



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección
continua de fibras mediante fibrado electrostático*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Andrés Chang Kim

DIRECTORES: Jesús del Val García

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección
continua de fibras mediante fibrado electroestático*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universidade de Vigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño y validación de un sistema de *electrospinning* con recolección continua y controlada de nanofibras mediante un colector rotatorio. El objetivo principal ha sido desarrollar un mecanismo funcional que mejore la homogeneidad en la deposición de fibras y facilite su escalabilidad, empleando soluciones mecánicas simples, materiales accesibles y componentes fácilmente integrables. El sistema diseñado incluye un cilindro colector de aluminio, accionado por un motorreductor de corriente continua, cuya velocidad se regula mediante modulación por ancho de pulso (PWM). El diseño incorpora también un sistema de guiado en los ejes X y Z para el posicionamiento de la aguja, y se ha tenido en cuenta tanto la seguridad eléctrica como la facilidad de ensamblaje y mantenimiento. Se ha construido un prototipo a escala, reutilizando materiales disponibles y con la colaboración del taller del centro, lo cual ha permitido validar la viabilidad de la propuesta. Además, se han realizado análisis estructurales mediante simulación con Autodesk Inventor, evaluando tensiones y desplazamientos en los componentes críticos. Los resultados indican que el diseño propuesto es mecánicamente robusto y adecuado para aplicaciones de laboratorio. Finalmente, se proponen futuras mejoras orientadas a la automatización, precisión del sistema y posibles adaptaciones a escala industrial.

PALABRAS CLAVE

Electrospinning, Nanofibras, Colector rotatorio, Diseño experimental, Fabricación aditiva.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi novia, Belén Barcia, por su apoyo incondicional durante todos estos meses, y a mi familia por haberme acompañado a lo largo de estos cinco años en la Escuela Naval Militar, siempre alentándome desde las Islas Canarias.

También quiero dedicar unas palabras a todos mis compañeros de brigada, en especial a mis compañeros de camareta, por haber sido un pilar fundamental durante este proceso. Su apoyo, humor y compañía han sido clave para mantener el ánimo en los momentos más intensos.

Por último, agradecer sinceramente a mi tutor, Jesús del Val, por su enorme paciencia, su guía constante y su predisposición incluso frente a ajustes de último momento o preguntas que, aunque pudieran parecer simples, siempre fueron recibidas con buena disposición y profesionalismo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Descripción del apartado.....	8
1.2 Objetivos	8
2 Estado del arte	10
2.1 Introducción de técnicas de fabricación de fibras	10
2.2 Técnica de <i>electrospinning</i>	14
2.2.1 Contexto histórico.....	14
2.2.2 Definición	14
2.3 Componentes fundamentales del sistema de hilado electrostático	14
2.4 Principios físicos	15
2.4.1 Campo eléctrico	16
2.4.2 Formación Cono de Taylor	16
2.4.3 Formación del chorro y su estabilidad.....	17
2.5 Tipos de materiales para <i>electrospinning</i>	18
2.5.1 Material base precursor de la fibra	18
2.5.1.1 Polímeros naturales.....	18
2.5.1.2 Polímeros sintéticos	19
2.5.2 Elementos dopantes.	20
2.5.2.1 Materiales cerámicos y metálicos.....	20
2.6 Campos de aplicación	20
2.6.1 Biomedicina.....	21
2.6.2 Filtración y purificación	22
2.6.3 Electrónica flexible y sensores.	23
2.6.4 Energía y almacenamiento.....	24
2.6.5 Supercondensadores	24
2.6.6 Industria textil y recubrimientos	24
2.7 Sistemas de <i>electrospinning</i> comerciales.....	24
2.7.1 Electrospinning de aguja única	24
2.7.2 Electrospinning de agujas múltiples	25
2.7.3 Electrospinning sin aguja.....	26

2.7.4 Electrospinning coaxial y multicapa.....	26
2.7.5 Ventajas y limitaciones de los sistemas de electrohilado comerciales	27
2.8 Colector de fibras electrohiladas.....	28
2.8.1 Tipos de colectores	28
2.8.1.1 Colector plano.....	28
2.8.1.2 Cilindro rotatorio	29
2.8.1.3 Colectores con patrones.....	30
2.8.1.4 Cilindro perforado o recubierto con electrodos	30
3 Requisitos del diseño de un sistema de <i>electrospinning</i>	32
3.1 Introducción	32
3.1.1 KDS Legato 100	33
3.1.2 Jeringa Hamilton®.....	34
3.1.3 Aguja y tubo de conexión.....	34
3.1.4 Generador de alto voltaje Genvolt 73030.....	34
3.1.5 Colector plano.....	35
3.1.6 Cámara de procesamiento.....	35
3.1.7 Deslizador en el eje Z	36
3.1.8 Soporte de la aguja.....	37
3.2 Condiciones de diseño.	37
4 Desarrollo	38
4.1 Diseño del sistema de fabricación de fibras.....	38
4.1.1 Sistema colector de fibras.....	39
4.1.1.1 Cilindro rotatorio. Colector	39
4.1.1.2 Soporte del colector y motor.....	44
4.1.2 Sistema de posicionamiento del electrodo.....	46
4.1.2.1 Sistema de posicionamiento horizontal del electrodo	47
4.1.2.2 Sistema de posicionamiento vertical del electrodo.....	48
4.1.3 Interlock.....	49
5 Prueba de concepto.....	56
5.1 Prototipo de sistema para <i>electrospinning</i>	56
5.2 Diseño del prototipo.....	56
5.3 Metodología del ensayo	58
5.4 Observaciones	59
6 Conclusiones y líneas futuras	61
6.1 Conclusiones	61

6.2 Líneas futuras	61
7 Bibliografía.....	63
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	68
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	69
Anexo III: Contenido del tercer anexo	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Imagen de fibras [1].....	10
Figura 2-2: Esquema de fundamentos de <i>melt spinning</i> [3].....	11
Figura 2-3: Sistema de meltblown [5].....	12
Figura 2-4: Sistema experimental de <i>laser spinning</i> [8]	13
Figura 2-5: Micrografías obtenidas por TEM de nanofibras [13].....	14
Figura 2-6: Diagrama esquemático de un aparato de <i>electrospinning</i> [14].	15
Figura 2-7: El chorro dependiendo del voltaje aplicado de menos (a) a más (d)[15].	15
Figura 2-8: Diagrama de campo eléctrico [19]	16
Figura 2-9: Descripción gráfica del cono de Taylor[22].....	16
Figura 2-10: Diferencia entre electrospraying y <i>electrospinning</i> [24].	17
Figura 2-11: Imagen del chorro [25].	18
Figura 2-12: Nanofibras simétricas y asimétricas [25].	18
Figura 2-13: Fibras formadas con colágeno [27]	19
Figura 2-14: PLA [30].....	19
Figura 2-15: Diagrama de aplicaciones del <i>electrospinning</i> [34].	21
Figura 2-16: Preparación de emulsión de agua y aceite para mejorar la encapsulación y control de liberación del fármaco dentro de la matriz polimérica[35].....	21
Figura 2-17: Imágenes de soporte de fibras[36].....	22
Figura 2-18: Mascarilla FFP2 [37]	22
Figura 2-19: Membrana por nanofibrado[38].	23
Figura 2-20: la prueba de biomarcador de líquido cefalorraquídeo abre las puertas al diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer en etapa temprana[39]	23
Figura 2-21: Compresas más baratas fabricadas por nanofibras y <i>electrospinning</i> [40].	24
Figura 2-22: Sistema de aguja única [42].....	25
Figura 2-23: Sistema de <i>electrospinning</i> de agujas múltiples [43].	25
Figura 2-24: Sistema Slit inyector [44]	26
Figura 2-25: Sistema coaxial de <i>electrospinning</i> [45].....	27
Figura 2-26: Máquina de <i>electrospinning</i> de 4 millones de euros [47].....	27
Figura 2-27: Colector plano [49].....	28
Figura 2-28: (A) Colector plano, (B) y (C) Tambor rotatorio[48]	29
Figura 2-29: Cilindro rotatorio [53]	29
Figura 2-30: Cilindro formado por barras[55]	31
Figura 3-1: Diagrama de bloques general de un sistema de <i>electrospinning</i>	32

Figura 3-2: Sistema experimental de <i>electrospinning</i> en los laboratorios de investigación del CUD financiado a través de los Proyectos Propios de Investigación del CUD-ENM (PICUD 2022-08)	33
Figura 3-3: KDS Legato 100 [56]	34
Figura 3-4: Jeringa utilizado en el laboratorio	34
Figura 3-5: Generador de alto voltaje Genvolt 73030 [57]	35
Figura 3-6: Contraelectrodo con papel de aluminio	35
Figura 3-7: Cámara de procesamiento de metacrilato del laboratorio de investigación del CUD ...	36
Figura 3-8: Deslizador en el eje Z	36
Figura 3-9: Soporte de la aguja	37
Figura 4-1: Esquema del ensamblaje de Autocad Inventor del sistema de <i>electrospinning</i>	38
Figura 4-2: Esquema de Inventor Autocad del sistema colector de fibras	39
Figura 4-3: Vista del ensamblaje completo del cilindro rotatorio.....	40
Figura 4-4: Cuerpo principal del cilindro rotatorio	40
Figura 4-5: Ranura del cilindro colector	41
Figura 4-6: Entrada para eje rotatorio	41
Figura 4-7: Eje transmisor.....	42
Figura 4-8: Ensamblaje del transmisor de giro	42
Figura 4-9: Motorreductor DC RS PRO [59]	43
Figura 4-10: Fuente de alimentación conmutada MEAN WELL[60].....	43
Figura 4-11: Acople del cilindro	44
Figura 4-12: Esquema del soporte del colector	45
Figura 4-13: Imagen detallada del punta de cobre	45
Figura 4-14: Patas de metacrilato de color naranja claro	46
Figura 4-15: Esquema del sistema de movimiento de la aguja en el eje X y Z	46
Figura 4-16: Perfil Item y corte a sección a zona de soporte	47
Figura 4-17: Conjunto del sistema para el movimiento en el eje X.....	47
Figura 4-18: Motor paso a paso NEMA 17 [61]	48
Figura 4-19: Plataforma de sujeción del soporte de la aguja con ensamblado de ruedas	48
Figura 4-20: Soporte de aguja	49
Figura 4-21: Ajustador del soporte.....	49
Figura 4-22: Sistema de Interlock	50
Figura 4-23: Análisis de tensiones de Von Mises de la cámara de procesamiento.....	51
Figura 4-24: Desplazamiento en el eje X	51
Figura 4-25: Desplazamiento en el eje Y	52
Figura 4-26: Desplazamiento en el eje Z.....	52
Figura 4-27: Vista de la tensión actuando sobre el lado de fijación donde se encuentra el motor ..	53

Figura 4-28: Análisis de tensiones de Von Mises del Perfil ITEM.....	53
Figura 4-29: Desplazamiento en el eje X	54
Figura 4-30: Desplazamiento en el eje Y	54
Figura 4-31: Desplazamiento en el eje Z.....	55
Figura 5-1: Modelo 3D del prototipo en INVENTOR	56
Figura 5-2: Prototipo real realizado con el apoyo del taller de mecanizado de la Universidad de Vigo	58
Figura 5-3: Sistema de prueba de concepto montado en el laboratorio de Investigación del CUD-ENM.....	58
Figura 5-4: Solución de PCL y acetona en el agitador magnético del laboratorio del CUD-ENM	59
Figura 5-5: Fibras depositadas	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5: Presupuesto mano de obra.....	83
Tabla 6: Material para la implementación del sistema.....	84
Tabla 7: Presupuesto por subcontratación.....	84
Tabla 8: Presupuesto total	84

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Descripción del apartado

El electrofibrado se ha consolidado como una de las técnicas más innovadoras para la fabricación de nanofibras, con aplicaciones que abarcan desde la biomedicina hasta la filtración avanzada y la electrónica flexible. Su capacidad para generar estructuras con alta relación superficie-volumen ha despertado un gran interés en la industria y la investigación. No obstante, el proceso enfrenta un reto fundamental: la falta de control preciso en la deposición de las fibras y la ausencia de un sistema de recolección continua, aspectos cruciales para garantizar su viabilidad en entornos industriales.

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño y desarrollo de un sistema de deposición controlada que optimiza la recolección de fibras generadas mediante fibrado electrostático. La propuesta integra un colector rotatorio con un mecanismo de movimiento en los ejes X y Z, lo que permite mejorar la alineación de las fibras y distribuir las de manera más uniforme sobre la superficie de recolección.

El estudio aborda aspectos clave del proceso, desde la selección de los parámetros óptimos hasta el diseño de un colector eficiente y económicamente viable. Además, se plantea la implementación de un sistema de control preciso, con el objetivo de mejorar la estabilidad y repetibilidad del electrohilado. Con este desarrollo, se busca facilitar la transición del *electrospinning* hacia una aplicación industrial más eficiente, asegurando una producción de materiales con mayor calidad, uniformidad y reproducibilidad.

1.2 Objetivos

El propósito central de este estudio es desarrollar un sistema de deposición controlada para la fabricación de fibras electrohiladas, con un enfoque en mejorar las capacidades y versatilidad del sistema de *electrospinning* de los laboratorios de investigación del CUD-ENM. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Mejora del sistema de *electrospinning* disponible actualmente en los laboratorios de Investigación del CUD para lo cual se busca un sistema que optimice la deposición de fibras, asegurando una distribución homogénea sobre la superficie de recolección y reduciendo irregularidades que puedan afectar la calidad del material obtenido.
- Desarrollar un mecanismo de recolección continua, basado en un colector rotatorio, complementado con un sistema de desplazamiento en los ejes X y Z para el electrodo. Esta configuración permitirá mejorar el control sobre la orientación y densidad de las fibras, favoreciendo una estructura más uniforme y reproducible.

- Integrar un sistema de control preciso, que regule el movimiento del colector y ajuste los parámetros clave del proceso en tiempo real, asegurando una alineación más efectiva de las fibras y una deposición más estable.
- Evaluar el rendimiento del sistema propuesto a través de pruebas experimentales, utilizando un prototipo a modo de prueba de concepto para analizar su eficiencia y realizar ajustes en el diseño con el fin de optimizar la producción de fibras electrohiladas.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción de técnicas de fabricación de fibras

A lo largo de la historia, la fabricación de fibras ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de la industria textil y de numerosos sectores que dependen de materiales versátiles y resistentes. Desde los primeros procesos artesanales hasta las tecnologías de vanguardia, la evolución en la producción de fibras ha transformado no solo la manera en que se confeccionan los tejidos, sino también sus aplicaciones en la vida cotidiana, la ingeniería y la ciencia de los materiales.

Las fibras son estructuras filiformes (ver Figura 2-1) caracterizadas por su alta relación longitud-diámetro, lo que les confiere propiedades únicas como flexibilidad, resistencia mecánica y baja densidad.

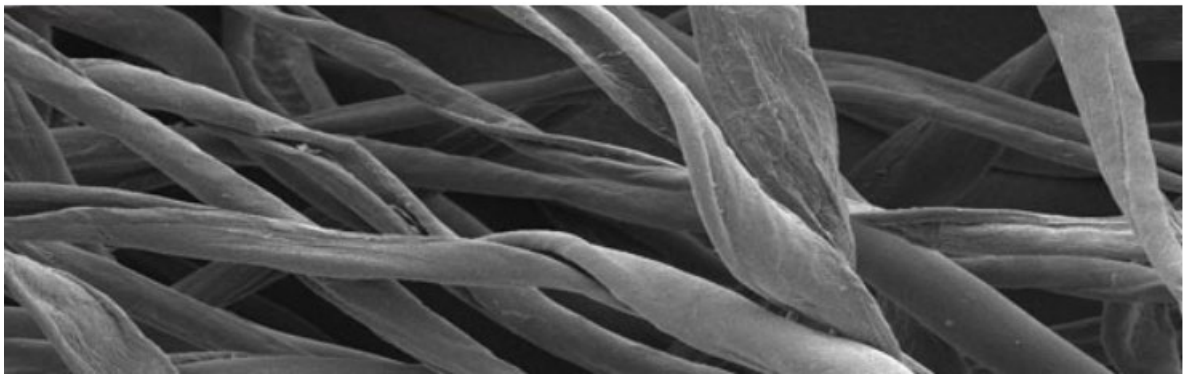


Figura 2-1: Imagen de fibras [1].

En este apartado, exploraremos la incorporación de nuevas técnicas de fabricación de fibras, analizando cómo la innovación ha permitido mejorar su rendimiento, sostenibilidad y adaptabilidad a distintas necesidades. Veremos de qué manera los avances en procesos sintéticos y naturales han ampliado las posibilidades de diseño y funcionalidad, impulsando el desarrollo de materiales más eficientes, ligeros y duraderos.

Con cada nueva técnica, se abre un horizonte de oportunidades que redefine los estándares de la industria, marcando el camino hacia un futuro donde la creatividad y la tecnología convergen para dar forma a productos más sofisticados y sostenibles.

Para la fabricación de fibras se utilizan técnicas de diversa índole, entre las que destacan las siguientes:

1. La hilatura por fusión, conocida en inglés como *melt spinning*, es un método ampliamente utilizado en la fabricación de fibras sintéticas, gracias a su eficiencia y versatilidad. El

proceso es relativamente simple pero sumamente efectivo: un polímero se calienta hasta alcanzar su punto de fusión y luego se extruye a través de una hilera, formando filamentos continuos que se solidifican al enfriarse. Esta técnica no solo permite la producción a gran escala, sino que también ofrece un alto grado de control sobre las propiedades finales de las fibras, lo que la convierte en una pieza clave en el desarrollo de materiales sintéticos adaptados a diversas aplicaciones.

Los polímeros más empleados en este proceso incluyen poliéster (PET), nylon (PA), polipropileno (PP) y polietileno (PE). Cada uno de estos materiales aporta características únicas a las fibras que se producen con ellos. El poliéster, por ejemplo, es valorado por su resistencia y facilidad de mantenimiento, lo que lo hace ideal para ropa, tapicería y textiles del hogar. El nylon, con su notable tenacidad y elasticidad, es la opción preferida para prendas deportivas, medias, alfombras y cordajes. Por otro lado, el polipropileno, al ser ligero y altamente resistente a la humedad, se emplea en ropa desechable, productos médicos y geotextiles. Finalmente, el polietileno se utiliza en la fabricación de fibras de alto rendimiento, presentes en equipos de protección y sistemas de filtración industrial.

Pero su impacto no se limita al ámbito textil. Las fibras obtenidas mediante hilatura por fusión han encontrado aplicaciones esenciales en sectores como la automoción, la construcción y la medicina. Desde airbags y cinturones de seguridad hasta mascarillas y filtros industriales, estos materiales han revolucionado la manera en que concebimos la seguridad, la higiene y la funcionalidad en distintos campos. La combinación de innovación tecnológica y adaptación a necesidades específicas ha convertido a esta técnica en una de las más influyentes en la evolución de los materiales sintéticos [2]. (ver Figura 2-2).

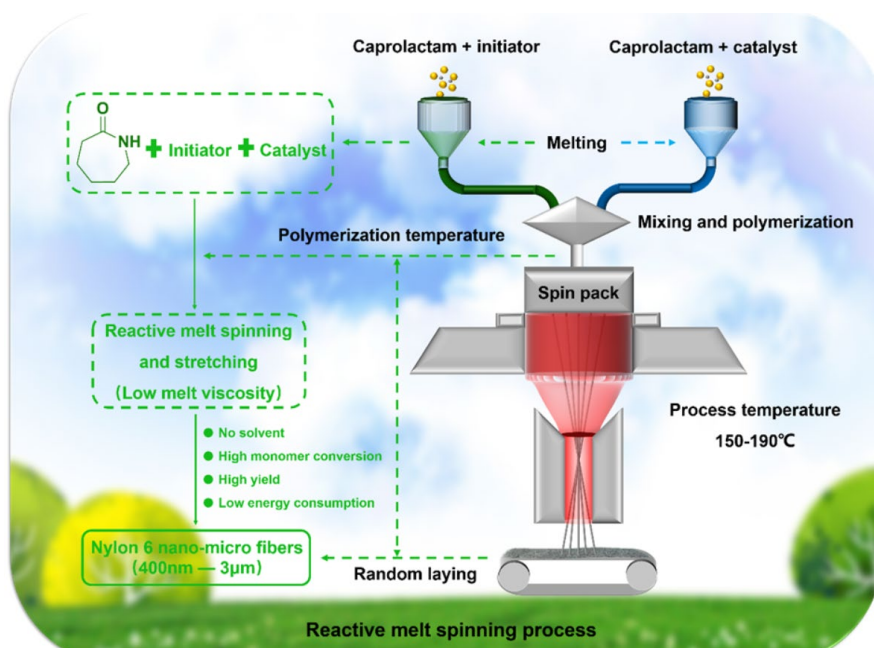


Figura 2-2: Esquema de fundamentos de *melt spinning* [3]

2. El *melblown* es un proceso de fabricación de fibras que parte de la hilatura por fusión, pero introduce una variación clave que lo distingue: en lugar de generar filamentos continuos, las fibras se estiran y fragmentan mediante un potente flujo de aire caliente a gran velocidad. Esta técnica permite obtener fibras extremadamente finas y discontinuas, que se enfrían y solidifican mientras son arrastradas en suspensión, formando una estructura no tejida con una porosidad notablemente alta. Estas características confieren al material resultante propiedades únicas, como una excelente capacidad de filtración, ligereza y una textura suave al tacto.

Para su fabricación, se emplean diversos polímeros termoplásticos, siendo los más comunes el polipropileno (PP), el poliéster (PET), las poliamidas (PA) y el poliuretano termoplástico (TPU). Entre todos ellos, el polipropileno destaca por ser el más utilizado, ya que permite producir fibras ultrafinas con una distribución homogénea y un equilibrio óptimo entre resistencia mecánica y transpirabilidad.

Gracias a su estructura y propiedades, las fibras obtenidas mediante el proceso Meltblown tienen aplicaciones fundamentales en múltiples sectores. En el ámbito médico y sanitario, son el material base para la fabricación de mascarillas quirúrgicas y respiradores de alta eficiencia, como los modelos N95 y FFP2, además de otros elementos de protección desechables, como batas y gorros. En la industria de la filtración, estas telas desempeñan un papel crucial en filtros de aire y líquidos, desde sistemas de purificación de agua hasta filtros industriales y de climatización. También tienen una presencia importante en la producción de toallitas húmedas, productos de higiene personal y absorbentes industriales, donde su capacidad de retención y absorción resulta indispensable.

Pero su impacto no se limita a la sanidad o la filtración. La ligereza y la porosidad controlada de estas fibras han permitido su integración en sectores como la automoción, donde se emplean en la fabricación de filtros de aire y combustible, y en la industria química, donde se utilizan para la absorción y contención de derrames de aceites y sustancias peligrosas. Más que una simple técnica de fabricación, el proceso Meltblown ha revolucionado la manera en que concebimos los materiales no tejidos, proporcionando soluciones innovadoras que combinan funcionalidad, eficiencia y un alto rendimiento en aplicaciones que van desde la protección personal hasta la filtración de precisión[4]. (ver Figura 2-3).

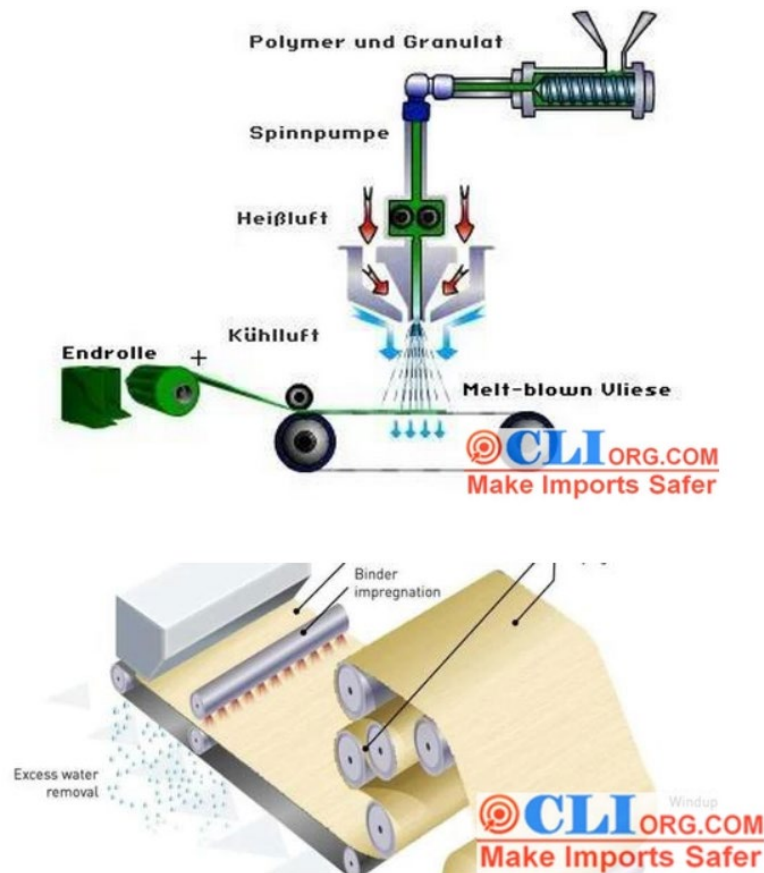


Figura 2-3: Sistema de meltblown [5].

3. El *laser spinning* es una técnica revolucionaria en la fabricación de nanofibras, que emplea un láser de alta potencia para fundir un material precursor y transformarlo en fibras ultrafinas

con diámetros de pocas decenas de nanómetro. A diferencia de métodos tradicionales como el *electrospinning* o la hilatura por fusión, este proceso no requiere disolventes ni el uso de hileras, lo que permite generar fibras directamente a partir de materiales sólidos. Esta característica simplifica la producción y, al mismo tiempo, amplía el abanico de materiales utilizables, reduciendo el impacto ambiental y facilitando el desarrollo de fibras con propiedades avanzadas.

Los materiales precursores utilizados para laser spinning son cerámicas o vidrios que poseen diversos tipos de composición, entre los que se pueden destacar los vidrios bioactivos por su alta biocompatibilidad y biointegración ósea. Gracias a la versatilidad del proceso, es posible fabricar nanofibras de óxido de silicio, alúmina, circonia, carburo de silicio y vidrios bioactivos como el 45S5 (Bioglass) o el S53P4 (aprobados por la FDA para su uso en seres humanos), entre otros, cada uno con características específicas que los hacen ideales para distintas aplicaciones.

Las fibras obtenidas mediante este método han encontrado un lugar clave en sectores altamente exigentes. En el ámbito biomédico, su capacidad para imitar la matriz extracelular las convierte en materiales idóneos para andamios (*scaffolds*) en ingeniería de tejidos, apósitos avanzados y sistemas de liberación controlada de fármacos[6]. En la industria aeroespacial y automotriz, su combinación de baja densidad, alta resistencia y estabilidad térmica las hace esenciales en revestimientos termoaislantes y materiales compuestos ultraligeros.

Otro sector donde la técnica de laser spinning está ganando terreno es el de la filtración y purificación, ya que permite la creación de membranas ultrafinas capaces de retener partículas y contaminantes en el aire y el agua, lo que resulta crucial en el desarrollo de sistemas de purificación de nueva generación. Además, en el ámbito de la energía, estas nanofibras están siendo investigadas para su aplicación en electrodos de baterías de alta capacidad y supercondensadores, donde su estructura porosa mejora el transporte de iones y optimiza el rendimiento electroquímico.

Más que una simple evolución en la fabricación de fibras, el laser spinning representa un cambio de paradigma en la creación de materiales funcionales. Su precisión, eficiencia y flexibilidad lo convierten en una tecnología con un inmenso potencial para redefinir los límites de la biomedicina, la energía, la industria aeroespacial y la nanotecnología[7]. (ver Figura 2-4).

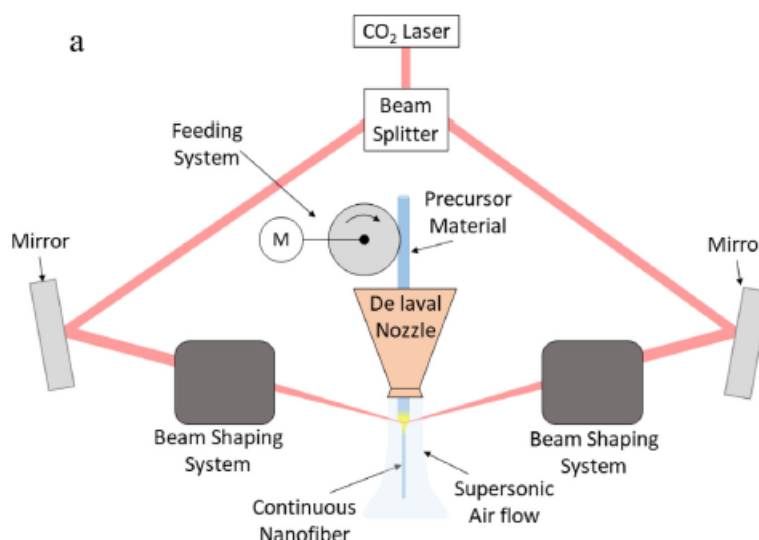


Figura 2-4: Sistema experimental de *laser spinning* [8]

4. El *electrospinning* es una de las técnicas de fabricación de fibras más extendidas y versátiles, y será el eje central de los próximos apartados, dado que constituye el núcleo de este Trabajo de Fin de Grado. A lo largo del desarrollo, se explorarán sus principios, aplicaciones y el impacto que ha tenido en diversos campos, abordando tanto sus ventajas como los desafíos que plantea su implementación.

2.2 Técnica de *electrospinning*

2.2.1 Contexto histórico

El electrohilado tiene sus raíces en estudios sobre líquidos sometidos a campos eléctricos, con antecedentes que se remontan al siglo XVI, cuando William Gilbert exploró la influencia de cargas eléctricas en fluidos. En 1887, Charles Boys investigó la formación de fibras ultrafinas a partir de líquidos cargados eléctricamente, y en 1902, John Francis Cooley y W. Morton patentaron procesos sobre la manipulación de líquidos dieléctricos bajo altos voltajes[9]. Sin embargo, el avance clave ocurrió en 1934, cuando Anton Formhals patentó el primer dispositivo de *electrospinning*, estableciendo la base del proceso moderno con una aguja cargada eléctricamente y un colector[10].

En la década de 1960, Geoffrey Taylor describió matemáticamente la deformación de gotas bajo campos eléctricos, definiendo el cono de Taylor, esencial en la formación de nanofibras. A pesar de estos avances, el electrospinning permaneció como una técnica experimental confinada en gran medida a un uso más en laboratorios de investigación hasta la década de los 90s del siglo pasado, cuando Reneker y Chun en 1995 demostraron su viabilidad para la producción de nanofibras a gran escala, impulsando su desarrollo en aplicaciones biomédicas, filtración y electrónica flexible[11].

2.2.2 Definición

El *electrospinning* es una técnica de fabricación de fibras que utiliza la aplicación de un campo eléctrico a una solución o fundido polimérico para generar fibras con diámetros en el rango nanométrico y micrométrico, tal y como se puede observar en la Figura 2-5. Su simplicidad, versatilidad y capacidad para producir estructuras con una alta relación superficie-volumen han consolidado su relevancia en la ciencia de materiales[12].

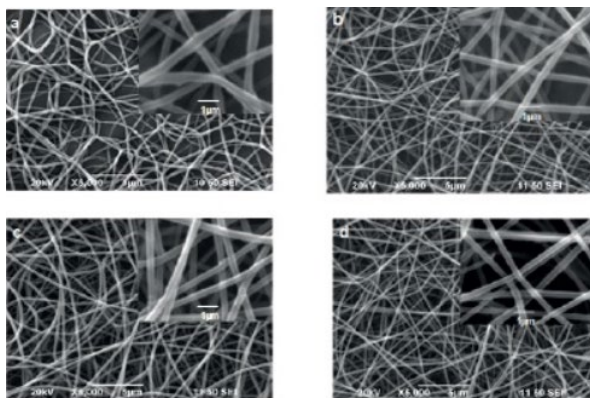


Figura 2-5: Micrografías obtenidas por TEM de nanofibras [13].

2.3 Componentes fundamentales del sistema de hilado electrostático

El sistema de electrohilado se compone principalmente de los siguientes elementos como se puede observar en la Figura 2-6;

1. Fuente de alta tensión.
2. Sistema de inyección de precisión.
3. Depósito de material precursor.

4. Electrodo (aguja).
5. Contraelectrodo (colector).

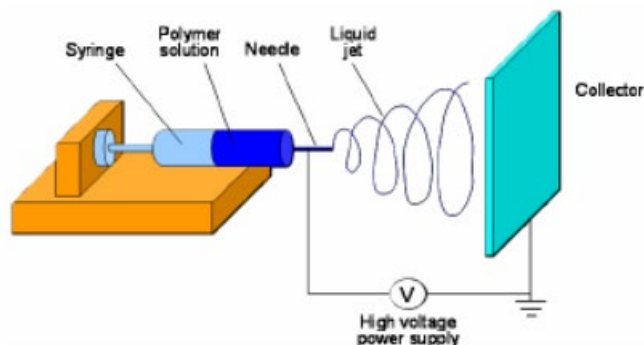


Figura 2-6: Diagrama esquemático de un aparato de *electrospinning*[14].

Mediante la fuente de alta tensión se genera un campo eléctrico de alta tensión. Esto genera un campo eléctrico que induce la carga de la solución polimérica contenida en la jeringa. Esta solución es administrada de manera controlada mediante una bomba de inyección, la cual regula el flujo del polímero hacia la aguja o boquilla.

A medida que la solución alcanza la punta de la aguja, el campo eléctrico aplicado supera la tensión superficial del fluido, lo que provoca la formación de un cono de Taylor y la emisión de un chorro polimérico cargado (ver Figura 2-7). Durante su trayectoria hacia el colector, el chorro experimenta un proceso de adelgazamiento y evaporación del solvente, lo que permite la formación y deposición de nanofibras sobre la superficie colectora.

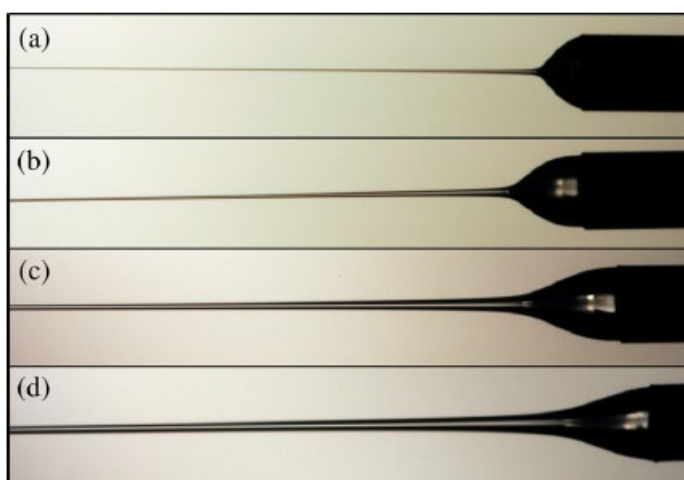


Figura 2-7: El chorro dependiendo del voltaje aplicado de menos (a) a más (d)[15].

2.4 Principios físicos

Para adentrarse en el mundo del electrohilado y entender su papel en la fabricación de nanofibras, es esencial explorar los principios físicos que lo sustentan. Este proceso, que combina la acción de un campo eléctrico intenso con la dinámica de fluidos, permite la generación de fibras ultrafinas a partir de soluciones o fundidos poliméricos. Su funcionamiento se basa en un delicado equilibrio de fuerzas que transforman un fluido en filamentos continuos con dimensiones nanométricas[16]. Los siguientes apartados abordarán en detalle los procesos fundamentales que intervienen en el *electrospinning*:

2.4.1 Campo eléctrico

El campo eléctrico es una alteración en el espacio generada por un cuerpo con carga, la cual puede influir sobre otra carga sin necesidad de que haya contacto directo entre ellas (ver Figura 2-8). Esta teoría explica la interacción eléctrica como un proceso que se transmite gradualmente a través del medio, propagándose a la misma velocidad que la luz[17]. Por otro lado, en un sistema de *electrospinning* el campo eléctrico se establece aplicando un voltaje de muy alta intensidad entre una aguja metálica siendo este el electrodo y un colector conectado a tierra que vendría siendo el contraelectrodo[18].

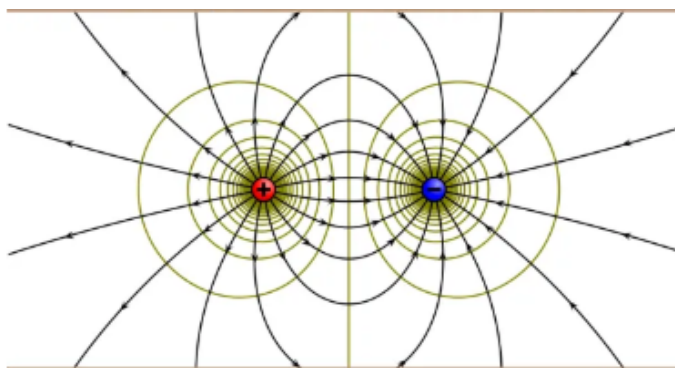


Figura 2-8: Diagrama de campo eléctrico [19]

2.4.2 Formación Cono de Taylor

El Cono de Taylor es una estructura cónica que se forma en la punta de una aguja o inyector cuando un fluido cargado eléctricamente es sometido a un campo eléctrico intenso[20]. Inicialmente, la tensión superficial del líquido mantiene una forma esférica en la punta de la aguja como se puede observar en la

La tensión superficial, es la fuerza que mantiene unidas las moléculas en la superficie de un líquido, actuando como una barrera que resiste la deformación. En el *electrospinning*, esta fuerza compite directamente con la fuerza electrostática inducida por el campo eléctrico, y el equilibrio entre ambas determina la correcta formación del cono de Taylor y la estabilidad del chorro polimérico.

La tensión superficial se expresa en unidades de N/m y está gobernada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas del fluido[18]. En este punto, da lugar la formación de un cono estable con un ángulo semivertical de $49,3^\circ$, según las predicciones de Taylor[21]. (ver Figura 2-9)

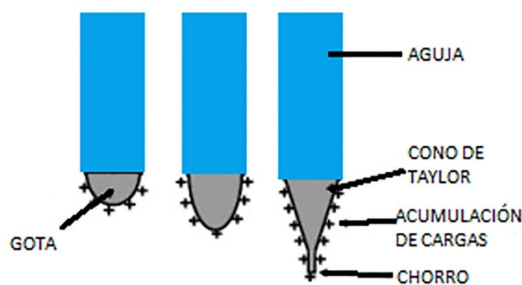


Figura 2-9: Descripción gráfica del cono de Taylor[22].

Existen varios factores que pueden alterar la tensión superficial del líquido:

1. Los polímeros con alta cohesión molecular presentan una tensión superficial elevada, lo que dificulta la formación del chorro y puede causar electrospraying (ver Figura 2-10) en lugar de electrohilado. Además, al aumentar la concentración de polímero en la solución, la tensión superficial se reduce, facilitando la formación de un cono estable y fibras más uniformes[23].

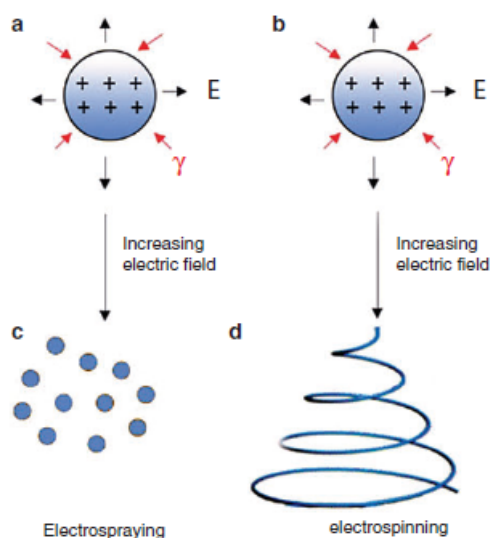


Figura 2-10: Diferencia entre electrospraying y *electrospinning*[24].

2. Los solventes con alta polaridad, como el dimetilsulfóxido (DMSO) o la N,N-dimetilformamida (DMF), tienden a reducir la tensión superficial. En contraste, solventes con baja polaridad pueden dificultar el proceso. Por ello, soluciones con mayor conductividad permiten una mayor acumulación de carga, lo que mejora la elongación del chorro y favorece la formación de fibras más delgadas. Sin embargo, conductividades excesivas pueden generar inestabilidad en el proceso, provocando la formación de estructuras no uniformes[9].
3. El aumento de la temperatura del sistema provoca una disminución de la tensión superficial del líquido, promoviendo una mayor estabilidad en el chorro polimérico. De forma similar, la humedad relativa influye en la evaporación del solvente y, por ende, en la morfología final de las fibras electro hiladas.
4. Por último, para ajustar la tensión superficial, se pueden añadir surfactantes a la solución polimérica. Estos compuestos reducen la energía requerida para la deformación del fluido, facilitando la generación de fibras ultra finas sin defectos[16].

2.4.3 Formación del chorro y su estabilidad

Una vez que se supera la tensión superficial del fluido polimérico ocurre la formación del chorro. Cuando se alcanza el voltaje crítico, el chorro emerge del vértice del cono de Taylor y es guiado por el campo eléctrico hacia el colector. Durante su trayectoria, el chorro experimenta un proceso de adelgazamiento, que es crucial para la formación de fibras de diámetros nanométricos.

La estabilidad de este chorro es fundamental para garantizar la producción de fibras ultrafinas homogéneas y libres de defectos. Si el chorro es inestable pueden presentarse anomalías como formación de gotas (electrospraying), perlas en las fibras o chorros múltiples como en la Figura 2-11[18].

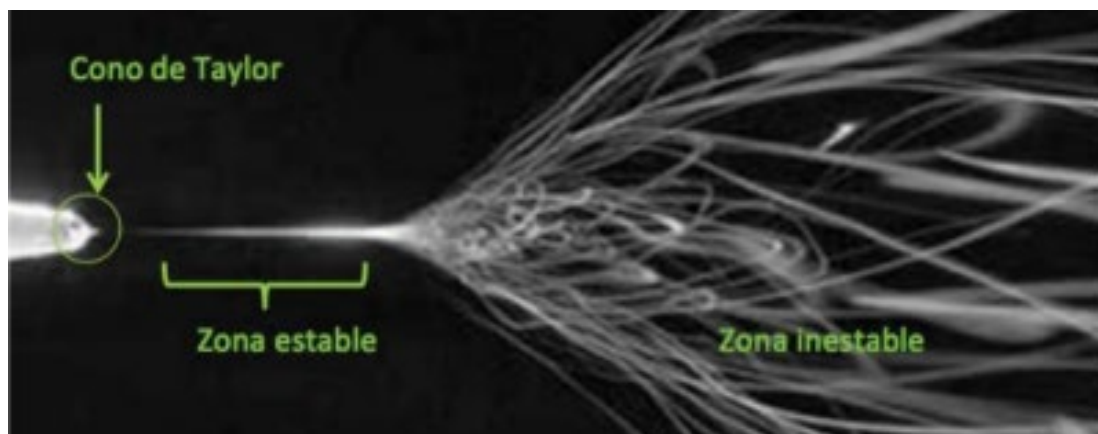


Figura 2-11: Imagen del chorro [25].

A medida que el chorro avanza, el solvente presente en la solución polimérica se evapora, lo que conduce a la solidificación de las fibras antes de su llegada al colector. La morfología de la malla de fibras depositada depende de diversos parámetros del proceso, como la viscosidad del polímero, el voltaje aplicado, la distancia al colector y la velocidad de deposición. Si el colector es estático, las fibras se organizan de manera aleatoria, creando una estructura porosa. En cambio, si el colector es rotatorio o cuenta con control de dirección, es posible obtener fibras alineadas[26].

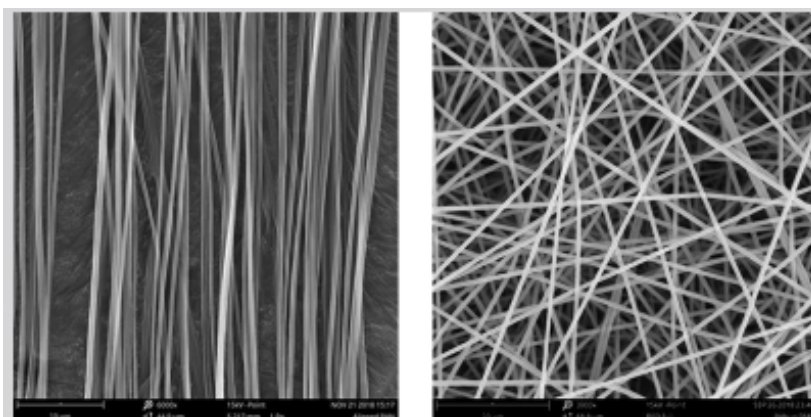


Figura 2-12: Nanofibras simétricas y asimétricas [25].

2.5 Tipos de materiales para *electrospinning*

Para el proceso de electrohilado se utiliza distintos tipos de polímeros como material precursor de la fibra, los cuales deben disolverse en un solvente adecuado según las propiedades específicas de cada material. La elección del solvente no responde únicamente a criterios de facilidad de procesamiento o versatilidad, sino que está determinada por la compatibilidad química con el polímero en cuestión, su capacidad para generar una solución homogénea y su comportamiento durante la evaporación en el proceso de hilado. Cada combinación de polímero y solvente influye directamente en la morfología, el diámetro y las propiedades finales de las fibras obtenidas. Por ejemplo, la policaprolactona (PCL) se disuelve en acetona. Además, se puede utilizar elementos dopantes de las fibras para modificar las propiedades originales. A continuación, se va a proceder a comentar los materiales más utilizados para la fabricación de fibras mediante la técnica de *electrospinning*:

2.5.1 Material base precursor de la fibra

2.5.1.1 Polímeros naturales

Los polímeros naturales se derivan de fuentes biológicas y son altamente biocompatibles, lo que los hace adecuados para aplicaciones biomédicas. Algunos de los más utilizados incluyen:

1. Colágeno (ver Figura 2-13): Componente estructural clave en los tejidos biológicos, ampliamente utilizado en ingeniería de tejidos y regeneración celular[9].

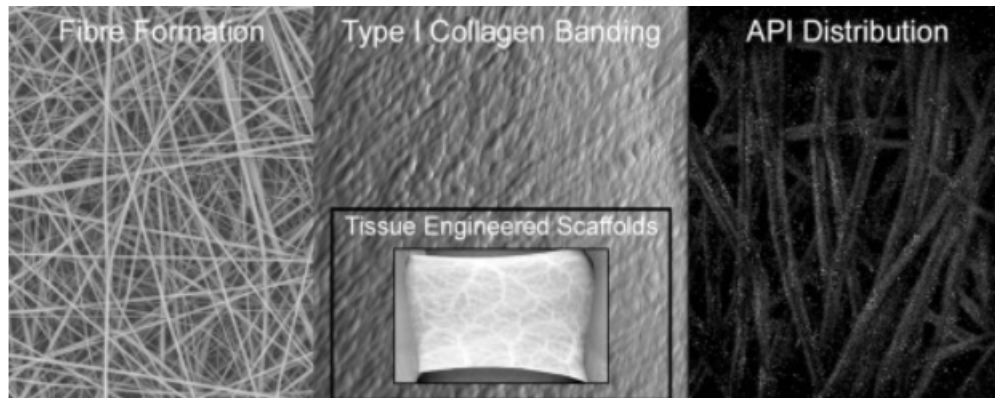


Figura 2-13: Fibras formadas con colágeno [27]

2. Gelatina: Derivado del colágeno con excelente biocompatibilidad, utilizado en aplicaciones médicas y farmacéuticas.
3. Quitosano: Polímero derivado de la quitina, con propiedades antibacterianas y bioactivas, útil en la liberación de fármacos y vendajes[28].
4. Ácido poliláctico (PLA) (ver Figura 2-14) y derivados: Biodegradable y ampliamente utilizado en aplicaciones médicas y ambientales[29].



Figura 2-14: PLA [30].

2.5.1.2 Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son altamente personalizables y permiten el ajuste de propiedades como la porosidad, resistencia mecánica y biodegradabilidad. Entre los más utilizados se encuentran:

1. Policaprolactona (PCL): Biodegradable y con excelentes propiedades mecánicas, empleado en ingeniería de tejidos y recubrimientos[29].
2. Políácido láctico-co-glicólico (PLGA): Biodegradable y biocompatible, usado en la liberación controlada de fármacos.
3. Poliestireno (PS): Ampliamente empleado en la fabricación de membranas para filtración y aislamiento térmico[9].
4. Poliuretanos (PU): Materiales flexibles y resistentes, utilizados en prótesis, dispositivos médicos y aplicaciones. Fue aprobada por la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE.UU. (FDA) en aplicaciones específicas utilizadas en el cuerpo humano[9].
5. Polietileno óxido (PEO) y Polivinilpirrolidona (PVP): Hidrosolubles y utilizados como portadores de fármacos y andamios temporales[29].

2.5.2 Elementos dopantes.

2.5.2.1 Materiales cerámicos y metálicos

Los materiales cerámicos y metálicos se utilizan en *electrospinning* cuando se requiere estabilidad térmica, conductividad eléctrica o resistencia a la corrosión. Estos materiales suelen procesarse mediante *electrospinning* de soluciones precursoras seguidas de calcinación. Ejemplos incluyen:

a) Materiales cerámicos:

1. El dióxido de titanio (TiO_2) es un elemento esencial en la modificación y mejora de las propiedades de las fibras durante su fabricación. por su fotocataliticidad, biocompatibilidad y estabilidad química, con aplicaciones en biomedicina, purificación ambiental, energía y sensores. Se utiliza en vendajes antibacterianos, tratamiento de agua y aire, celdas solares y dispositivos electrónicos, mejorando la eficiencia y funcionalidad de las nanofibras para aplicaciones tecnológicas avanzadas[28].
2. El óxido de zinc (ZnO) desempeña un papel fundamental en *electrospinning* debido a sus propiedades antimicrobianas, fotocatalíticas y semiconductoras, con aplicaciones en biomedicina, purificación ambiental, energía y sensores. [9].
3. El óxido de silicio (SiO_2) juega un rol esencial en *electrospinning* debido a su biocompatibilidad, estabilidad química y propiedades dieléctricas y mecánicas. Se aplica en biomedicina para implantes y sistemas de liberación de fármacos, en electrónica para dispositivos fotónicos y sensores, y en materiales estructurales y catalizadores para recubrimientos protectores y purificación ambiental, contribuyendo al desarrollo de nanofibras multifuncionales para aplicaciones avanzadas[29].

b) Materiales metálicos:

1. Metales nobles como la plata (Ag) y el oro (Au) son materiales dopantes clave en para la fabricación de fibras debido a su conductividad, efecto antimicrobiano y propiedades ópticas y catalíticas, con aplicaciones en biomedicina, sensores, catálisis y nanotecnología. La plata destaca por su acción bactericida y alta conductividad, mientras que el oro es valorado por su biocompatibilidad y uso en biosensores y terapia fototérmica. Su incorporación en nanofibras mejora su rendimiento en medicina, electrónica y purificación ambiental.[31].
2. El óxido de hierro (Fe_2O_3 ,) es un material dopante de gran interés en *electrospinning* debido a su estabilidad química, propiedades magnéticas y actividad catalítica, con aplicaciones en biomedicina, energía, sensores y purificación ambiental. Su capacidad para dirigir fármacos mediante campos magnéticos, mejorar la degradación de contaminantes y optimizar el almacenamiento de energía lo convierte en un dopante clave en el desarrollo de nanofibras funcionales para tecnología avanzada[32].
3. El yodo (I_2), cobre (Cu) y cobalto (Co) son elementos dopantes en *electrospinning* que mejoran las propiedades de las nanofibras en biomedicina, energía, sensores y catálisis. El yodo aporta actividad antimicrobiana y estabilidad química, el cobre mejora la conductividad eléctrica y la acción bactericida, mientras que el cobalto destaca por sus propiedades magnéticas y catalíticas, siendo útil en baterías, biosensores y descontaminación ambiental. Su integración en nanofibras potencia el desarrollo de materiales funcionales para aplicaciones avanzadas [33].

2.6 Campos de aplicación

La técnica de *electrospinning* ha demostrado ser un sistema versátil con aplicaciones en diversos campos gracias a su capacidad de producir fibras a escala nanométrica con propiedades específicas. Obteniéndose así mallas de fibras con propiedades avanzadas. La continua optimización de los parámetros de procesamiento y el desarrollo de nuevos materiales han ampliado significativamente las

posibilidades de esta tecnología, posicionándola como una herramienta clave en la innovación de materiales multifuncionales[28]. Esta tecnología ha sido ampliamente implementada en sectores como la biomedicina, la filtración, la electrónica, la energía y la industria textil, donde las fibras electrohiladas han permitido el desarrollo de productos con características avanzadas (ver Figura 2-15)

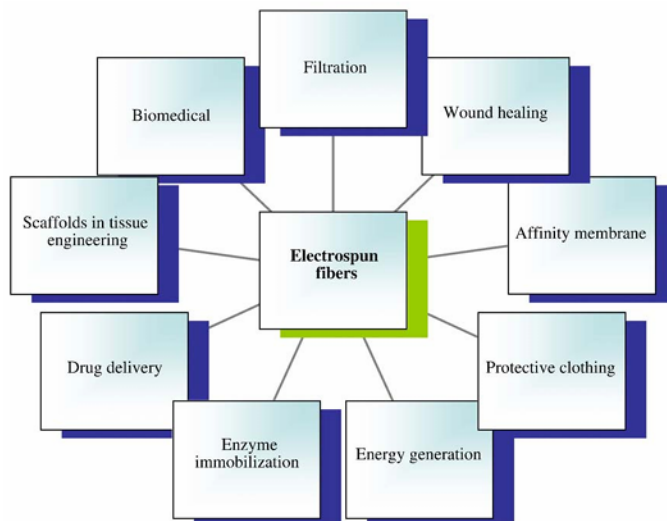


Figura 2-15: Diagrama de aplicaciones del *electrospinning*[34].

A continuación, se presentará los distintos campos en los que se puede utilizar estas fibras tan complejas y con diversas propiedades:

2.6.1 Biomedicina

En el ámbito de la biomedicina, las fibras obtenidas mediante *electrospinning* han sido utilizadas en ingeniería de tejidos, ya que su estructura porosa y su alta relación superficie-volumen facilitan la adhesión y proliferación celular. Esto ha permitido su aplicación en la regeneración de piel, cartílago, hueso y tejidos musculares[29]. (ver Figura 2-16)

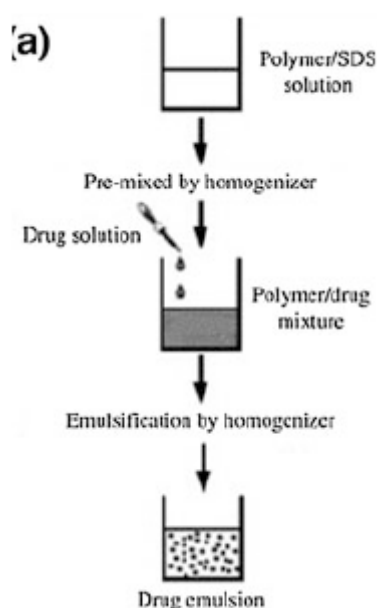


Figura 2-16: Preparación de emulsión de agua y aceite para mejorar la encapsulación y control de liberación del fármaco dentro de la matriz polimérica[35].

Por ejemplo, es muy frecuente el soporte celular en la ingeniería de tejidos. Los llamados scaffolds que permiten controlar y adaptar la anatomía de una estructura en el cual la forma externa del soporte debe ser adecuada a la necesidad del tejido, la nanofibra puede ser inoculada con nutrientes, factores de crecimiento o genes que estimulan la regeneración del tejido[36]. (ver Figura 2-17)

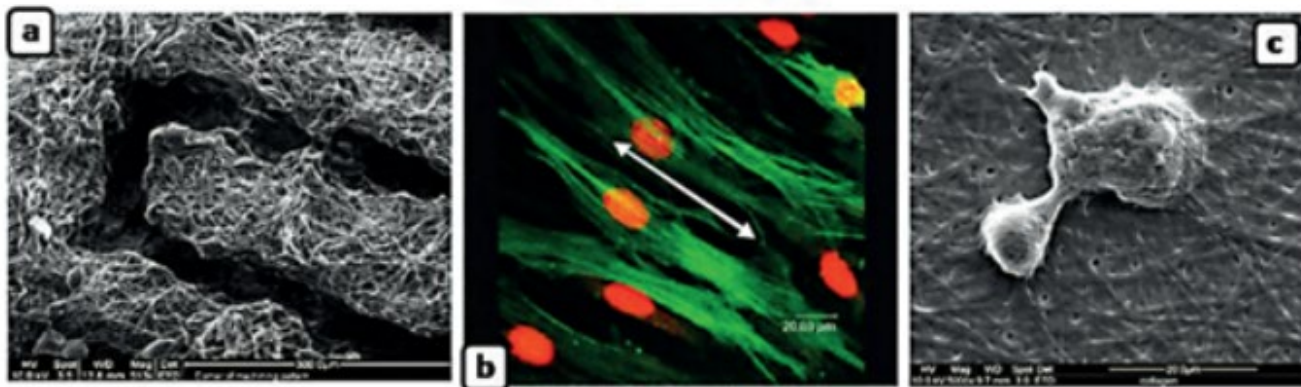


Figura 2-17: Imágenes de soporte de fibras[36].

Asimismo, el *electrospinning* ha sido clave en el diseño de sistemas de liberación controlada de fármacos, donde las fibras electro hiladas actúan como reservorios que permiten una liberación sostenida y localizada de compuestos bioactivos[9]. Otras aplicaciones biomédicas incluyen la fabricación de vendajes avanzados con propiedades antimicrobianas y una alta capacidad de absorción para la cicatrización de heridas, así como el desarrollo de andamios para la regeneración neuronal.

2.6.2 Filtración y purificación

En el sector de la filtración y purificación, las membranas electro hiladas presentan una estructura altamente porosa que les confiere una gran eficiencia en la retención de partículas. Su empleo en filtros de aire ha sido crucial en la eliminación de agentes contaminantes en entornos hospitalarios y en la industria[9]. Por ejemplo, la fabricación de mascarillas (ver Figura 2-18) (FFP2, N95, KN95) con nanofibras de poliamida, PVDF y polímeros cargados electrostáticamente.



Figura 2-18: Mascarilla FFP2 [37]

Además, han sido utilizadas en la filtración de agua para la eliminación de contaminantes, metales pesados y microorganismos[29], así como en la separación de líquidos y gases en la industria química y farmacéutica[28]. (ver Figura 2-19)

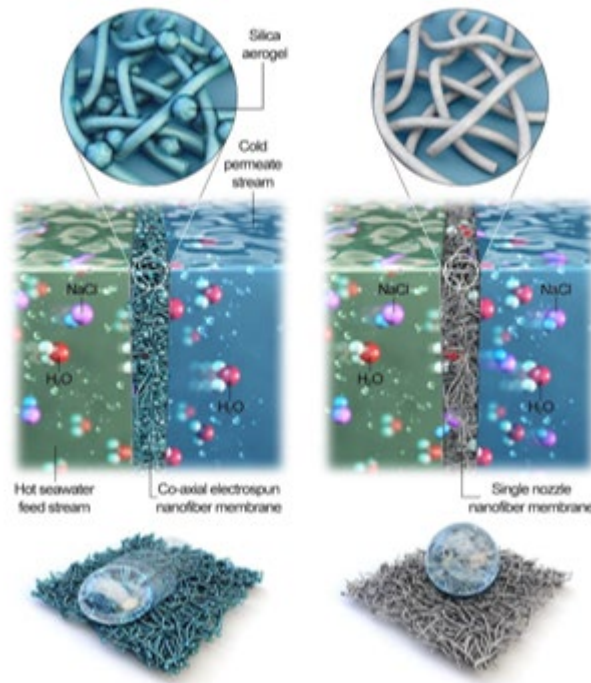


Figura 2-19: Membrana por nanofibrado[38].

2.6.3 Electrónica flexible y sensores.

En el campo de la electrónica flexible y los sensores, la técnica de *electrospinning* ha facilitado la fabricación de materiales conductivos y dispositivos de alta sensibilidad. Se han desarrollado sensores biomédicos basados en fibras electrohiladas funcionalizadas para la detección de biomarcadores en fluidos biológicos. Asimismo, se han producido membranas conductoras para su integración en electrónica flexible, como pantallas táctiles y dispositivos portátiles[9]. (ver Figura 2-20)

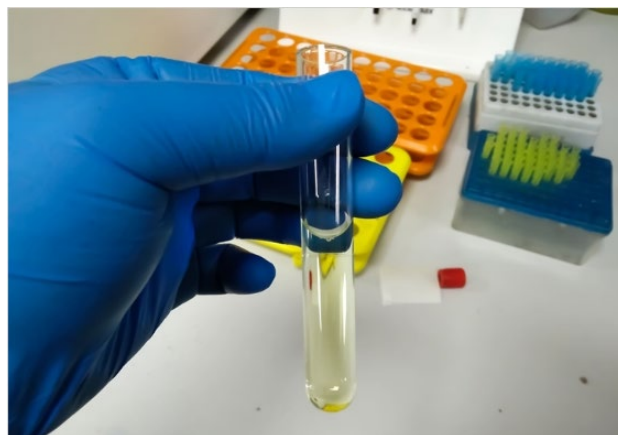


Figura 2-20: la prueba de biomarcador de líquido cefalorraquídeo abre las puertas al diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer en etapa temprana[39]

Otras aplicaciones en esta área incluyen superficies autolimpiantes con propiedades hidrofóbicas y antimicrobianas, diseñadas para su uso en dispositivos electrónicos[28].

2.6.4 Energía y almacenamiento

En el ámbito de la energía y almacenamiento, las fibras electrohiladas han sido empleadas en tecnologías de almacenamiento y conversión de energía. Se han desarrollado electrodos porosos para baterías de iones de litio con alta capacidad de carga y mejor eficiencia ciclable. Además, se han producido membranas conductoras para su aplicación en celdas de combustible, mejorando la eficiencia de conversión energética[9].

2.6.5 Supercondensadores

En el campo de los supercondensadores, los materiales basados en nanofibras han demostrado su eficacia para el almacenamiento rápido de energía y una mayor durabilidad en ciclos de carga y descarga[28].

2.6.6 Industria textil y recubrimientos

En la industria textil y los recubrimientos, el *electrospinning* ha permitido el desarrollo de textiles avanzados con propiedades funcionales mejoradas (ver Figura 2-21). Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran los textiles técnicos con características antibacterianas, hidrofóbicas y de protección contra la radiación ultravioleta[29]. Asimismo, se han implementado recubrimientos funcionales para ropa deportiva con regulación térmica y materiales ignífugos con mayor resistencia al fuego en textiles industriales y de seguridad[9].



Figura 2-21: Compresas más baratas fabricadas por nanofibras y *electrospinning*[40].

2.7 Sistemas de *electrospinning* comerciales.

Existen diferentes configuraciones de *electrospinning* diseñadas para aplicaciones específicas, incluyendo sistemas de laboratorio, equipos de producción industrial y plataformas automatizadas para la fabricación de materiales funcionales. A continuación, se presentan los principales sistemas de *electrospinning* comercialmente disponibles, junto con sus ventajas y limitaciones.

2.7.1 *Electrospinning* de aguja única

Este sistema es el más común en entornos de investigación y desarrollo. Su diseño incluye una jeringa con una aguja metálica como puede ver en la Figura 2-22, conectada a una fuente de alto voltaje, un alimentador de solución polimérica y un colector. Permite un control preciso del flujo del polímero y de los parámetros eléctricos, lo que lo hace ideal para estudios de optimización de fibras. Sin embargo, su baja productividad limita su uso en aplicaciones industriales, ya que solo permite la producción de fibras a baja escala[41].



Figura 2-22: Sistema de aguja única [42]

2.7.2 Electrospinning de agujas múltiples

Para aumentar la tasa de producción de nanofibras, se han desarrollado sistemas de *electrospinning* de agujas múltiples (ver Figura 2-23). En este diseño, varias agujas son dispuestas en paralelo y conectadas a una única fuente de alimentación de voltaje. Este enfoque permite un incremento significativo en la producción de fibras sin comprometer la calidad estructural. Sin embargo, la distribución del campo eléctrico puede verse afectada, lo que puede generar variabilidad en el diámetro de las fibras producidas. Además, la obstrucción de las boquillas debido a la evaporación del solvente es un problema recurrente en este sistema[41].



Figura 2-23: Sistema de *electrospinning* de agujas múltiples [43].

2.7.3 *Electrospinning sin aguja*

El *electrospinning* sin aguja (ver Figura 2-24) es una tecnología emergente que elimina la necesidad de utilizar boquillas individuales para la generación del chorro polimérico. En su lugar, la solución de polímero se distribuye sobre una superficie libre, como un disco rotatorio o un anillo metálico, desde donde múltiples chorros emergen simultáneamente al ser sometidos a un campo eléctrico[41]. Este sistema ofrece una producción masiva de fibras con menor riesgo de obstrucción y mayor uniformidad en la morfología de las fibras. Sin embargo, el control preciso del diámetro y alineación de las fibras sigue siendo un desafío, ya que el número y ubicación de los chorros generados pueden ser difíciles de predecir y estabilizar[10].

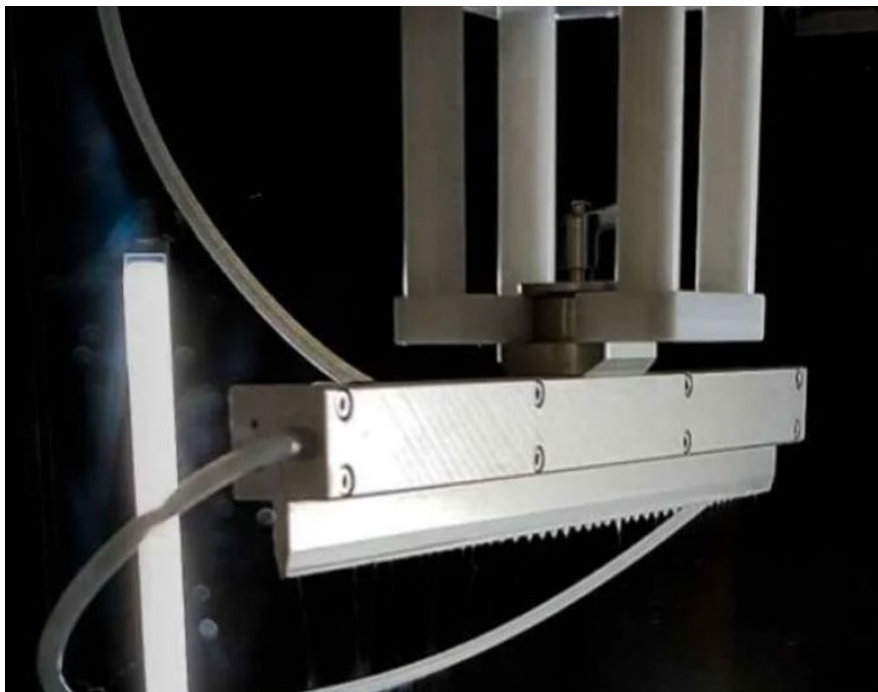


Figura 2-24: Sistema Slit inyector [44]

2.7.4 *Electrospinning coaxial y multicapa*

Los sistemas de *electrospinning* coaxial permiten la fabricación de fibras con estructuras núcleo-corteza mediante el uso de múltiples soluciones poliméricas en un solo proceso. Este diseño es utilizado para encapsular compuestos bioactivos, como fármacos y factores de crecimiento, en el núcleo de la fibra, permitiendo su liberación controlada. También se emplea en la fabricación de materiales funcionales con combinaciones de propiedades mecánicas, eléctricas y biológicas mejoradas. Sin embargo, la complejidad del proceso y la necesidad de controlar simultáneamente múltiples parámetros de viscosidad y conductividad eléctrica pueden dificultar la producción de fibras uniformes y reproducibles a gran escala[41].



Figura 2-25: Sistema coaxial de *electrospinning* [45]

2.7.5 Ventajas y limitaciones de los sistemas de electrohilado comerciales

El desarrollo de sistemas de *electrospinning* comerciales ha permitido la transición de esta tecnología desde entornos de investigación hacia aplicaciones industriales de gran impacto. La optimización de los equipos y la posibilidad de escalar la producción han facilitado la integración de nanofibras en productos innovadores con propiedades avanzadas, ampliando las posibilidades en diversas industrias[16]. Además, estas versiones comerciales están diseñados con medidas de seguridad para proteger al operador, como sistemas de ventilación para manejar solventes volátiles y sistemas de protección contra descargas eléctricas. Por otro lado, ofrecen alta consistencia en la producción de nanofibras, lo que es esencial para aplicaciones industriales y de investigación que requieren resultados consistentes[46].

Sin embargo, la inversión inicial para adquirir estos equipos puede ser de decenas de miles de euros, lo que puede limitar su accesibilidad para laboratorios con presupuestos reducidos (ver Figura 2-26). Y finalmente, debido a su carácter comercial son sistemas cerrados que no permiten realizar modificaciones o adaptaciones específicas.



Figura 2-26: Máquina de *electrospinning* de 4 millones de euros [47]

2.8 Colector de fibras electrohiladas

El colector en el sistema de *electrospinning* es el componente donde se depositan las nanofibras formadas durante el proceso. Su diseño y material influyen significativamente en la morfología, alineación y propiedades de las fibras obtenidas. La elección adecuada del colector es esencial para aplicaciones específicas que requieren características particulares en las nanofibras. El colector proporciona una superficie para la deposición de las nanofibras generadas. Por ello, su diseño puede afectar a la orientación y uniformidad de las fibras.

A continuación, se describirán los distintos tipos de colectores que existen:

2.8.1 Tipos de colectores

2.8.1.1 Colector plano

El colector plano (ver Figura 2-27) consiste típicamente en una placa metálica conductora conectada a tierra donde se depositan las nanofibras electrohiladas. Bajo un campo eléctrico uniforme, el chorro cargado se dirige hacia la placa y forma un manto delgado de fibras. Debido a la naturaleza aleatoria del vuelo del chorro, las fibras se orientan de manera no alineada, formando un material no tejido con fibras dispuestas al azar[48]. Este es el colector más sencillo y común en *electrospinning*.



Figura 2-27: Colector plano [49]

El colector tiene como ventaja que este presenta una configuración simple, económica y fácil de implementar. No tiene partes móviles, lo que simplifica el montaje. Permite obtener mantas uniformes de nanofibras sobre una superficie amplia, adecuadas para producir membranas porosas de gran área. Además, es versátil para diversos polímeros y se puede colocar un sustrato (ej. tela o papel aluminio) sobre la placa para facilitar la recolección de la nanomalla formada[50]. Además, la distribución del campo eléctrico sobre una placa plana tiende a ser homogénea, favoreciendo una deposición relativamente uniforme en espesor.

Sin embargo, la principal limitación es la falta de control sobre la orientación de las fibras. El resultado típico es una alfombra de nanofibras con orientación isotrópica aleatoria[48], sin alineación preferente como se puede observar en la Figura 2-28. Esto implica propiedades mecánicas relativamente isotrópicas y, en algunos casos, menores en ciertas direcciones en comparación con colectores que alinean fibras. Asimismo, un colector plano estándar ofrece poco control sobre la arquitectura fina de la red de fibras, dificultando regular la densidad de fibras o su diámetro a través del colector[51]. Otro inconveniente es que, al acumularse una capa gruesa de fibras sobre la placa, éstas actúan como aislante eléctrico, reduciendo el campo efectivo y dificultando la deposición de capas adicionales (lo que limita el espesor alcanzable de la nanomalla).

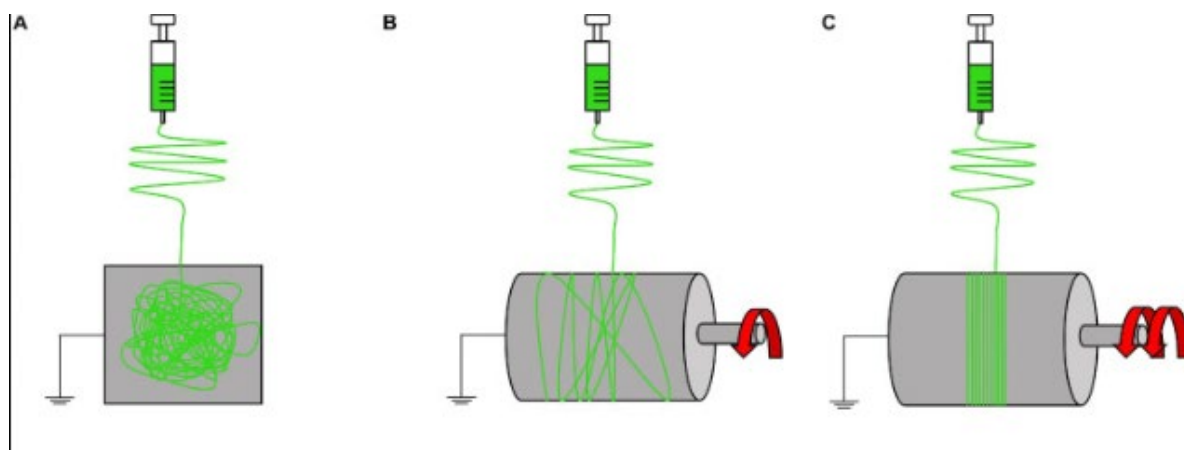


Figura 2-28: (A) Colector plano, (B) y (C) Tambor rotatorio[48]

2.8.1.2 Cilindro rotatorio

Este colector consiste en un tambor o cilindro metálico (ver Figura 2-29) que gira a cierta velocidad mientras recoge las fibras. Al rotar, la superficie del tambor “arrastra” las fibras en una dirección preferente, lo que puede inducir alineación si la velocidad lineal de la superficie es suficientemente alta. En bajas velocidades de rotación, el comportamiento es similar al de la placa plana (las fibras se depositan sin orden). Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad periférica del tambor, las fibras tienden a orientarse en la dirección de giro. En particular, existe un umbral de velocidad a partir del cual las fibras empiezan a alinearse uniaxialmente a lo largo de la circunferencia del tambor. Estudios reportan que por encima de aproximadamente 8 m/s de velocidad tangencial, se logra una orientación altamente anisotrópica de las nanofibras en el sentido del giro (fibra casi paralela entre sí). En la práctica, el grado de alineación mejora cuanto mayor es la velocidad, hasta un límite donde el chorro puede volverse inestable o la fibra romperse por exceso de estiramiento[52].



Figura 2-29: Cilindro rotatorio [53]

El tambor rotatorio agrega un control mecánico ausente en la placa estática. Su ventaja principal frente al colector plano es la capacidad de producir fibras alineadas en una dirección, lo que otorga propiedades anisotrópicas deseables en muchos casos. A diferencia de la distribución aleatoria sobre placa, un tambor a alta velocidad produce un tejido uniaxial (todas las fibras aproximadamente paralelas). Además, permite recoger nanofibras en forma de cinta continua enrollada alrededor del tambor, facilitando la obtención de muestras largas o incluso procesos continuo tipo rollo-a-rollo. Sin embargo, a bajas velocidades no ofrece beneficios claros respecto al plano, y a velocidades extremas

puede haber limitaciones (ej. alineación incompleta en los bordes del tambor o acumulación desigual). En términos de uniformidad de espesor, ambos (plano y tambor) pueden dar deposiciones homogéneas, aunque en el tambor la fibra tiende a distribuirse más hacia los extremos si no está bien centrado el chorro[48].

2.8.1.3 Colectores con patrones

En lugar de una superficie continua, estos colectores presentan geometrías definidas (patrones) como mallas, rejillas, ranuras o texturas, que modifican el campo eléctrico local y por tanto la forma en que se depositan las fibras. La geometría del colector influye directamente en la estructura de las nanofibras obtenidas[54]. Por ejemplo, usando una rejilla metálica (malla de alambre) como colector, las fibras tienden a depositarse preferencialmente sobre los hilos de la rejilla (donde el campo es más intenso) y a alinearse a lo largo de éstos. Esto produce un patrón de fibras que refleja la geometría de la malla: zonas con alta densidad de fibra sobre los filamentos conductores y espacios entre ellos prácticamente libres de fibras. En otras palabras, el diseño del colector “imprime” su topografía en la nanoestructura del manto fibroso.

Es decir, si el colector tiene relieves o formas, las fibras pueden estirarse o orientarse siguiendo esas características. Superficies con micro-texturas (estrias o ranuras) pueden guiar la deposición; por ejemplo, relieves lineales actúan casi como “raíles” electrostáticos donde las fibras se alinean paralelamente. En el caso de colectores con patrón de rejilla, las aperturas y barras de la rejilla generan un campo no uniforme: los bordes de las barras atraen más fibra, pudiendo formarse haces de fibras a lo largo de cada barra. Incluso es posible que las fibras se tensen abarcando los huecos si dos elementos del patrón están próximos, creando fibras estiradas de un punto a otro (similar al concepto de colector en brecha). En general, patrones periódicos en el colector inducen estructuras periódicas en la malla fibrosa resultante. Asimismo, usando electrodos con formas específicas (p.ej. puntos o agujas cargadas dispuestas en cierta configuración), se pueden lograr deposiciones de fibras en sitios predeterminados. Un estudio mostró cómo una matriz de agujas cargadas en el colector produce regiones de alta densidad de fibra correspondiendo a cada aguja, con escasa fibra en las zonas aislantes intermedias. Por tanto, ajustando la geometría colectora es posible obtener desde fibras alineadas unidireccionalmente hasta patrones más complejos (rejillas, cruces, etc.) de nanofibras.

2.8.1.4 Cilindro perforado o recubierto con electrodos

Este tipo de colector es una variación del tambor rotatorio, diseñado para mejorar la orientación y distribución de las fibras mediante modificaciones en el propio cilindro. Existen dos enfoques principales: (a) usar un tambor perforado o compuesto por secciones huecas (p. ej. un cilindro formado por barras o una malla cilíndrica) (ver Figura 2-30), y (b) incorporar electrodos adicionales (o segmentos con distinto potencial) en la superficie del cilindro. Ambos métodos tienen como fin moldear el campo eléctrico alrededor del tambor para guiar mejor la deposición de fibras.



Figura 2-30: Cilindro formado por barras[55]

En un cilindro perforado (por ejemplo, un tambor hecho de varios alambres paralelos formando un “jaula” cilíndrica), las fibras pueden depositarse atravesando los huecos y quedando soportadas por las barras del tambor. Este diseño reduce la interrupción del campo eléctrico por parte de fibras ya depositadas (ya que muchas fibras quedan suspendidas en los espacios abiertos), permitiendo seguir atrayendo nuevas fibras de manera más uniforme. Un caso documentado es el de un tambor construido con alambres de cobre paralelos separados aproximadamente 0.8 cm entre sí, rotando para recoger nanofibras. En este sistema, las fibras se depositaron formando una especie de vaina o manto alrededor del armazón de alambre, con las fibras alineadas perpendicularmente al eje del cilindro. El espacio entre barras permitió recoger fibras más largas de lo habitual, superando la limitación de longitud cuando se usa un colector sólido (donde las fibras muy largas podrían quebrarse). De hecho, la rotación continua de este tambor de alambre logró haces continuos de nanofibras alineadas en la dirección circunferencial, venciendo la tendencia a obtener solo fragmentos cortos de fibras (del orden de milímetros) en colectores convencionales[28]. No obstante, se observó que en este diseño podían presentarse dificultades para separar las fibras individuales, ya que tienden a agregarse en un haz cohesionado debido a la alineación extrema.

En cuanto a los tambores recubiertos con electrodos, se trata de añadir elementos conductores cargados al cilindro para influir en el campo eléctrico local. Por ejemplo, se ha utilizado un electrodo con forma de aguja o pincha insertado coaxialmente en un mandril rotatorio: la aguja cargada (p. ej. con carga negativa) crea un intenso campo adicional en el interior del tambor que atrae las fibras hacia sí, logrando una mejor alineación sobre la superficie del cilindro. Zhu et al. demostraron que al colocar un pincho afilado cargado dentro de un cilindro rotatorio, las nanofibras de gelatina se alineaban más uniformemente a lo largo del tambor, gracias al campo focalizado del pincho que estiraba las fibras antes de depositarlas. Este enfoque es relativamente simple y mejoró notablemente la orientación de las fibras sin requerir velocidades de rotación extremas[28].

Otro ejemplo es el uso de bordes afilados (knife-edge) a lo largo del tambor: Yang et al. emplearon cuchillas cargadas junto a un tubo rotatorio aislante, manteniendo un campo eléctrico en las proximidades de la superficie del tambor a medida que se depositaban capas de fibra. Esto permitió depositar capas más gruesas de nanofibras alineadas sin que la primera capa apantallara el campo, obteniendo mallas ordenadas de varias capas con distintas orientaciones controladas inclinando la aguja o los electrodos. En resumen, incorporar electrodos adicionales (ya sea internos o externos al tambor) ayuda a mantener y moldear el campo eléctrico durante el proceso, superando problemas como la dispersión del chorro o la pérdida de alineación en capas gruesas[28].

3 REQUISITOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE *ELECTROSPINNING*

3.1 Introducción

En la Figura 3-1 se muestra el esquema conceptual de los elementos básicos del sistema de electrohilado desarrollado en este TFG.

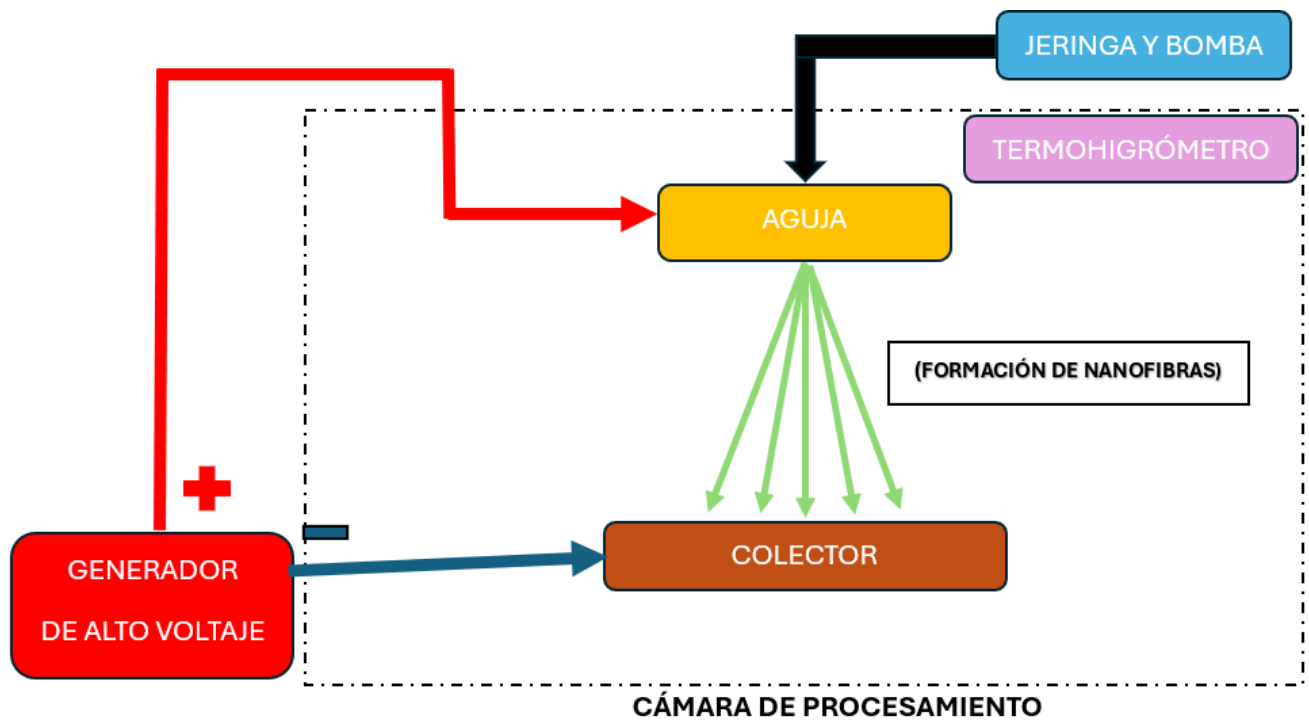


Figura 3-1: Diagrama de bloques general de un sistema de *electrospinning*

Los componentes principales del sistema experimental del sistema de *electrospinning* son los siguientes:

1. Bomba de infusión. Se trata del sistema que permite la inyección del material precursor de las fibras con un alto grado de precisión.
2. Jeringa. Es el depósito que almacena el material precursor y controla con precisión la cantidad inyectada.
3. Aguja y tubo de conexión. Constituyen el electrodo que facilita la conducción y distribución del material precursor.

4. Generador de alto voltaje. Es la fuente de alta tensión que suministra la energía necesaria para el proceso.
5. Colector. Es el contraelectrodo que cierra el circuito eléctrico y estabiliza la operación.
6. Cámara de procesamiento. Espacio controlado donde se lleva a cabo la formación de fibras bajo condiciones específicas.
7. Termohigrómetro. Dispositivo que mide y controla la temperatura y humedad durante el proceso.

Para el desarrollo de este TFG se ha partido del sistema de *electrospinning* actualmente disponible en el laboratorio, sobre el cual se va a pensar el nuevo diseño para mejorar y extremar sus capacidades. A continuación se comentan brevemente los elementos de dicho sistema que se puede observar en la Figura 3-2:

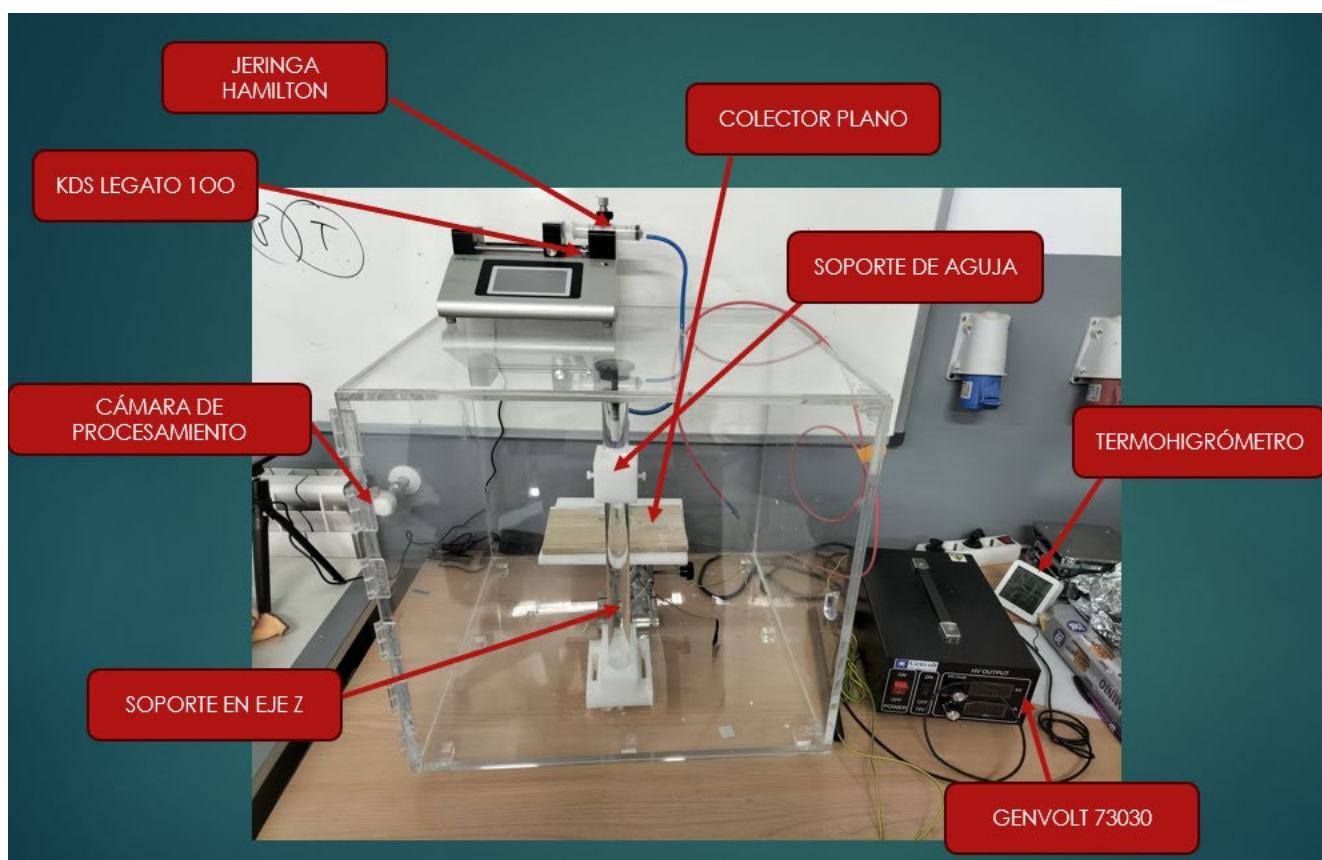


Figura 3-2: Sistema experimental de *electrospinning* en los laboratorios de investigación del CUD financiado a través de los Proyectos Propios de Investigación del CUD-ENM (PICUD 2022-08)

3.1.1 KDS Legato 100

Se dispone de una bomba de jeringa de la serie KDS Legato 100 (ver Figura 3-3), la cual opera mediante un émbolo que impulsa la solución polimérica contenida en una jeringa. Este sistema es programable y ofrece un caudal de bombeo ajustable en el rango de 0,1 a 426.000 $\mu\text{l/h}$.



Figura 3-3: KDS Legato 100 [56]

3.1.2 Jeringa Hamilton®

Se dispone de una jeringa Hamilton® de la serie 1000 GASTIGHT® (ver Figura 3-4) con punta cónica de 10 ml con un rango de bombeo de 0,1-125ml/h.

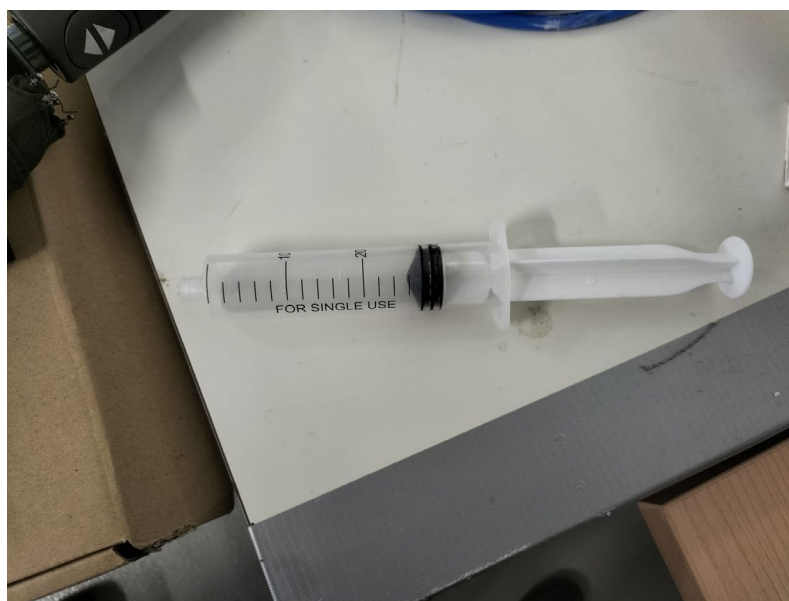


Figura 3-4: Jeringa utilizado en el laboratorio

3.1.3 Aguja y tubo de conexión

Se dispone de una aguja conectada a un tubo de conexión hecha de teflón situadas ambas dentro de la caja de metacrilato y conectadas a la jeringa Hamilton. La aguja es el componente encargado de suministrar la solución polimérica al campo eléctrico generado actuando así como el punto de salida del chorro de solución polimérica.

3.1.4 Generador de alto voltaje Genvolt 73030

El Genvolt 73030 (ver Figura 3-5) se emplea como fuente de alto voltaje en el proceso de *electrospinning* en el laboratorio de investigación del CUD por su capacidad para generar un campo eléctrico constante y ajustable, requisito indispensable para la formación controlada de nanofibras. Este generador permite alcanzar tensiones de hasta 30 kV, con una salida regulable que se adapta a diferentes

configuraciones experimentales según el polímero, la viscosidad de la solución o la distancia de trabajo entre la aguja y el colector.



Figura 3-5: Generador de alto voltaje Genvolt 73030 [57]

3.1.5 Colector plano

La recolección de las fibras generadas durante el proceso de electrohilado se hace actualmente por medio de una lámina de papel de aluminio colector que se coloca sobre una superficie plana de teflón que actúa como soporte, una configuración sencilla pero eficaz que permite obtener depósitos uniformes. El papel de aluminio, actúa como conductor, conectándose a tierra de la fuente de alta tensión. Esta conexión es esencial para establecer el campo eléctrico entre la aguja y el colector, guiando así el recorrido del chorro polimérico hasta su deposición final. (ver Figura 3-6)



Figura 3-6: Contraelectrodo con papel de aluminio

3.1.6 Cámara de procesamiento

La cámara donde se aloja todo el sistema de electrohilado (ver Figura 3-7) ha sido concebida no solo como un contenedor funcional, sino como una barrera de protección imprescindible frente a los riesgos asociados al uso de altos voltajes. Está formada por seis planchas de metacrilato, cortadas a medida y

ensambladas con precisión, de modo que encajan entre sí con solidez y sin dejar espacio a fugas ni inestabilidades.. La cámara da la posibilidad de ver todo el proceso desde fuera al ser transparente. Las dimensiones de cada placa son de 520x498x10 mm exceptuando la puerta de 518x468x10 mm.

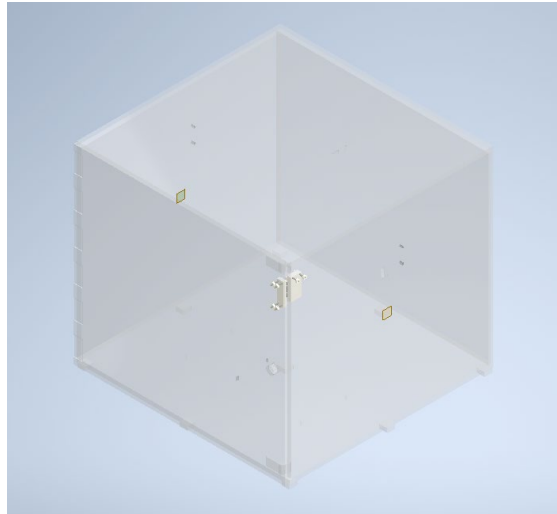


Figura 3-7: Cámara de procesamiento de metacrilato del laboratorio de investigación del CUD

3.1.7 Deslizador en el eje Z

El ajuste de la altura de la aguja (ver Figura 3-8) se realiza mediante un sistema diseñado con sencillez, pero bien resuelto en su funcionalidad. En el centro del conjunto, un cilindro de metacrilato actúa como deslizador vertical, permitiendo regular la posición con precisión. Este elemento se encuentra encajado en ambos extremos: en la parte superior, se apoya sobre un pie de PVC que proporciona estabilidad y firmeza a toda la estructura; mientras que en la base, un soporte fabricado en teflón actúa como contrapeso y anclaje, asegurando que el cilindro se mantenga erguido y estable durante el proceso. Esta disposición permite manipular con soltura la altura de la aguja sin comprometer el equilibrio del sistema.



Figura 3-8: Deslizador en el eje Z

3.1.8 Soporte de la aguja

La aguja se sostiene mediante un soporte cuidadosamente acoplado al cilindro deslizador del eje Z (ver Figura 3-9), que actúa como guía vertical en el sistema. Este soporte envuelve el cilindro con firmeza y está provisto de un saliente de metacrilato, discretamente encajado en su interior, que funciona como base para alojar la aguja. Es sobre este pequeño anclaje donde la aguja reposa, bien sujeta pero accesible, lista para iniciar el proceso de electrohilado con precisión y estabilidad. La disposición, aunque simple en apariencia, responde a una lógica funcional pensada para facilitar los ajustes sin perder rigidez estructural.

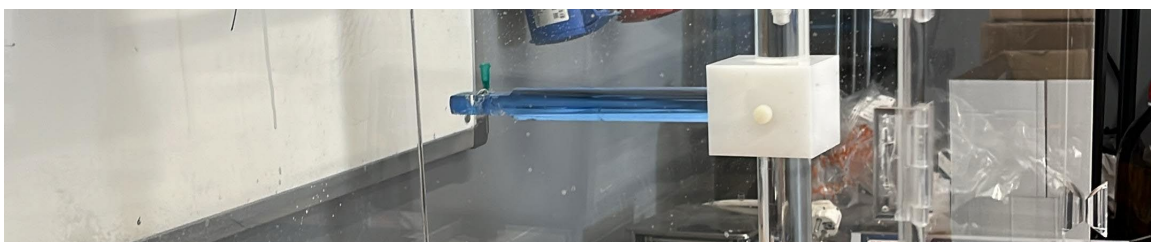


Figura 3-9: Soporte de la aguja

3.2 Condiciones de diseño.

Las condiciones de diseño del nuevo sistema experimental son las siguientes:

1. Incorporar un sistema que sea económico, de bajo coste, de mantenimiento sencillo, versátil y sencillo de operar.
1. Diseñar un sistema que permita recoger fibras de manera continua.
2. Incorporar un sistema de seguridad para garantizar la seguridad de los operarios.
3. Un sistema que el montaje y desmontaje de los distintos componentes del sistema pueda realizarse de forma ágil y sin complicaciones.
4. Adaptar el sistema para que permita la doble inyección de materiales con dos electrodos.

4 DESARROLLO

4.1 Diseño del sistema de fabricación de fibras

En las próximas líneas se detalla el sistema desarrollado como se puede ver en la Figura 4-1 específicamente para dar respuesta a los objetivos planteados en este trabajo. Más que una simple descripción técnica, se trata de desentrañar la lógica detrás de cada decisión de diseño, entendiendo cómo cada componente, cada ajuste y cada elección de material contribuyen a la finalidad del proyecto:

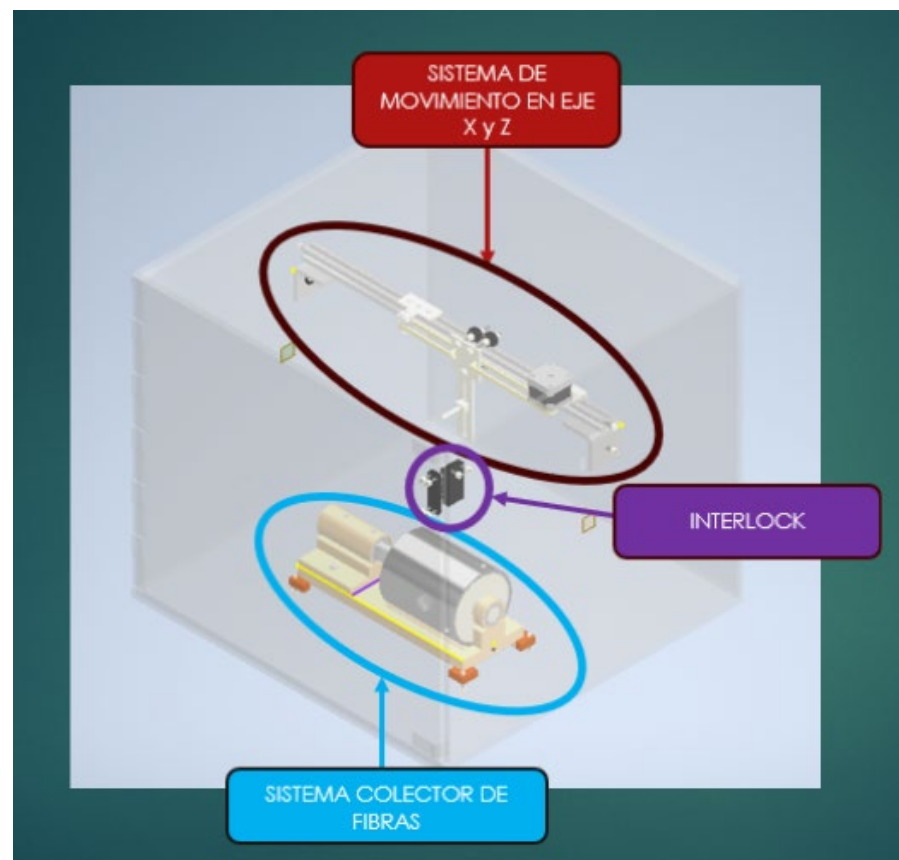


Figura 4-1: Esquema del ensamblaje de Autocad Inventor del sistema de *electrospinning*

Seguidamente, el sistema diseñado se compone de dos subsistemas principales. El primero de ellos es el sistema colector de fibras que permite el fibrado continuo y un segundo subsistema que permite el posicionamiento de precisión (horizontal y vertical) del electrodo.

4.1.1 Sistema colector de fibras

El sistema colector de fibras (véase la Figura 4-2), que tiene como función principal la recolección continua de las fibras producidas durante el proceso, se compone de TRES grandes bloques; motor, Cilindro rotatorio, soporte.

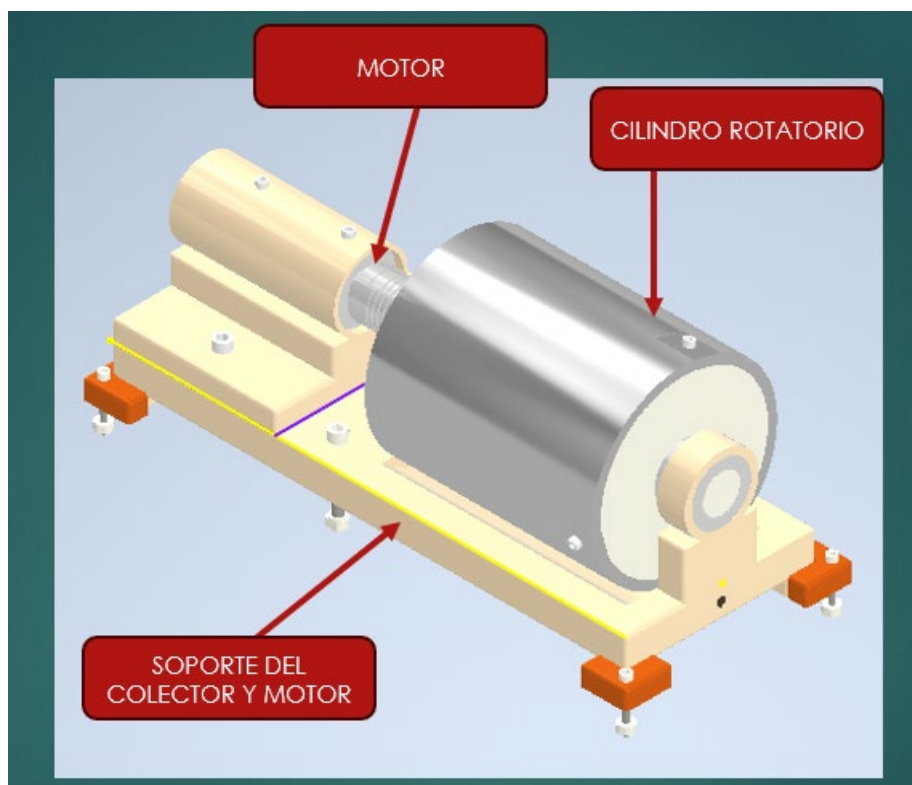


Figura 4-2: Esquema de Inventor Autocad del sistema colector de fibras

4.1.1.1 Cilindro rotatorio. Colector

El diseño de este colector ha sido cuidadosamente pensado para asegurar una deposición uniforme y constante de nanofibras, evitando la formación de acumulaciones irregulares que podrían comprometer la calidad del material final. No se trata solo de recoger fibras, sino de hacerlo de manera eficiente, garantizando una distribución equilibrada a lo largo de toda la superficie de recolección.

Uno de los aspectos determinantes en el diseño del colector es, sin duda, el material del cilindro, que en este caso se ha fabricado en aluminio. Esta elección no es casual ni meramente estructural: responde a una combinación de razones técnicas que van más allá de su ligereza o resistencia mecánica.

El aluminio, al ser altamente conductor, desempeña un papel fundamental en el comportamiento del campo eléctrico que se genera durante el proceso de electrohilado. Su capacidad para mantener una distribución eléctrica uniforme en la superficie del colector es esencial para que las fibras, cargadas eléctricamente, se depositen de forma controlada y constante.

Como se puede observar en la Figura 4-3 el cilindro se compone del cuerpo principal, un acople en la cara posterior, un eje con su acoplamiento y el motor.

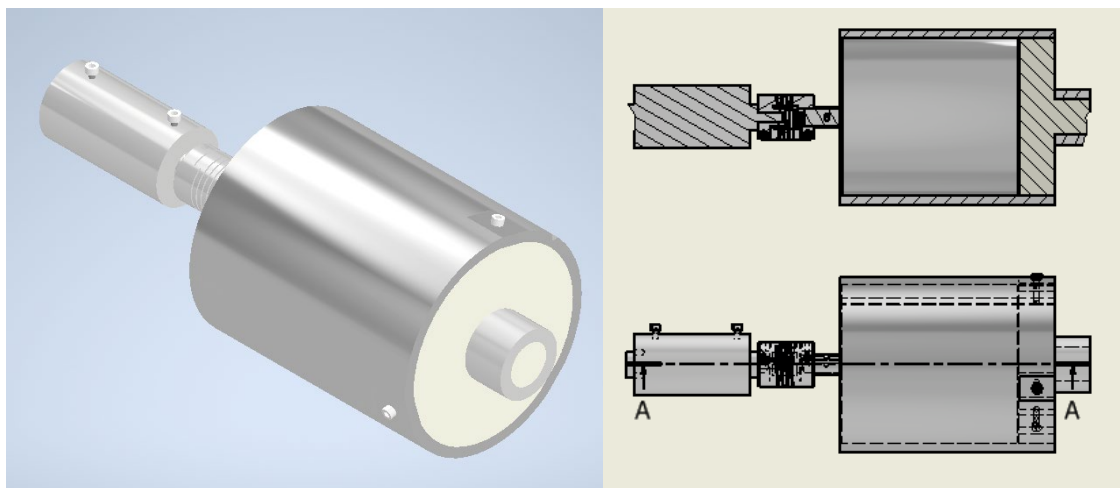


Figura 4-3: Vista del ensamblaje completo del cilindro rotatorio

En la Figura 4-4 se puede observar cómo se ha optado por un cilindro con un diámetro exterior de 10 cm, lo cual permite su fácil instalación dentro de la cámara de procesamiento y permite tener una superficie de recogida de fibras acorde a las necesidades de uso del sistema. Se consigue así una disminución de la acumulación localizada de las fibras y favorece la continuidad del proceso. Además, este tamaño permite alcanzar una velocidad tangencial óptima, facilitando cierto grado de alineación en las fibras. Por el contrario, reducir el diámetro por debajo de los 7 cm [58] podría dificultar esa alineación y generar depósitos menos homogéneos. Por otro lado, optar por un tamaño mayor, por encima de los 15 cm, implicaría un incremento significativo en la inercia rotacional, lo que haría más difícil regular la velocidad de giro y exigiría un motor de mayor potencia.

Además, se ha decidido que el colector sea un cilindro hueco, con un diámetro interior de 9 cm. Este diseño responde a una necesidad clave: reducir el peso total sin comprometer la estabilidad estructural. Un cilindro sólido habría supuesto una carga innecesaria sobre el sistema, mientras que un espesor de pared de 5 mm proporciona la rigidez necesaria para evitar deformaciones sin incrementar de manera innecesaria la inercia del sistema. Este equilibrio entre resistencia y ligereza es crucial para mantener un rendimiento óptimo sin exigir un esfuerzo excesivo del motor.

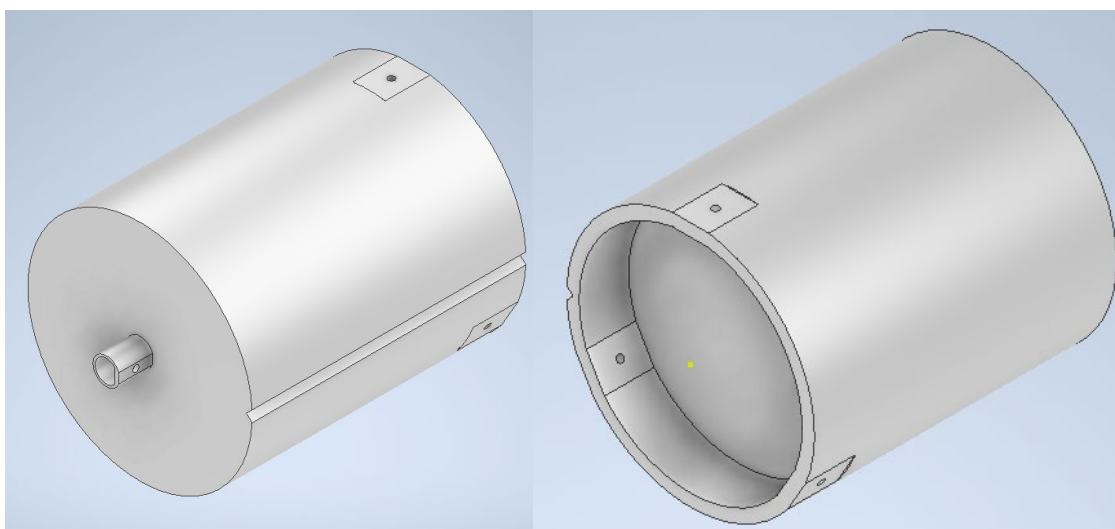


Figura 4-4: Cuerpo principal del cilindro rotatorio

La longitud total del cilindro es de 12,2 cm lo cual permite tener un área de deposición suficiente sin volver el sistema innecesariamente voluminoso. Asegura una distribución controlada de las fibras en el eje longitudinal y facilita la integración con los mecanismos de soporte y sujeción. Además, la decisión

ha estado condicionada por el espacio disponible dentro de la caja protectora del sistema, lo que ha determinado el límite físico del diseño.

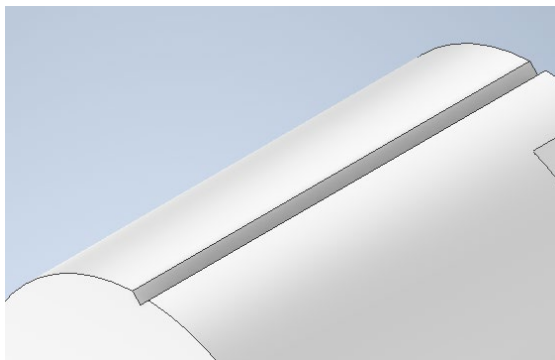


Figura 4-5: Ranura del cilindro colector

Por otro lado, se ha incorporado una ranura longitudinal como se puede observar en la Figura 4-5 a lo largo de toda la superficie del cilindro, con una profundidad de 2,55 mm, diseñada con una doble función clave dentro del sistema.

Por un lado, esta ranura facilita la extracción de la tela de nanofibras una vez finalizado el proceso de electrohilado. Su diseño permite introducir con precisión un cuchillo, navaja o cualquier herramienta afilada, lo que posibilita el desprendimiento del material depositado sin comprometer su integridad ni dañar la superficie del cilindro. Esto agiliza la recolección de la membrana sin necesidad de aplicar una fuerza excesiva, asegurando que el proceso se mantenga eficiente y práctico.

Además de su función para la recolección de fibras, la ranura también sirve como referencia visual para la medición de las revoluciones por minuto del cilindro. Al utilizar sensores ópticos o estroboscópicos, esta marca longitudinal permite monitorizar la velocidad de rotación con precisión, optimizando el control del sistema y asegurando que el proceso de electrohilado se desarrolle bajo condiciones consistentes y predecibles.

En una de las caras del cilindro, se ha incorporado un saliente de 5 mm de diámetro (ver Figura 4-6), el cual sirve como zona de acople con el eje que transmite la fuerza generada por el motor. Para garantizar un acople seguro y evitar deslizamientos, este saliente cuenta con un perno de seguridad, que mantiene fijo el eje y evita cualquier desplazamiento axial durante la rotación.

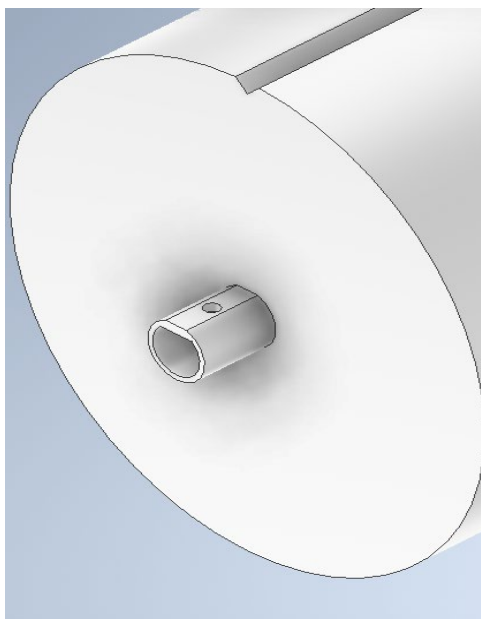


Figura 4-6: Entrada para eje rotatorio

Se ha diseñado un eje transmisor (Figura 4-7) de 1 cm de diámetro y 2 cm de longitud, fabricado en resina acetálica (POM, polioximetileno). Por un lado, este material se ha seleccionado debido a que así evitamos interferencias con el electrodo y así evitando la mala deposición de las fibras. Además, su baja fricción, alta resistencia mecánica y excelente estabilidad dimensional, lo que lo hace ideal para componentes sometidos a esfuerzos mecánicos continuos. Además, su resistencia a la humedad y la abrasión garantiza un rendimiento duradero sin necesidad de lubricación adicional. Este eje transmisor va acoplado por un lado al eje rotatorio y por otro al acoplamiento rígido del eje del motor, asegurando así la correcta alineación del sistema y evitando que el giro tenga excentricidades que puedan afectar a la deposición de las fibras.

En la Figura 4-8 se puede observar el ensamblaje completo del sistema transmisor de giro del colector.

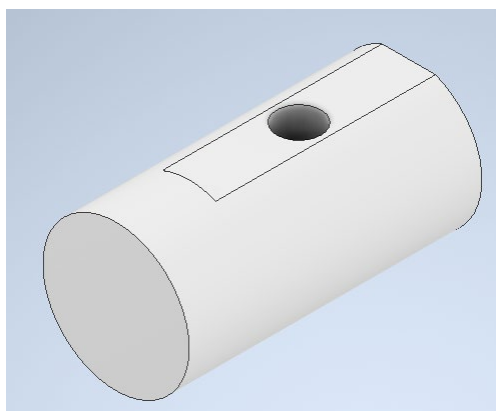


Figura 4-7: Eje transmisor

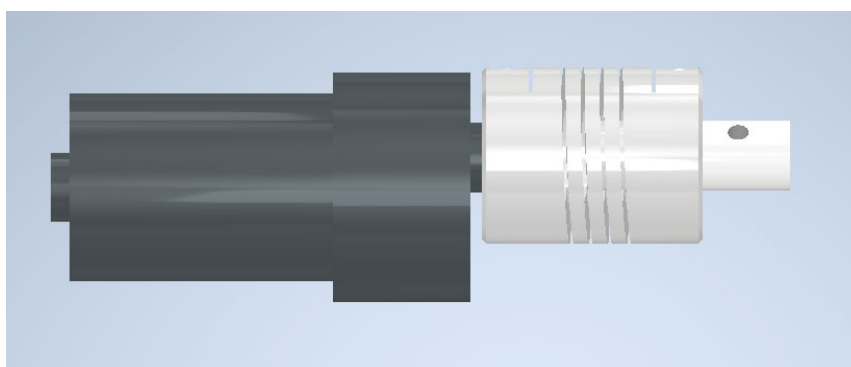


Figura 4-8: Ensamblaje del transmisor de giro

Para poner en marcha el giro del cilindro colector, se ha optado por un motorreductor de corriente continua de 24 V (ver Figura 4-9) concretamente el modelo RS PRO. Este equipo ofrece una velocidad sin carga de 190 revoluciones por minuto y un par máximo de 0,6 Nm, características que lo hacen especialmente adecuado para este tipo de aplicaciones. Su comportamiento estable y progresivo permite mantener un movimiento rotatorio uniforme. Gracias a su configuración, no ha sido necesario incorporar sistemas de reducción adicionales, lo que simplifica el diseño general del sistema y reduce posibles fuentes de error mecánico.

El control de velocidad se realiza mediante un sistema de modulación por ancho de pulso (PWM), lo que permite ajustar de forma precisa la rotación del cilindro según las exigencias del proceso. Y además se puede integrar fácilmente en cualquier sistema de control juntas, como plataforma Arduino o ESP3R.



Figura 4-9: Motorreductor DC RS PRO [59]

Para alimentar este motorreductor se ha elegido una fuente de alimentación conmutada RS PRO (ver Figura 4-10), con salida de 24 V y hasta 4,5 A, lo que supone una potencia total de 108 W. Esta fuente ha sido diseñada para entornos industriales exigentes, y destaca por su estabilidad de salida, eficiencia energética y sistema de protección interna frente a sobrecargas, sobretensiones y cortocircuitos.



Figura 4-10: Fuente de alimentación conmutada MEAN WELL[60]

Además, en el otro extremo del cilindro, se ha diseñado un sistema de fijación (ver Figura 4-11) que permite la conexión con un soporte externo, asegurando la estabilidad del sistema sin afectar el giro. Para ello, se ha integrado un orificio central de 2 cm de diámetro, que se extiende hasta alcanzar el diámetro interno de 9 cm del cilindro hueco. Este orificio está diseñado para alojar una pieza acoplada fabricada en politetrafluoroetileno (PTFE), un material elegido por su baja fricción y alta resistencia al desgaste, lo que evita la degradación del cilindro de aluminio. Además, al ser un material eléctricamente no conductor, el PTFE no interfiere con la formación del campo eléctrico en el proceso de *electrospinning*, permitiendo una deposición de fibras libre de alteraciones. La pieza acoplada tiene un diámetro exterior de 9 cm y una longitud de 2 cm, asegurando un encaje preciso dentro del cilindro. Para garantizar su fijación durante la rotación, se han incorporado tres pernos dispuestos equidistantemente alrededor del cilindro. Esta configuración distribuye uniformemente la fuerza de sujeción, eliminando cualquier posibilidad de desajustes o vibraciones no deseadas que puedan comprometer la precisión del giro.

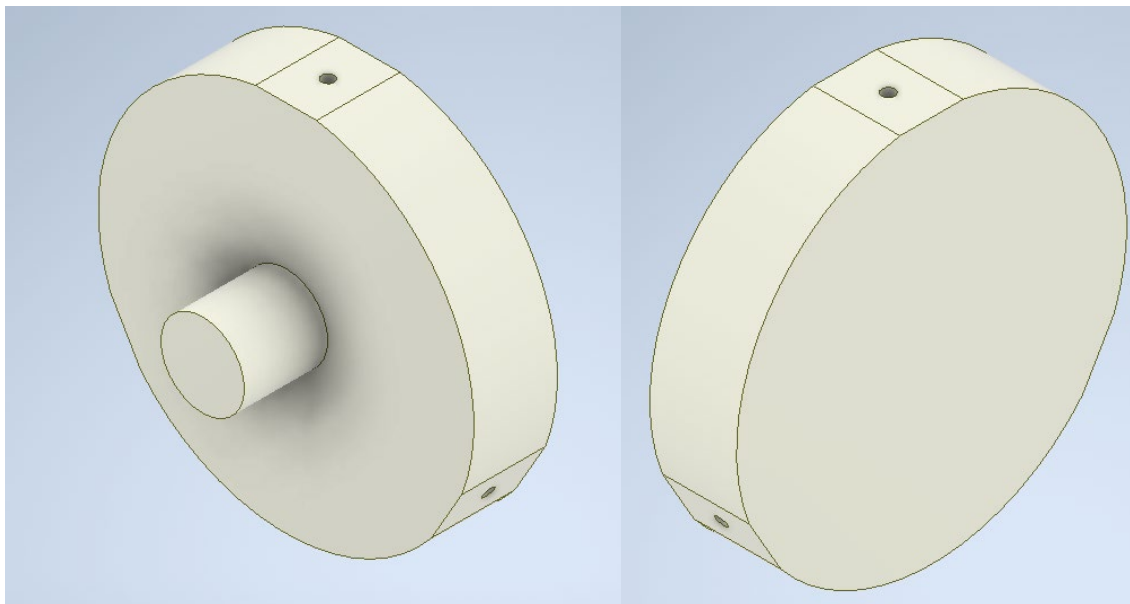


Figura 4-11: Acople del cilindro

Para asegurar el giro suave y estable del cilindro, se ha incorporado un rodamiento de bolas RS PRO 6804-2RS, montado alrededor del eje de acople. Este rodamiento, de tipo rígido de una hilera y con un diámetro interior de 20 mm, ha sido seleccionado por su perfil compacto, su capacidad para soportar cargas radiales moderadas, y su diseño sellado a ambos lados, lo que evita la entrada de polvo o residuos generados durante el proceso. Gracias a estas características, cumple una doble función: garantiza la alineación precisa del eje y permite un movimiento fluido y continuo del cilindro, sin añadir fricción innecesaria ni requerir mantenimiento frecuente. Su integración en el sistema responde tanto a criterios de fiabilidad mecánica como de durabilidad en condiciones de uso prolongado.

4.1.1.2 Soporte del colector y motor

Para garantizar una base sólida y confiable para el cilindro rotatorio, el soporte (ver Figura 4-12) ha sido diseñado con una estructura robusta, elevada 2,5 cm del suelo. para permitir una mejor integración con el sistema y evita interferencias que pudieran comprometer el funcionamiento del conjunto. Se ha optado por realizar el soporte de polietileno, ya que es un material que combina rigidez estructural con propiedades aislantes, evitando cualquier alteración en el campo eléctrico que rige el proceso de *electrospinning*. El diseño del soporte se compone de dos secciones diferenciadas, cada una con un propósito claro. La primera, más amplia, actúa como la base principal donde descansa el cilindro, asegurando su estabilidad sin necesidad de contacto directo con la superficie. La segunda, más compacta y ubicada en un nivel superior, está destinada a la fijación del motor, el cual se acopla mediante dos tornillos de teflón de métrica 5. Además, en esa zona se aloja la estructura que funciona como contraelectrodo del sistema de *electrospinning*, y que se comenta con más detalle a continuación

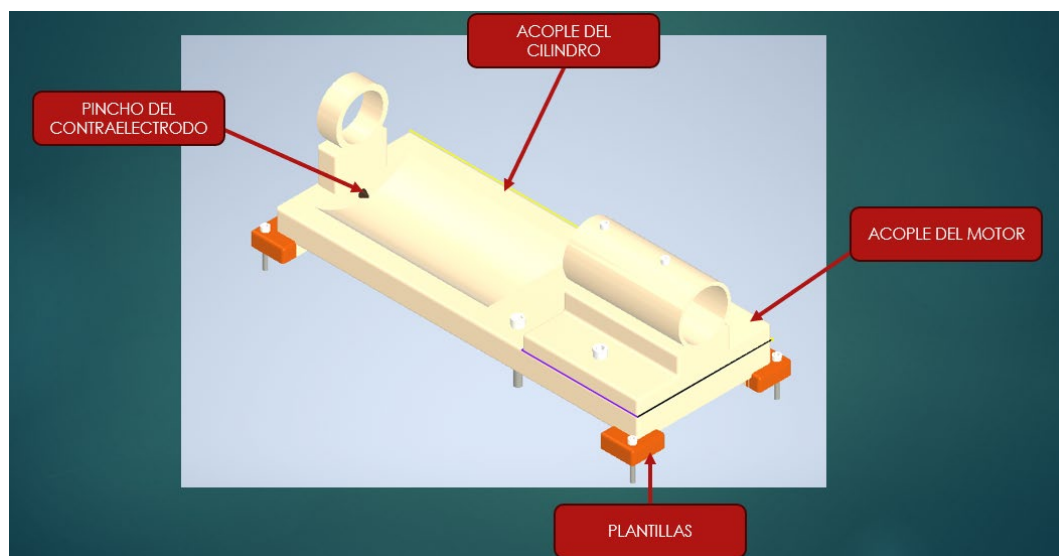


Figura 4-12: Esquema del soporte del colector

En el núcleo del soporte, una cavidad mecanizada reproduce con precisión la forma del cilindro, permitiendo que este encaje con total naturalidad. Esto permite que el giro ocurra con total libertad, sin generar fricción innecesaria ni restringir su movimiento. Justo en la base, se ha integrado un orificio circular de 3,2 cm de diámetro, donde encaja el rodamiento diseñado para estabilizar el extremo del cilindro. Este rodamiento no solo reduce la fricción, sino que también absorbe posibles vibraciones, permitiendo una rotación fluida y sin desviaciones que pudieran comprometer la uniformidad del proceso. Destacar que el soporte irá atornillado a la base de la cámara de procesamiento para aumentar su estabilidad.

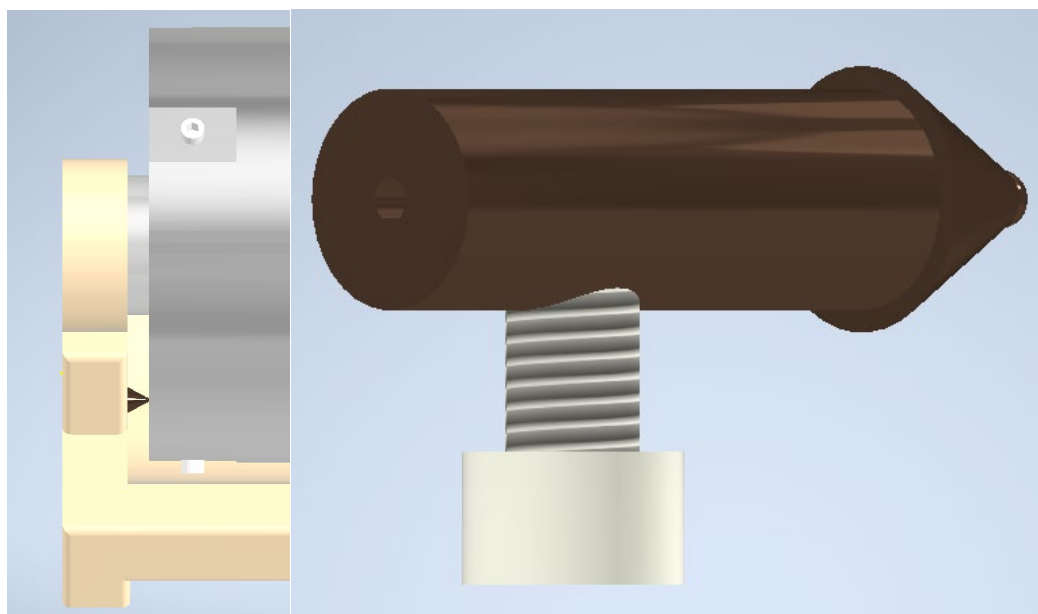


Figura 4-13: Imagen detallada del punta de cobre

Uno de los aspectos más críticos del diseño es la incorporación de un orificio en uno de los extremos del soporte, pensado para alojar una punta de cobre (ver Figura 4-13) conectada a la toma de tierra de la fuente de alto voltaje. Su función es hacer contacto con el borde del cilindro y establecer, en combinación con el electrodo, el campo eléctrico de alta intensidad necesario para la deposición controlada de las fibras. La disposición de este contraelectrodo ha sido establecida de tal forma que se minimicen las posibles interferencias que se pudieran dar, garantizando la correcta deposición de fibras en el colector

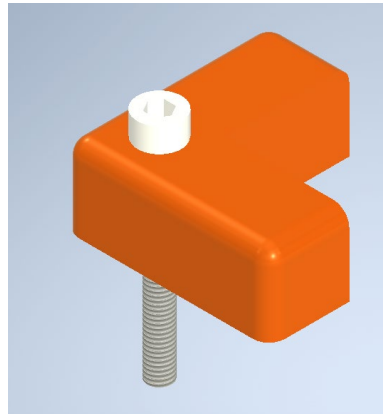


Figura 4-14: Patas de metacrilato de color naranja claro

Además, en la base se han instalado cuatro posicionadores de metacrilato atornilladas (ver Figura 4-14), cuya finalidad es simplificar el montaje y desmontaje del sistema dentro de la caja protectora. Estas guías no solo aseguran que el soporte se alinee siempre en la posición exacta, sino que también permiten una instalación ágil y sin complicaciones, algo esencial en un equipo que debe mantenerse accesible para ajustes o mantenimiento.

4.1.2 Sistema de posicionamiento del electrodo

A continuación se procederá a describir el diseño del soporte incorporado en la cámara de procesamiento para el movimiento vertical y horizontal de la aguja (que actúa como electrodo) según los ejes X y Z como se puede observar en la Figura 4-15:

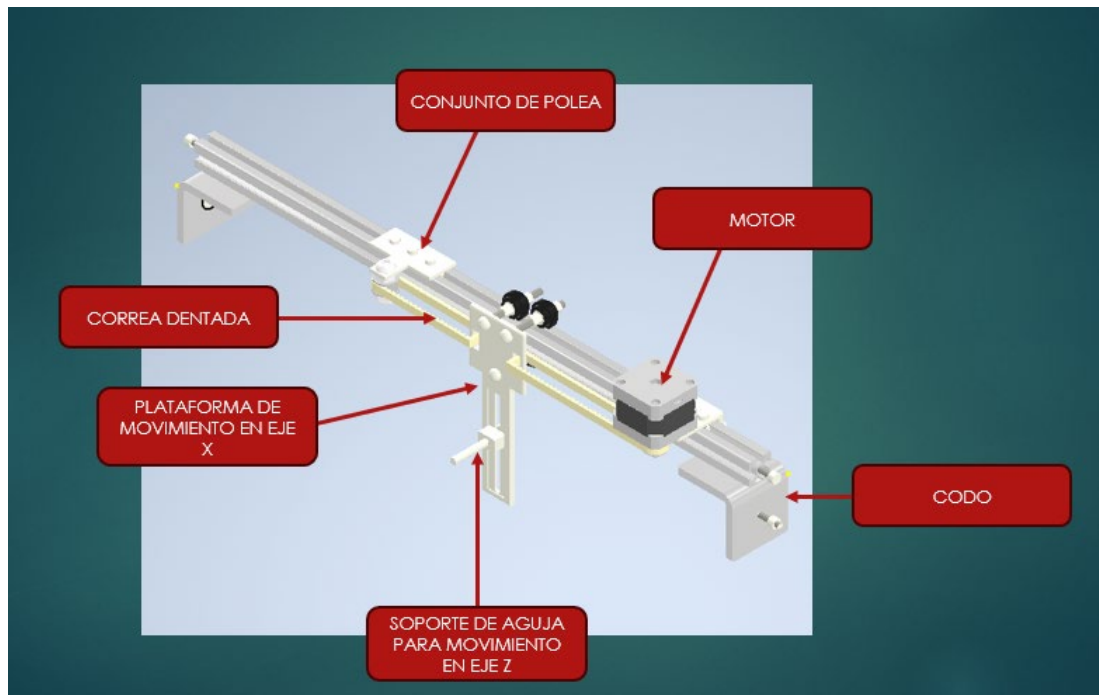


Figura 4-15: Esquema del sistema de movimiento de la aguja en el eje X y Z

4.1.2.1 Sistema de posicionamiento horizontal del electrodo

Para garantizar una deposición uniforme de fibras sobre el colector, se ha diseñado un sistema de movimiento lineal que permite desplazar la aguja de *electrospinning* con precisión. Para ello, se ha montado un perfil ITEM 5 20x20 cm de aluminio (ver Figura 4-16), fijado en ambos extremos mediante codos y tornillos, asegurando una estructura estable y resistente a vibraciones.

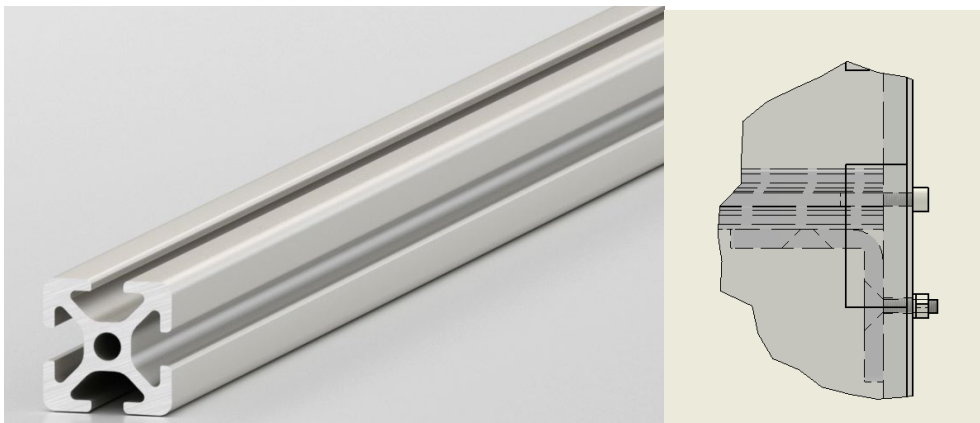


Figura 4-16: Perfil Item y corte a sección a zona de soporte

A lo largo del perfil ITEM de aluminio se fijarán, mediante tornillería, dos plataformas planas enfrentadas, que actuarán como soporte del sistema de tracción. En una de ellas irá montado un motor paso a paso NEMA 17, robusto y preciso, encargado de generar el movimiento. En el extremo opuesto, sobre la segunda plataforma, se instalará una polea dentada, alineada cuidadosamente con el eje del motor. Ambas piezas quedarán unidas mediante una correa de transmisión, que al tensarse, permitirá trasladar el movimiento giratorio del motor a lo largo del eje X, asegurando desplazamientos suaves y controlados sobre el sistema. (ver Figura 4-17)

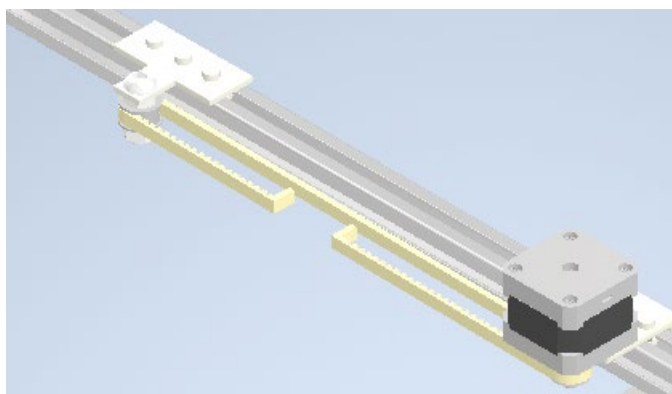


Figura 4-17: Conjunto del sistema para el movimiento en el eje X

El motor paso a paso NEMA 17 (modelo 103H7123-0440), mostrado en la Figura 4-18, ofrece un equilibrio adecuado entre tamaño compacto y capacidad de respuesta. Con un par nominal de 1,26 Nm, proporciona un movimiento estable y preciso, ideal para el desplazamiento controlado de la aguja dentro del sistema. Su funcionamiento en modo paso a paso permite variar la velocidad sin comprometer la exactitud, y su nivel de torque resulta suficiente para mantener un barrido fluido en condiciones de carga moderada.

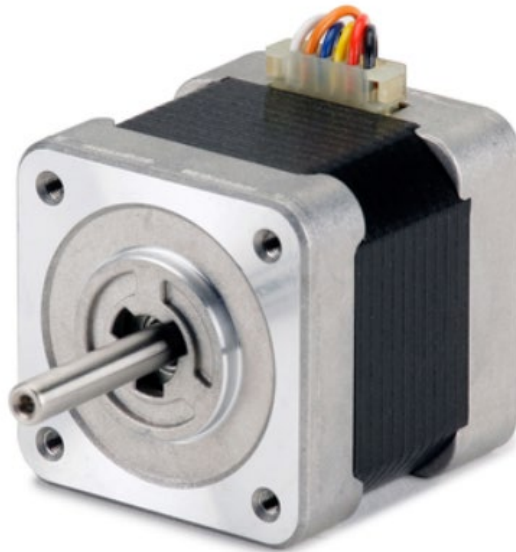


Figura 4-18: Motor paso a paso NEMA 17 [61]

4.1.2.2 Sistema de posicionamiento vertical del electrodo

El movimiento en el eje vertical Z se verá guiado por una placa deslizante fabricada de teflón, la cual se desplaza a lo largo del perfil gracias a un sistema de dos ruedas guía montadas en su parte superior y una en su parte inferior[62]. El mecanismo se basa en un sistema sencillo pero efectivo: ruedas fijadas mediante una arandela a cada lado, aseguradas con una tuerca que mantiene las piezas firmemente en su lugar. Para evitar que el tornillo se desplace o gire libremente, se ha fijado directamente a la placa utilizando el mismo principio: arandela y tuerca bien ajustadas, creando así un punto de anclaje sólido que garantiza la estabilidad del conjunto durante el movimiento. Y este diseño permite que el movimiento sea suave y preciso, evitando desalineaciones o bloqueos. La placa se encuentra acoplada a una corredera dentada accionada por un motor paso a paso, lo que facilita el control del desplazamiento con alta precisión. (ver Figura 4-19)

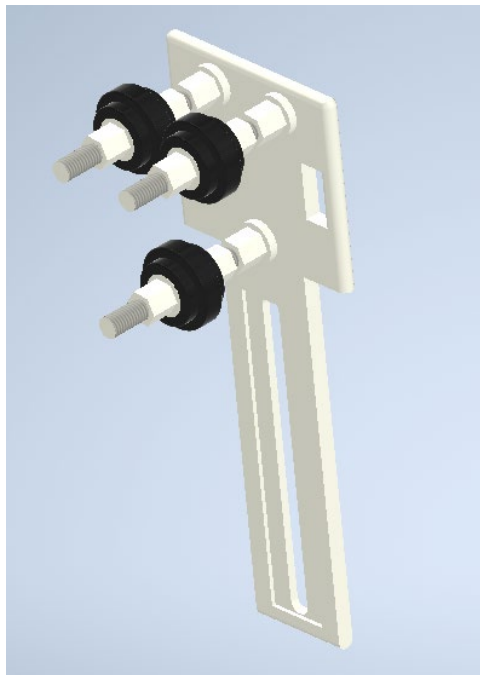


Figura 4-19: Plataforma de sujeción del soporte de la aguja con ensamblado de ruedas

Sobre la placa de guiado se encuentra un soporte de aguja (ver Figura 4-20) que se puede ajustar su altura en función de la deseada. Este sistema es variable con un apriete (ver Figura 4-21) en su extremo que lo presiona para que no se desestabilice la aguja.

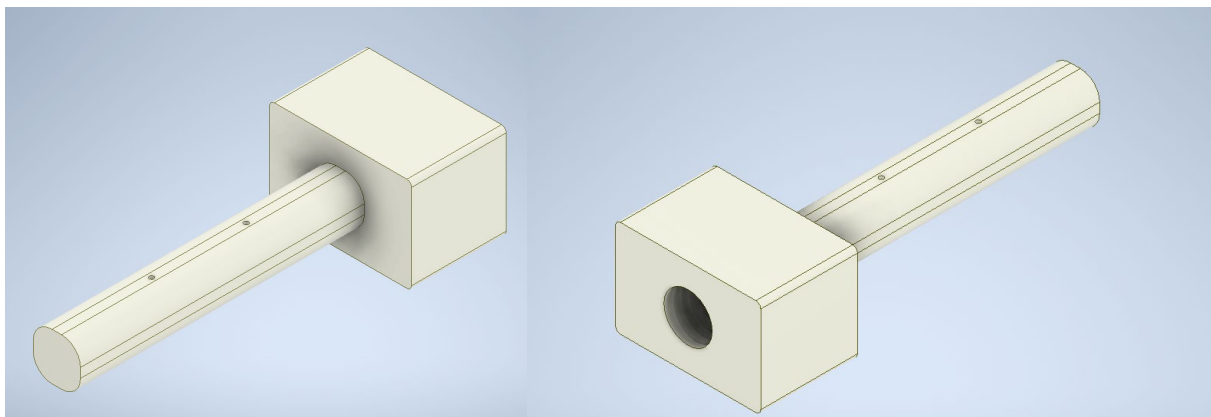


Figura 4-20: Soporte de aguja

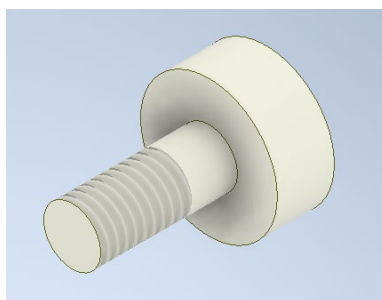


Figura 4-21: Ajustador del soporte

4.1.3 Interlock

Con el objetivo de reforzar la seguridad durante el funcionamiento del sistema de *electrospinning*, se ha incorporado un interlock (ver Figura 4-22), un mecanismo pensado para limitar al máximo cualquier exposición accidental del operario al interior de la cámara de procesamiento mientras está operativa la alta tensión. Este sistema de protección se ha resuelto a través de un diseño sencillo pero eficaz: unas carcasas de plástico alojan en su interior dos piezas metálicas de acero, encargadas de cerrar el circuito y permitir la conducción del voltaje únicamente cuando las condiciones son seguras.

Una de estas unidades ha sido firmemente atornillada a la pared lateral derecha del equipo, mientras que la otra se ha fijado en la puerta de la cámara de procesamiento. Este sistema se lleva a la salida de interlock del panel trasero de la fuente de alto voltaje. De este modo, el sistema se interrumpe automáticamente si la puerta se abre, evitando así cualquier contacto accidental con elementos sometidos a alto voltaje. Esta solución, más allá de su funcionalidad técnica, refleja una preocupación clara por preservar la integridad del usuario sin comprometer la operatividad del conjunto.

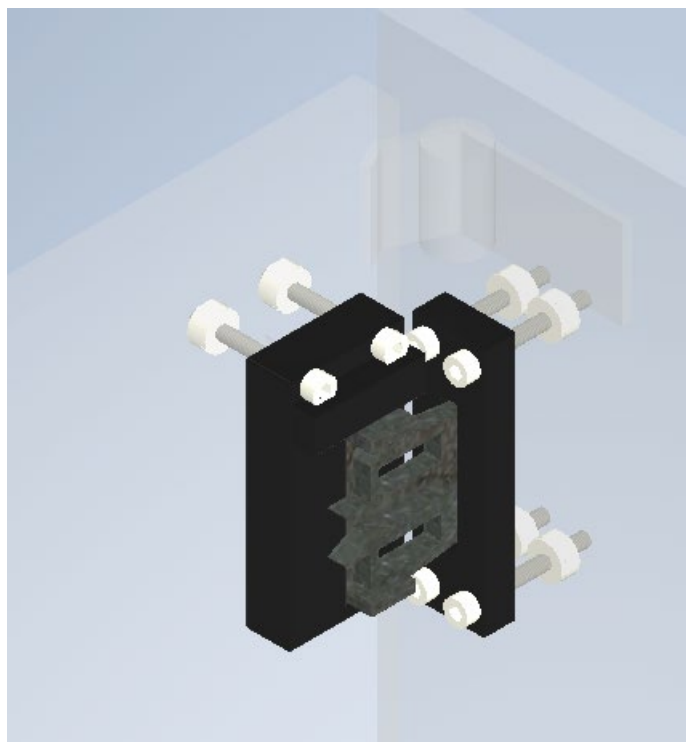


Figura 4-22: Sistema de Interlock

4.2 Análisis de tensiones

A lo largo del desarrollo del proyecto, se tomó la decisión de realizar un análisis de tensiones utilizando el software Autodesk Inventor, centrando la atención en aquellos puntos que, por su función estructural, podrían presentar mayor debilidad. El primer foco de estudio fueron los dos orificios situados en la cámara de procesamiento, ya que actúan como anclajes principales del sistema de movimiento tanto en el eje horizontal como en el vertical, soportando buena parte de las cargas dinámicas. El segundo análisis se llevó a cabo sobre el perfil de aluminio tipo ITEM, pieza clave que sustenta el conjunto completo, y cuya integridad es esencial para garantizar la estabilidad y fiabilidad del sistema. Esta doble aproximación permitió anticipar posibles fallos mecánicos y optimizar el diseño en zonas críticas.

4.2.1 Cámara de procesamiento

En esta simulación, se aplicaron cargas verticales equivalentes a 3,4937 N, el peso de los componentes que se acoplan al sistema, concentradas en los puntos de fijación principales que son los dos agujeros en las paredes de laterales y un momento de 12,478 Nm en ambos lado afectando la cara interior de la pared.

La mostrada Figura 4-23 corresponde al mapa de tensiones de Von Mises, un criterio ampliamente utilizado para predecir la posible aparición de fallos por deformación plástica en materiales dúctiles. En ambas vistas, se aprecia que las tensiones máximas alcanzadas se sitúan en torno a 32,06 MPa, concentradas en la zona de unión de los refuerzos laterales. Dado que el material de la cámara es PMMA (polimetilmetacrilato), con un límite elástico de 48,9 MPa, se puede concluir que el diseño trabaja dentro de los márgenes de seguridad aceptables, sin riesgo aparente de rotura o deformación permanente bajo las condiciones simuladas. Este análisis valida la resistencia mecánica del diseño para soportar el peso y las fuerzas asociadas al funcionamiento continuo del sistema de electrohilado. Aun así, podría contemplarse una futura optimización geométrica en las zonas donde se concentra la carga para incrementar el margen de seguridad, especialmente si se incrementa el peso de los componentes o las condiciones de trabajo se vuelven más exigentes.

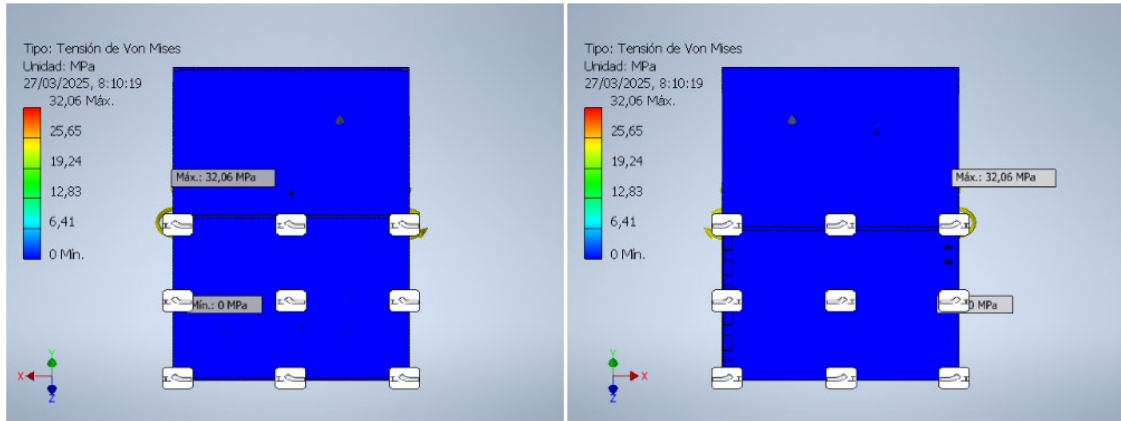


Figura 4-23: Análisis de tensiones de Von Mises de la cámara de procesamiento

Además del análisis de tensiones, se ha evaluado la respuesta estructural en términos de desplazamiento ante la aplicación de las cargas previstas. Este tipo de análisis permite conocer cómo se deforma la estructura en cada eje, incluso cuando las tensiones se mantienen dentro de los márgenes elásticos del material.

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos para los desplazamientos en las direcciones X, Y y Z. Todos los valores están expresados en milímetros:

- En el eje X, el desplazamiento máximo registrado es de $4,122 \times 10^{-3}$ mm, una magnitud prácticamente despreciable desde el punto de vista funcional. (ver Figura 4-24)

Desplazamiento X

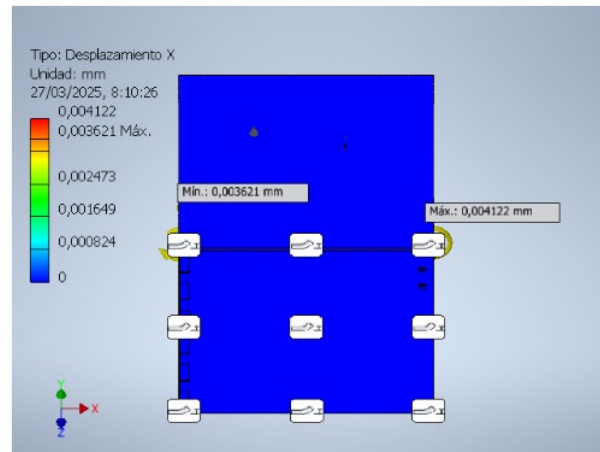


Figura 4-24: Desplazamiento en el eje X

- En el eje Y, que representa la componente vertical del sistema, se observó una ligera mayor deformación, con un máximo de $15,53 \times 10^{-3}$ mm, siendo aún muy por debajo de cualquier valor preocupante. (ver Figura 4-25)

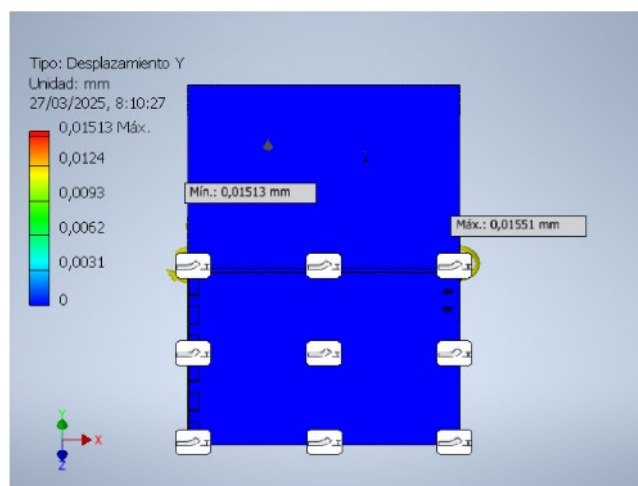


Figura 4-25: Desplazamiento en el eje Y

- En el eje Z, el desplazamiento máximo fue de $18,43 \times 10^{-3}$ mm, siendo este el valor más alto de los tres, pero igualmente insignificante en términos estructurales. (ver Figura 4-26)

Desplazamiento Z

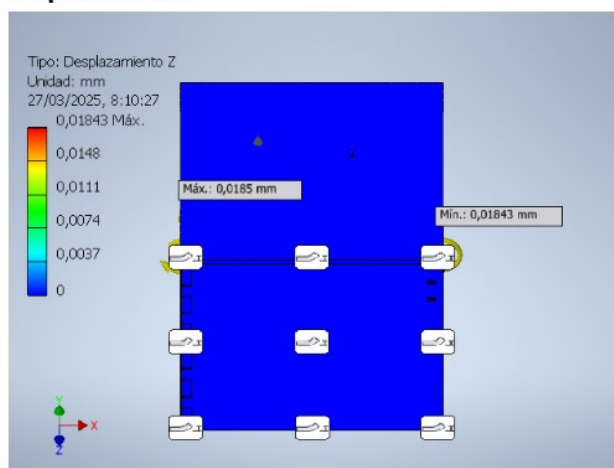


Figura 4-26: Desplazamiento en el eje Z

Estos desplazamientos mínimos indican que la caja de metacrilato mantiene su rigidez incluso bajo carga, y que la deformación elástica se distribuye uniformemente a lo largo de las superficies de fijación. Además, el hecho de que las deformaciones no superen las décimas de milímetro permite garantizar que el funcionamiento del sistema no se ve comprometido en ningún momento, ni en la trayectoria de los componentes móviles ni en la precisión de la deposición de fibras.

4.2.2 Perfil ITEM

A continuación en esta simulación para completar la validación estructural del sistema, se realizó un análisis independiente del perfil ITEM, que actúa como soporte principal del conjunto de movimiento en el eje X. Esta pieza es crítica, ya que soporta tanto el peso del sistema como los esfuerzos transmitidos durante el desplazamiento de la aguja.

En la simulación estática llevada a cabo con Autodesk Inventor, se aplicó una carga puntual de 3,43N en el centro del perfil, simulando el peso del conjunto móvil suspendido y a 25 mm del apoyo una carga de 2,6068 N que simularía el peso del motor. Las restricciones se fijaron en los extremos del perfil (ver Figura 4-27), imitando su sujeción mecánica en la estructura de la cámara. La fuerza aplicada se estimó a partir de la masa total del sistema móvil, considerando además un coeficiente de seguridad. Se asumió el material del perfil como aluminio, con sus correspondientes propiedades elásticas.

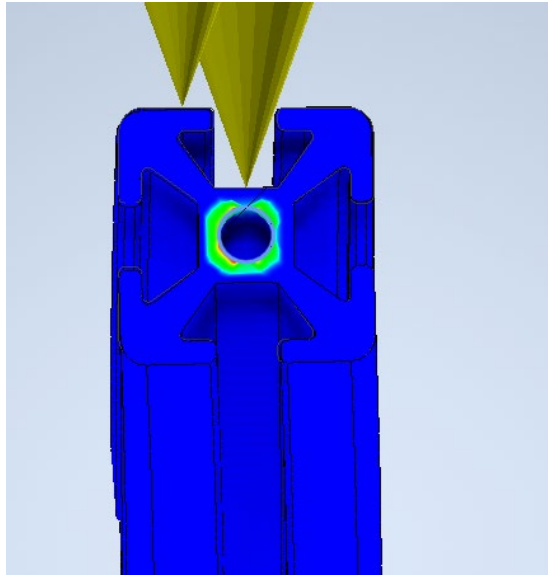


Figura 4-27: Vista de la tensión actuando sobre el lado de fijación donde se encuentra el motor

Los resultados del análisis de tensiones de Von Mises (ver Figura 4-28.) muestran una distribución elástica bien contenida, con un valor máximo de 12,74 MPa en la zona inferior del centro del perfil, donde se esperaba mayor deformación. Dado que el límite elástico del aluminio suele situarse en torno a los 200–250 MPa, los esfuerzos generados se encuentran muy por debajo del umbral crítico, indicando un comportamiento completamente seguro.

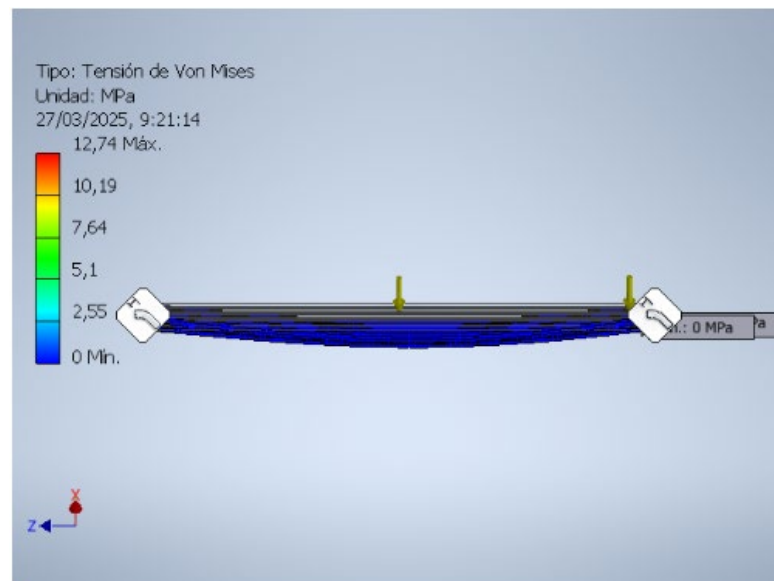


Figura 4-28: Análisis de tensiones de Von Mises del Perfil ITEM

En cuanto a los desplazamientos, se evaluaron en los tres ejes:

- En el eje X el desplazamiento máximo es de $1,545 \times 10^{-2}$ mm, totalmente despreciable. (ver Figura 4-29)

Desplazamiento X

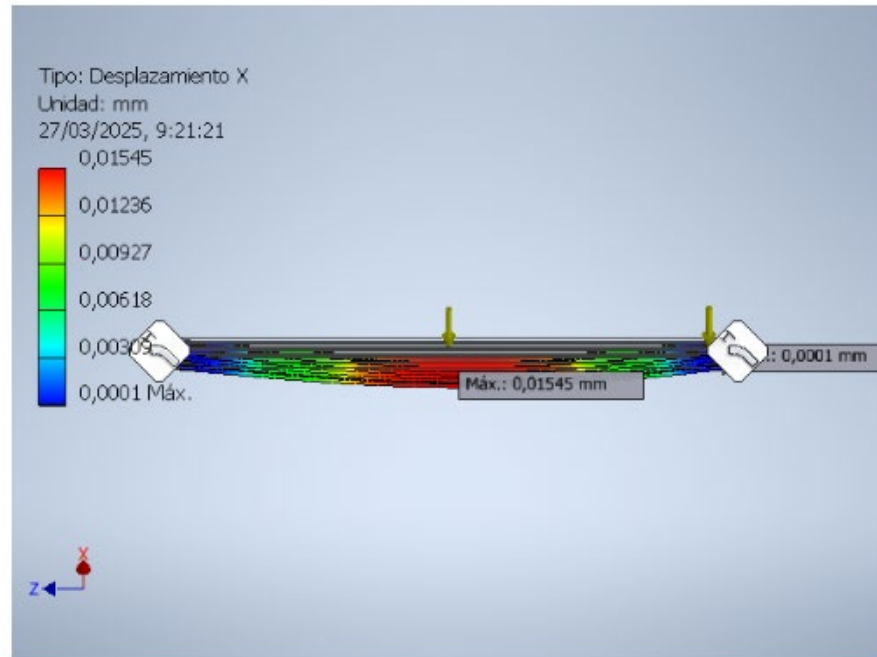


Figura 4-29: Desplazamiento en el eje X

- En el eje Y el desplazamiento máximo es de $5,076 \times 10^{-4}$ mm, el cual es la componente más significativa, correspondiente a la flexión vertical del perfil. (ver Figura 4-30)

Desplazamiento Y



Figura 4-30: Desplazamiento en el eje Y

- En el eje Z el desplazamiento máximo es de $1,006 \times 10^{-3}$ mm, reflejo del pandeo lateral, aunque igualmente es muy bajo. (ver Figura 4-31)

Desplazamiento Z

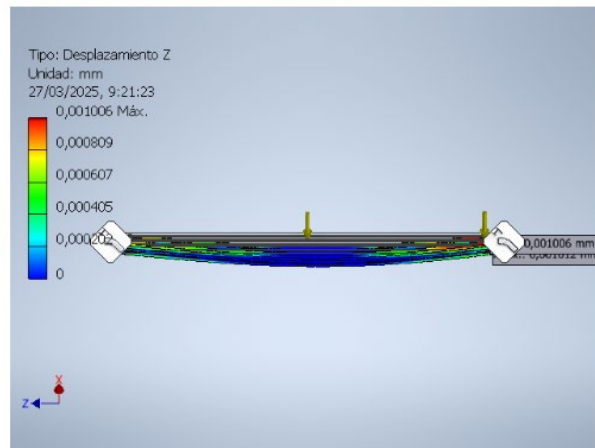


Figura 4-31: Desplazamiento en el eje Z

El valor máximo de flexión vertical, inferior a $1,545 \times 10^{-2}$ mm, demuestra que el perfil conserva una rigidez suficiente como para soportar el peso sin afectar al funcionamiento del sistema de deposición. La deformación es mínima y no supone riesgo alguno para la estabilidad estructural ni para la precisión del proceso.

5 PRUEBA DE CONCEPTO.

5.1 Prototipo de sistema para *electrospinning*

Debido a las limitaciones temporales propias del desarrollo de un Trabajo de Fin de Grado, no ha sido posible llevar a cabo la fabricación y puesta a punto completa del sistema experimental diseñado, basado en un colector cilíndrico rotatorio con desplazamiento sobre los ejes X y Z. La construcción del sistema definitivo requeriría el mecanizado de múltiples piezas a medida, proceso que, por cuestiones logísticas y de disponibilidad en los talleres, podría haberse alargado varias semanas.

Con el objetivo de comprobar la viabilidad funcional de la propuesta, se optó por construir un prototipo a escala, más sencillo, reutilizando materiales ya disponibles y componentes básicos. Esta prueba de concepto ha permitido evaluar el comportamiento general del sistema y verificar, al menos de forma preliminar, su capacidad para generar fibras de manera continua mediante *electrospinning*.

El montaje del prototipo se realizó con el apoyo del taller de mecanizado de la Universidad de Vigo, empleando piezas de recuperación: un tubo de aluminio como cilindro colector, un motor de corriente continua de 12 V, una fuente de laboratorio regulable (30 V, 5 A), un regulador de velocidad PWM), piezas de nylon modificadas manualmente, y elementos de sujeción básicos.

5.2 Diseño del prototipo

A continuación la Figura 5-1 se muestra el modelo 3D del prototipo diseñado para esta prueba, que lo componen:

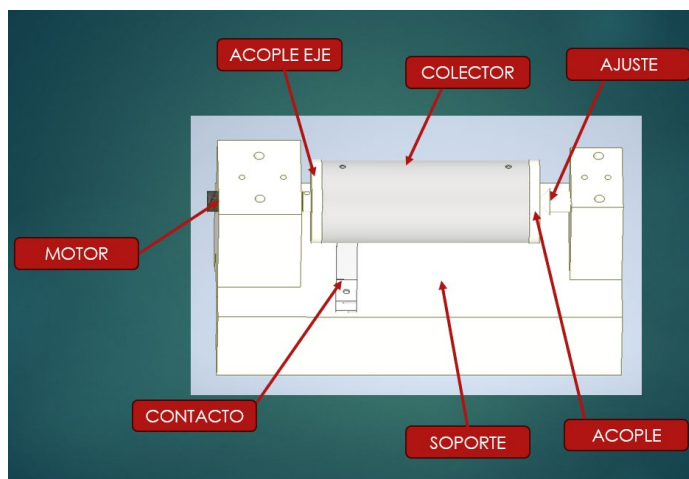


Figura 5-1: Modelo 3D del prototipo en INVENTOR

El colector utilizado en este sistema es un cilindro hueco fabricado en aluminio. Mide 4 cm de diámetro exterior y 10 cm de largo. Este diseño permite un montaje limpio y sólido, esencial para garantizar la estabilidad en el giro durante el proceso de electrohilado.

El acople del eje está fabricado en nylon, un material elegido por su resistencia mecánica y su carácter aislante, ideal para evitar interferencias en un entorno de alto voltaje. Esta pieza presenta una entrada mecanizada, diseñada para encajar sobre el eje del motor. Una vez posicionada, se fija mediante un perno transversal, que asegura una unión firme y sin holguras. Para su acoplamiento al cilindro colector, se ha optado por una solución igualmente sencilla y eficaz: un tornillo de nylon, que mantiene la conexión estable sin añadir peso ni comprometer la conductividad del sistema. Este ensamblaje permite una transmisión directa del giro, al tiempo que preserva la integridad eléctrica y mecánica del conjunto.

La pieza que actúa como tapa del cilindro ha sido diseñada siguiendo las mismas proporciones y material que el acople del eje: nylon, por su ligereza, facilidad de mecanizado y propiedades aislantes.

El soporte del cilindro está construido a partir de una plataforma de nylon, concebida para albergar y estabilizar el giro del cilindro durante el proceso. Sobre esta base reposa, en uno de los extremos, el motor de accionamiento, que queda fijado mediante dos orificios practicados en la cara superior del soporte, por los cuales se atornilla, garantizando una sujeción firme durante el funcionamiento.

En el extremo opuesto, la plataforma presenta un orificio central con un encaje cónico, diseñado específicamente para que el eje del cilindro pueda apoyarse y rotar suavemente, manteniendo su alineación sin necesidad de rodamientos adicionales. Este punto de apoyo actúa como guía pasiva, reduciendo vibraciones y permitiendo un giro más estable.

Además, se ha incorporado en la base del soporte un orificio adicional, destinado a atornillar el conductor que conecta a tierra la fuente de alta tensión, asegurando así una correcta derivación del potencial eléctrico y reforzando la seguridad del sistema.

El motor de continua de 12V que va fijo dentro del soporte.

El ajuste encargado de mantener el colector firmemente en su lugar se encuentra atornillado en el interior del soporte, funcionando como un tope que impide cualquier desplazamiento axial durante el giro. Está fabricado en nylon, lo que no solo garantiza una buena resistencia mecánica con bajo peso, sino que también evita interferencias eléctricas en el entorno del proceso. Su diseño permite que sea fácilmente desmontable, lo que facilita el acceso al cilindro y agiliza las tareas de montaje, mantenimiento o sustitución sin necesidad de herramientas complejas. Su presencia resulta clave para asegurar la estabilidad del conjunto sin comprometer la modularidad del sistema.

En la base del soporte se ha incorporado un contacto de aluminio en forma de escobilla, cuya función es establecer la conexión a tierra del cilindro colector. Esta pieza, atornillada directamente a la estructura, ha sido diseñada para rozar levemente la superficie del cilindro durante su rotación, garantizando la continuidad eléctrica sin generar fricción significativa ni comprometer la fluidez del movimiento. Gracias a la conductividad del aluminio y a su disposición estratégica, este contacto asegura una derivación eficaz del potencial, integrándose al sistema de tierra de la fuente de alta tensión sin interferir en el comportamiento dinámico del colector.

Mientras que en la Figura 5-2 puede verse una fotografía del sistema real, ya montado e integrado en la cámara de *electrospinning* del laboratorio de investigación en mecánica del CUD-ENM.



Figura 5-2: Prototipo real realizado con el apoyo del taller de mecanizado de la Universidad de Vigo

En la imagen Figura 5-3 se identifican claramente los principales elementos del sistema.

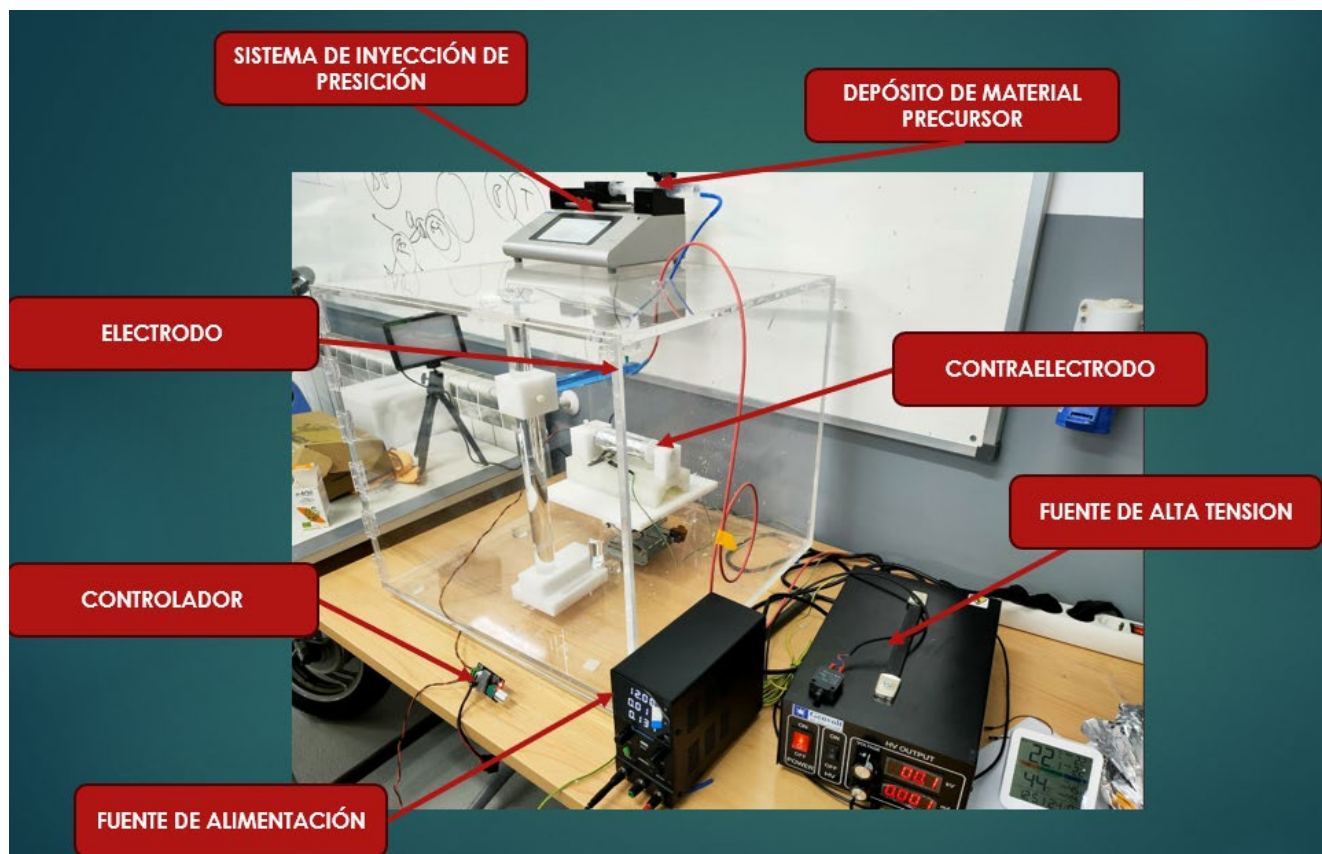


Figura 5-3: Sistema de prueba de concepto montado en el laboratorio de Investigación del CUD-ENM

5.3 Metodología del ensayo

A continuación en este apartado se describirá la metodología que se ha seguido para el ensayo del prototipo en el laboratorio del CUD-ENM:

Para llevar a cabo el ensayo, se utilizó policaprolactona (PCL) (Merck, 80.000 Mn, en gránulos) como polímero precursor. Se preparó una disolución al 10 % en peso, mezclando 50 gramos de acetona con PCL en un vaso de precipitados. La mezcla se mantuvo durante 6 horas en un agitador magnético a

500 rpm y 45 °C, hasta lograr la completa disolución del polímero (ver Figura 5-4). Una vez obtenida la solución, esta se cargó en una jeringa conectada a una bomba de inyección, regulada para dispensar un flujo constante de 10 mL/h durante 5 minutos.



Figura 5-4: Solución de PCL y acetona en el agitador magnético del laboratorio del CUD-ENM

El proceso de electrohilado se llevó a cabo aplicando una diferencia de potencial de 20 kV entre la aguja y el colector. La velocidad de rotación del cilindro se ajustó a 10 rpm, valor suficiente para permitir la deposición continua de las fibras sobre la superficie del cilindro.

Se han obtenido fibras de forma continua depositadas en toda la longitud del colector cilíndrico rotario formando una capa de espesor considerable como se puede observar en la Figura 5-5.

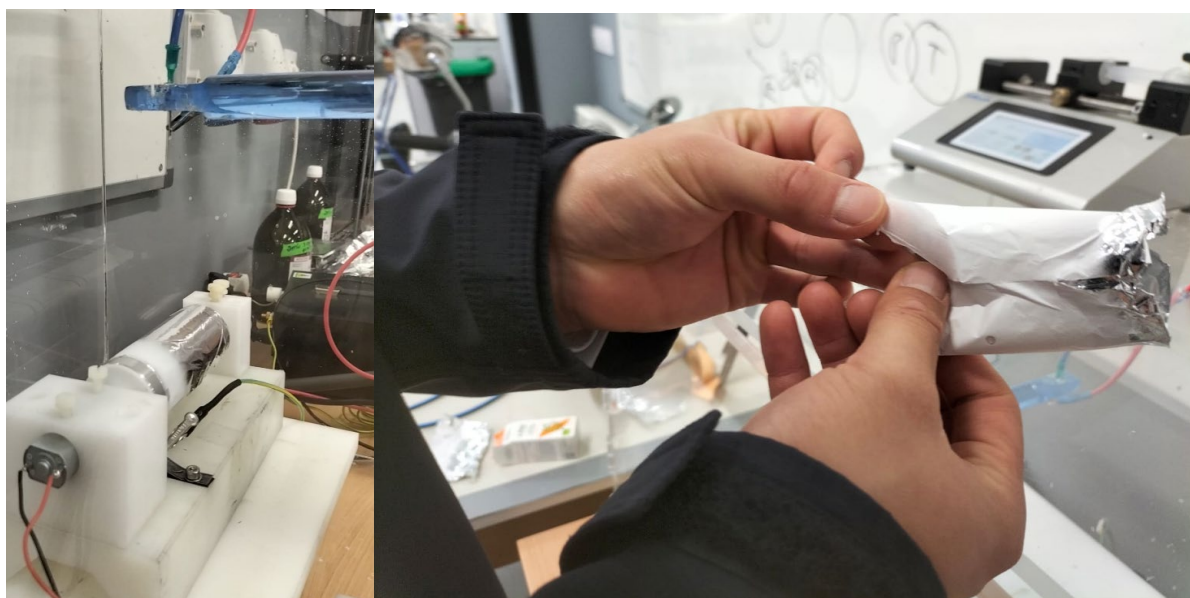


Figura 5-5: Fibras depositadas

5.4 Observaciones

Aunque el experimento confirma la viabilidad del diseño para el hilado continuo, el prototipo presenta limitaciones mecánicas que condicionan la repetibilidad de los ensayos. Se ha detectado un reparto irregular de las fibras, especialmente al inicio del proceso, atribuible a un exceso de fricción entre el cilindro y el sistema de sujeción. Esta fricción genera ligeros bloqueos o “saltos” durante el giro,

y se ha identificado además cierta excentricidad en el eje de rotación, lo que afecta a la homogeneidad de la deposición.

Estos problemas, aunque esperables en un prototipo inicial construido con recursos limitados y sin mecanizados de precisión, aportan información valiosa sobre los aspectos a mejorar en futuras iteraciones del sistema, especialmente en lo referente a soportes, rodamientos y centrado del eje.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha llevado a cabo el diseño completo de un sistema experimental para la fabricación de nanofibras mediante *electrospinning*, enfocado en la mejora del control de deposición y la continuidad del proceso. Este sistema, centrado en un colector cilíndrico rotatorio, ha sido concebido no solo desde la perspectiva funcional, sino también considerando su viabilidad técnica, económica y de integración en entornos reales de laboratorio.

Uno de los logros más destacados ha sido la implementación de un mecanismo compacto, de bajo coste y relativamente fácil de fabricar, que permite recoger fibras de forma continua, manteniendo una rotación estable del cilindro. La elección de materiales, como el aluminio para el colector o el PTFE en elementos de soporte y guiado, ha estado guiada tanto por criterios eléctricos como mecánicos, buscando siempre optimizar el rendimiento del sistema sin comprometer su simplicidad.

Además, se ha validado la funcionalidad de una versión simplificada del sistema mediante un prototipo, demostrando que, aun con recursos limitados, es posible alcanzar una deposición continua de fibras. Si bien el prototipo no está exento de imperfecciones —como el leve desequilibrio del cilindro, rozamientos puntuales o falta de alineación inicial—, estos inconvenientes no invalidan el enfoque, sino que refuerzan la necesidad de ajustes de precisión para optimizar su comportamiento.

Desde el punto de vista del análisis estructural, los estudios de tensiones y desplazamientos realizados en Autodesk Inventor han mostrado que los componentes clave del sistema operan dentro de márgenes seguros, incluso bajo cargas representativas del uso real. Este análisis ha sido fundamental para afinar los espesores, materiales y puntos de fijación, garantizando una mayor fiabilidad a largo plazo.

6.2 Líneas futuras

Este trabajo abre diversas líneas de evolución y mejora, tanto en lo que respecta al sistema de recolección como al conjunto del proceso de electrohilado. Algunas de las direcciones más prometedoras son:

- Automatización del sistema de control: Integrar sensores ópticos o encoders para realizar un control en lazo cerrado de la velocidad de rotación, lo cual permitiría mayor precisión en la deposición y facilitaría la reproducibilidad entre ensayos.

- Ampliación del sistema de ejes móviles: Desarrollar un sistema completamente automatizado para el posicionamiento del electrodo en los ejes X y Z, con la posibilidad de incorporar trayectorias programadas para optimizar el patrón de deposición.
- Escalado industrial: Aunque este diseño se ha realizado con fines experimentales y educativos, se plantea como objetivo a largo plazo adaptar el sistema para líneas piloto de producción continua de nanofibras, evaluando su rendimiento bajo ciclos prolongados y condiciones industriales.
- Integración de sistemas de caracterización in situ: Incorporar módulos de monitorización (como cámaras de alta velocidad o sensores de carga) que permitan estudiar en tiempo real la formación del chorro y la distribución de fibras, facilitando ajustes dinámicos del sistema.
- El uso de algún material aislante para recubrir el perfil ITEM para que así no interfiera con el campo magnético formado dentro del sistema.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «As Fibras: O que são e que tipos existem | Fibrenamics». Accedido: 9 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fibrenamics.com/intelligence/reports/as-fibras-o-que-sao-e-que-tipos-existem>
- [2] Gacén, J., «Fibras de Poliamida: Desarrollo y Previsiones», *Dyna Ingeniería e Industria*, vol. 58, n.º 4, pp. 37-44, 1983.
- [3] R. Zhao, X. Meng, H. He, J. Ming, y X. Ning, «Formation of a nylon-6 micro/nano-fiber assembly through a low energy reactive melt spinning process», *Green Chem.*, vol. 24, n.º 1, pp. 176-190, 2022, doi: 10.1039/D1GC03468E.
- [4] Isla Lizett Rodríguez Banda, «Panorama general sobre la tela no tejida meltblown y spunbond», Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Caso de estudio, mar. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/746/1/C.E.%20Isla%20Lezeth%20Rodr%C3%ADguez%20Banda%20-%20PTP.pdf>
- [5] «Composition and structure of meltblown fabric machine and analysis of production status in China | CLI Inspection Services». Accedido: 9 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cliorg.com/meltblown-fabric-machine/>
- [6] J. R. Jones, «Review of bioactive glass: From Hench to hybrids», *Acta Biomaterialia*, vol. 9, n.º 1, pp. 4457-4486, ene. 2013, doi: 10.1016/j.actbio.2012.08.023.
- [7] F. Quintero *et al.*, «Continuous fiberizing by laser melting (Cofiblas): Production of highly flexible glass nanofibers with effectively unlimited length», *Sci. Adv.*, vol. 6, n.º 6, p. eaax7210, feb. 2020, doi: 10.1126/sciadv.aax7210.
- [8] J. Penide *et al.*, «Anamorphic beam shaping system designed to optimize irradiance distribution in the Cofiblas process for glass nanofibers production», *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 152, p. 106972, may 2022, doi: 10.1016/j.optlaseng.2022.106972.
- [9] I. Shepa, E. Mudra, y J. Dusza, «Electrospinning through the prism of time», *Materials Today Chemistry*, vol. 21, p. 100543, ago. 2021, doi: 10.1016/j.mtchem.2021.100543.
- [10] Khaled H. Mahmoud y Khalid S. Essa, *Electrospinning: Theory, Applications, and Update Challenges*. Anna's Archive, 2024.
- [11] P. Davoodi, E. L. Gill, W. Wang, y Y. Y. Shery Huang, «Advances and innovations in electrospinning technology», en *Biomedical Applications of Electrospinning and Electrospraying*, Elsevier, 2021, pp. 45-81. doi: 10.1016/B978-0-12-822476-2.00004-2.

- [12] D. H. Reneker y I. Chun, «Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning», *Nanotechnology*, vol. 7, n.º 3, pp. 216-223, sep. 1996, doi: 10.1088/0957-4484/7/3/009.
- [13] J. Colín-Orozco, M. Zapata-Torres, R. Pedroza-Islas, y G. Rodríguez-Gattorno, «Crecimiento y caracterización de nanofibras obtenidas a partir de proteína aislada de suero lácteo y óxido de polietileno por la técnica de electrohilado», *Superficies y vacío*, vol. 26, n.º 2, pp. 31-35, 2013.
- [14] J.-S. Park, «Electrospinning and its applications», *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 1, n.º 4, p. 043002, dic. 2010, doi: 10.1088/2043-6262/1/4/043002.
- [15] G. C. Rutledge y S. V. Fridrikh, «Formation of fibers by electrospinning», *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 59, n.º 14, pp. 1384-1391, dic. 2007, doi: 10.1016/j.addr.2007.04.020.
- [16] L. Wang, «Electrospinning».
- [17] C. Furió-Mas y J. Guisasola Aranzabal, «La enseñanza del concepto de campo eléctrico basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada», *ensciencias*, vol. 19, n.º 2, pp. 319-334, ene. 2001, doi: 10.5565/rev/ensciencias.4007.
- [18] H. Yu y Z. Tan, *Introduction to Electrospinning and Nanofiber*. en Synthesis Lectures on Green Energy and Technology. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. doi: 10.1007/978-3-031-74310-8.
- [19] «Campo eléctrico: qué es, fórmula e intensidad - Resumen», *geoenciclopedia.com*. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.geoenciclopedia.com/campo-electrico-que-es-formula-e-intensidad-927.html>
- [20] W. Gamboa, O. Mantilla, y V. Castillo, «PRODUCCIÓN DE MICRO Y NANO FIBRAS A PARTIR DE LA TÉCNICA “ELECTROSPINNING” PARA APLICACIONES FARMACOLÓGICAS», 2007.
- [21] G. M. Gonzales y A. M. G. Calvo, «Determinación experimental de la carga eléctrica transportada por las primeras gotas emitidas en la formación de un cono de Taylor».
- [22] «¿Cómo funcionan los métodos de electrohilado para fabricación de fibras poliméricas?», *Interempresas*. Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/462990-Como-funcionan-los-metodos-de-electrohilado-para-fabricacion-de-fibras-polimericas.html>
- [23] G. R. Mitchell, Ed., *Electrospinning: principles, practice and possibilities*. en RSC polymer chemistry series, no. 14. Cambridge: Royal Society of Chemistry, RSC Publ, 2015. doi: 10.1039/9781849735575.
- [24] I. Alghoraibi y S. Alomari, «Different Methods for Nanofiber Design and Fabrication», en *Handbook of Nanofibers*, A. Barhoum, M. Bechelany, y A. Makhoulf, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1-46. doi: 10.1007/978-3-319-42789-8_11-2.
- [25] G. Y. Doria, B. A. Ballesteros, y R. R. Rodríguez, «Funcionalización de nanofibras electrohiladas con plata coloidal para aplicaciones antimicrobianas».
- [26] Lezama Cabrera, Edmundo, «Obtención de fibras electrohiladas de alcohol polivinílico y fluoresceína empleando un inyector coaxial», Tesis de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, 2019.
- [27] I. J. Hall Barrientos *et al.*, «Electrospun collagen-based nanofibres: A sustainable material for improved antibiotic utilisation in tissue engineering applications», *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 531, n.º 1, pp. 67-79, oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijpharm.2017.08.071.

- [28] A. Nadaf *et al.*, «Recent update on electrospinning and electrospun nanofibers: current trends and their applications», *RSC Adv.*, vol. 12, n.º 37, pp. 23808-23828, 2022, doi: 10.1039/D2RA02864F.
- [29] Joachim H. Wendorff, S. Agarwal, y A. Greiner, *Electrospinning: Materials, Processing, and Applications*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527647705>
- [30] Monika, «El futuro de los plásticos sostenibles: una perspectiva integral sobre el ácido poliláctico (PLA)», Goldsupplier. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.goldsupplier.com/es/pla-polylactic-acid/>
- [31] Z. Peles, I. Binderman, I. Berdicevsky, y M. Zilberman, «Soy protein films for wound-healing applications: antibiotic release, bacterial inhibition and cellular response», *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, vol. 7, n.º 5, pp. 401-412, 2013, doi: 10.1002/term.536.
- [32] M. Alkahtani *et al.*, «Photostable and Small YVO4:Yb,Er Upconversion Nanoparticles in Water», *Nanomaterials*, vol. 11, n.º 6, Art. n.º 6, jun. 2021, doi: 10.3390/nano11061535.
- [33] «Impacts of iodine on the properties of electrospun polymeric nanofibers: Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures: Vol 31 , No 4 - Get Access». Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1536383X.2023.2168266>
- [34] N. Bhardwaj y S. C. Kundu, «Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique», *Biotechnology Advances*, vol. 28, n.º 3, pp. 325-347, may 2010, doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.01.004.
- [35] Z. Li y C. Wang, «Introduction of Electrospinning», en *One-Dimensional nanostructures*, en SpringerBriefs in Materials. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 1-13. doi: 10.1007/978-3-642-36427-3_1.
- [36] H. M. G. Molfino *et al.*, «Electrospinning: Avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina», *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, vol. 20, n.º 4, pp. 706-713, oct. 2020, doi: 10.25176/rfmh.v20i4.3004.
- [37] «MASCARILLA FFP2 NR VP2 Blanca - Fabricadas en España», VP Mascarillas. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vpmascarillas.com/producto/mascarilla-ffp2-nr-vp2-blanca/>
- [38] «Nueva membrana capaz de convertir el agua salada en agua dulce en minutos, 99,99% de efectividad». Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/nueva-membrana-capaz-de-convertir-agua-salada-en-dulce/>
- [39] «Prueba de biomarcadores en LCR detecta Alzheimer más temprano», Labmedica.es. Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.labmedica.es/diagnostico-molecular/articles/294804023/prueba-de-biomarcadores-en-lcr-detecta-alzheimer-mas-temprano.html>
- [40] M. Rodríguez, «Un nuevo nanomaterial permitirá fabricar compresas menstruales más baratas y seguras», Nanotecnología. Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.euroresidentes.com/tecnologia/nanotecnologia/nanomaterial-compresas-menstruales/>
- [41] W. Su *et al.*, «Electrospinning and electrospun polysaccharide-based nanofiber membranes: A review», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 263, p. 130335, abr. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130335.
- [42] «Máquinas de Electrospinning», Fluidnatek. Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fluidnatek.com/es/maquinas-electrospinning/>

- [43] «Inovenso Pilot Scale Electrospinning/Spraying Machine». Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.inovenso.com/portfolio-view/nanospinner-pilot-line-electrospinning-machine/>
- [44] «Tecnología Slit Injector», Fluidnatek. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fluidnatek.com/es/equipos-electrospinning-avanzados/electrospinning-injector/>
- [45] «Multifunctional Electrospinning Machine E04S», QINGZI NANO. Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nanofiberlabs.com/product/multifunctional-electrospinning-machine-e04-001.html>
- [46] C. Gutiérrez, D. R. Cabello, y J. Carlos, «DESARROLLO DE UN EQUIPO DE ELECTROSPINNING PARA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS ALINEADAS DE RECOMBINÁMEROS TIPO ELASTINA».
- [47] «[Hot Item] Electrospinning Máquina para el proceso de fibras ultrafinas Electrospaying avanzado equipo nano tecnología», Made-in-China.com. Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_71f63bbb1a8b6b81/product_Electrospinning-Machine-for-Ultrafine-Fibre-Process-Advanced-Electrospaying-Equipment-Nano-Technology_uouesouiuu.html
- [48] A. Sensini, G. Massafra, C. Gotti, A. Zucchelli, y L. Cristofolini, «Tissue Engineering for the Insertions of Tendons and Ligaments: An Overview of Electrospun Biomaterials and Structures», *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, mar. 2021, doi: 10.3389/fbioe.2021.645544.
- [49] «Steel Plate Collector», Linari Nanotech. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.linarinanotech.com/products/stainless-steel-plate-collector>
- [50] «Types of Collectors for different morphology», Electrospinning technology for nanofiber production. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.4spin.info/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=138
- [51] A. Switz, A. Mishra, K. Jabech, y A. Prasad, «Affordable lab-scale electrospinning setup with interchangeable collectors for targeted fiber formation», *HardwareX*, vol. 17, p. e00501, dic. 2023, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00501.
- [52] A. Nadaf *et al.*, «Recent update on electrospinning and electrospun nanofibers: current trends and their applications», *RSC Adv*, vol. 12, n.º 37, pp. 23808-23828, doi: 10.1039/d2ra02864f.
- [53] «Aluminum Cylinder», Linari Nanotech. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.linarinanotech.com/products/aluminum-cylinder>
- [54] A. S. Bogdanova, A. I. Sokolova, E. R. Pavlova, D. V. Klinov, y D. V. Bagrov, «Investigation of cellular morphology and proliferation on patterned electrospun PLA-gelatin mats», *J Biol Phys*, vol. 47, n.º 2, pp. 205-214, jun. 2021, doi: 10.1007/s10867-021-09574-9.
- [55] «Steel Wire Drum», Linari Nanotech. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.linarinanotech.com/products/stainless-steel-wire-drum>
- [56] «Infuse Only Single Syringe Pump - Legato 100». Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.kdscientific.com/legato-100-syringe-pump.html>
- [57] «7xx30 - High-voltage power supply by Genvolt | DirectIndustry». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.com/prod/genvolt/product-210071-2191989.html>
- [58] A. Switz, A. Mishra, K. Jabech, y A. Prasad, «Affordable lab-scale electrospinning setup with interchangeable collectors for targeted fiber formation», *HardwareX*, vol. 17, mar. 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00501.

[59] «Motorreductor DC RS PRO, 24 V CC, 190 rpm, par máx. 10 Ncm, Ø de eje 5mm | RS». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/motores-dc/2588293>

[60] «RS-150-24 | Fuente de alimentación conmutada MEAN WELL, 24V dc, 6.5A, 156W, 1 salida, Montaje en panel | RS». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/fuentes-de-alimentacion-conmutadas/6210685?gb=s>

[61] «MOTOR PASO A PASO 103-H5208-0483 - MSH17156 - RTA - Motion Control Systems». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rta-store.com/es/product/158190-motore-passo-passo-103-h5208-0483-msh17156>

[62] «Ranura de rueda – item». Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.item24.com/es-es/rueda-5-37097>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

El acceso a tecnologías de fabricación de nanofibras mediante electrohilado ha estado históricamente limitado a laboratorios altamente especializados y con financiación significativa. El diseño de un sistema funcional, seguro y asequible, como el desarrollado en este TFG, democratiza el acceso a esta tecnología, permitiendo que centros educativos, laboratorios con presupuestos limitados y entidades públicas puedan implementar procesos avanzados de fabricación de nanomateriales. Esto favorece la formación técnica del alumnado, impulsa la investigación local y puede fomentar el desarrollo de productos con impacto social, como vendajes antimicrobianos o filtros de bajo coste.

A nivel económico, el enfoque de diseño propuesto representa una alternativa de bajo coste frente a los sistemas comerciales de electrospinning, los cuales pueden alcanzar precios superiores a decenas de miles de euros. El empleo de componentes reutilizados, materiales accesibles y sistemas mecánicos simples permite reducir significativamente los costes de implementación. Esta reducción no solo beneficia a los centros de investigación, sino que también abre la puerta a una producción local de prototipos o dispositivos basados en nanofibras, con potencial de transferencia tecnológica hacia pequeñas y medianas empresas interesadas en desarrollar productos innovadores en sectores como la salud, el medioambiente o la energía.

Desde el punto de vista medioambiental, el sistema permite trabajar con fibras biodegradables o precursores poliméricos de bajo impacto, lo que facilita el desarrollo de materiales sostenibles. Además, la precisión en la deposición y el control del proceso minimizan el desperdicio de material, reduciendo el consumo innecesario de polímeros y solventes. El uso de materiales reutilizados y reciclables en la construcción del prototipo (como el aluminio o el metacrilato) también contribuye a disminuir la huella ecológica del sistema. En este sentido, el proyecto promueve un modelo de desarrollo tecnológico alineado con los principios de sostenibilidad y economía circular.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo y aplicación de tecnologías como el electrospinning no puede desligarse de una reflexión ética y social sobre su impacto, sus usos potenciales y las responsabilidades asociadas a su implementación.

El diseño de un sistema de fabricación de nanofibras conlleva una responsabilidad directa en cuanto a la seguridad del usuario y del entorno. El uso de altos voltajes, disolventes potencialmente tóxicos y materiales biológicamente activos requiere una gestión cuidadosa y un diseño que minimice riesgos. Por ello, se ha priorizado la incorporación de elementos de protección, como la cámara de procesamiento, y se han seguido principios de diseño ético que anteponen la seguridad operativa a la eficiencia técnica.

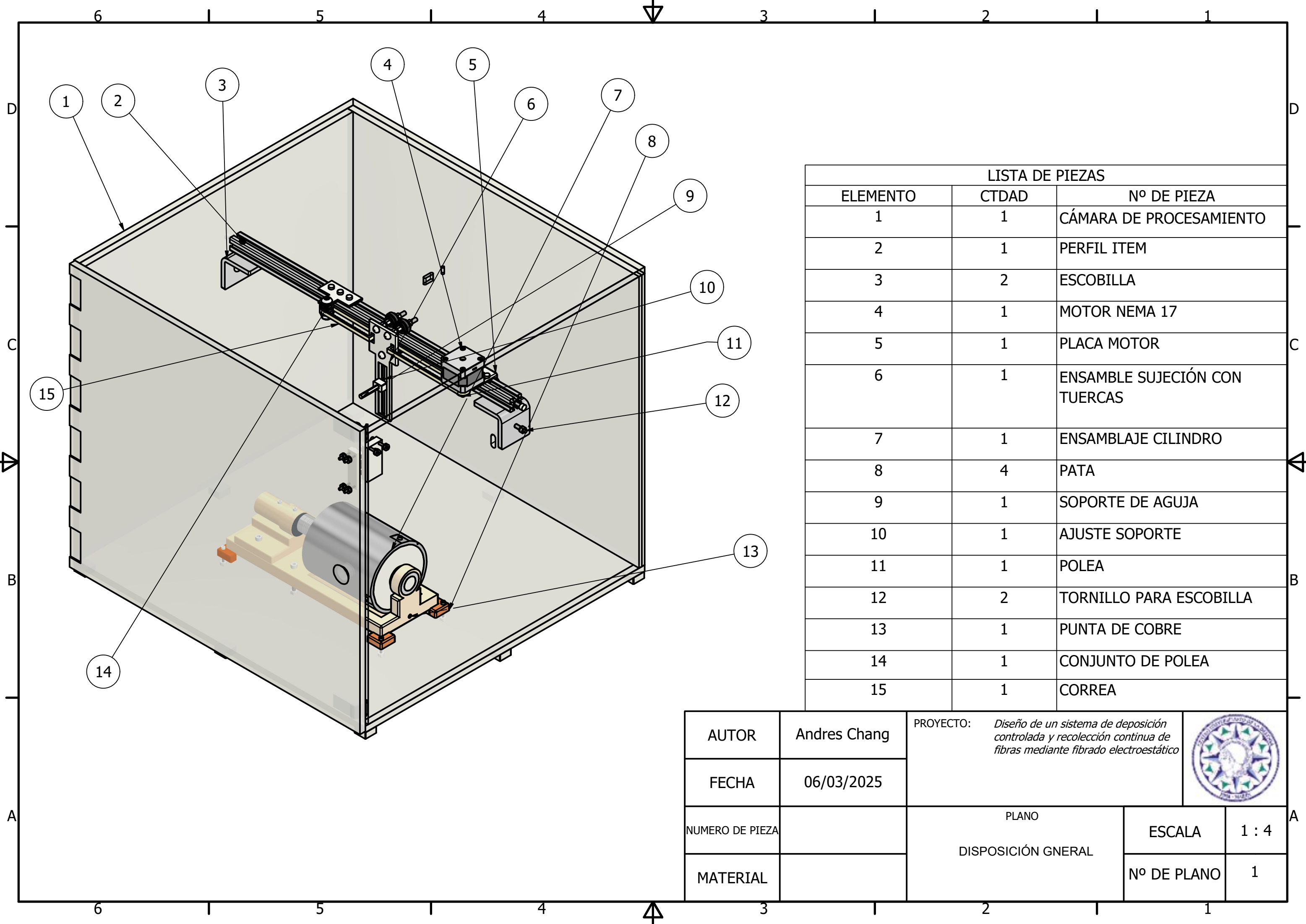
Otro eje fundamental es la equidad en el acceso al conocimiento y a la tecnología. Frente a la tendencia de mercado a la exclusividad tecnológica y los equipos cerrados de alto coste, este proyecto apuesta por una solución abierta, replicable y asequible, que pueda ser adaptada por estudiantes, investigadores o centros con recursos limitados. Esta democratización del acceso tecnológico no solo promueve la innovación local, sino que también refuerza valores de colaboración, inclusión y justicia social.

ANEXO III: PLANOS

A continuación en este anexo se dispondrá de todos los planos relevantes para el diseño del sistema de fibrado electrostático de este trabajo. Se mostrará un glosario de todos los planos:

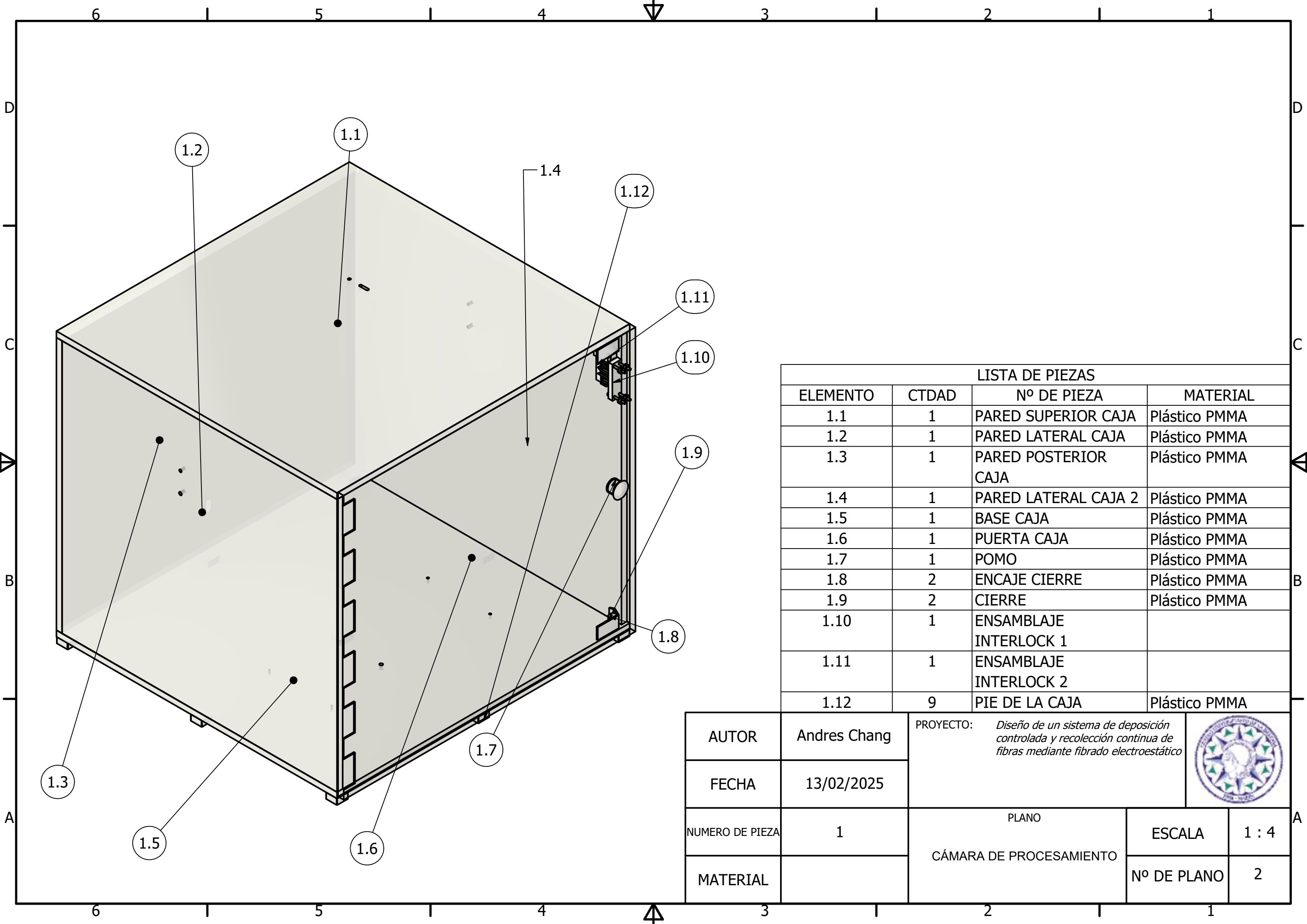
NÚMERO DE PLANO	PLANO
1	DISPOSICIÓN GENERAL
2	CÁMARA DE PROCESAMIENTO
3	PARED SUPERIOR
4	PARED LATERAL CAJA
5	PARED POSTERIOR CAJA
6	PARED LATERAL CAJA 2
7	BASE DE CAJA
8	PUERTA CAJA
9	POMO
10	ENCAJE CIERRE
11	CIERRE
12	INTERLOCK
13	INTERLOCK 1
14	CARCASA INTERLOCK 1
15	PIEZA METÁLICA INTERLOCK 1
16	INTERLOCK 2
17	PIEZA METÁLICA INTERLOCK 2
18	CARCASA INTERLOCK 2
19	PIE DE CAJA
20	ESCOBILLA
21	PLACA MOTOR
22	ENSAMBLE SUJECCIÓN CON TUERCAS
23	SUJECCIÓN
24	ENSAMBLAJE CILINDRO
25	CILINDRO COLECTOR

26	CUERPO PRINCIPAL
27	ACOPLE
28	EJE CILINDRO
29	SUJECCIÓN DEL RODAMIENTO
30	ACOPLE MOTOR
31	PATA
32	SOPORTE DE AGUJA
33	AJUSTE SOPORTE
34	PUNTA DE COBRE



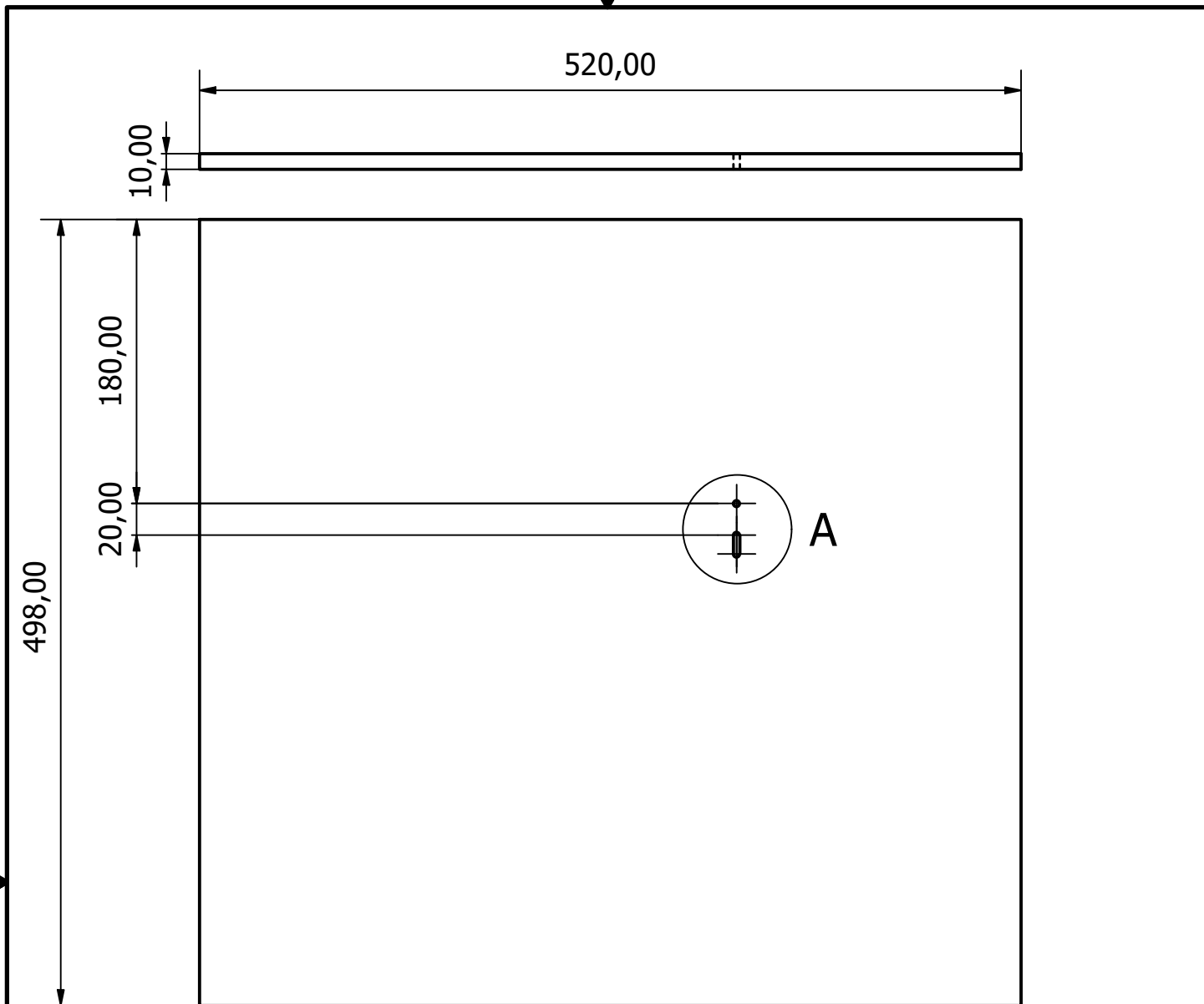
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	CÁMARA DE PROCESAMIENTO
2	1	PERFIL ITEM
3	2	ESCOBILLA
4	1	MOTOR NEMA 17
5	1	PLACA MOTOR
6	1	ENSAMBLE SUJECCIÓN CON TUERCAS
7	1	ENSAMBLAJE CILINDRO
8	4	PATA
9	1	SOPORTE DE AGUJA
10	1	AJUSTE SOPORTE
11	1	POLEA
12	2	TORNILLO PARA ESCOBILLA
13	1	PUNTA DE COBRE
14	1	CONJUNTO DE POLEA
15	1	CORREA

AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	06/03/2025				
NUMERO DE PIEZA		PLANO DISPOSICIÓN GNERAL		ESCALA	1 : 4
MATERIAL				Nº DE PLANO	1

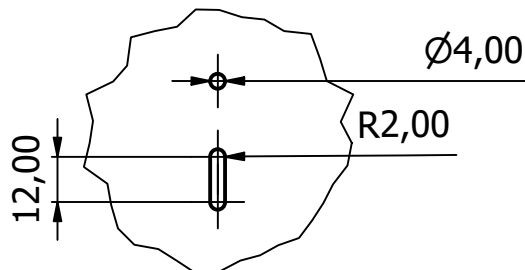


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
1.1	1	PARED SUPERIOR CAJA	Plástico PMMA
1.2	1	PARED LATERAL CAJA	Plástico PMMA
1.3	1	PARED POSTERIOR CAJA	Plástico PMMA
1.4	1	PARED LATERAL CAJA 2	Plástico PMMA
1.5	1	BASE CAJA	Plástico PMMA
1.6	1	PUERTA CAJA	Plástico PMMA
1.7	1	POMO	Plástico PMMA
1.8	2	ENCAJE CIERRE	Plástico PMMA
1.9	2	CIERRE	Plástico PMMA
1.10	1	ENSAMBLAJE INTERLOCK 1	
1.11	1	ENSAMBLAJE INTERLOCK 2	
1.12	9	PIE DE LA CAJA	Plástico PMMA

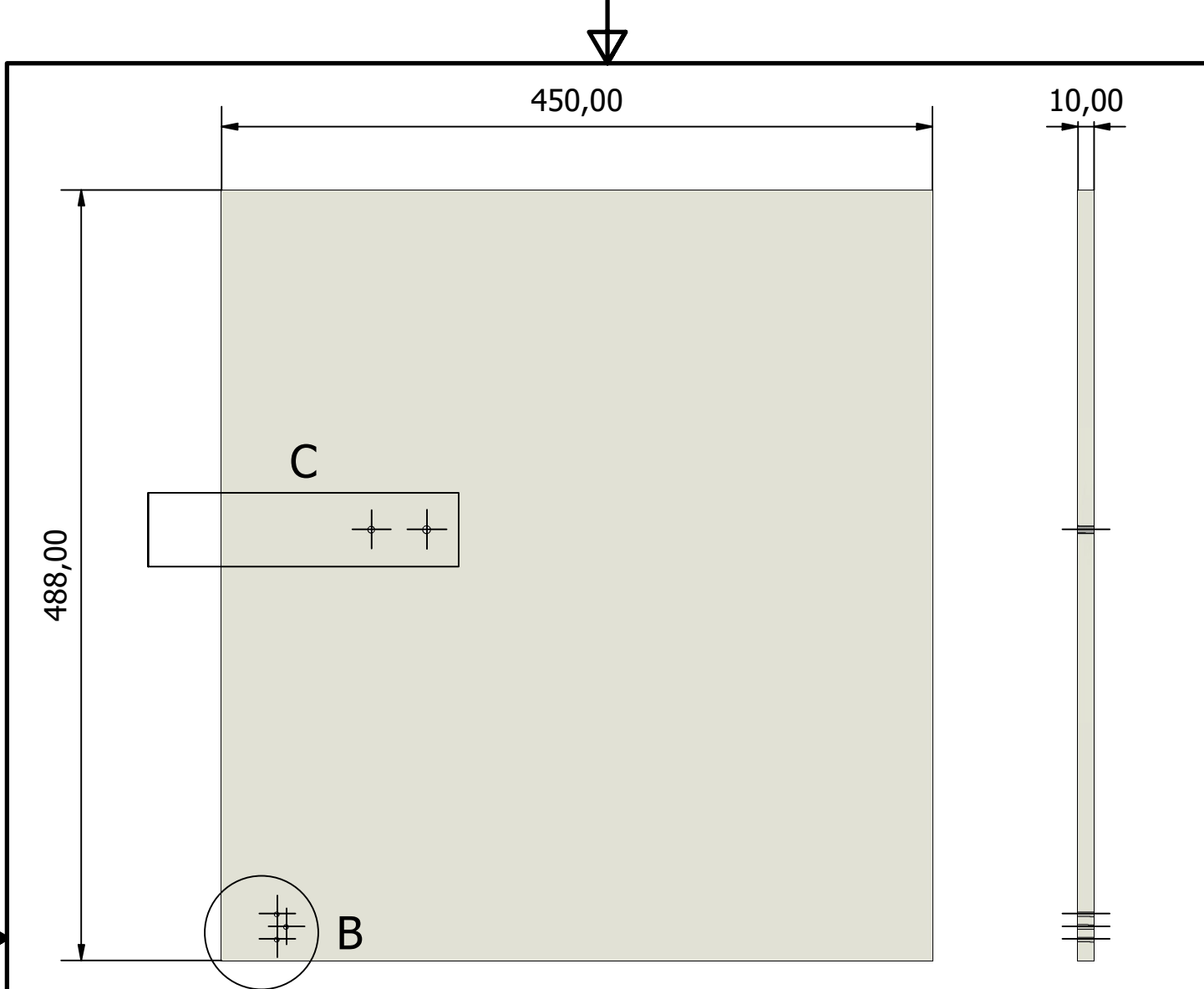
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>			
FECHA	13/02/2025				
NUMERO DE PIEZA	1	PLANO CÁMARA DE PROCESAMIENTO		ESCALA	1 : 4
MATERIAL				Nº DE PLANO	2



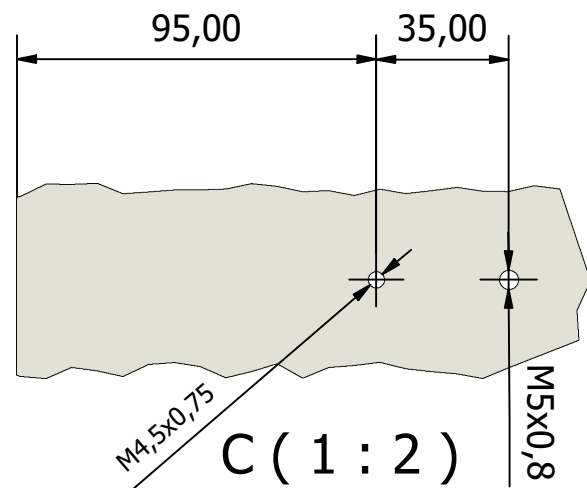
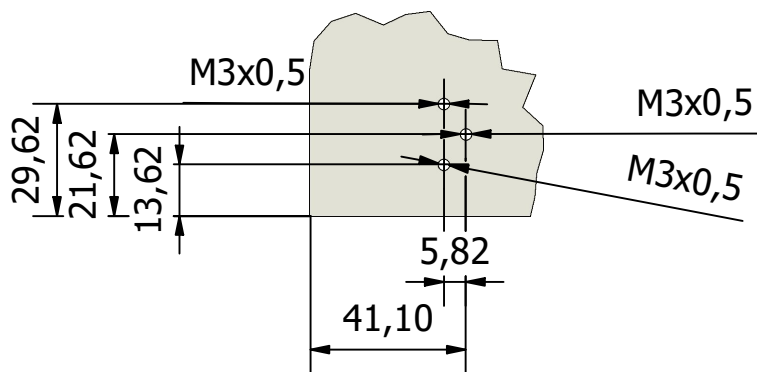
A (1 : 2)



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	04/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.1	PLANO PARED SUPERIOR		ESCALA 1 : 4
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO 3

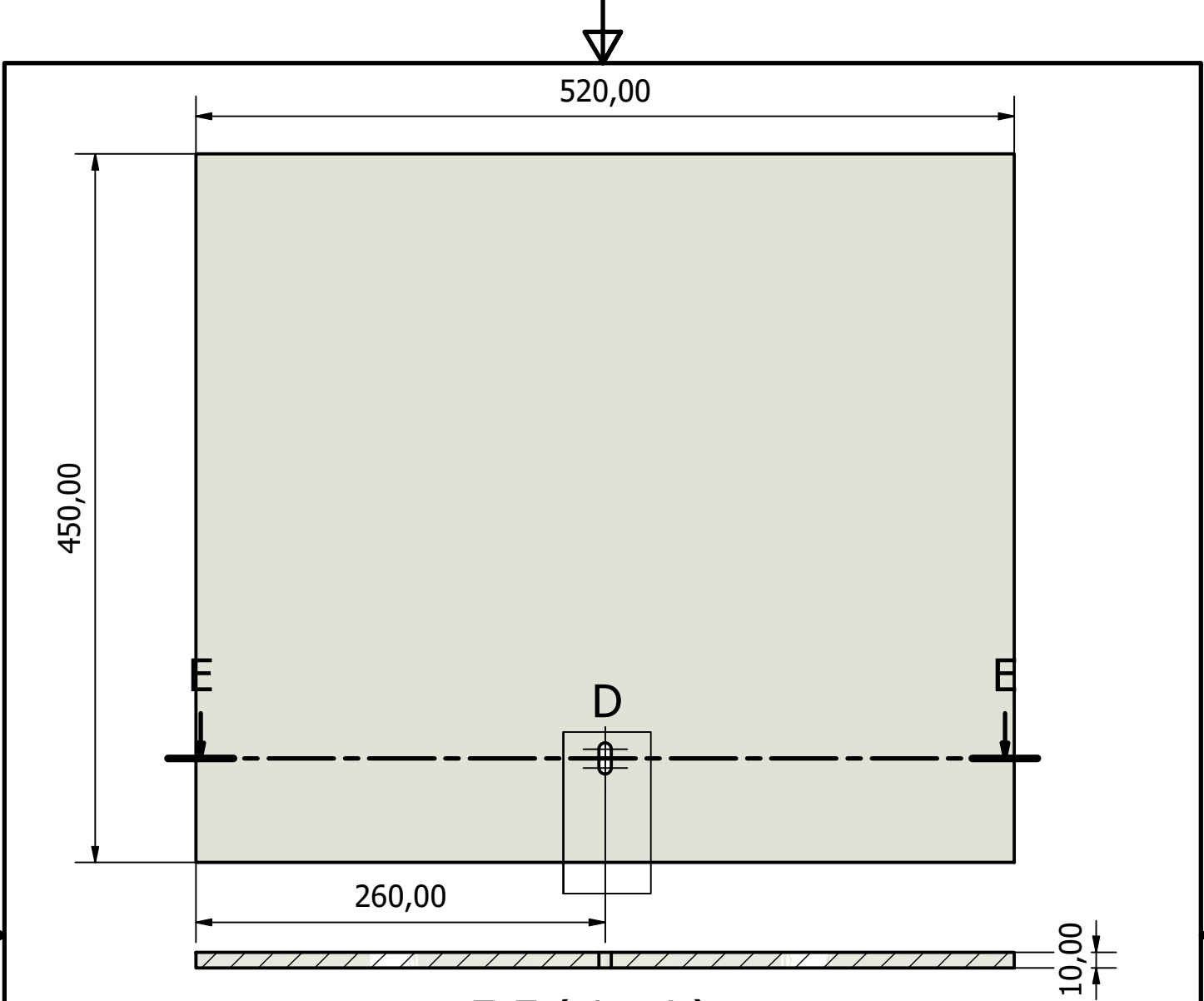


B (1 : 2)



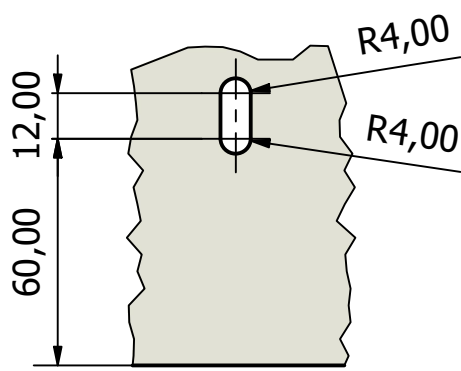
C (1 : 2)

AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>		
FECHA	05/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.2	PLANO PARED LATERAL CAJA		ESCALA 1 : 4
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO 4

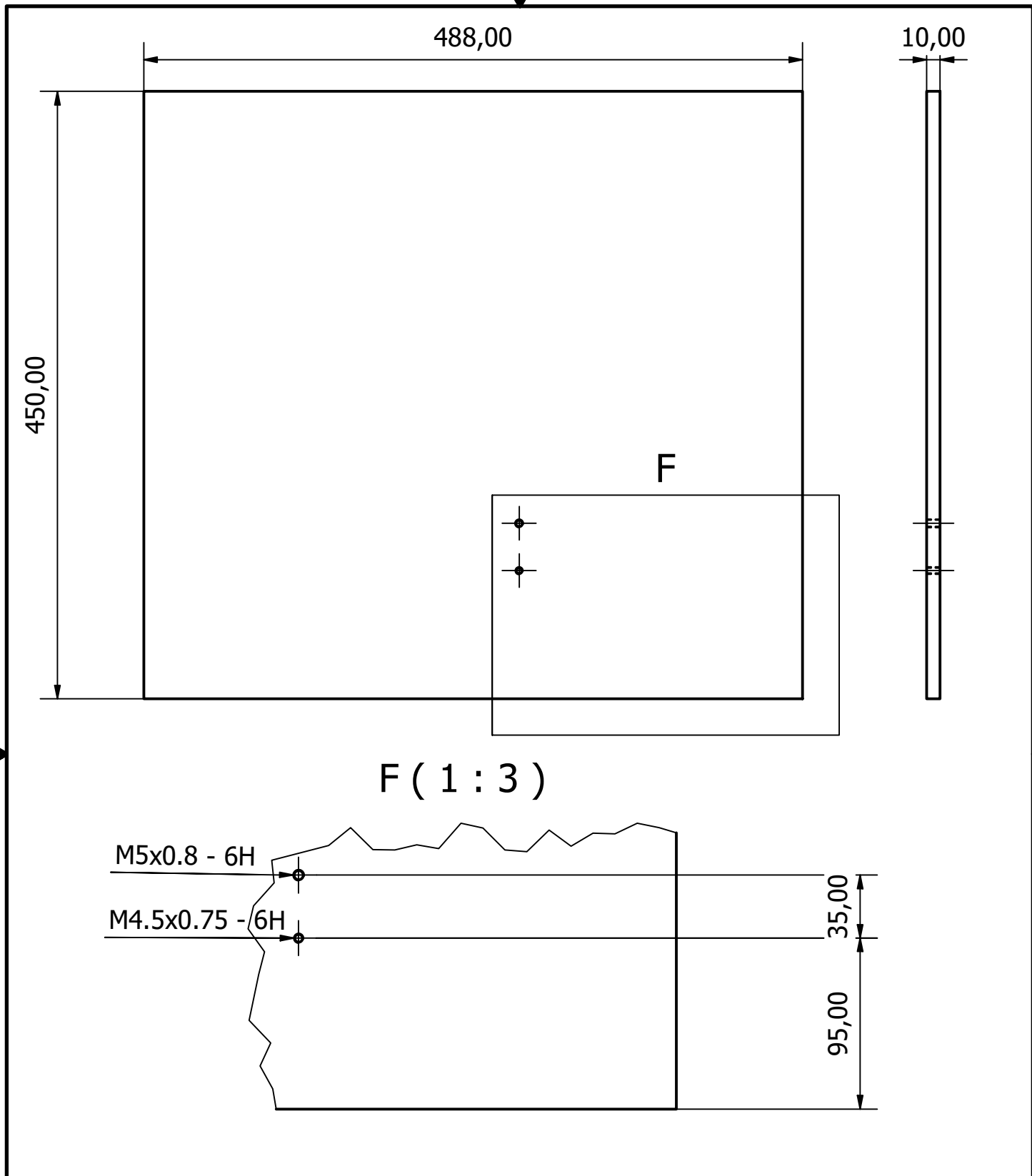


E-E (1 : 4)

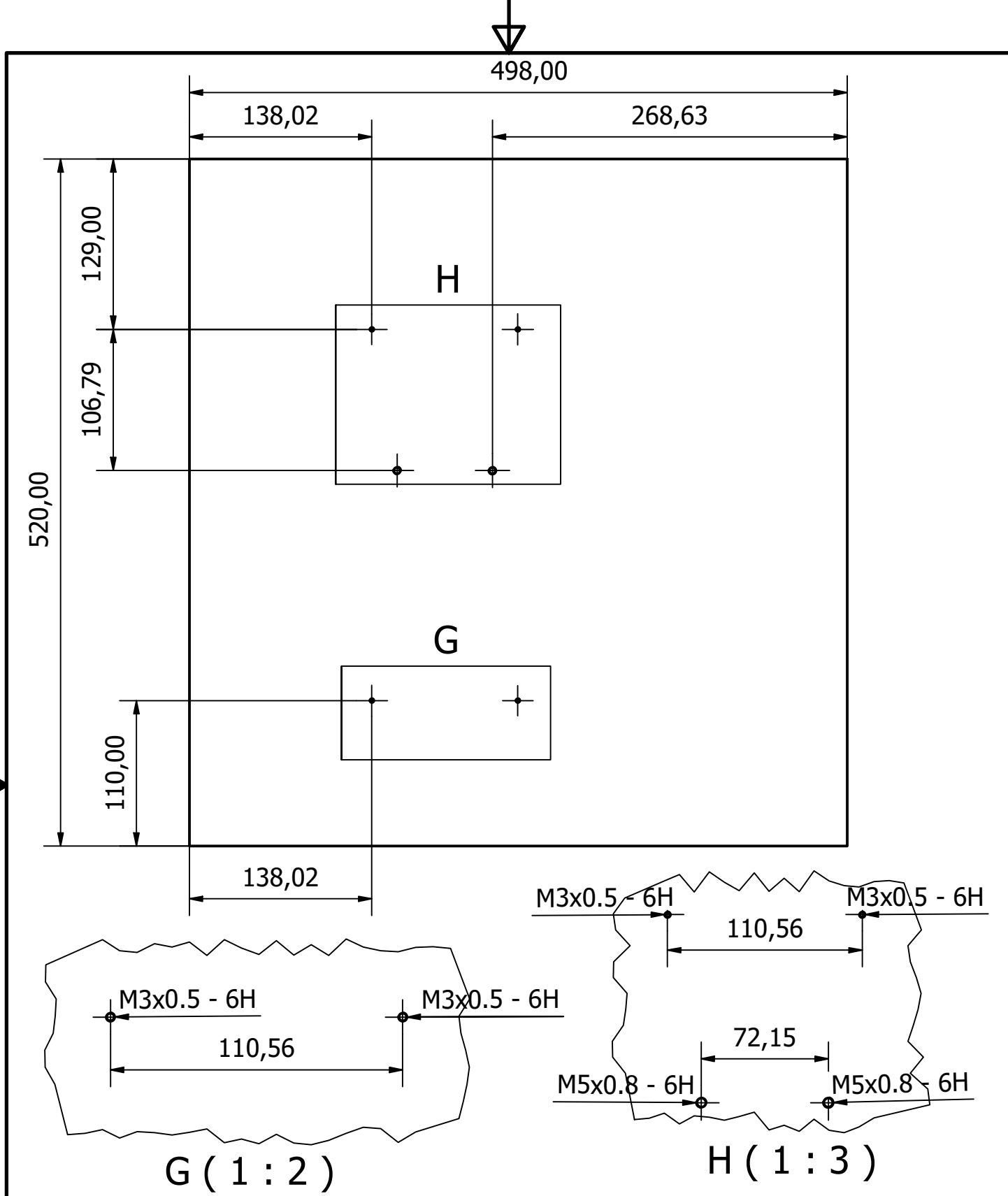
D (1 : 2)



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>			
FECHA	05/02/2025				
NUMERO DE PIEZA	1.3	PLANO PARED POSTERIOR CAJA		ESCALA	1 : 4
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO	5



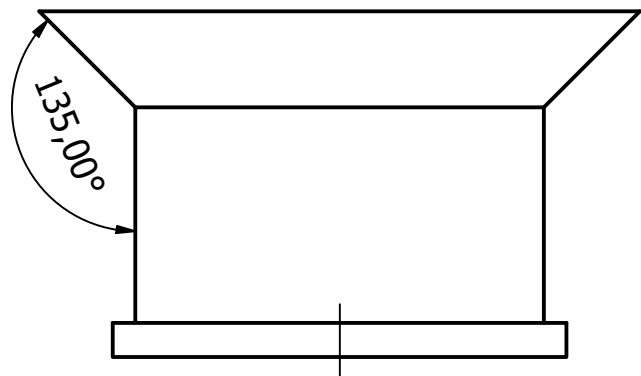
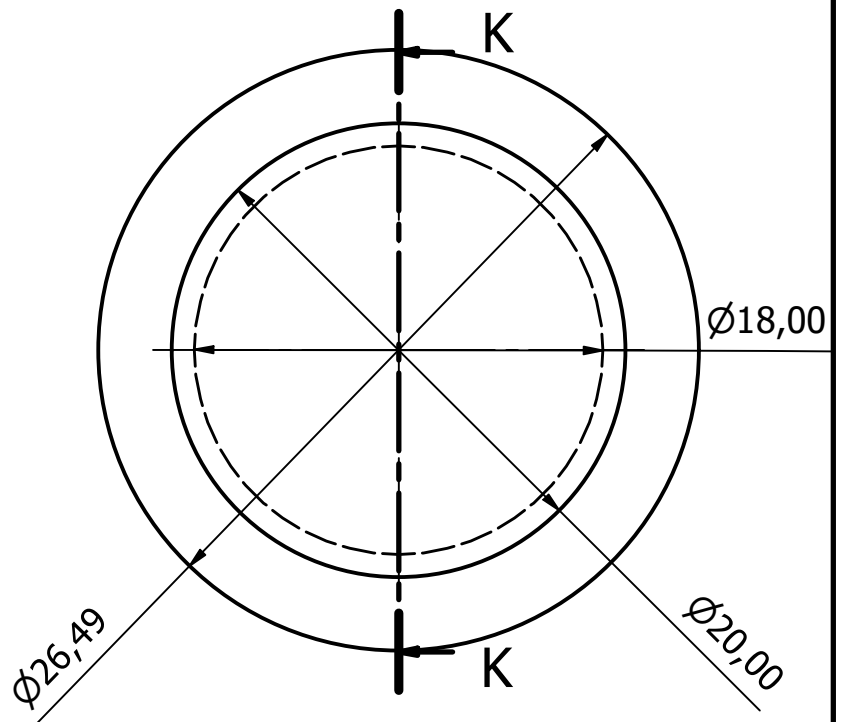
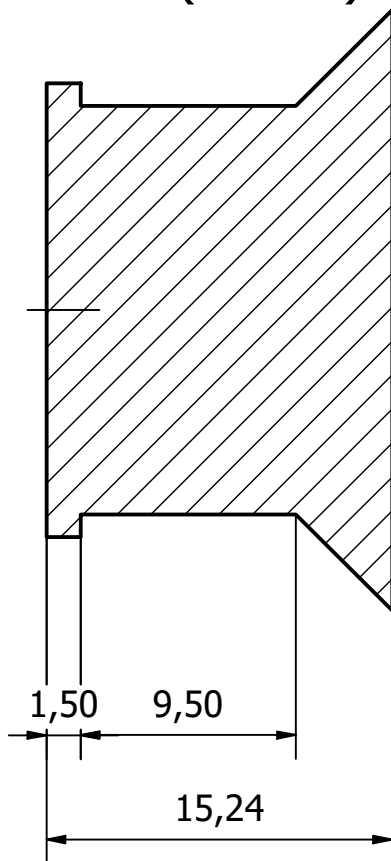
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	05/02/2025				
NUMERO DE PIEZA	1.4	PLANO PARED LATERAL CAJA 2		ESCALA	1 : 4
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO	6



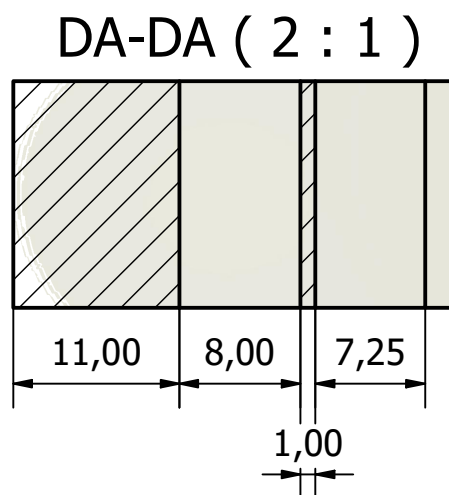
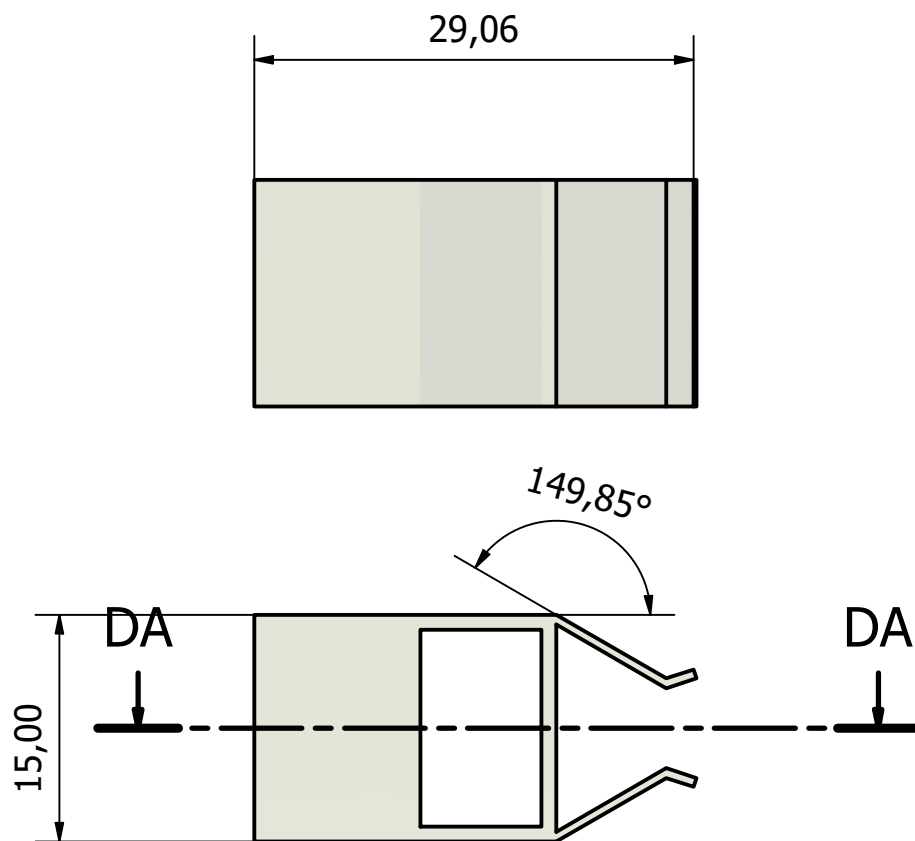
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i> 		
FECHA	05/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.5	PLANO BASE DE CAJA		ESCALA 1 : 4
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO 7



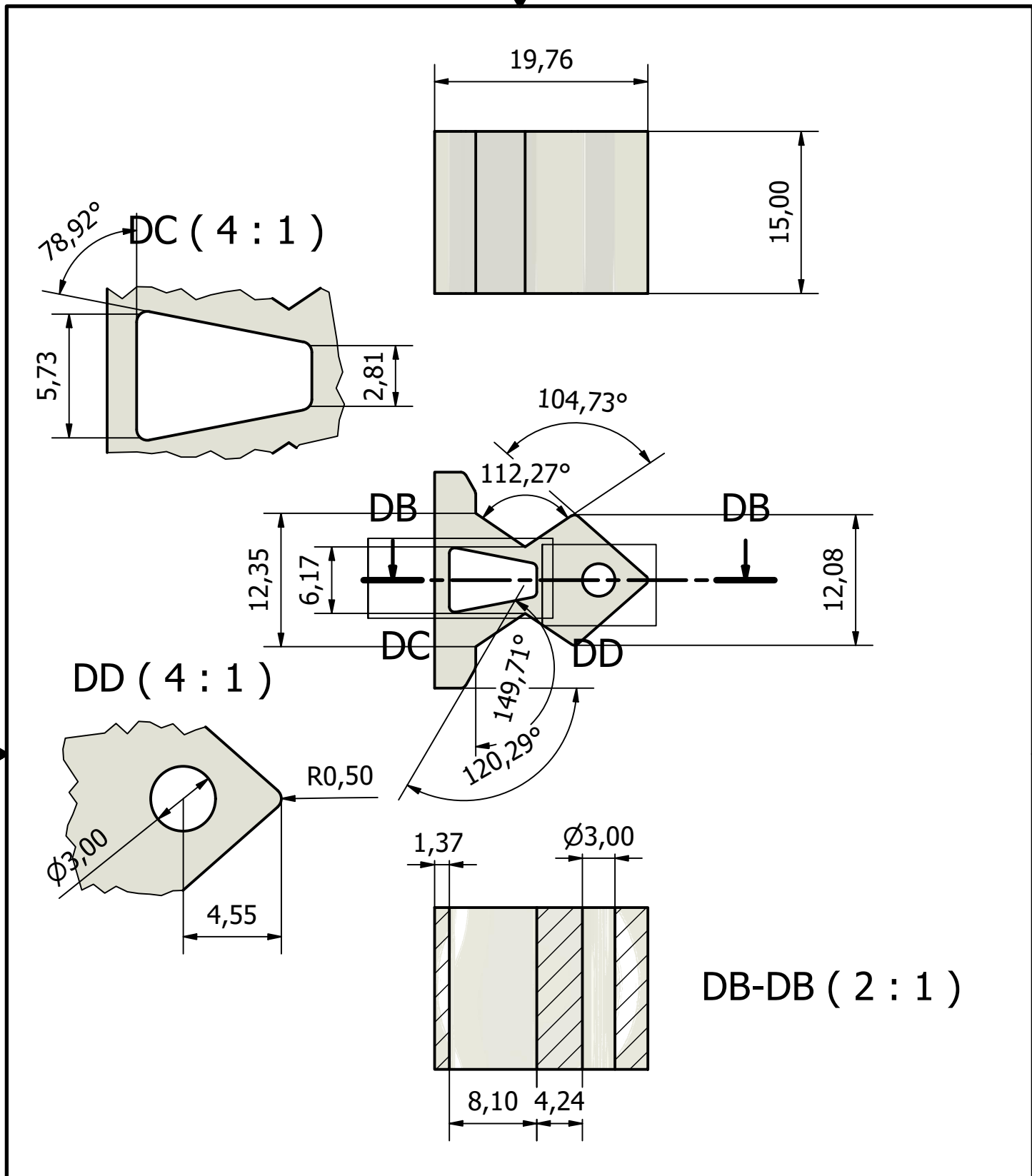
K-K (3 : 1)



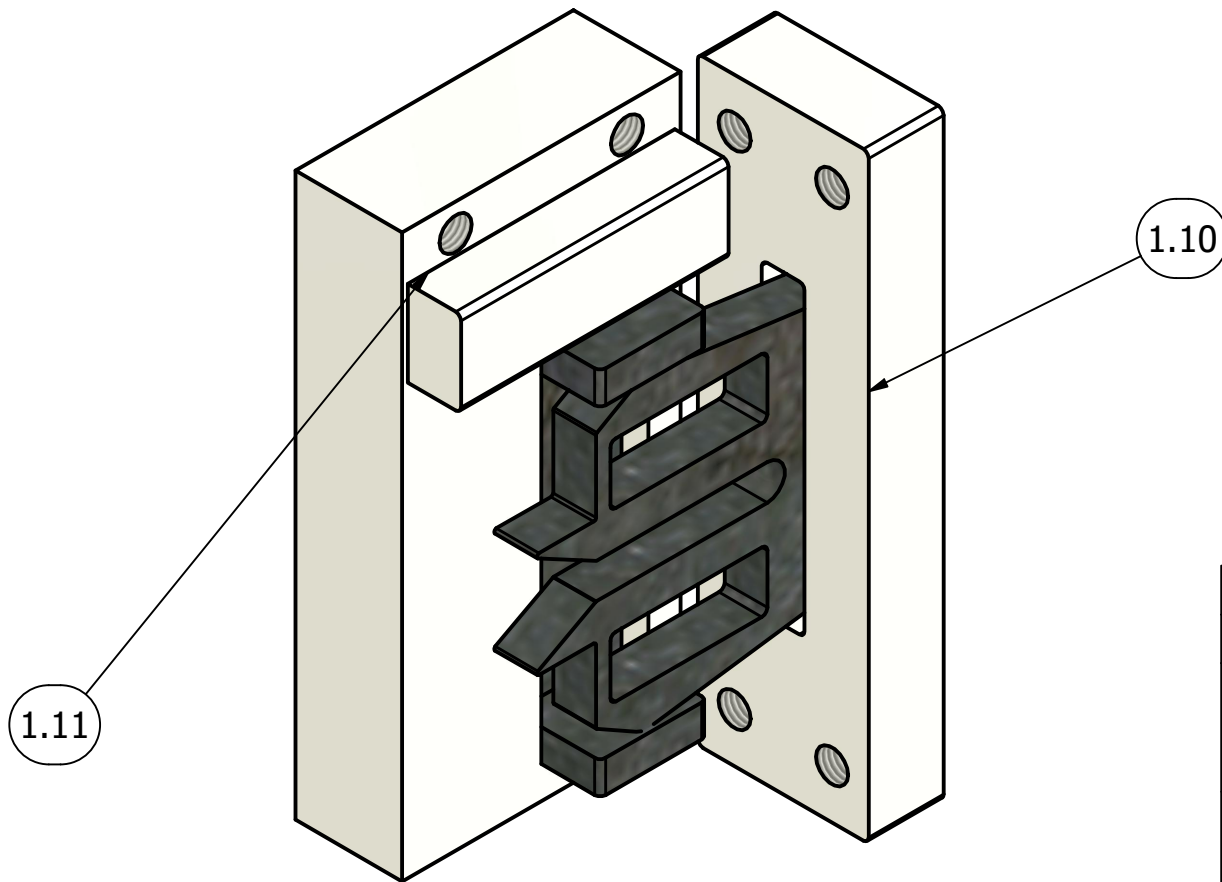
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>		
FECHA	05/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.7	PLANO POMO	ESCALA	3 : 1
MATERIAL	Plástico PMMA		Nº DE PLANO	9



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	27/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.8	PLANO ENCAJE CIERRE	ESCALA	2 : 1
MATERIAL	Plástico PMMA		Nº DE PLANO	10

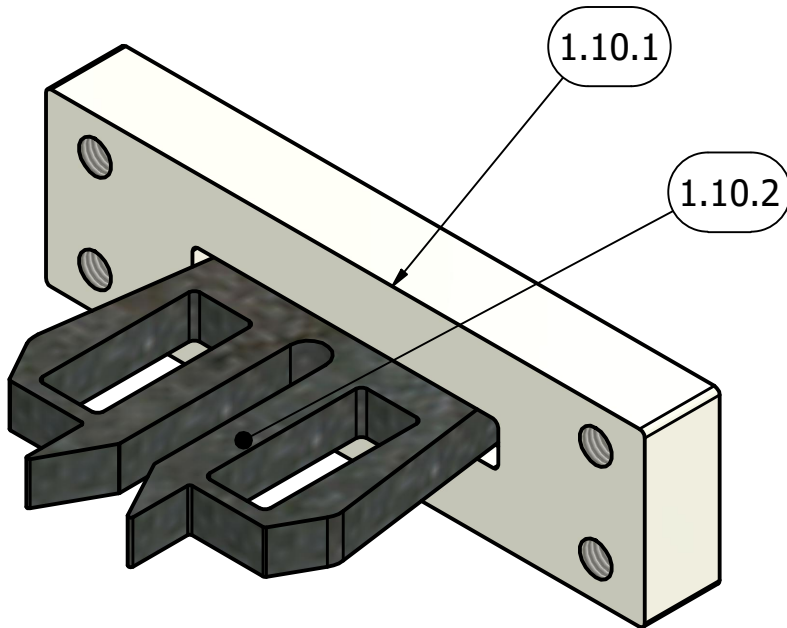


AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	27/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	1.9	PLANO CIERRE		ESCALA	2 : 1
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO	11



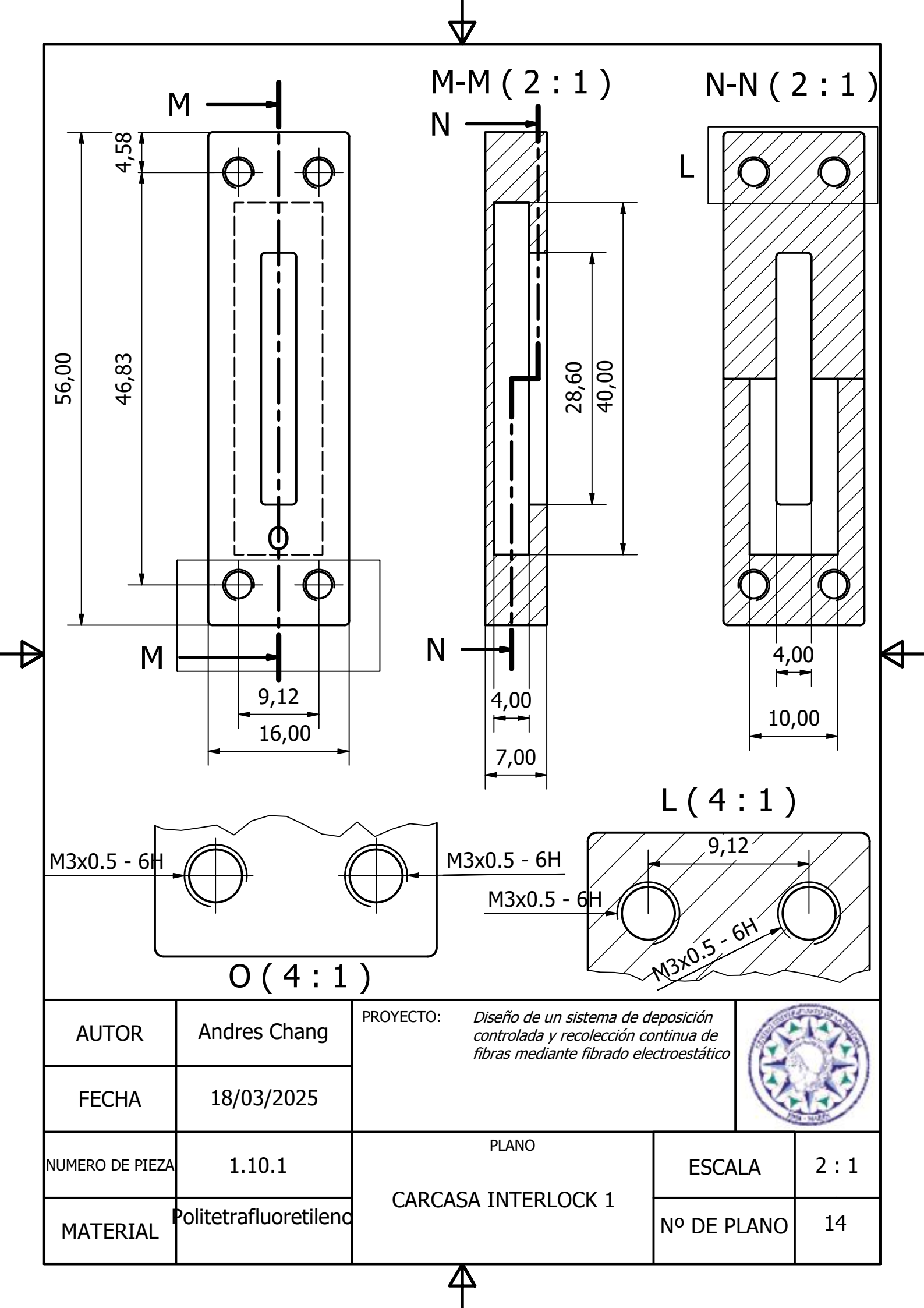
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1.10	1	Ensamblaje INTERLOCK 1
1.11	1	Ensamblaje INTERLOCK 2

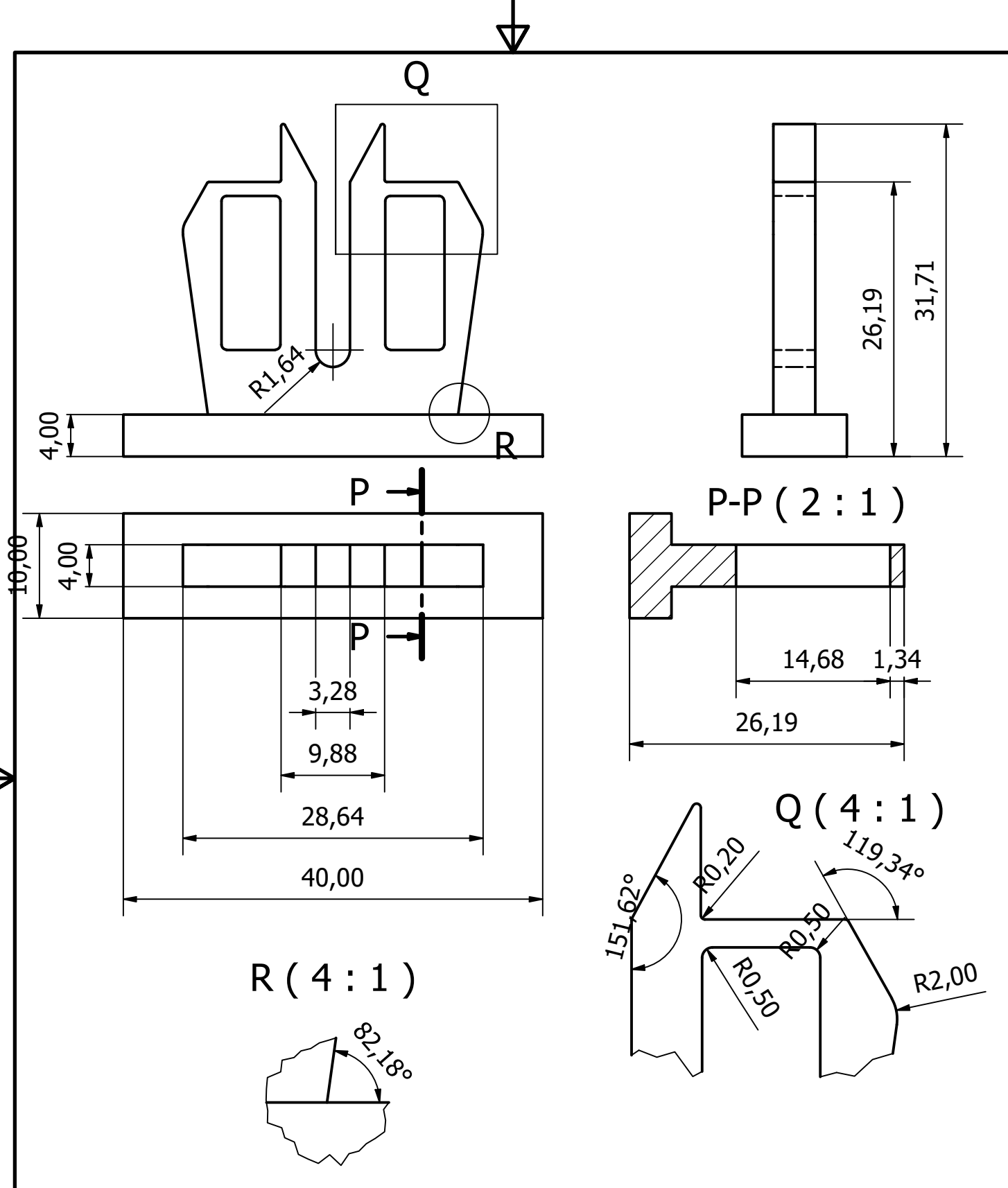
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	13/02/2025			
NUMERO DE PIEZA		PLANO INTERLOCK	ESCALA	2 : 1
MATERIAL			Nº DE PLANO	12



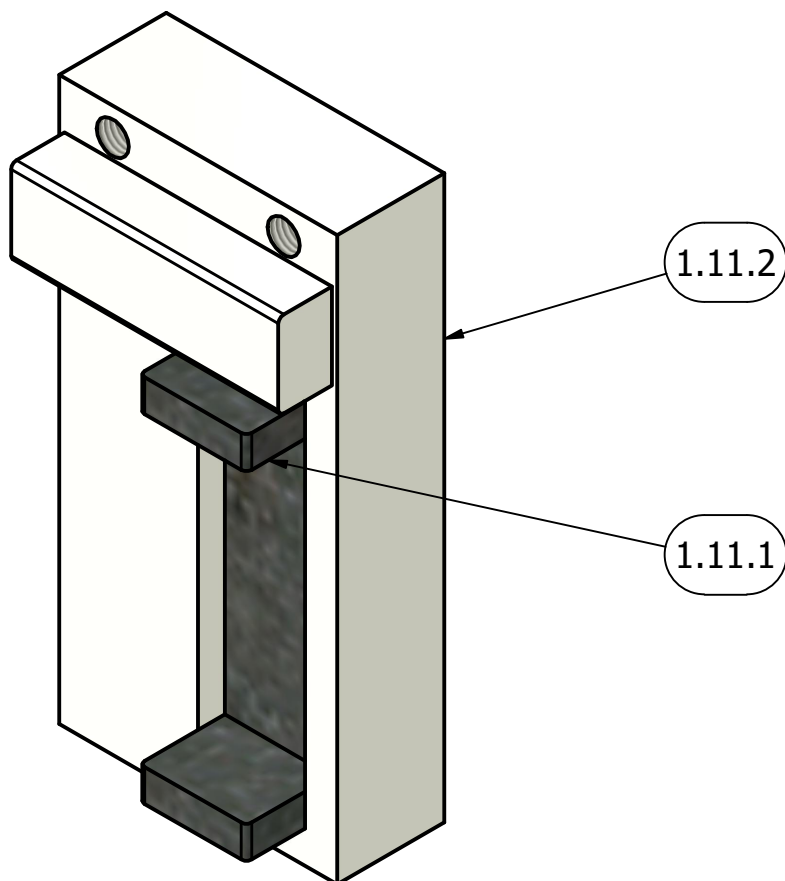
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
1.10.1	1	CARCASA INTERLOCK 1	Politetrafluoretileno
1.10.2	1	PIEZA METÁLICA INTERLOCK 1	Acero

AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	18/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.10	PLANO INTERLOCK 1	ESCALA	2 : 1
MATERIAL			Nº DE PLANO	13



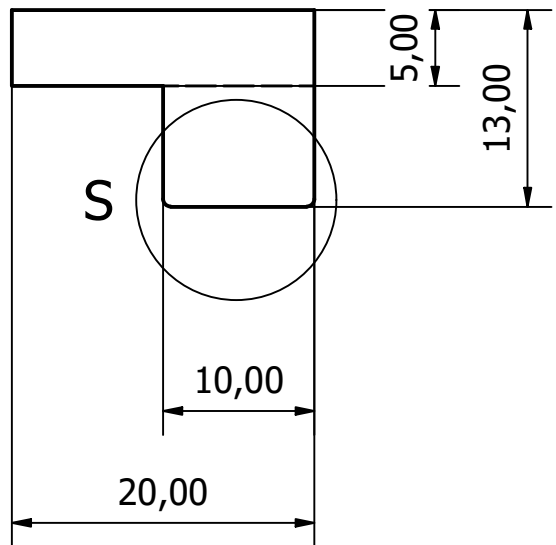
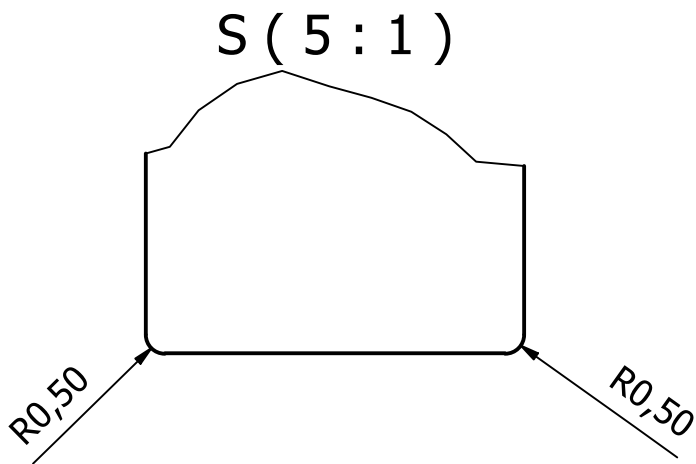
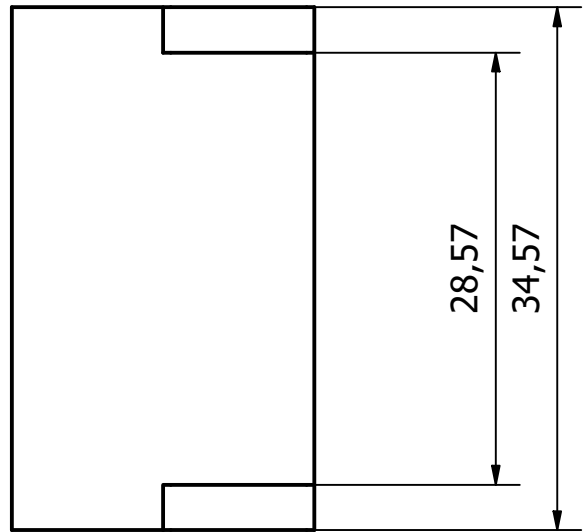
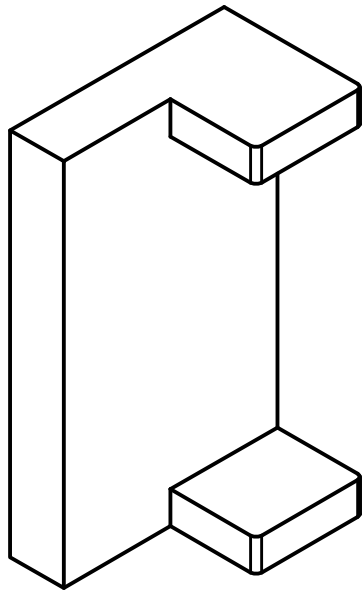


AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i> 		
FECHA	18/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.10.2	PLANO		ESCALA 2 : 1
MATERIAL	Acero	PIEZA METALICA INTERLOCK 1		Nº DE PLANO 15

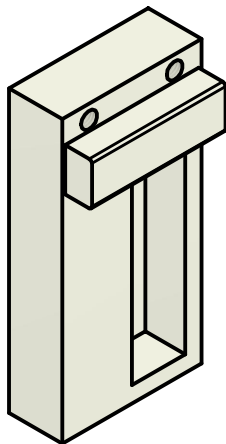


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
1.11.1	1	PIEZA METALICA INTERLOCK 2	Acero
1.11.2	1	CARCASA INTERLOCK 2	Politetraflu oretileno

AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	18/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.11	PLANO INTERLOCK 2	ESCALA	2 : 1
MATERIAL			Nº DE PLANO	16



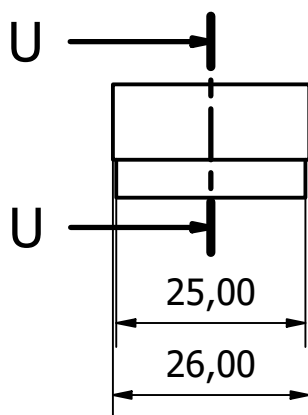
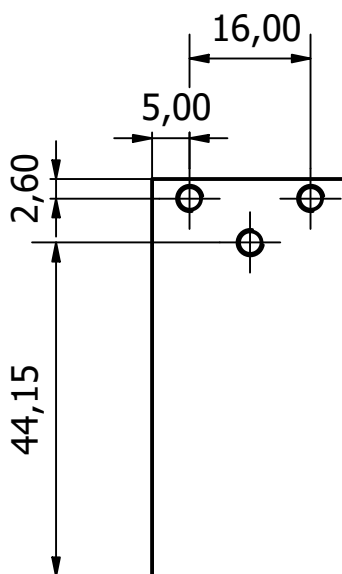
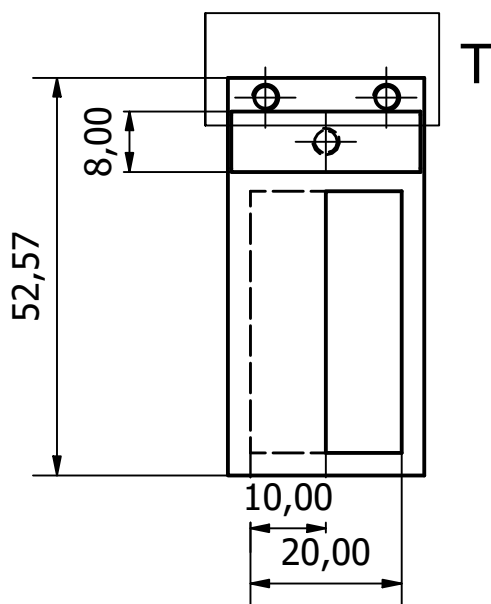
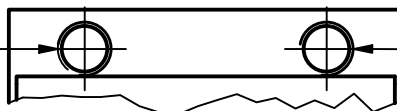
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	18/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.11.1	PLANO	ESCALA	2 : 1
MATERIAL	Acero	PIEZA METALICA INTERLOCK 2	Nº DE PLANO	17



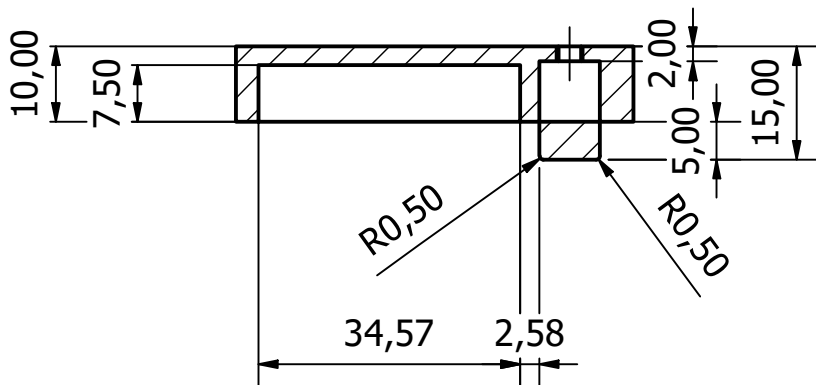
T (2 : 1)

M3x0.5 - 6H

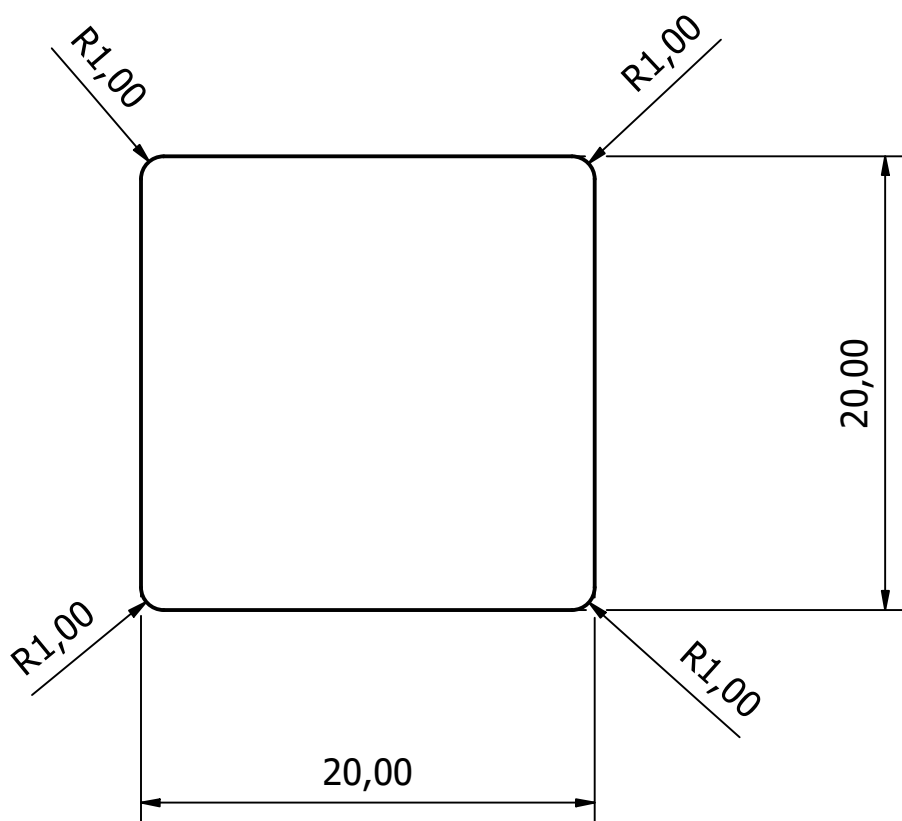
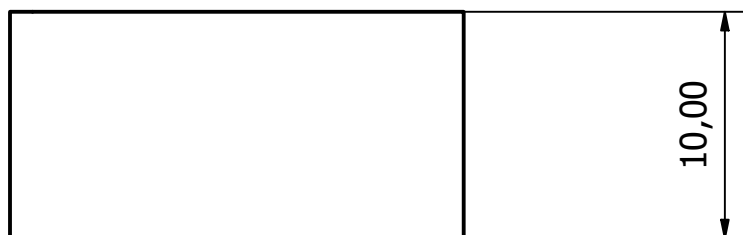
M3x0.5 - 6H



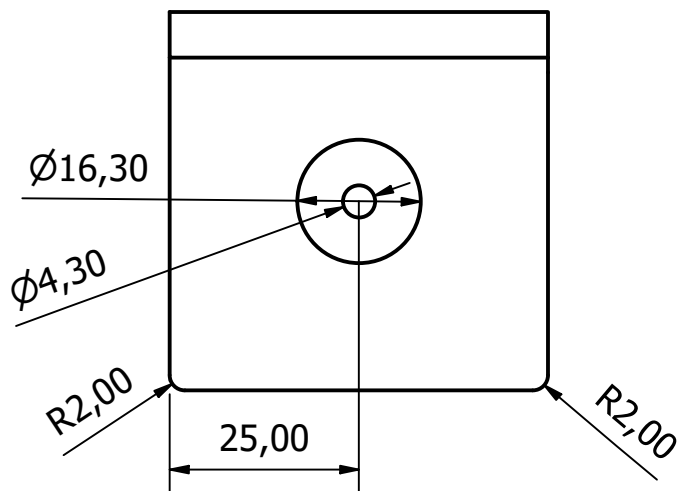
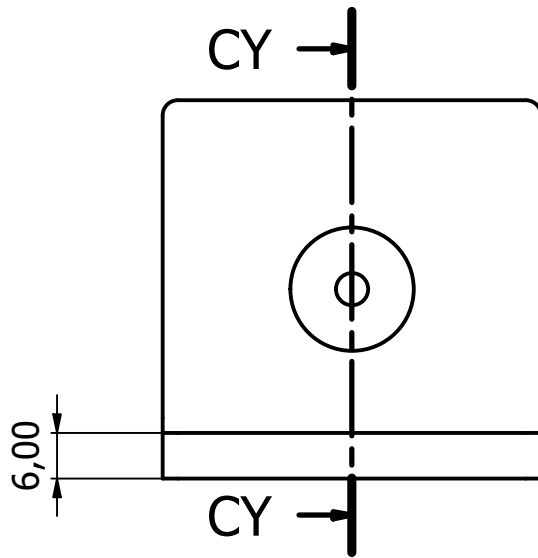
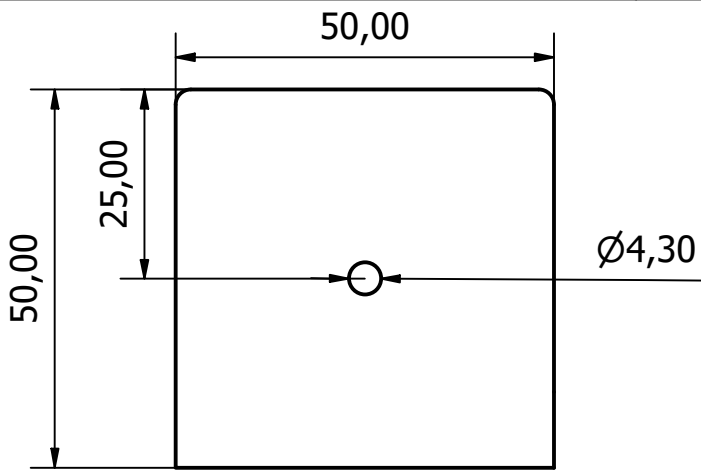
U-U (1 : 1)



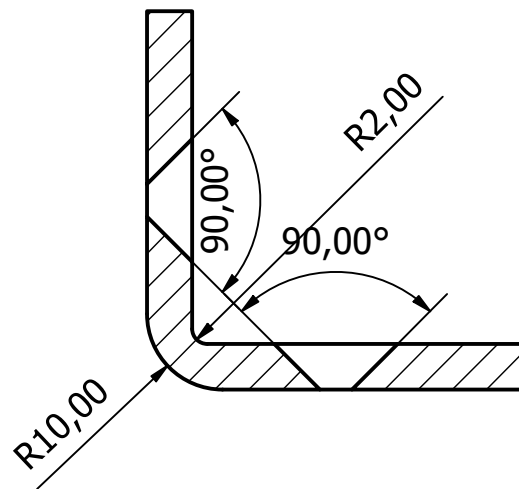
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	18/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	1.11.2	PLANO CARCASA INTERLOCK 2	ESCALA	1 : 1
MATERIAL	Politetrafluoretileno		Nº DE PLANO	18



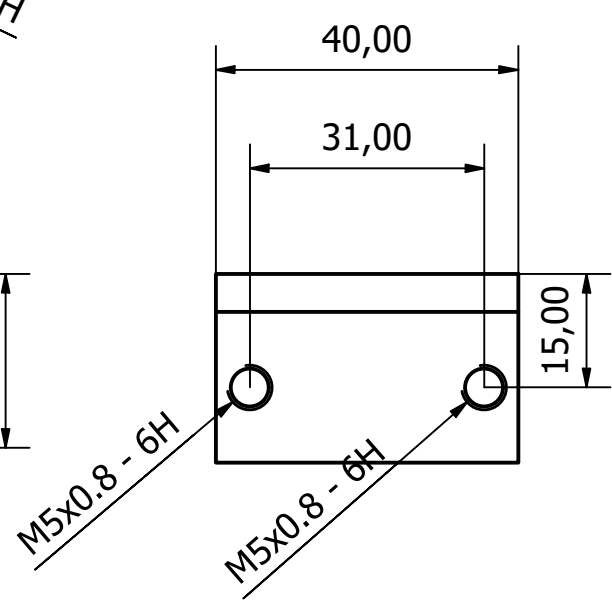
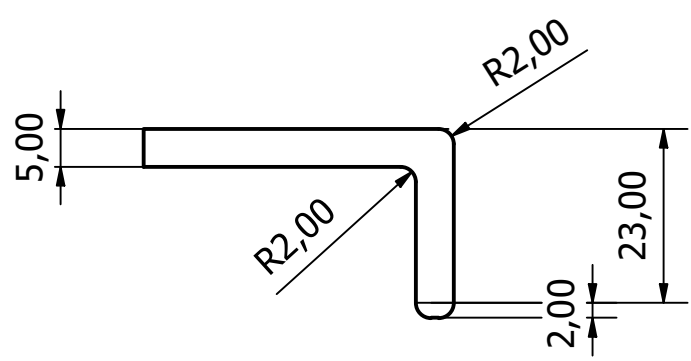
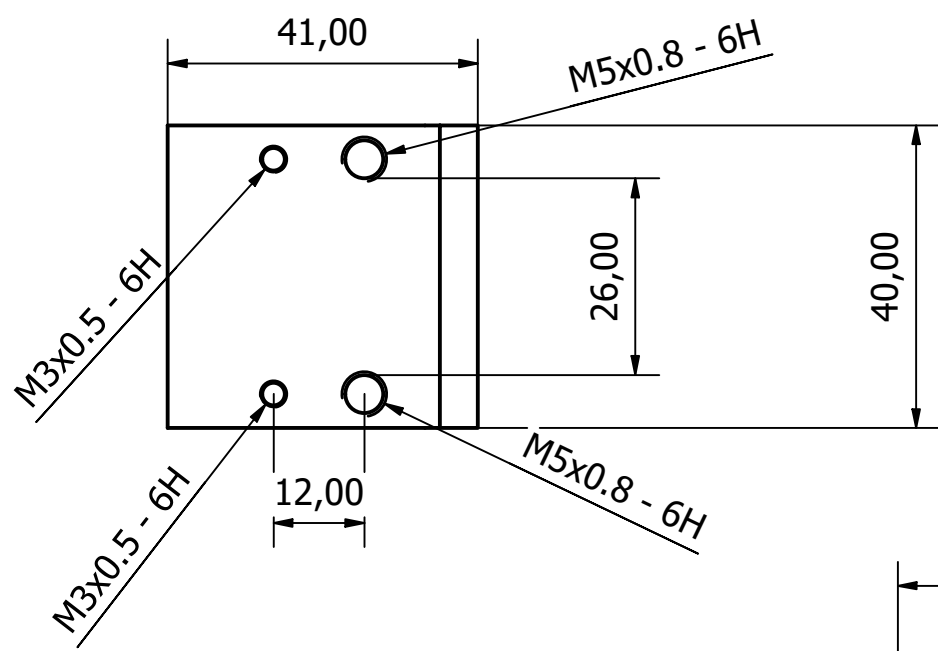
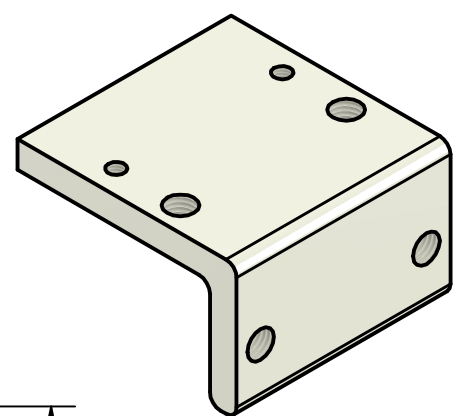
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	05/02/2025				
NUMERO DE PIEZA	1.12	PLANO PIE DE CAJA		ESCALA	3 : 1
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO	19



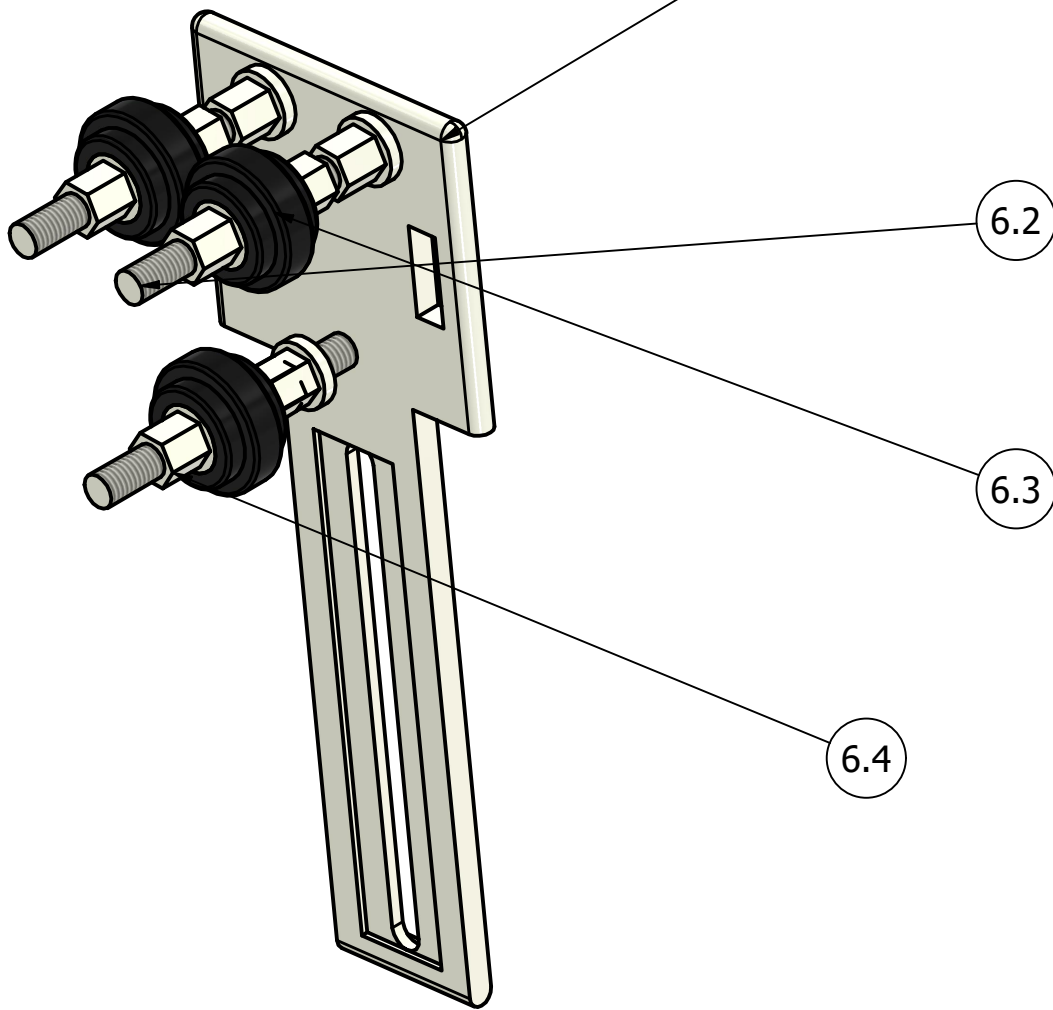
CY-CY (1 : 1)



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	06/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	3	PLANO ESCOBILLA		ESCALA	1 : 1
MATERIAL	Aluminio			Nº DE PLANO	20



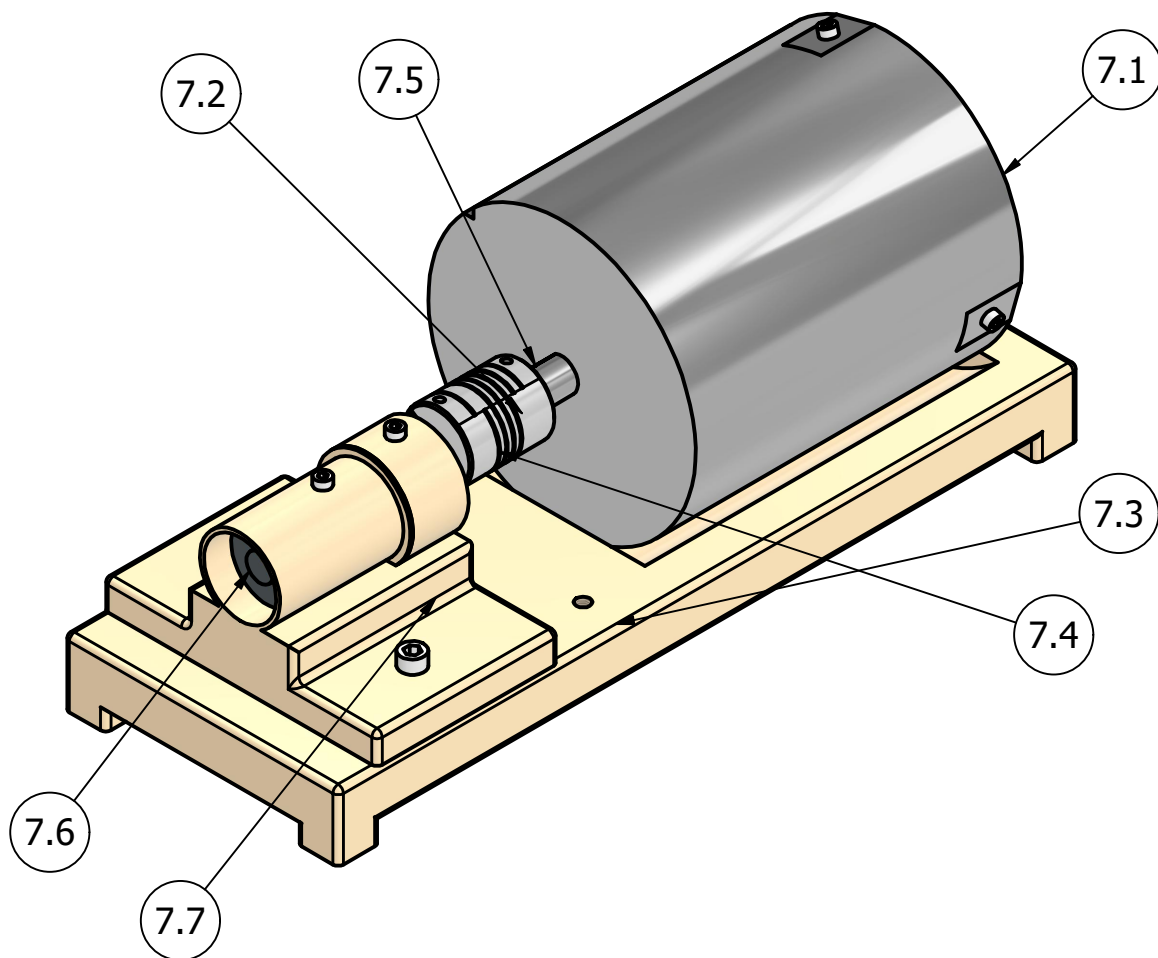
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	08/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	5	PLANO		ESCALA	1 : 1
MATERIAL	Politetrafluoretileno	PLACA MOTOR		Nº DE PLANO	21



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
6.1	1	SUJECCIÓN	Politetrafluoretileno
6.2	3	TORNILLO	Politetrafluoretileno
6.3	3	RUEDA	Resina acetálica, negra
6.4	6	TUERCA Y ARANDELA	

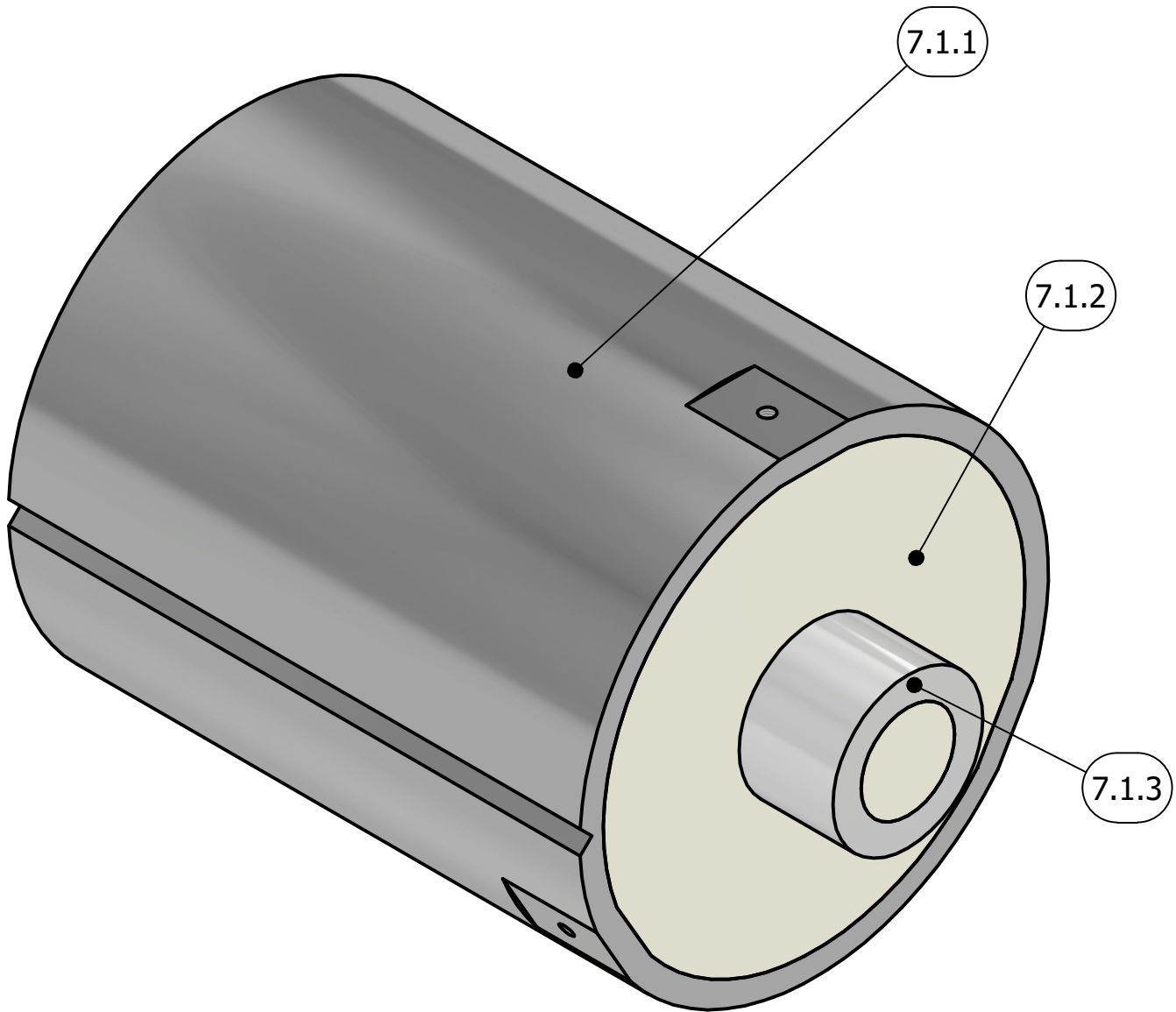
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	09/03/2025			
NUMERO DE PIEZA	6	PLANO ENSAMBLE SUJECCIÓN CON TUERCAS	ESCALA	1 : 1
MATERIAL			Nº DE PLANO	22



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
7.1	1	CILINDRO COLECTOR
7.2	1	EJE CILINDRO
7.3	1	SUJECION DEL RODAMIENTO
7.4	1	ACOPLAMIENTO DE EJE
7.5	1	PERNO PARA EJE
7.6	1	MOTOREDUCTOR
7.7	1	ACOPLE MOTOR

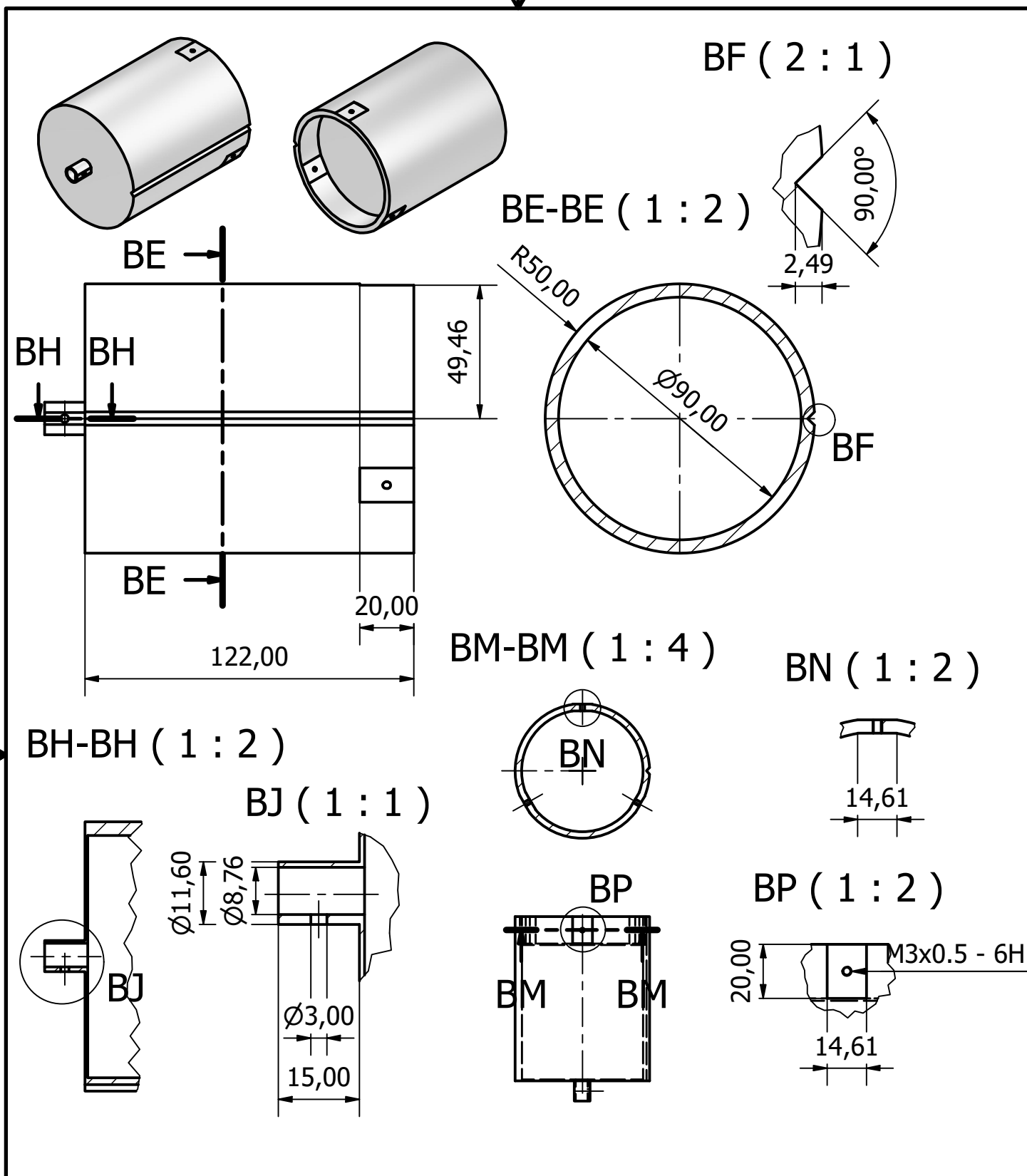
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>	
FECHA	28/02/2025		
NUMERO DE PIEZA	7	PLANO ENSAMBLAJE CILINDRO	ESCALA 1 : 2
MATERIAL			Nº DE PLANO 24



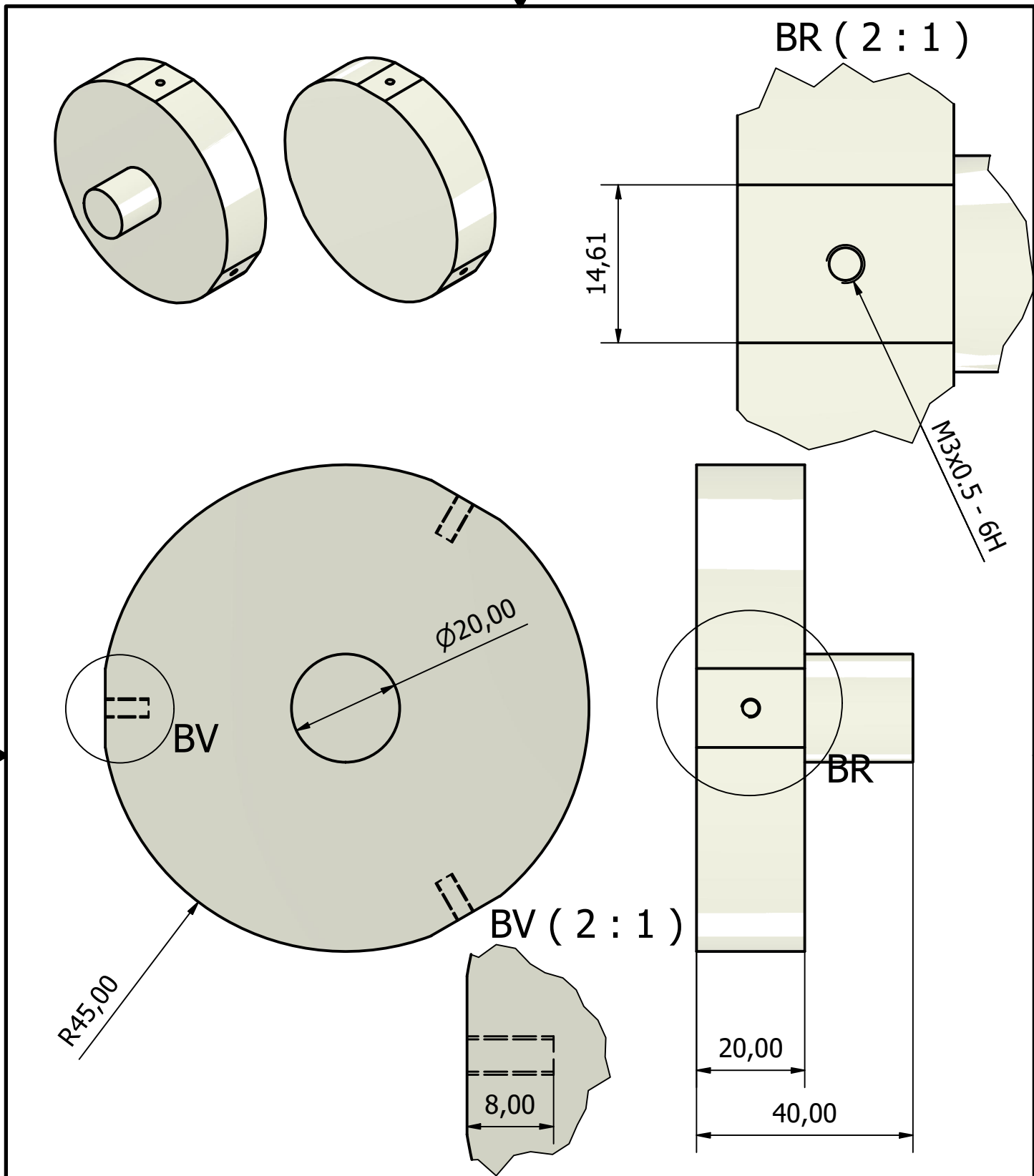
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
7.1.1	1	CUERPO PRINCIPAL	Acero inoxidable AISI 304
7.1.2	1	ACOPLE	Politetrafluoretileno
7.1.3	1	RODAMIENTO	Aluminio

AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>		
FECHA	13/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	7.1	PLANO CILINDRO COLECTOR	ESCALA	1 : 1
MATERIAL			Nº DE PLANO	25

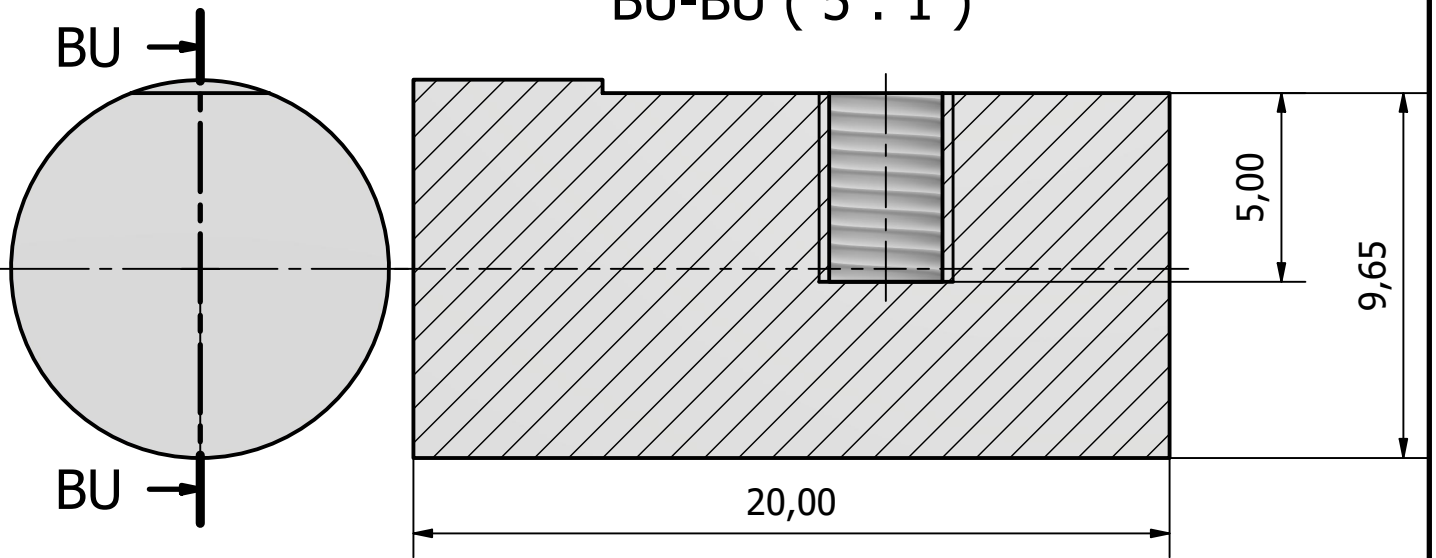


AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>		
FECHA	13/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	7.1.1	PLANO CUERPO PRINCIPAL		ESCALA 1 : 4
MATERIAL	Acero inoxidable AISI 304			Nº DE PLANO 26



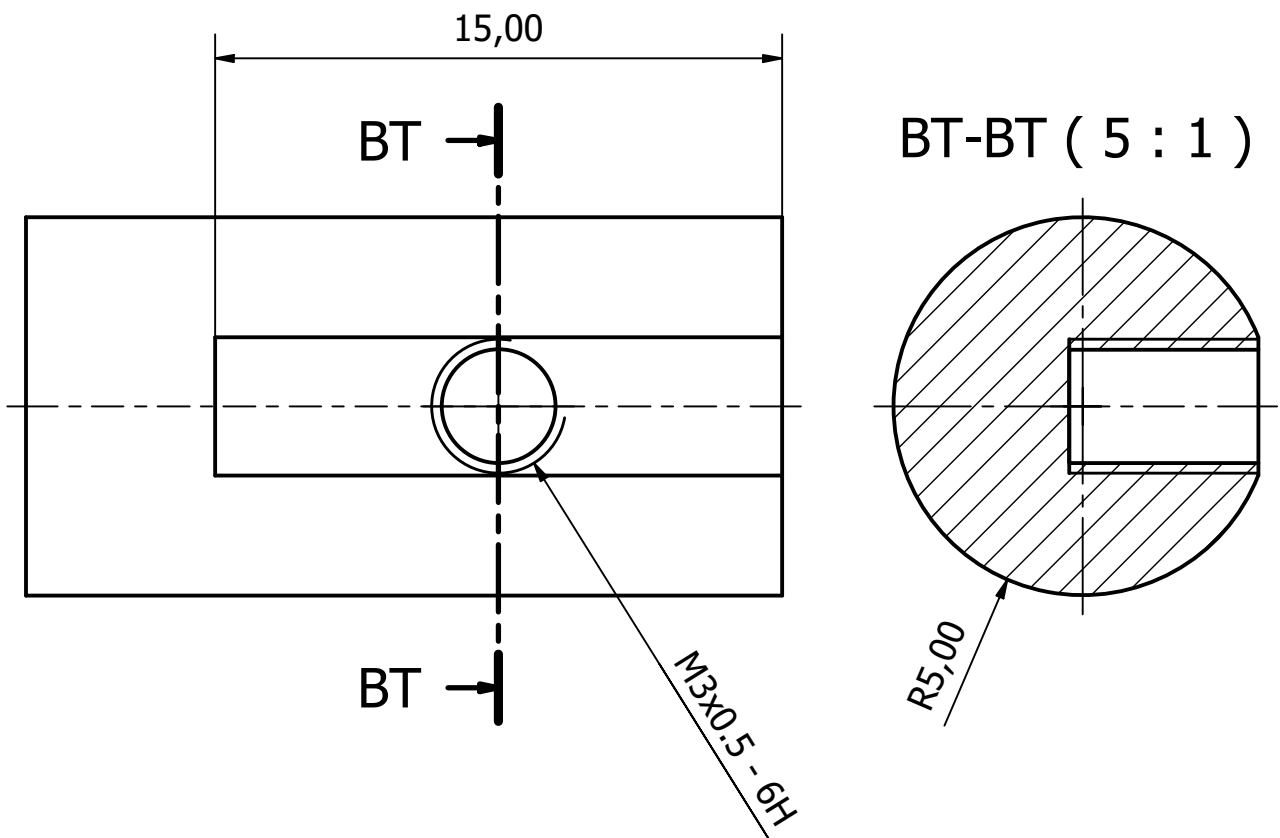
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>		
FECHA	13/02/2025			
NUMERO DE PIEZA	7.1.2	PLANO	ESCALA	1 : 2
MATERIAL	Politetrafluoretileno	ACOPLE	Nº DE PLANO	27

BU-BU (5 : 1)

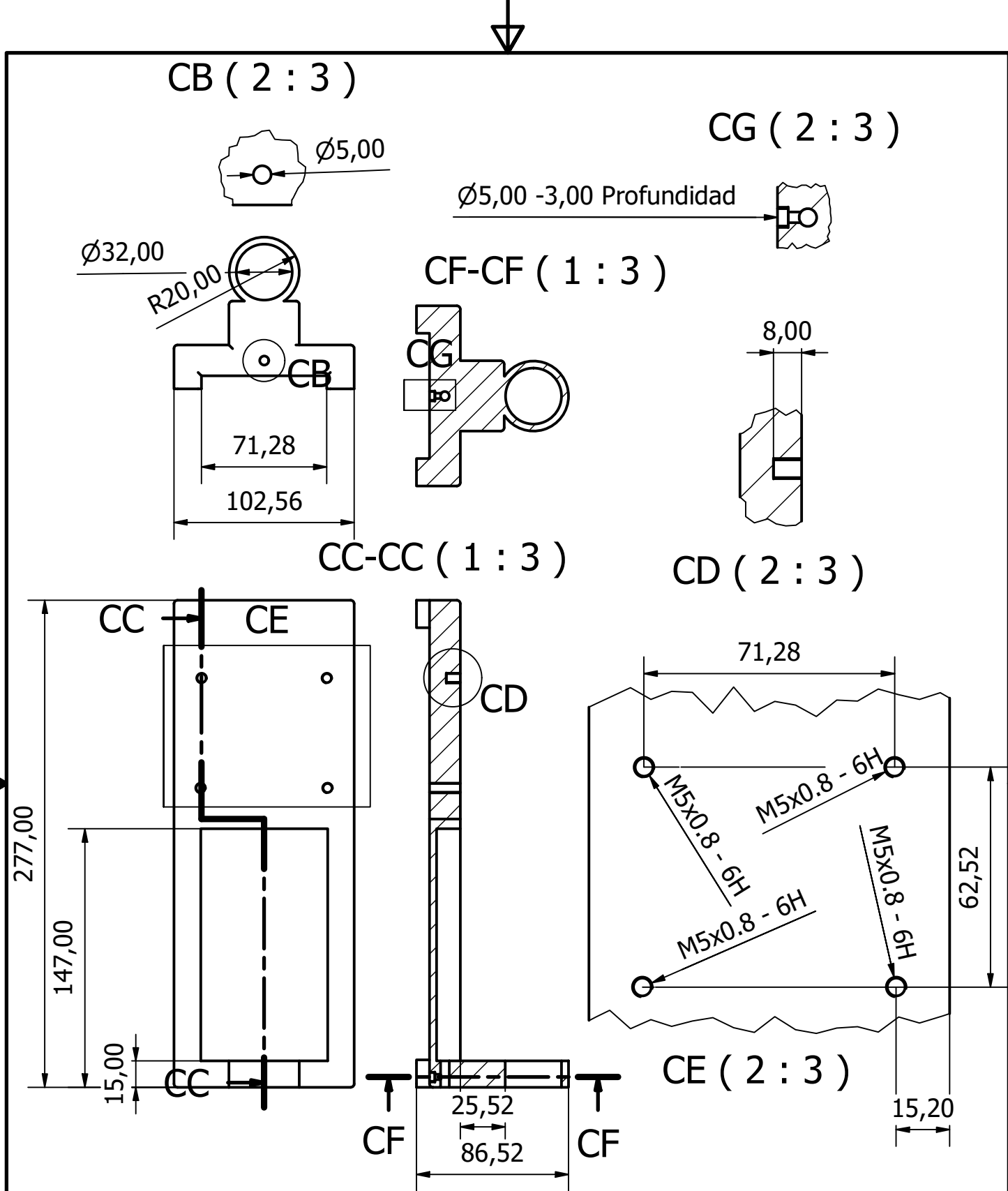


BT

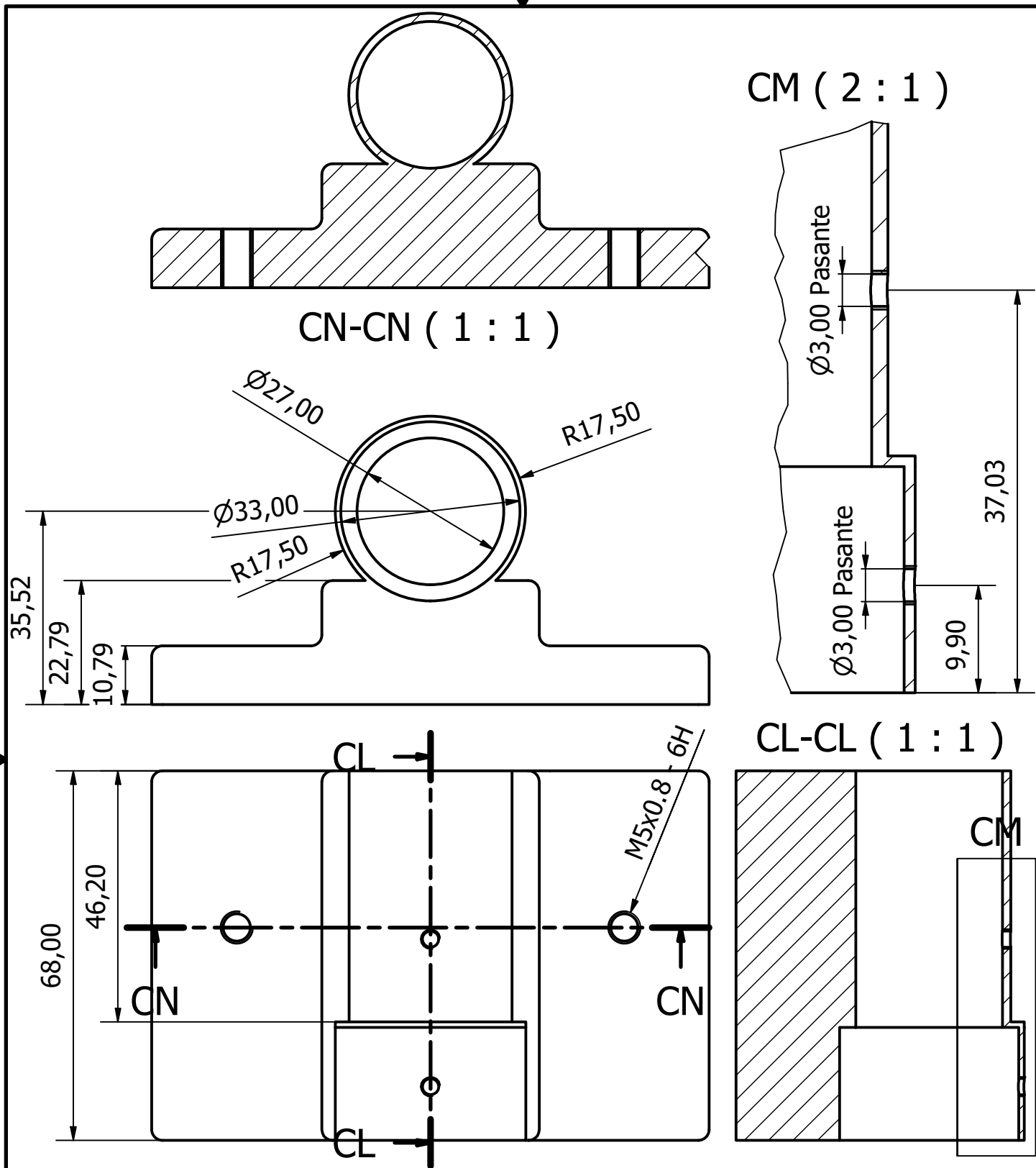
BT-BT (5 : 1)



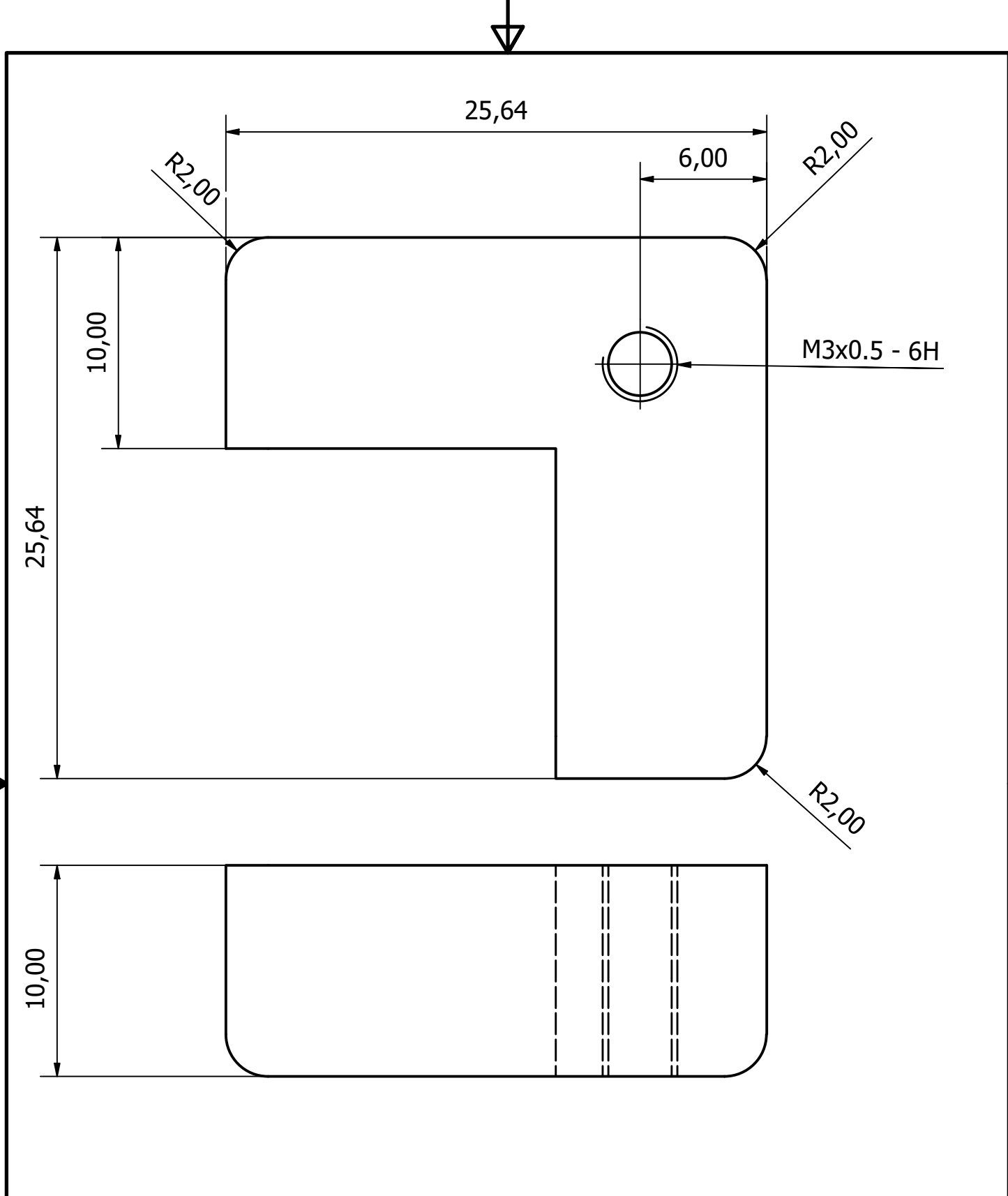
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	18/02/2025				
NUMERO DE PIEZA	7.2	PLANO		ESCALA	5 : 1
MATERIAL	Resina acetálica, blanca	EJE CILINDRO		Nº DE PLANO	28



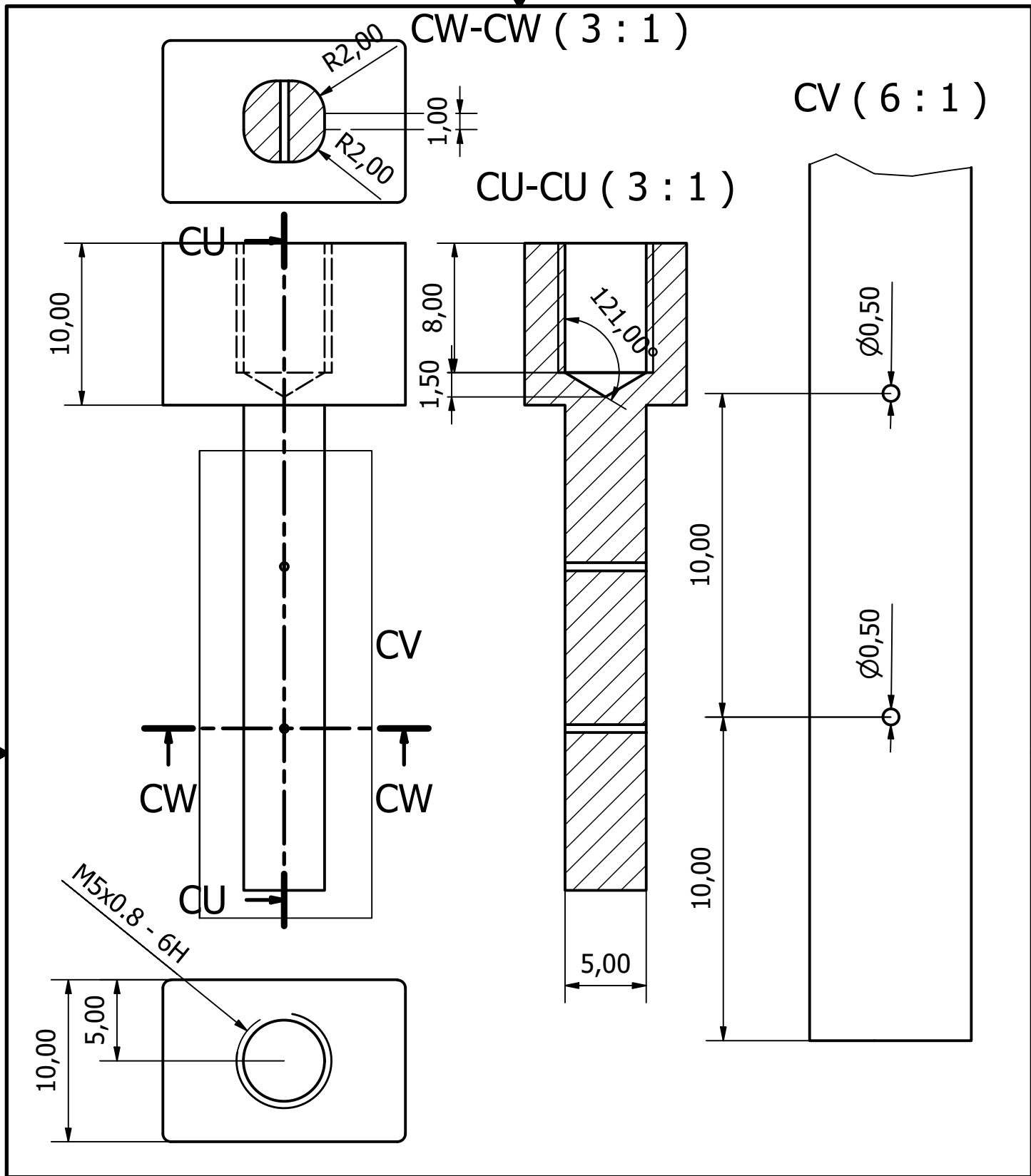
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	27/02/2025				
NUMERO DE PIEZA	7.3	PLANO		ESCALA	1 : 3
MATERIAL	Polietileno, alta densidad	SUJECION DEL RODAMIENTO		Nº DE PLANO	29



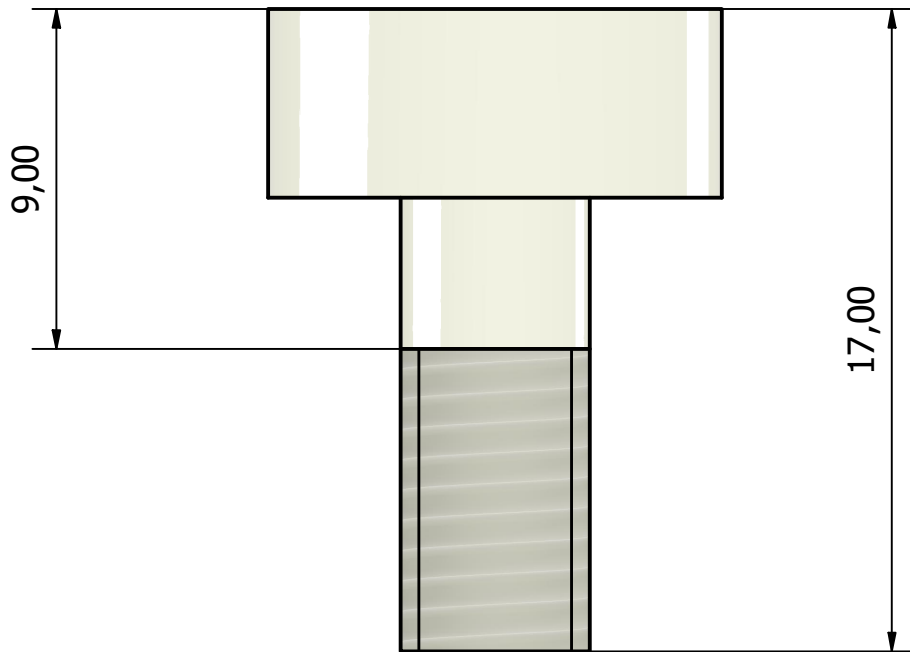
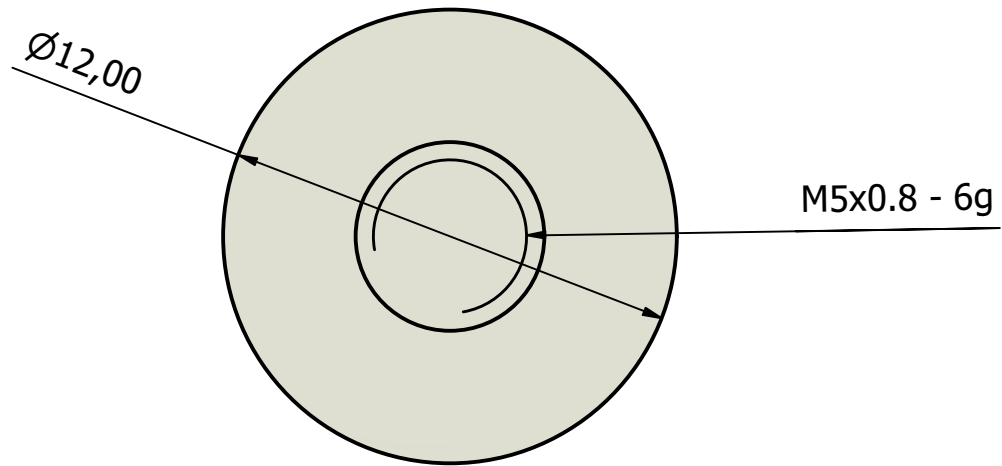
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>			
FECHA	10/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	7.6	PLANO ACOPLE MOTOR		ESCALA	1 : 1
MATERIAL	Polietileno, alta densidad			Nº DE PLANO	30



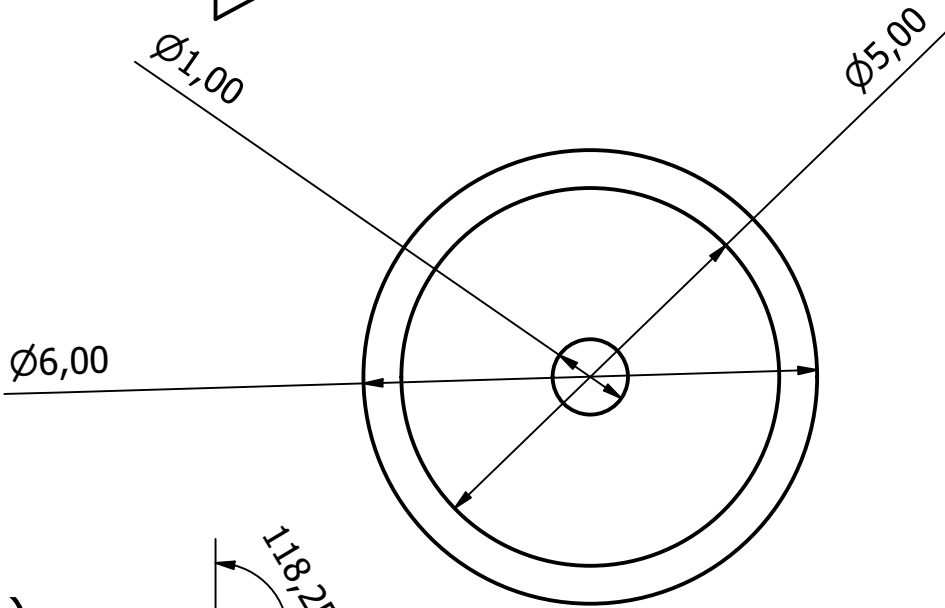
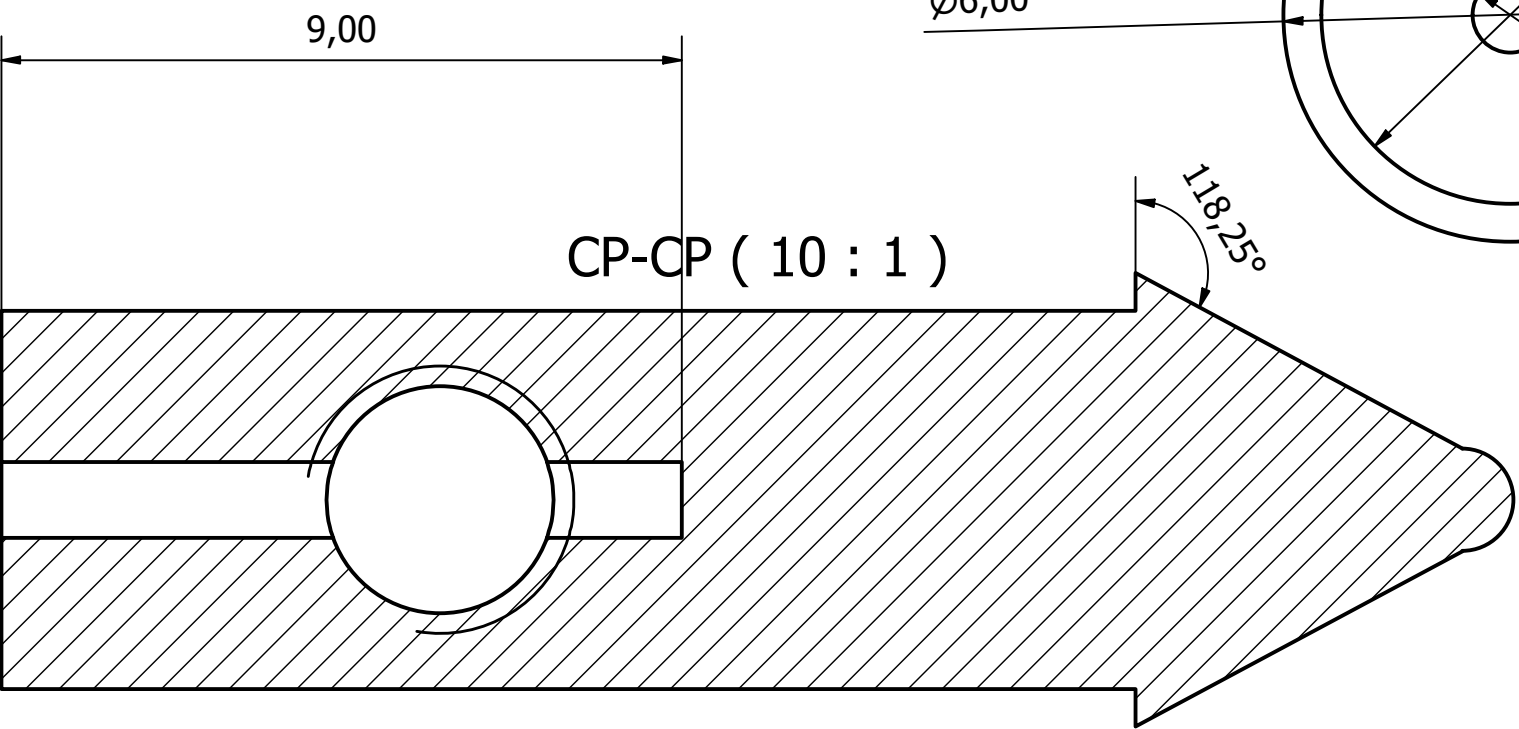
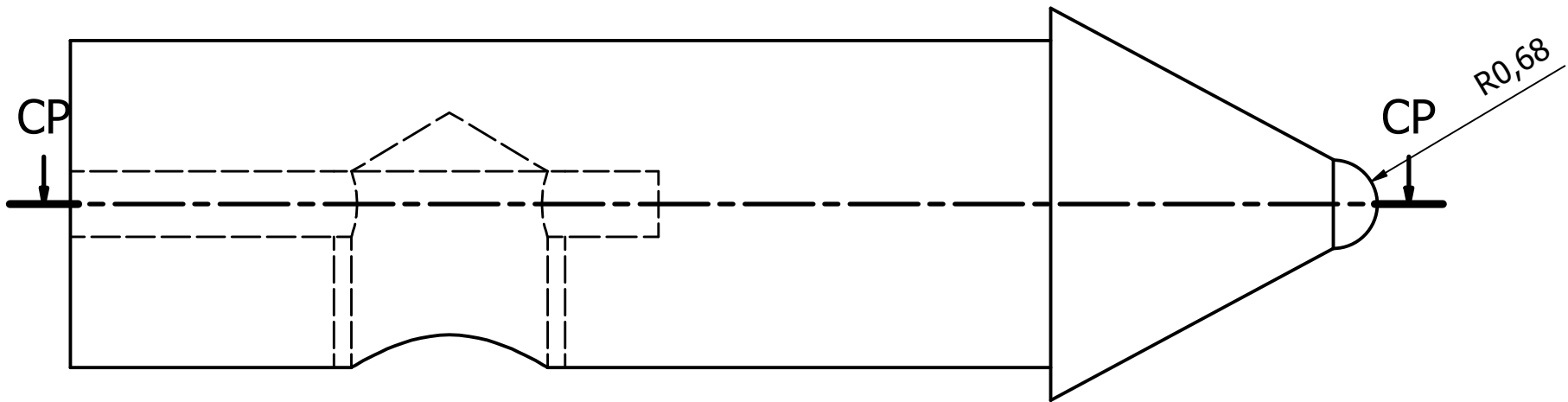
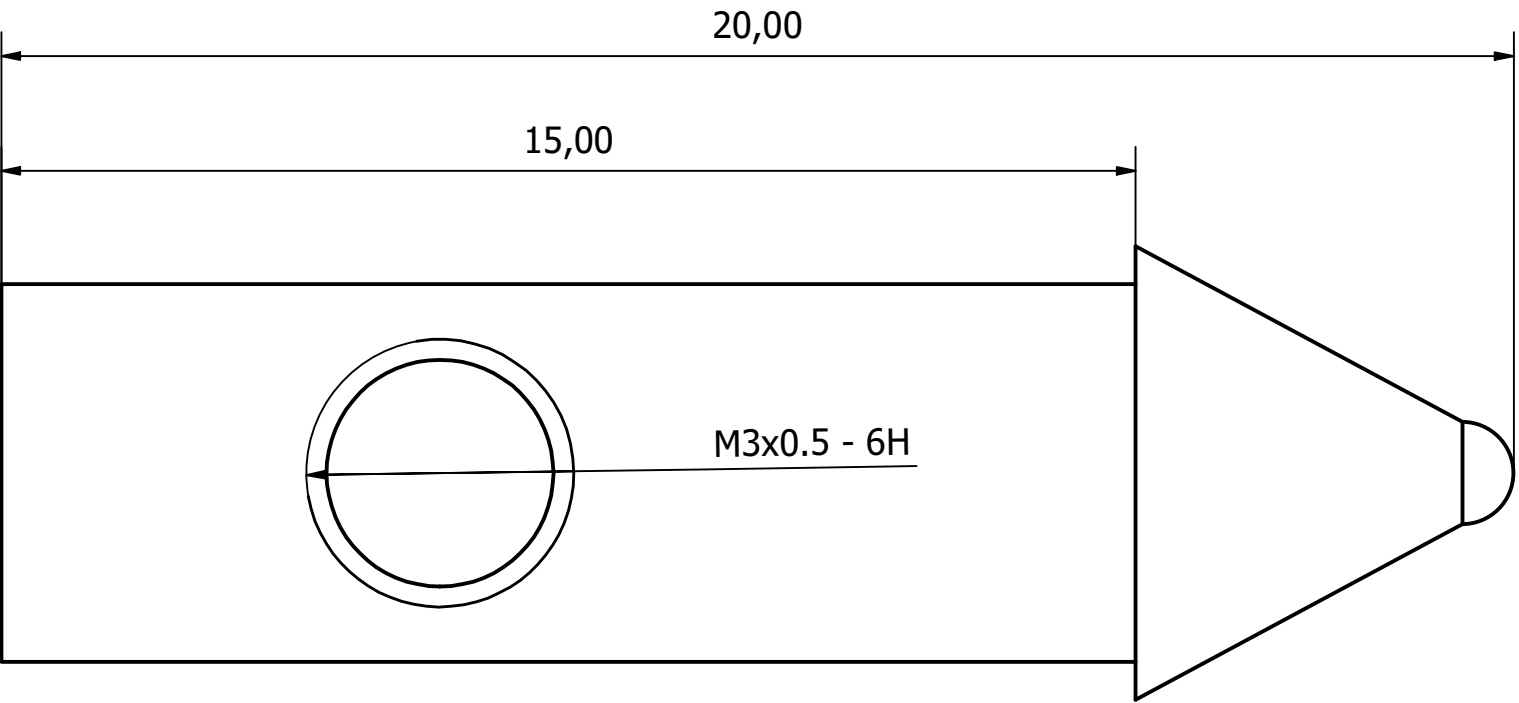
AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	11/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	8	PLANO PATA		ESCALA	4 : 1
MATERIAL	Plástico PMMA			Nº DE PLANO	31



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	12/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	9	PLANO SOPORTE DE AGUJA		ESCALA	3 : 1
MATERIAL	Politetrafluoretileno			Nº DE PLANO	32



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electroestático</i>			
FECHA	13/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	10	PLANO		ESCALA	5 : 1
MATERIAL	Politetrafluoretileno	AJUSTE SOPORTE		Nº DE PLANO	33



AUTOR	Andres Chang	PROYECTO: <i>Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección continua de fibras mediante fibrado electrostático</i>			
FECHA	13/03/2025				
NUMERO DE PIEZA	13	PLANO PUNTA DE COBRE		ESCALA	10 : 1
MATERIAL	Bronce			Nº DE PLANO	34



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección
continua de fibras mediante fibrado electroestático*

PLIEGO DE CONDICIONES

Universida_deVigo

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES.

ELEMENTO UTILIZADOS.....	75
Bomba de jeringa	75
Jeringa tubo de conexión y aguja.....	75
Generador de alta tensión.....	76
Termohigrómetro	76
Caja de metacrilato.....	76
Ensamblaje de posicionamiento del sistema de movimiento en el eje X e Y	77
Contraelectrodo	77
MANUAL DE USUARIO	77
Montaje del sistema experimental.....	77

PLIEGO DE CONDICIONES

ELEMENTO UTILIZADOS

Bomba de jeringa

Para este proyecto se ha optado por utilizar una bomba de jeringa KDS Legato, serie 100, un equipo de precisión diseñado para ofrecer un control exacto sobre el caudal de líquidos. Gracias a este dispositivo, es posible impulsar la solución polimérica con la regularidad y la velocidad necesarias para que fluya hacia la aguja sin interrupciones ni variaciones bruscas. Este nivel de control resulta fundamental en procesos como el electrospinning, donde incluso pequeñas fluctuaciones en el flujo pueden alterar la morfología de las fibras generadas. La bomba, silenciosa y robusta, permite programar el ritmo de infusión con total exactitud, aportando estabilidad al sistema y facilitando la repetibilidad de los ensayos.

El sistema opera en modo continuo, con un movimiento fluido y constante que se logra gracias a un microprocesador integrado que gobierna un motorreductor paso a paso. Este motor, meticuloso en su funcionamiento, transmite el movimiento a través de un tornillo de avance, el cual está sincronizado mediante una correa dentada y un conjunto de poleas que se encargan de trasladar el impulso mecánico con precisión. Cada componente, desde la electrónica hasta el sistema de transmisión, trabaja de forma coordinada para mantener un ritmo uniforme, asegurando así la estabilidad del proceso en todo momento.

Voltaje	200-240 V y 50/60 Hz.
Tamaño de jeringas	10 µl - 60 ml.
Flujo de operación	0.1 µl/h - 426 ml/h
Dimensiones	23 x 15,25 x 13 cm
Peso	12 kg
Datos en fila 6	Datos en col 2

Tabla P 1: Características de la bomba de jeringa KDS Legato, seri 100.

Jeringa tubo de conexión y aguja

Para el sistema de infusión se ha optado por una jeringa de vidrio Hamilton® de la serie 1000 GASTIGHT®, con un volumen de 10 ml y un diámetro interior de 14,6 mm, rematada en una punta cónica. Esta jeringa, plenamente compatible con la bomba utilizada en el montaje, permite alcanzar un nivel de precisión milimétrica tanto en el volumen dispensado como en la velocidad de bombeo, aspectos cruciales en un proceso tan sensible como el electrohilado. Gracias a su diseño, es posible trabajar cómodamente en un rango de caudal que va de 0,1 a 125 ml/h, margen ideal para controlar el flujo de la solución polimérica con exactitud y estabilidad.

La aguja utilizada, también de Hamilton®, está fabricada en acero inoxidable, presenta una longitud de 51 mm y corresponde a un calibre 22, lo que ofrece un equilibrio adecuado entre diámetro de salida y control del chorro. Dado que esta aguja se instala en el interior de la caja de metacrilato, se requiere una conducción segura del fluido desde la jeringa hasta la punta, lo cual se resuelve mediante el uso de

dos tubos semirrígidos de poliamida. La elección de este material no es casual: la poliamida, además de ofrecer una buena resistencia mecánica, es químicamente inerte frente a los disolventes utilizados, lo que evita interacciones indeseadas con la solución.

El primero de estos tubos tiene un diámetro exterior de 6 mm y un interior de 4 mm, mientras que el segundo, más estrecho, presenta un diámetro exterior de 4 mm y un paso interno de 2,7 mm. Esta combinación asegura una transición fluida entre la jeringa y la aguja, sin fugas ni obstrucciones, garantizando un flujo constante y sin alteraciones durante todo el proceso.

Generador de alta tensión

Para llevar a cabo el proceso de electrohilado, se ha empleado el generador de alta tensión ES30P-5W, fabricado por Gamma High Voltage Research. Se trata de un equipo compacto y tiene las características que se observan en la

Voltaje de entrada	90-240 VAC +/-10% 50-60HZ
Voltaje de salida	0 a 30 kV
Polaridad de salida	Positiva
Corriente de salida	0 a 166 μ A
Dimensiones	12,7 x 20,32 x 25,5 cm
Peso	2,27 kg

Tabla P 2: Características del generador de alta tensión ES30P

Termohigrómetro

El termohigrómetro utilizado en el montaje experimental es el modelo RS 413-7617, un instrumento preciso y fiable para el control de las condiciones ambientales durante el proceso. Está alojado en una carcasa fabricada en ABS, un material plástico que no solo aporta ligereza y resistencia mecánica, sino que, además, actúa como aislante eléctrico, una cualidad especialmente útil en entornos donde se trabaja con altos voltajes, como ocurre en el electrospinning. Esta elección de material evita interferencias o riesgos innecesarios, contribuyendo así a mantener la seguridad y la estabilidad durante las sesiones de trabajo.

Rango de temperaturas	-20 a 40 °C
Humedad relativa	20 al 80 %
Dimensiones	150 mm de diámetro y de 35 mm
Peso	0,175 kg,

Tabla P 3: Características del termohigrómetro

Caja de metacrilato

Dado el uso de altos voltajes en el proceso de electrohilado, se ha optado por realizar el montaje dentro de un recinto fabricado íntegramente en metacrilato. Esta elección no ha sido casual: el material ofrece una combinación ideal de propiedades para este tipo de aplicación. Por un lado, actúa como aislante eléctrico, lo que resulta esencial para trabajar con tensiones elevadas. Por otro, su transparencia facilita la supervisión del proceso sin necesidad de abrir el sistema, y su resistencia al impacto, entre 10

y 20 veces superior a la del vidrio, añade una capa adicional de seguridad frente a posibles golpes o manipulaciones accidentales.

La estructura de la caja se ha diseñado con unas dimensiones exteriores de 520 x 498 x 470 mm, mientras que en su interior dispone de un espacio útil de 500 x 450 x 488 mm, suficiente para manejar cómodamente todos los elementos del sistema.

Se han practicado diversos orificios en la carcasa, destinados a facilitar el paso y montaje de distintos componentes: el sistema de posicionamiento de la aguja, los conectores del generador de alta tensión, así como el tubo que conecta la jeringa con la aguja.

Además, la caja cuenta con una puerta frontal, equipada con bisagras, pomo y cierre, todos ellos también en metacrilato, lo que permite abrir y cerrar el sistema con facilidad y sin comprometer el aislamiento. Para garantizar una base sólida, se le han incorporado diez patas del mismo material, que reparten el peso de forma uniforme y proporcionan una mayor estabilidad al conjunto, incluso durante sesiones prolongadas de trabajo.

Ensamblaje de posicionamiento del sistema de movimiento en el eje X e Y

El ajuste para posicionar el sistema de movimiento consta de varias piezas:

- Perfil ITEM
- 2 codos
- 2 placas
- Motor NEMA 23
- Polea
- Corredera dentada
- Sistema de sujecion y soporte de la aguja

El sistema puede desplazarse 20 cm en la horizontal y 7,8 cm en la vertical.

Contraelectrodo

El colector se incorporará a su respectivo acople e irá encuadrado entre las cuatro plantillas con forma de L que irán atornilladas en sus respectivas posiciones. Para llevar a cabo el proceso de electrohilado se ha utilizado papel de aluminio como contraelectrodo, una solución sencilla pero eficaz que cumple una doble función. Este se coloca cuidadosamente sobre la superficie del colector y se conecta directamente a la toma de tierra del generador de alta tensión, completando así el circuito eléctrico necesario para la formación de las fibras. Además de cumplir con su función como elemento de descarga, el papel de aluminio actúa como superficie de recolección, sobre la que se depositan las fibras generadas durante el proceso, permitiendo su posterior retirada y análisis sin dificultad.

MANUAL DE USUARIO

En este apartado se detallan los pasos a seguir para que el montaje y arranque del equipo experimental se hagan de forma adecuada:

Montaje del sistema experimental

El proceso de montaje del sistema experimental comienza con la colocación de la caja de metacrilato en el área de trabajo (ver Figura P 1). Su peso ligero permite transportarla sin dificultad, lo que facilita este primer paso. Una vez posicionada correctamente, se inicia el ensamblaje del mecanismo de desplazamiento de la aguja, que operará a lo largo de los ejes X y Z.

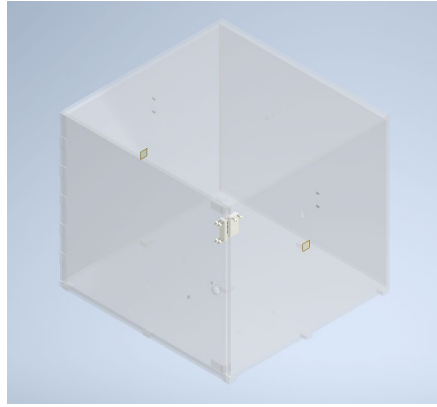


Figura P 1: Caja de metacrilato

El primer componente en montarse es el perfil de aluminio ITEM, sobre el cual se fijan las placas que sostendrán el motor paso a paso y la polea. Estas placas deben colocarse dejando una separación aproximada de 20 centímetros, distancia suficiente para lograr una tensión adecuada en la correa dentada que conectará ambos extremos. La placa del motor se asegura al perfil mediante cuatro tornillos de teflón, distribuidos en dos en la cara superior y dos en la frontal, garantizando una sujeción robusta. En el extremo opuesto, la placa que sostiene la polea cuyo peso es considerablemente menor se fija con tres tornillos en la parte superior, suficientes para mantenerla estable. (ver Figura P 2)



Figura P 2: Motor y polea sujetos en el perfil ITEM

Una vez montadas estas piezas y comprobada la tensión de la correa, se procede a fijar el conjunto móvil que sostiene la aguja. En este punto es importante ajustar con precisión la distancia del soporte de la aguja respecto a la plataforma que la sustenta, asegurándose de que el tornillo de apriete quede bien fijado para evitar holguras durante el funcionamiento.

Con el sistema de movimiento completamente montado y alineado (ver Figura P 3), el último paso consiste en atornillar el perfil ITEM a la caja de metacrilato. Esto se realiza en ambos extremos del perfil, utilizando tuercas y arandelas de teflón para garantizar una sujeción firme y resistente. Como refuerzo adicional, se instalan codos metálicos bajo los puntos de apoyo del perfil, lo que permite distribuir el peso y mantener la estabilidad del conjunto durante el funcionamiento del sistema. (verFigura P 3)



Figura P 3: Ensamblaje de sistema de movimiento en eje horizontal y vertical y cámara de procesamiento

El siguiente paso en el montaje consiste en ensamblar el sistema colector, una pieza esencial dentro del conjunto experimental. Se comienza uniendo el cuerpo principal del cilindro con su acople, utilizando tres tornillos de teflón, elegidos por su capacidad aislante y su resistencia frente a las condiciones del sistema. En la cara opuesta, se inserta el eje metálico, fijado con un perno que asegura una unión firme y estable, evitando cualquier juego durante el giro. (ver Figura P 4)

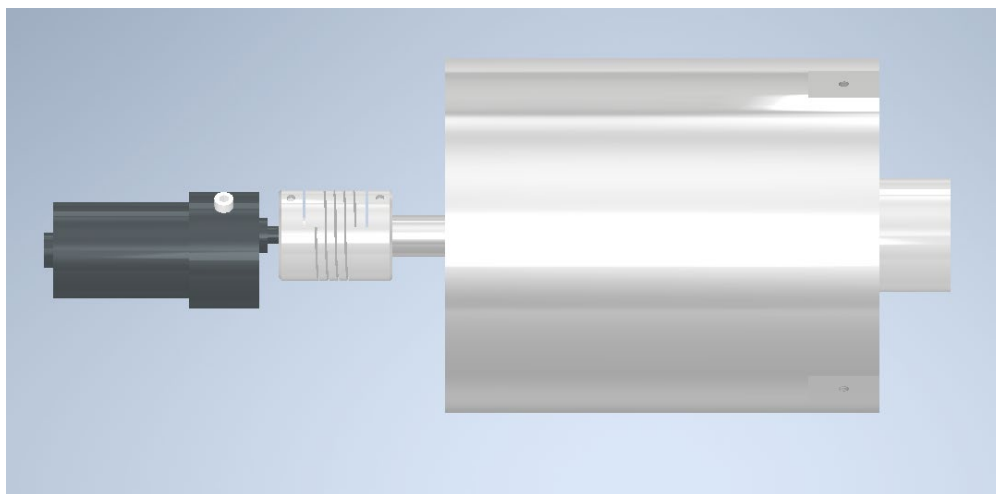


Figura P 4: Ensamblaje del cilindro colector rotatorio

A continuación, el eje se acopla al motor mediante un acople mecánico con una entrada de 1 cm y una salida de 5 mm de diámetro, garantizando una transmisión precisa del movimiento. Con el cilindro y el eje ya conectados, se procede a instalar el conjunto en su soporte.

Este soporte se compone de dos piezas independientes. La base inferior se fija mediante tornillería, mientras que la pieza superior está diseñada para sujetar y cubrir el motor, actuando como protección mecánica y, al mismo tiempo, como barrera aislante para evitar interferencias en el campo eléctrico generado durante el proceso.

Una vez montado el soporte, se incorpora el pincho de cobre, que se introduce a través del orificio correspondiente y se fija mediante un tornillo. En su interior, se conecta un cable conductor, encargado de cerrar el circuito eléctrico con el sistema de alta tensión.

Finalmente, todo el conjunto se posiciona en su lugar definitivo dentro de la cámara de procesamiento, alineado sobre cuatro plantillas previamente marcadas, que se atornillan firmemente a la base para asegurar su estabilidad y mantener la correcta disposición del sistema durante la operación.

Con el sistema principal ya ensamblado y fijado en su posición definitiva, el siguiente paso consiste en instalar el sistema de interlock, una medida clave para garantizar la seguridad durante la operación. Este mecanismo se integrará en dos puntos estratégicos de la caja de metacrilato: por un lado, en la puerta frontal, y por otro, en la pared lateral.

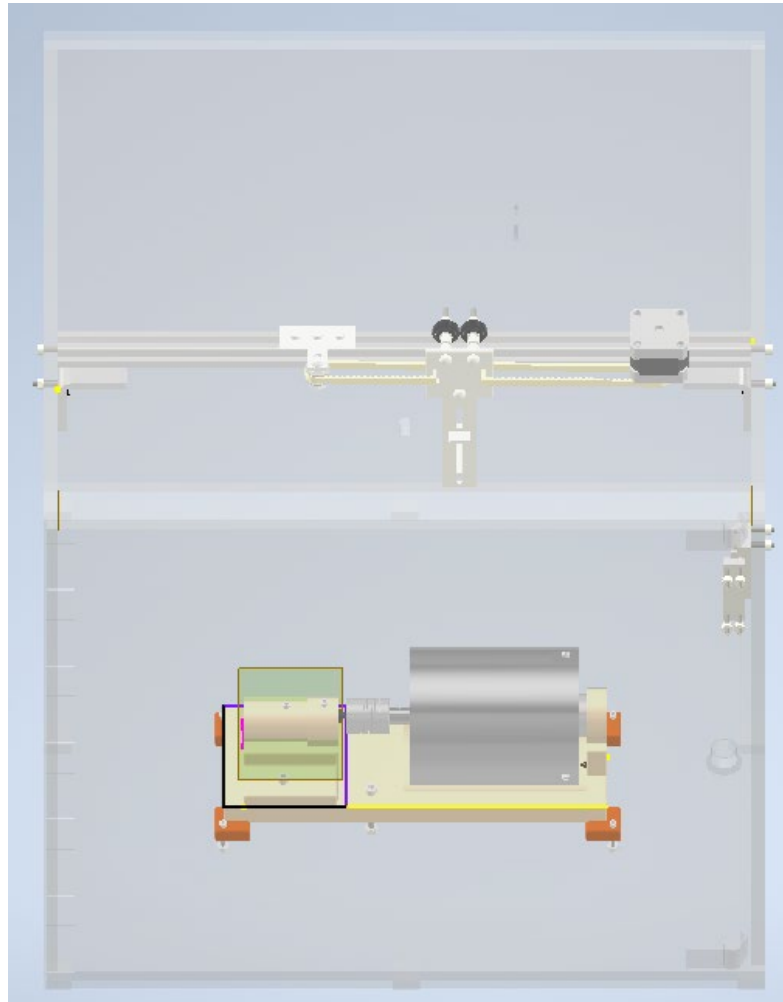


Figura P 5: Ensamblaje completo

La instalación requiere una alineación precisa entre ambas piezas del interlock, de modo que el circuito solo se cierre cuando la puerta esté completamente cerrada y encajada. Este sistema actúa como un interruptor de seguridad, evitando que el generador de alto voltaje entre en funcionamiento si la puerta está abierta o mal cerrada, protegiendo al usuario frente a posibles descargas o interferencias accidentales. Su incorporación, aunque sencilla en términos de montaje, es fundamental para asegurar un entorno de trabajo controlado y fiable. (ver Figura P 5)



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un sistema de deposición controlada y recolección
continua de fibras mediante fibrado electroestático*

PRESUPUESTO

Universidade de Vigo

A continuación, se detalla el presupuesto estimado necesario para la fabricación del sistema de electrohilado diseñado. Este desglose incluye los costes asociados a los componentes mecánicos y electrónicos, así como los materiales estructurales, elementos de fijación y posibles servicios externos, como el mecanizado de piezas. El objetivo es ofrecer una visión clara y realista del coste total que implicaría materializar el sistema propuesto en condiciones de laboratorio, partiendo de un enfoque funcional y técnicamente viable.

- **Mano de obra**

En este apartado la mano de obra se divide en ingenieril y de supervisión atendiendo a las tareas realizadas. Con ello la siguiente Tabla 4 especifica los costes asociados:

Tipo de mano de obra	Cantidad [horas]	Coste Unitario con IVA [€/h]	Coste total [€]
Ingenieril	56	30	1680
Subtotal			912

Tabla 1: Presupuesto mano de obra

- **Material**

A continuación se muestran en forma de los materiales necesarios y sus costes asociados:

Material para la implementación del sistema	Cantidad	Coste por unidad [€]	Coste total [€]
Perfil ITEM 5 20x20mm 3000mm	1	39,09	39,09
Motor NEMA 17	1	52,70	52,7
Plancha de teflón	1	5	5
Pieza de resina acetálica	1	5	5
Tornillo de teflón M5 5cm	7	5	35
Tornillo de teflón M5 1cm	9	2,50	22,5
Tornillo de teflón M3 3cm	10	2,77	27,7
Tornillo de teflón M3 1cm	6	2,15	12,9
Tornillo de teflón M3 4mm	1	2,07	2,07
Arandela de teflón M5	25	0,73	18,25
Arandela de teflón M3	17	0,12	2,04
Tuercas de teflón M5	25	2,03	50,75
Tuercas de teflón M3	17	1,96	33,32
Tuerca corredera M5	7	0,40	2,80
Barra de cobre	1	8	8

Fuente de alimentación conmutada MEAN WELL	1	48,58	48,58
Rueda de ITEM	3	5,00	15,00
Placa de acero 20x20x10	1	12,66	12,66
Acoplamiento	1	21,32	21,32
Rodamiento de bolas	1	8,76	8,76
Motoreductor DC RS PRO	1	61,32	61,32
Plancha de metacrilato 1m ²	1	0,61	0,61
Correa dentada de nilón	1	15,99	15,99
Cilindro macizo de aluminio	1	25,40	25,40
Escuadra	2	2	4
Subtotal			530,76

Tabla 2: Material para la implementación del sistema

Tipo de subcontratación	Cantidad [horas]	Coste hora	Coste total [€]
Mecanizado del teflón	2	17	34
Mecanizado del aluminio	1	30	30
Mecanizado de resina acetálica	0,3	15	4,5
Mecanizado del cobre	0,7	50	35
Subtotal			103,5

Tabla 3: Presupuesto por subcontratación

- ***Presupuesto Final***

Tipos de coste	Coste total [€]
Mano de obra	912
Material para la implementación del sistema	507,96
Tipo de subcontratación	99
Subtotal	1518,96

Tabla 4: Presupuesto total