a que la máquina no soporta grandes esfuerzos más allá de la tensión de bobinado del hilo (en torno a 10N) y los cilindros neumáticos, se ha optado por diseñar una estructura formada por perfilería de aluminio modular acorde a la *Figura 23* mostrada, cuyas medidas exteriores son 40x40mm. El resto de las medidas se incluyen en la *Figura 24*.



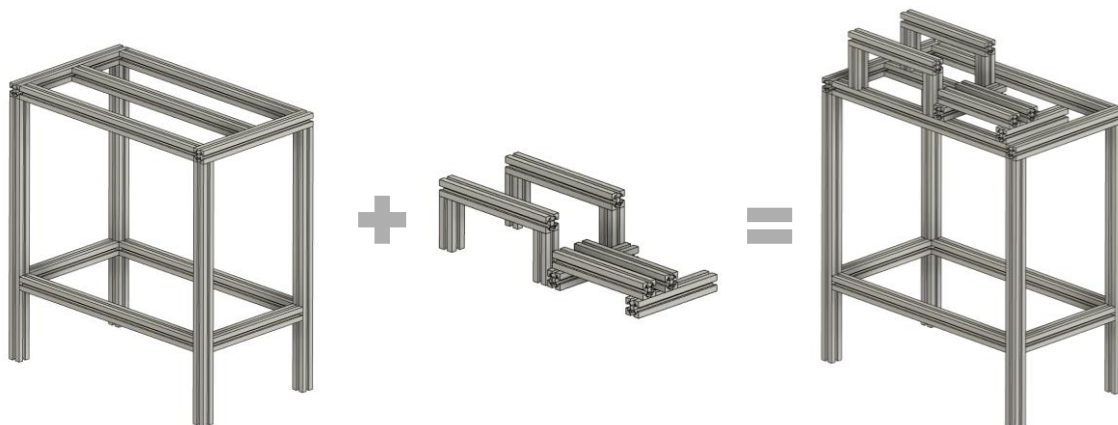
*Figura 23. Perfil empleado para la estructura.*  
Fuente: *adajusa.es*



*Figura 24. Medidas del perfil empleado. Fuente: adajusa.es*

Este sistema de perfilería en aluminio es recomendable para prototipado y construcción rápida, además de ser suficientemente resistente a los esfuerzos que serán sometidos. Dado que es una perfilería estandarizada, existe en el mercado una amplia variedad de piezas, acoples y tornillería especialmente dedicada a estos perfiles, lo cual facilita el montaje. Dicha estructura está formada por un soporte principal en forma cúbica donde apoyan 2 subestructuras: una para sostener el sistema del cabezal y otra de menor tamaño

para sostener el sistema porta bobinas. La *Figura 25* muestra el diseño de la estructura empleado.



*Figura 25. Formación de la estructura de aluminio*

En combinación con los perfiles de aluminio, se emplea el diseño e impresión de piezas plásticas realizadas mediante impresión 3D que son acopladas a dicha estructura gracias a las ranuras de los perfiles. Estas piezas sirven de unión entre la estructura y el resto de las piezas mecánicas tales como husillos, rodamientos, motores, etc. Serán mostradas en los apartados próximos, los planos en detalle de estos diseños pueden consultarse en el apartado *7.2 Planos*.

### **3.1.2. Giro de bobina (porta-bobinas).**

El diseño del sistema porta-bobinas existente en las máquinas actuales está formado por dos discos que presan entre sí la bobina de manea neumática o mediante una rosca que prensa los dos laterales entre sí. En ambos casos, uno de los discos laterales es un eje que transmite el giro del motor a la bobina, mientras que el otro, consiste en un eje libre que prensa la bobina de manera neumática o mediante rosca.

Atendiendo a estas posibilidades surge la idea de realizar un sistema de acople neumático, es rápido y sencillo para los operarios, además de ejercer una fuerza homogénea, a diferencia de la rosca que depende de su apriete. El siguiente esquema en la *Figura 26* muestra el sistema que se pretende emplear.

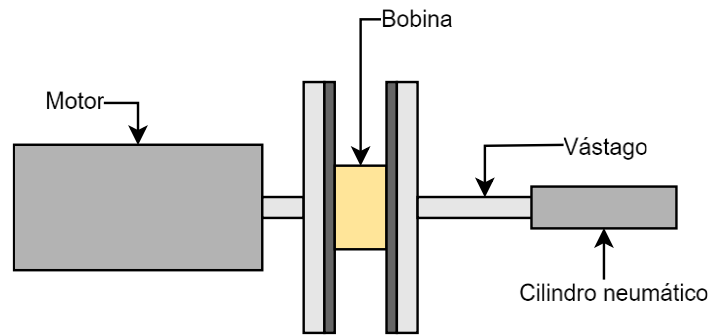


Figura 26. Componentes del sistema porta bobinas

Según el diseño mostrado, un lateral es acoplado directamente al eje del motor, mientras que el otro lateral está asegurado mediante un cilindro neumático sujeto al disco por medio de un rodamiento que permite el giro libre para así presionar o liberar la bobina. De esta manera, la bobina es firmemente anclada al disco del motor, para realizar un cambio de bobina, se retrae el pistón y el disco es separado de la bobina. En la *Figura 27* se muestra un dibujo del porta bobinas abierto y cerrado .

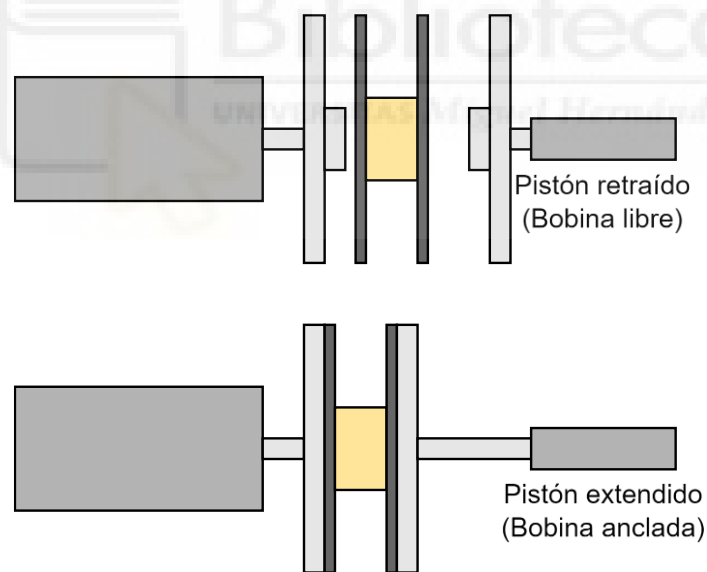
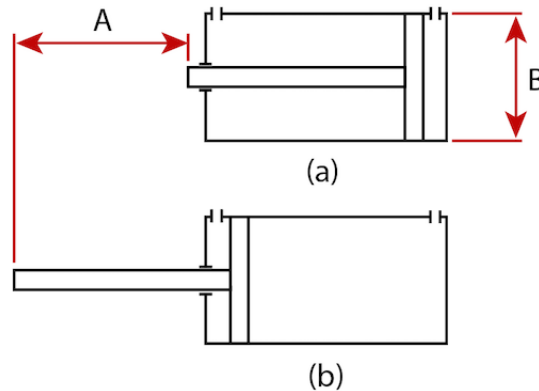


Figura 27. Dibujo explicativo del sistema porta bobinas

Para realizar un correcto diseño, es conveniente el cálculo previo de medidas del cilindro neumático para comprobar la viabilidad de esta configuración. Un cilindro neumático está compuesto por dos medidas: el diámetro y la carrera. El diámetro del cilindro está directamente relacionado con la presión que ejerce, mientras que la carrera define el

recorrido total del vástago. Atendiendo a la *Figura 28* la distancia A corresponde a la carrera mientras que la distancia B se refiere al diámetro del cilindro.



*Figura 28. Indicación de medidas de diámetro y carrera para un cilindro neumático*

Comenzando con el diámetro, la empresa ha marcado una fuerza aproximada de 30kg para presionar la bobina, haciendo uso de las unidades que definen 1 pascal se opera.

$$1 Pa = \frac{N}{m^2} \quad (1)$$

Sabiendo que la red neumática de la fábrica trabaja a 8 bares (800000 Pa), basta con sustituir con los datos conocidos en la ecuación ( 2 ).

$$800000 Pa = \frac{30 * 9.8}{A_{cilindro}} \quad (2)$$

$$A_{cilindro} = 367.5 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (3)$$

Obteniendo el área del cilindro en la ecuación ( 3 ), se procede a calcular el diámetro ideal.

$$367.5 \cdot 10^{-6} m^2 = \pi \cdot r^2 \quad r = 10.8mm \quad (4)$$

$$D = 2r = 2 \cdot 10.8mm = 21.6mm \quad (5)$$

Resolvemos la ecuación ( 4 ) y obtenemos un diámetro del cilindro de 22mm aproximadamente. El valor de la carrera, según pruebas realizadas, debe ser al menos de 80mm para poder extraer las bobinas con facilidad. En base a la disponibilidad del proveedor de material neumático se va a emplear un cilindro de diámetro 25mm y 100mm de carrera.

A la hora de ejecutar un giro controlado de las bobinas y que estas enrollen de manera adecuada, es necesario un servomotor, en este caso se trata del servomotor 90ST-M02430 (*Figura 29*), el cual es acoplado directamente al disco, de esta manera las bobinas giran solidarias al motor. También incluye su respectivo driver modelo AASD-15A mostrado en la *Figura 30* que incluye todos los parámetros de ajuste [6] necesarios para el servomotor.

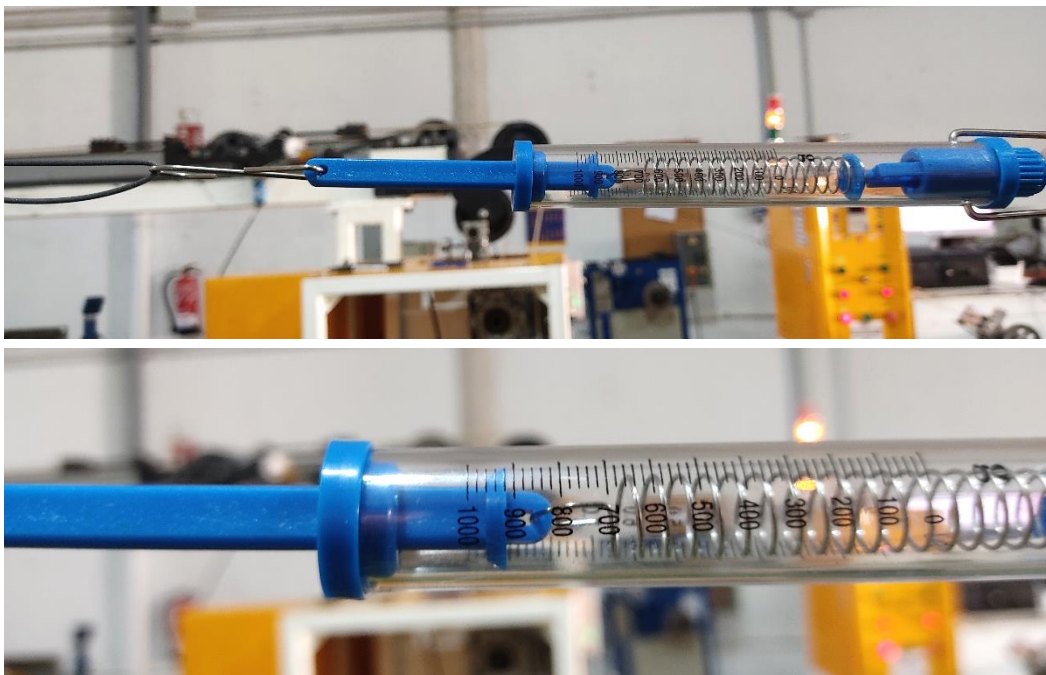


*Figura 29. Servomotor 90ST-M02430*



*Figura 30. Driver (controlador) incorporado del servomotor*

Ha sido preciso calcular el par de bobinado necesario, así como la velocidad de bobinado para comprobar el cumplimiento de los requisitos de par y velocidad. Sabiendo que la tensión ejercida por el acumulador de hilo es muy similar a la tensión de bobinado, se procede a medir dicha tensión mediante un dinamómetro. Tal y como se muestra en la *Figura 31*.



*Figura 31. Tensión empleada para bobinar*



Este nos devuelve un valor aproximado de 900g o 9N. Sabiendo que el hilo es enrollado de manera tangencial a la bobina y esta tiene un diámetro de 200mm es posible calcular el par requerido.

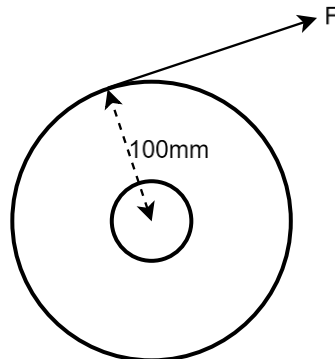


Figura 32. Cálculo del par en una bobina

$$Par(Nm) = 9N \cdot 0.1m = 0.9Nm \quad (6)$$

Por tanto, se estima que el par necesario será de 0.9Nm aproximadamente (se puede añadir un 50% extra para el arranque), la velocidad media de bobinado es calculada midiendo la velocidad de extrusión del filamento, el cual es extruido a una velocidad de 1m/s aproximadamente. De nuevo, con las medidas de la bobina, calculamos la velocidad angular equivalente según la ecuación ( 7 ). Obteniendo una velocidad aproximada de 100rpm.

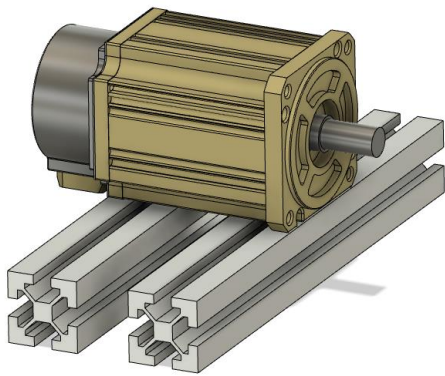
$$2 \cdot \pi \cdot 0.1(m) \cdot \frac{w(rpm)}{60(s)} = 1 m/s \quad (7)$$

$$w = 95.5 rpm \quad (8)$$

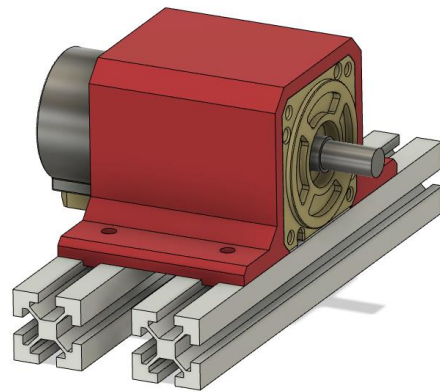
El motor seleccionado tiene unos valores de par y velocidad máximos de 24Nm y 3000 rpm respectivamente, cumple holgadamente con los valores mínimos necesarios. Además, este servomotor incorpora un encoder de 2500 pulsos por vuelta para monitorizar en todo momento la posición de la bobina.



El servomotor es anclado a la estructura mediante una de sus caras y 2 perfiles de aluminio, de manera perpendicular a estos (*Figura 33*). Para una unión fija entre el servomotor y la perfilería de aluminio, se ha diseñado una pieza sustentada sobre los perfiles y anclada tanto a la estructura como al motor mediante tornillos de métrica 8 (*Figura 34*).

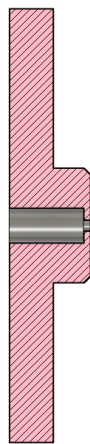


*Figura 33. Ubicación del servomotor en la estructura*

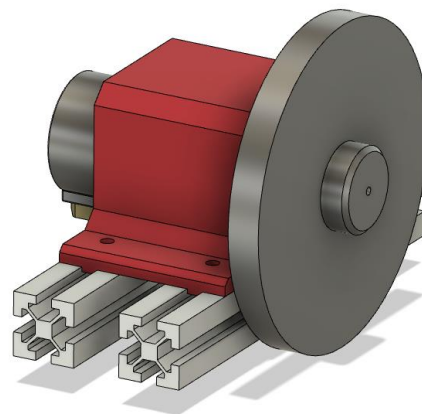


*Figura 34. Pieza de unión entre el servomotor y la bobina*

En el eje del motor se acopla un disco diseñado e impreso de 200mm cuya sección y forma se muestran en la *Figura 35* y *Figura 36*. Como detalle, el disco incluye un chaflán de 5mm para facilitar el acople de la bobina.



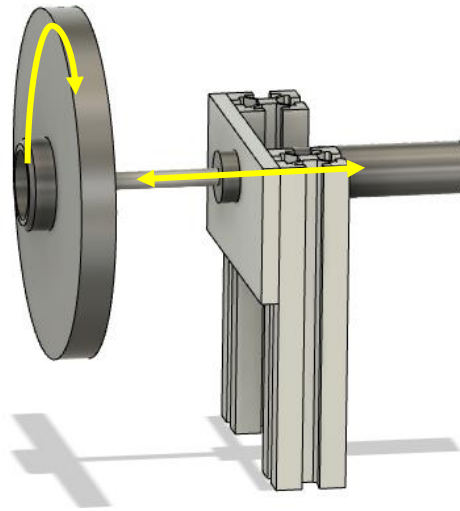
*Figura 35. Vista en sección del disco porta-bobinas.*



*Figura 36. Conjunto motor, acople y porta-bobinas*

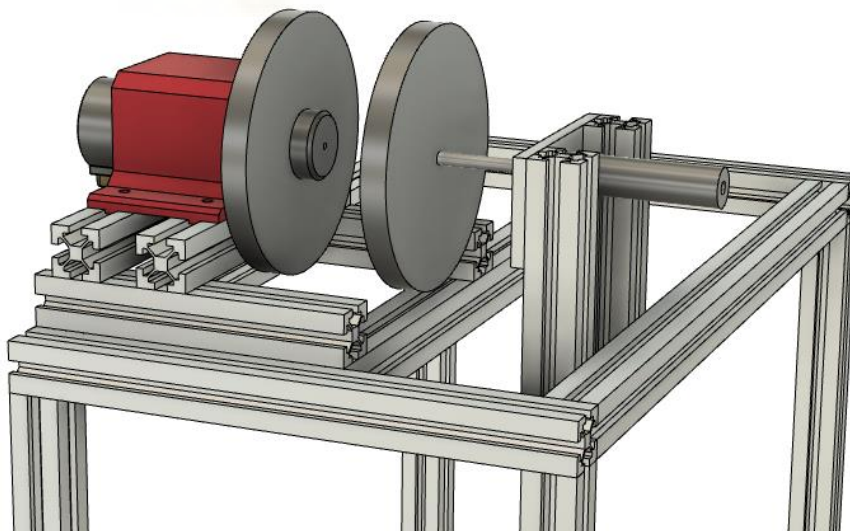
En el lado opuesto, un cilindro neumático presiona la bobina y lo mantiene unido durante el proceso de enrollado. La unión entre el disco y el cilindro neumático se realiza mediante un rodamiento, el cual es introducido en el disco y está sujeto al vástago del

cilindro neumático por medio de 2 tuercas. Así, el disco presenta un giro libre, además de poder desplazarse lateralmente gracias al cilindro neumático. El sistema se representa en la *Figura 37*.



*Figura 37. Sistema de anclaje de la bobina mediante cilindro neumático*

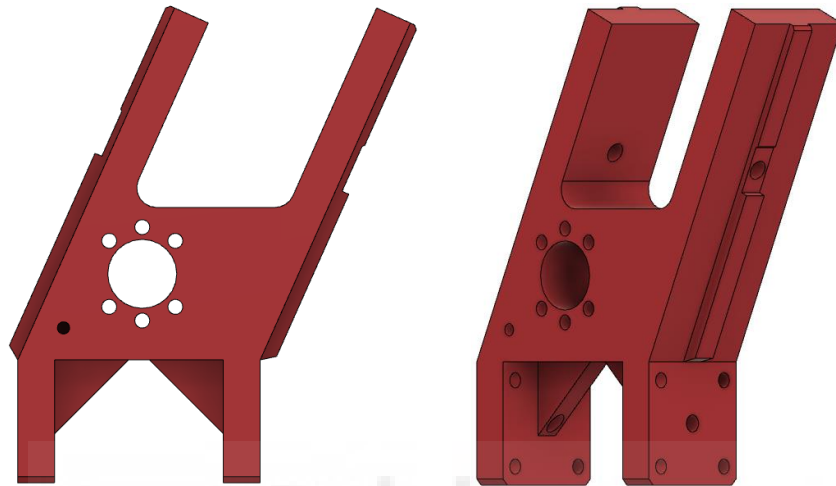
Este cilindro se encuentra sujeto a una pletina de aluminio de 10mm de grosor que a su vez está sujeta mediante dos perfiles de aluminio a la estructura. Todo el conjunto mencionado en el presente apartado constituye el sistema de giro y anclaje de la bobina mostrado en la *Figura 38*.



*Figura 38. Diseño completo del sistema de giro y anclaje de la bobina*

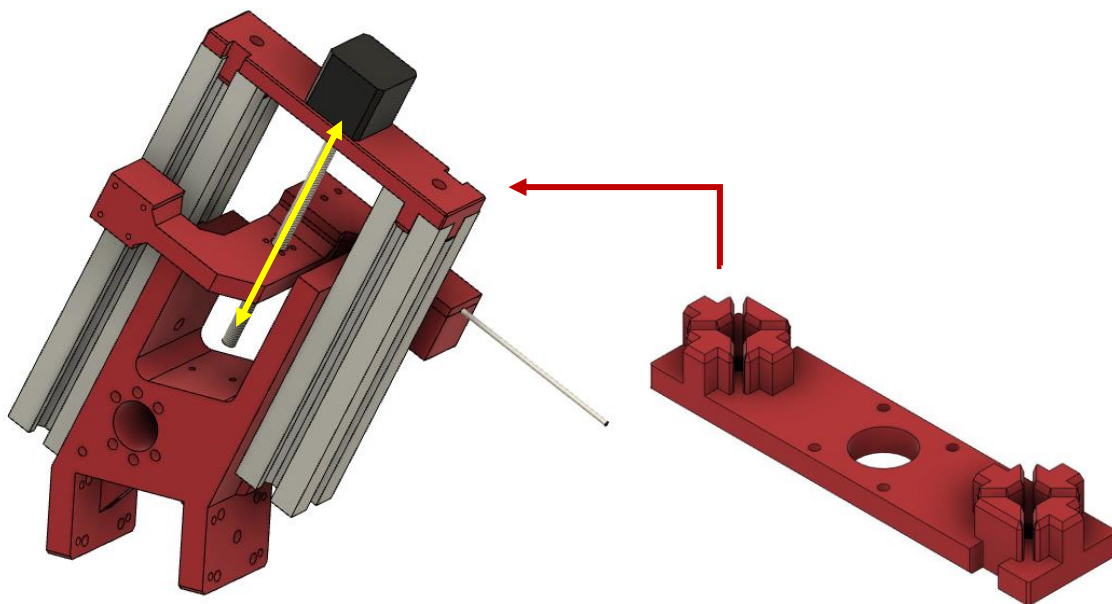
### 3.1.3. Cabezal de guiado del hilo.

El cabezal de guiado del hilo ha sido diseñado en base a modelos de bobinadoras actuales, estas máquinas presentan el cabezal con una ligera inclinación de 20° aproximadamente. Para evitar curvar el filamento proveniente del acumulador que se encuentra elevado, se aplicará una inclinación de 24° en este caso. Para tal fin se ha diseñado la pieza mostrada en la *Figura 39*.



*Figura 39. Vista lateral y general del diseño del soporte de carro*

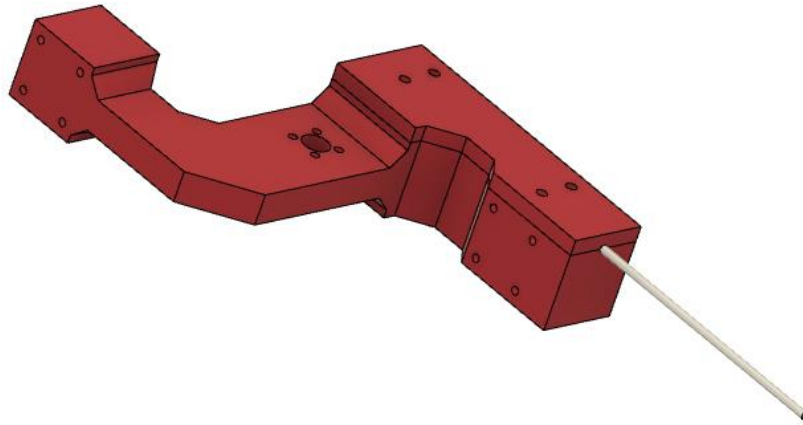
Este elemento incorpora el sistema de elevación del cabezal de guiado del hilo, formado por dos perfiles de aluminio los cuales elevan el cabezal gracias a un motor a pasos y un husillo, el conjunto de componentes se muestra en la *Figura 40*. Por otro lado, para soportar y centrar el motor y su husillo se diseña una pieza, sirviendo de puente entre ambos perfiles, *Figura 41*.



*Figura 40. Conjunto del cabezal de guiado del hilo.*

*Figura 41. Soporte de perfiles y motor.*

El guiado del hilo se realiza mediante un cabezal formado por un tubo de 2mm de diámetro interior y 3mm de diámetro exterior por el cual es introducido el hilo y sale tangente de la bobina para realizar así un guiado preciso. El diseño propuesto para el cabezal se muestra en la *Figura 42*.



*Figura 42. Vista general del cabezal.*

Para realizar un movimiento ascendente se emplea un motor a pasos nema 17 42HS40-005B y un driver TB6600 de bucle abierto con su respectivos husillo y guías lineales, mostrados en la *Figura 43* y *Figura 44*. Dado que el carro será un elemento ligero no se ve necesario emplear un motor de mayor tamaño.



*Figura 43. Conjunto motor nema 17 y driver de bucle abierto.*



*Figura 44. Husillo y guías lineales empleadas para eje de subida del carro.*

Por otro lado, el sistema debe moverse lateralmente en cada capa del bobinado, se hará uso de unas guías lineales SFC16, movidas por un husillo de 5mm por vuelta (BK12) y un motor a pasos nema 23 modelo 23HS30-5004D con un driver de bucle cerrado CL57T [7], mostrados en la *Figura 45* y *Figura 46*.



*Figura 45. Conjunto motor nema 23 y driver de bucle cerrado*



*Figura 46. Husillo empleado BK12.*

Para realizar una vuelta completa del husillo se requieren 5000 pulsos, por lo que el cabezal presenta una precisión teórica de 0,001mm. El conjunto de ambas piezas mostradas previamente en la *Figura 39* y *Figura 42* logran un movimiento en 2 ejes en el cabezal, tal como se muestra en la *Figura 47* y *Figura 48*.



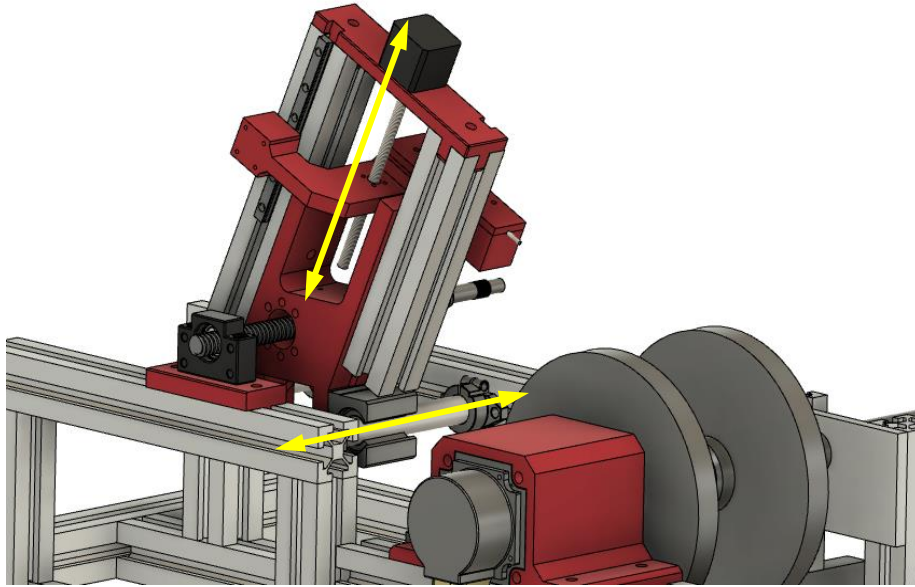


Figura 47. Ejes de desplazamiento del cabezal

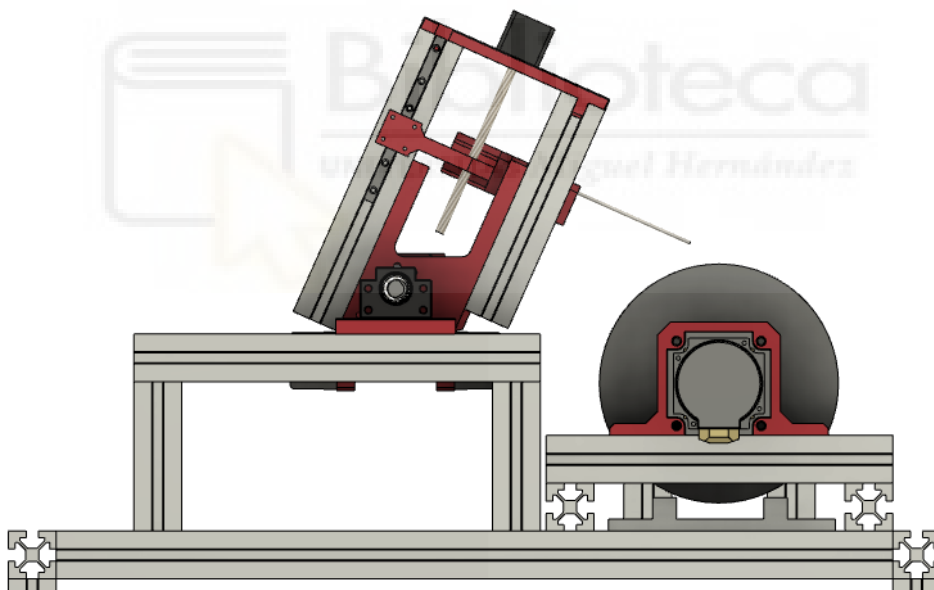


Figura 48. Vista lateral del sistema de guiado del hilo.

El movimiento ascendente del cabezal asegura que, conforme son apiladas las capas, el cabezal asciende para mantener la tangencia con el punto de contacto de la bobina. A modo aclaratorio, la *Figura 49* muestra la posición del cabezal al comienzo de la bobina, mientras que la *Figura 50* muestra la posición al finalizar la bobina. En el proceso de bobinado, el cabezal debe ascender para mantenerse siempre tangente con el hilo depositado.

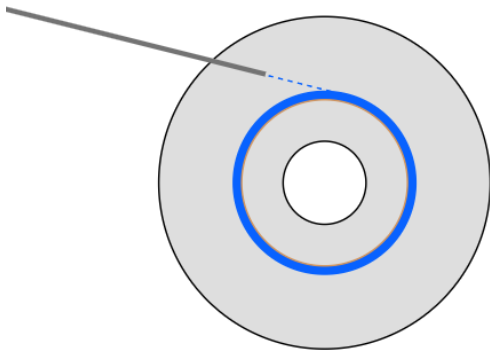


Figura 49. Posición del cabezal tangente al inicio de la bobina

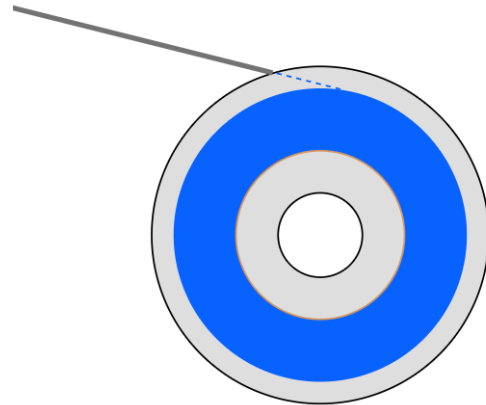


Figura 50. Posición del cabezal tangente al final de la bobina

#### 3.1.4. Pinza.

Cabe recordar que, previo a la bobinadora, está situado el acumulador, que además de almacenar el hilo, lo hace aplicando una fuerza constante. Por ello, es conveniente diseñar una pinza neumática cuya función sea bloquear el hilo en el cambio de bobina. En un cambio de bobina, el filamento debe cortarse para iniciar una nueva bobina, si el filamento no está pinzado en ningún punto, al cortarse retrocederá a gran velocidad y saldrá de todas las poleas del acumulador. Obligando al operario a detener la producción durante unos minutos y volver a pasar el filamento por las 16 poleas del acumulador.

Es imprescindible un elemento que bloquee el hilo una vez terminado el bobinado, manteniéndolo firme y permitiendo un corte del hilo con total seguridad. Al comienzo de una nueva bobina, este elemento se abrirá y permitirá de nuevo el movimiento del hilo en el cabezal para enrollar. La *Figura 51* muestra un diseño constituido por un cilindro neumático de diámetro 25mm y carrera 35mm que prensa el hilo sobre una superficie plana de plástico.

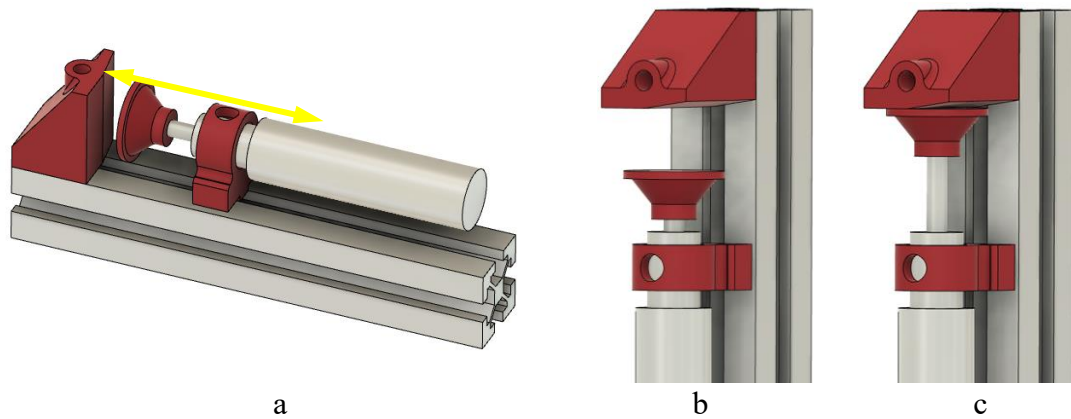


Figura 51. Diseño de pinza. a) Vista general. b) Pinza abierta c) Pinza cerrada

Del mismo modo que el caso anterior, se han calculado las medidas para la pinza. En esta ocasión, la fuerza ejercida por la pinza debe ser de 10kg.

$$800000 \text{ Pa} = \frac{10 * 9.8}{A_{cilindro}} \quad (9)$$

$$A_{cilindro} = 122.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (10)$$

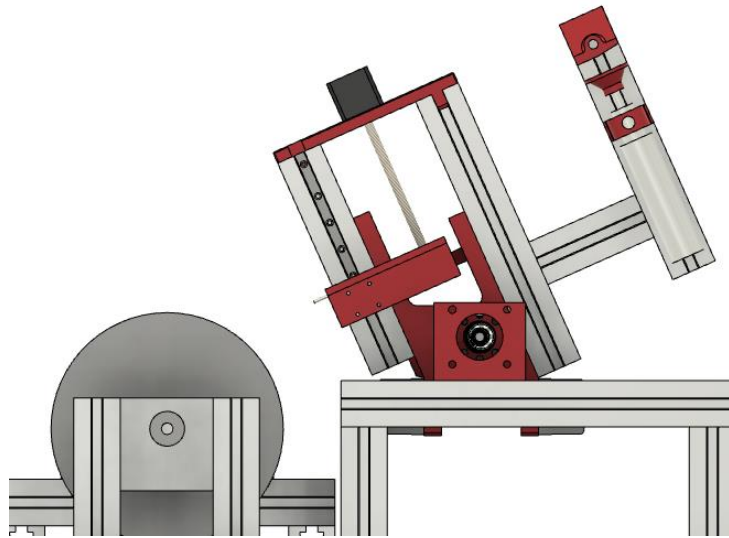
$$122.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = \pi \cdot r^2 \quad r = 6.25 \text{ mm} \quad (11)$$

$$D = 2r = 2 \cdot 6.25 \text{ mm} = 12.5 \text{ mm} \quad (12)$$

La ecuación ( 12 ) devuelve un diámetro de 12.5mm. Por tanto, el cilindro deberá tener un diámetro entre 10-15mm. La carrera, dado que únicamente debe prensar el hilo, basta con 25mm. Dados los requisitos, el cilindro neumático empleado es de 25mm y 25mm de carrera, atendiendo a la disponibilidad del proveedor.

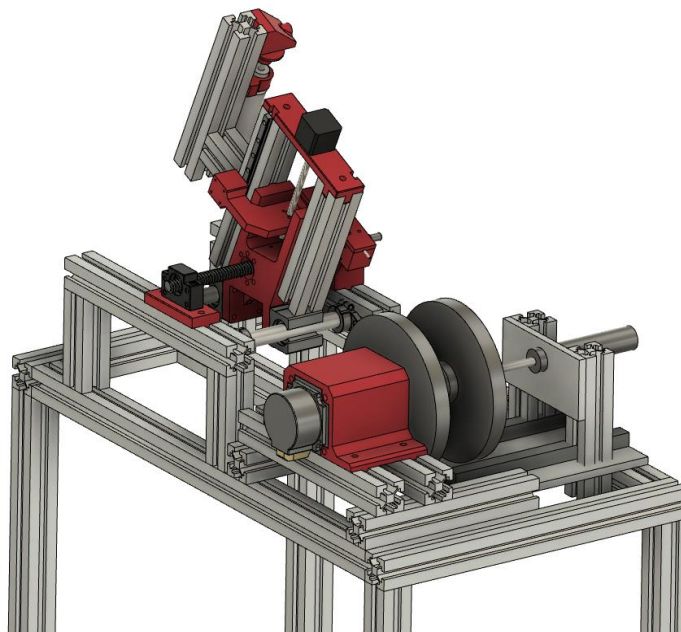


El conjunto “pinza” es acoplado al cabezal del guiado del hilo según se muestra en la *Figura 52* de manera que presenta un movimiento solidario al este.



*Figura 52. Visión completa del conjunto del cabezal*

Finalmente, el diseño completo queda según el diseño de la *Figura 53*. Con dos ejes de desplazamiento para el cabezal y uno para la bobina que permite el giro, además de los dos cilindros neumáticos.



*Figura 53. Visión completa de la bobinadora.*

### 3.1.5 Electrónica/Electricidad.

El esquema eléctrico mostrado en la siguiente figura indica el conexionado planteado para la bobinadora. Un plano más detallado de las conexiones puede consultarse en el apartado 7.1 *Esquema eléctrico*.

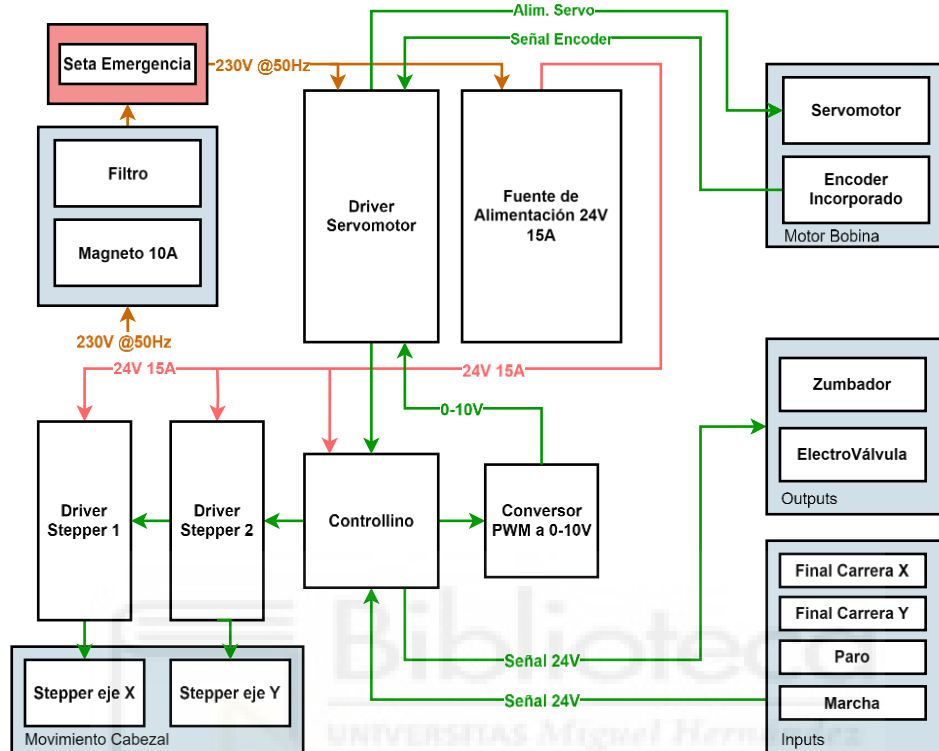


Figura 54. Esquema de conexiones del cuadro eléctrico

Todo el sistema electrónico de la máquina está gobernado por un PLC (Controlador Lógico Programable) mostrado en la *Figura 55* basado en el microcontrolador ATmega2560 de ATMEL. Funciona a 16MHz. Se trata de un *Controllino MAXI 100-100-00* alimentado a 24V con salidas y entradas digitales PWM, posee también salidas de relé y entradas analógicas [8].

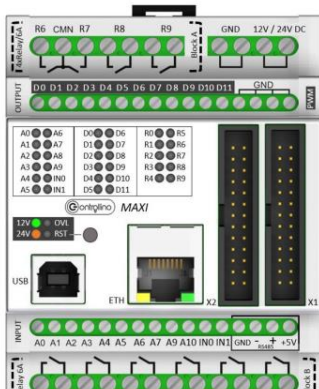


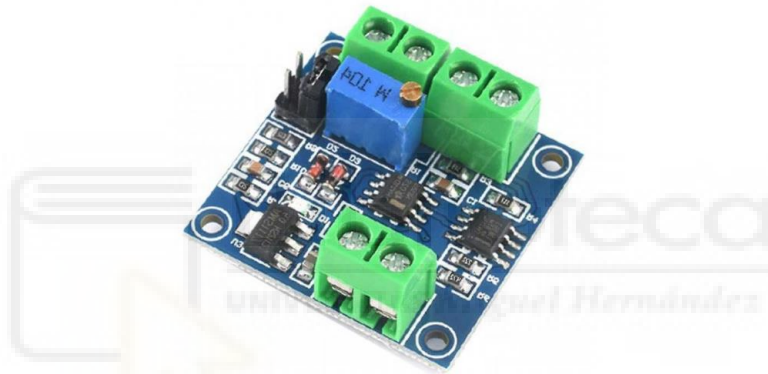
Figura 55. Controllino MAXI empleado



Figura 56. IDE de Arduino

Este PLC presenta un sistema de programación basado en Arduino (C++). El IDE de programación será por tanto el propio de Arduino. Su función principal es controlar la posición del cabezal en función del giro de la bobina para generar así el movimiento de bobinado deseado, enviando pulsos a los drivers de los motores y solenoides, así como leer la señal de los botones de marcha y paro.

El par de giro aplicado a la bobina se realiza gracias a una señal analógica de 0-10v que es introducida en el driver del servomotor. Puesto que nuestro PLC no puede generar una señal analógica de 0 a 10v, se requiere de un convertidor DAC LM358-PWM2V, transformando la señal PWM en voltaje analógico, *Figura 57*. Este módulo permite ser alimentado a 12V-30V con un voltaje de salida analógico de 0V-10V. De esta manera la señal PWM generada por el PLC es convertida a una señal entre 0-10v que es introducida en el controlador.



*Figura 57. Convertidor PWM a Voltaje Analógico*

Para el movimiento de la pinza neumática se emplea una electroválvula monoestable AIGNEP 5/2 (*Figura 58*) que, mediante una señal de 24v proporcionada por el PLC permite la apertura y cierre de esta.



*Figura 58. Modelo de electroválvula seleccionada*

Los dos motores situados en el cabezal de guiado del hilo son motores a pasos gobernados mediante otro tipo de controlador. En este caso, reciben una señal de pulso y dirección entregada directamente por el PLC que permite el movimiento del motor. La siguiente figura muestra el funcionamiento del driver en un motor a pasos.

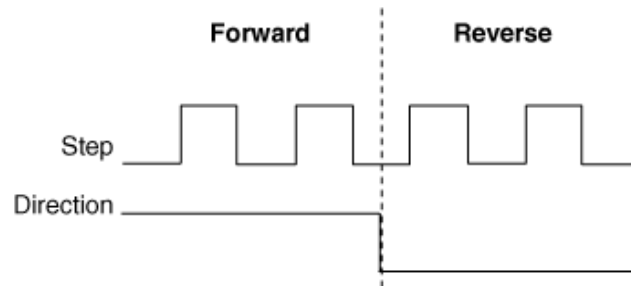


Figura 59. Funcionamiento de un controlador para motor a pasos

Cada pulso enviado al driver permite avanzar al motor un paso (configurado previamente en el driver), el valor de dirección puede ser alto o bajo y define la dirección de giro del motor en cada pulso. El motor *nema 23* posee un encoder incorporado conectado al *driver* permitiendo así una conexión en bucle cerrado para evitar la pérdida de pasos, crucial para un movimiento preciso del cabezal.

El cuadro incorpora una fuente de alimentación REDREX S-360-24 de 24v 15A que da servicio a todos los componentes que así lo necesitan, además de alimentar a los motores a pasos. Toda la electrónica está precedida por un filtro EMI (CW4L2-20A-T) mostrado en la *Figura 61*, situado a la entrada de la alimentación de la red con la finalidad de reducir interferencias electromagnéticas generadas por la maquinaria de alrededor y por la estática generada por el hilo. También se incluye un magnetotérmico bipolar de 10A (*Figura 60*).



Figura 60. Magnetotérmico empleado 10A.



Figura 61. Filtro EMI empleado

Se ha incluido un zumbador activo de 24V 2000Hz (*Figura 62*) que emite una señal sonora indicando la finalización del proceso de bobinado para así, avisar al operario y realizar un cambio de bobina. Emite una señal sonora de 85db.



*Figura 62. Zumbador 2000hz*

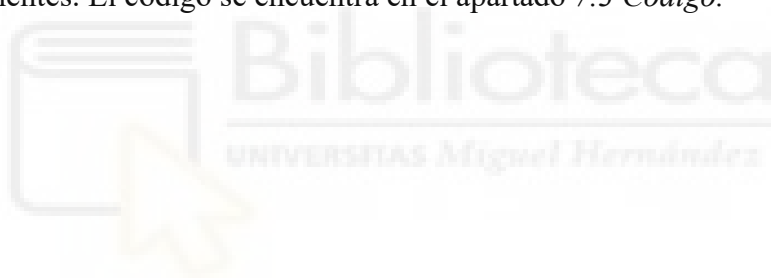
Para incrementar la seguridad de la máquina, se incorporan unos finales de carrera mecánicos en los husillos para realizar las funciones de “*Homing*” o detener los motores en caso de fallo. El motor referente al giro de la bobina también presenta un par reducido; en caso de atasco del hilo, la bobina se detendrá y no romperá el filamento. Por último, una seta de emergencia corta por completo la electricidad de la máquina, deteniendo así todos los motores y liberando la pinza en caso de emergencia.

Todo el chasis y componentes metálicos han sido conectados a tierra para proteger de contactos indirectos, la máquina está conectada aguas arriba a un diferencial de 30mA.

### 3.1.6 Software.

Este software está programado mediante el lenguaje Arduino, basado en *c++*. Es una plataforma de creación de código abierto basada en hardware y software libre. El código ha sido creado desde cero e incluye la totalidad de las funciones de la máquina de manera parametrizable, es decir se pueden cambiar las condiciones iniciales de los parámetros tales como diámetro del filamento, par, tipo de material, tamaño de bobina, paso, etc. De esta manera es posible estudiar la configuración más óptima posible y la influencia de los parámetros en el bobinado.

Por otro lado, el software de control de la máquina garantiza una operación intuitiva y eficiente. En un uso general de la máquina solo se emplea un botón para realizar el cambio de bobina, introducir un nuevo carrete y bobinar. La máquina trabaja de forma cíclica mediante la pulsación de un único botón que va ejecutando estas órdenes de manera indicada en el diagrama de flujo de la *Figura 63*. En este apartado se detallan los aspectos más importantes referentes al software, así como la explicación del funcionamiento y los cálculos pertinentes. El código se encuentra en el apartado *7.3 Código*.



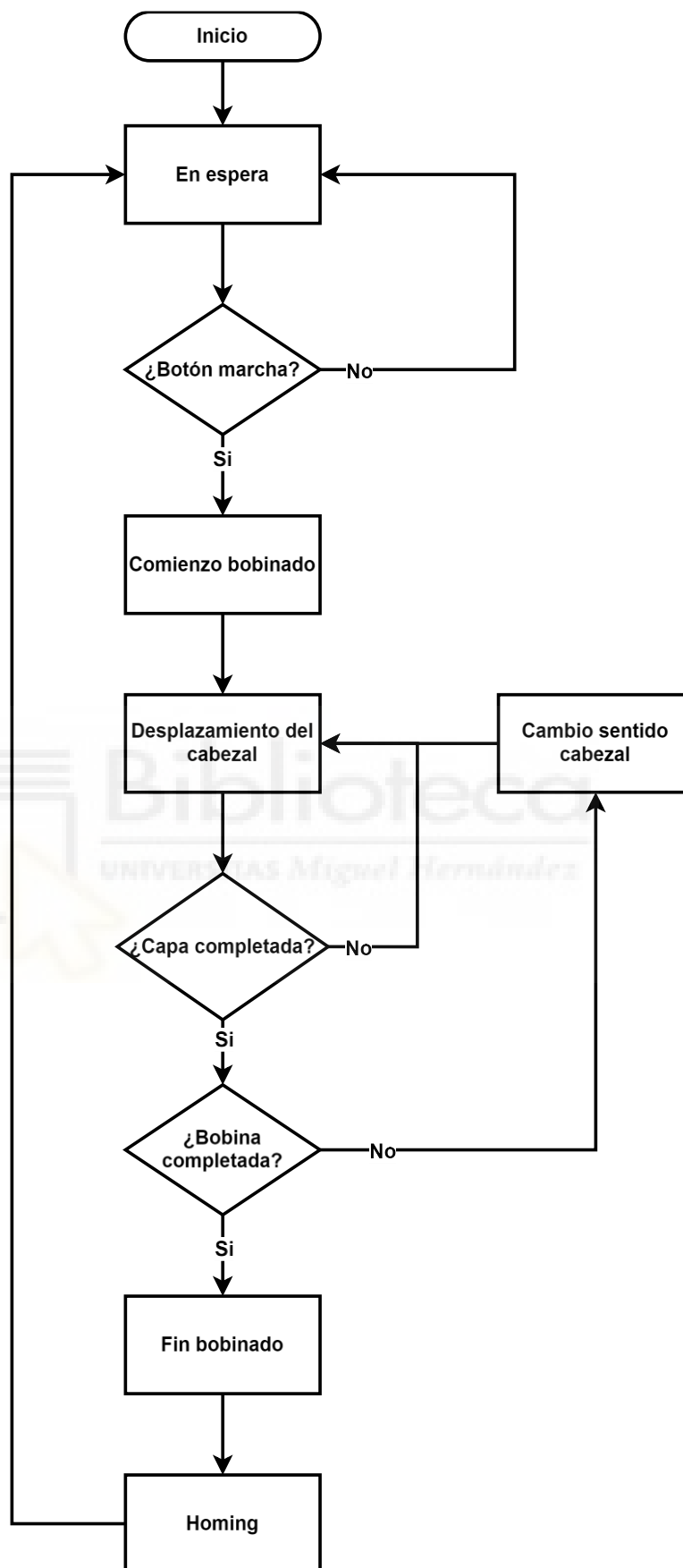


Figura 63. Diagrama de flujo del funcionamiento de la bobinadora.

### Cálculo del paso en función del ancho de la bobina.

Esta función define el movimiento lateral del cabezal del hilo en el proceso de bobinado. Este movimiento, explicado anteriormente en el apartado 2.2 *Patrones de bobinado* puede variar en función del patrón empleado ya sea circunferencial u orto-cíclico, lo que indica un movimiento del cabezal continuo o discreto respectivamente en cada vuelta. La distancia que recorre el cabezal en cada vuelta es conocida como paso o “p”.

Se plantean dos métodos de cálculo del paso:

- 1) Paso en función de la bobina
- 2) Paso fijo

Este presente apartado describe el cálculo del paso en función del ancho de la bobina. El cual permite dividir el ancho disponible entre un número de vueltas exacto. El cálculo del paso comienza con el valor del ancho de la bobina, posteriormente se calcula cuantas vueltas completas pueden realizarse dentro del ancho de la bobina teniendo en cuenta el grosor del hilo previamente definido (en este caso es de 1,75mm).

Supongamos que se tiene una bobina con un ancho de 50mm y deseamos bobinar hilo de 1,75mm. Primero, aplicando la ecuación ( 13 ) se calcula cuantas vueltas hemos de realizar para suplir esos 50mm de ancho:

$$vueltas = \frac{50mm}{1,75mm} = 28.57 \quad (13)$$

Debido a que solo es posible realizar vueltas completas, se toma únicamente la parte entera, la parte decimal es dividida equitativamente en cada una de las 28 vueltas, aplicando la ecuación ( 14 ) obtenemos el paso por vuelta:

$$paso = \frac{50mm}{28} = 1.7857mm \quad (14)$$

De esta manera, al realizar las 28 vueltas, el cabezal se desplaza todo el ancho disponible (50mm exactos) en cada una de las capas.

Por otro lado, existen funciones de calibración para delimitar los extremos de la bobina de manera precisa, así como indicar el punto de tangencia<sup>1</sup> (*Figura 64*). El usuario realiza pequeños movimientos del cabezal hasta que se muestre alineado con el punto deseado.

---

<sup>1</sup> El punto de tangencia indica el lugar donde el filamento comienza a tocar la bobina y apoya sobre esta. Ver *Figura 64*. Representación del punto de tangencia..



Es entonces cuando se guardan los parámetros en la memoria EEPROM del PLC y posteriormente serán usados para limitar los extremos de la bobina.

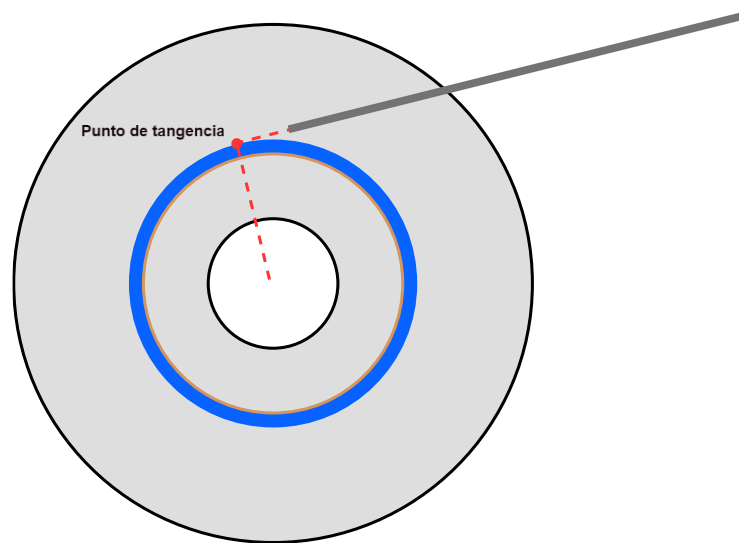


Figura 64. Representación del punto de tangencia.

### Paso independiente.

En este caso, el desplazamiento “p” del cabezal es indicado por el usuario. Este método es compatible con el bobinado circunferencial y orto-cíclico. A diferencia del método previo, este permite realizar vueltas no exactas. Por ejemplo, suponemos un ancho de 50mm y un paso de 1,76:

$$Vueltas = \frac{50}{1.76} = 28.41 \quad (15)$$

En este caso se realizarán 28.41 vueltas por capa, cambiando la dirección del cabezal cuando alcanza los extremos. La ventaja de este método es la posibilidad de controlar el paso de manera precisa, independientemente del ancho de la bobina o el diámetro del filamento.

### Movimiento del cabezal.

Haciendo uso del encoder incorporado en el servomotor y sabiendo que emite 2500 pulsos por vuelta; se realiza un movimiento lateral del cabezal (en un patrón circunferencial) interpolando los 2500 pulsos por vuelta entre los pulsos necesarios para avanzar una

distancia “p”. En el caso del patrón orto-cíclico se dividen los pulsos del cabezal entre los primeros 250<sup>2</sup> pulsos del encoder, el resto de los pulsos se mantiene fijo el cabezal.

### Corrección de par.

El control de tensión del hilo es un aspecto a tener en cuenta a la hora de enrollar. El funcionamiento del motor de la bobina es mediante par ajustable que permite controlar la tensión aplicada en todo momento. A medida que el filamento es enrollado en la bobina, este se encuentra más alejado del centro, por lo tanto, es preciso aplicar mayor par conforme el filamento se aleja del centro<sup>3</sup>. De esta manera, se mantiene constante la fuerza ejercida al hilo. En caso de emplear un par constante, a medida que se bobina, el hilo va perdiendo tensión ya que existe mayor brazo de palanca, como indica la *Figura 65*.

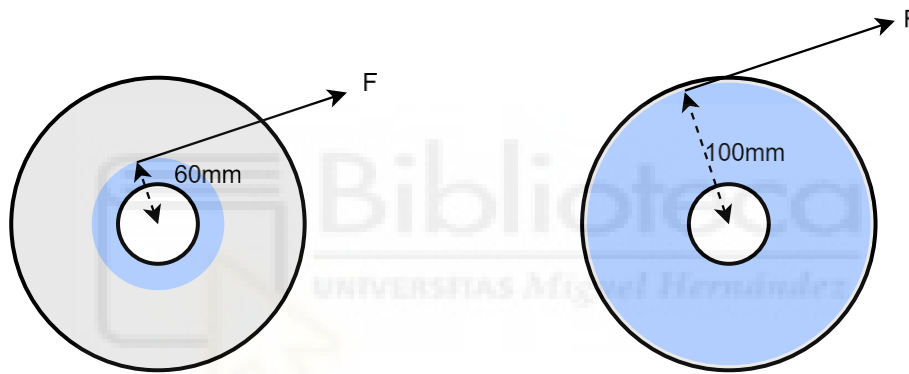


Figura 65. Variación de la fuerza en función de la posición del hilo.

Empleando la fórmula del momento indicada en la ecuación ( 16 ), la fuerza aplicada al hilo puede definirse como:

$$Par(Nm) = Fuerza(N) * Radio(m) \quad (16)$$

$$Fuerza(N) = \frac{Par(Nm)}{Radio(m)} \quad (17)$$

Puesto que la tensión debe ser constante en todo el bobinado, se igualan las fuerzas para el momento inicial y final, tal como indica la ecuación ( 18 ).

$$\frac{Par_{inicial}}{Radio_{inicial}} = \frac{Par_{final}}{Radio_{final}} \quad (18)$$

<sup>2</sup> Este valor es un ejemplo, en la práctica puede variar.

<sup>3</sup> También es posible aplicar menor par a las capas iniciales

El radio aproximado de una bobina vacía es de 5.25cm, el de una bobina completa es de 9cm aproximadamente, sustituyendo en la ecuación ( 19 ) obtenemos un aumento del par de 1.64 unidades respecto al par inicial.

$$\frac{Par_{inicial}}{0.0525} = \frac{Par_{final}}{0.09} \quad (19)$$

$$\frac{Par_{final}}{Par_{inicial}} = 1.71 \quad (20)$$

Este par deberá ser aumentado progresivamente en cada capa de la bobina hasta alcanzar un valor total de 1.71 veces el valor inicial.

### **Cálculo de longitud.**

En este caso, no existe odómetro. Para solventarlo, se calculan los metros necesarios de filamento en base a la densidad, posteriormente se calcula cuanta distancia ha recorrido el hilo en cada vuelta que realiza. Para calcular la distancia exacta recorrida, es preciso conocer el grosor del hilo, el tamaño de la bobina y el número de capa actual, así, la ecuación ( 21 ) indica los metros recorridos en cada vuelta.

$$m_{hilo} = 2 \cdot \pi \cdot (r_{bobina} + N_{capa} \cdot \phi_{hilo} \cdot 0.86) \quad (21)$$

El coeficiente 0.86 es el resultado de dividir el grosor que adquiere una bobina completa entre las 25 capas que suelen ser necesarias para formar un kg, ya que las capas no apoyan perfectamente una sobre la otra. Este resultado es obtenido según muestra la ecuación ( 22 ).

$$\frac{90mm - 52.5mm}{1.75mm \cdot 25} = 0.86 \quad (22)$$

El cálculo de la ecuación ( 21 ) es iterativo en el programa, los metros son sumados al valor anterior a cada vuelta que realiza. Cuando los metros calculados alcanzan los metros estipulados, la máquina da por finalizada la bobina

## 3.2. Fabricación.

### 3.2.1 Estructura.

Para el ensamble de la estructura de aluminio, se han tomado las medidas de todos los perfiles utilizando el diseño previamente hecho. Una vez tomadas las medidas y cantidades de cada perfil, una empresa especializada en aceros realiza un corte limpio con la medida exacta para los perfiles. Estos cortes deben ejecutarse de forma precisa y formando un ángulo recto, de no ser así, no ajustarán de forma perpendicular entre sí y darán lugar a desviaciones posteriores. La *Figura 66* muestra algunos perfiles ya cortados a su medida



*Figura 66. Perfiles de aluminio cortados*

La unión entre perfiles se realiza mediante escuadras de aluminio diseñadas para este fin. Poseen dos ranuras en cada una de sus partes planas las cuales son apretadas en ambos lados mediante tornillos de M8. Atendiendo a la *Figura 67*, para cada unión se precisa de una escuadra, dos tuercas y dos tornillos (M8 Allen, de 16mm de largo).



*Figura 67. Unión de perfiles mediante escuadra atornillada*

Las tuercas se introducen en las ranuras del perfil y permite tener roscar tornillos que pueden emplearse para acoplar cualquier elemento. En este caso para atornillar las escuadras, también son útiles para acoplar las piezas impresas en 3D. En el caso de los perfiles que soportan el motor de la bobina, estos llevan un taladro pasante que permite el acople con los perfiles inferiores, en este caso el diseño lo permite y es más sencillo que emplear escuadras.

Una vez montados todos los perfiles, la estructura queda según la *Figura 68* y *Figura 69*.



*Figura 68. Estructura principal*



*Figura 69. Subestructuras*

### 3.2.2 Piezas 3D.

Muchos de los componentes que forman la bobinadora, son piezas a medida, con un fin concreto, generalmente sirven de soporte / unión para otros componentes mecánicos. Estas piezas han sido diseñadas utilizando el programa *Fusion 360* que proporciona la empresa Autodesk. Es una plataforma de software de modelado 3D destinada al diseño y la fabricación de productos.

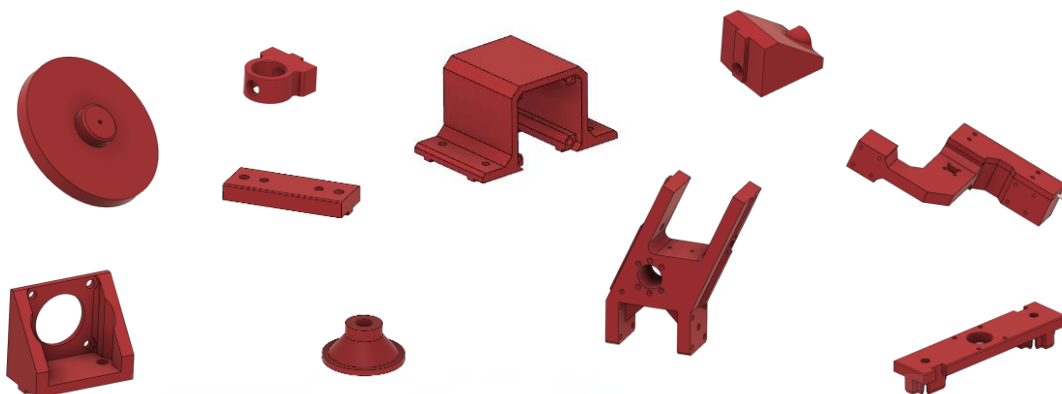


Figura 70. Conjunto de piezas diseñadas para la bobinadora.

Gracias a las impresoras de filamento plástico estas piezas han sido creadas mediante impresión 3D. Al tratarse de elementos no sometidos al desgaste ni esfuerzos mecánicos o condiciones ambientales extremas, el método de impresión 3D es una opción válida. De no ser así, hubieran sido mecanizadas en aluminio, lo que elevaría enormemente los costes y el tiempo de fabricación por pieza.

Para poder imprimir estas piezas con una resistencia acorde a su uso, se realizan diversas pruebas con distintas configuraciones de impresión tales como el relleno de pieza, número de perímetros, temperaturas, etc. Con el fin de garantizar una configuración que aporte una resistencia óptima.

El material empleado para las piezas es PETG, es el material más adecuado ya que, en general es superior al PLA. Presenta una mejor adhesión entre capas, lo cual aporta mayor resistencia mecánica a la pieza. Soporta mayores temperaturas (en torno a 80°C) a diferencia del PLA que apenas soporta temperaturas superiores a 60°C.

El PETG es resistente a productos químicos y altas humedades, en este ambiente de trabajo donde las piezas van a estar expuestas es preferible la utilización de PETG.

Además, al igual que el PLA, es un producto producido en la propia fábrica. La *Tabla 1* muestra las características técnicas de cada material.

	PLA	PETG
Composición	Ácido poliláctico	Tereftalato de Polietileno con Glicol
Diámetro	1.75mm	1.75mm
Densidad	1,24 g/cc	1,29 g/cc
Temperatura de fundido	165 - 180 °C	210 °C
Temperatura de transición vítrea	55-60°C	80°C
Resistencia a la tracción	51MPa	50MPa
Temperatura de impresión	200-220°C	230-240°C

*Tabla 1. Filamentos empleados y sus características básicas*

A la hora de crear piezas en una impresora 3D de filamento, existen ciertos parámetros que definen la resistencia de estas. Los más relevantes son el número de perímetros y el porcentaje de relleno.

- 1) Perímetros: Definido como el número de contornos que forman la pared de un modelo. Como muestra la *Figura 71*, a mayor número de perímetros, mayor grosor tendrá la pared y mayor resistencia tendrá la pieza.



*Figura 71. Distintos números de perímetros para una misma pieza. Fuente: Prusa.*

Para el caso de las piezas de la bobinadora son necesarios 6 perímetros, se han realizado pruebas con piezas de 4 perímetros, pero se mostraban menos resistentes a los golpes e incluso llegaban a partirse al ser apretados con tornillos de M8.

- 2) Porcentaje de relleno: El propósito principal del relleno es aumentar la resistencia en el interior de la pieza, además de servir como soporte para las capas superiores. La *Figura 72* muestra los distintos porcentajes de relleno.



12%      30%      50%



*Figura 72. Distintos porcentajes de relleno para una misma pieza*

Como se muestra, a mayor porcentaje, mayor densidad en el interior de la pieza y por tanto mayor resistencia. El porcentaje de relleno empleado para este caso ha sido entorno al 40-50%, estos valores han presentado un buen comportamiento bajo los esfuerzos a los que son sometidos las piezas.

Todas las piezas han sido impresas a una temperatura entre 230°-240°C aproximadamente. Esta horquilla de temperaturas viene dada por el fabricante y asegura la mayor adhesión entre capas, así como mejor acabado final.

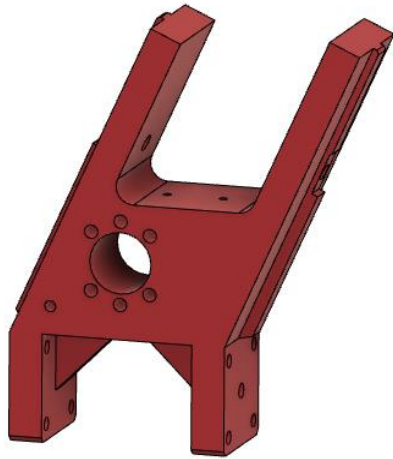
La impresora empleada ha sido una *Creality K1* (Figura 73) capaz de imprimir a 300mm/s, gracias a su diseño ligero permite mover el cabezal de impresión a grandes velocidades sin verse afectado por la inercia de las piezas móviles, esto permite realizar impresiones 3 veces más rápido que una impresora tradicional.



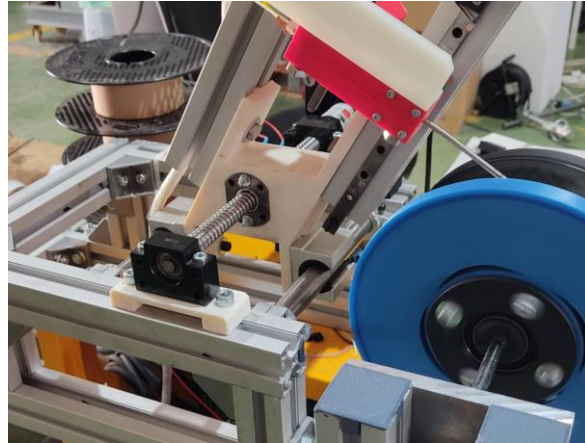
*Figura 73. Impresora 3D empleada.*



A modo de ejemplo, la pieza más grande diseñada proporciona el ángulo de inclinación del cabezal y soporta las guías lineales de los dos ejes. Mostrada en la *Figura 74* y *Figura 75*.



*Figura 74. Diseño 3D de pieza de soporte del carro*



*Figura 75. Aplicación de la pieza en la máquina.*

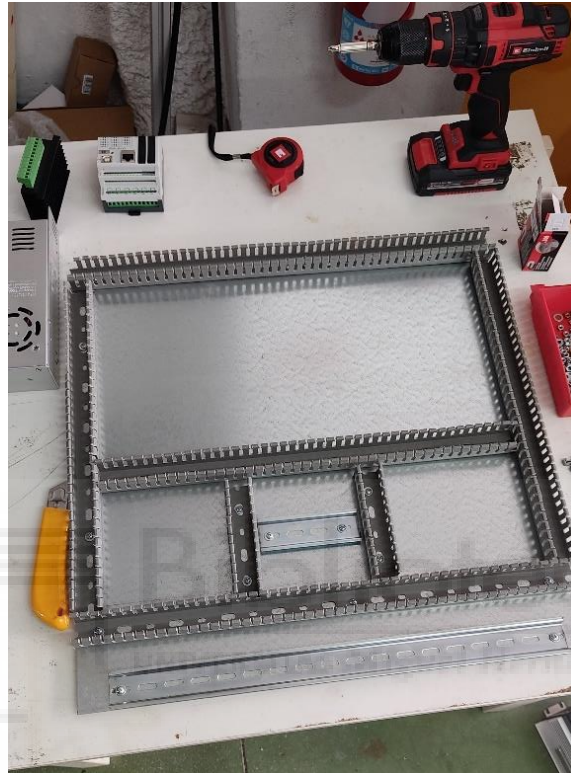
Esta pieza ha requerido un total de 16 horas de impresión y 500gr de material. Cabe remarcar que estos parámetros de impresión requieren mucho material y por tanto mucho tiempo. Aun así, este tiempo es relativamente corto al compararse con otros métodos de fabricación o incluso con una impresora tradicional, cuyo tiempo estimado estaría en 48 horas de impresión.

### **3.2.3 Cuadro eléctrico.**

Todos los componentes son anclados a una misma placa de acero, de esta manera quedan ordenados y accesibles. Estos componentes están dispuestos de forma que los cables de 230v y los cables de señal no coinciden en una misma canaleta, para evitar posibles interferencias. Además, el cuadro está separado en 3 zonas principales:

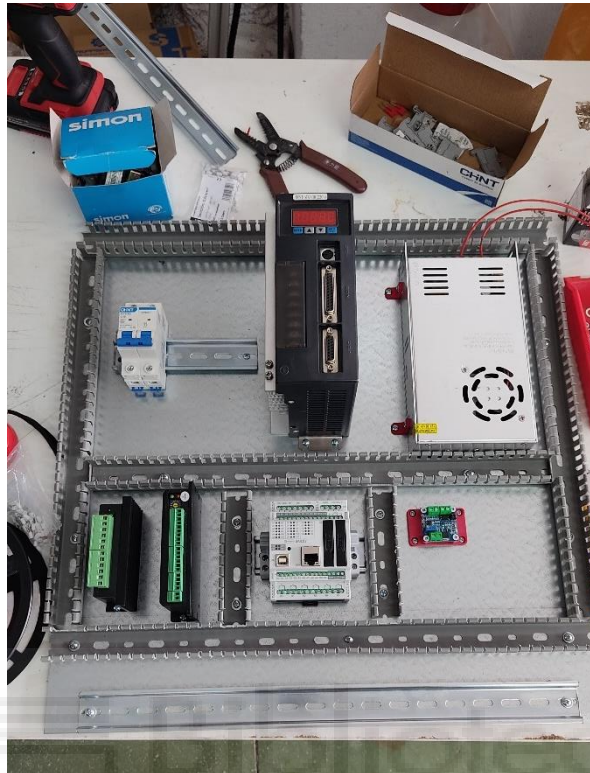
- 1) Zona superior: alberga los componentes alimentados a 230V tales como filtro, magnetos, driver del servomotor y fuente de alimentación
- 2) Zona media: contiene los componentes que funcionan a 24V como los drivers de los motores a pasos, el PLC y el convertidor PWM
- 3) Zona inferior: lugar donde son situadas las bornas de conexión que conectan con los elementos externos al cuadro, botones, electroválvula, motores a pasos, sirena, etc.

Todos los componentes (incluyendo canaletas y carril DIN) son anclados mediante tornillos a una placa de acero galvanizado de 500mm x 500m y 1.5mm de grosor. Se ha empleado canaleta ranurada de 25mm para guiar los cables por su interior y mantener ordenado el cableado. La *Figura 76* muestra la distribución de las canaletas que delimitan cada zona.



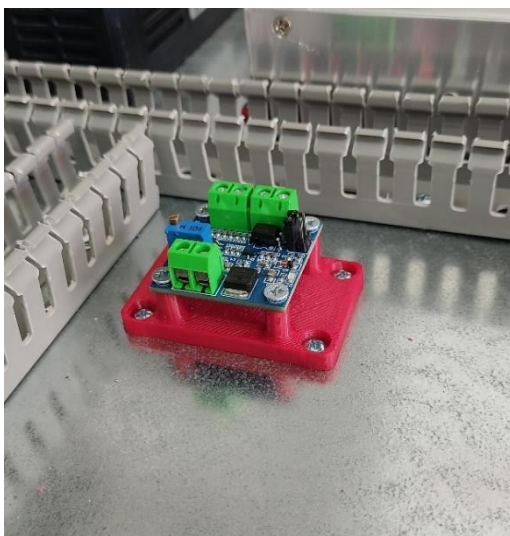
*Figura 76. Cuadro vacío con canaletas de distribución*

Posteriormente todos los componentes han sido atornillados a la chapa, de manera que queden lo más ordenados posible (*Figura 77*).



*Figura 77. Cuadro eléctrico con sus componentes*

Como detalle, estas dos piezas han sido diseñadas para permitir el anclaje del convertidor PWM y la fuente de alimentación a la chapa, ya que estos no incluyen ningún elemento para atornillarlo. La *Figura 78* y *Figura 79* muestra el resultado obtenido.

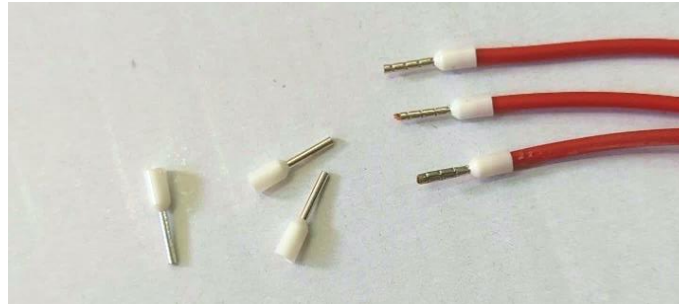


*Figura 78. Pieza de anclaje para conversor PWM*



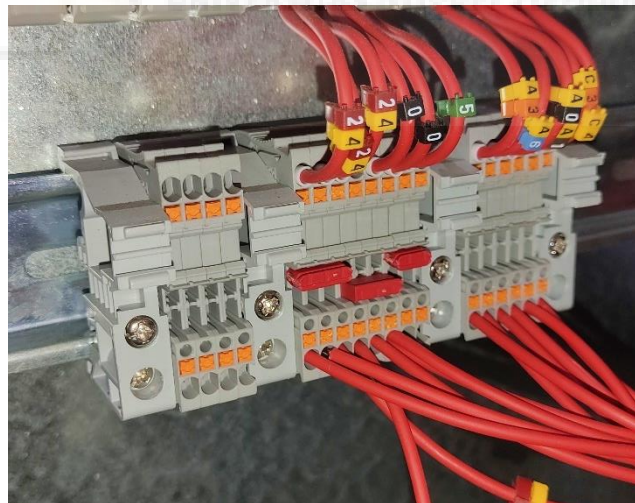
*Figura 79. Piezas de anclaje para fuente de alimentación*

Para una mayor fiabilidad en las conexiones, todos los extremos de los cables poseen punteras crimpadas, con su respectivo tamaño acorde a la sección del cable empleado.



*Figura 80. Terminales crimpados.*

Los cables de alimentación de 230V @50Hz tienen una sección de 2.5mm<sup>2</sup>, mientras que los cables provenientes de la fuente de alimentación de 24v tienen 1,5mm<sup>2</sup>. Los cables de señal del PLC tienen una sección de 0.75mm<sup>2</sup>. Se ha realizado una instalación y montaje lo más limpio posible, manteniendo el orden. La zona inferior del panel contiene un carril din sobre el cual, se acoplan todas las bornas necesarias. Estas bornas son de conexión rápida y no requieren tornillos para presar los terminales(*Figura 81*).

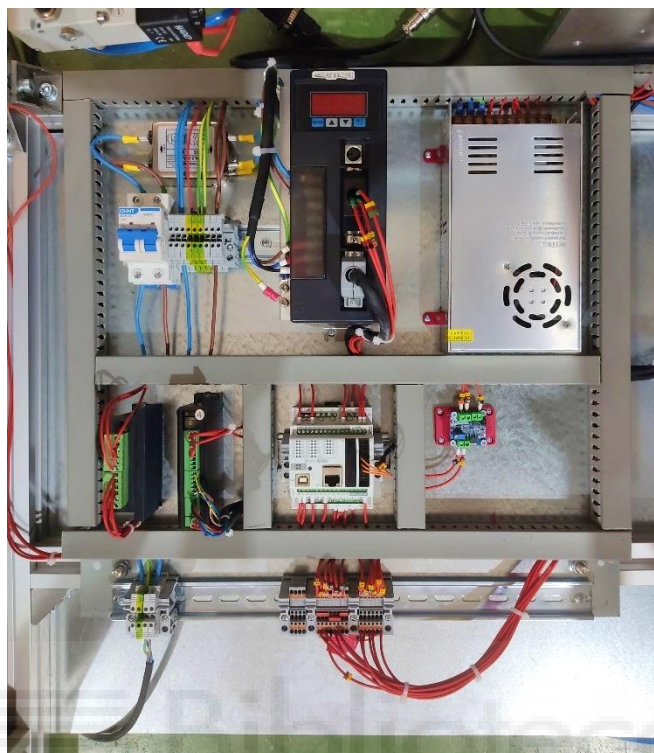


*Figura 81. Bornas de conexión*

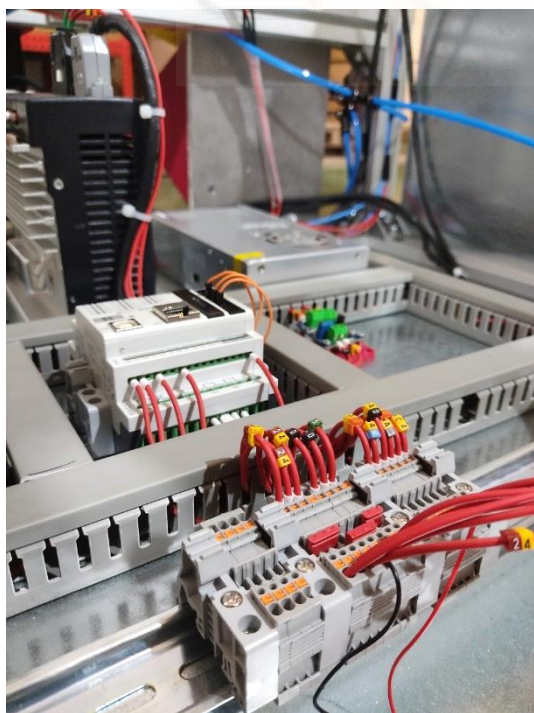
El cuadro eléctrico junto con todos sus elementos está anclado en el interior de la máquina, además, todos los laterales de la máquina son cubiertos con chapa de acero galvanizado de 1.5mm.



Tras cablear todo el cuadro el resultado final es el mostrado en la *Figura 82*, *Figura 83*, *Figura 84* y *Figura 85*.



*Figura 82. Cuadro eléctrico completo.*



*Figura 83. Detalles de conexiones del cuadro.*

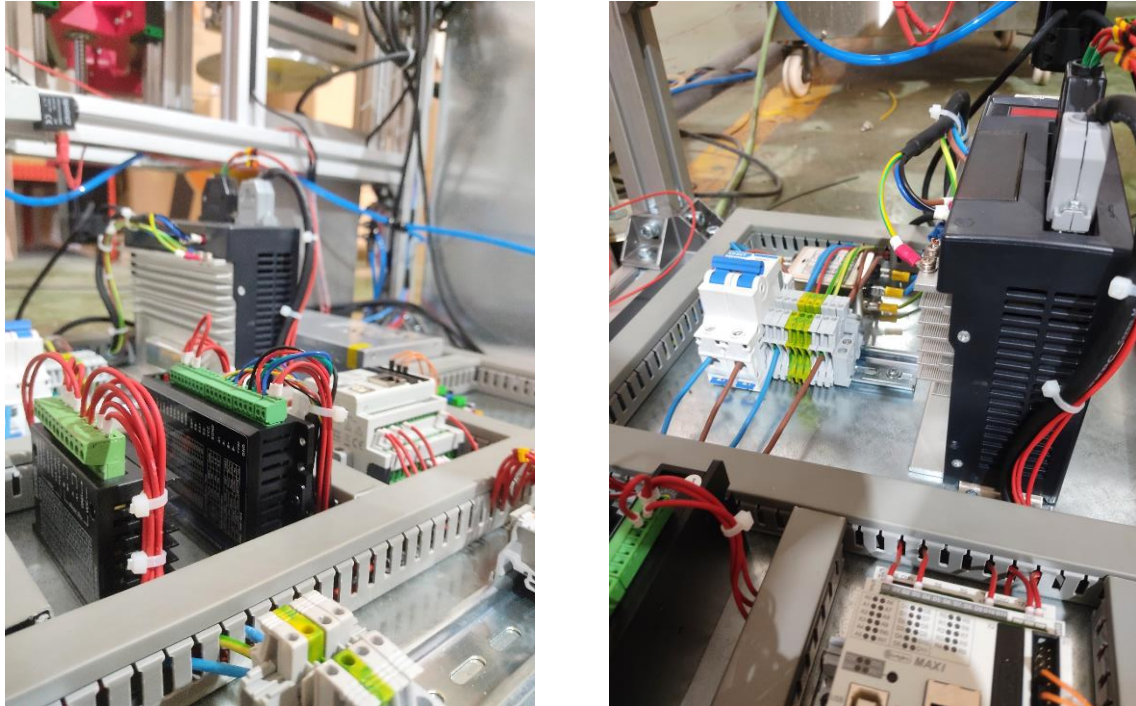


Figura 84. Detalles de elementos del cuadro eléctrico.

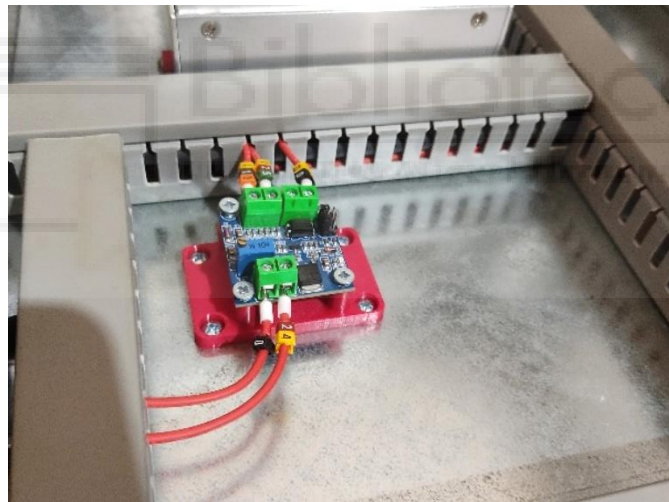


Figura 85. Detalle del convertidor DAC.

### 3.2.4 Neumática.

La máquina requiere de dos cilindros neumáticos; uno prensa la bobina entre dos discos para mantenerla en su sitio, el segundo se sitúa en la pinza y bloquea el hilo. Debido a problemas de disponibilidad del producto, se han adquirido dos cilindros de diámetro 25mm, de carrera 100mm y 25mm respectivamente. Al tratarse de un diámetro mayor al calculado previamente, será preciso un regulador de presión para reducir la fuerza ejercida por el cilindro. Para accionar el cilindro del porta bobinas, una válvula mecánica con palanca permite extender el cilindro de manera manual, según se muestra en la *Figura 86*. Esta palanca es accionada por los operarios en cada cambio de bobina.





Figura 86. Válvula mecánica

Todos los componentes neumáticos están conectados mediante tubo de teflón de 8mm y sus racores pertinentes. En el montaje de los cilindros, se ha observado que los vástagos presentan un desplazamiento excesivamente rápido, para solventar este problema ha sido necesaria la incorporación de reguladores de caudal en la entrada y salida de cada cilindro, como se muestra en la *Figura 87* y *Figura 88*.



Figura 87. Reguladores de caudal en la pinza.

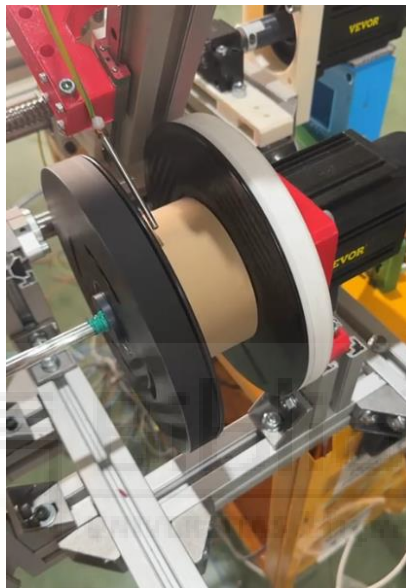


Figura 88. Regulador de caudal empleado.

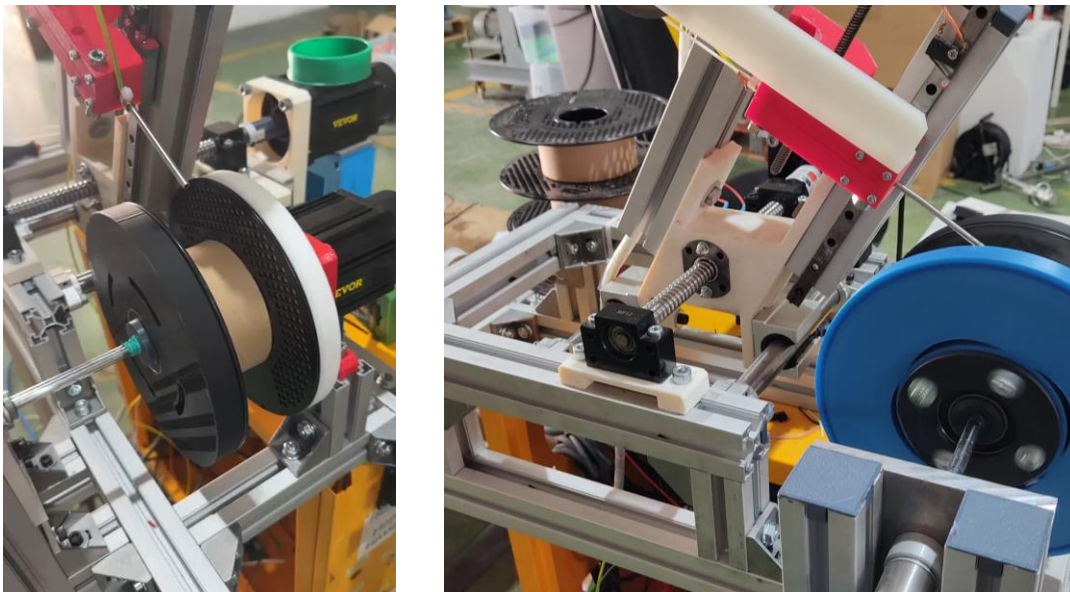
De esta manera es posible regular de manera precisa la velocidad con la que se extiende o contrae el vástago, aportando mayor seguridad y suavidad en el movimiento.

### 3.2.5 Otros elementos.

El par de todos los motores han sido reducidos para evitar roturas en caso de fallo del sistema, ambos *drivers* tienen la posibilidad de regularlo. Este par es suficientemente alto como para mover los componentes con normalidad, pero no lo suficiente como para romper los mecanismos en caso de llegar a los finales del recorrido de la máquina o existiera algún atasco. Finalmente, la máquina se encuentra preparada para realizar las pruebas. Según se muestra en la *Figura 89* y *Figura 90*.



*Figura 89. Prototipo 1 completo.*



*Figura 90. Máquina montada lista para realizar test.*



### 3.3. Test.

Una vez montada la máquina, es momento de realizar pruebas para observar su funcionamiento y obtener la mejor configuración posible. Para obtener un correcto bobinado han sido necesarias exhaustivas pruebas que han permitido comprender la dinámica del hilo y la influencia de diversos parámetros a la hora de bobinar correctamente.

Estos test comenzarán con un patrón circunferencial ya que es el patrón empleado en la mayoría de las bobinadoras de filamento, una vez se encuentre calibrada la máquina se estudiará el patrón orto-cíclico así como una variación en la posición del cabezal.

#### 3.3.1 Consideraciones previas.

Existen ciertos términos que serán mencionados a lo largo de este capítulo y que, aunque algunos han sido mencionados previamente, deben conocerse.

**Cabezal:** elemento formado por un tubo de acero cuyo filamento pasa en su interior, su función es guiar el hilo en todo momento.

**Vuelta:** cada una de las revoluciones que hace el hilo en la bobina.

**Capa:** se produce cuando el hilo llega a un lateral de la bobina, cambia de dirección y comienza a posarse sobre hilo previamente bobinado, esto se llama una nueva capa.

**Paso:** El paso  $p$  del enrollado es el avance del cabezal por cada vuelta que realiza la bobina.

**Tensión:** Indica la fuerza de tracción (en Newtons) presente en el hilo mientras se está bobinando.

**Límites de la bobina:** Este término es empleado para referirse a la posición del cabezal en los extremos de la bobina, tanto un lado como otro. Supongamos que los límites de la bobina son  $a_1$  y  $a_2$ , esto indica que el cabezal se desplazara desde  $a_1$  hasta  $a_2$  y viceversa para bobinar el hilo. Véase *Figura 91*.

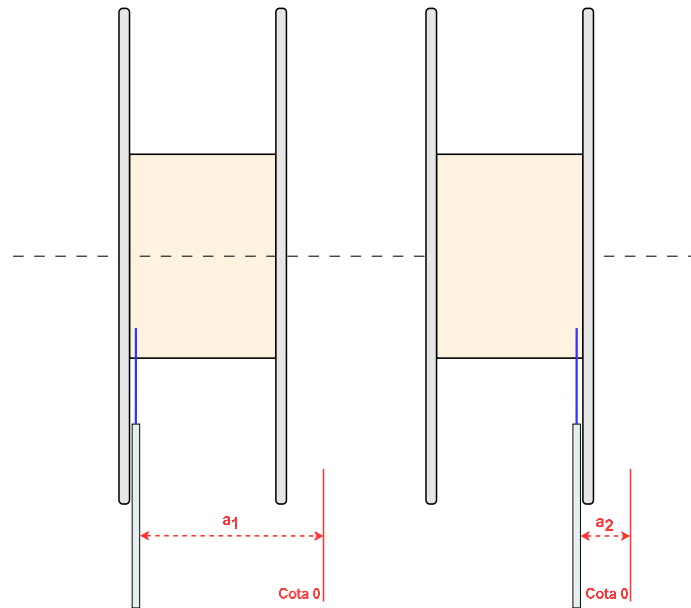


Figura 91. Representación gráfica de los límites de una bobina

**Recorrido del cabezal:** Se refiere a la distancia que recorre el cabezal de lado a lado, atendiendo a la figura anterior puede definirse como  $(a_1 - a_2)$  es la resta de los dos límites de la bobina. Se expresa en mm.

### 3.3.2. Variación límites de la bobina.

Se trata del primer parámetro a ajustar, todas las pruebas realizadas en el apartado 3.3. *Test.* se realizarán con el cabezal dentro de la bobina si no se indica lo contrario. Los límites de la bobina definen el desplazamiento del cabezal en ambos laterales de esta, acorde a la *Figura 91*. Teóricamente, teniendo en cuenta las medidas interiores de la bobina, el cabezal presenta un recorrido de 52mm de extremo a extremo, teniendo este dato se realizarán pruebas en torno a esta medida para dar con el valor real que mejor resultados obtenga. Se va a realizar un barrido en torno al recorrido teórico comenzando de menor a mayor.

Para esta prueba, únicamente se modifican los límites de la bobina. El resto de los parámetros como el paso y la tensión serán constantes a 1,78mm y 9N respectivamente. Se ha elegido 1.78mm ya que esta medida incluye la precisión del 2% que asegura el fabricante. El valor de 9N se ha ajustado de manera digital en el driver del servomotor, en el apartado 3.3.4 *Variación de la tensión del hilo.* se comenta más en detalle este ajuste.

### Limites -4mm.

Este test parte de unos límites muy por debajo del recorrido teórico; sabiendo que el recorrido teórico del cabezal es 52mm, comenzamos con un recorrido de 44mm, esto significa que el cabezal distará 4mm de los laterales de la bobina en sus puntos extremos, tal como se muestra en la Figura 92.

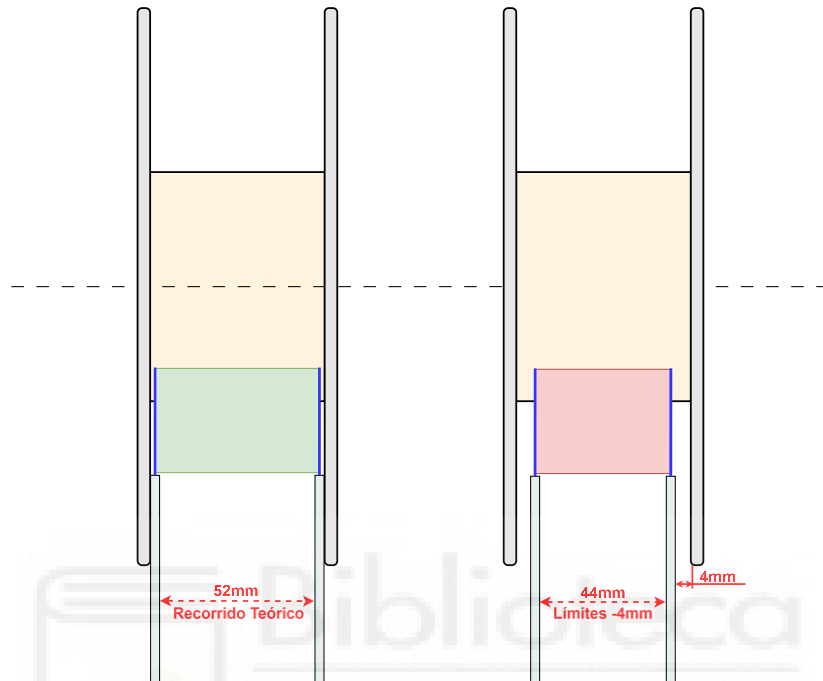


Figura 92. Explicación recorrido del cabezal

Estos han sido los resultados obtenidos en la práctica.

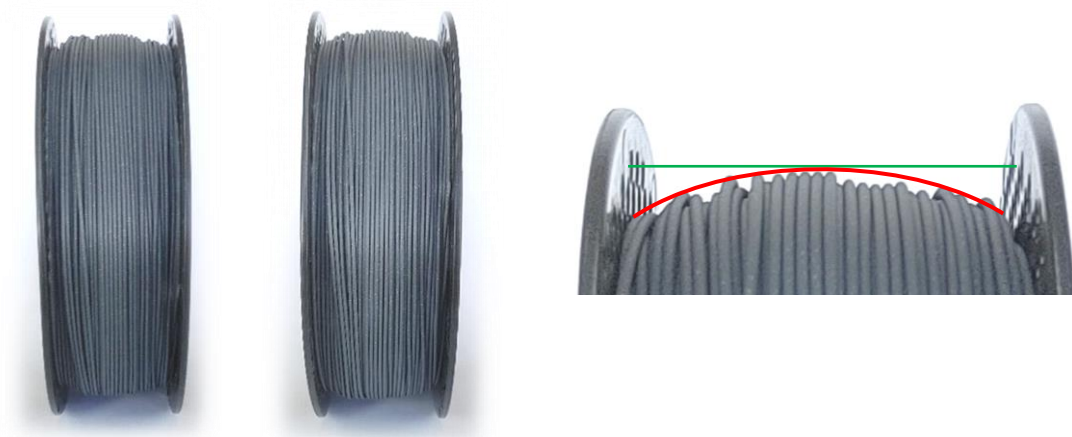


Figura 93. Resultados con recorrido de 44mm.

Como muestra la Figura 93, al configurar unos límites muy por debajo de los valores teóricos, el filamento no llega a los extremos y por tanto tiende a escasear en la zona de los laterales. Este hueco va incrementando a medida que aumentan las capas, generando un aspecto final de bobinado curvo.

### Límites -2mm.

Dados los resultados previamente obtenidos, se ve adecuado aumentar los límites (incrementar recorrido) hasta los 48mm, dejando 2mm a cada lado de margen.

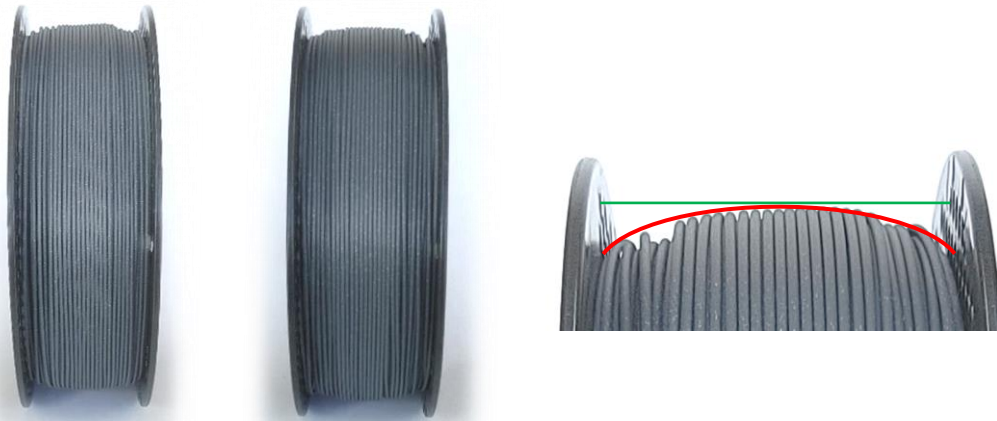


Figura 94. Resultados con recorrido de 48mm

El resultado, como era de esperar sigue estando por debajo del ideal, se aprecia una ligera curvatura en las bobinas superiores, causa de una falta de material en los extremos. Es conveniente seguir aumentando el recorrido para dar con el valor exacto.

### Límites -1mm

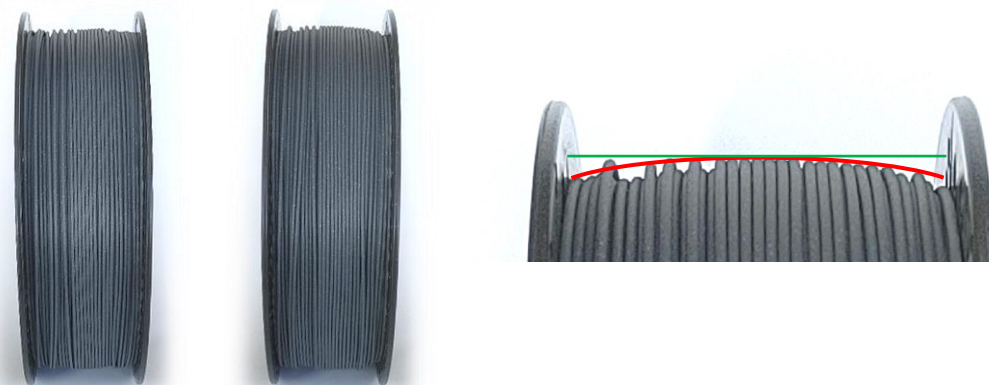


Figura 95. Resultados con recorrido de 50mm.

Tal como muestra la *Figura 95*, este resultado presenta menor hendidura en los laterales respecto a la prueba anterior y una mayor uniformidad, el resultado es positivo pero la mayoría de las bobinas siguen estando fuera de los criterios de bobinado; se aprecia un

déficit de aproximadamente 2 capas en los laterales. Se procede a realizar el recorrido teórico.

### Límites 0mm (recorrido teórico).

En esta prueba el cabezal realiza el recorrido teórico, esto significa un margen de 0mm a cada lado de la bobina. Estos han sido los resultados.

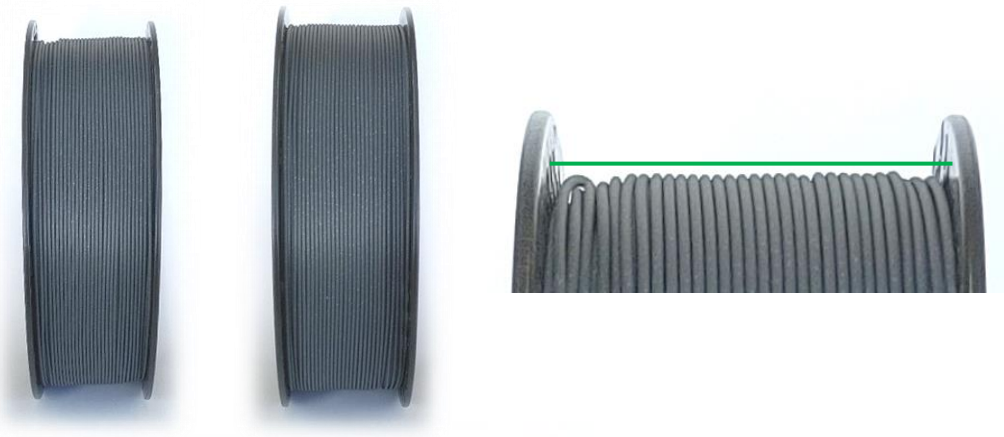


Figura 96. Resultados con recorrido de 52mm.

Los resultados han sido sorprendentemente buenos, en este caso el bobinado cumple con los requisitos. En el proceso de bobinado, el filamento acompaña en todo momento al cabezal, realizando el cambio de dirección en el momento preciso, obteniendo un resultado más que aceptable. Aun así, se decide aumentar ligeramente el recorrido para observar su comportamiento.

### Límites +0.5mm

Si por el contrario nos excedemos en el recorrido del cabezal, se obtiene el resultado mostrado en la *Figura 97*, donde el filamento tiende a apilarse en los extremos de esta.

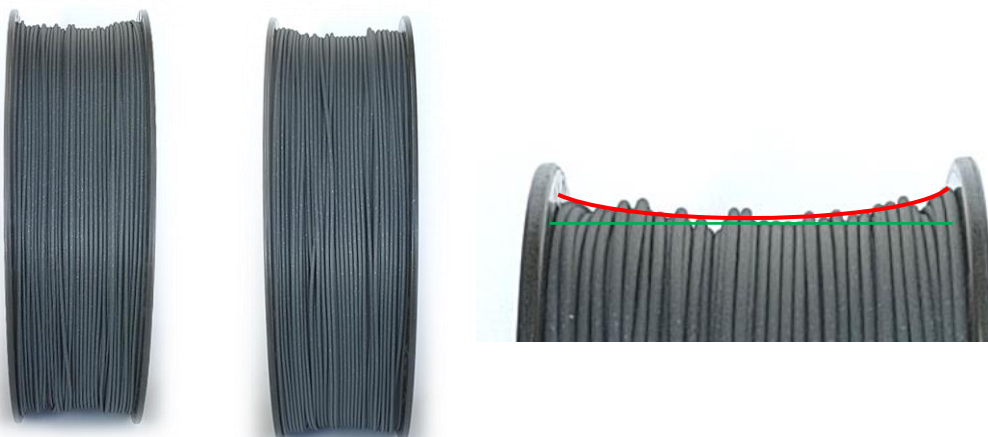


Figura 97. Resultados con recorrido de 53mm.

Por tanto, se puede afirmar que el recorrido real coincide con el recorrido teórico, se han realizado pruebas variando ligeramente el recorrido teórico y se han observado ligeras perturbaciones si el recorrido se aleja más de 0.2mm respecto al valor teórico.

**Limites reales empleados y observaciones.**

Tras haber realizado estas pruebas con relación al recorrido del cabezal y los límites, se han plasmado los resultados en una tabla con su correspondiente gráfica.

Recorrido del cabezal	Variación respecto teoría	Error obtenido
44mm	-8mm	-8.75mm
48mm	-4mm	-7mm
50mm	+2mm	-3.5mm
52mm	0mm	+0mm
54mm	+2mm	+3.5mm

Tabla 2. Relación recorrido/error.

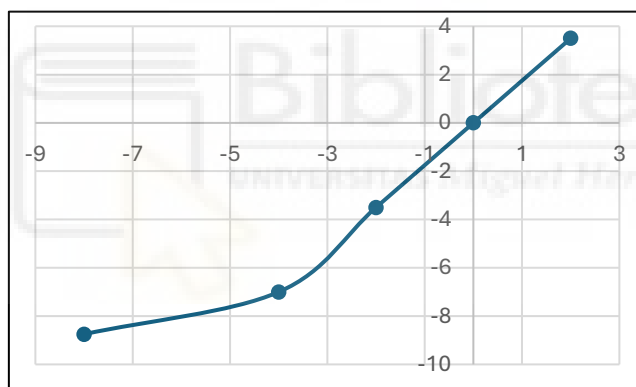


Figura 98. Relación recorrido/error bobinado

Dados los resultados previamente obtenidos, se puede afirmar que el valor real se asemeja mucho al valor del recorrido teórico. Como se ha mencionado previamente, tras diversas pruebas realizadas a posteriori con distintas tensiones y paso, se ha concluido que el recorrido ideal se encuentra en el rango de  $\pm 0.2$ mm del valor teórico, es decir, entre 51.8mm y 52.2mm. Dentro de este rango, los resultados obtenidos son satisfactorios y cumplen con los requerimientos.

### 3.3.3. Variación del paso.

A continuación, se procede a analizar el paso del cabezal para estudiar su influencia en el bobinado. Para estos test se han tomado los límites de la bobina previamente estudiados, la tensión se mantiene constante a 9N. Se procede a realizar las pruebas con un paso de 1,75mm e ir incrementando el valor, pasos menores a 1.75mm no son posibles ya que el filamento tenderá a apilarse entre sí dado que no hay espacio físico entre vueltas. En este test se pretende conseguir el menor paso posible para así obtener un bobinado compacto.

#### Paso 1.75mm.



Figura 99. Resultados con paso 1.75mm.

Este caso no presenta un bobinado correcto, todas las vueltas se cruzan entre sí, es conveniente aumentar el paso. Este valor, aunque es el teórico, no es el adecuado debido a la tolerancia en el grosor del filamento, el cual aumenta el diámetro medio de este.

#### Paso 1.77mm.

Se procede a aumentar el valor 0.02mm para observar sus resultados.

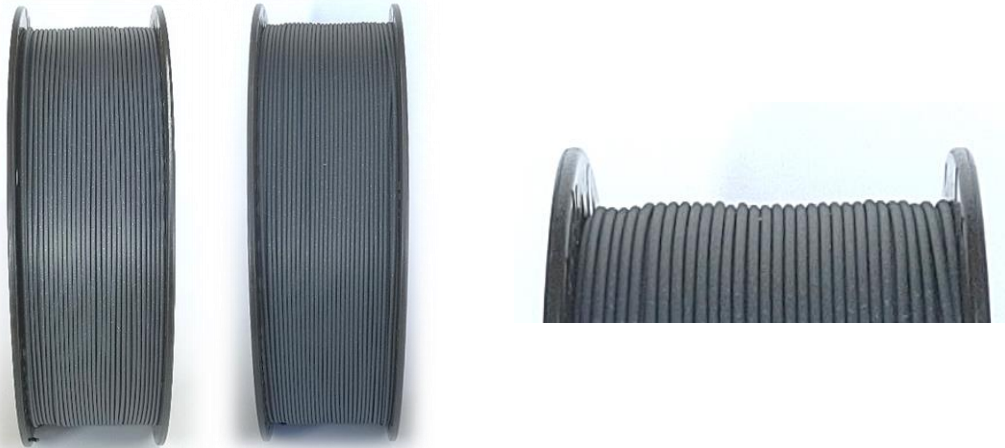


Figura 100. Resultados con paso 1.77mm.



Este resultado es más positivo que el test anterior, aunque a primera vista parezcan iguales, el filamento tiende a montarse menos sobre sus capas previas, lo que indica que el valor óptimo se encuentra cerca. Se procede a aumentar el paso 0.02mm más.

#### **Paso 1.79mm.**



*Figura 101. Resultados con paso 1.79mm.*

El paso de 1.79 mm arroja unos resultados muy aceptables, se podría afirmar que este es el menor paso al que una bobina es enrollada adecuadamente. Puesto que se busca optimizar al máximo el espacio disponible, no se va a continuar aumentando el paso ya que esto no contribuye a un buen aprovechamiento del espacio. El paso es un 2,29% más del grosor ideal. El paso óptimo de 1.79 mm es debido a las irregularidades en el grosor del filamento, las cuales generan variaciones que requieren un ajuste en el paso para asegurar un enrollado adecuado. En el caso de variación a diámetros menores, no existen inconvenientes, ya que existe un mayor espacio disponible entre las vueltas del filamento. Sin embargo, con diámetros mayores, es necesario un espaciado mínimo para mantener las vueltas ordenadas sin apilarse entre sí, evitando cualquier superposición indeseada.

### 3.3.4 Variación de la tensión del hilo.

Dados los datos de los límites previamente obtenidos y un paso de 1.79mm, se dispone a realizar pruebas variando únicamente la tensión ejercida al bobinar. Previo a estos test, se ha medido la tensión del filamento en el acumulador, en el apartado 3.1.2. *Giro de bobina (porta-bobinas)*. ya que este ejerce una fuerza muy similar a la tensión de bobinado. La medición indica que la bobinadora antigua estaba aplicando una tensión de unos 9N al filamento al bobinar.

Por otro lado, el par del servomotor de la bobinadora ha sido calculado mediante un dinamómetro y la distancia hasta el centro del eje. Sabiendo la fuerza que ejerce el motor a una distancia determinada (77mm en este caso), se calcula el par ejercido. La razón de esta prueba es asegurar que el filamento es bobinado a la tensión deseada mediante el control de par del servomotor. Este control lo realiza el driver del servomotor el cual incluye una gran cantidad de parámetros ajustables, entre ellos, el par ejercido cuyo valor es un porcentaje del par máximo que puede entregar.

El servomotor posee un par máximo de 24Nm, si queremos aplicar una tensión en el hilo de 9N, teniendo en cuenta la ecuación ( 23 ) obtenemos que el motor debe realizar un par de 0.9Nm, esto quiere decir un 3.75% del máximo.

$$Par(Nm) = 9N \cdot 0.1m = 0.9Nm \tag{23}$$

$$\frac{0.9Nm}{24Nm} = 3.75\% \tag{24}$$

Este valor porcentual es introducido en el driver del motor, aunque, en este caso sólo es posible introducir un número entero. Se ha realizado una tabla con las equivalencias entre porcentajes y par aplicados, también se ha aprovechado para comparar el par teórico con el par real medido. Obteniendo la *Tabla 3*.

Porcentaje driver	Fuerza obtenida (N)	Par Resultante (Nm)	Par teórico (Nm)	Tensión real aplicada al hilo (N)
1%	3.5	0.27	0.24	2.8
2%	6	0.46	0.48	4.9
3%	8	0.62	0.72	6.5
4%	10.5	0.81	0.96	8.5
5%	13	1.00	1.2	10.5
6%	15.5	1.19	1.44	12.6
7%	18	1.39	1.68	14.6
8%	21	1.62	1.92	17

Tabla 3. Equivalencias de Par en servomotor

Procedemos a mostrar los valores de par obtenidos en una gráfica, observar su forma y compararlos con los valores teóricos, según muestra la *Figura 102*.

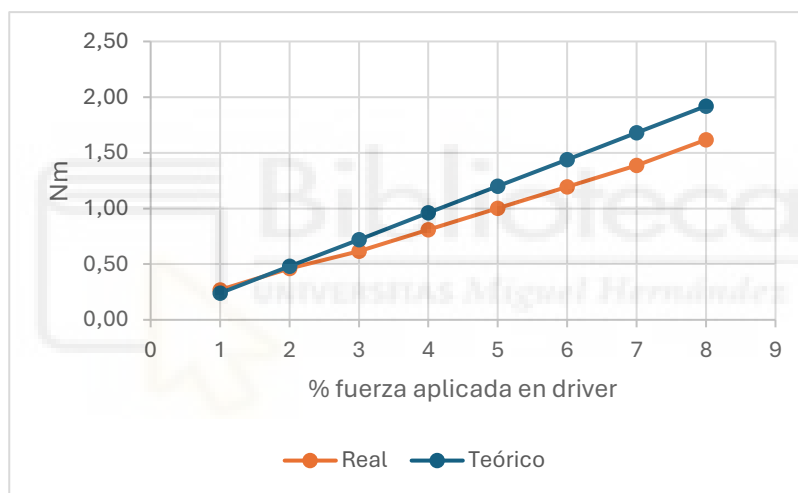


Figura 102. Comparativa par real- teórico

Como se muestra en la gráfica, el crecimiento del par es lineal en función del porcentaje introducido, se observa una disminución del par real respecto al teórico, pudiendo deberse a pérdidas relacionadas con rozamiento o incluso una caída de voltaje en el convertidor que envía la señal del PLC al driver, aun así, los resultados no distan mucho de la teoría y son aceptables. Se toman como válidos. Este apartado empleará los valores de N aplicados al hilo (última columna). Las inercias del motor se consideran despreciables. Los test parten de una tensión de 2.8 newtons, posteriormente son aumentadas gradualmente en cada bobina para observar los efectos.

Tras realizar diversas pruebas a distintas tensiones, a excepción de valores extremadamente altos o bajos, no se ha observado ningún cambio sustancial en el resultado final, todas las bobinas eran correctas.

Se han apreciado ciertas perturbaciones en las tensiones de 2.8N y 14.6N. Sabiendo que el filamento se bobina a una tensión aproximada de 9N , esto supone un 26% y 162% del valor nominal, lo cual refleja un margen más que suficiente para bobinar correctamente. Estos han sido los resultados obtenidos en dichos límites del margen:

### Tensión mínima (2.8N)



*Figura 103. Resultados con tensión baja.*

En el caso de la *Figura 103* se aprecia una ligera perturbación en los extremos de la bobina, aunque no excesivos. No ha sido posible realizar pruebas a menor tensión ya que el driver no lo permite, aun así, el sistema no permite trabajar con tan poca fuerza (el acumulador no funciona correctamente). Tensiones menores hubieran agravado las perturbaciones laterales. Por otro lado, el filamento tiende a ocupar ligeramente más espacio respecto a una bobina realizada a 9N.

**Tensión alta (>14.6N)**



*Figura 104. Resultados con tensión alta.*

En este caso las variaciones en los laterales de la bobina también son perceptibles. Además, el hilo ocupa menos volumen que el caso anterior. No se han realizado pruebas a mayor tensión ya que el filamento comienza a presentar riesgo de rotura o fallo en el sistema del “Puller”.

**Tensión correcta.**

Se puede afirmar que el rango de tensión correcto se encuentra entre los 2.8N y 14.6N, cualquier valor dentro de este rango presentará resultados positivos.

### 3.3.5 Posición del cabezal: Fuera de la bobina.

Se ha adoptado esta configuración para estudiar el comportamiento del bobinado e identificar diferencias respecto a la configuración de los test previos (cabezal dentro de la bobina). La Figura 105 muestra la diferencia entre el cabezal dentro y fuera de la bobina.

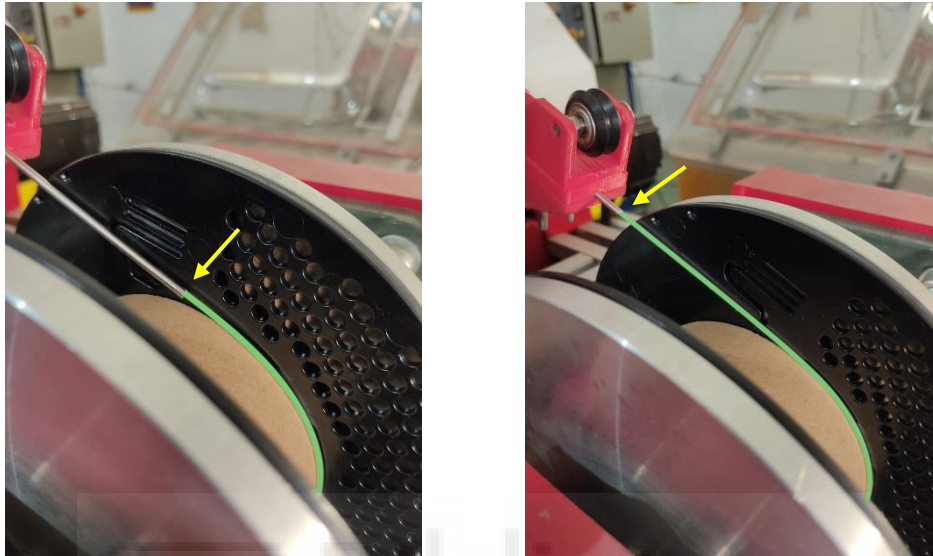


Figura 105. Posición del cabezal dentro y fuera de la bobina respectivamente.

En esta prueba el tubo se encuentra fuera de la bobina. De esta forma, la distancia entre el punto de tangencia y el cabezal es de unos 50mm, una distancia considerablemente mayor si se compara con el cabezal dentro de la bobina. El resultado obtenido no ha sido satisfactorio, aunque las primeras capas del bobinado eran correctas, un mínimo error en el cambio de capa provocaba un desfase del filamento con el cabezal, realizando un movimiento prácticamente aleatorio. Dicha perturbación conlleva consecuencias negativas en la capa siguiente, lo cual desemboca en mayor desorden y así sucesivamente hasta obtener una bobina completamente desordenada. Este cambio ha permitido estudiar las diferencias en cuanto a la dinámica del filamento, además de hallar una explicación a este comportamiento tan errático. Principalmente a mayor distancia entre el cabezal y la bobina, mayor será el desfase permitido entre el filamento y el cabezal. Obsérvese la Figura 106.

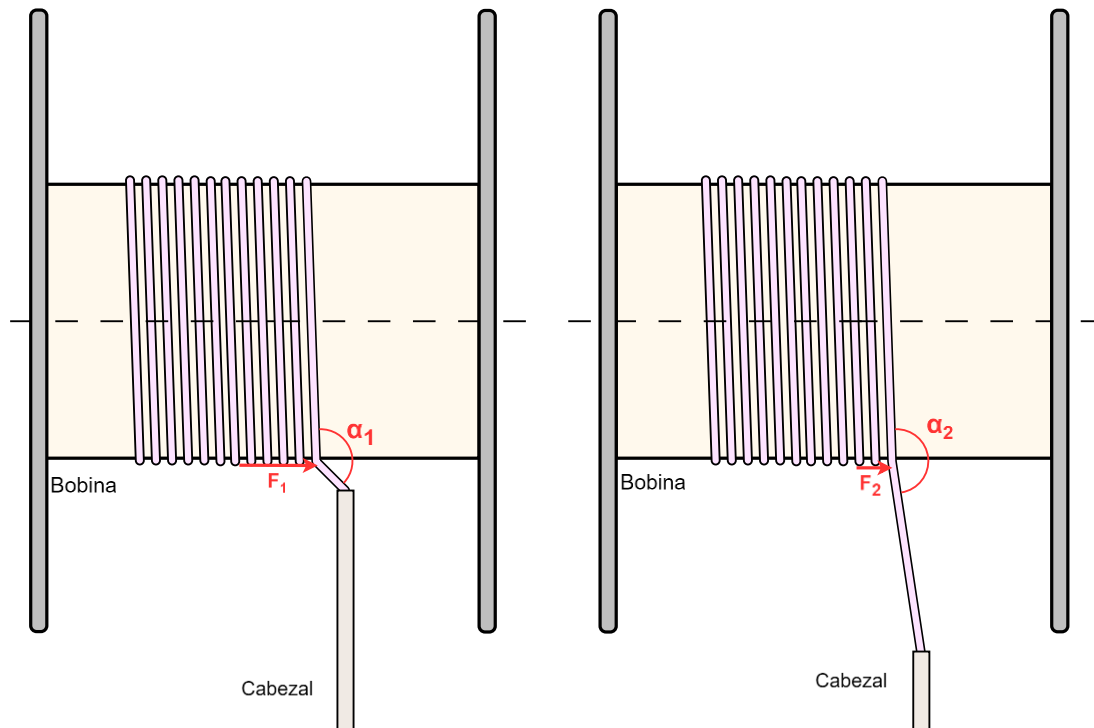


Figura 106. Comparativa cabezal dentro - fuera de la bobina.

En la figura previa, ambos casos presentan el mismo desfase, su única diferencia es la distancia del cabezal, el cual provoca un ángulo formado por el hilo diferente. Como es lógico, para un mismo desfase, distancias menores generan ángulos más cerrados. En el proceso de bobinado existe un rango de ángulos dentro del cual el filamento se enrolla correctamente, ya que la fuerza lateral resultante no es suficiente como para desviar el filamento. En el caso de ángulos más cerrados la componente lateral aumenta y obliga al filamento a alinearse de nuevo con el cabezal. Para un bobinado correcto, este ángulo debe mantenerse siempre cercano a  $180^\circ$ , lo cual indica que el filamento está alineado con el cabezal [9]. Supongamos que el máximo ángulo permitido es  $\pm 10^\circ$  respecto a  $180^\circ$ , analicemos ahora el desfase equivalente máximo en función de ambas posiciones del cabezal. Para el cabezal dentro de la bobina se tomará una distancia de 10mm (Ecuación ( 25 )), mientras que fuera de la bobina, se emplearán 60mm (Ecuación ( 26 )).

$$\text{Desfase Max1} = 10\text{mm} \cdot \tan 10 = 1.76\text{mm} \quad (25)$$

$$\text{Desfase Max2} = 60\text{mm} \cdot \tan 10 = 10.58\text{mm} \quad (26)$$



Como se muestra en los resultados, el filamento admite mayor desfase con el cabezal a mayor distancia se encuentre este. Este desfase permisible puede parecer favorable para el bobinado ya que permite cierto “juego” entre el cabezal y el filamento. En la práctica, grandes distancias de desfase no son favorables. Al situarse el cabezal más lejos del punto de tangencia, el hilo se encuentra menos influenciado por el cabezal, por tanto, si existe algún error durante el bobinado que descuadre el hilo respecto a su posición (suele ocurrir en el cambio de capa), es poco probable que el cabezal pueda corregirlo, dejando así el filamento desfasado respecto su posición ideal. En estos casos, el filamento volverá a alinearse cuando exceda el ángulo máximo permitido, para entonces ya habrá creado una perturbación en el bobinado difícil de subsanar. Como punto favorable cabe destacar que, el hilo sí puede ir a los extremos de la bobina en su totalidad ya que, al estar el cabezal fuera de la bobina, este puede aumentar el recorrido, de manera que sea el propio hilo quien toque las paredes de la bobina y no el cabezal. Aun así, esta ventaja no es suficiente. Para el caso contrario, distancias menores provocan desfases menores, en esta configuración el cabezal adquiere más influencia al bobinar, dejando al filamento muy poco margen de error. En caso de desfase con el cabezal, el filamento rápidamente es corregido, siguiendo con su curso estipulado. Como contra, al poseer mayor influencia el cabezal, es muy importante ajustar y calibrar el movimiento de este durante el bobinado. A modo de resumen se incluye la *Tabla 4* mostrando las ventajas e inconvenientes en función de la posición del cabezal.

<b>Cabezal dentro de la bobina</b>	<b>Cabezal fuera de la bobina</b>
Menor desfase permitido	Mayor desfase permitido
Mayor influencia del cabezal	Menor influencia del cabezal
Mayor importancia de los parámetros de bobinado	Menor importancia de los parámetros de bobinado
Recorrido del cabezal reducido	Recorrido del cabezal completo

*Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de la posición del cabezal.*

### **3.3.6 Patrón orto-cíclico.**

Como se ha comentado previamente este estilo de bobinado realiza movimientos discretos en cada revolución de la bobina. Tras realizar diversas pruebas con este patrón, no se han obtenido resultados del todo exitosos, la tasa de fallo es muy elevada, una posible respuesta al problema es debido a la flexibilidad del material. Al tratarse de un material ciertamente elástico, no es posible aplicar movimientos bruscos en el bobinado para dirigir el filamento en todo momento. Este patrón es más común en bobinado de

cobre o estaño, ambos son materiales maleables y permiten estas deformaciones, lo que explica el mal comportamiento del PLA. o PETG.

Se ha empleado este patrón durante varias jornadas de trabajo, pero en ningún caso presentaba resultados tan positivos como el patrón circunferencial. La mayoría de las bobinas presentaban un mal acabado y con cruzamientos, a lo sumo, presentaban un acabado similar al circunferencial; por ello, se ha decidido descartar este método e invertir más tiempo en el patrón circunferencial, que aporta mejores resultados en el tiempo. Esto explica por qué el patrón circunferencial es empleado en la gran mayoría de bobinadoras de filamento plástico.



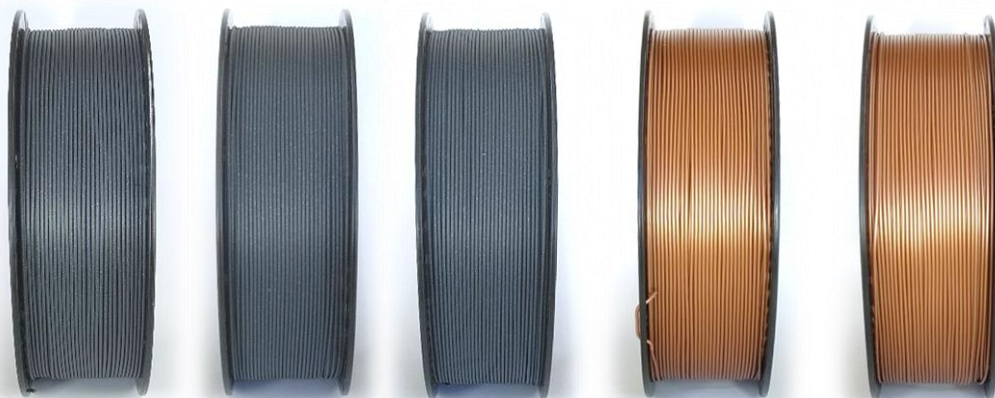
### 3.4 Observaciones del primer prototipo.

La máquina ha sido probada durante varias jornadas para comprobar su correcto funcionamiento. Dados los resultados obtenidos en estas primeras pruebas se puede afirmar que los parámetros más adecuados para un bobinado correcto deben poseer un recorrido del cabezal entre 51.8mm y 52.2mm, una tensión en el rango de 2.8N-14.6N y un paso de 1,79mm. Además, el método de bobinado debe ser circunferencial y el tubo presente en el cabezal debe estar próximo a la bobina. No obstante, para una mayor aproximación de los valores dados, es recomendable volver a realizar todos los test tomando como base los parámetros actuales, ya que los tres parámetros están relacionados entre sí y puede existir cierta variación. Prueba de ello es que, tras ajustar el paso, ha sido conveniente reajustar el recorrido del cabezal ya que los laterales se habían visto afectados ligeramente. Por ello es importante buscar un equilibrio entre estos tres parámetros y evitar realizar cambios bruscos. Aun así, estos son los parámetros que aseguran un bobinado correcto para nuestro caso, mostrados en la *Tabla 5*.

<b>Parámetros de bobinado actuales</b>	
Límites de la Bobina	51.8mm - 52.2mm
Tensión	2.8N - 14.6NN
Paso	1.76mm

*Tabla 5. Parámetros válidos tras las primeras pruebas*

Estos son los acabados de las bobinas obtenidas:



*Figura 107. Resultados del primer prototipo.*

### **Problemas de repetibilidad.**

No obstante, a pesar de tener unos parámetros correctos según las pruebas, no se aprecian unos resultados sólidos a lo largo del tiempo. Es decir, existen ciertas jornadas en las que la bobinadora no presenta acabados del todo satisfactorios y obliga a desechar un 25% de las bobinas producidas. Esta problemática ha provocado auténticos quebraderos de cabeza para hallar la raíz del problema. Primeramente, el problema se atribuía a un error de ajuste de parámetros, pero, tras numerosas (decenas) de iteraciones variando los tres parámetros, el comportamiento sigue siendo ciertamente errático a la larga. Aunque los parámetros estén correctos, un 20-25% de las bobinas es desechado, esto lleva a la siguiente pregunta:

¿Por qué ha fallado una bobina si el patrón de movimiento ha sido exactamente igual al anterior?

Tras muchas pruebas para hallar el origen del problema han sido descartados los siguientes elementos:

No son las bobinas: se ha probado seleccionar minuciosamente las bobinas, evitando las que poseían las paredes ligeramente combadas y eligiendo sólo las que presentaban dos caras perfectamente rectas y paralelas. Aun así, la máquina fallaba.

No es el material: tanto PETG como PLA o cualquier color es indiferente a la hora de bobinar, sigue presentando fallos de bobinado aleatorios a lo largo del tiempo.

No es la velocidad de extrusión: extrusiones a velocidades más lentas de lo normal (en torno a un 40-50%) o más rápidas (115%), siguen dando problemas.

Finalmente, tras descartar todas las opciones, el fallo puede encontrarse en ciertos elementos mecánicos:

- 1) **Discos desalineados:** Los discos que apoyan en la bobina y la hacen girar se encuentran impresos en 3D, al girar la bobina se observa que presentan un giro no uniforme, existe un ligero pandeo que provoca que los laterales no roten correctamente.
- 2) **Sistema porta – bobinas:** El cilindro neumático que presiona la bobina no es un sistema del todo robusto y presenta movimiento durante el proceso de bobinado, descentrando así el giro de la bobina y realizando un giro excéntrico. Dado el diseño actual, la fuerza radial recae sobre el vástago, el cual no está diseñado para soportar tales fuerzas.

- 3) **Finales de carrera:** Los finales de carrera empleados son del tipo mecánicos y se encuentran unidos al chasis mediante tornillos, al finalizar una bobina, la máquina realiza un “*homing*” en ambos ejes. Esto provoca que, tras largas jornadas de trabajo, los finales de carrera se encuentren ligeramente desplazados respecto la posición original. Prueba de ello es que es necesario el reajuste del punto inicial cada 900 bobinas aproximadamente.
- 4) **Cabezal de guiado del hilo:** El tubo de acero que conforma el cabezal de guiado del hilo no se encuentra correctamente anclado a la pieza y genera cierto pandeo lateral.

Por ello se van a realizar diversas modificaciones en el diseño para evitar estas debilidades mecánicas que influyen en el bobinado. En definitiva, se pretende realizar una máquina más robusta para reducir al máximo el error mecánico.

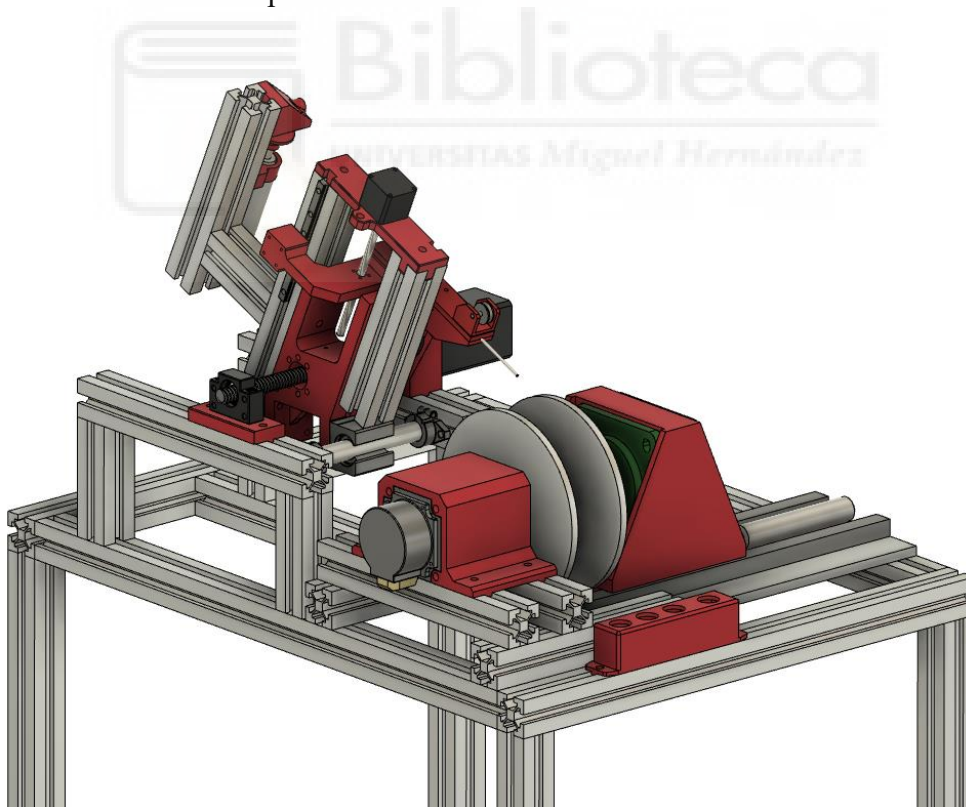


## 4. SEGUNDO PROTOTIPO.

Dado que es preciso fabricar al menos otra máquina, se realizan cambios en el diseño de esta , si son fructíferos, serán aplicados a la primera máquina. La eficiencia de la máquina 1 es del 80% aproximadamente, está por debajo de lo estipulado, aunque se permite mientras se fabrica la máquina 2 para no perder producción.

### 4.1 Diseño.

El diseño propuesto del segundo prototipo, a pesar de seguir las líneas generales del primer modelo, presenta ciertas modificaciones mecánicas y estructurales que aportan mayor rigidez a la estructura y partes móviles. Se pretende eliminar holguras o debilidades en el cabezal, así como eliminar el pandeo en el giro de la bobina con el fin de mejorar la precisión y el bobinado. En la *Figura 108*, *Figura 109* y *Figura 110* se muestra el diseño del segundo prototipo, similar al primero y con ciertas diferencias que serán comentadas en este apartado.



*Figura 108. Vista general del segundo diseño*

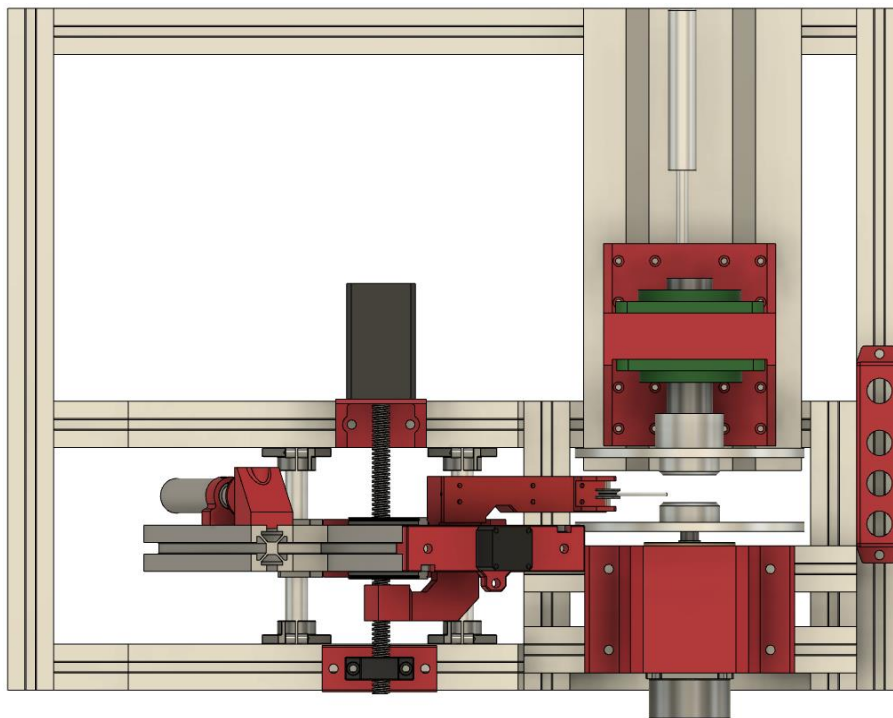


Figura 109. Vista en planta del segundo diseño

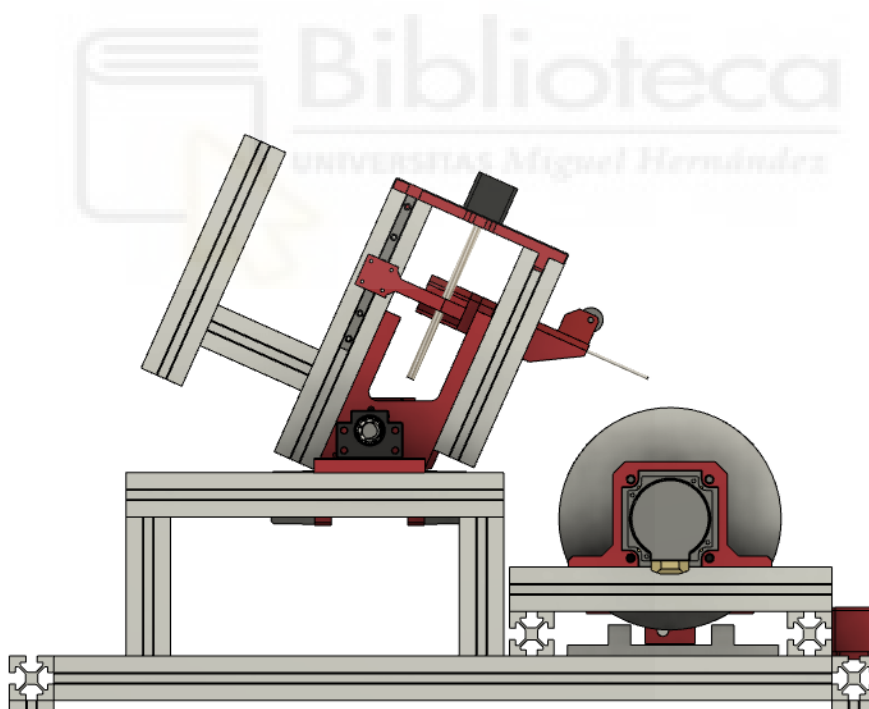


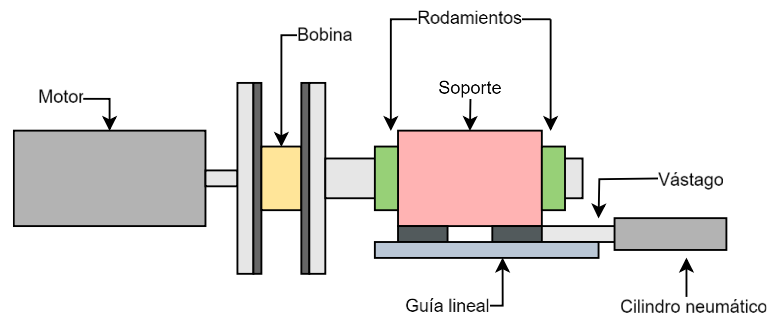
Figura 110. Vista lateral del segundo diseño



Cabe remarcar que en este apartado únicamente serán incluidas las novedades respecto a la máquina anterior, el resto, se mantiene igual que el primer diseño.

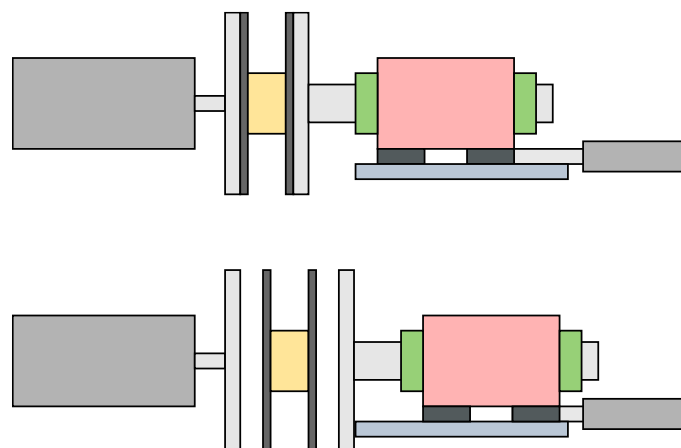
#### 4.1.1 Nuevo giro de bobina.

Este sistema ha comportado un cambio de vital importancia. La fuerza radial ejercida al bobinar no recae sobre el cilindro neumático, si no, sobre unas guías lineales y dos rodamientos, tal y como indica la *Figura 111*.



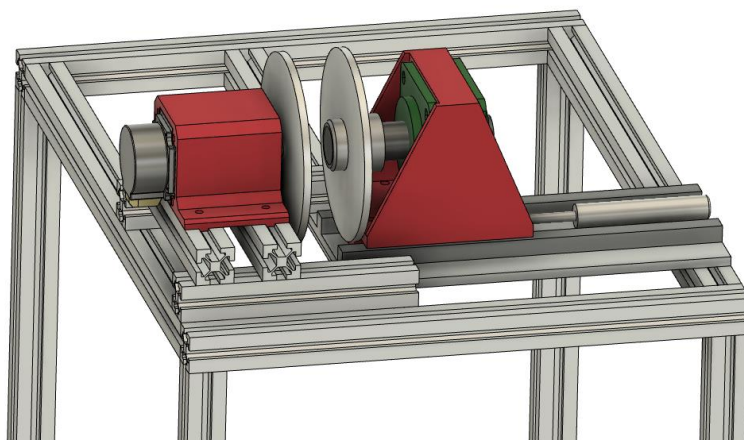
*Figura 111. Nuevo sistema Porta - bobinas*

De esta manera las fuerzas son absorbidas por las guías lineales y los rodamientos, aportando mayor rigidez al sistema. Está compuesto por un eje con rodamientos sujeto a un carro desplazable sobre dos carriles lineales que es accionado mediante un cilindro neumático. La *Figura 112* muestra un boceto del acople y desacople del carro en la bobina.

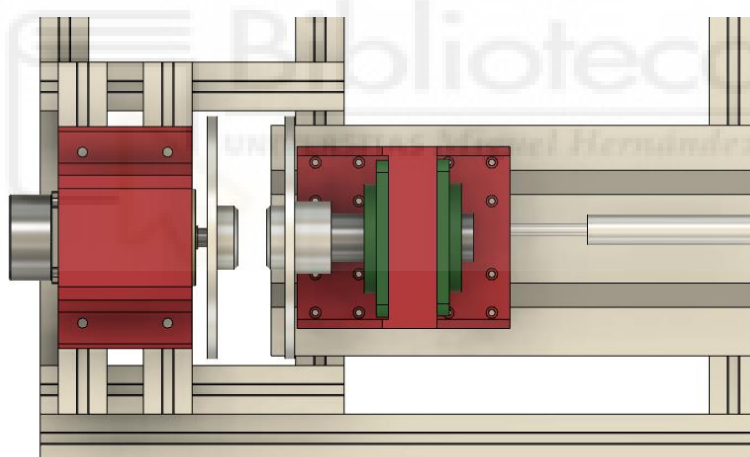


*Figura 112. Sistema de acople de bobinas*

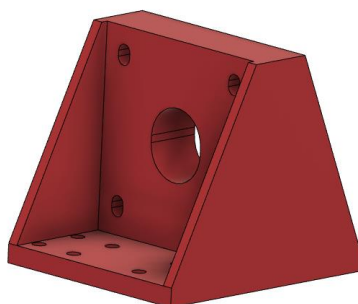
Dado este nuevo sistema se ha diseñado el modelo tridimensional teniendo en cuenta las medidas reales necesarias *Figura 113, Figura 114, Figura 115* (las piezas no relevantes han sido ocultadas, mostrando solo las propias del sistema porta-bobinas)



*Figura 113. Vista general del nuevo diseño*



*Figura 115. Vista Superior del nuevo diseño*



*Figura 114. Nueva pieza soporte porta - bobinas.*

Paralelamente, los discos de acople presentan menor grosor (10mm frente a los 20mm previos), ya que serán realizados en aluminio mediante torneado para eliminar todo tipo de pandeos o excentricidades

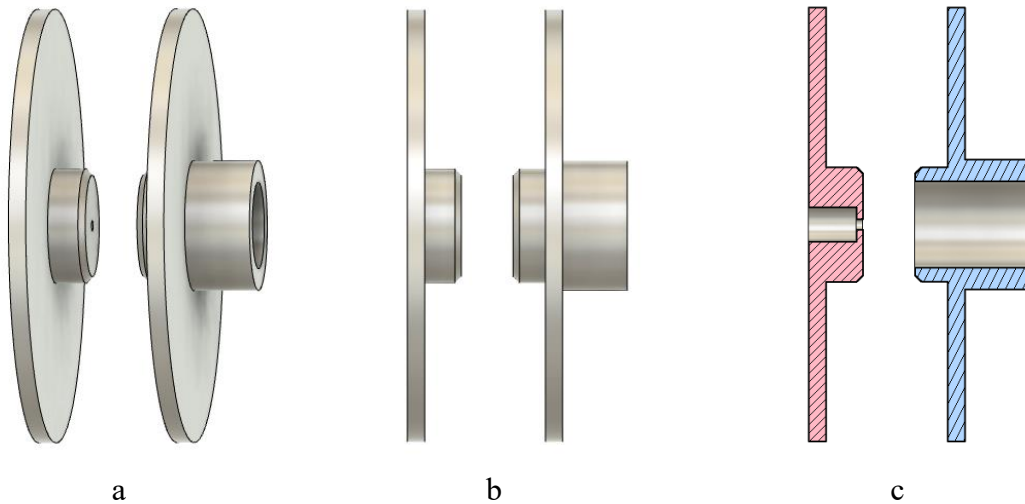


Figura 116. a).Vista General b).Vista Frontal c).vista en sección de los nuevos discos.

#### 4.1.2 Nuevo cabezal de guiado del hilo.

El cabezal presenta cambios en su diseño, el extremo donde es situado el tubo guía del filamento ha sido extendido, de manera que existe menor voladizo en el tubo y por tanto menor pandeo. La Figura 117 muestra una comparativa del cabezal antiguo y nuevo.

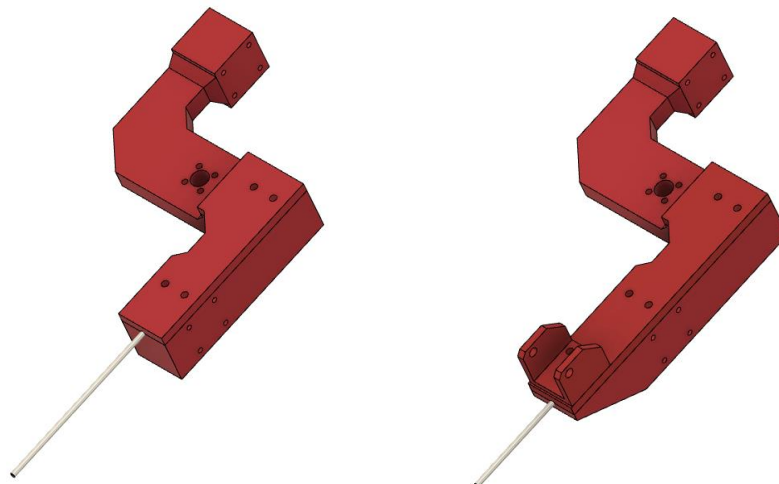
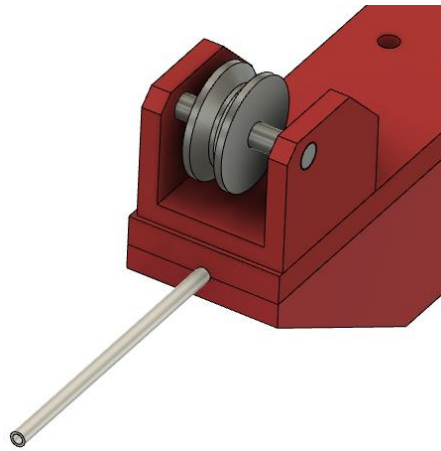


Figura 117. a)Cabezal antiguo b)Cabezal nuevo

Tal como se observa, el tubo de acero presenta menos distancia fuera del cabezal, esto aporta un menor pandeo al bobinar.

Por otro lado, se ha añadido un soporte en forma de “U” (*Figura 118*), sirviendo de sustento para una polea que permite guiar el filamento en caso de no pasarlo por el tubo.

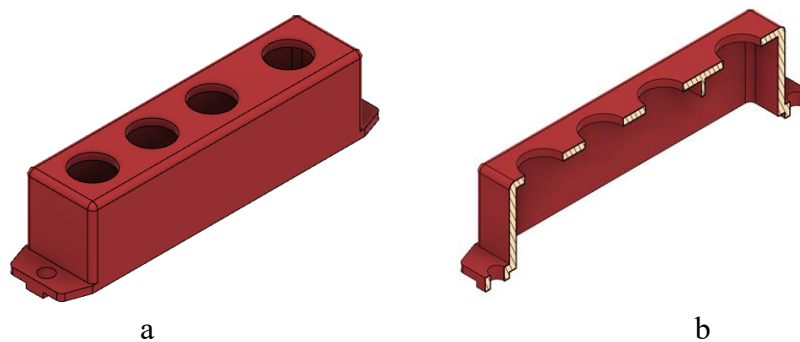


*Figura 118. Detalle de polea auxiliar*

Este sistema resulta útil en casos en los que el filamento aumenta de grosor y no permite la entrada en el tubo; (el filamento puede aumentar su tamaño debido a un problema en el “Puller”, fallo en la extrusión o cualquier test) de esta manera no se detiene la extrusión. Por último, previo a este cabezal se instala una polea que guía el hilo para permitir la entrada del tubo sin ningún tipo de roce, independientemente de dónde provenga el filamento previamente. Esta polea se muestra en el apartado 4.2. *Fabricación*.

#### 4.1.3 Botonera.

Puesto que la máquina posee pulsadores de marcha, paro, interruptor general y seta de emergencia, una carcasa albergará estos 4 botones de forma integrada en la estructura.



*Figura 119. a) Vista general botonera b) Vista en sección*

El primer prototipo de máquina también presenta estos 4 botones y se encuentran anclados al chasis mediante un panel de metacrilato provisional, por ello la botonera diseñada permite emplazarlos de forma permanente y segura.

## 4.2. Fabricación.

En este apartado, al igual que el apartado previo de diseño, serán comentados únicamente los aspectos nuevos en relación a la fabricación; si no es mencionado, procede igual que el primer prototipo.

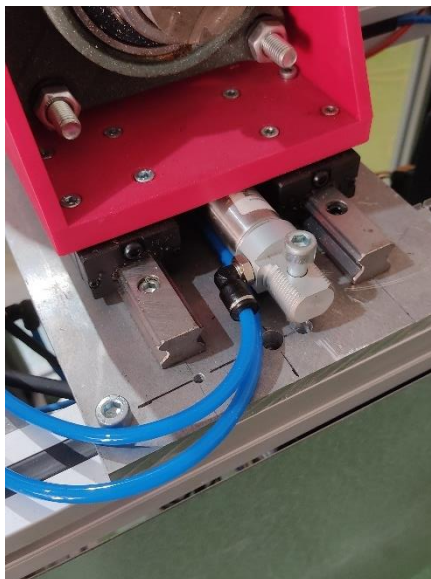
### 4.2.1 Nuevo carro porta – bobinas.

El montaje del nuevo carro está formado por dos guías lineales posadas sobre una placa de aluminio según se muestra en la *Figura 120*, esta placa facilita el montaje de las guías, además de mantener ambas sobre un mismo plano.



*Figura 120. Guías lineales para nuevo carro*

Estas guías lineales se tratan del modelo HGR20 de 200mm de longitud, que incorporan 2 carros en cada guía, aportando estabilidad. Sobre estas guías se atornilla la pieza impresa que, a su vez, soporta los rodamientos. Dichos rodamientos albergarán un eje de aluminio de 40mm y su correspondiente disco. El cilindro neumático se sitúa entre las guías lineales y va anclado a la placa de aluminio, el vástago va directamente atornillado al carro, como se observa en la *Figura 121*.

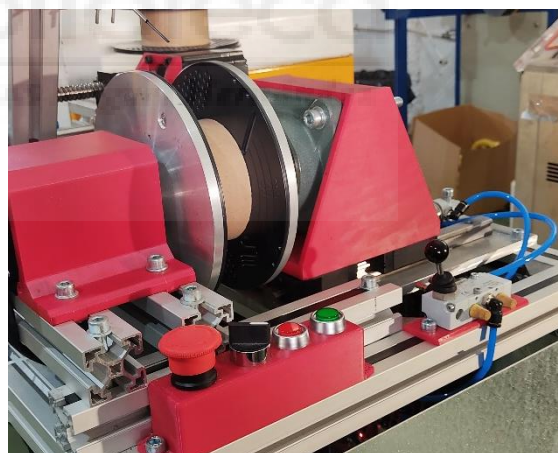


*Figura 121. Cilindro neumático del porta - bobinas*

Así queda el sistema completo. Mediante la permutación de la palanca es posible abrir el porta-bobinas (Figura 122) o cerrarlo (Figura 123):



*Figura 122. Porta-bobinas abierto*

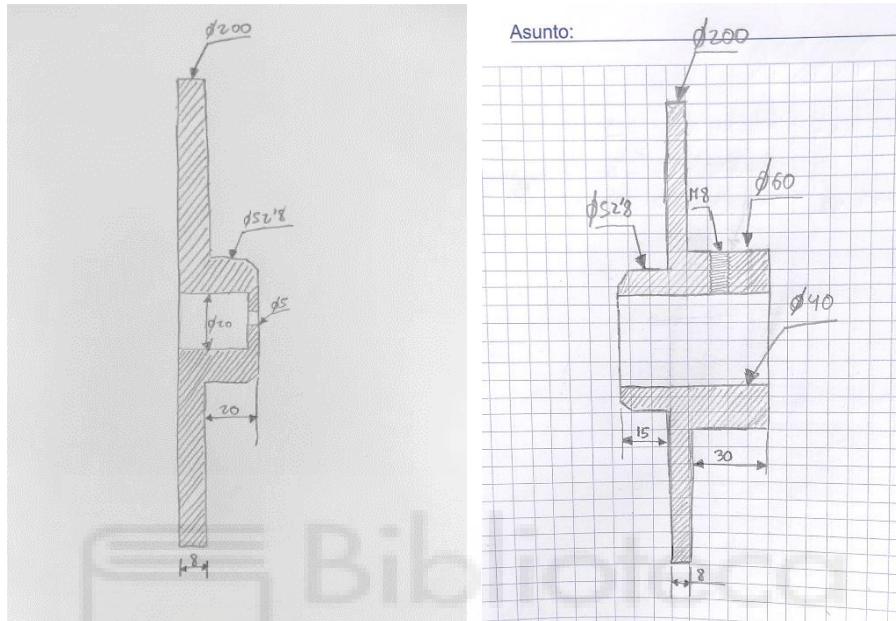


*Figura 123. Porta-bobinas cerrado*



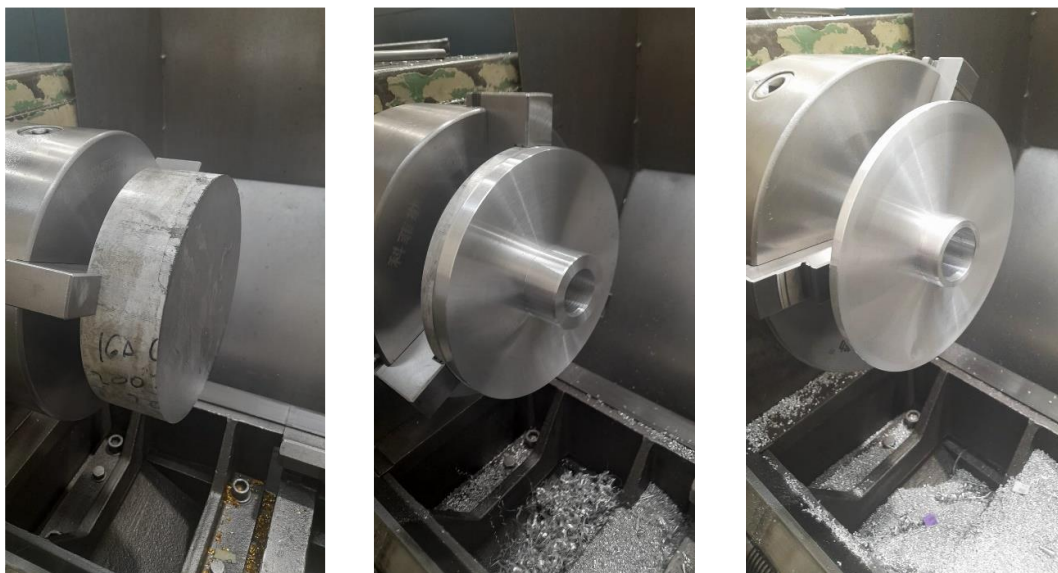
#### 4.2.2 Discos de aluminio.

Los discos del porta – bobinas, son de aluminio y mecanizados mediante torneado. Ya que el torneado es un trabajo manual, es necesario plasmar las medidas de las piezas en papel y lápiz para poder entregarlo al tornero. La *Figura 124* muestra el plano a mano alzada que ha servido como referencia para la mecanización de las piezas.



*Figura 124. Bocetos de ambos discos porta-bobinas*

Partiendo de un cilindro de aluminio de 200mm de diámetro, se extrae material mediante una fresa para formar las piezas, estas son las imágenes del proceso.



*Figura 125. Proceso de torneado del disco de aluminio.*

Finalmente, las piezas quedan según se muestran en la *Figura 126*.

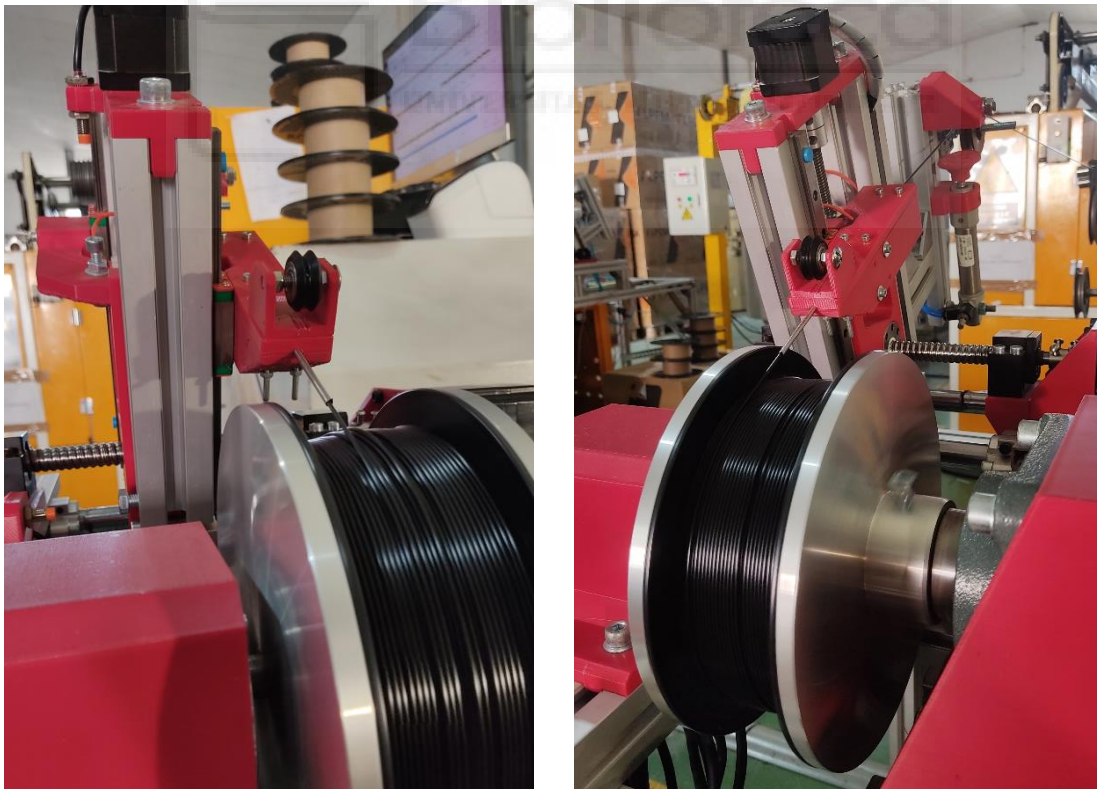




*Figura 126. Resultado final de los discos*

#### **4.2.3 Nuevo cabezal.**

Tal y como se mostró en el diseño previo, el nuevo cabezal queda de la siguiente manera.



*Figura 127. Nuevo cabezal para el segundo prototipo*

#### 4.2.4 Pinza.

El cilindro seleccionado presenta retroceso por muelle, por tanto, sólo es necesaria una entrada de aire. Cuando no hay aire a presión, el cilindro retrocede a su posición inicial. Así, se elimina la conexión de retorno del aire, simplificando el sistema.

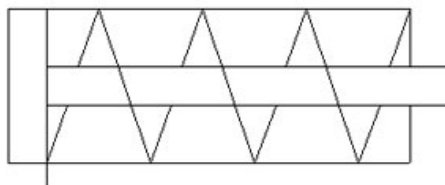


Figura 128. Dibujo cilindro empleado

Por otro lado, se añade una polea que guía el hilo independientemente de dónde provenga este, así, se evitan roces con la pinza y se produce una entrada recta al tubo.

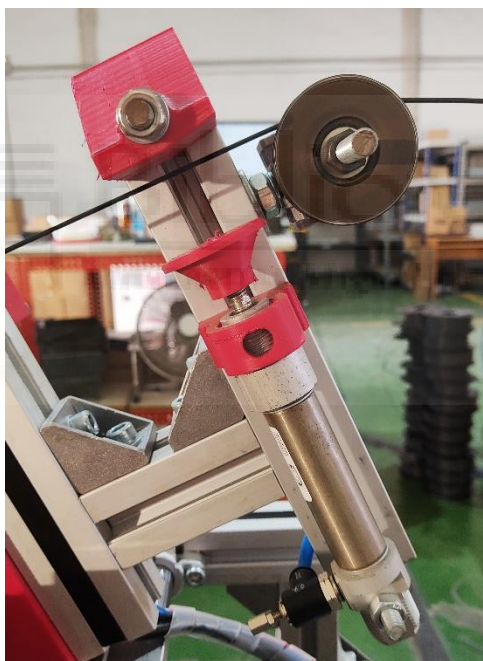
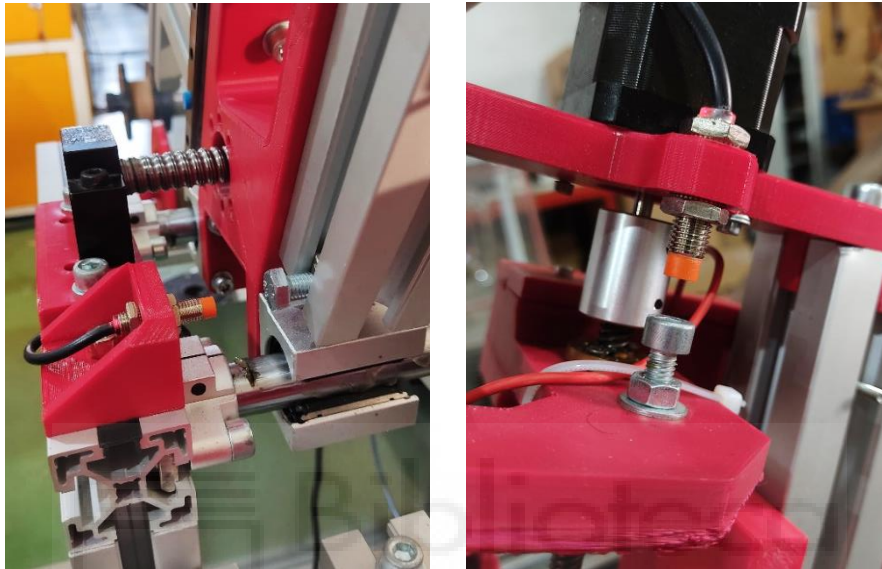


Figura 129. Pinza y polea empleadas en el segundo prototipo

#### 4.2.5 Finales de carrera Inductivos.

En este segundo diseño, los finales de carrera son de tipo inductivos, capaces de detectar elementos metálicos. Estos sensores incorporan toda la lógica necesaria para su funcionamiento, se alimentan a 24V y devuelven una señal alta (por un tercer cable) cuando detectan elementos metálicos en un rango igual o inferior a 2mm de distancia. Han sido situados en los extremos de ambos ejes, tal y como muestra la *Figura 130*.

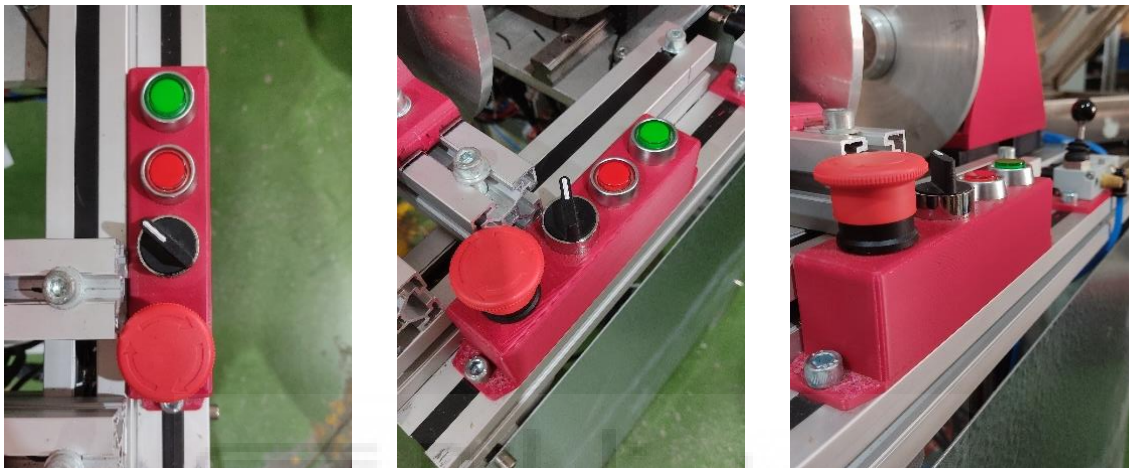


*Figura 130. Final de carrera inductivo*

Este tipo de sensores presentan mayor vida útil ya que, al no tener componentes mecánicos no tienen apenas desgaste, lo cual permite mantener la precisión a lo largo del tiempo. Dado que no existe contacto entre el sensor y el elemento metálico, los sensores siempre se van a mantener en su posición.

#### 4.2.6 Botonera.

Esta carcasa impresa en 3D sirve de soporte para albergar 4 botones, va anclada en el perfil de aluminio y protege las conexiones. Los 4 botones que se aprecian en la *Figura 131* son de marcha, paro, interruptor de la máquina y seta de emergencia respectivamente. Estos cuatro elementos son suficientes para controlar la máquina; en un uso habitual de esta, únicamente se emplea el botón de marcha.

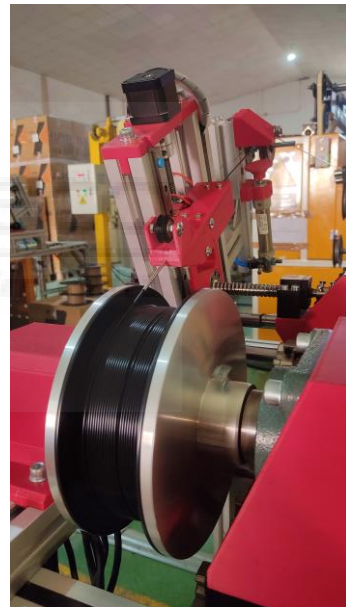
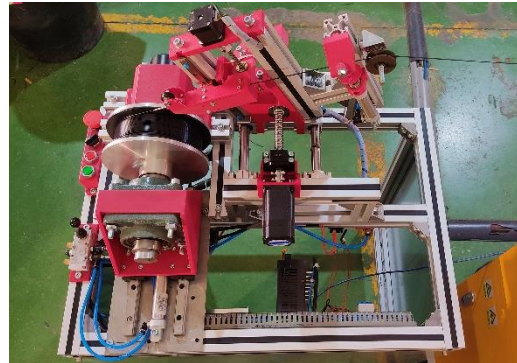


*Figura 131. Botonera del segundo prototipo*



#### 4.2.7 Aspecto final.

Así queda el segundo prototipo completamente ensamblado:

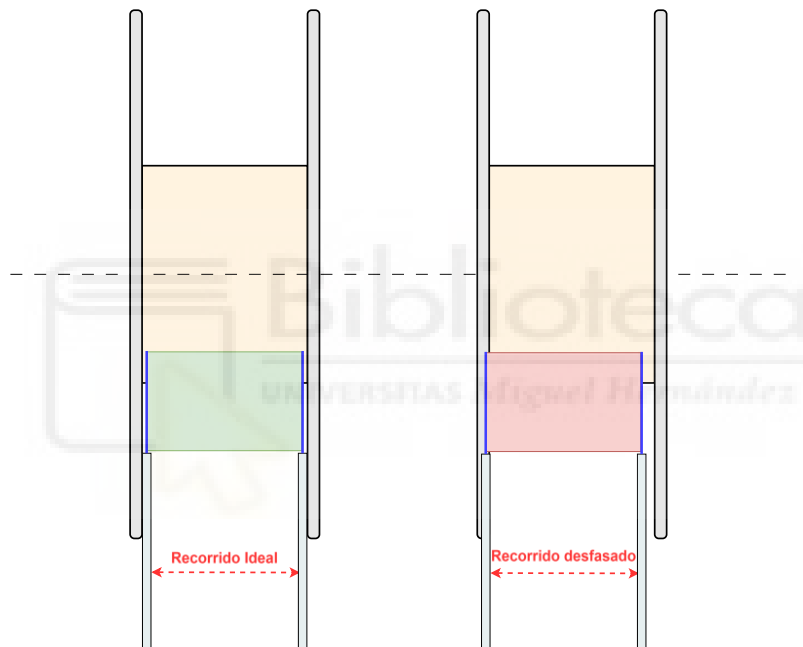


### 4.3 Test.

Puesto que ambos prototipos son prácticamente iguales se introducen los mismos parámetros que el primero. En las primeras bobinas se observa un fenómeno claramente identificable, el cabezal se está moviendo con un desfase lateral.

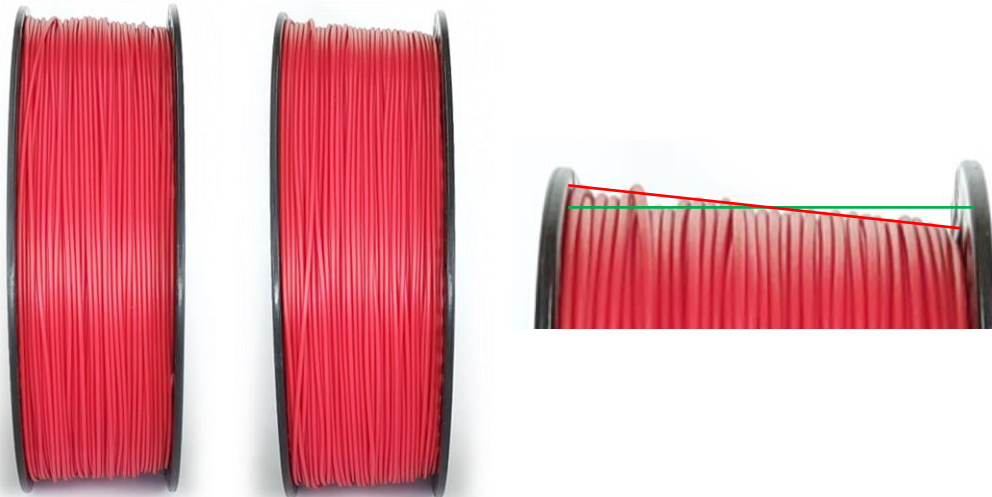
#### 4.3.1 Desviación lateral

Aun habiendo empleado la misma configuración que la máquina previa, el recorrido del cabezal presenta una desviación lateral, es decir, si bien el recorrido es el mismo, este está desplazado ligeramente hacia la izquierda. Este fenómeno se muestra en la *Figura 132*.



*Figura 132. Explicación del desfase lateral*

Esto provoca bobinas mal enrolladas, con un lateral más “cargado” que otro, tal y como se aprecia en la *Figura 133*.



*Figura 133. Bobinas con desfase lateral*

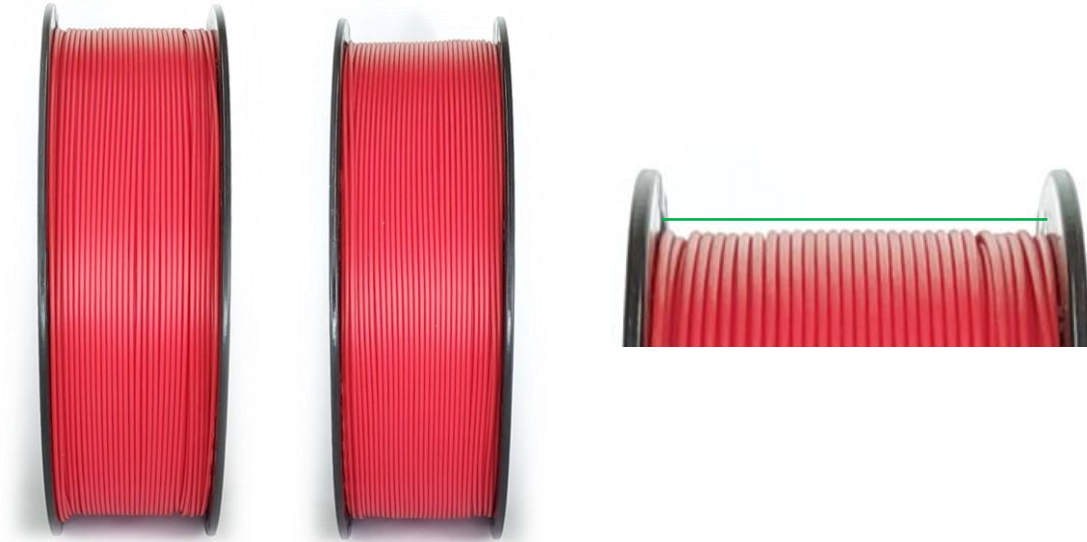
Para subsanar este desfase se cambian ambos límites de la bobina por igual en la misma dirección, en este caso 0.5mm hacia la derecha. Este es el resultado obtenido:



*Figura 134. Bobinas con desfase lateral (menor).*

Sigue existiendo un ligero desfase, por lo que se desplaza 0.3mm más hacia la derecha para alcanzar el resultado final.





*Figura 135. Bobinas perfectamente ajustadas.*

Como se muestra en la *Figura 135* el resultado obtenido es satisfactorio, el resto de los parámetros coincide con el primer prototipo, es momento de comprobar su repetibilidad a lo largo del tiempo y comprobar la eficacia de los cambios realizados.

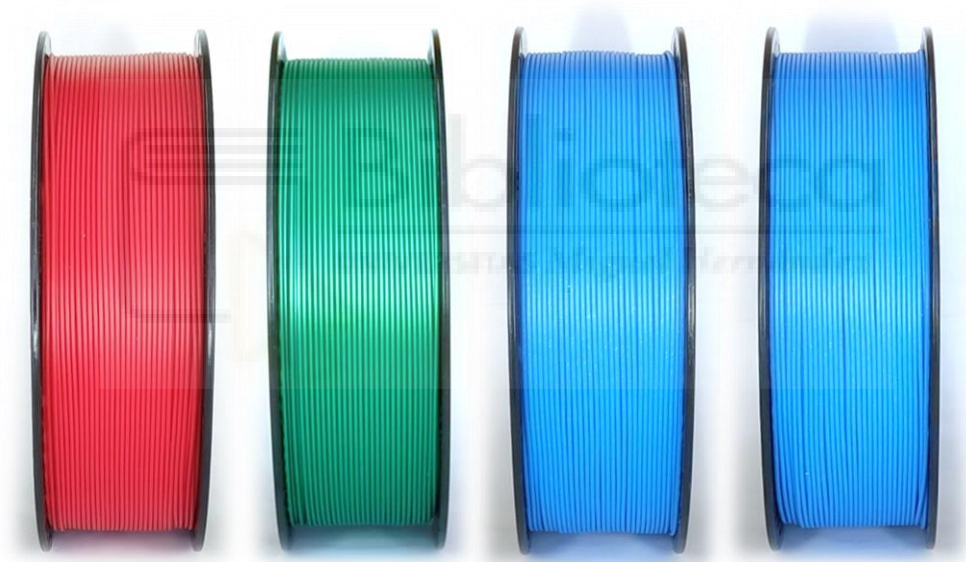
### **Repetibilidad**

Tras realizar más de 100 bobinas con esta configuración, la segunda máquina ha presentado mejores resultados respecto al primer prototipo. Si bien el primer prototipo presenta una eficiencia del 80%, esta segunda máquina posee una eficiencia muy superior al 90%, pudiendo alcanzar el 100% en determinadas jornadas de trabajo. Sin duda, los cambios realizados en la estructura han sido un éxito rotundo en la mejora del desempeño de la máquina. Estos cambios han sido aplicados inmediatamente al primer prototipo, el cual ha mejorado su eficiencia a niveles muy similares al segundo prototipo, cumpliendo con todos los requisitos mencionados en el apartado *1.3. Requerimientos*. y dando por concluido el desarrollo de la máquina.

#### 4.4. Observaciones del segundo prototipo.

Ambas máquinas funcionan con los mismos parámetros de paso, recorrido y tensión. Las pruebas han demostrado la importancia de una buena estructura y un buen diseño firme, ya que, por ejemplo, holguras en el cabezal de 0.5mm influyen significativamente a la hora de realizar un bobinado. Todo ha de estar correctamente diseñado para evitar cualquier tipo de holgura o debilidad en la estructura. No sirve de nada hacer variaciones por software de 0,02mm cuando mecánicamente existen holguras de 0,5mm.

Prueba de ello son las mejoras realizadas en el segundo prototipo que aportan mayor rigidez; el cambio más sustancial se encuentra en el sistema de acople de las bobinas, así como los discos torneados en aluminio, ello proporciona un giro firme y sin desviaciones que influye de manera muy positiva en el bobinado. Algunos de las bobinas realizadas se muestran en la *Figura 136*.



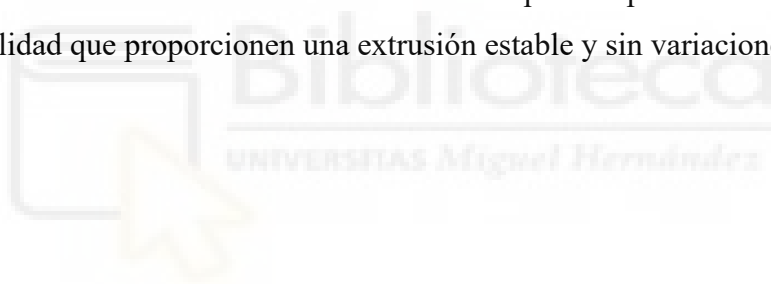
*Figura 136. Bobinas realizadas por el segundo prototipo.*

Tras observar el proceso de bobinado, se ha visto como, en las vueltas adyacentes a los extremos de las bobinas siempre existe algo de incertidumbre y desorden, ya que es complicado calcular en qué momento el filamento va a rebosar y saltar a la siguiente capa. En la teoría es posible calcular el punto exacto donde el filamento va a estar obligado a rebosar y generar la siguiente capa, pero en la práctica dependen muchos factores como el ancho exacto de la bobina, imperfecciones en las paredes de la bobina, diámetro inestable, tensión del hilo, etc. Esto puede conllevar a un atraso o adelanto del punto de rebose del hilo, que a la larga puede arruinar el bobinado. Por ello es importante hallar un

equilibrio entre los parámetros de bobinado, además de asegurar una extrusión estable, sin variaciones de grosor para así obtener resultados satisfactorios como los mostrados previamente. Los parámetros aplicados a esta máquina son los mismos que el primer prototipo.

Otro aspecto relevante observado a lo largo del tiempo es la influencia de la calidad del filamento; un filamento cuyo diámetro es inestable a lo largo de una bobina o presenta picos y ligeras perturbaciones será difícil de bobinar de manera correcta, ya que el paso del cabezal está directamente relacionado con el diámetro del hilo, esto originaría problemas de desfase del filamento con respecto al cabezal. En tramos donde el filamento es más fino (1.73mm) surgirá un excesivo hueco entre vueltas y en tramos donde el filamento sea más grueso (1.77) se producirá una superposición de vueltas con los problemas que conllevan mencionados anteriormente.

Para evitarlo, es muy importante una correcta calibración de los equipos de medida de filamento y los equipos encargados de variar la velocidad de extrusión para así modificar el grosor de filamento en todo momento. También es preciso partir de materias primas (pellets) de calidad que proporcionen una extrusión estable y sin variaciones.



## 5.CONCLUSIONES.

### 5.1 Producto final.

Ambas máquinas trabajan correctamente con tasas de éxito muy similares. Estos son algunos de los colores producidos, todos presentan un aspecto homogéneo y sin cruzamientos, cumpliendo con los requerimientos del proyecto.



Estos nuevos productos han sido incluidos en el catálogo de productos de la empresa “*3DFilaments*”, con ello, la empresa muestra el compromiso con la mejora constante de productos y adaptación a las nuevas tecnologías. Son pocas las empresas que aseguran un bobinado de calidad similar al obtenido en este proyecto. Gracias a esta renovación, además de prever un aumento del número de ventas, pretende también aumentar la fidelidad de los clientes, dando una mejor experiencia con el producto.

Paralelamente, se ha observado una mejora en la satisfacción del cliente. Esto reduce problemas y devoluciones lo que a su vez redundará en una mejor imagen de marca y finalmente en una mejora económica. Reduciendo considerablemente los costes derivados de devoluciones y cambios de producto.

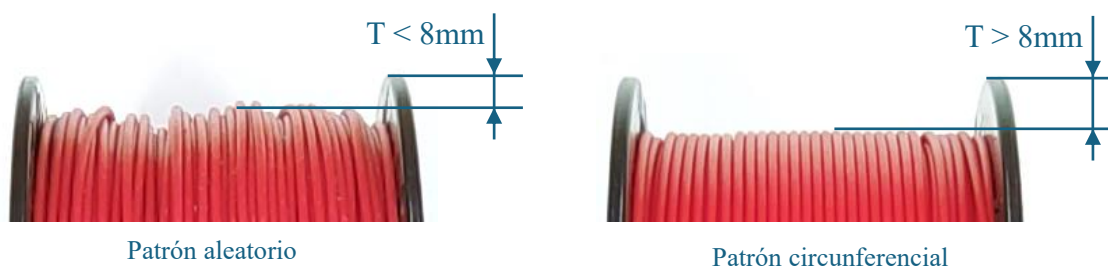
Aun es relativamente temprano hablar de números y retorno de inversión, pero todo indica a un aumento de las ventas apreciable en el último mes, la empresa prevé un retorno de la inversión en un plazo aproximado de 12 meses.



## 5.2 Factor de relleno.

Para demostrar cuantitativamente la mejora del enrollado se procede a calcular el factor de relleno [5] (concepto similar al factor de empaquetamiento de las estructuras atómicas [10] ), haciendo uso del volumen empleado para almacenar 1kg de filamento tanto para el patrón aleatorio (máquinas antiguas) como para el circunferencial.

Primeramente, se mide la distancia entre la última capa de filamento y el borde de la bobina (esta distancia será llamada  $T$ ), comparando ambos patrones, de la forma mostrada en la *Figura 137*.



*Figura 137. Comparativa de tamaño entre patrón aleatorio y patrón circunferencial.*

Se observa cómo, según el método de enrollado empleado se obtienen distancias al borde diferentes, estas distancias han sido medidas en diferentes bobinas y plasmadas en la *Tabla 6*.

Valores T bobinado aleatorio (mm)	Valores T bobinado Circunferencial (mm)
3.2	8.5
5.5	9.0
4.7	9.2
3.8	9.6
5.2	10.1
4.3	10.2
2.2	9.3
Promedio: 4.13mm	Promedio: 9.41

*Tabla 6. Comparativa valores T.*



Como se aprecia, el valor promedio  $T$  en un bobinado aleatorio es menor que uno circunferencial, esto significa que se encuentra más próximo al borde de la bobina y por tanto requiere más espacio. Para un mayor entendimiento, se han incluido estos valores en una gráfica, tal como muestra la *Figura 138*.

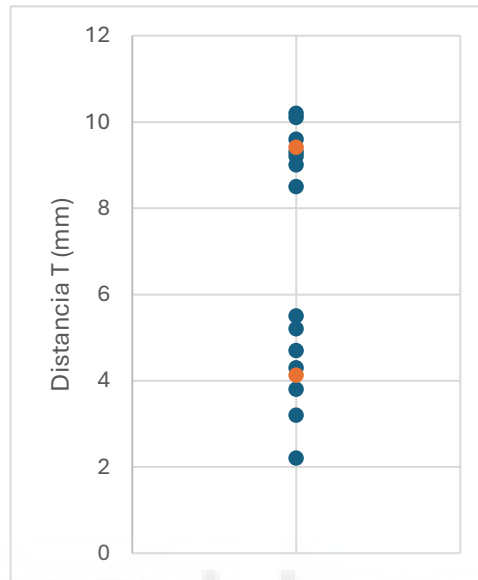


Figura 138. Comparativa gráfica de medidas  $T$  tomadas.

Se han insertado todas las medidas en un mismo eje, los puntos superiores a 8mm corresponden a los valores del bobinado circunferencial, mientras que los inferiores a 6 corresponden al patrón aleatorio. Los puntos naranjas indican el valor promedio de ambos patrones. Como curiosidad se observa cómo el método circunferencial, además de presentar valores  $T$  mayores, están más concentrados, lo que significa diámetros más estables.

Teniendo estos valores promedio, es posible calcular la densidad de ambos casos.

**Patrón aleatorio.** Sabiendo que una bobina mide 200mm, se resta el valor promedio  $T$  para hallar el diámetro que ocupa el bobinado, tal como se muestra en la ecuación ( 27 ).

$$\varnothing_{bobinadoA} = 200mm - 2 \cdot 4.13mm = 191.74 mm \quad (27)$$

Conociendo el diámetro, dado que el grosor de la bobina es 55mm y posee un núcleo de 105mm de diámetro, se puede calcular el volumen empleado según la ecuación ( 28 ).

$$V_A = \frac{\pi}{4} \cdot (19.174^2 - 10.5^2) \cdot 5.5 = 1111.85 cm^3 \quad (28)$$



El resultado es un volumen de 1111.85 cm<sup>3</sup> para almacenar una masa de 1kg. La densidad del bobinado se puede definir como indica en la ecuación ( 29 ).

$$Densidad_{BobinadoA} = \frac{1000g}{1111.85cm^3} = 0.9g/cm^3 \quad (29)$$

Se obtiene un valor de 0.9 g/cm<sup>3</sup>, comparando este resultado, con la densidad del PLA (1.24 g/cm<sup>3</sup>), se obtiene una eficiencia del 72.5% según la ecuación ( 30 ).

$$Eficiencia_A = \frac{0.9g/cm^3}{1.24g/cm^3} = 0.725 \quad (30)$$

Esta eficiencia puede denominarse factor de relleno, este valor indica qué porcentaje de volumen está ocupado por plástico. Realicemos ahora los mismos cálculos para el siguiente patrón

**Patrón circunferencial.** Se procede de la misma manera que el caso anterior, en este caso las bobinas presentan una distancia T promedio de 9.41mm, se calcula el diámetro de bobinado empleado según la ecuación ( 31 ).

$$\emptyset_{bobinadoH} = 200mm - 2 \cdot 9.41mm = 181.18 mm \quad (31)$$

Dado el diámetro obtenido, puesto que el resto de las medidas es igual que el caso anterior, se procede a calcular el volumen, como se muestra en la ecuación ( 32 ).

$$V_H = \frac{\pi}{4} \cdot (18.118^2 - 10.5^2) \cdot 5.5 = 941.74 cm^3 \quad (32)$$

Se obtiene un volumen de 941.74 cm<sup>3</sup> para un kg de material. Por tanto, la densidad resultante se obtiene según la ecuación ( 33 ).

$$Densidad_{BobinadoH} = \frac{1000g}{941.74cm^3} = 1.06g/cm^3 \quad (33)$$

Del mismo modo que el caso anterior, se compara este valor con la densidad del PLA para obtener la eficiencia, el resultado lo muestra la ecuación ( 34 ).

$$Eficiencia_H = \frac{1.06g/cm^3}{1.24g/cm^3} = 0.856 \quad (34)$$

La Tabla 7 muestra ambos factores de relleno.

	<b>Bobinado aleatorio</b>	<b>Bobinado circunferencial</b>
<b>Volumen empleado</b>	1111.85 cm <sup>3</sup>	941.74 cm <sup>3</sup>
<b>Densidad del bobinado</b>	0.9 g/cm <sup>3</sup>	1.06 g/cm <sup>3</sup>
<b>Factor de relleno</b>	0.725	0.856

*Tabla 7. Comparativa factores de relleno*

El segundo método presenta un coeficiente superior al primero, se obtiene un valor de 0.856, lo que significa un incremento de un 18% respecto al patrón aleatorio.



### 5.3 Futuros trabajos.

Esta máquina sigue en constante desarrollo y podría considerarse una primera versión de esta. En un futuro se pretende fabricar 2 máquinas adicionales, teniendo un total de cuatro máquinas que den cobertura a las 4 líneas de producción de la empresa. Además de estudiar su viabilidad en el enrollado de hilo elástico (TPU) que debe ser bobinado a muy baja tensión del hilo para evitar su deformación, este enrollado debe tener el mismo aspecto final que las bobinas mostradas previamente, de ser así, “3D Filaments ” sería una de las pocas empresas en llevarlo a cabo.

Como se ha mostrado en el proyecto, se han empleado piezas diseñadas e impresas en 3D, aunque muchas de ellas no sufren desgaste, es interesante valorar la mecanización de ciertas piezas que están directamente relacionadas con la estabilidad de la estructura. Aunque la rigidez actual es más que suficiente, este cambio aportaría mayor resistencia en la estructura y mayor durabilidad.

Por otro lado, es interesante realizar un sistema de comunicación con el ordenador para enviar los parámetros de bobinado a tiempo real, incluso crear parámetros preseleccionados en función del material, ya sea material Rígido o Elástico. Además, se pueden incluir varios elementos como un contador de bobinas realizadas. Este contador podría proporcionar datos sobre el número de bobinas realizadas diariamente, kilogramos/hora, o cantidad de bobinas fallidas (si se ha pulsado el botón de paro).

En relación a las bobinas fallidas, sería interesante introducir algún tipo de sensor o elemento capaz de medir el ángulo de desfase entre el filamento y el cabezal para poder corregir errores a tiempo real, en definitiva, introducir un *feedback* a la máquina. Esta retroalimentación podría realizarse introduciendo un elemento mecánico que permita el giro del cabezal y detecte el desfase del filamento mediante un potenciómetro o similar. Otra opción trata del uso de una cámara que analice el ángulo en todo momento. Con este *feedback* también sería posible la recolección de datos para poder identificar los parámetros más adecuados del bobinado. En definitiva, una serie de cambios que aporten mayor versatilidad y fiabilidad a la máquina, además de facilitar su uso.

## 5.4 Reflexión final.

Este proyecto ha sido un completo desafío a nivel personal y profesional. A nivel profesional, el proyecto ha albergado multitud de competencias tales como diseño de piezas, conceptos de mecánica, conceptos estructurales, montaje, electrotecnia y conceptos relacionados con la extrusión de plásticos. Ha sido un proyecto creado desde cero, con poca información al respecto y con la certeza y esperanza de su funcionamiento exitoso. A nivel personal, en el transcurso del proyecto han surgido ciertas etapas de frustración, dado que la máquina no se comportaba como era de esperar y se desconocía la causa. Ha sido gracias a la perseverancia y la constancia, la causa del éxito de esta máquina. Se han empleado decenas de horas observando en detalle la máquina y su manera de bobinar para tratar de encontrar una explicación al comportamiento del filamento. Tras muchas horas de investigación, como se ha explicado en apartados previos, el problema no es causado por un elemento en concreto, sino por diversos factores que en su conjunto agravan el problema. Esto lleva a una reflexión muy importante y presente en este proyecto “no dejar nada a medias”, todo ha de estar perfectamente ejecutado y sin lugar a errores para asegurar el éxito de los resultados. Se ha demostrado como, pequeñas variaciones en los parámetros o elementos mecánicos suponen diferencias muy notables en cuanto a resultados. Por otro lado, la ejecución, diseño y creación de estas bobinadoras ha sido una confirmación de lo aprendido en estos cursos que, ya sea de manera general o específica, han servido de apoyo a la hora de tomar decisiones. He disfrutado mucho el proceso de creación de estas máquinas; taladro, destornillador, pelacables, etc., son herramientas que me han ayudado a conectar con el mundo real y permiten hacer tangible lo que previamente ha sido ideado según unos conocimientos. La máxima satisfacción de este proyecto es saber que, a día de hoy, estas máquinas siguen funcionando y sirven de ayuda a una empresa para mejorar sus condiciones y su producto final.

## 6.BIBLIOGRAFIA.

- [1] Vicente Oliva, Silvia (2018). *La impresión 3D como tecnología de uso general en el futuro*. Centro Universitario de la defensa.
- [2] Hung, J. Y., & Van White, H. (1992). *Precision winding of fiber optic filament. I. Winding characteristics*.
- [3] Abdalla, F. H., Mutasher, S. A., Khalid, Y. A., Sapuan, S. M., Hamouda, A. M. S., Sahari, B. B., & Hamdan, M. M. (2007). Design and fabrication of low-cost filament winding machine. *Materials & Design*, 28(1), 234–239.
- [4] W. L. L. Lenders (1962). The orthocyclic method of coil winding.
- [5] Tecnologías de enrollado de bobinas.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Coil\\_winding\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Coil_winding_technology)
- [6] Manual Driver Servomotor AASD-15A.  
[https://www.cnctrive.com/downloads/AASD\\_servodrivemanual.pdf](https://www.cnctrive.com/downloads/AASD_servodrivemanual.pdf)
- [7] Driver bucle cerrado CL57T manual.  
[https://www.omc-stepperonline.com/download/CL57T\\_V4.0.pdf](https://www.omc-stepperonline.com/download/CL57T_V4.0.pdf)
- [8] Controllino Maxi 100-100-00 pinout.  
[https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2023/05/CONTROLLINO\\_MAXI\\_Pinout\\_Table.pdf](https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2023/05/CONTROLLINO_MAXI_Pinout_Table.pdf)
- [9] Nicolai B. MORTENSEN, Jay A. JOHNSON, Alexander J. SHTURMAKOV (2014). “Precision cable winch level wind for deep ice-coring systems”, *Annals of Glaciology*.
- [10] Factor de empaquetamiento atómico.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Factor\\_de\\_empaquetamiento\\_atómico](https://es.wikipedia.org/wiki/Factor_de_empaquetamiento_atómico)

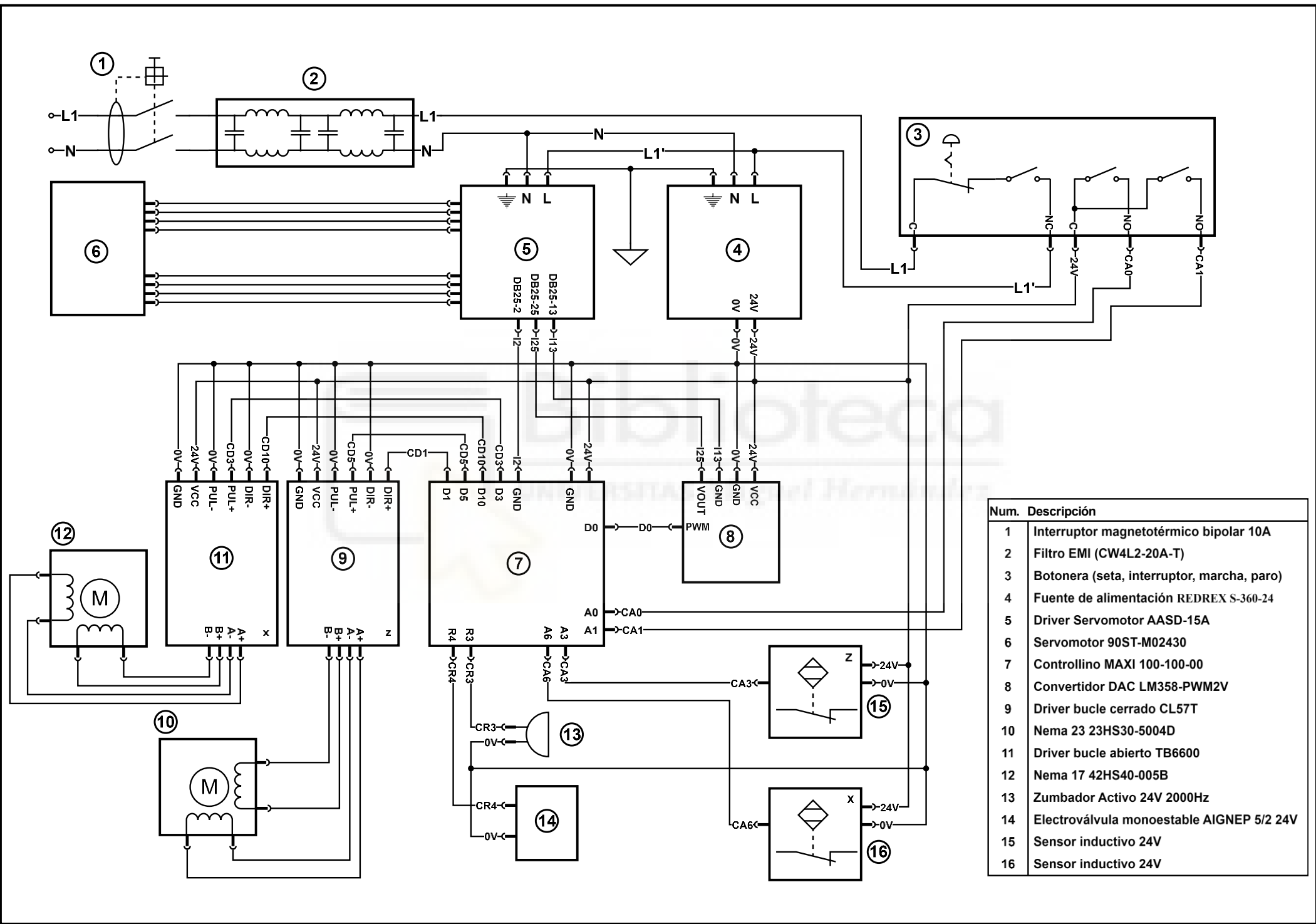
## **7.ANEXOS.**

### **7.1 Esquema eléctrico.**

### **7.2 Planos.**

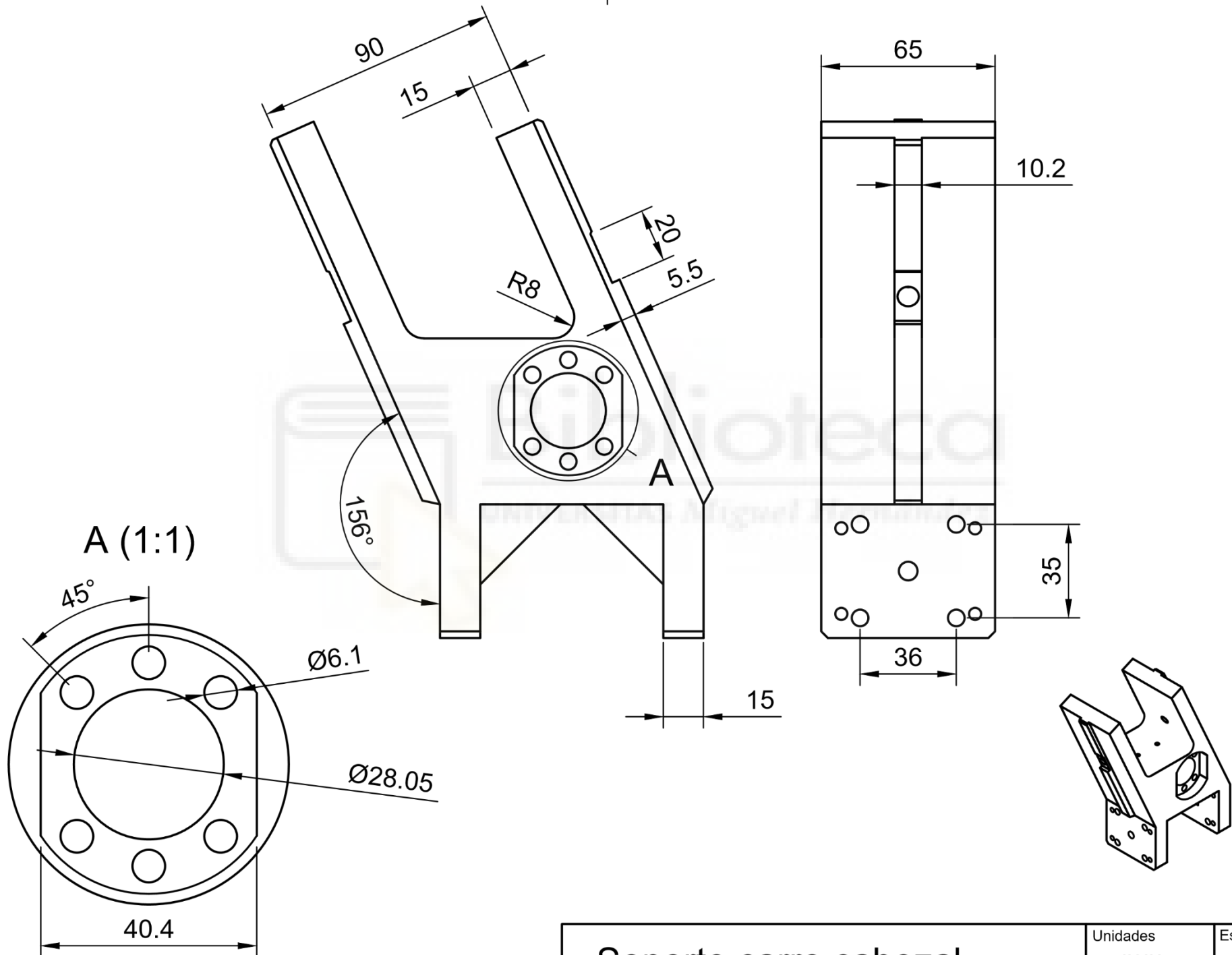
### **7.3 Código.**





Num.	Descripción
1	Interruptor magnetotérmico bipolar 10A
2	Filtro EMI (CW4L2-20A-T)
3	Botonera (seta, interruptor, marcha, paro)
4	Fuente de alimentación REDREX S-360-24
5	Driver Servomotor AASD-15A
6	Servomotor 90ST-M02430
7	Controllino MAXI 100-100-00
8	Convertidor DAC LM358-PWM2V
9	Driver bucle cerrado CL57T
10	Nema 23 23HS30-5004D
11	Driver bucle abierto TB6600
12	Nema 17 42HS40-005B
13	Zumbador Activo 24V 2000Hz
14	Electroválvula monoestable AIGNEP 5/2 24V
15	Sensor inductivo 24V
16	Sensor inductivo 24V

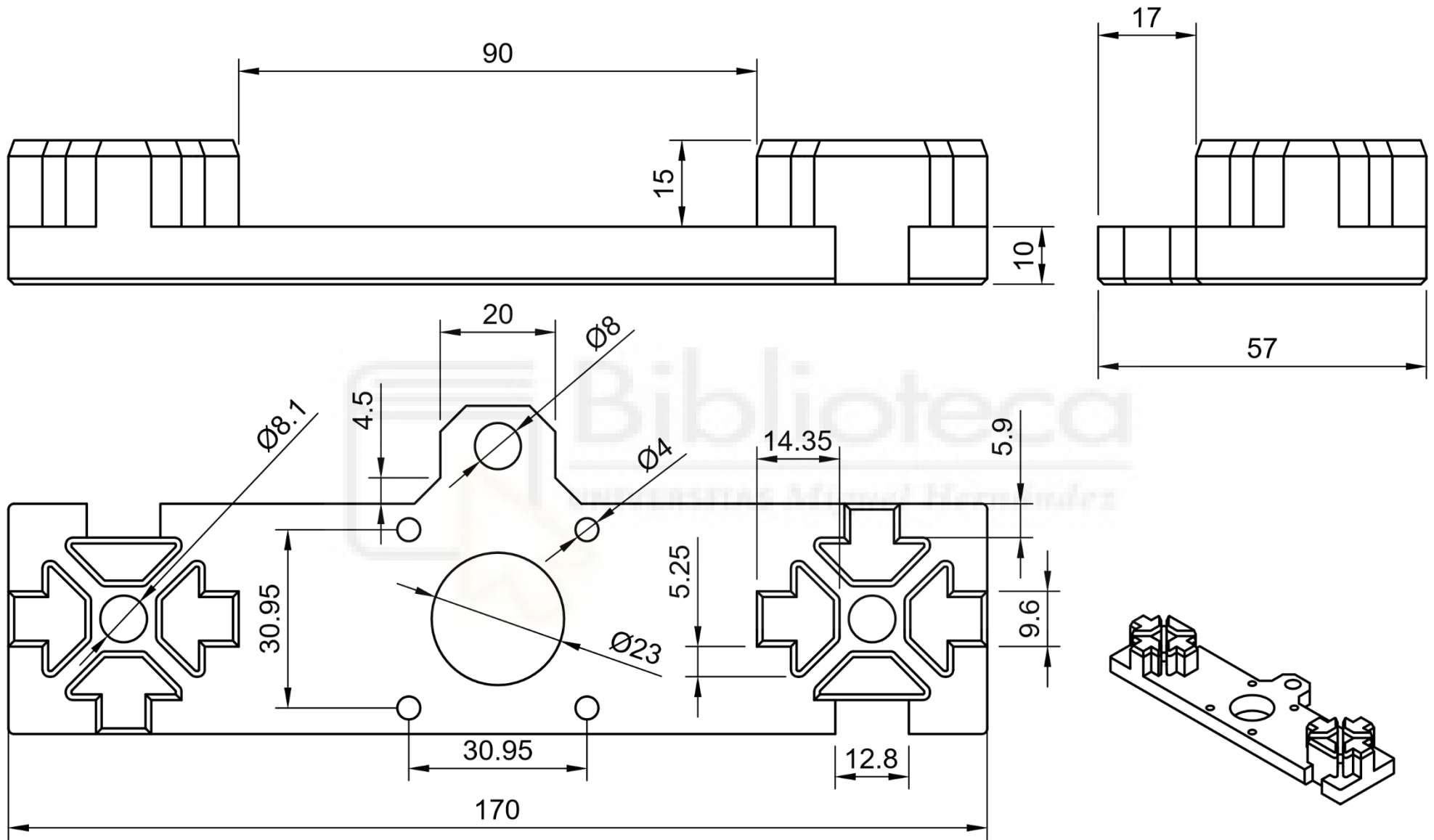




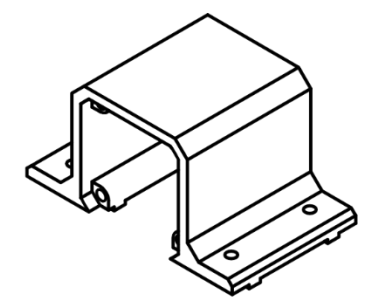
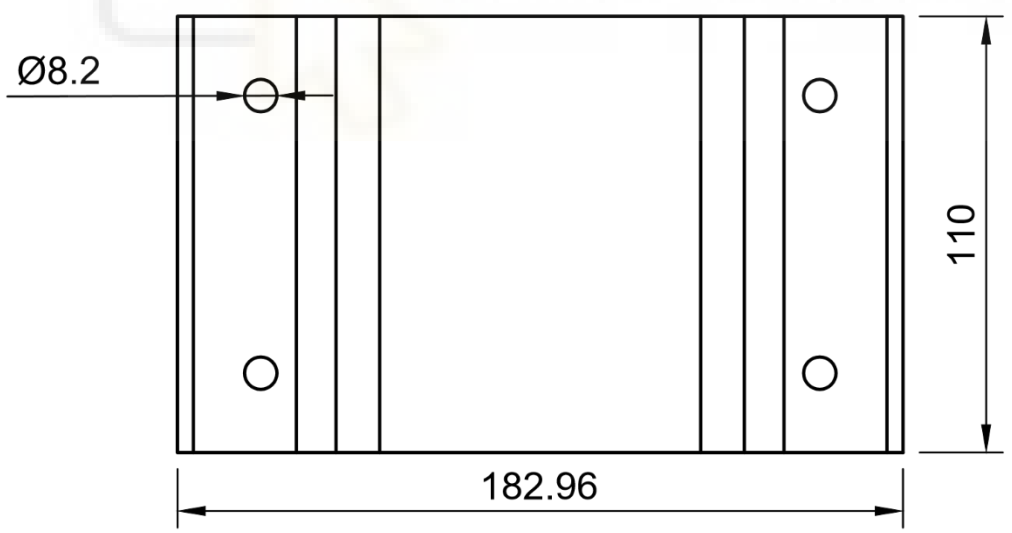
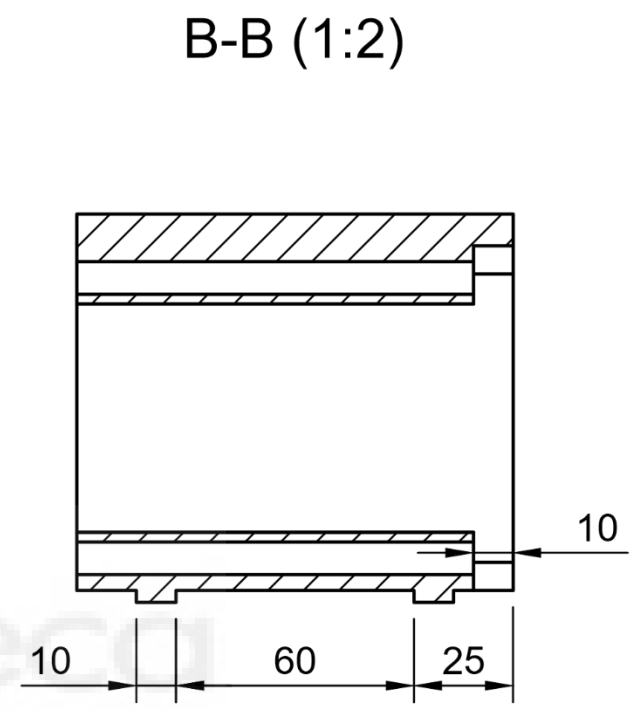
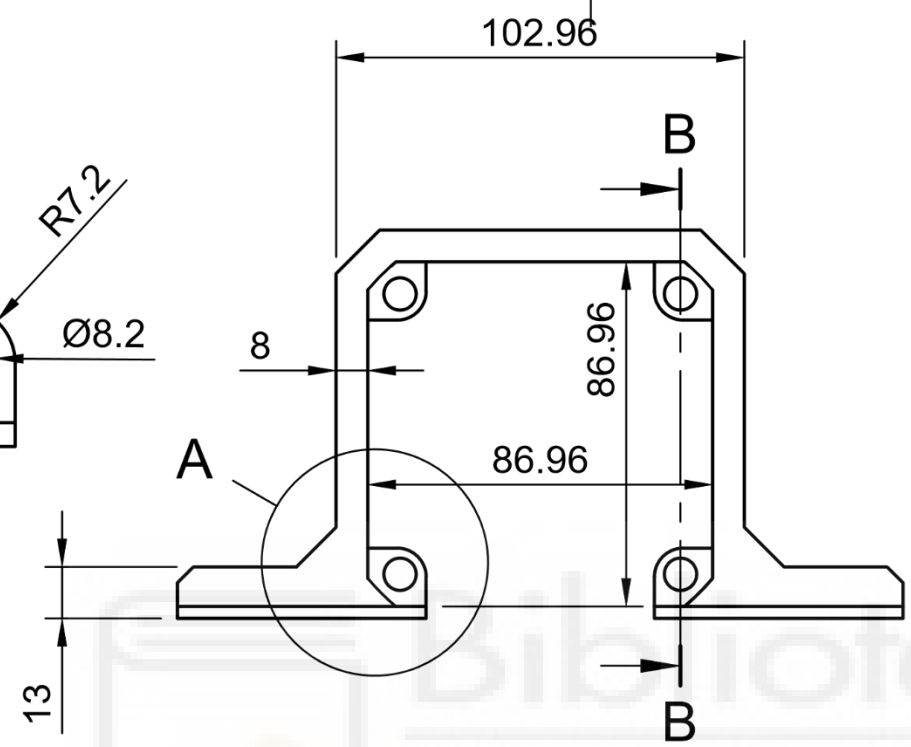
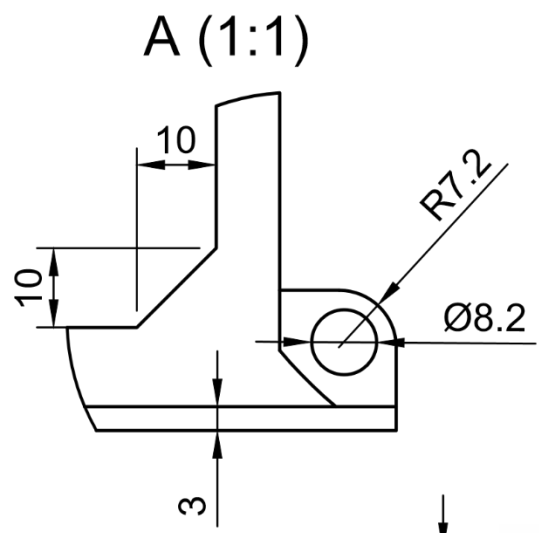
Soporte carro cabezal

Unidades  
mm

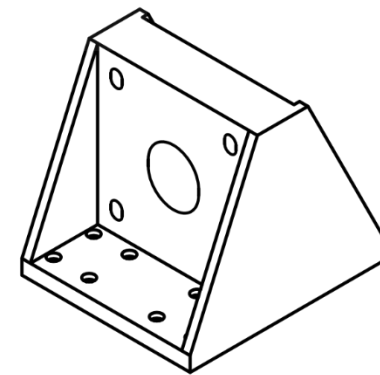
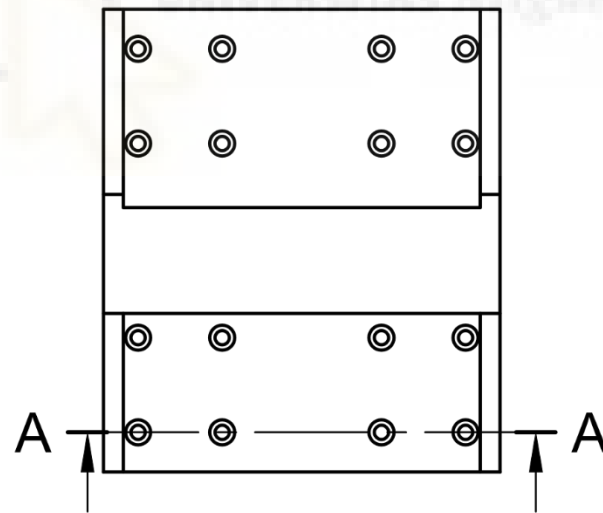
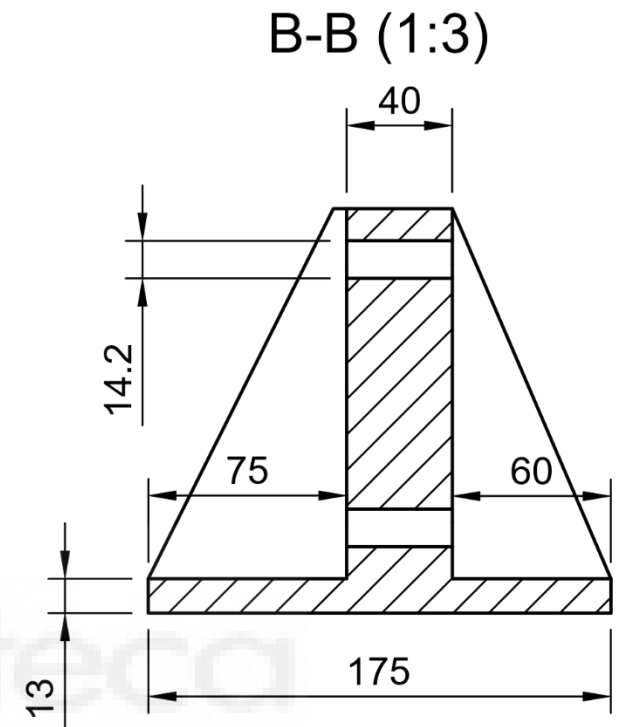
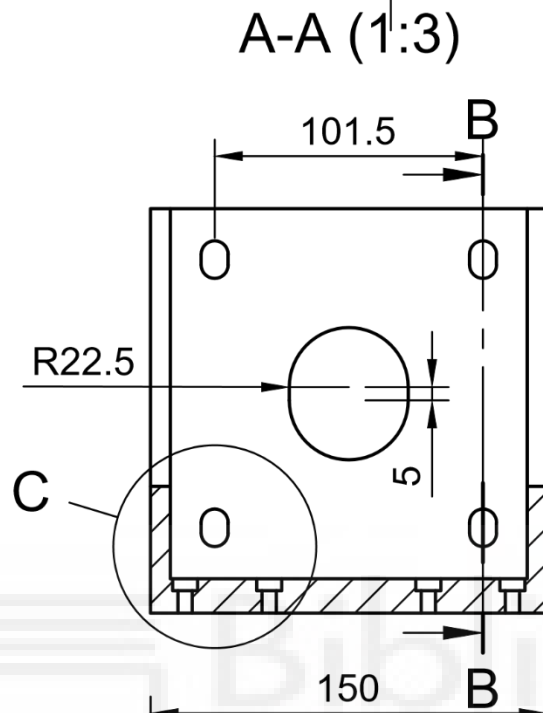
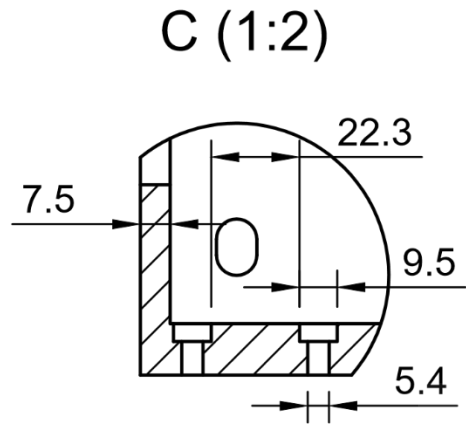
Escala  
1:2



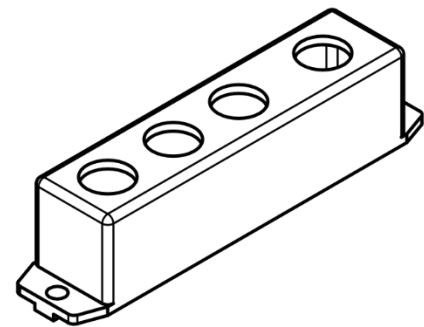
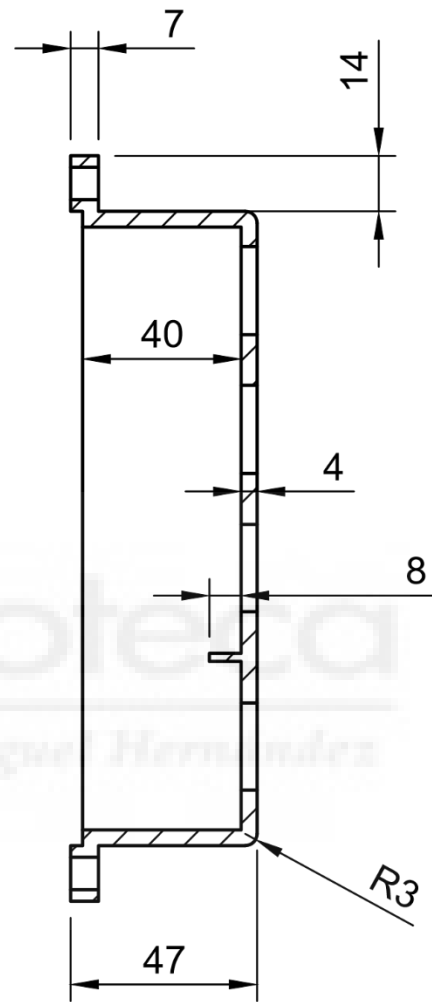
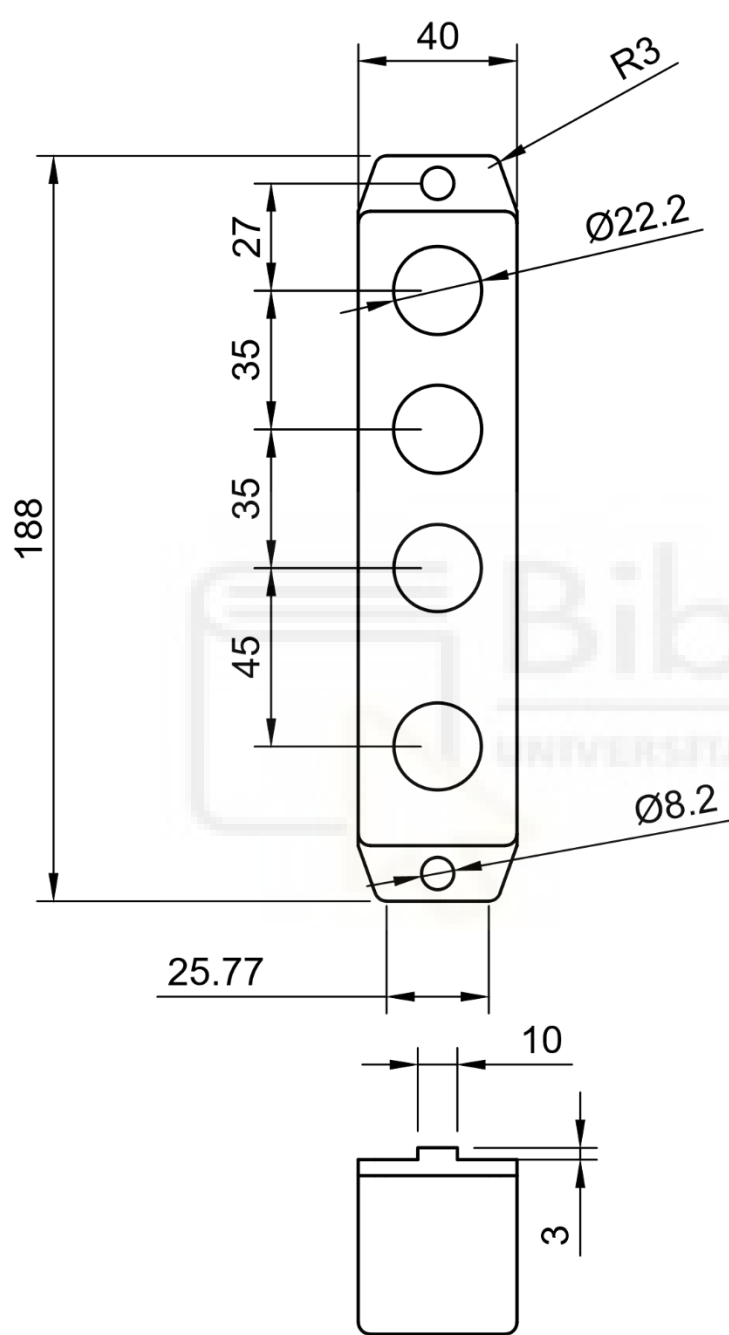
Puente carro	Unidades	Escala
	mm	1:1



<b>Soporte servomotor</b>	Unidades mm	Escala 1:2
---------------------------	----------------	---------------



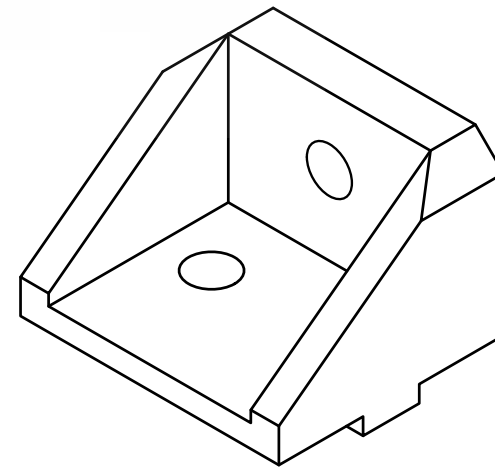
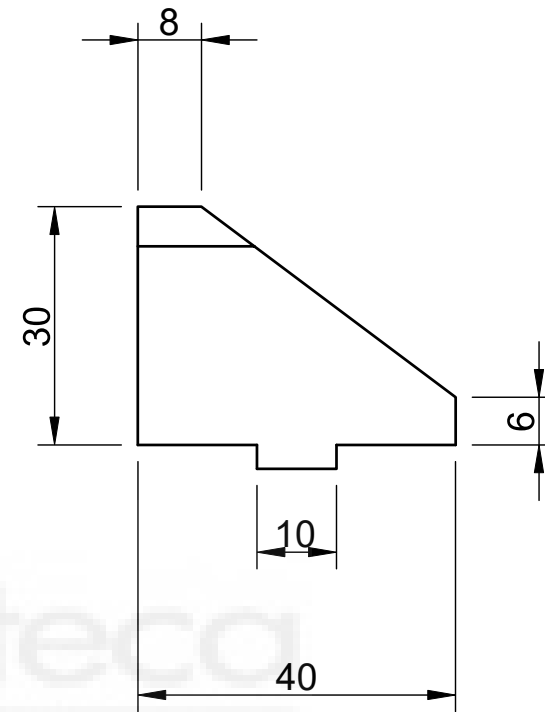
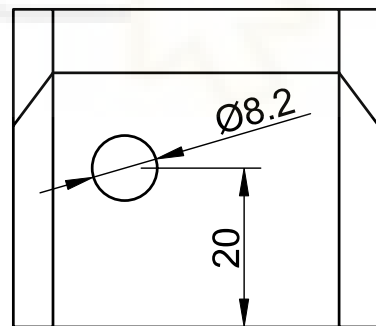
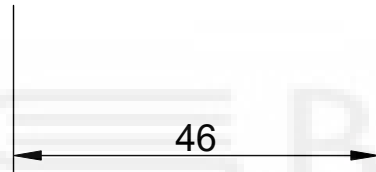
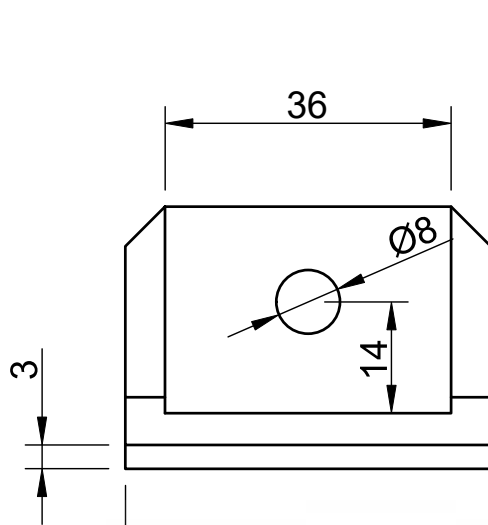
<p><b>Guia bobina</b></p>	<p>Unidades mm</p>	<p>Escala 1:3</p>
---------------------------	------------------------	-----------------------



Botonera

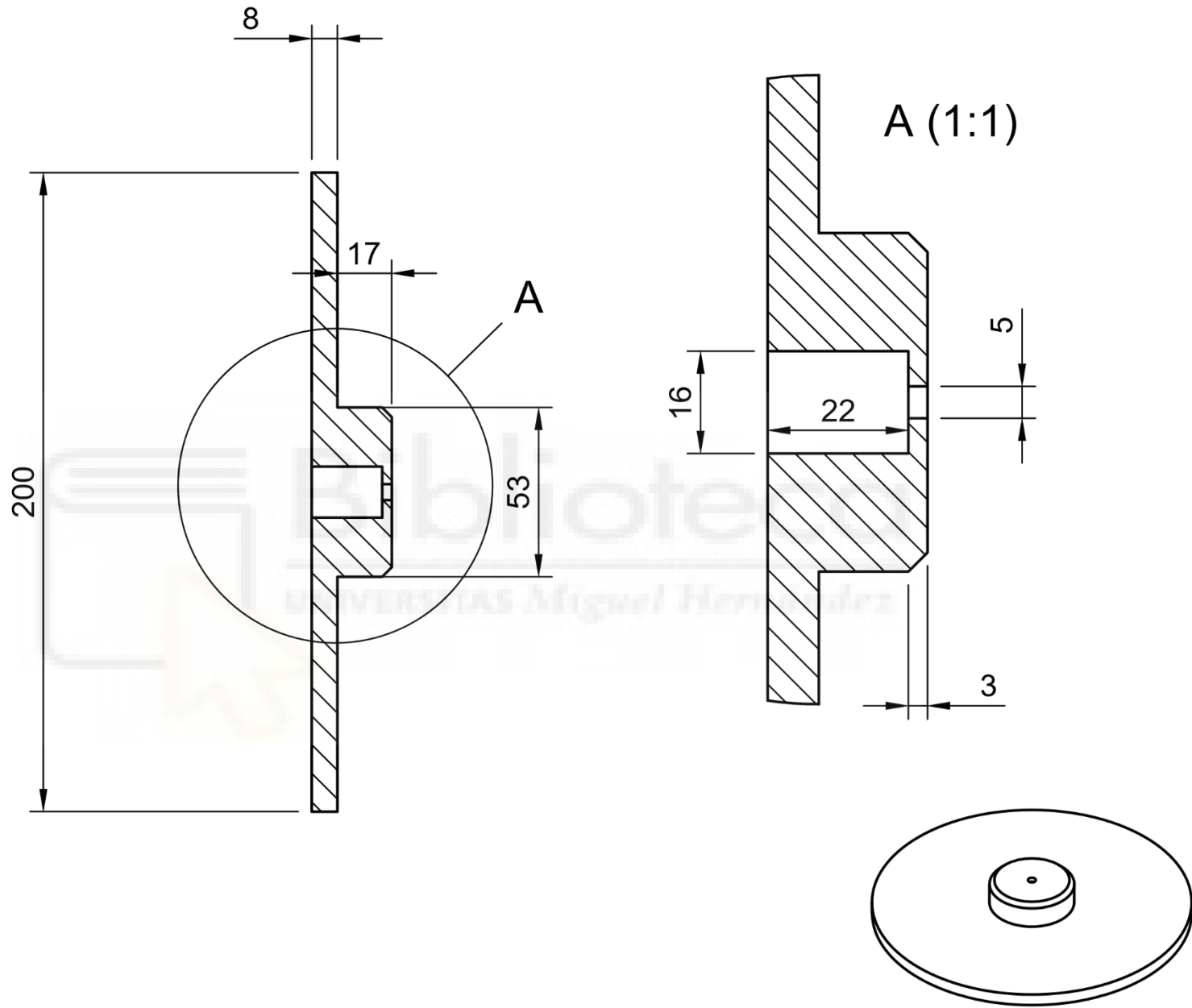
Unidades  
mm

Escala  
1:2

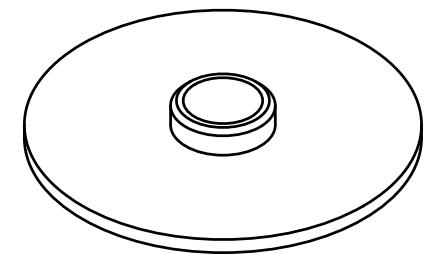
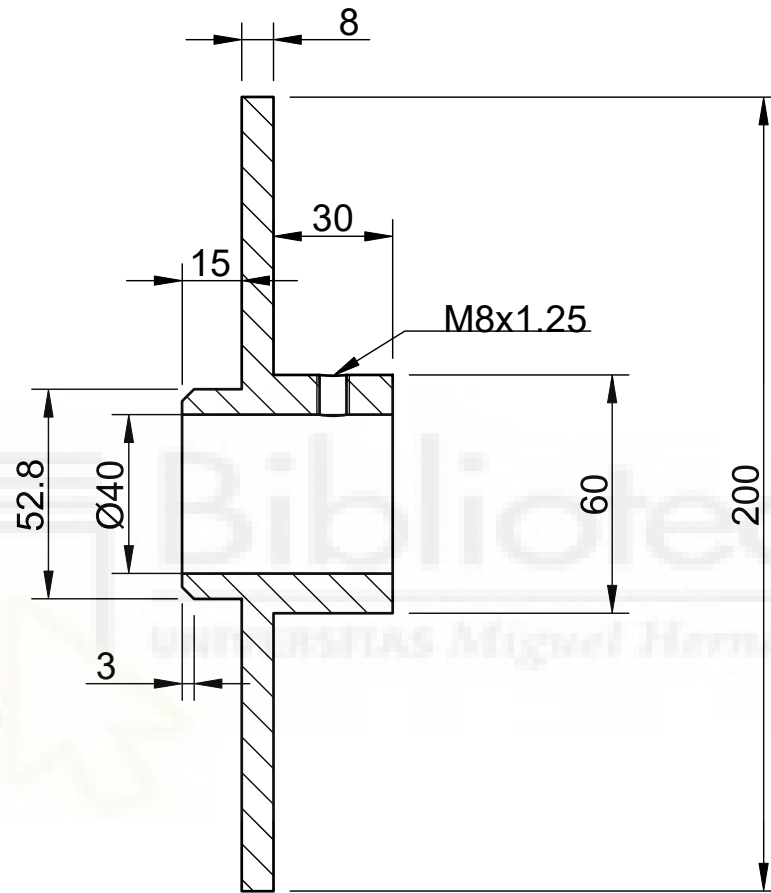


Soporte sensor inductivo	Unidades mm	Escala 1:1
--------------------------	----------------	---------------





Disco acople servo	Unidades mm	Escala 1:2
--------------------	----------------	---------------



Disco acople

Unidades  
mm

Escala  
1:2

```

#include <Wire.h>
#include <Controllino.h>
#include <EEPROM.h>
#include <AccelStepper.h>

#define sirena CONTROLLINO_R3
#define pinza CONTROLLINO_R4
#define paro CONTROLLINO_A0
#define marcha CONTROLLINO_A1
#define final_de_carrera_z CONTROLLINO_A3
#define final_de_carrera CONTROLLINO_A6
#define par_motor CONTROLLINO_D0
#define PP CONTROLLINO_D3 //Pulsos
#define PD CONTROLLINO_D10 //Direccion
#define PP2 CONTROLLINO_D5 //Pulsos //PIN 5V
#define PD2 CONTROLLINO_D1 //Direccion //PIN 5V

AccelStepper stepper2(AccelStepper::DRIVER, PP2, PD2);

//varios
float diametro = 1.75 ; // m
float densidad = 0.00124; // g/mm3
float metros = round(1000 / (PI * pow((diametro / 2), 2) * densidad));
//mm
int diametro_bobina = 106;
unsigned long t1;
const float Pi = 3.14159;

//Eeprom
long posiciones[5][2];
int array_metros[3][5];
int Eaddress = 0;

//posiciones
long posicion;
long posicion_i;
long posicion_f;
int posicion_z;
int posicion_z_i;
int pulsos_por_vuelta = 2500 ;

//configuracion bobina y material
String elementos_menu[] = {"Material", "Formato", "Diametro",
"Calibrar", "Calibrar Z", "Ajustar Metros", "Atras"};
String formatos[] = {"250g", "500g", "1Kg", "2.5Kg", "5Kg", "Atras"};
String diametros [] = {"1.75 mm", "2.85 mm", "Atras"};
String materiales [] = {"PLA", "PETG", "TPU", "Atras"};
String formato = "1 Kg";
String material = "PLA";
int selector_bobina = 2; //0=250g,1=500g,2=1000g,3=2500g,4= 5000g
int selector_material = 1; //0=PLA, 1=PETG, 2 = TPU

//proceso de bobinado
long pulsos = 0;
int par_bobina = 15;
int paso_z = 16;
bool nueva_vuelta = 0;
long num, numprev;
int salto;
volatile int direccion, paso = 1790;
volatile bool mover_z = false;

```

```

volatile long ancho;
volatile int vueltas_tot, capas, vueltas;

void contar_pulsos() {
  pulsos ++;
  if (pulsos >= pulsos_por_vuelta) {
    pulsos = 0;
    nueva_vuelta = true;
    vueltas++;
  }

  if (vueltas > vueltas_tot) {
    vueltas = 0;
    direccion = !direccion;
    capas++;
    mover_z = true;
  }

  int num = map(pulsos, 0, 2500, 0, paso);
  salto = num - numprev;
  if (salto) {
    unsigned long t1;
    digitalWrite(PD, direccion);
    digitalWrite(PP, HIGH);
    t1 = micros();
    while (micros() - t1 < 2);
    digitalWrite(PP, LOW);
  }
  numprev = num;
}

void mover_husillo(bool direccion, long cantidad, int velocidad = 20)
{
  long i = 0;
  if (velocidad > 110 || velocidad < 0 ) velocidad = 1;
  int v = 20 + 500 - ((velocidad / 100.0) * 500);
  digitalWrite(PD, direccion);
  while (i < cantidad) {
    digitalWrite(PP, LOW);
    delayMicroseconds(v);
    digitalWrite(PP, HIGH);
    delayMicroseconds(1);
    i++;
  }
  if (!direccion) posicion -= cantidad;
  if (direccion) posicion += cantidad;
}

void home_bobinador() {
  Serial.println('h');
  digitalWrite(PD, LOW);
  while (digitalRead(final_de_carrera) == HIGH ) {
    digitalWrite(PP, HIGH);
    delayMicroseconds(100);
    digitalWrite(PP, LOW);
    delayMicroseconds(100);
  }
  posicion = 0;
}

```

```

}

void home_rapido() {
  digitalWrite(PD, LOW);
  while (digitalRead(final_de_carrera) == HIGH) {
    if (posicion > 1000) {
      digitalWrite(PP, HIGH);
      delayMicroseconds(80);
      digitalWrite(PP, LOW);
      delayMicroseconds(80);
    }
    else {
      digitalWrite(PP, HIGH);
      delayMicroseconds(45000);
      digitalWrite(PP, LOW);
      delayMicroseconds(45000);
    }
  }
  posicion = 0;
}

void home_z() {
  mover_husillo2(1, 30);
  digitalWrite(PD2, LOW);
  while (digitalRead(final_de_carrera_z)) {
    digitalWrite(PP2, HIGH);
    delayMicroseconds(400);
    digitalWrite(PP2, LOW);
    delayMicroseconds(400);
  }
  posicion_z = 0;
  mover_husillo2(1, 60);
}

void home_z_rapido() {
  int i = 100;
  digitalWrite(PD2, LOW);
  while (digitalRead(final_de_carrera_z)) {
    if (i < 0) i = 0;
    digitalWrite(PP2, HIGH);
    delayMicroseconds(100 + i);
    digitalWrite(PP2, LOW);
    delayMicroseconds(100 + i);
    i--;
  }
  posicion_z = 0;
  delay(100);
  mover_husillo2(1, 20);
}

void mover_husillo2(int direccion, int cantidad) {
  if (!direccion) stepper2.move(-cantidad * 10);
  if (direccion) stepper2.move(cantidad * 10);
  stepper2.setMaxSpeed(7000);
  stepper2.runToPosition();
  if (!direccion) posicion_z -= cantidad;
  if (direccion) posicion_z += cantidad;
}

void mover_husillo2_abs(int posicion_d) {
  int direccion = 0;

```

```

int calculo = posicion_d - posicion_z;
int cantidad = abs(calculo);
if (calculo > 0) {
    direccion = 1;
}
else {
    direccion = 0;
}
mover_husillo2(direccion, cantidad);
}

void mover_husillo_abs(long posicion_d, int velocidad = 20) {
    int direccion = 0;
    long calculo = posicion_d - posicion;
    long cantidad = abs(calculo);
    if (calculo > 0) {
        direccion = 1;
    }
    else {
        direccion = 0;
    }
    mover_husillo(direccion, cantidad, velocidad);
}

void setup() {
    Serial.begin(19200);
    stepper2.setMaxSpeed(7000);
    stepper2.setAcceleration(300000);
    pinMode(CONTROLLINO_IN0, INPUT);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(CONTROLLINO_IN0),
    contar_pulsos, FALLING);
    // posiciones[selector_bobina][0] = 63600;
    // posiciones[selector_bobina][1] = 12000;
    // posiciones[selector_bobina][2] = 780;
    // EEPROM.put(Eadress, posiciones);
    // delay(500);
    EEPROM.get(Eadress, posiciones);
    posicion_i = posiciones[selector_bobina][0];
    posicion_f = posiciones[selector_bobina][1];
    posicion_z_i = 700;

    Serial.println(posicion_i);
    Serial.println(posicion_f);
    Serial.println(paso);

    pinMode(marcha, INPUT);
    pinMode(paro, INPUT);
    pinMode(final_de_carrera, INPUT);
    pinMode(final_de_carrera_z, INPUT);
    pinMode(pinza, OUTPUT);
    pinMode(par_motor, OUTPUT);
    pinMode(PP, OUTPUT);
    pinMode(PD, OUTPUT);
    pinMode(PP2, OUTPUT);
    pinMode(PD2, OUTPUT);
    pinMode(sirena, OUTPUT);
    digitalWrite(sirena, HIGH);
    analogWrite(par_motor, 0);
}

```

```

delay(40);
digitalWrite(sirena, LOW);
digitalWrite(pinza, HIGH);

home_z();
home_bobinador();
mover_husillo_abs(posicion_f, 95);
}

void loop() {
  if (digitalRead(marcha) == HIGH ) {
    bobinar();
  }
}

void bobinar() {
  float m = 0;
  int ajuste_par;
  capas = 0;
  direccion = 1;
  pulsos = 0;
  nueva_vuelta = 0;
  mover_husillo2_abs(posicion_z_i);
  ancho = posicion_i - posicion_f;

  digitalWrite(sirena, LOW);
  digitalWrite(pinza, LOW);
  ajuste_par = map(capas, 0, 28, 150, 255);
  analogWrite(par_motor, ajuste_par);

  while (m / 1000 <= array_metros[selector_bobina][selector_material])
  {
    analogWrite(par_motor, par_bobina * 10);
    if (m >= metros - 10000) {
      digitalWrite(sirena, HIGH);
    }
    if (digitalRead(paro) == HIGH) {
      break;
    }
    if (nueva_vuelta) {
      nueva_vuelta = false;
      m += Pi * (diametro_bobina + 2 * diametro * capas * 0.86);
      if (mover_z) {
        mover_husillo2(0, paso_z);
        mover_z = false;
      }
    }
  }
  fin_bobina();
}

void fin_bobina() {
  digitalWrite(sirena, HIGH);
  analogWrite(par_motor, 0);
  digitalWrite(pinza, HIGH);
  home_z_rapido();
  home_bobinador();
  mover_husillo_abs(posicion_f, 90);
}

```



```

/*void calibrar_z() {
  int paso_c = 10;
  home_z();
  mover_husillo2_abs(posicion_z_i);

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Calibra P.Inicio");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(posicion_z);
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print(paso_c);

  while (digitalRead(verde_izquierda) == LOW ) {
    lcd.setCursor(8, 1);
    lcd.print(paso_c);
    if (digitalRead(verde_derecha) == HIGH) {
      mover_husillo2(1, paso_c);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(posicion_z);
      delay(50);
    }
    if (digitalRead(rojo_derecha) == HIGH) {
      mover_husillo2(0, paso_c);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(posicion_z);
      delay(50);
    }
  }
  posicion_z_i = posicion_z;
  posiciones[selector_bobina][2] = posicion_z_i;
  EEPROM.put(Eadress, posiciones);
  pantalla_actual = 0;
  cambio_menu = 1;
  delay(250);
  inicio();
}

void calibrar() {
  int paso_c = 100;
  mover_husillo_abs(posicion_i, 100);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Calibra P.Inicio");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(posicion);
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print(paso_c);

  while (digitalRead(verde_izquierda) == LOW ) {
    lcd.setCursor(8, 1);
    lcd.print(paso_c);
    if (digitalRead(verde_derecha) == HIGH) {
      mover_husillo(1, paso_c, 20);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(posicion);
      delay(200);
    }
    if (digitalRead(rojo_derecha) == HIGH) {
      mover_husillo(0, paso_c, 20);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(posicion);
    }
  }
}

```

```

        delay(200);
    }
}
posicion_i = posicion;
posiciones[selector_bobina][0] = posicion_i;

mover_husillo_abs(posicion_f, 100);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Calibra P.Fin");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(posicion);
lcd.setCursor(8, 1);
lcd.print(paso_c);

while (digitalRead(verde_izquierda) == LOW ) {
    lcd.setCursor(8, 1);
    lcd.print(paso_c);

    if (digitalRead(verde_derecha) == HIGH) {
        mover_husillo(1, paso_c);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(posicion);
        delay(200);
    }
    if (digitalRead(rojo_derecha) == HIGH) {
        mover_husillo(0, paso_c);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(posicion);
        delay(200);
    }
}
posicion_f = posicion;
posiciones[selector_bobina][1] = posicion_f;
mover_husillo_abs(posicion_i, 100);
EEPROM.put(Eadress, posiciones);
pantalla_actual = 0;
cambio_menu = 1;
}*/

```