



POLITÉCNICA

escuela técnica superior de
ingeniería
y **diseño**
industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de
Producto

TRABAJO FIN DE GRADO

**Actualización de la electrónica frontal de las cámaras de
deriva del Solenoide Compacto de Muones. Diseño del
sistema y procedimiento de montaje de la estructura
mecánica.**

Autor: Jesús Cuchillo Ortega

Co-tutora:

Cristina Fernández Bedoya

División de Física Experimental de

Altas Energías

CIEMAT

Tutora:

Rosa Concepción Ocaña López

Departamento de Ingeniería Mecánica,

Química y Diseño Industrial

ETSIDI - UPM

Madrid, febrero, 2024

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional en cada paso que he dado.

A Cristina Fernández, por su transmisión de conocimiento infinita que me ha hecho crecer a nivel profesional y personal. También por su confianza en mí para participar en este proyecto.

A Rosa Ocaña, por su disposición y profesionalidad tanto en el desarrollo de este trabajo como a lo largo de mi trayectoria académica.

A mis amigos, los que estaban y los que han ido llegando para quedarse, haciendo que saque mi mejor versión.

Al equipo de DT, por su amable acogida y disponibilidad.

A todas las personas del CIEMAT que me han acompañado y me han prestado su ayuda.

Gracias.

*** Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-116262RB-C42, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación / 10.13039/501100011033.*

Acrónimos

<i>Siglas</i>	<i>Términos</i>	<i>Traducción al castellano</i>
CCB	Chamber Control Board	Placa de control de la cámara
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire	Organización Europea para la Investigación Nuclear
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas	<i>idem</i>
CIEMAT-FP	Unidad CIEMAT - Física de Partículas	<i>idem</i>
CMS	Compact Muon Solenoid	Solenoides Compacto de Muones
CSC	Cathode Strip Chambers	Cámaras de tiras catódicas
DT	Drift Tubes	Tubos de deriva
FDM	Fused Deposition Modelling	Modelado por deposición fundida
FE	Front-End	Frontal
FEB	Front-End Board	Placa Frontal
FPGA	Field-Programmable Gate Array	Matriz de puertas programables
GBT-SCA	Giga-Bit Transceiver optical link – Slow Control Adapter	Enlace óptico Transceptor Giga-Bit - Adaptador de control lento
HL-LHC	High Luminosity Large Hadron Collider	Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad
INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare	Instituto Nacional de Física Nuclear (de Italia)
LHC	Large Hadron Collider	Gran Colisionador de Hadrones
LV	Low Voltage	Baja tensión
lpGBT	low power Giga Bit Transceiver	Transceptor Giga Bit de bajo consumo
MiC1	Minicrate 1 for DT system	Minicrate 1 para el sistema de tubos de deriva
MiC2	Minicrate 2 for DT system (Phase-2)	Minicrate 2 para el sistema de tubos de deriva (Fase-2)
MTP	Multi-fiber Termination Push-on	Terminación Multifibra de Conexión Rápida
OBDT	On-Board electronics for Drift Tubes	Electrónica integrada para tubos de deriva
PCB	Printed Circuit Board	Placa de circuito impreso
ROB	Read-Out Board	Tarjeta de lectura
RPC	Resistive Plate Chambers	Cámaras de placas resistivas
SC	Slow-Control	Control lento
SL	Superlayer	Supercapa
SLS	Selective Laser Sintering	Sinterización selectiva por láser
SM	Standard Model	Modelo Estándar
SX5	Service Experiment 5	Servicio Experimento 5
USC	Underground Service Cavern	Caverna de servicio subterránea
UXC	Underground Experiment Cavern	Caverna experimental subterránea
VTRx+	Versatile Link Plus Transceiver	Transceptor de Enlace Versátil Plus

Resumen

Este trabajo se centra en el diseño del sistema y procedimiento de montaje para garantizar el ensamblaje de los distintos componentes que formarán parte de la estructura mecánica que alojará la nueva electrónica frontal de las cámaras de deriva del Solenoide Compacto de Muones (CMS, por sus siglas en inglés). Estas nuevas estructuras son necesarias para permitir el funcionamiento del detector tras la actualización que se llevará a cabo en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN para trabajar a alta luminosidad.

Se ha elaborado un estudio del contexto y del sistema que está funcionando actualmente para garantizar una correcta integración. El diseño ha seguido un proceso iterativo estableciendo las especificaciones requeridas, el estudio de posibles soluciones y su adaptabilidad a la fabricación industrial. Se destaca el análisis de los sistemas de refrigeración de la electrónica y la importancia de la selección de materiales marcada por la durabilidad de los componentes bajo radiación.

Se han elaborado dos secuencias de montaje para que el ensamblaje se realice de manera correcta y segura, buscando optimizar el trabajo, cumplir con los tiempos de producción establecidos y facilitar la comunicación entre las distintas instituciones que colaboran en el proyecto. Con el fin de reunir esta información, se han creado dos manuales cuidando el diseño bajo la búsqueda de claridad y sencillez para minimizar posibles errores de usuario y guiar al operario en el proceso de montaje.

En este documento se trabajan los aspectos técnicos de la fabricación y el montaje que se desarrolla en el CIEMAT, centro participante en la construcción de las cámaras de deriva y cuyo trabajo sigue contribuyendo a fortalecer la posición del experimento CMS y su consolidación como un progreso significativo en el ámbito del conocimiento en física de partículas.

Abstract

This thesis focuses on the design of the system and assembly procedure to ensure the installation of the different components that will form part of the mechanical structure that will accommodate the new on-detector electronics of the Compact Muon Solenoid (CMS) drift tubes chambers. These new structures are needed to allow the detector to operate after the upgrade of the Large Hadron Collider at CERN to work at high luminosity.

A study of the context and the system currently in operation has been carried out to ensure correct integration. The design has followed an iterative process establishing the required specifications, the study of possible solutions and their adaptability to industrial manufacturing. The analysis of the electronics cooling systems and the significance of materials selection based on component durability under radiation are highlighted.

Two assembly sequences have been developed to ensure correct and safe assembly, aiming to optimize work, meet established production timelines, and facilitate communication among the various institutions collaborating on the project. In order to compile this information, two manuals have been created, prioritizing design clarity and simplicity to minimize potential user errors and guide the operator through the assembly procedure.

This document deals with the technical aspects of the manufacture and assembly at CIEMAT, a centre involved in the construction of the drift tubes chambers and whose work continues to contribute to strengthening the position of the CMS experiment and its consolidation as a significant advance in the field of knowledge in particle physics.

Índice

Índice de figuras	1
Índice de tablas	4
Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	5
Capítulo 2. El LHC, CMS y la actualización de HL-LHC.....	7
2.1. La física de partículas y el LHC en el CERN	7
2.2. El experimento CMS.....	9
2.3. Actualización para HL-LHC	12
Capítulo 3. El detector de las cámaras de deriva	14
3.1. Las cámaras DT.....	14
3.2. Distribución de las cámaras DT en CMS.....	16
3.3. La electrónica de las cámaras DT y su actualización	18
Capítulo 4. Diseño y fabricación de componentes mecánicos	23
4.1. Distribución de la fabricación y el ensamblaje.....	23
4.1.1. Introducción y estandarización	23
4.1.2. Distribución de tareas	23
4.2. Perfiles para los Minicrates. Fabricación para cada cámara DT.....	24
4.2.1. Descripción del diseño de la matriz para la extrusión de aluminio.....	24
4.2.2. Distribución de longitudes para cada tipo de perfil	25
4.2.3. Mecanizado de los perfiles.....	29
4.3. Sistema de refrigeración del Minicrate. Diseño e instalación del circuito.....	31
4.3.1. Definición del sistema de refrigeración	31
4.3.2. Diseño y fabricación de los tubos en “U”	34
4.3.3. Costes y especificaciones de fabricación.....	38
4.3.4. Limpieza de los tubos	39
4.4. OBDT-Theta frames. Elemento disipador de calor.....	40
4.4.1. Disipación de calor en la tarjeta OBDT-Theta y selección de materiales	40
4.4.2. Diseño del frame para la OBDT-Theta	43
4.4.3. Costes y especificaciones de fabricación.....	50
4.5. Fibers support. Diseño para impresión 3D.	51
4.5.1. Diseño de la pieza y requerimientos establecidos	51
4.5.2. Materiales para impresión 3D.....	60
4.5.3. Tecnologías de impresión 3D utilizadas	64
4.5.4. Ensayo de piezas impresas en 3D bajo radiación	69
4.5.5. Costes y especificaciones de fabricación.....	73

4.6.	Fiber caps y nuts. Corte y plegado de aluminio.....	74
4.7.	Cubiertas de protección. Diseño para instalación y transporte de Minicrates.....	78
4.7.1.	Planteamiento del problema y propuestas preliminares.....	78
4.7.2.	Prototipado y evolución de la propuesta.....	83
4.7.3.	Definición de la propuesta final.....	86
Capítulo 5. Diseño del procedimiento de montaje.....		92
5.1.	Evaluación de requerimientos.....	92
5.2.	Puestos de trabajo y herramientas necesarias.....	92
5.3.	Descripción de la secuencia de montaje.....	95
5.4.	Diseño del manual de montaje de la OBDT-Theta.....	96
5.4.1.	Requisitos previos.....	96
5.4.2.	Formato, identidad y maquetación.....	97
5.4.3.	Desarrollo del manual.....	101
5.4.4.	Imágenes de ensamblajes.....	104
5.5.	Diseño del manual de montaje y verificación del sistema de refrigeración de los Minicrates 106	
5.5.1.	Especificaciones del manual.....	106
5.5.2.	Desarrollo del manual.....	106
Capítulo 6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....		110
Referencias.....		113
Anexos.....		116
Anexo 1. Lista de piezas mecánicas MiniCrate2.....		116
Anexo 2. Plano del perfil de extrusión de MiC2.....		118
Anexo 3. Plano para el mecanizado de los perfiles MB1.....		120
Anexo 4. Plano archivado de la tubería en forma de “U” de los Minicrate Legacy (Pipe 6).....		123
Anexo 5. Planos de fabricación.....		125
Anexo 6. Plano con secciones para marcar las elevaciones del OBDT-Theta frame.....		138
Anexo 7. Dosimetría del ensayo de irradiación en la Náyade.....		140
Anexo 8. Plano del edificio 75 del CIEMAT con la zona de montaje para MiC2.....		142
Anexo 9. Manual de montaje de la OBDT-Theta (MiC2) (versión en inglés).....		144
Anexo 10. Manual de montaje de la OBDT-Theta (MiC2) (versión en castellano).....		160
Anexo 11. Manual de montaje de MiC2. Preparación e instalación del sistema de refrigeración.....		176

Índice de figuras

Figura 1. Esquema Modelo Estándar de Partículas Elementales. [2]	8
Figura 2. Vista global del LHC. [4]	9
Figura 3. Vista satélite de la superficie del Punto 5 del CERN. [Imagen extraída de Google Maps]	10
Figura 4. Plano de las instalaciones de CMS en Punto 5. [5]	10
Figura 5. Fotografía real del detector CMS en el interior de la caverna. [6].....	11
Figura 6. Representación tridimensional del detector CMS y sus subdetectores. [8]	11
Figura 7. Calendario del LHC a largo plazo. [11]	13
Figura 8. Corte transversal de una celda de una cámara DT. [1].....	14
Figura 9. Esquema de una SL de las cámaras DT. [1].....	15
Figura 10. Dibujo esquemático de la disposición de las celdas y las SL en una cámara DT. [12]	15
Figura 11. Imagen real de una cámara DT completa con identificación de las SL. [1]	16
Figura 12. Fotografía de una parte del armazón de CMS con las cámaras DT. [8]	16
Figura 13. Sección transversal y longitudinal del barril de CMS con subdivisión en ruedas y sectores. [1]	17
Figura 14. Dibujo esquemático de distribución de las cámaras DT en la rueda del detector CMS. [13]	17
Figura 15. Ubicación del Minicrate dentro de un modelo 3D de cámara DT.....	18
Figura 16. Esquema simplificado de una cámara MB1 y su conexión con las tarjetas OBDT.	19
Figura 17. Vista superior de la tarjeta OBDT-Theta (cara superior/top) con las medidas generales.....	20
Figura 18. Vista inferior de la tarjeta OBDT-Theta (cara inferior/bottom).	20
Figura 19. Vista en alzado de la tarjeta OBDT-Theta.	20
Figura 20. Esquema de la OBDT-Theta con identificación de sus componentes más elementales.	21
Figura 21. Imagen del módulo VTRx+ óptico transceiver desarrollado por el CERN mostrando el módulo, el cable de fibra óptica y el conector MTP. [17]	22
Figura 22. Perfil de extrusión de MiC2. [Imagen extraída del plano incluido en el Anexo 2]	25
Figura 23. Recorte de la ficha de descripción del proyecto de fabricación en el CIEMAT. [Imagen extraída de documentación interna del CIEMAT]	30
Figura 24. Mecanizado de los perfiles Minicrates en el taller del CIEMAT.....	30
Figura 25. Esquema de unión del circuito de refrigeración de una cámara MB1-Left con el sistema de refrigeración del Minicrate. [Imagen extraída de documentación interna del CERN]	32
Figura 26. Racor de acero inoxidable, codo macho posicionable, diámetro exterior del tubo de 8 mm x rosca paralela ISO macho de 1/8 pulg. [20]	33
Figura 27. Roscado necesario para racor cilíndrico 1/8" siguiendo ISO 228. [21]	33
Figura 28. Prototipo de unión de los dos conductos de refrigeración del Minicrate con la pieza en "U".	34
Figura 29. Recomendación de longitud mínima de tramo recto y radio de la curva para una correcta instalación del tubo con el racor. [20].....	35
Figura 30. Comprobación del radio de curvatura de los tubos en "U" de refrigeración del Minicrate con un prototipo sobre el plano con radio de curvatura de 24 mm.	36
Figura 31. Comprobación del radio de curvatura de los tubos en "U" de refrigeración del Minicrate con un prototipo sobre el plano con radio de curvatura de 18 mm.	36
Figura 32. Opciones para los tubos en "U" de refrigeración del Minicrate según radio de curvatura; a la izquierda radio de curvatura de 24 mm y a la derecha de 18 mm.....	37
Figura 33. Ejemplo de una dobladora de tubo automática. [22].....	38
Figura 34. Máquina de ultrasonidos durante la limpieza de las "Us".	39
Figura 35. Extracción de las "Us" de la máquina de ultrasonidos.	40
Figura 36. Esquema de flujo de calor en componentes electrónicos mediante disipación por almohadillas térmicas. [23] ...	41
Figura 37. Ejemplo de funcionamiento de una almohadilla térmica como disipador de calor. [14]	42
Figura 38. Imagen de la tarjeta de TP de la OBDT-Theta.....	44
Figura 39. Boceto de los adaptadores MTP (MPO) a MT Optical. [25]	45
Figura 40. Boceto previo del frame incorporando los requisitos iniciales.....	45
Figura 41. Imagen de la tarjeta OBDT-Theta tomada con una cámara termográfica.	46
Figura 42. Boceto de diseño de las elevaciones centrales del frame sobre la OBDT-Theta.	46
Figura 43. Boceto inicial del frame tras incorporar las elevaciones centrales.....	47

Figura 44. Prototipo del OBDT-Theta frame en la fresadora CNC de los talleres del CIEMAT.....	47
Figura 45. Prototipo previo de un OBDT-Theta frame.	48
Figura 46. Boceto y modificaciones en el diseño del frame.	48
Figura 47. Ensamblaje de la OBDT-Theta sobre el frame y cortes que muestran la medida del espacio libre entre los componentes electrónicos y las elevaciones del frame. [Imagen del plano incluido en el Anexo 6]	49
Figura 48. Prototipo final de OBDT-Theta frame en el taller del CIEMAT.	49
Figura 49. Esquema de conexión de VTRx+ sobre placa base. [Imagen de elaboración propia a partir de [26]]	51
Figura 50. Primera opción de diseño para ajustar los VTRx+ a la placa. [14]	52
Figura 51. Imagen del módulo VTRx+ optical transceiver para mostrar su tamaño y terminación de fibras. [17].....	52
Figura 52. VTRx+ conectados en la OBDT-Theta.	53
Figura 53. Tornillo Machine Screw Pan Phillips 4-40 de referencia 36-9902-ND. [26]	53
Figura 54. Primer boceto de la pieza fibers support sobre la OBDT-Theta.....	54
Figura 55. Primer diseño de fibers support.	54
Figura 56. Primer prototipo de fibers support.	55
Figura 57. Ensamblaje de prototipo previo de fibers support en la OBDT-Theta.....	55
Figura 58. Medidor de potencia óptica usado para verificar la pieza de fibers support.	56
Figura 59. Cota de altura 2,51mm para la pieza fibers support.	57
Figura 60. Esquema de disipación de calor desde los VTRx+ hasta el frame de la OBDT-Theta.....	57
Figura 61. Problema detectado en el ensamblaje del prototipo de fibers support con el tornillo.....	57
Figura 62. Medición de la altura las pestañas del fibers support.	58
Figura 63. Cambio realizado en las guías de los cables del fibers support.	59
Figura 64. Vista superior de la pieza definitiva fibers support.	59
Figura 65. Vista inferior de la pieza definitiva fibers support.....	60
Figura 66. Especificaciones dimensionales de la pieza fibers support.	60
Figura 67. Prototipo de pieza impresa en 3D en PLA.	61
Figura 68. Prototipos de piezas impresas en 3D en PETG.	62
Figura 69. Prototipo de pieza impresa en 3D en Nylon.	63
Figura 70. Esquema de funcionamiento del proceso de impresión 3D SLS. [32].....	64
Figura 71. Posacabado de las piezas impresas en 3D en SLS.....	65
Figura 72. Captura de pantalla del software Preform en la preparación de una pieza fibers support.....	66
Figura 73. Captura de pantalla del software Preform en la preparación de 28 piezas fibers support.	66
Figura 74. Prototipo de pieza fibers support impresa en 3D SLS en PA12.	67
Figura 75. Esquema de funcionamiento del proceso de impresión 3D FDM. [32]	67
Figura 76. Captura de pantalla del software Ultimaker Cura en la preparación de una pieza fibers support en PETG usando soportes con material soluble.	68
Figura 77. Captura de pantalla del software Ultimaker Cura en la preparación de una pieza fibers support en PETG usando soportes del mismo material.....	69
Figura 78. Vista superior de la piscina de la Instalación Náyade donde se muestra la distribución de fuentes en 6 lotes.	70
Figura 79. Recortes de piezas impresas en 3D para introducir en el portamuestras en el ensayo de irradiación.	70
Figura 80. Muestra de material PLA impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.	71
Figura 81. Muestra de material Nylon impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.....	71
Figura 82. Muestra de material Nylon impreso en 3D SLS tras la prueba de irradiación de 100 Gy.	72
Figura 83. Muestra de material PETG azul impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.....	72
Figura 84. Muestra 2 de material PETG verde impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.....	72
Figura 85. Imagen de un adaptador MTP (MPO) TO MT Optical. [25]	74
Figura 86. Proceso de diseño de la tuerca para los fiber caps.....	74
Figura 87. Modelo 3D de la pieza nut que unirá los adaptadores MTP con los fiber caps.	75
Figura 88. Fabricación por corte con chorro de agua de las piezas nut en los talleres del CIEMAT.	75
Figura 89. Detalle del corte con chorro de agua de las piezas nut en los talleres del CIEMAT.....	76
Figura 90. Esquema de unión de los fiber caps, nuts, adaptadores MTP y frame.....	76
Figura 91. Corte de chapa por chorro de agua de las piezas fiber caps previo al plegado en el taller del CIEMAT.....	77
Figura 92. Modelo 3D de las piezas fiber caps. [Imagen extraída de los planos del Anexo 5].....	78
Figura 93. Imagen del sistema de pruebas para validar los Minicrate legacy con los cables de FE incorporados. [1]	78
Figura 94. Imagen de un prototipo de Mic2 MB1 en SX5 con el cableado incorporado.....	79
Figura 95. Propuesta de ranuras para unir los cables al Minicrate.	80

Figura 96. Primera propuesta de diseño de cubiertas de protección usando los mismos perfiles de aluminio del Minicrate.	80
Figura 97. Segunda propuesta de diseño de cubiertas de protección usando una pieza atornillada con forma de canalón.	81
Figura 98. Tercera propuesta de diseño de cubiertas de protección usando una pieza con forma de canalón sin atornillar.	81
Figura 99. Cuarta propuesta de diseño de cubiertas de protección usando una pieza flexible por el exterior.	82
Figura 100. Quinta propuesta de diseño de cubiertas de protección usando un perfil en U atornillado. [A la izquierda, imagen de [35]]	82
Figura 101. Nuevo sistema de fijación de cables con dos placas y un espaciador para los Minicrates.	83
Figura 102. Prototipo del nuevo sistema de fijación de cables para los Minicrates.	83
Figura 103. Propuesta de cubiertas de protección compatible con las placas de sujeción de cables del Minicrate.	84
Figura 104. Esquema de una cubierta en U a lo largo de todo el Minicrate con piezas de anclaje.	84
Figura 105. Imágenes renderizadas de varias cubiertas en U a lo largo de todo el Minicrate con piezas de anclaje.	85
Figura 106. Detalle de la propuesta inicial de las cubiertas en U con las piezas de anclaje a diferentes niveles.	85
Figura 107. Propuesta inicial de piezas de anclaje cortadas y plegadas para cubiertas de protección. A la izquierda, el modelo 3D; a la derecha, la chapa desplegada.	86
Figura 108. Prototipo de la propuesta de cubiertas de protección impreso en 3D.	86
Figura 109. Vistas de las piezas de anclaje de las cubiertas de protección para los Minicrates.	87
Figura 110. Dimensiones en mm de las piezas de anclaje de las cubiertas de protección para los Minicrates.	87
Figura 111. Prototipo en PA12 impreso en SLS de piezas de anclaje de las cubiertas de protección para los Minicrates.	88
Figura 112. Prototipo de cubiertas de protección de 40 cm de longitud realizado en chapa.	88
Figura 113. Preparación de un Mic2 con los prototipos de cubiertas de protección en las pruebas de instalación realizadas durante EYETS23-24.	89
Figura 114. Detalle de un Mic2 con los prototipos de cubiertas de protección en las pruebas de instalación realizadas durante EYETS23-24.	89
Figura 115. Prueba de instalación de un Mic2 en una cámara de deriva durante EYETS23-24.	90
Figura 116. Mic2 instalado en una cámara de deriva con las cubiertas de protección durante EYETS23-24.	91
Figura 117. Recubrimiento con cinta de los saltos entre cubiertas de protección.	91
Figura 118. Zona del edificio 75 del CIEMAT previamente al montaje de los Minicrates.	93
Figura 119. Propuesta de distribución del espacio para el montaje de Minicrates en el CIEMAT. [Imagen detalle del plano del Anexo 8]	93
Figura 120. Prueba tipográfica para los textos del Manual de la OBDT-Theta.	98
Figura 121. Detalle del encabezado y pie de página del manual.	98
Figura 122. Visualización del detalle de continuidad del encabezado del manual.	99
Figura 123. Texto extraído del manual donde se observa la alineación a la izquierda.	99
Figura 124. Bloques de texto durante la edición del manual para mostrar la jerarquía de información.	100
Figura 125. Detalle de un dibujo de ensamblaje en 3D del manual de montaje de la OBDT-Theta.	100
Figura 126. Anotaciones en color naranja para la identificación de elementos destacados.	101
Figura 127. Portada del Manual de montaje de la OBDT-Theta.	101
Figura 128. Índice del Manual de montaje de la OBDT-Theta.	102
Figura 129. Página de introducción del Manual de montaje de la OBDT-Theta.	102
Figura 130. Página 4 del Manual de montaje de la OBDT-Theta.	103
Figura 131. Página 5 del Manual de montaje de la OBDT-Theta.	103
Figura 132. Vista en perspectiva del ensamblaje 3D de la OBDT-Theta en Solidworks.	104
Figura 133. Vista explosionada del ensamblaje 3D de la OBDT-Theta en Solidworks.	104
Figura 134. Opción para crear dibujo desde ensamblaje en Solidworks.	105
Figura 135. Opción de dibujo del ensamblaje en Solidworks.	105
Figura 136. Portada del Manual de montaje del Mic2.	107
Figura 137. Página con introducción y clasificación de perfiles en el Manual de montaje del Mic2.	107
Figura 138. Página de descripción de limpieza en el Manual de montaje del Mic2.	108
Figura 139. Página de descripción de premontaje de férulas en tubos en el Manual de montaje del Mic2.	108
Figura 140. Página de descripción de instalación de racores en el Manual de montaje del Mic2.	109
Figura 141. Página de descripción de las pruebas de verificación en el Manual de montaje del Mic2.	109

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución del montaje de los MiC2 por ciudades.	24
Tabla 2. Clasificación de los perfiles Minicrates según el tipo de cámara DT.....	26
Tabla 3. Clasificación de los perfiles Minicrates según longitud.....	27
Tabla 4. Combinación de perfiles según longitud barra.	28
Tabla 5. Primera iteración del número de barras extruidas.	28
Tabla 6. Combinación final de perfiles en las barras extruidas.	28
Tabla 7. Número de perfiles finales clasificados por longitud.....	29
Tabla 8. Número de barras extruidas de cada tipo.	29
Tabla 9. Características del sistema de refrigeración de las cámaras DT.	32
Tabla 10. Especificaciones de fabricación para los tubos en "U".	38
Tabla 11. Comparación de la conductividad térmica de diferentes aleaciones de aluminio. [19]	42
Tabla 12. Especificaciones de fabricación para los OBDT-Theta frames.	50
Tabla 13. Especificaciones de fabricación para la pieza fibers support.	73

Capítulo 1. Introducción y objetivos

La composición de la materia ha sido una pregunta de interés desde la antigüedad. En la filosofía griega ya se establecían teorías sobre los componentes básicos del Universo. A día de hoy, los métodos científicos permiten dar respuesta a esta cuestión describiendo las teorías que aborda la física de partículas. Para ello, se han creado experimentos como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), el acelerador de partículas más grande del mundo. Sus experimentos permiten observar fenómenos a las escalas más pequeñas posibles del Universo. Con el objetivo de maximizar este potencial y seguir obteniendo información sobre la materia a nivel subatómico, durante la década de 2030 se pretende aumentar la capacidad de producir los sucesos más improbables en la denominada fase de HL-LHC (High Luminosity Large Hadron Collider). Para que esto ocurra se aumentará la luminosidad, tasa de colisiones, permitiendo visualizar un número más elevado de sucesos. Este aumento supone un desafío en el ámbito de la ingeniería para lograr generar las colisiones de partículas y poder detectarlas para su análisis.

El CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) es un organismo público español de investigación adscrito al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Su ámbito de actividad es muy diverso, participando en el desarrollo de experimentos de primer orden. Dentro de este organismo se encuentra la Unidad CIEMAT - Física de Partículas (CFP), dedicada a la investigación en física, astrofísica de partículas y cosmología observacional. Este grupo ha participado en el Solenoide Compacto de Muones (CMS, por sus siglas en inglés) desde las primeras etapas del experimento. Colaboró en el desarrollo de prototipos de pequeños imanes superconductores para el acelerador, así como en el diseño y montaje de 70 cámaras de muones que fueron construidas en los talleres del CIEMAT, lo que supone casi un 30% del detector. Actualmente, la construcción, pruebas, puesta en servicio, operación, mantenimiento y actualización del detector, son una de las principales actividades del grupo. Dentro de estas tareas se enmarca el presente trabajo en el que se tratan los aspectos técnicos del diseño y el procedimiento de montaje que se desarrollarán en el CIEMAT, dando importancia a la investigación básica e incentivando la consolidación del experimento CMS.

Numerosos países participan activamente en el experimento CMS, contribuyendo con recursos humanos, financieros y tecnológicos para llevar a cabo investigaciones avanzadas en el campo de la física de partículas. La internalización y globalización ligadas a la investigación científica y tecnológica justifica el uso de abundantes términos en inglés en este trabajo, por ser el idioma elegido para la comunicación efectiva y el intercambio de conocimiento en el proyecto. No obstante, se han incluido descripciones y traducciones al castellano de los términos utilizados en inglés para que el lector pueda comprender plenamente el contenido, eliminando las posibles barreras lingüísticas y dado el carácter académico de este Trabajo Fin de Grado.

La electrónica frontal de las cámaras de deriva es esencial para la adquisición y el procesamiento de datos del experimento CMS, su mejora contribuirá significativamente a la eficiencia y precisión de la información generada en los choques de muones. La motivación principal de este trabajo es contribuir a la electrónica del detector de partículas para respaldar su correcto funcionamiento utilizando el diseño industrial como una herramienta esencial para crear soluciones innovadoras. En este contexto, se podrán crear productos que no solo mejoren el rendimiento técnico, sino que también aborden consideraciones ergonómicas fundamentales para optimizar la fabricación a nivel industrial.

Tras haber definido la motivación del trabajo, se concretan los objetivos específicos:

- Estudio del funcionamiento del acelerador de partículas LHC remarcando su papel en la investigación en física de altas energías.
- Análisis del contexto, el experimento CMS, las cámaras de deriva y su actualización, con el propósito de lograr una completa integración de las soluciones propuestas.
- Desarrollo de un proceso de diseño iterativo para analizar la problemática de cada caso planteado, aportando soluciones desde el prototipado hasta la validación de los diseños.
- Evaluación de las diversas opciones de materiales y tecnologías y definición de los aspectos técnicos. Elaboración de documentación con las especificaciones requeridas para la fabricación industrial de las soluciones diseñadas.
- Asignación de métodos tradicionales de fabricación e implementación de las tecnologías de impresión 3D, no solo en prototipado, sino también como proceso de producción industrial final.
- Definición de las secuencias de montaje requeridas y elaboración de manuales de montaje que permitan realizar el ensamblaje de manera eficiente evitando errores de usuario, usando las herramientas del diseño para su ejecución.

Adicionalmente a los objetivos establecidos, este trabajo servirá como repositorio de las labores llevadas a cabo en el CIEMAT referentes a la mejora de la electrónica de las cámaras de deriva. Este material se usará como fuente de información para futuras publicaciones científicas y tecnológicas, afianzando el compromiso del centro con la excelencia en la investigación dentro de este ámbito específico.

Capítulo 2. El LHC, CMS y la actualización de HL-LHC

2.1. La física de partículas y el LHC en el CERN

La física de partículas o física de altas energías tiene como objetivo comprender la materia a nivel subatómico, determinar los constituyentes básicos o elementales de la materia y las fuerzas que intervienen en sus interacciones. El Modelo Estándar (SM, *Standard Model*) de la física de partículas es el paradigma que describe esta disciplina. Postula la existencia de partículas fundamentales, como quarks, leptones y bosones mediadores, junto con la existencia de cuatro fuerzas fundamentales: la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil y la gravedad (aunque esta última aún no se ha logrado unificar). El SM ha sido respaldado por numerosos experimentos y se ha destacado como una teoría poderosa para explicar fenómenos subatómicos, aun teniendo sus limitaciones como no incluir la gravedad y la falta de una explicación para la materia oscura y la energía oscura.

Para aclarar las incógnitas que plantea el SM es necesario explorar una región de energías altas que permita la búsqueda de partículas de mayor masa. En física de altas energías el método general consiste en colisionar partículas mediante aceleradores y estudiar los productos resultantes de la colisión. A mayor energía de las partículas originales, se pueden crear partículas más pesadas como resultado de la colisión (la masa puede transformarse en energía y viceversa según la ecuación de Einstein: $E = m \cdot c^2$), y mediante los detectores adecuados se pueden medir las distintas propiedades de masa, carga o tiempo de vida de las partículas resultantes [1].

Según el SM, la materia se describe como una composición de dos tipos de partículas con spin semientero (fermiones): los quarks y los leptones (ver Figura 1). Cada una de estas categorías consta de seis tipos de partículas que se relacionan por "generaciones" o pares. Las partículas más ligeras y estables pertenecen a la primera generación, mientras que las más pesadas y menos estables se ubican en las generaciones segunda y tercera. La materia estable del universo se compone de partículas pertenecientes a la primera generación, ya que cualquier partícula de generaciones posteriores decae rápidamente en partículas más estables. Los seis quarks se organizan en tres generaciones: "quark up" y "quark down" forman la primera generación, seguidos por el "quark charm" y el "quark strange" en la segunda generación, y finalmente el "quark top" y el "quark bottom" en la tercera generación. De manera similar, los seis leptones se disponen en tres generaciones: el "electrón" y el "neutrino del electrón", el "muon" y el "neutrino del muon", y el "tau" y el "neutrino del tau". El electrón, el muon y el tau tienen carga eléctrica y una masa apreciable, mientras que los neutrinos son eléctricamente neutros y poseen una masa extremadamente pequeña.

Standard Model of Elementary Particles

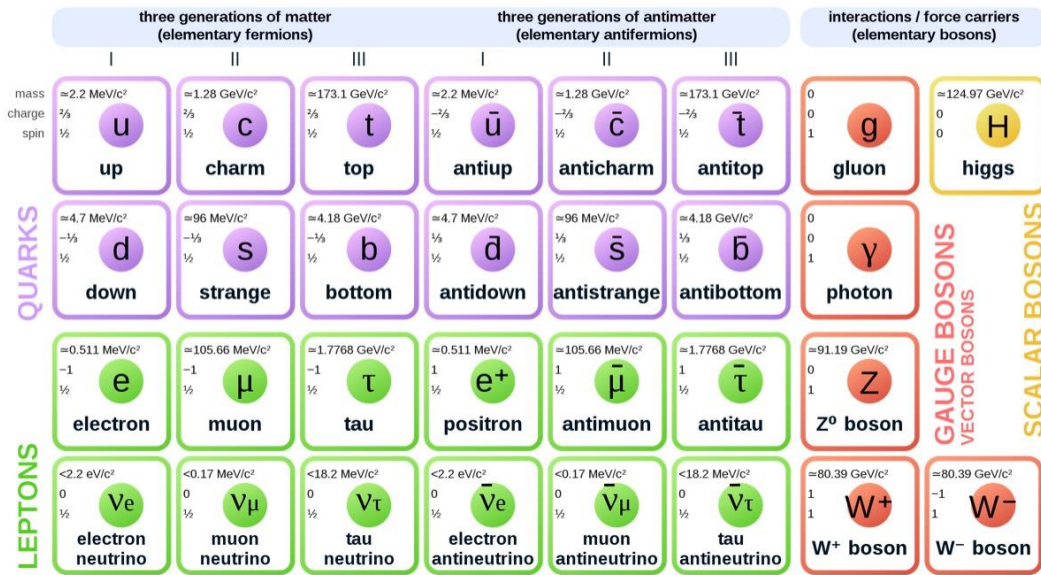


Figura 1. Esquema Modelo Estándar de Partículas Elementales. [2]

Tras la clasificación de los fermiones, siguiendo con el SM, se hace necesario hablar del otro grupo de partículas elementales, los bosones. Estas partículas son las mediadoras de las fuerzas fundamentales del Universo, no componen la materia, pero hacen posible sus interacciones. Dentro de este grupo, se clasifican en: gluones, fotones, bosones Z, bosones W y bosón de Higgs. Este último es el único bosón escalar descubierto hasta la fecha y permitió confirmar la existencia del campo de Higgs, cuyo descubrimiento dio lugar a explicar la ruptura espontánea de la simetría electrodébil explicando la masa no nula de los bosones.

El bosón de Higgs fue descubierto en 2012 después de tres años de toma de datos en el Gran Colisionador de Hadrones, LHC (Large Hadron Collider) del CERN [3].

El CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) es la Organización Europea para la Investigación Nuclear, siendo en la actualidad el laboratorio de investigación básica más importante del mundo. Desde su fundación en 1954, ha permitido explorar la física nuclear y de partículas mediante la construcción de aceleradores y detectores. Los experimentos que tienen lugar en el CERN están ligados a la creación de grandes máquinas que han requerido el desarrollo de nuevas tecnologías (microelectrónica, ultravacío, criogenia, superconductividad, computación, etc.). Esta labor requiere la colaboración de numerosos países e instituciones. España lleva participando en la institución desde 1961. Tras retirarse ocho años más tarde, volvió en 1983 y mantuvo su participación hasta la actualidad.

El LHC es el acelerador de partículas más grande y de mayor energía que existe hasta la fecha. Se trata de un colisionador hadrónico situado en la frontera entre Francia y Suiza. Es un acelerador circular cuyo anillo mide 27 km de longitud y utiliza unos 8000 imanes superconductores refrigerados con helio líquido a 1,9K. En él se aceleran protones o núcleos de plomo a casi la velocidad de la luz en forma de haces que colisionan. Cada haz se hace viajar en direcciones opuestas y se controla para que colisionen en el punto central de cuatro experimentos: ALICE (física del plasma), LHCb (física del quark b), ATLAS y CMS. Los dos primeros experimentos mencionados son pequeños y especializados mientras que los

dos últimos son experimentos grandes y de propósito general, siendo CMS sobre el cual está desarrollándose este proyecto.

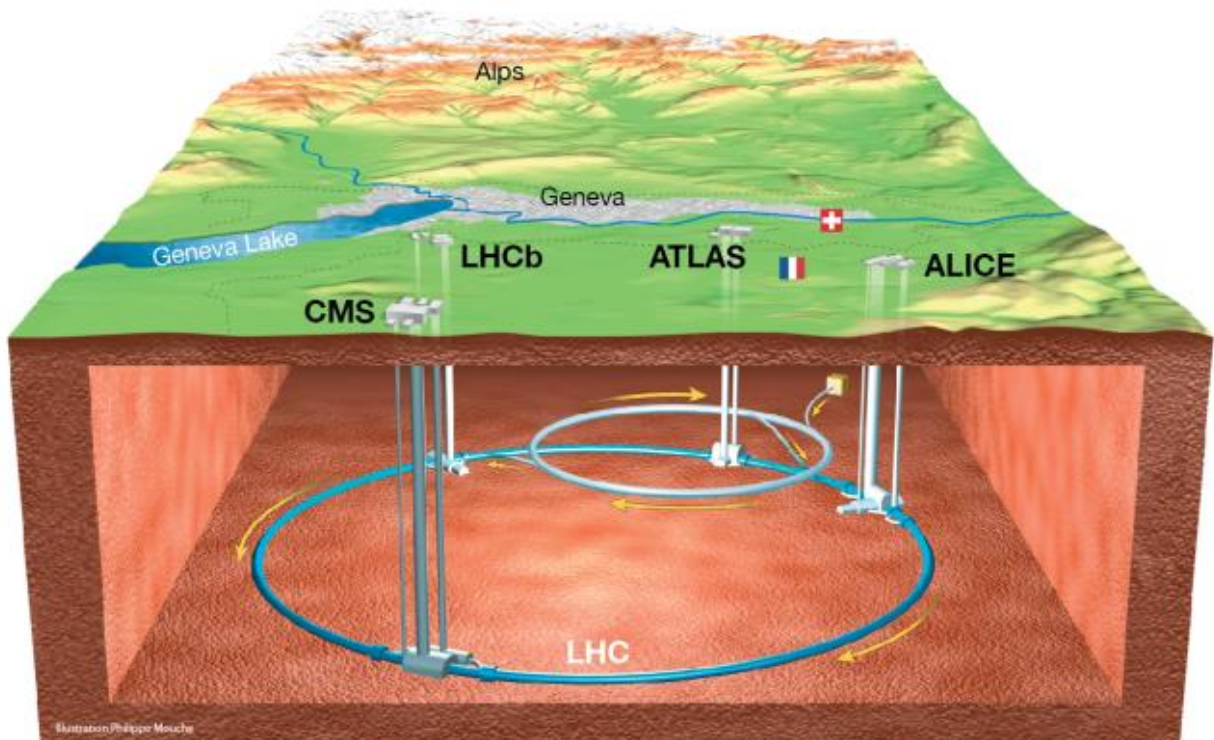


Figura 2. Vista global del LHC. [4]

2.2. El experimento CMS

El Solenoide Compacto de Muones, CMS (Compact Muon Solenoid), es uno de los dos experimentos de propósito general del LHC que estudia las colisiones entre protones con una gran resolución. La mayoría de las partículas producidas en las colisiones son inestables, transformándose rápidamente en partículas de mayor tiempo de vida, las cuales pueden ser detectadas por CMS permitiendo así medir sus momentos y energías y reunir la información recreando una “imagen” de la colisión para desarrollar un análisis detallado.

Este experimento está formado por una colaboración internacional que cuenta con más de 4000 físicos, ingenieros, informáticos, técnicos y estudiantes de alrededor de 240 institutos y universidades de más de 50 países.

Se trata de un detector de grandes dimensiones, con una estructura cilíndrica de 15 m de diámetro y 21,6 m de longitud. Está ubicado a 100 metros bajo tierra en el Punto 5 del LHC, cerca de la localidad de Cessy (Francia). En la superficie de Punto 5 (ver Figura 3) se encuentra un complejo de edificios industriales en los que se realizan trabajos de construcción, control, mantenimiento, laboratorios y todo tipo de actividades que dan servicio al experimento.



Figura 3. Vista satélite de la superficie del Punto 5 del CERN. [Imagen extraída de Google Maps]

Desde este emplazamiento situado en la superficie se puede acceder a las instalaciones subterráneas del acelerador. Un ascensor permite bajar 90 m y acceder a la caverna de servicio USC (*Underground Service Cavern*) donde se encuentran parte de los sistemas de adquisición de datos del acelerador. Diez metros más abajo, se ubica la caverna experimental UXC (*Underground Experimental Cavern*), en la cual está instalado el detector CMS.

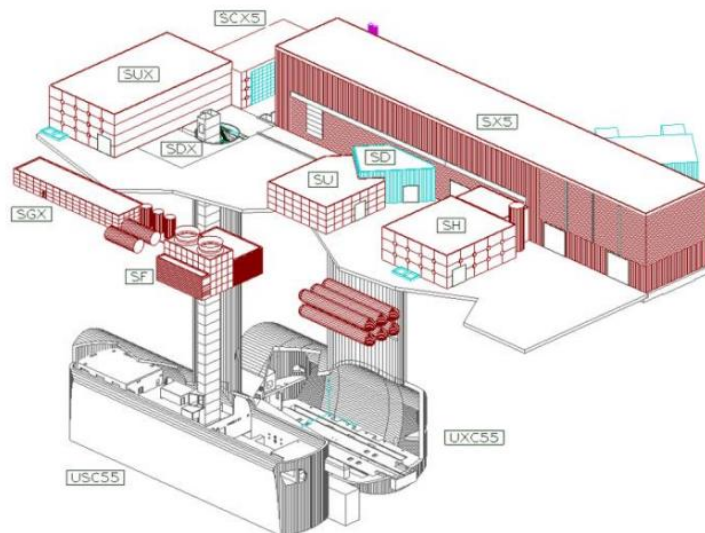


Figura 4. Plano de las instalaciones de CMS en Punto 5. [5]

El detector se distribuye en varias capas que se disponen alrededor del tubo del haz, siendo cada una de ellas un sistema especializado en la detección de un tipo de partículas. Con sus 14.000 toneladas de peso se puede decir que es un detector compacto teniendo en cuenta la cantidad de material que contiene. Uno de los aspectos más destacables es que cuenta con el imán más potente jamás fabricado, un único solenoide superconductor de 6m de radio y 12,5m de longitud que genera un campo magnético de 4T.

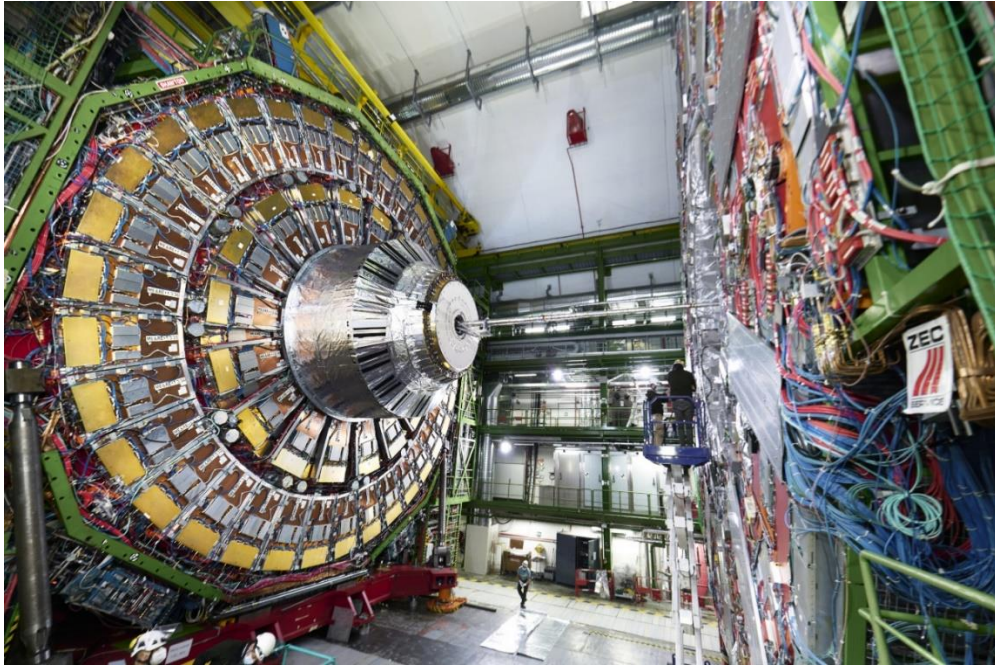


Figura 5. Fotografía real del detector CMS en el interior de la caverna. [6]

Las capas que lo forman son los subdetectores concéntricos que detectan diferentes partículas en función de su poder de penetración. Entre estos subdetectores se encuentran, de dentro a fuera y dentro de la estructura del imán, un detector de trazas (Tracker), un calorímetro electromagnético (ECAL) y un calorímetro hadrónico (HCAL). Rodeando este conjunto, se encuentra una inmensa estructura de acero de más de 11.000 toneladas [7] que aloja otros subdetectores (entre ellos, las cámaras de muones) y que sirve de retorno para el flujo magnético. Este armazón de acero está dividido en una parte central, el barril, y tres discos perpendiculares al haz en cada extremo, *endcaps*. La estructura del detector se puede apreciar en la Figura 6.

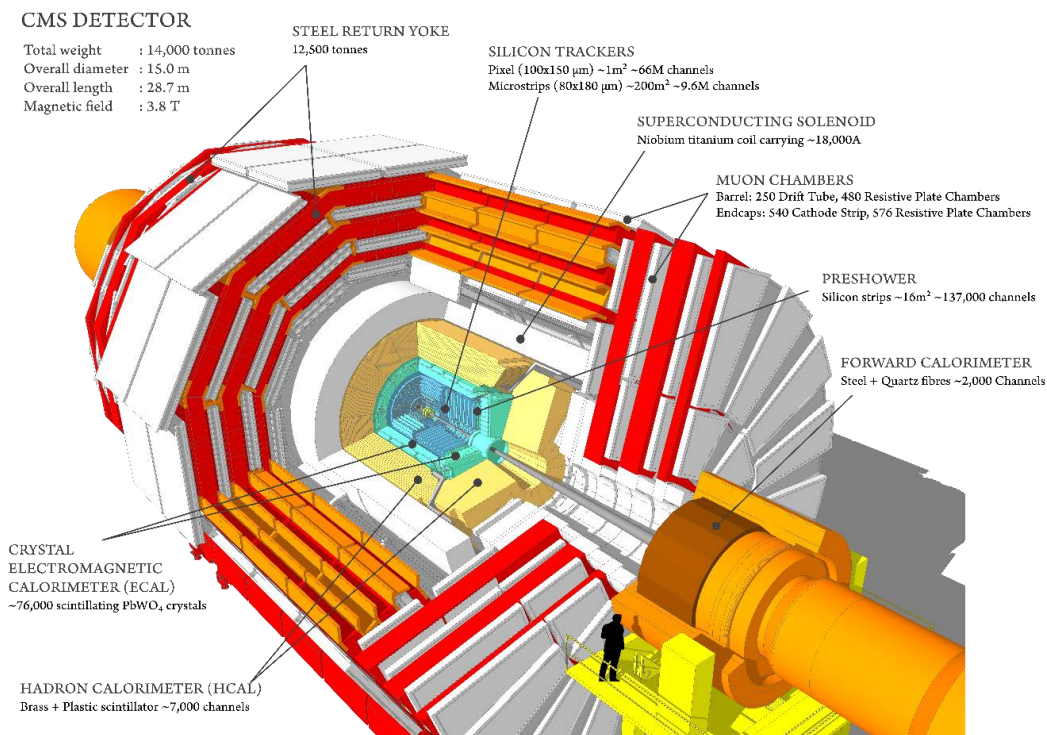


Figura 6. Representación tridimensional del detector CMS y sus subdetectores. [8]

Como se ha mencionado, las cámaras de muones se encuentran en la parte más externa del detector [9]. De esta forma, se asegura que solamente puedan llegar hasta ella muones y neutrinos, que pueden atravesar los calorímetros y el armazón de acero. Se usan detectores complementarios para obtener un sistema redundante que permita reconstruir la topología del suceso en detalle, quedando de este modo la identificación de los muones asegurada. Se pueden distinguir tres tipos de cámaras de muones en CMS:

- Cámaras proporcionales de hilos y tiras catódicas, CSC (Cathode Strip Chambers): Se encuentran en las tapas del detector, donde el campo magnético es bastante irregular y el flujo de partículas es muy alto.
- Cámaras de tiras resistivas, RPC (Resistive Plate Chambers): Se encuentran intercaladas entre las DTs y las CSCs. Tienen una excelente resolución temporal y determinan sin ambigüedad el cruce de haces del que proviene el muon.
- Cámaras de tubos de deriva, DT (Drift Tubes): Se encuentran en la zona central del detector. Estas cámaras son objeto de este proyecto, por lo que se desarrollará su descripción detallada en el Capítulo 3.

2.3. Actualización para HL-LHC

El experimento CMS ha tenido gran éxito desde que se inició. El detector ha estado funcionando sin problemas a energías de centro de masa protón-protón de hasta 13 TeV, récord mundial con una luminosidad¹ de más de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Los datos recogidos han servido para probar el SM en un régimen de energía sin precedentes y con gran precisión. Ha permitido descubrir la partícula que faltaba en el SM, el bosón de Higgs. En los próximos años, muchos componentes del acelerador deberán ser reemplazados porque llegarán al final de su vida útil, fundamentalmente por daños por radiación. Por esta razón y con la motivación de aumentar el número de colisiones para ampliar la sensibilidad y tener más posibilidades de descubrir nueva física, se está preparando una actualización del LHC, el HL-LHC (High Luminosity LHC). En esta actualización, la luminosidad integrada se multiplicará por diez con respecto a los valores de diseño originales. Se espera que la energía del centro de masa para las colisiones protón-protón actual pase de 13 a 14 TeV.

El periodo de toma de datos actual del LHC se denomina “Phase-1” y finalizará en el año 2025, seguido de una parada para la mejora del HL-LHC denominada LS3 (Long Shutdown 3) que finalizará en 2029 (ver Figura 7). El periodo de toma de datos de alta luminosidad con el LHC actualizado se denomina “Phase-2” y se espera que dure de 2029 a 2041. El HL-LHC aumentará la luminosidad integrada proyectada de 300 fb^{-1} para la “Phase-1”, el periodo actual del LHC, en un orden de magnitud hasta 3000 fb^{-1} en las próximas dos décadas, tanto para el detector CMS como para ATLAS [10].

¹ En física de partículas, la luminosidad se refiere al número de colisiones que tienen lugar por unidad de tiempo y de superficie.

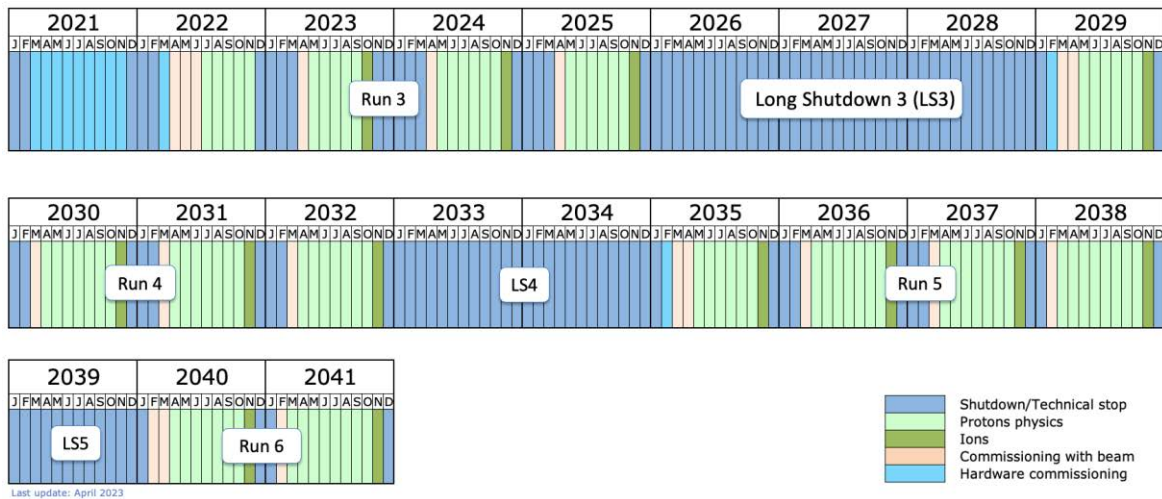


Figura 7. Calendario del LHC a largo plazo. [11]

Realizar una actualización de tal dimensión deriva en problemas y nuevos retos que se deben superar. Muchos de los sistemas que están funcionando actualmente no están preparados para trabajar a alta luminosidad. Se hace necesario actualizar también ciertos sistemas de los detectores ya bien porque los daños por radiación podrían afectar a los componentes de los detectores o porque no son capaces de trabajar con tal ocupación, tasa y solapamiento de datos que se producirán. Entre los sistemas que se deben actualizar se encuentra la electrónica de las cámaras de muones.

Se plantearon dos posibles fuentes de modificación en las cámaras de deriva. Una de ellas sería reemplazar las propias cámaras, pero tras estudios de irradiación de las cámaras de deriva se ha permitido extrapolar el funcionamiento esperado durante HL-LHC. Aunque se espera una pérdida de eficiencia (en torno a un 15%) en algunas de las cámaras más expuestas del detector, globalmente el efecto será reducido y asumible. Diferente es la situación de la electrónica actual que digitaliza las señales procedentes de las cámaras. Esta electrónica actualmente permite una tasa de disparo máxima de ~ 100 kHz, mientras que para el HL-LHC se planea que será de ~ 750 kHz. Por ello, resulta imprescindible reemplazar la electrónica actual de las cámaras de deriva, siendo esta actualización el eje principal de este trabajo.

Capítulo 3. El detector de las cámaras de deriva

3.1. Las cámaras DT

Las cámaras de deriva, cámaras de tubos de deriva o cámaras DT (*Drift Tubes*), como se ha comentado, son un componente esencial del experimento que forma parte del espectrómetro de muones del barril de CMS y permiten detectar los muones resultantes de las colisiones de protones del LHC. Sus funciones principales son identificar, generar la señal de disparo y tomar medidas de los muones.

El elemento básico de estas cámaras son las celdas de deriva (ver Figura 8). Cada celda tiene forma rectangular con un ancho de 42 mm, una altura de 13 mm y una longitud variable entre 2 y 4 metros. Están delimitadas por dos vigas recubiertas por unas bandas de aluminio y por su centro pasa un hilo recubierto de oro. Las vigas recubiertas actúan como cátodos y el hilo actúa como ánodo. La parte superior e inferior de la celda se compone de unas placas de aluminio en cuyas caras internas transcurren unas cintas de aluminio (*strips*) aisladas mediante *mylar*² que actúan como generadoras de campo eléctrico. El interior de la celda se encuentra relleno de una mezcla de gases (85% de argón y 15% de dióxido de carbono) cuya pureza es de especial importancia, se utilizan gases que no sean electronegativos para garantizar la estabilidad del sistema.

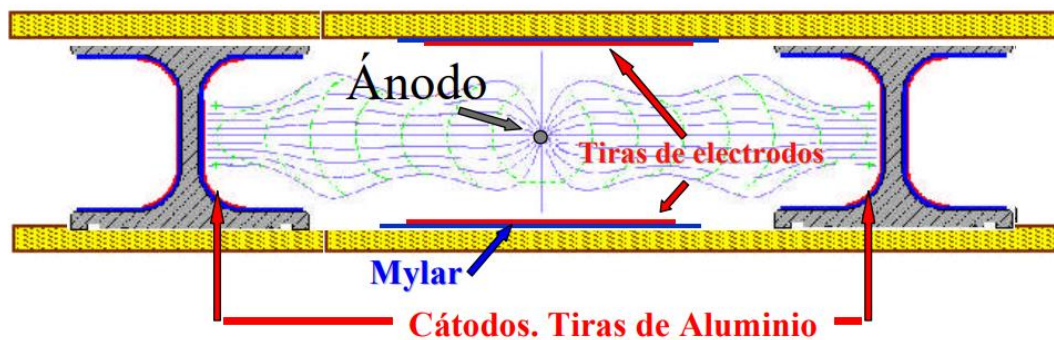


Figura 8. Corte transversal de una celda de una cámara DT. [1]

El funcionamiento de estas cámaras se basa en la ionización del gas que hay en su interior. Cuando una partícula cargada entra en la celda, ioniza el gas (que está sometido a una diferencia de potencial), liberando un electrón adicional. Este electrón provocará una nueva ionización dando lugar a la formación de una avalancha de electrones que derivan al hilo produciendo un pulso eléctrico que es recogido por la electrónica. Las cargas que llegan al ánodo van a velocidad constante, lo que permite una dependencia lineal entre la posición de paso del muon y el tiempo que tardan en llegar al ánodo las cargas ionizadas (tiempo de deriva). Si se tiene el tiempo que tarda en llegar la señal con respecto a una referencia fija, se puede saber la posición exacta de paso del muon y reconstruir así su trayectoria.

La unión de celdas de deriva, situando una junto a otra, hace que se pueda cubrir una gran superficie, logrando con ello la buena resolución que tienen las cámaras DT de la posición del paso de los muones. Las celdas se repiten en un plano formando una capa de la cámara. Las capas, a su vez, se agrupan de

² El *mylar* es un material polimérico en forma de lámina de poliéster metalizado con buenas propiedades de resistencia y durabilidad. El nombre "*mylar*" es una marca comercial registrada por la empresa DuPont.

cuatro en cuatro desplazadas una distancia de media celda las capas pares con respecto a las impares, formando así una Supercapa o SL (Superlayer). Se puede ver un esquema en la Figura 9.

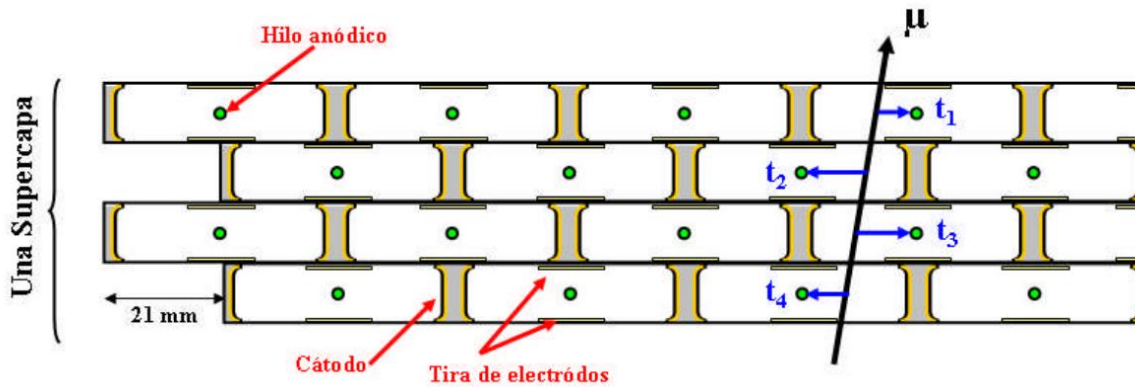


Figura 9. Esquema de una SL de las cámaras DT. [1]

Cada cámara de deriva está compuesta por tres SL, se pueden observar en la figura 10. Las dos SL exteriores (SL1 y SL3) tienen los hilos paralelos al eje del haz, obtienen medidas en la coordenada azimutal ϕ (Supercapa ϕ). La SL central o intermedia (SL2) tiene los hilos orientados perpendicularmente a los anteriores, mide la coordenada polar θ (Supercapa θ). Entre las SL mencionadas se encuentra pegada una estructura hexagonal de aluminio en forma de panal de abeja (Honeycomb) que permite dar rigidez a la cámara evitando deformaciones de las SL sin aumentar el peso [1].

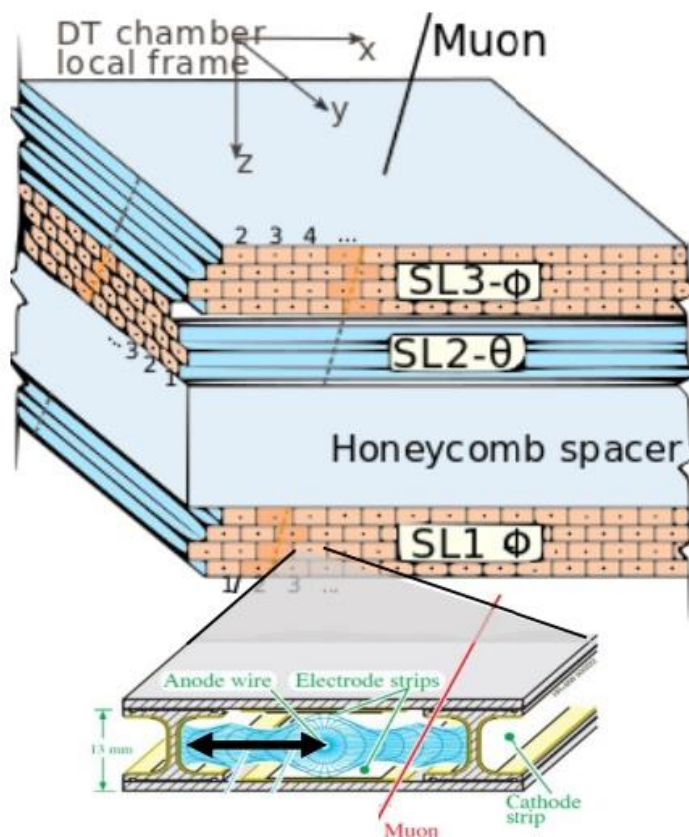


Figura 10. Dibujo esquemático de la disposición de las celdas y las SL en una cámara DT. [12]

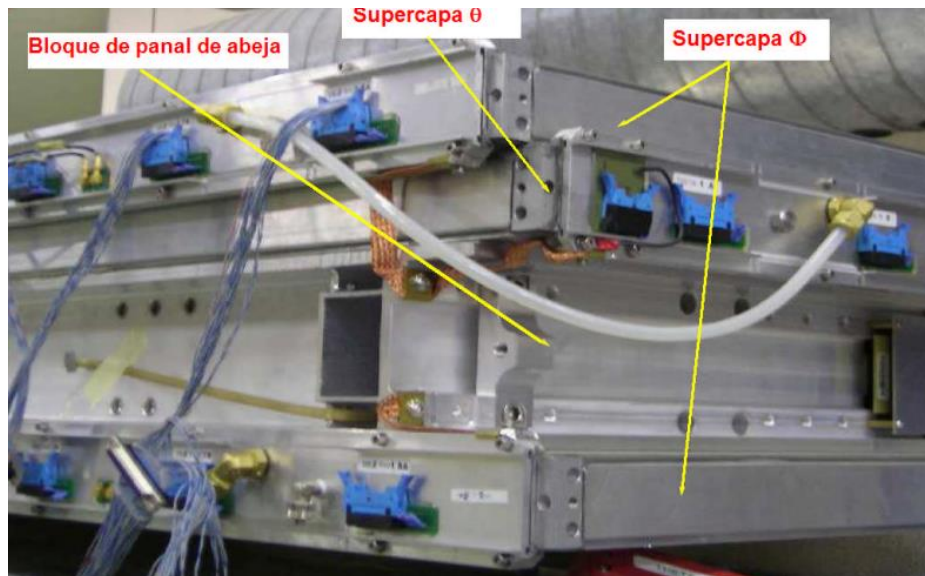


Figura 11. Imagen real de una cámara DT completa con identificación de las SL. [1]

3.2. Distribución de las cámaras DT en CMS

Tras la descripción de las cámaras DT y su funcionamiento, se hablará de la distribución dentro del detector CMS. Volviendo a lo mencionado en el apartado 2.2, las cámaras DT son subdetectores que se encuentran en la parte más externa. En concreto, estas cámaras se encuentran incrustadas en el armazón de acero que rodea al solenoide de CMS (ver la ubicación del armazón en la Figura 6). En la Figura 12 se puede observar una fotografía real en la que aparecen las cámaras (aspecto gris metálico) y el armazón de acero (pintado de color rojo).



Figura 12. Fotografía de una parte del armazón de CMS con las cámaras DT. [8]

El armazón de acero se encuentra dividido en cinco secciones cilíndricas o ruedas que miden unos 2,5 m de grosor cada una y son llamadas YB (*Yoke Barrel*) +2, +1, 0, -1, -2 como se muestra en la Figura 13. Cada una de estas ruedas está dividida en doce sectores, siendo el sector 1 el que está más cerca del centro del anillo del LHC.

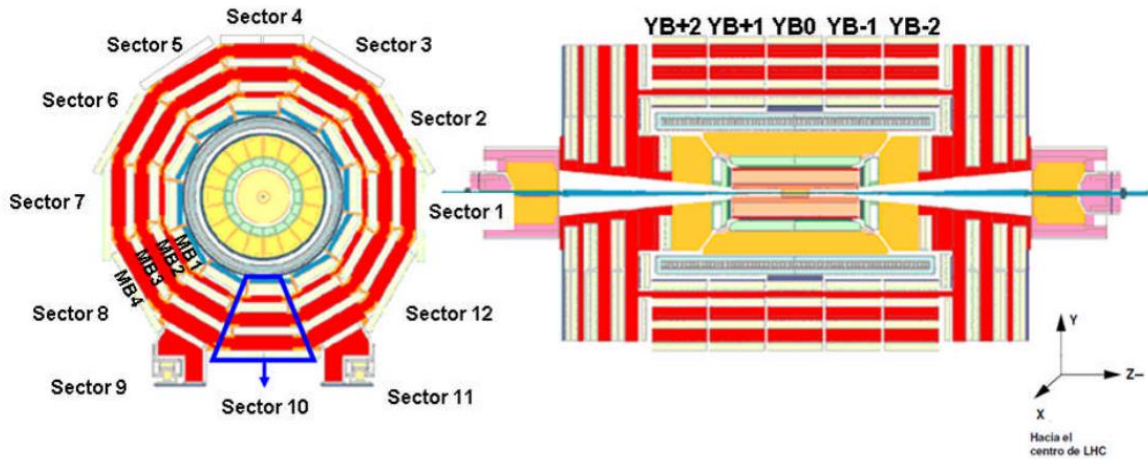


Figura 13. Sección transversal y longitudinal del barril de CMS con subdivisión en ruedas y sectores. [1]

En cada uno de los sectores mencionados las cámaras DT se encuentran intercaladas en cuatro estaciones concéntricas respecto al tubo por el que circula el haz de protones. Estas estaciones se denominan, desde la más interna hasta la más externa, MB1, MB2, MB3 y MB4. Con esta distribución, se tendrían: cuatro cámaras por sector, doce sectores y cinco ruedas, lo que daría 240 cámaras. Considerando que los sectores 4 y 10 cuentan con dos cámaras MB4 cada uno, se consiguen alojar en total 250 cámaras DT en el detector.

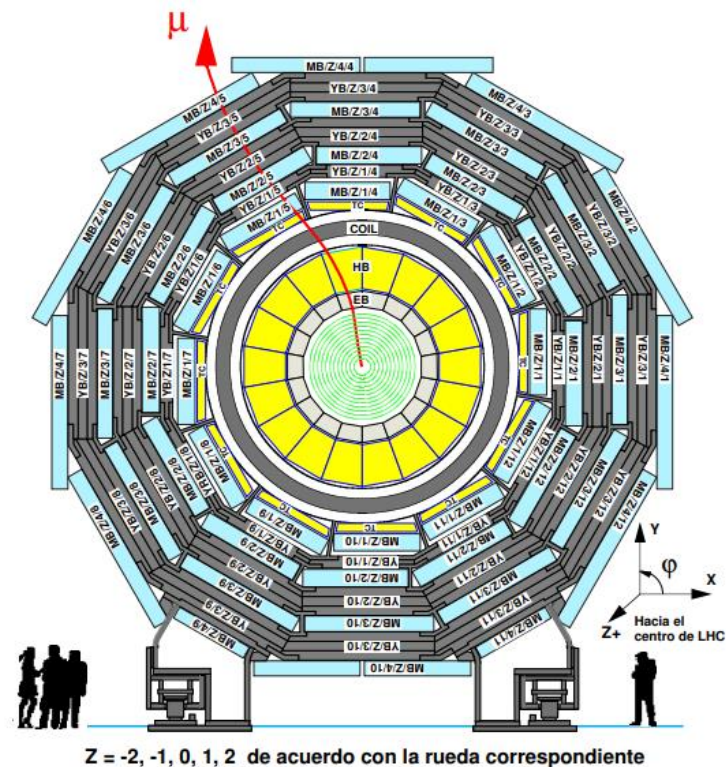


Figura 14. Dibujo esquemático de distribución de las cámaras DT en la rueda del detector CMS. [13]

3.3. La electrónica de las cámaras DT y su actualización

Los pulsos producidos por los hilos anódicos de las celdas de deriva (ver apartado 3.1) pasan por la electrónica analógica o frontal de las cámaras que está formada por las tarjetas FE (*Front-End*) o FEB (*Front-End Board*). Estas tarjetas se encuentran en el interior del volumen de la cámara y se encargan de acondicionar las señales antes de su digitalización temporal por las tarjetas ROB (*Read-Out Board*). Por tanto, la salida de las FEB de cada SL se conecta directamente a las tarjetas ROB y TRB (*Trigger Board*), siendo estas el primer nivel del sistema de adquisición de datos y de disparo. Ambas tarjetas están situadas dentro de una estructura llamada Minirate que está fija al panel de abeja en uno de los extremos de la estructura de la cámara (ver Figura 15). Para dar un orden de magnitud del sistema de lectura, el número de cámaras DT es de 250, lo que deriva en 172200 canales que digitalizar. Cada tarjeta ROB fue creada para permitir digitalizar 128 canales en unas dimensiones limitadas al espacio reducido que hay en las cámaras. Al situarse acopladas a la cámara se garantiza que las señales recorran una distancia reducida y se minimice el número de cables que salen del detector, además de minimizar también las interferencias electromagnéticas que degradarían la calidad de la señal.

Cada cámara DT tiene asociado este complejo sistema electrónico llamado Minirate en el que además de la electrónica de disparo y lectura de los pulsos también se encuentra la electrónica de control de las cámaras, CCB (*Chamber Control Board*). Los Minirates que se usaron para la construcción original del detector se denominaron MiC1 (Minirate 1 for DT system) y se conocen como “*Minirate legacy*”. Cada MiC tiene un consumo de unos 100 W, lo que requiere un sistema de refrigeración propio para cada MiC que se realiza con un circuito de refrigeración líquida permitiendo mantener la temperatura por debajo de 34°C.

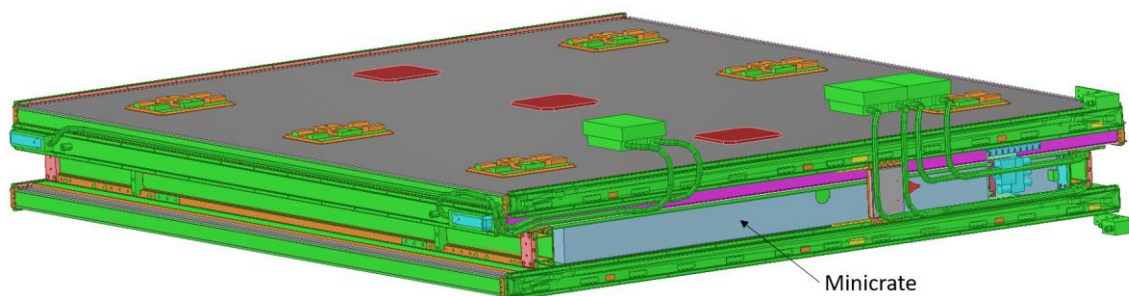


Figura 15. Ubicación del Minirate dentro de un modelo 3D de cámara DT.

Como se ha mencionado en el apartado 2.3, en la actualización del detector se reemplazará la electrónica frontal de las cámaras DT, lo que conlleva un cambio en los MiC1 que están funcionando actualmente. La principal limitación de los MiC1 es su banda ancha disponible ya que en HL-LHC se pretende alcanzar una tasa de disparo de entre 500 kHz y 750 kHz, frente a los 100 kHz actuales. A partir de 300 kHz de tasa de disparo la electrónica ROB no puede operar eficientemente. Otros motivos que hacen necesaria la actualización de los Minirates es el deterioro de la electrónica de control tras años de operación en el detector bajo radiación, es decir, la limitación a la radiación de las tarjetas CCB y su longevidad obligan a un reemplazamiento si se pretende que sigan funcionando. Por ello, en LS3 se reemplazarán los MiC1 por los nuevos Minirates MiC2 (Minirate 2 for DT system (Phase-2)), cuyo diseño del sistema y procedimiento de montaje se desarrollará en este proyecto.

Los MiC2 incorporarán nuevas tarjetas denominadas OBDT (*On-Board electronics for DT*). Estas tarjetas permitirán transferir los datos fuera de la caverna experimental utilizando la tecnología de enlace óptico de gran ancho de banda. Según el tipo de SL del que reciban la señal, se clasifican en: tarjetas OBDT-Theta, conectadas a las SL de tipo θ y, tarjetas OBDT-Phi, conectadas a las SL de tipo ϕ (ver esquema en la Figura 16). Las tarjetas OBDT-Theta están siendo íntegramente desarrolladas por el CIEMAT, lo que implica diseño, desarrollo de firmware, validación (tanto en laboratorio como en el detector CMS), además de otros test como los de radiación realizados en las instalaciones de CHARM en el CERN. Las tarjetas OBDT-Phi están siendo desarrolladas por el equipo de investigadores del INFN (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*) de Padova.

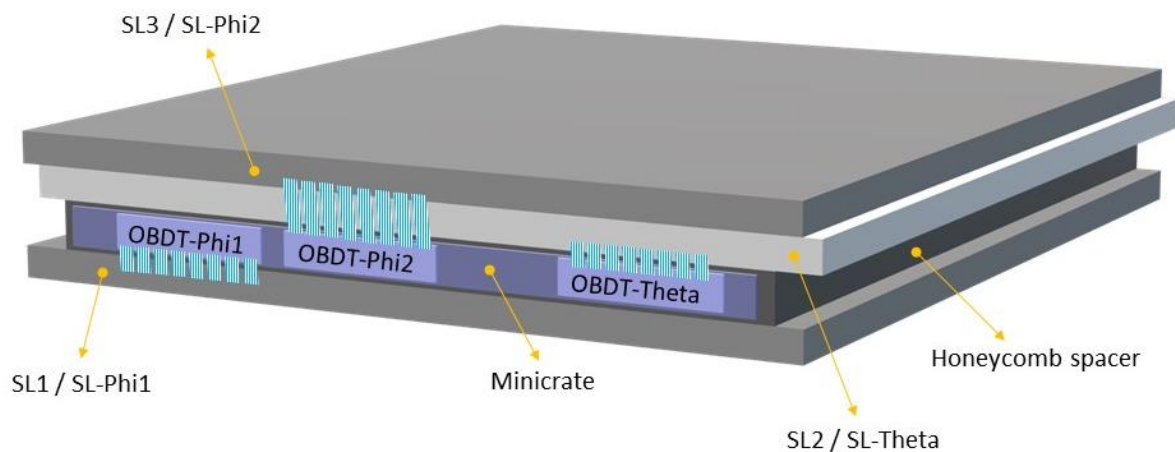


Figura 16. Esquema simplificado de una cámara MB1 y su conexión con las tarjetas OBDT.

Las OBDT tienen el objetivo de digitalizar los muones que se generarán en las colisiones de protones, se encargan del *readout* (lectura) de los datos producidos en cada choque de haz de partículas. La información que llegará al sistema cuando los muones atraviesen la cámara será en forma de hits o eventos.

La tarjeta OBDT-Theta que será diseñada en el CIEMAT recibirá la información a través de ocho conectores de *Front-End* (FE) conectados a la cámara. En cada evento se generarán pulsos que estos conectores recibirán por medio de sus canales. En la OBDT-Theta se procesará la información recibida para enviarla después a la superficie con un enlace de fibra óptica de altas prestaciones que ha sido diseñado exclusivamente para los experimentos de altas energías del HL-LHC [14]. En la Figura 17, Figura 18 y Figura 19 se puede observar la geometría de la tarjeta.

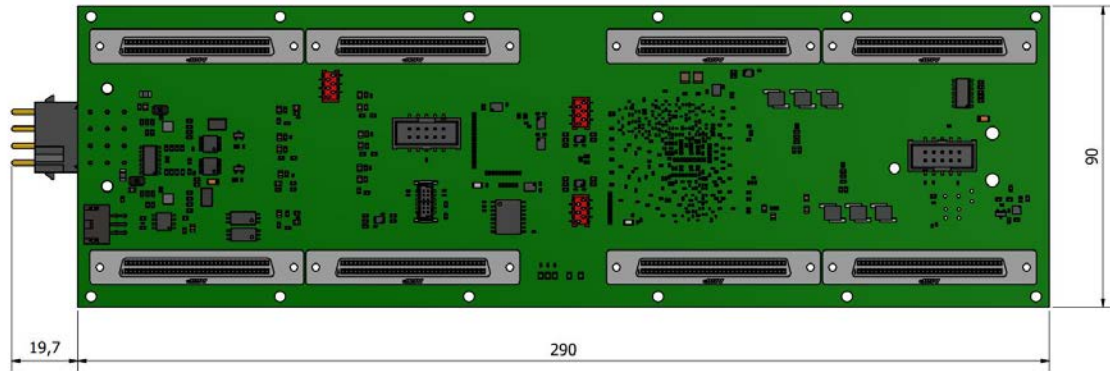


Figura 17. Vista superior de la tarjeta OBDT-Theta (cara superior/top) con las medidas generales.

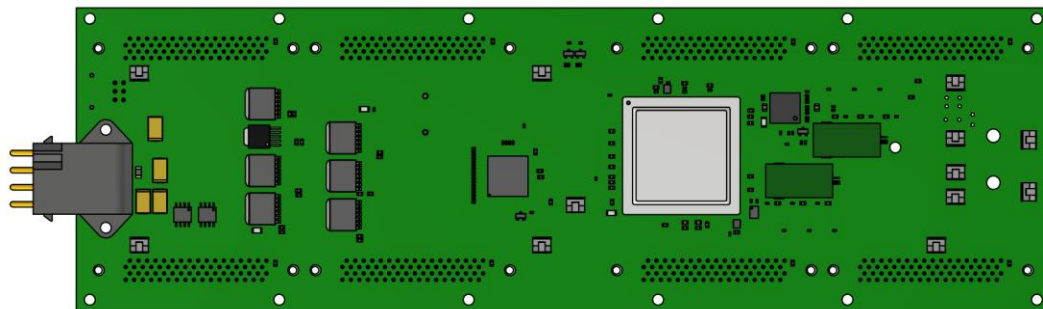


Figura 18. Vista inferior de la tarjeta OBDT-Theta (cara inferior/bottom).

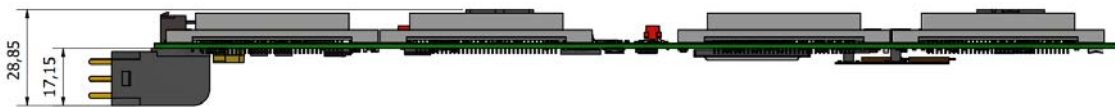


Figura 19. Vista en alzado de la tarjeta OBDT-Theta.

Para llevar a cabo las comunicaciones con la OBDT-Theta se usará un enlace de fibra óptica que se encargará de mandar órdenes a la tarjeta y monitorizar su estado.

De todos los componentes que se pueden encontrar en la tarjeta, en este texto se destacarán solamente los más relevantes que afectan a la parte mecánica, lo que concierne a este trabajo. Los componentes elementales de la tarjeta, que además son los que trabajan alta temperatura y requieren un sistema de disipación de calor, son los siguientes: reguladores, GBT-SCA, PolarFire, lpGBT y VTRX+. Se puede comprobar la ubicación de estos componentes en la Figura 20.

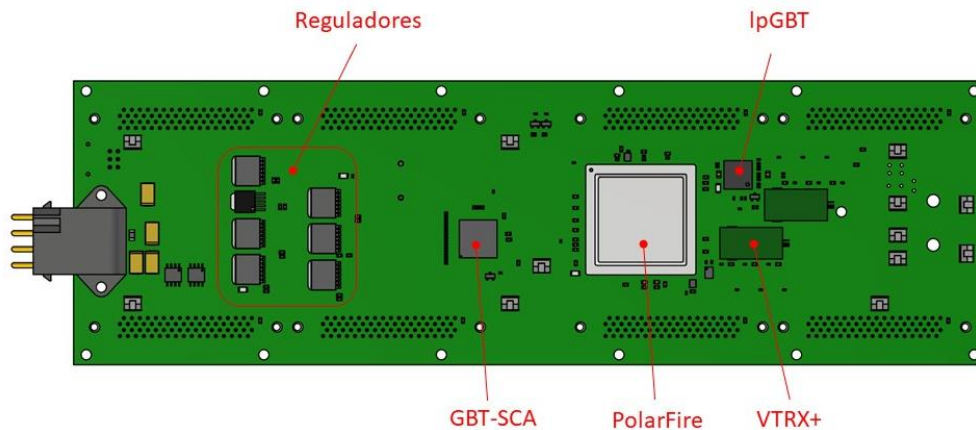


Figura 20. Esquema de la OBBD-Theta con identificación de sus componentes más elementales.

La zona marcada como reguladores en la Figura 20 indica dónde están situados los reguladores de voltaje de la tarjeta. Los reguladores son dispositivos electrónicos diseñados para mantener constante la tensión de salida de un sistema eléctrico. Estos reguladores están instalados con el objetivo de que los dispositivos reciban un suministro de voltaje estable y sin rizado, evitando que las fluctuaciones en la carga o entrada de voltaje afecten al rendimiento de los dispositivos. Los reguladores actúan como una resistencia, disminuyen el voltaje y disipan calor, por ello será uno de los puntos que necesita especial atención para disminuir la temperatura. En la OBBD-Theta se han usado reguladores LDO (*Low Drop-Out*) que permiten tener una baja caída de voltaje entre la entrada y la salida y garantizan una alta precisión.

El IpGBT (*Low Power Giga Bit Transceiver*) [15] es un chip ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*), un circuito integrado no estándar diseñado para un uso específico. Desarrollado por el CERN, es un transceptor que permite la comunicación con la electrónica a través de un enlace serie de alta velocidad.

El GBT-SCA (*Giga-Bit Transceiver optical link – Slow Control Adapter*) [16] es también un ASIC diseñado por el CERN. El GBT-SCA está pensado para su uso en experimentos de física de partículas y más concretamente el del HL-LHC. En la OBBD-Theta permite realizar las tareas de ADC (Convertor de señal analógica a digital, en inglés *Analog-to-Digital Converter*) y DAC (Convertor de señal digital a analógica, en inglés *Digital-to-Analog Converter*).

La PolarFire es la FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) instalada en la tarjeta. Es el dispositivo que actúa como cerebro del sistema y el origen de todas las comunicaciones. Si se desea enviar órdenes o recibir datos es necesario comunicarse con la FPGA.

Los VTRx+ (*Versatile Link Plus Transceiver*) son módulos diseñados por el CERN que forman un sistema óptico de transmisión de datos mediante los cuales se hace la conexión por fibra óptica a la OBBD-Theta. Estos transceptores ópticos permiten convertir los datos eléctricos en señales ópticas en un módulo miniaturizado que mide 10 mm x 20 mm y con una altura inferior a 2,5 mm. Cuentan con 4 canales de transmisión de datos y un único canal de recepción. Estos módulos tendrán una terminación de MTP (*Multi-fiber Termination Push-on*) que se conecta a un *fan-out* LC de 12 permitiendo separar los canales deseados [17].

En la OBDT-Theta se utilizan dos VTRx+. Uno de ellos está dedicado al *slow control* y permite configurar la tarjeta y acceder a todas las interconexiones de la cámara de deriva. El otro VTRx+ está dedicado a *trigger*, tiene un enlace de *slow control* secundario que permitiría comunicarse con la tarjeta en caso de que falle el *slow control* primario y se utiliza principalmente para mandar la digitalización de los *hits* o pulsos generados.

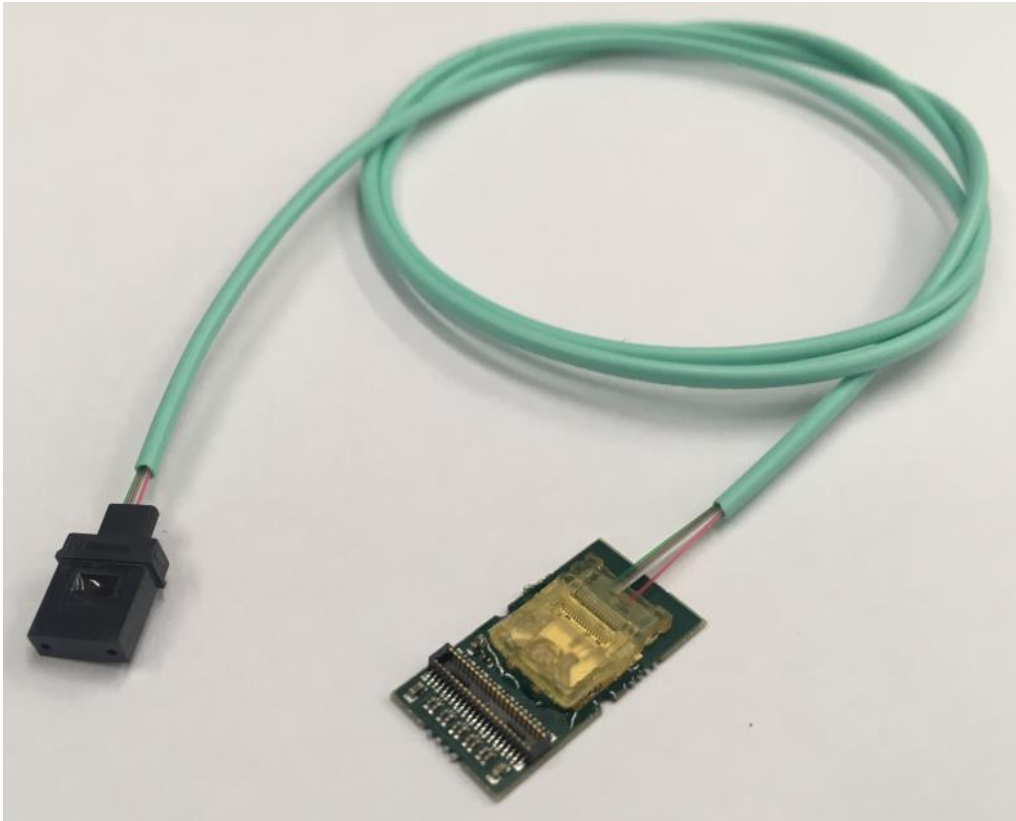


Figura 21. Imagen del módulo VTRx+ optical transceiver desarrollado por el CERN mostrando el módulo, el cable de fibra óptica y el conector MTP. [17]

Además del complejo desarrollo de las tarjetas electrónicas, el reemplazamiento de los Minicrates lleva asociado la reconstrucción de un gran sistema de estructuras mecánicas, cableado y sistema de refrigeración cuyas cuestiones se tratarán en este documento.

Capítulo 4. Diseño y fabricación de componentes mecánicos

4.1. Distribución de la fabricación y el ensamblaje

En este punto se encontrará la información relacionada con el reparto de tareas tanto de fabricación como de ensamblaje de las partes involucradas y la estandarización de las piezas mecánicas.

4.1.1. Introducción y estandarización

La actualización de la electrónica de las cámaras de deriva lleva asociado un gran trabajo de ingeniería, tanto a nivel de la propia electrónica como de la fabricación industrial de componentes mecánicos que están involucrados y deben ser reemplazados.

Al tratarse de una colaboración internacional, las distintas instituciones que participan en la producción y el ensamblaje de la electrónica de las cámaras llegaron a un acuerdo para distribuir tareas en sus respectivas instalaciones.

La estandarización de nomenclatura es crucial en la producción industrial. Una nomenclatura normalizada proporciona un lenguaje común y preciso que facilita la comunicación. Al adoptar un sistema de nomenclatura uniforme, se reducen significativamente las posibilidades de malentendidos y errores, ya que todos los participantes en la cadena de suministro utilizan los mismos términos para designar una pieza en concreto. El hecho de utilizar una nomenclatura normalizada es evidente en la industria a gran escala, pero no tan usual en términos de fabricación para laboratorios de investigación o producciones más reducidas ya que se trata de piezas “personalizadas” que no serán reproducidas numerosas veces. Aun así, cuando el número de componentes es significativo, la estandarización se convierte en un factor crítico para garantizar la coherencia en la producción y esto se hace aún más importante cuando se trabaja en un entorno internacional en el que se hablan diferentes idiomas. Debido al alto número de piezas que intervienen en este montaje y, siendo apreciables los problemas de comunicación al inicio de este proyecto, se hizo necesaria la estandarización de la designación de los componentes mecánicos. Se ha creado una tabla en la que se describen los diferentes elementos asociando a cada uno un nombre, un número de referencia, una descripción y la institución responsable de su fabricación. Esta tabla se puede encontrar en el Anexo 1.

4.1.2. Distribución de tareas

En este capítulo se desarrollará la fabricación de los componentes de los cuales es responsable el grupo CIEMAT. Como se puede apreciar en la tabla mencionada del Anexo 1, el CIEMAT es responsable de la fabricación de todos los perfiles de aluminio para los Minicrates de las diferentes cámaras. Además de esta producción, se encarga del sistema de refrigeración de los Minicrates y de la fabricación de las OBDT-Theta, como se mencionó anteriormente. La tarea de fabricar las OBDT-Theta involucra también la producción de los componentes mecánicos que van asociados a la tarjeta y permiten su correcto funcionamiento.

La fabricación implica la creación y la transformación de productos a partir de materias primas, siendo un proceso fundamental que establece la base para la calidad y la eficiencia. Por otro lado, el montaje

y ensamblaje se centran en la integración de estos componentes para formar el producto final. Separar estas actividades permite elegir ubicaciones especializadas y optimizar recursos, siempre priorizando la calidad del producto final y el acuerdo entre las instituciones involucradas. Cada institución se encarga de la fabricación de determinados componentes y del ensamblaje de un número concreto de Minicrates. Es por ello que el reparto de componentes en cuanto a fabricación se realizó de manera independiente al reparto de tareas de ensamblaje, garantizando que la logística era adecuada para hacer llegar los componentes necesarios al lugar correspondiente. Así, en este caso, el montaje se repartió distinguiendo según tipos de Minicrates como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución del montaje de los MiC2 por ciudades.

Ciudad	Tipo de Minicrate
Aachen (Alemania)	MB1 (Cantidad: 60)
Torino (Italia)	MB2 (Cantidad: 20) + MB4-10 (Cantidad: 20)
Madrid (España)	MB2 (Cantidad: 40) + MB4-9,11 (Cantidad: 10)
Padova (Italia)	MB3 (Cantidad: 60)
Bolonia (Italia)	MB4s + MB4-4 (Cantidad: 40)

4.2. Perfiles para los Minicrates. Fabricación para cada cámara DT.

En este apartado se hablará de la extrusión de aluminio de los perfiles para los Minicrates MiC2 (descritos en el apartado 3.3) para cada tipo de cámara DT, explicando en detalle su fabricación y mecanizado posterior.

4.2.1. Descripción del diseño de la matriz para la extrusión de aluminio

El Minicrate forma una estructura independiente que se acopla en el panel de abeja de la cámara de deriva (ver apartado 3.3) y forma un módulo electrónico que permite digitalizar las señales de la cámara para la posterior reconstrucción de la traza de los muones. Para facilitar la compatibilidad con los sistemas antiguos y, por tanto, la instalación, los Minicrates han sido diseñados para ser lo más parecido posible a los “legacy” (los Minicrates ya instalados en CMS que han estado funcionando hasta la fecha), pero añadiendo las modificaciones necesarias para las nuevas tarjetas electrónicas.

Las estructuras base de los Minicrates legacy son perfiles de aluminio extruido con una anchura fija de 10,5 cm y una altura de 5,5 cm cuyas longitudes varían entre los 207,5 cm para el tipo MB3 y 107,1 cm para el tipo MB4(9,11). Independientemente de las ventajas a nivel industrial que supone el uso de un material como el aluminio, en este caso se debe principalmente a que el intenso campo magnético presente en la zona del detector hace fundamental el empleo de materiales no magnéticos en toda la estructura mecánica. No obstante, al añadir un sistema de refrigeración en su interior, el aluminio proporciona las condiciones ideales para este funcionamiento por su buena conductividad térmica, cuyo análisis se encuentra de manera más detallada en el apartado 4.4.

Se ha realizado un nuevo diseño para la matriz de extrusión de los perfiles de aluminio de los MiC2, buscando la optimización de material y manteniendo las dimensiones generales sin perder funcionalidad. Se ha comprobado que el diseño cumpla con los requisitos necesarios para ser utilizado como perfil de extrusión, teniendo en cuenta el espesor mínimo para mejorar la estabilidad de la extrusión y mantener las cotas dentro de tolerancias admisibles. También se puede apreciar que no hay cambios bruscos de espesor para favorecer el enfriamiento homogéneo y evitar distorsiones durante la fabricación. El diseño cuenta con radios de redondeo en las aristas, ya que si se dejan las aristas “vivas” se incrementaría la generación de calor reduciendo la velocidad de extrusión y aumentando los problemas de calidad. Se puede observar el plano completo del perfil en el Anexo 2 y un esquema en la Figura 22.

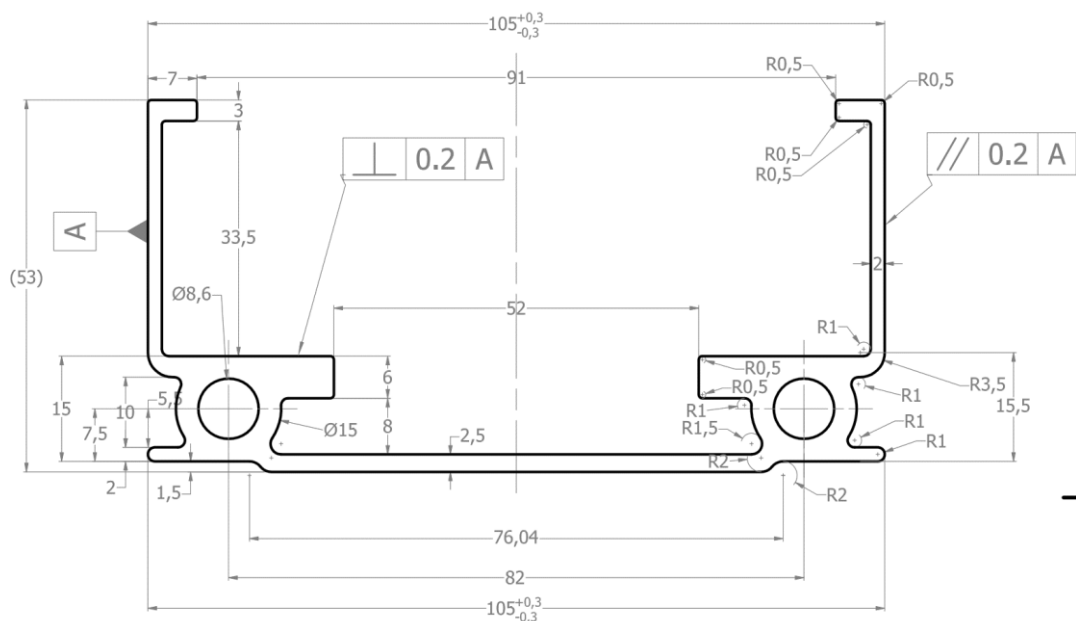


Figura 22. Perfil de extrusión de MiC2. [Imagen extraída del plano incluido en el Anexo 2]

Este diseño de perfil se mantiene para todos los tipos de cámaras. Las dos circunferencias que aparecen en el diseño darán lugar con la extrusión a las tuberías por las que circulará el sistema de refrigeración que permitirá disipar calor manteniendo la estructura del Minicrate a una temperatura adecuada para que la electrónica funcione correctamente. Las dimensiones de anchura y altura del perfil respetan el hueco en el que se deberá instalar el Minicrate dentro de la cámara. Las aletas que aparecen hacia el interior del perfil servirán como soporte para los componentes, siendo las superiores las que permitirán sujetar el cableado y las inferiores sobre las que se apoyarán las OBDT.

4.2.2. Distribución de longitudes para cada tipo de perfil

Pese a que solo hay un único diseño de perfil de extrusión, para cada tipo de cámara se necesita una longitud determinada y un mecanizado posterior específico para situar los agujeros asociados a cada configuración. La geometría del Minicrate variará en función de la posición dentro de las ruedas de CMS y del tamaño de las cámaras de deriva. Hay cuatro tipos principales: MB1, MB2, MB3 y MB4. Al mismo tiempo, los Minicrates del tipo MB4 se diferencian dependiendo del sector en el que se encuentren. En los sectores S4 y S10 se tienen dos cámaras MB4, siendo de inferior tamaño cada una al resto de los sectores. En los sectores S9 y S11, las cámaras han de ser más estrechas porque coinciden con las sujeciones de la rueda. Dentro de las ruedas de CMS se diferencian también

Minicrates de tipo *Left* (Izquierda) y *Right* (Derecha), idénticos en funcionalidad, pero con la orientación de las conexiones externas invertidas.

En la Tabla 2 se ha realizado una clasificación de los Minicrates en función del tipo de cámara a la que pertenece, indicando la longitud del perfil de aluminio que debe tener, la cantidad requerida para instalar (cantidad de cámaras), cantidad de perfiles de repuesto y la suma de cantidad requerida más el repuesto, que da el número total de perfiles que se deben producir.

Tabla 2. Clasificación de los perfiles Minicrates según el tipo de cámara DT.

TIPO MINICRATE	LONGITUD [mm]	Nº REQUERIDO	Nº REPUESTO (mínimo)	Nº TOTAL PERFILES	Longitud total aluminio necesitada [mm]
MB1	1704	60	8	68	115872
MB2	1834	60	6	66	121044
MB3	2085	60	8	68	141780
MB4 (4/10)	1583	20	4	24	37992
MB4 (9/11)	1081	10	4	14	15134
MB4	1834	40	6	46	84364
Total		250	36	286	516186

Con el número de perfiles necesarios, se pueden calcular las cantidades finales de materia prima que se necesitará para la extrusión. El pedido realizado a la empresa encargada de la extrusión debe ser de mínimo 517 metros de aluminio con la matriz del perfil anteriormente mencionado.

Combinando los factores de resistencia, peso, función estructural y transmisión de calor, además de la geometría y la complejidad del perfil que ya se ha considerado, la selección del material para este tipo de perfil es el uso de aluminio *EN-AW-6060*³ con un tratamiento térmico T6⁴. La aleación de aluminio 6060 es de uso frecuente en la industria, sobre todo para la fabricación de perfiles extruidos como marcos de cuadros o mobiliario de gamas altas [18]. Contiene un 0,30% de silicio y un 0,30% de magnesio, que aportan buenas propiedades de conformabilidad y unas propiedades mecánicas aceptables (existen otras aleaciones con propiedades mecánicas más altas). Es una opción adecuada para aplicaciones en las que la fuerza no es el factor primordial y se requiere un acabado de calidad.

³ La designación del aluminio "EN AW-XXXX X" especifica su composición química. Con las primeras letras se identifica que se trata de aluminio para forja, seguido de las cifras numéricas que indican en orden: aleación mayoritaria; variación de la aleación original/control especial de impurezas; porcentaje de contenido de aleantes o grado de pureza y variante nacional registrada.

⁴ El tratamiento térmico T6 se usa para mejorar las propiedades del aluminio. Consiste en dos etapas: la solución, en la que el material se calienta en torno a 500°C para que los átomos de la aleación se disuelvan en la matriz haciendo una estructura más homogénea; y el envejecimiento, en el que el material se enfría rápidamente y se vuelve a calentar a temperatura más baja (en torno a 170°C) dando lugar a precipitados de la fase de aleación que consiguen mejorar la resistencia mecánica y la dureza.

Con el objetivo de dar más protección al perfil, mejorar la resistencia superficial y a la abrasión, se dará un Anodizado Sulfúrico de Aluminio a (SAA)⁵ [19].

Con estos datos se debía llegar a una distribución de los perfiles en la extrusión que permitiera la optimización de material, teniendo en cuenta las consideraciones teóricas y prácticas necesarias para esta distribución. Uno de los factores más limitantes era la longitud máxima del perfil extruido. Esta longitud normalmente varía en función del tipo de perfil, la aleación de aluminio que se utilice y las capacidades específicas de la máquina extrusora. A día de hoy, las longitudes más usuales para la extrusión de perfiles de aluminio suelen estar entre los 6 y 8 metros. Esta limitación se debe principalmente a los problemas que pueden surgir por la deformación y torsión durante el proceso de extrusión. En todo momento de la producción se busca evitar que la uniformidad de las propiedades a lo largo del perfil se vea afectada, controlando la temperatura y la velocidad de enfriamiento. Si se aumenta demasiado la longitud de extrusión, las tensiones internas son más difíciles de controlar y las dimensiones del perfil pueden quedar fuera de tolerancias. Otro factor importante es la logística, ya que estos perfiles debían ser producidos y transportados hasta los talleres del CIEMAT para su mecanizado posterior. En este caso, se estudiaron también las instalaciones de los talleres del CIEMAT para poder considerar las limitaciones de espacio en las áreas de producción. Con las contemplaciones realizadas, la limitación de longitud se estableció en 7 metros como máximo por perfil extruido.

En la clasificación del número de perfiles anterior se ha distinguido según el tipo de cámara DT. En la Tabla 3 se puede ver un resumen del número de perfiles según la longitud del perfil, ya que hay Minicrates con la misma longitud que irán destinados a cámaras diferentes.

Tabla 3. Clasificación de los perfiles Minicrates según longitud.

Longitud por perfil [mm]	Cantidad de perfiles para producir
1704	68
1834	112
2085	68
1583	24
1081	14

Es importante destacar que las longitudes que se han mencionado hasta ahora son las finales, de los perfiles acabados con los extremos mecanizados teniendo en cuenta que se establece una tolerancia de ± 1 mm. Se debe añadir una determinada longitud de perfil adicional como creces para que en los cortes posteriores se puedan mecanizar los extremos y dejarlos a la medida adecuada.

Para la distribución de las longitudes, se han ido probando diferentes combinaciones buscando optimizar la barra y teniendo como referencia que la barra deberá estar en torno a los 6 metros y siempre por debajo de 7 metros. En estas combinaciones se ha tenido en cuenta una longitud adicional de 20 mm para poder tener sobrante en cada perfil de corte y mecanizar asegurando el acabado final.

⁵ SAA (Anodizado Sulfúrico de Aluminio) es un proceso electroquímico utilizado para mejorar las propiedades superficiales del aluminio.

Tabla 4. Combinación de perfiles según longitud barra.

Combinación de perfiles	Longitud de la barra total [mm]	Longitud de la barra total redondeada [mm]
1704+1834+1583+1081+20	6222	6230
1704+1834+2085+20	5643	5650
1834*2+2085+20	5773	5780
1583*4+20	6352	6360
1834*3+20	5522	6360

Realizando una primera iteración con las combinaciones de la Tabla 4 se planteó una primera opción para intentar cubrir el número de perfiles necesario.

Tabla 5. Primera iteración del número de barras extruidas.

Longitud de la barra total redondeada [mm]	Nº barras a pedir	Longitudes parciales por tipo de barra [mm]
6230	14	87220
5650	50	282500
5780	14	80920
6360	2	12720
6360	6	38160
	Total:	501520

Con la opción planteada en la Tabla 5 no se consigue cubrir la longitud total de aluminio extruido necesario y además serían 5 tipos de barras diferentes, opción que encarecería el coste de la extrusión. Por estos motivos, se plantea otra segunda iteración. Añadiendo el factor económico, se decide agrupar las longitudes de las barras ya que a nivel de la industria es más barato producir un mayor número de barras del mismo tipo o de dos tipos diferentes, pero no un número mayor (cuanto más personalizado sea el pedido, mayor será el coste). Se decide cerrar las longitudes en dos tipos de barras, las de tipo A de 6360 mm y las de tipo B de 5780 mm.

Teniendo dos longitudes de barras diferentes, se establece una numeración para identificar la combinación de perfiles que saldrán de cada barra y así se obtiene el número final de barras que se deben cortar. Esta información queda reflejada en la Tabla 6.

Tabla 6. Combinación final de perfiles en las barras extruidas.

Barra en bruto tipo	Corte tipo	Longitudes de piezas (mm) a cortar de cada barra	N barras a cortar según esa disposición
A (6360 mm)	AC1	1704+1834+1583+1081	15
B (5789 mm)	BC1	1704+1834+2085	55
B (5789 mm)	BC2	1834+1834+2085	15
A (6360 mm)	AC2	1583+1583+1583+1583	3
A (6360 mm)	AC3	1834+1834+1834	7

Con la combinación mencionada, se recalcula de nuevo el número de perfiles que saldrán de cada longitud. En la Tabla 7 se observa el número de perfiles final. Esta cantidad de perfiles supera a la cantidad establecida inicialmente en la Tabla 3, lo que asegura que la producción será suficiente para cubrir la cantidad requerida. La cantidad sobrante se almacenará durante la producción como una reserva para usar en caso de que en el mecanizado salgan lotes defectuosos y se necesiten más perfiles.

Tabla 7. Número de perfiles finales clasificados por longitud.

Longitud del perfil [mm]	Nº perfiles finales
1704	70
1834	121
2085	70
1583	27
1081	15

Tabla 8. Número de barras extruidas de cada tipo.

	Nº de barras de cada tipo
Tipo A (6360 mm)	25
Tipo B (5789 mm)	70

Una vez recogida la información resumida en la Tabla 8 en relación a la distribución de perfiles, se solicitó el pedido a una empresa de extrusión de aluminio. La misma empresa se encargó de la logística y, al finalizar la producción, hizo llegar los perfiles solicitados a los talleres del CIEMAT. Con la información de la Tabla 6 se realizó una orden de trabajo para el corte de los perfiles, indicando que la medida de la tabla es la medida del perfil ya mecanizado con una tolerancia de ± 1 mm, por lo que era necesario añadir creces al corte (mínimo 5 mm en cada extremo).

Tras el corte de los perfiles, se realizó un fresado para lograr el acabado de los extremos con la tolerancia mencionada.

4.2.3. Mecanizado de los perfiles

Con los perfiles acabados y en su longitud final, se procede a la realización del mecanizado específico para adaptar cada pieza al tipo de cámara. Los planos se han elaborado en el INFN de Bolonia y han sido enviados al CIEMAT para realizar la fabricación. Estos planos se realizaron siguiendo el mismo criterio de distribución de las placas electrónicas dentro del perfil que los Minicrate legacy. Para verificar que la distribución de agujeros en el perfil era adecuada, se realizó un prototipo de cada una de las cámaras. Una vez recibidos los planos, se procedió a realizar una comprobación previa de las dimensiones para evitar errores antes de la fabricación en taller. Esta comprobación se basó en identificar cada tipo de agujeros realizados en el perfil y asegurar que coincidían con las piezas que van directamente unidas al Minicrate.

El primer tipo de perfiles verificados fueron los MB1, cuyos planos se muestran en el Anexo 3. Tras recibir la aprobación de todas las partes colaboradoras en el proyecto, se procedió a realizar la orden de trabajo para su mecanizado en los talleres del CIEMAT. La realización de un trabajo en los talleres

internos del CIEMAT requiere de una ficha de inscripción del proyecto de fabricación en la que se debe indicar, por parte del solicitante, las especificaciones técnicas del proyecto, los planos y el material utilizado. Cuando la ficha de fabricación llega al taller, los responsables se encargan de aceptarla o rechazarla si falta información para la fabricación.



	FICHA DE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE FABRICACIÓN		Fecha Recepción 04-05-2023	
				
CLIENTE INTERNO				
Nombre del Cliente	CUCHILLO ORTEGA, JESUS			
Unidad Organizativa	DIVISIÓN DE FÍSICA EXPERIMENTAL DE ALTAS ENERGÍAS			
Departamento	DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN BÁSICA			
Correo electrónico		Teléfono		C.F.
Especificaciones Técnicas del Proyecto				
<p>REALIZAR TODOS LOS AGUJEROS DE 35 MINICRATES MB1L (PERFILES DE ALUMINIO DE LONGITUD 1704MM QUE SE LLEVARÁN AL TALLER) SITUADOS SEGÚN EL PLANO ADJUNTO. IMPORTANTE LIMPIAR LAS REBABAS DE MATERIAL SOBRENTE DE LOS TALADROS YA QUE PUEDE DAÑAR LA ELECTRÓNICA QUE VA DENTRO. SE PUEDE HACER CON UNA LIJA O UN ESTROPAJO.</p>				

Figura 23. Recorte de la ficha de descripción del proyecto de fabricación en el CIEMAT. [Imagen extraída de documentación interna del CIEMAT]

Cuando la orden de trabajo se acepta, se establece un calendario de planificación en el que las piezas solicitadas se distribuyen según la zona de fabricación necesaria. En este caso, los perfiles pasarían primero por la zona de ajuste en la que se encargarían de realizar el roscado para las tuberías de refrigeración durante 29 días de trabajo y posteriormente pasarían a la zona de fresado en la que se realizarían los taladros con una máquina de fresado vertical (ver Figura 24).



Figura 24. Mecanizado de los perfiles Minicrates en el taller del CIEMAT.

4.3. Sistema de refrigeración del Minicrate. Diseño e instalación del circuito.

En este apartado se describirá el sistema de refrigeración de los Minicrates ya instalados en CMS y la implementación del mismo sistema para los nuevos MiC2. Se indicará el diseño del circuito, sus componentes y requerimientos para su instalación.

4.3.1. Definición del sistema de refrigeración

La magnitud del sistema de lectura de las cámaras DT implica un elevado nivel de integración que repercute en numerosos aspectos. La electrónica está diseñada para minimizar el consumo de potencia, entre otros factores, porque el espacio en el interior del detector es muy reducido. Además, la presencia de un campo magnético tan elevado (0,08 Teslas es el campo magnético residual presente en esta zona) obliga a la utilización de sistemas de refrigeración por conducción, impidiendo así el uso de sistemas de refrigeración basados en ventiladores (como se usa habitualmente para disipar calor en placas electrónicas). Por esta razón, el sistema de refrigeración de los Minicrates se desarrolló mediante conducción térmica a través de un flujo de agua desmineralizada.

La disipación térmica mediante refrigeración por agua de las tarjetas de adquisición de datos se consigue gracias a los conductos que están incorporados en la geometría del perfil de aluminio extruido. Cada Minicrate forma una estructura independiente que se deberá acoplar al circuito de refrigeración distribuido por las cámaras DT en el detector CMS. El flujo de agua del circuito de refrigeración en cada rueda es de 35 l/min y su temperatura de entrada es 18°C y 20°C la de salida [1]. En cada Minicrate se encuentran dos conductos independientes, lo que implica que hay cuatro entradas/salidas. El sistema de refrigeración está diseñado para que estos conductos del Minicrate se unan y formen así un único circuito con una entrada y una salida por cada perfil. La entrada y salida del sistema de refrigeración de cada Minicrate se conecta con las tuberías de refrigeración que lleva cada cámara DT. En la Figura 25 se observa un esquema de las tuberías de una cámara DT y se puede ver un ejemplo de cómo se realiza la unión de estas tuberías con los conductos del Minicrate.

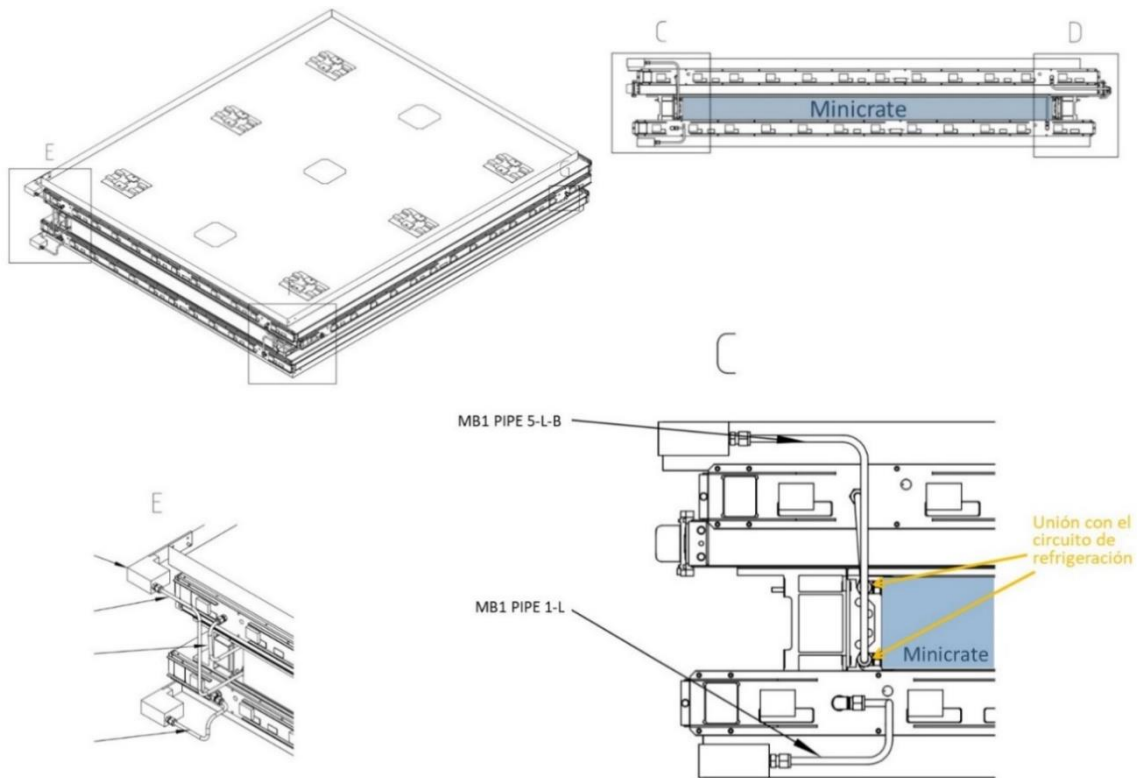


Figura 25. Esquema de unión del circuito de refrigeración de una cámara MB1-Left con el sistema de refrigeración del Minicrate. [Imagen extraída de documentación interna del CERN]

Las características del sistema de refrigeración que actualmente está funcionando en las cámaras DT están recogidas en la Tabla 9. Con estas condiciones será diseñado el nuevo sistema, que se mantendrá lo más parecido posible al que ya está instalado para los nuevos MiC2. Por ello, la tarea consiste en reproducir el mismo sistema fabricando de nuevo las piezas necesarias y realizando el aprovisionamiento de las piezas normalizadas.

Tabla 9. Características del sistema de refrigeración de las cámaras DT.

Caudal que llega al Minicrate	1,5 l/min
Presión de funcionamiento	8-10 bares
Temperatura de entrada del fluido	18 °C
Tipo de fluido	Agua desmineralizada con resinas en circuito cerrado

De las características mencionadas, se debe añadir que la temperatura de entrada del fluido al Minicrate no siempre es constante. Cuando los calorímetros están encendidos, esta temperatura puede aumentar algún grado por encima de los 18 °C establecidos. Con respecto al caudal, se tienen 35 l/min por cada rueda, que se divide en los circuitos paralelos dentro de cada rueda. En un mismo circuito se tienen las dos estaciones de cada par de segmentos vecinos, es decir, $6 \times 4 = 24$ circuitos por rueda con un caudal de 1,5 l/min cada uno.

Para las entradas/salidas de los conductos internos del Minicrate con las tuberías se usarán racores acodados de acero inoxidable AISI 316 (EN 1.4401). La conexión del racor con el perfil de aluminio se

realizará mediante rosca paralela ISO macho de 1/8" y el sellado con junta de fluorocarbono FKM⁶, mientras que la conexión del racor con el tubo externo se realizará por apriete de férula en tubería de acero inoxidable de 8 mm de diámetro exterior. Se puede observar el racor mencionado en la Figura 26. Este tipo de racor está estandarizado y se puede encontrar con facilidad en el mercado. Como en cada perfil hay cuatro entradas/salidas, se necesitarán cuatro por doscientos cincuenta Minicrates, lo que hace una cantidad de 1000 unidades más repuesto. Se realizó un pedido final de 1100 racores de este tipo.

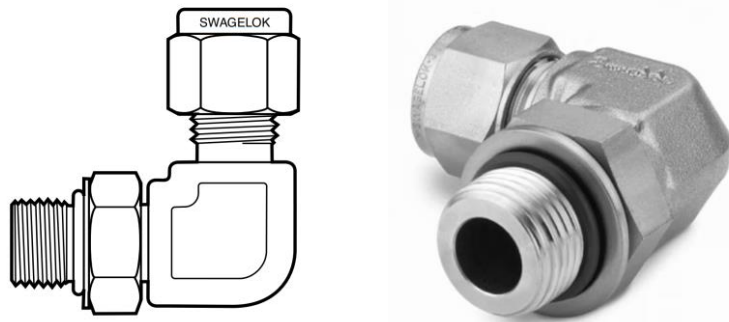


Figura 26. Racor de acero inoxidable, codo macho posicionable, diámetro exterior del tubo de 8 mm x rosca paralela ISO macho de 1/8 pulg. [20]

Se ha seguido la Norma ISO 228: "Roscas de tuberías para uniones sin estanqueidad en la rosca". Esta Norma especifica los requisitos para la forma de la rosca, medidas, tolerancias y designación de roscas paralelas para sujeción de tuberías entre 1/16 y 6". Con esta unión no se consigue estanqueidad en la rosca, solo se realiza la unión mecánica de las piezas (en este caso, la unión del racor con el perfil de aluminio). Para conseguir la estanqueidad se usará la compresión de dos superficies estancas en el exterior interponiendo un elemento de sellado. Los dos conductos del Minicrate tienen un diámetro de diseño de 8,6 mm, cumpliendo con la Norma que especifica que el diámetro mínimo del núcleo para la rosca hembra sea de 8,566 mm. En el proceso de mecanizado de los perfiles se realizó el roscado correspondiente indicado en la Norma para 1/8" para las cuatro entradas/salidas del perfil extruido.

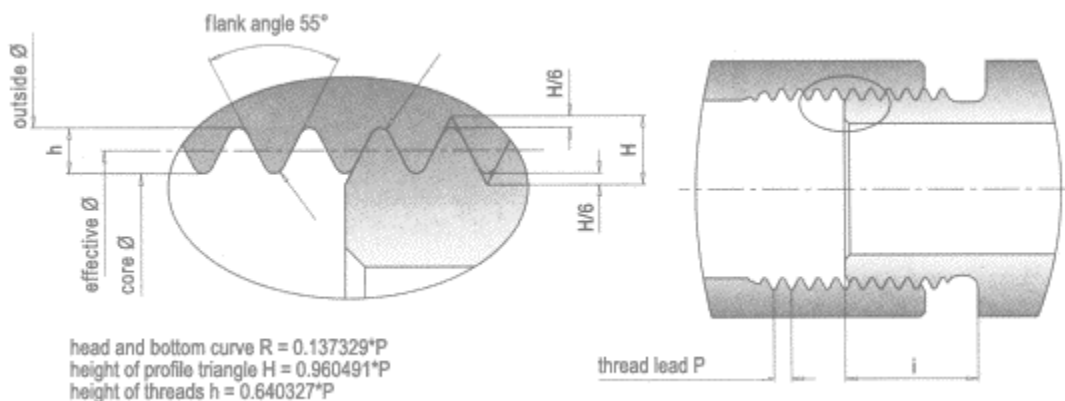


Figura 27. Roscado necesario para racor cilíndrico 1/8" siguiendo ISO 228. [21]

⁶ El fluorocarbono FKM es un caucho sintético que se usa de manera muy común para este tipo de juntas tóricas en sellado. Se conoce normalmente por su nombre comercial Viton (marca comercial registrada).

4.3.2. Diseño y fabricación de los tubos en "U"

Para lograr la unión de los dos conductos internos del Minicrate se usará una tubería en forma de "U" de tubo de 8 mm, tal y como se puede observar en la Figura 28. Las condiciones de diseño para esta pieza vienen limitadas por el espacio disponible en la cámara y por los requerimientos indicados por el fabricante para que la instalación con el racor funcione correctamente.

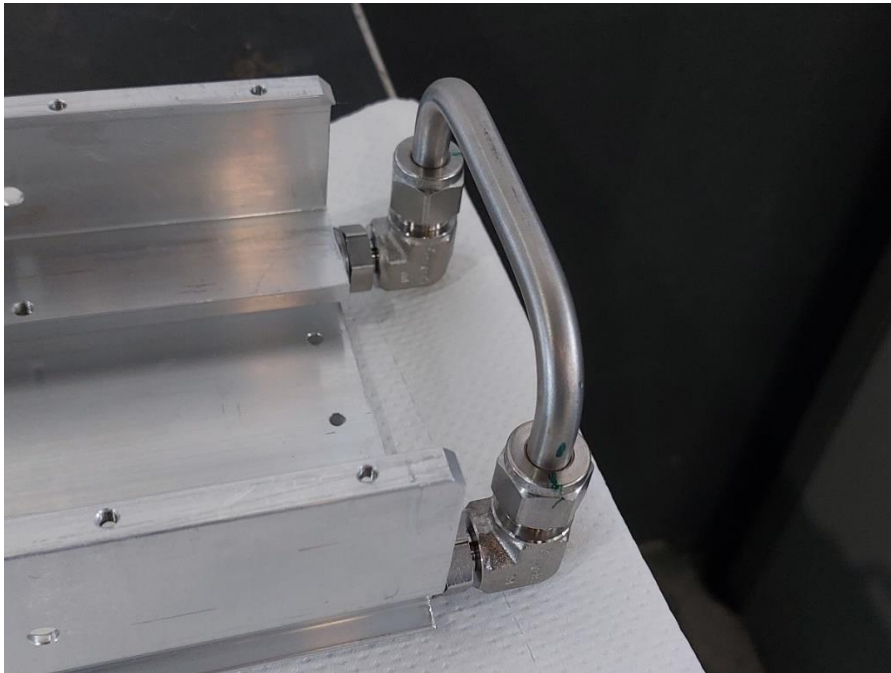
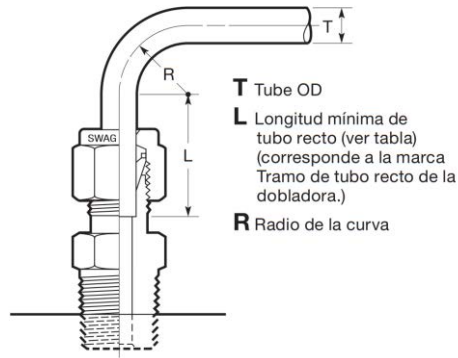


Figura 28. Prototipo de unión de los dos conductos de refrigeración del Minicrate con la pieza en "U".

Como el planteamiento es mantener el sistema de refrigeración que se usó para los Minicrate legacy, se rescataron los planos de los tubos en forma de "U" usados anteriormente. En el plano que se encontró del año 2003, añadido en el Anexo 4, se pueden observar las dimensiones generales del tubo. De este plano se pudieron obtener las limitaciones de altura, ya que el tubo no debía sobrepasar los 41 mm para no interferir con otros elementos que van a su alrededor. También se comprobó que la distancia entre ejes se mantenía en 82 mm porque los conductos de los perfiles de aluminio del Minicrate se mantuvieron en la misma posición. Teniendo la altura máxima y la distancia entre los ejes de la salida/entrada del tubo, todas las medidas estaban definidas excepto una variable modificable que podría ser el radio de curvatura o el tramo recto, dos medidas condicionadas una con respecto a la otra por las limitaciones ya impuestas.

Para realizar correctamente la unión del tubo con el racor se consultaron las recomendaciones establecidas por el fabricante de racores [20]. En el manual del fabricante se establecen unas limitaciones de tramo recto antes de una curva para asegurar disponer la longitud de inserción del tubo dentro del racor y poder realizar el desmontaje y extracción de la tuerca sin que se vea afectado por la curva. Este dato viene especificado para realizar el doblado del tubo a la altura correcta evitando fugas según el diámetro de tubería que se utilice. En este caso, se utilizará el mismo tubo que se usó anteriormente, tubo de 8 mm. Para un tubo de 8 mm de diámetro exterior se recomienda usar una longitud de tramo recto previo a la curva de 23 mm y un radio de curvatura de 24 mm con respecto al eje central (ver Figura 29).



Fraccional, pulg.		
T Ø ext. del tubo	R Radio de curvatura	L
1/8	9/16	23/32
1/4	9/16	13/16
	3/4	
5/16	15/16	7/8
3/8	15/16	15/16
1/2	1 1/2	1 3/16

Métrico, mm		
T Ø ext. del tubo	R Radio de curvatura	L
3	15	19
6	15	21
8	24	23
10	24	25
12	38	31

Figura 29. Recomendación de longitud mínima de tramo recto y radio de la curva para una correcta instalación del tubo con el racor. [20]

Contrastando esta información con el plano de las “Us” instaladas del Anexo 4 se llegó a ver que el radio de curvatura recomendado se mantenía, pero no se seguía la recomendación de longitud de tramo recto mínimo de 23 mm.

Al realizar los planos para lanzar la fabricación de las piezas, se hizo un nuevo diseño en el que se estableció como condición que el tramo recto fuera de 23 mm. Como la distancia en altura estaba limitada a 41 mm y no se podía cambiar por espacio disponible, las opciones eran cambiar el radio de curvatura o cambiar el tramo recto. Analizando el funcionamiento del sistema, se dio prioridad a la condición de tramo recto mínimo porque se debía garantizar la inserción del tubo dentro del racor. Esta inserción se puede ver afectada si el tramo recto es menor y, además, se vería dificultado el desmontaje y reinstalación de la tuerca. El radio de curvatura es una recomendación del fabricante para el doblado del tubo, pero también se puede deber al tipo de dobladora de tubo que tenga, ya que este doblado se puede hacer de manera manual y habría que adaptarse a la máquina. Como estas piezas no iban a ser dobladas manualmente, el radio de curvatura no era tan relevante como mantener el tramo recto mínimo.

Aun así, para estar seguros del montaje, se procedió a la búsqueda de piezas de repuesto fabricadas en el mismo lote de las que ya fueron instaladas y que actualmente están funcionando correctamente para comprobar sus dimensiones y poder reproducir las nuevas piezas con la misma geometría.

Se realizaron dos versiones de piezas: una manteniendo el curvado a 24 mm; otra estableciendo 23 mm de tramo recto, con un radio de curvado de 18 mm. Se realizaron los planos a escala 1:1 y se imprimieron a tamaño real para poder usarlos como método de comprobación de las piezas antiguas que se encontraron en las instalaciones de Punto 5 de CMS.

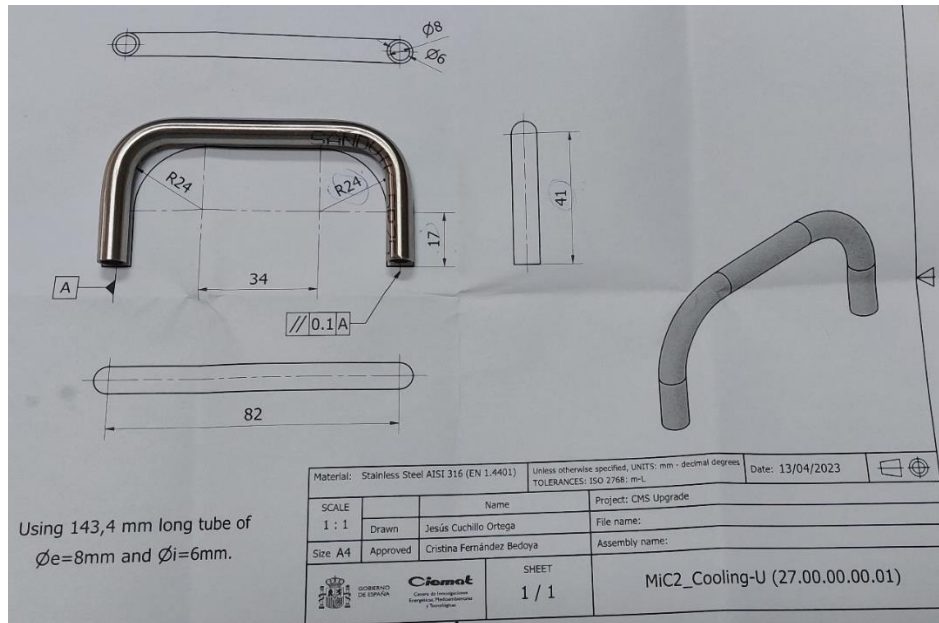


Figura 30. Comprobación del radio de curvatura de los tubos en "U" de refrigeración del Minicrate con un prototipo sobre el plano con radio de curvatura de 24 mm.

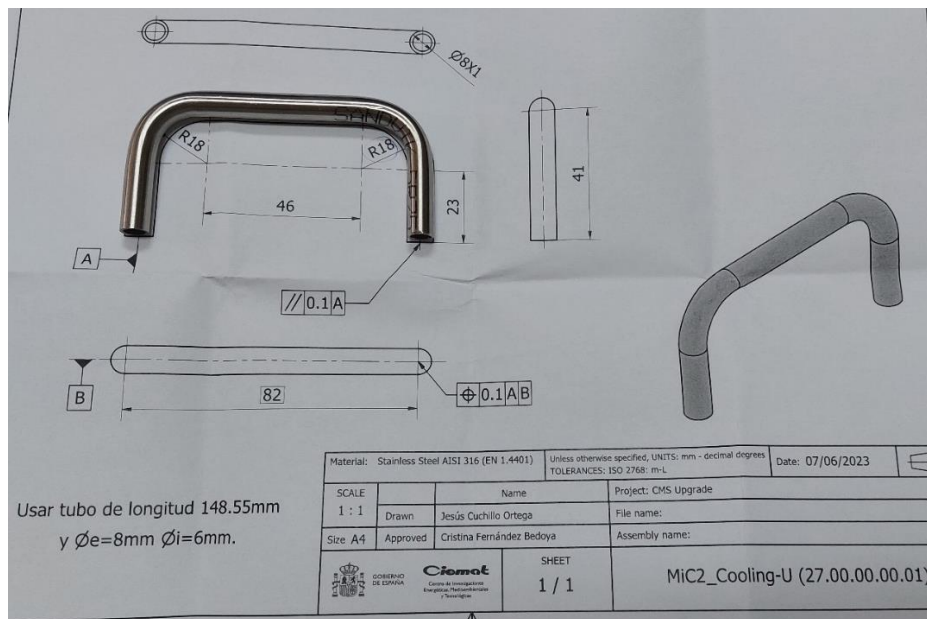


Figura 31. Comprobación del radio de curvatura de los tubos en "U" de refrigeración del Minicrate con un prototipo sobre el plano con radio de curvatura de 18 mm.

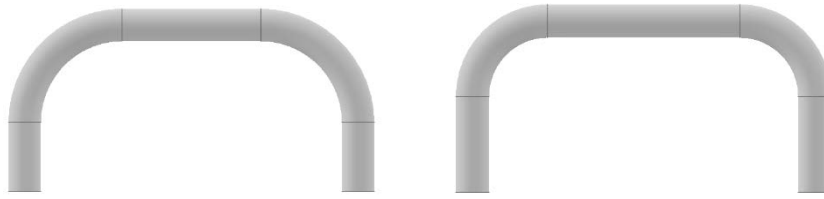


Figura 32. Opciones para los tubos en "U" de refrigeración del Minicrate según radio de curvatura; a la izquierda radio de curvatura de 24 mm y a la derecha de 18 mm.

En la Figura 32 se pueden observar las diferencias y comparar la geometría de las dos opciones mencionadas según varía el radio de curvatura. Tras realizar la comprobación de las piezas ya usadas para los Minicrates, se hizo evidente que, aunque en los planos encontrados el radio fuera de 24 mm, en la práctica se había usado un radio más similar al de 18 mm. En la Figura 31 se ve como la pieza coincide con mayor exactitud con el contorno del plano.

Una vez se tenían definidas las medidas cumpliendo con las limitaciones de espacio y con los requisitos de medidas mínimos para evitar fugas en el sistema, se estableció el tipo de material para la fabricación de los tubos. Para garantizar la eficiencia y durabilidad del sistema se empleará un material metálico. Dentro de los materiales metálicos más comunes utilizados para los sistemas de refrigeración por agua se puede encontrar principalmente cobre, aluminio y acero inoxidable. El cobre y el aluminio son utilizados en sistemas de refrigeración por su buena conductividad térmica, pero, en función de las necesidades y requisitos, para el funcionamiento de la tubería que se va a fabricar no es prioridad la conductividad sino la durabilidad. La unión del tubo con el racor se realizará por compresión de una férula ajustada por el apriete de una tuerca y, para que no haya fugas, es esencial seguir las recomendaciones del fabricante. El racor está diseñado para la unión acero-acero, si se quería garantizar una conexión hermética y segura era necesario usar acero inoxidable para el tubo. En este experimento está limitado el uso de materiales magnéticos debido al elevado campo electromagnético presente, pero en este caso no se pudo emplear otra opción de material por las condiciones de la unión y se consideró que no sería un problema dadas las dimensiones de la pieza. Dentro de los aceros inoxidables comúnmente utilizados para tuberías se encuentran el AISI 304 y el AISI 316, entre otros. Como las condiciones iniciales del sistema de refrigeración no son demasiado exigentes, no requieren de un material especial por alta temperatura o elevada resistencia a la corrosión. Entre los aceros mencionados, se eligió finalmente el acero inoxidable AISI 316 (EN 1.4401) porque tiene propiedades adicionales de resistencia a la corrosión y no suponía un gran incremento de precio ya que es muy habitual encontrarlo en la industria. Al realizar el pedido de material, se especificó que fuera tubo liso sin soldadura longitudinal para evitar posibles deterioros en el curvado.

Con el diseño final definido, se realizó el plano para la fabricación de las piezas en "U" denominadas "MiC2_Cooling-U" según la tabla del Anexo 1. En el plano se añadieron todas las medidas necesarias para la fabricación, incluyendo como tolerancias comunes en el plano ISO 2768: m-L y añadiendo tolerancias geométricas específicas a las medidas que se les debía prestar especial importancia. Se estableció una tolerancia básica en la cota de 82 mm entre ejes porque si esa medida no se mantiene puede ocasionar tensiones internas y forzar el material al realizar la instalación en los racores. También se establecieron tolerancias de posición y paralelismo en los ejes. Se puede ver el plano de fabricación "Cooling-U: 27.00.00.00.01" en el Anexo 5.

La fabricación de esta pieza comienza por cortar el tubo recto previo al doblado. En este caso se usará un tubo recto de 8 mm de una longitud 148,55 mm con un espesor de pared de 1 mm, indicado en el plano. Se especificó al fabricante que desbarbase las terminaciones del tubo para que el corte quedara liso y el acoplamiento con el racor no tuviera irregularidades en la superficie. Posterior a la operación de corte y rebarbado, la curvatura se realizó con una dobladora de tubo automática como la que se puede ver en la Figura 33. La operación se realiza por deformación con una matriz y una contraforma específicas para las dimensiones del tubo. Por control numérico se establece la posición de las curvas y el ángulo de curvado, que en este caso es de 90° para las dos curvas.

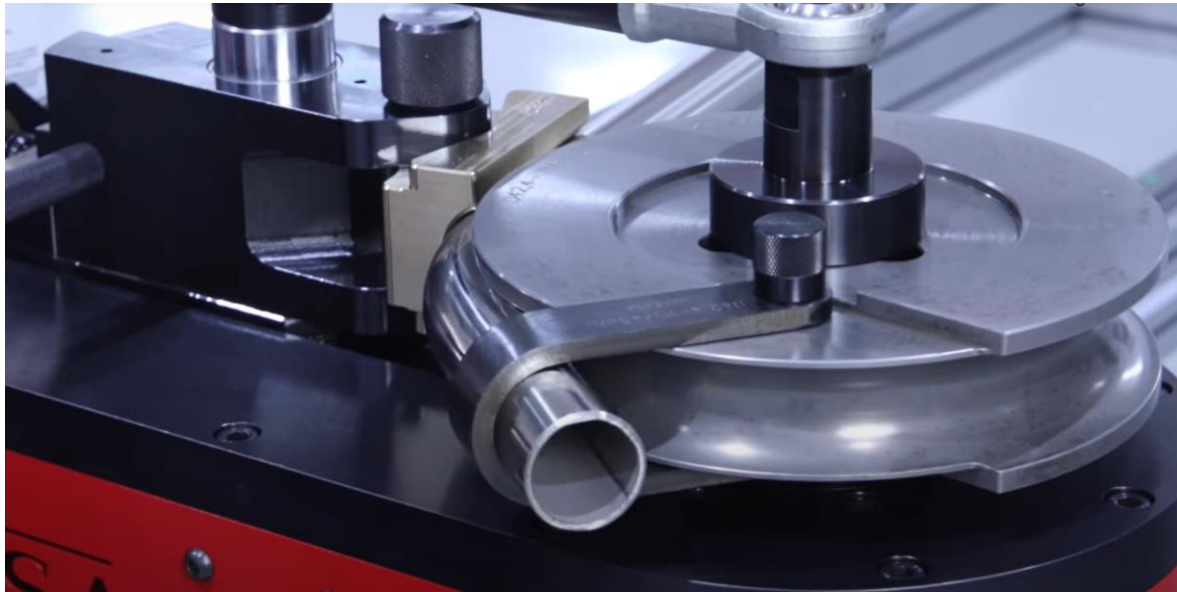


Figura 33. Ejemplo de una dobladora de tubo automática. [22]

4.3.3. Costes y especificaciones de fabricación

Se necesita una de las piezas en "U" por cada Minicrate, serían 250 unidades. A esta cantidad inicial se debe sumar los Minicrates adicionales que se fabricarán como repuesto más una cantidad extra de piezas que se usarán en las pruebas del sistema de refrigeración. Se estableció la cantidad total de piezas a fabricar en 300 unidades.

Con los planos de fabricación, el material asignado y la cantidad de piezas total, se pidieron ofertas a diferentes empresas. En la solicitud de las ofertas se especificaron los datos que aparecen en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones de fabricación para los tubos en "U".

Descripción de la pieza:	Piezas de tubo en "U"
Dimensiones:	Tubo de Diam. Exterior 8 mm y Diam. Interior 6 mm; 8/6 1mm espesor
Material:	Acero Inox. AISI 316L; Tubo hidr. Sin soldadura
Cantidad:	300 unidades
Operaciones a realizar:	Corte, desbarbado y curvado a medida según plano de fabricación

Se recibieron varias ofertas con distintas especificaciones. Algunas empresas ofrecían realizar el curvado con una dobladora manual. Esta opción era la más barata, ofertaban un precio en torno a 6

€/unidad, pero fueron descartadas porque no cumplían con los requerimientos dimensionales. De las opciones con curvado por control numérico que cumplían con las tolerancias, se recibieron ofertas de 8,16€/unidad solo por las operaciones, indicando que el material lo suministraría el cliente. Otras empresas ofrecieron presupuestos con material y transporte incluidos por 13,23€/unidad y 12,73€/unidad. Finalmente, se recibió un presupuesto por el precio de 7,60€/unidad sin el transporte incluido, opción elegida porque por cercanía a las instalaciones el transporte no suponía un problema. Por tanto, los costes finales fueron 7,60€/unidad por 300 unidades, en total, 2.280€ (IVA no incluido).

4.3.4. Limpieza de los tubos

En la operación de doblado se usa lubricante en la zona de curvado. Como estas piezas forman parte del sistema de refrigeración por el que circulará agua, se deben limpiar para que no contaminen el fluido del circuito. Una vez que se recibieron las piezas acabadas, el siguiente proceso fue realizar la limpieza de estas en el CIEMAT.

El procedimiento de limpieza se estableció en varias fases. La primera consistió en quitar la suciedad más grosera mediante un baño de las piezas en una mezcla de agua y jabón en limpiador de ultrasonidos con agua caliente (ver Figura 34). Se programó el limpiador para que funcionara a una frecuencia de 40 kHz y una temperatura de 70°C durante 60 min. Se añadió agua hasta que el tanque estuviera a 2/3 de su capacidad para que la limpieza fuera eficiente y se puso a funcionar.



Figura 34. Máquina de ultrasonidos durante la limpieza de las "Us".

Se repitió el mismo proceso tres veces cambiando al agua, ya que después de cada baño de 60 minutos esta quedaba completamente sucia.



Figura 35. Extracción de las "Us" de la máquina de ultrasonidos.

Se realizó un último baño con agua destilada y acetona a temperatura ambiente para lograr un acabado final completamente limpio y conseguir que la grasa que tenían las piezas se disolviera por completo.

Con los tubos completamente limpios y los racores recibidos, se podía proceder al siguiente paso, el ensamblaje. El montaje del sistema de refrigeración de los Minicrates está especificado en un manual que se ha creado para guiar a los operarios durante el procedimiento. El manual se puede encontrar en el Anexo 11 y su diseño se describirá en el apartado 5.5.

4.4. OBDT-Theta frames. Elemento disipador de calor.

Este punto describe el funcionamiento del sistema de disipación de calor de las tarjetas OBDT-Theta a través de almohadillas térmicas y piezas de aluminio. Se hablará del proceso de diseño y fabricación de la pieza de aluminio que actúa como soporte y como elemento disipador de calor, de aquí en adelante denominada como "frame".

4.4.1. Disipación de calor en la tarjeta OBDT-Theta y selección de materiales

El sistema de refrigeración del Minicrate explicado en el apartado 4.3.1 permitirá disipar el calor generado por la tarjeta electrónica OBDT-Theta. La tarjeta se encontrará anclada a una montura metálica que, como se ha mencionado, es conocida como "frame". Las funciones del frame son principalmente dos. Por un lado, la tarjeta irá atornillada al frame y de este se atornillará al Minicrate, actuando como estructura soporte para la tarjeta electrónica y de anclaje a la cámara mediante el Minicrate. Por otro lado, el objetivo de este frame es permitir que la tarjeta disipe el calor generado por sus componentes mediante conducción. La tarjeta transferirá calor al frame y el frame al Minicrate, por el cual circulará un fluido de refrigeración.

La selección de materiales juega un papel primordial para poder cumplir los objetivos funcionales de este componente. Se requiere un material que tenga buenas propiedades mecánicas para actuar como soporte, que permita mecanizarse para poder adaptarse a la geometría de la tarjeta y que tenga las mejores propiedades de conducción térmica posibles para que actúe como disipador de calor. Además, debe ser un material no magnético como requisito indiscutible ya que habrá un intenso campo magnético presente en la zona. El aluminio es un material que cumple con todos los requisitos establecidos.

El inconveniente que se encuentra con el uso de aluminio como material para el frame es que, al trabajar con componentes electrónicos, si este entra en contacto con alguno de los componentes de la tarjeta puede provocar un cortocircuito. Para solucionar este problema, se usarán almohadillas térmicas o “thermal pads” (se usa comúnmente el término en inglés para referirse a este elemento). Las almohadillas térmicas son ampliamente utilizadas en la industria informática para refrigerar componentes de los ordenadores que alcanzan temperaturas elevadas, como tarjetas gráficas o microprocesadores. Su función es conducir el calor del componente electrónico que actúa como fuente de calor (*Heat source*) hacia un disipador de calor o un área de disipación mayor (*Heat sink*), ver esquema en la Figura 36.

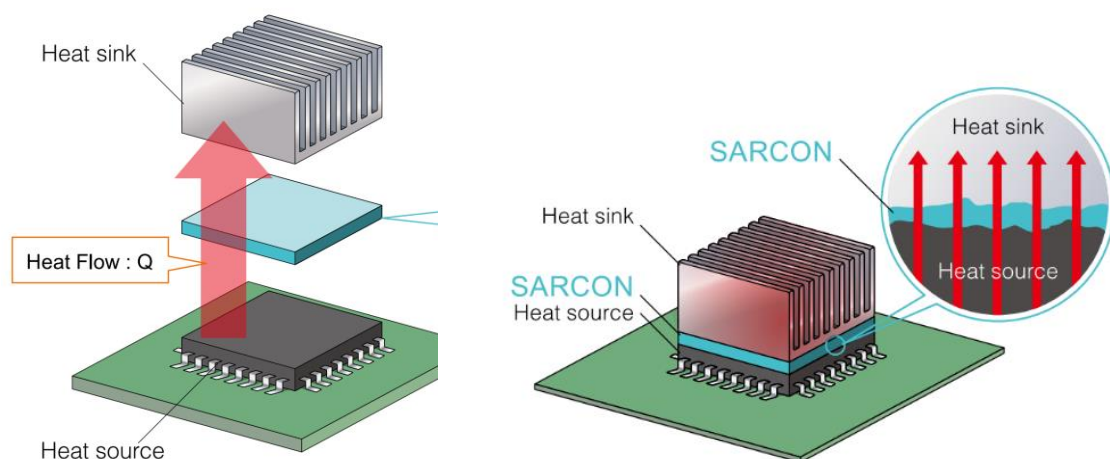


Figura 36. Esquema de flujo de calor en componentes electrónicos mediante disipación por almohadillas térmicas. [23]

Estas almohadillas están hechas de materiales termoconductores (silicona, caucho de silicona, polímeros con partículas conductores, etc.) que permiten una transferencia eficiente. Las características de estos thermal pads hacen que sean ideales para su aplicación en las tarjetas OBDT-Theta porque normalmente son flexibles y pueden adaptarse a la superficie de los diferentes componentes electrónicos. Otra opción que se puede considerar como alternativa es la pasta térmica, un compuesto que se usa con el mismo objetivo, pero es más difícil de aplicar, requiere de más precisión en el montaje y las almohadillas ofrecen la ventaja de ser más fáciles en su reemplazo y mantenimiento con el tiempo [14].

El uso de estas almohadillas permitirá rellenar los huecos microscópicos que quedan en las superficies debido a las texturas de los materiales logrando así una unión uniforme entre el componente electrónico y la superficie del frame como disipador. Los thermal pads permiten rellenar los huecos de aire consiguiendo una conductividad térmica de más de 5 W/m·K, frente a la conductividad térmica del aire de 0,02 W/m·K a temperatura ambiente entre 20 y 25°C. Para obtener el mejor contacto

posible se ejercerá un cierto grado de presión en la unión, comprimiendo levemente el componente con la almohadilla flexible como aparece en la Figura 37, donde “heater” se refiere al componente que genera calor, “heat sink” es el disipador de calor y “thermal gap filler pad” es la almohadilla térmica comprimida rellenando el hueco.

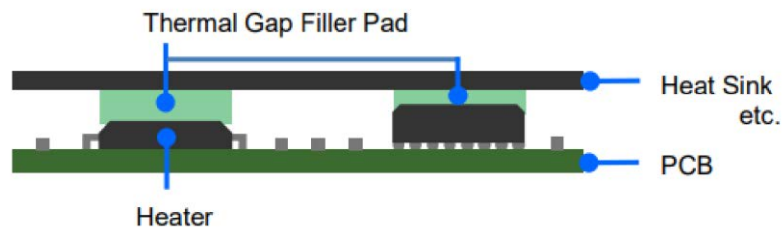


Figura 37. Ejemplo de funcionamiento de una almohadilla térmica como disipador de calor. [14]

Para lograr la unión más eficiente en este “sándwich” es importante considerar el espesor de la almohadilla, además del material que la compone que dará el grado de disipación de calor. Con los sensores de temperatura de los componentes de la OBDT-Theta se han realizado pruebas con diferentes thermal pads para comprobar cuál de ellos era el más óptimo para este sistema. El grosor del thermal pads definido también marca el diseño de los frames, ya que en función del grado de presión que se requiera sobre los componentes se diseñarán las alturas de la pieza.

Una vez definido el sistema de disipación de calor y verificando que el aluminio es la mejor opción para producir el frame, el siguiente paso fue realizar un análisis de qué tipo de aluminio se iba a utilizar. El factor principal es usar el aluminio con la mayor conductividad térmica, pero, se debe hacer un balance entre la mejor conductividad térmica posible que a la vez proporcione buenas propiedades para el mecanizado y la fabricación de las piezas.

El aluminio puro como material tiene una buena conductividad térmica, aunque en la industria, lo que se encuentra son aleaciones de aluminio que, en general, mejoran sus propiedades. Se seleccionaron cuatro aleaciones de aluminio de uso común en los talleres de mecanizado que contasen con las mejores características de conductividad térmica: 6060, 6061, 5083 y 6082. Las conductividades térmicas para cada aleación de aluminio se recogen en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación de la conductividad térmica de diferentes aleaciones de aluminio. [19]

Aleación de aluminio	Conductividad térmica ⁷
5083	estado O - 117 W/(m x °C) a 20°C
6060	estado O - 166 W/(m x °C) a 20°C
6061	estado O - 180 W/(m x °C) a 20°C / estado T6 - 167 W/(m x °C) a 20°C
6082	estado T6 - 174 W/(m x °C) a 20°C

⁷ La conductividad térmica es el índice de transmisión de calor por conducción que se produce por el interior de un cuerpo sólido. Esta propiedad es diferente según el estado metalúrgico del material. Según la Norma EN-515, se establece la letra O para definir estado recocido (con objeto de conseguir el estado de menor resistencia mecánica) y la letra T para identificar a los productos con tratamiento térmico de endurecimiento. El primer dígito después de la T sirve para identificar la secuencia específica de tratamientos básicos, siendo T6 la secuencia de solución, temple y maduración artificial. [19]

Es importante saber el proceso de fabricación a la hora de decidir el material que se usará. Se ha hecho un balance considerando, además de la conductividad térmica, la resistencia mecánica, la disponibilidad, el precio y la facilidad de fabricación.

Con respecto a la resistencia a la corrosión, el aluminio 5083 y 6082 están especialmente formulados para mejorar esta propiedad, siendo los más utilizados en entornos marinos. En relación con la resistencia mecánica, el aluminio 6061 tiene mayor resistencia mecánica que los demás, aunque el 6082 y 5083 también tienen buenas propiedades si se les aplica tratamiento térmico. La mejor opción de las planteadas en cuanto a resistencia a la corrosión y buen mecanizado es el 5083 pero, es el que menor conductividad térmica presenta.

La geometría del frame implica que la pieza base de la que parte el mecanizado sea una plancha de aproximadamente unos 2 cm de espesor. Esto provoca que la opción más económica en cuanto a fabricación y también respecto a estabilidad sea partir de una plancha rectificada. Al comprar una plancha ya rectificada con el espesor final que proviene de una fábrica especializada, el taller de mecanizado que hará la pieza se evita problemas posteriormente porque este material se entrega con mayor estabilidad y genera menos tensiones, no sufre tanta deformación como una plancha no rectificada.

Contrastando esta información con empresas del sector de mecanizado y comparando disponibilidad, además de precios, se llegó a la conclusión de que la mejor opción sería utilizar aluminio EN AW-6082-T6. Con esta aleación de aluminio con silicio, manganeso y magnesio se logra la mejor combinación de propiedades mecánicas, buena maquinabilidad y una conductividad térmica de las más elevadas dentro de los aluminios que se encuentran actualmente en la industria.

4.4.2. Diseño del frame para la OBDT-Theta

La metodología que se ha seguido para el diseño de este frame ha sido la completa personalización de la pieza sobre la tarjeta electrónica OBDT-Theta, siguiendo en todo momento un proceso iterativo de realización de prototipos y pruebas.

Para proceder con el diseño, el primer paso fue analizar la geometría de la tarjeta. Se trata de una tarjeta rectangular de 90 mm de ancho por 290 mm de largo (sin añadir el conector de LV -baja tensión- que son en torno a 20 mm adicionales a los 290 mm). Se pueden ver las vistas de la tarjeta en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19. Con estas medidas se puede establecer que la anchura del frame será de 90 mm al igual que la tarjeta para lograr un perfecto ensamblaje y para que pueda entrar en el hueco del perfil del Minirate donde se instalará. Con respecto a la dimensión longitudinal, se establece que el mínimo será de 300 mm, aunque habrá que añadir más elementos.

Al igual que una PCB (*Printed Circuit Board*, Placa de Circuito Impreso) convencional, la tarjeta está hecha sobre una base rígida de material laminado que proporciona un sustrato aislante y actúa como soporte estructural. En concreto, esta placa está hecha de MEGTRON 6 libre de halógenos, un material avanzado desarrollado por Panasonic para PCB [24]. Este material tiene una constante dieléctrica baja que lo hace ideal para transmisión de señales de muy alta velocidad (10 Gbps). Para la fabricación de las PCB se utiliza un proceso de laminación en el que se combinan las capas de material dieléctrico

(generalmente fibras de vidrio impregnadas con resina epoxi) y las capas conductoras de cobre que crean las conexiones eléctricas entre los diferentes componentes electrónicos. La tarjeta está diseñada para ser anclada sobre esta base laminada y fijada mediante doce agujeros, seis en cada uno de los lados longitudinales. Los agujeros de la tarjeta tienen un diámetro de 3,2 mm y están separados a distancias iguales de 56,4 mm entre centros. La OBDT cuenta con componentes electrónicos por ambos lados de su base, debe ser apoyada sobre un elemento longitudinal en la zona de los agujeros, es la única parte de la tarjeta en la que no hay componentes electrónicos. Por ello, para el diseño del frame se establecieron dos raíles de 5,5 mm de espesor suficientes para sujetar la tarjeta por ambos lados y siguiendo las dos filas de agujeros.

En el diseño del frame también se debía incorporar un espacio para alojar la tarjeta de TP (*Test Pulses*). Esta otra tarjeta debe estar situada al lado de la OBDT para poder realizar las conexiones entre ellas. La base de esta tarjeta es rectangular (ver Figura 38) con unas dimensiones de 90 mm x 30 mm. Está diseñada para ser acoplada al mismo frame que la OBDT.

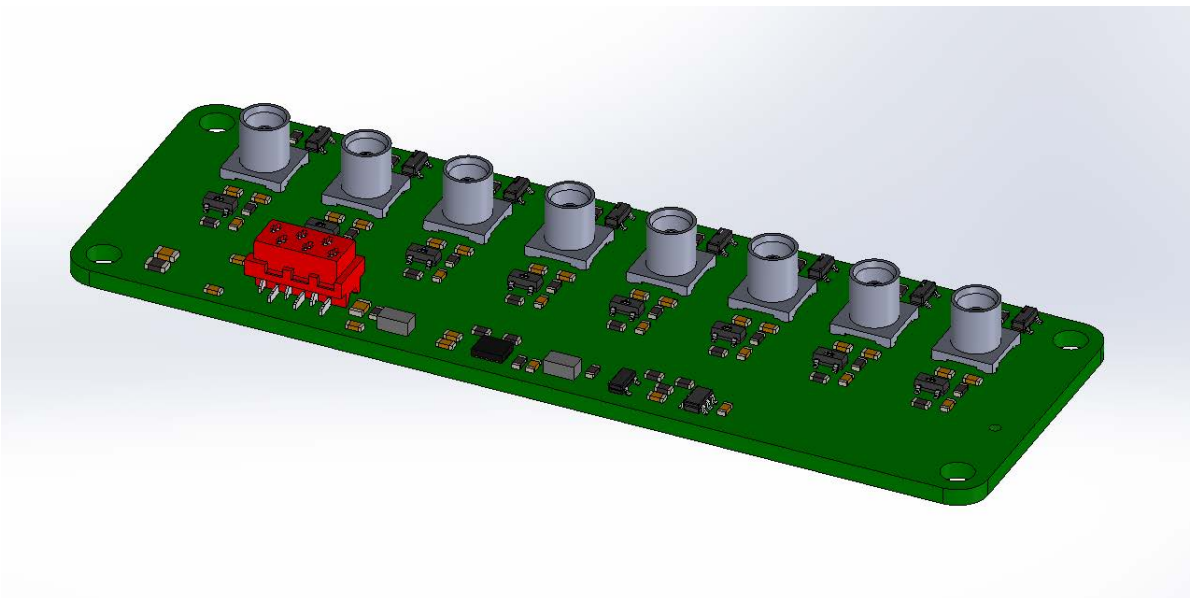


Figura 38. Imagen de la tarjeta de TP de la OBDT-Theta.

Otro de los requisitos de diseño era el alojamiento de las conexiones de fibra óptica que unen los VTRx+ con los conectores MTP (*Multi-Fiber Termination Push-on*). Se trata de un adaptador de dimensiones generales aproximadas de 25 mm x 13 mm x 23 mm con la forma que se puede observar en la Figura 39. Estos adaptadores deben estar anclados al frame, por lo que es uno de las especificaciones de diseño para considerar. Se han desarrollado unas piezas específicas para poder anclarlos al frame cuya explicación está desarrollada en el apartado 4.6.

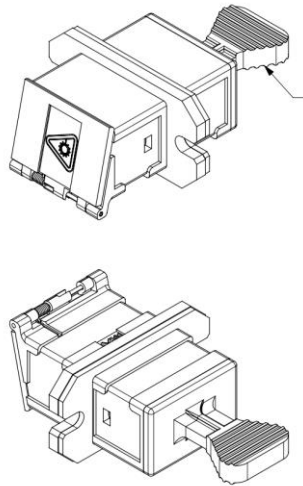


Figura 39. Boceto de los adaptadores MTP (MPO) a MT Optical. [25]

Con todos los requerimientos de diseño se realizó un boceto previo del diseño del frame que se puede observar en la Figura 40.

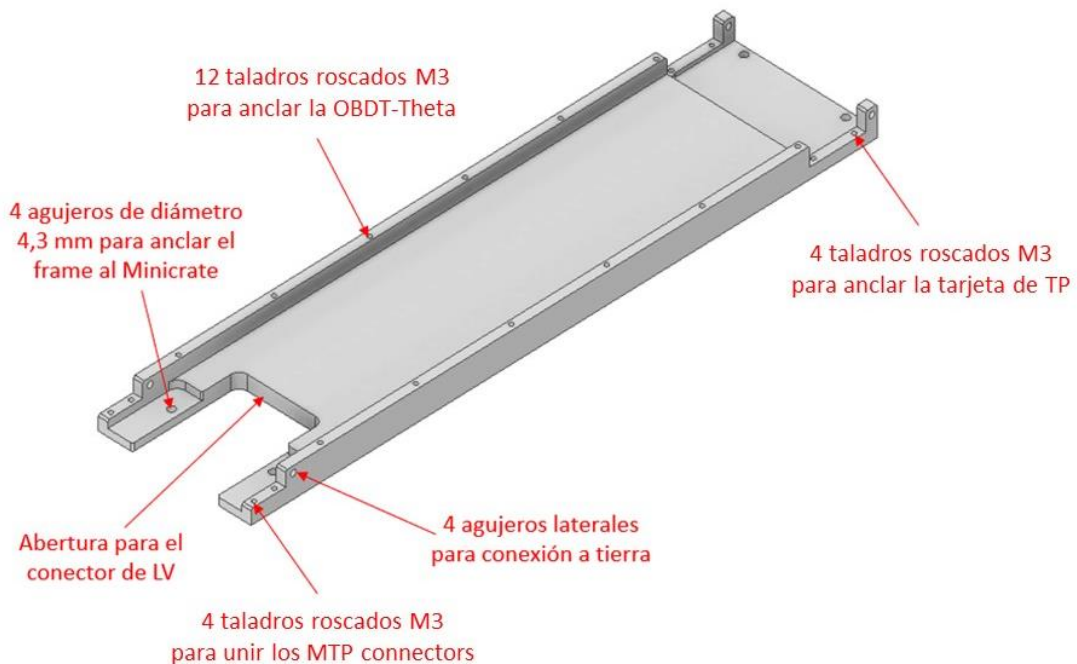


Figura 40. Boceto previo del frame incorporando los requisitos iniciales.

Tras este diseño que cumplía con los requerimientos de soporte de la OBDT-Theta e integración de los elementos vinculados, se procede a diseñar el frame para que cumpla con el otro objetivo principal, actuar como disipador de calor. Para ello, lo primero fue identificar cuáles eran los componentes que trabajan a temperaturas más altas. Se tomó una imagen con una cámara termográfica en el laboratorio (se puede observar en la Figura 41). Viendo el rango de temperaturas que aparece en el lateral de la imagen, se identifica que los colores más claros y amarillentos marcan las zonas de la tarjeta en las que se alcanzan temperaturas más elevadas, los puntos calientes. Esos puntos coinciden con los componentes principales de la tarjeta, mencionados en el apartado 3.3 y que se pueden identificar con claridad en la Figura 20.



Figura 41. Imagen de la tarjeta OBDT-Theta tomada con una cámara termográfica.

En la zona central del frame se añadirán unas elevaciones de material o “islas” cuya posición estará fijada por la ubicación del elemento a refrigerar y cuyo objetivo será presionar el componente. Por este motivo es crucial la altura de estas islas y deberá especificarse con gran exactitud en los planos de fabricación ya que, si no se consigue el valor especificado, el sistema de compresión del aluminio contra el elemento electrónico a través de las almohadillas térmicas no funcionará de manera correcta y el sistema de disipación de calor no será efectivo, poniendo en peligro el funcionamiento de la tarjeta.

Para diseñar el posicionamiento de las elevaciones del frame que comprimirán los componentes electrónicos, se estableció la vista inferior de la tarjeta en el programa de modelado 3D y se realizó una proyección de los componentes. Una vez se tenía la ubicación de los componentes, se bocetó cada una de estas elevaciones, creando agrupaciones en las que la altura del componente electrónico era la misma. Se estableció un margen de aproximadamente 1 mm alrededor de los componentes para asegurar que cubría toda la superficie. En la Figura 42 se observan estas agrupaciones mencionadas con una línea roja bocetada sobre la tarjeta.

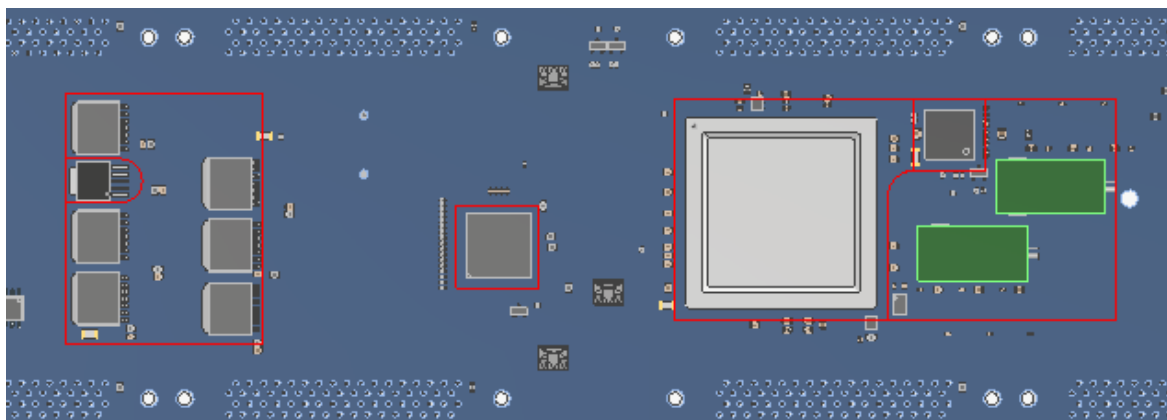


Figura 42. Boceto de diseño de las elevaciones centrales del frame sobre la OBDT-Theta.

Con las posiciones de las agrupaciones para hacer la elevación, se procedió a hacer el diseño mediante la extrusión de cada una de estas regiones a la altura requerida como se ve en la Figura 43.

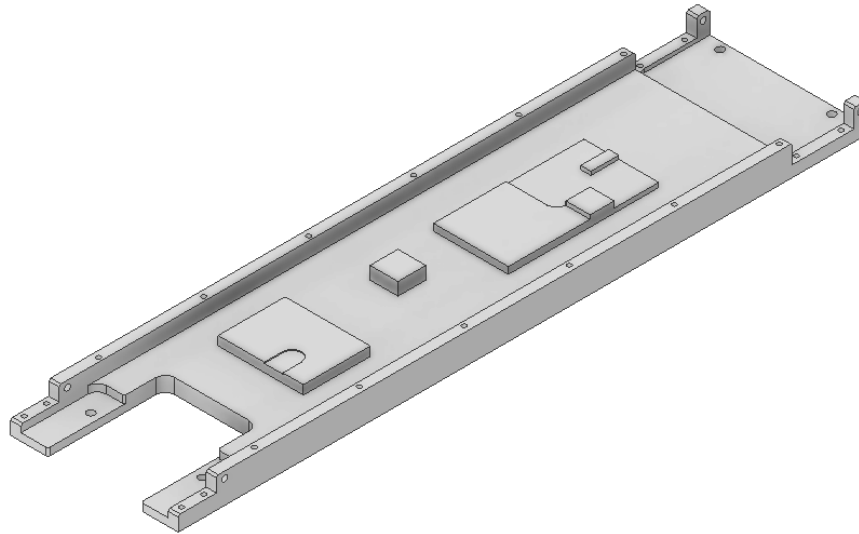


Figura 43. Boceto inicial del frame tras incorporar las elevaciones centrales.

Con este diseño se hicieron prototipos a escala real en aluminio para probar tanto el ensamblaje como el funcionamiento del sistema de disipación de calor y medir temperaturas.

El procedimiento de fabricación seguido para los prototipos fue mecanizado por arranque de viruta partiendo de una pletina de aluminio 6082 de sección rectangular de 100 x 20 mm y de longitud 390 mm. Mediante fresado CNC se mecanizaron las paredes externas de la pieza para dejarlas a la medida de los planos. Posteriormente se fabricó una plancha con anclajes a medida para posicionar la pieza rectificada y así realizar el mecanizado de las islas centrales. En la Figura 44 se puede observar la pieza justo al finalizar el fresado, situada en la plancha de aluminio creada para la sujeción del frame.

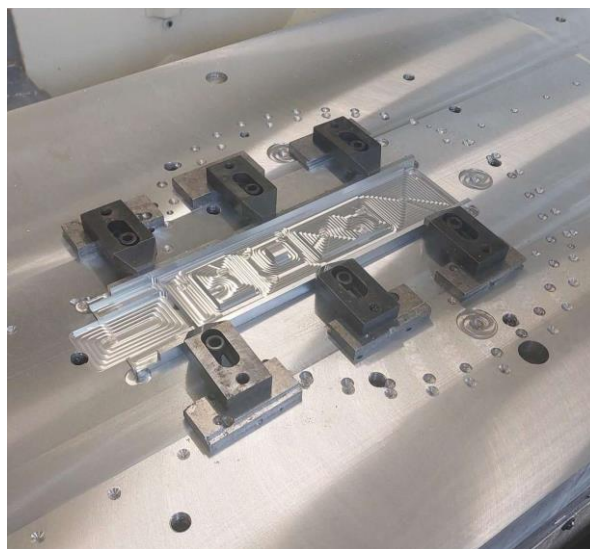


Figura 44. Prototipo del OBDT-Theta frame en la fresadora CNC de los talleres del CIEMAT.



Figura 45. Prototipo previo de un OBDT-Theta frame.

Tras las pruebas realizadas en los laboratorios del CIEMAT, se tomaron nota de las opciones de mejora para el diseño final del frame. Estas modificaciones del diseño se incorporaron al modelo 3D y se pueden ver especificadas en la Figura 46.

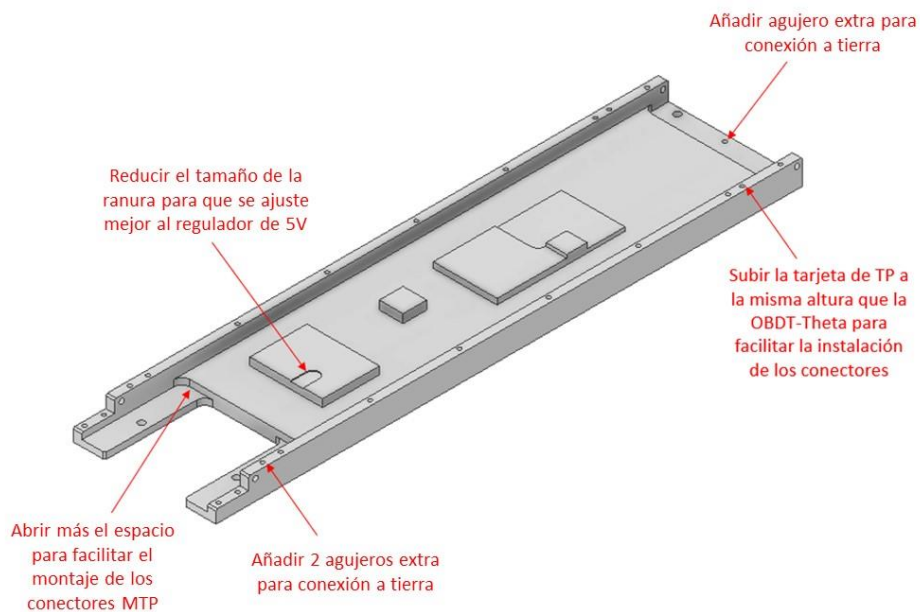


Figura 46. Boceto y modificaciones en el diseño del frame.

Se realizó un ensamblaje virtual de la tarjeta sobre el frame para comprobar cuál era el espacio que quedaba entre la elevación y el componente electrónico. El thermal pad usado en las pruebas era de espesor 1,5 mm, por tanto, para conseguir que el frame comprimiera los componentes se debía dejar aproximadamente 1 mm de espacio. El modelo 3D teórico de la OBDT-Theta muestra una altura que puede variar en la fabricación de la tarjeta ya que al soldar los componentes se añade material. Esto provoca que se haya especificado una altura para cada elevación que deja un hueco de diferentes dimensiones entre los componentes de la tarjeta y el frame. Los cortes realizados en el ensamblaje virtual para comprobar estas alturas se encuentran la Figura 47, obtenida del plano que está incluido en el Anexo 6.

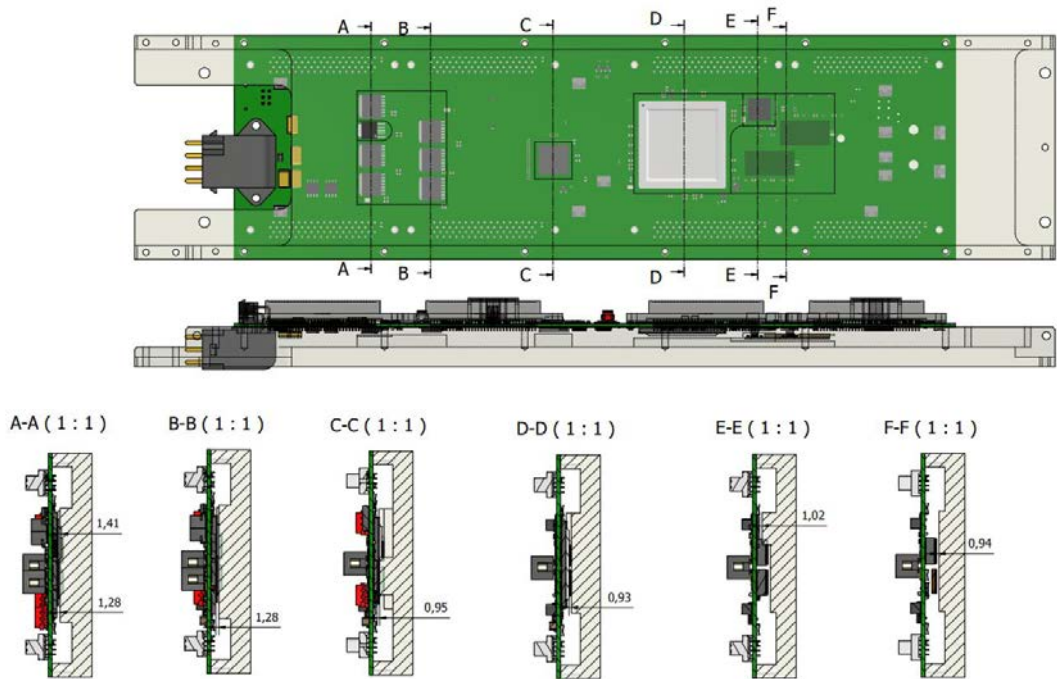


Figura 47. Ensamblaje de la OBDT-Theta sobre el frame y cortes que muestran la medida del espacio libre entre los componentes electrónicos y las elevaciones del frame. [Imagen del plano incluido en el Anexo 6]

Tras las iteraciones de diseño mencionadas, finalmente se fabricaron otros dos prototipos (ver Figura 48) con el diseño final para verificar los planos de fabricación y poder lanzar la producción completa de los frames definitivos.

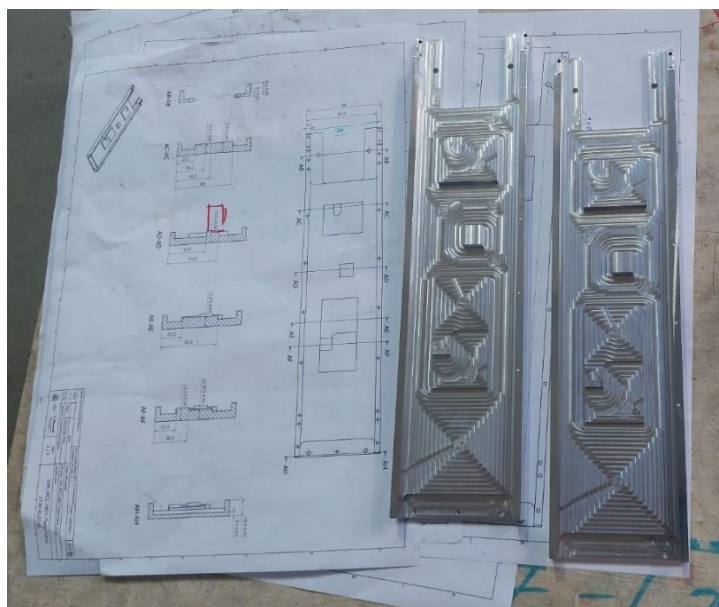


Figura 48. Prototipo final de OBDT-Theta frame en el taller del CIEMAT.

El proceso de diseño del frame ha ido ligado completamente a las modificaciones de diseño la tarjeta OBDT-Theta, ya que ambos procesos se desarrollaron de forma paralela para cumplir con los plazos establecidos. Durante el diseño de la tarjeta se modificó la ubicación de los componentes y esto consecuentemente requería modificaciones en el frame. Con los últimos prototipos se pudo verificar el diseño definitivo del frame y finalizar los planos de fabricación, que se pueden ver en el Anexo 5 con la identificación "OBDT-Theta-Frame: 27.00.00.03.02".

4.4.3. Costes y especificaciones de fabricación

Se necesita un frame por cada tarjeta OBDT-Theta, lo que equivale a 180 unidades. A esta cantidad inicial se debe sumar un número adicional de piezas que se fabricará como repuesto. Se estableció la cantidad total de piezas a fabricar en 200 unidades.

Con los planos de fabricación, el material asignado y la cantidad de piezas total, se pidieron ofertas a diferentes empresas. En la solicitud de las ofertas se especificaron los datos que aparecen en la Tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones de fabricación para los OBDT-Theta frames.

Descripción de la pieza:	Piezas mecanizadas FRAMES OBDT-Theta
Dimensiones generales:	370 x 90 x 16 mm
Material:	ALUMINIO EN AW-6082-T6
Cantidad:	200 unidades
Operaciones a realizar:	Mecanizado según plano de fabricación

Para lograr una correcta fabricación, se detallaron las puntualizaciones que se habían definido durante el proceso de diseño. Se explicó a las empresas que, en relación con el tipo de aluminio seleccionado, se había dado prioridad a que el material posea una mayor conductividad térmica, dado que estas piezas funcionan como disipadores de calor para la electrónica. Desde un punto teórico, el aluminio 6082-T6 es de los que mejor conductividad proporciona dentro de los aluminios usuales en la industria del mecanizado. No obstante, se sugirió que se consultase con el proveedor de material para verificar que el material ofrecido (dentro de los aluminios para mecanizado) fuera el que mejor conducía el calor. De todas maneras, lo preferible sería realizar una primera prueba antes de iniciar toda la producción para confirmar que el material se mecanizaba adecuadamente. En caso de que este material presentase problemas de estabilidad, se podría optar por cambiarlo y utilizar otro, como el 6060-T6, buscando un equilibrio entre la máxima conductividad térmica posible y resultados satisfactorios en el mecanizado. Se buscaba también que las piezas salieran con el acabado final, sin anodizado ni tratamientos posteriores.

Es fundamental que las piezas cumplan con las tolerancias solicitadas. Las dimensiones más críticas son aquellas especificadas con una tolerancia de 0,05 mm, detalladas en la página 3 de los planos. Se solicitó considerar esta especificación en el presupuesto para llevar a cabo un seguimiento de la producción y asegurar la entrega de las piezas con la calidad necesaria.

Dado que el producto solicitado requería unas especificaciones muy concretas, no se recibió respuesta de muchas de las empresas. Finalmente, el presupuesto se elaboró con una empresa que se comprometía a cumplir con las especificaciones, cumpliendo con el material, con los planos propuestos y ofreciendo la fabricación de 4 unidades preserie para su validación en el CIEMAT. Además, incluirían certificado de material, informe dimensional y hojas de autocontrol de todo el proceso de fabricación realizando un muestreo cada 5 unidades. El precio unitario incluyendo las especificaciones se definió en 136,75€/unidad por 200 unidades, en total, 27.350€ (IVA no incluido).

4.5. Fibers support. Diseño para impresión 3D.

En este epígrafe se describen los módulos VTRx+ y la conexión por fibra óptica con la tarjeta OBDT-Theta, junto con el proceso de diseño de un sistema mecánico para su correcto funcionamiento cuyo resultado es una pieza que actuará como soporte de las fibras, denominada “fibers support”. Se ha incluido un análisis de materiales y tecnologías de impresión 3D, además de un ensayo de irradiación de los materiales mencionados.

4.5.1. Diseño de la pieza y requerimientos establecidos

Las conexiones ópticas con la tarjeta OBDT-Theta se realizarán mediante los módulos VTRx+ (ver Figura 21), tal y como se ha descrito en el apartado 3.3. Estos transceptores ópticos han sido desarrollados por el CERN para que los datos eléctricos producidos en los detectores se conviertan en señales ópticas y pueden enviarse a las salas de control subterráneas para su procesamiento. También cuentan con un receptor óptico para convertir una entrada óptica en una señal eléctrica y permitir así el control de la tarjeta. Como su objetivo es utilizarse en el interior de los detectores del HL-LHC, han sido diseñados para que puedan funcionar bajo radiación [17].

En la Figura 49 se puede observar un esquema visto de perfil de cómo se realiza la conexión del módulo al conector eléctrico de la placa base. A la derecha de la figura se encuentra el bloque de acoplamiento óptico que, como se puede advertir, queda suspendido en el aire sin tocar la placa. Esta disposición provoca que el módulo pueda balancearse sobre el conector eléctrico, generando así una pérdida de potencia óptica en el sistema. Esta pérdida de potencia óptica ha sido detectada en el laboratorio y, consecuentemente, ha surgido la necesidad de diseñar un sistema mecánico adicional que permita inmovilizar el módulo evitando la pérdida.

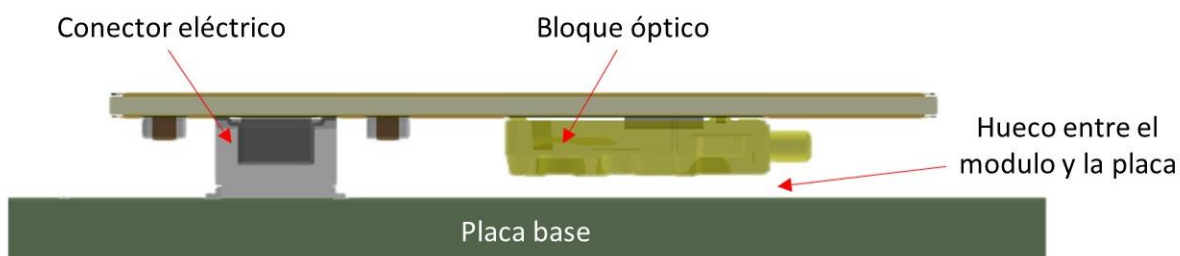


Figura 49. Esquema de conexión de VTRx+ sobre placa base. [Imagen de elaboración propia a partir de [26]]

En una primera idea se pensó en solucionar el problema añadiendo un pequeño soporte mecánico cuyo planteamiento se puede ver en la Figura 50. Las dimensiones tan ajustadas y la complicación en la instalación de estas piezas descartaron finalmente la propuesta.

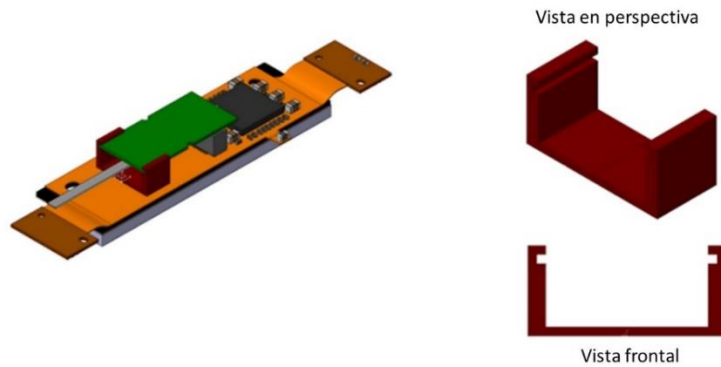


Figura 50. Primera opción de diseño para ajustar los VTRx+ a la placa. [14]

Estos módulos son muy ligeros y de dimensiones miniaturizadas, diseñados así con el propósito de adaptarse a la electrónica de los detectores de HL-LHC. En la Figura 51 se puede comprobar el tamaño del módulo y la terminación del cable de fibras. Del módulo sale un manojo de cables de fibra óptica protegido con un envoltorio que los recoge que se encuentra alejado de la conexión, lo que provoca que se deba tener mucho cuidado en la instalación y desinstalación del módulo con el conector eléctrico. Todo ello hace que, a la necesidad mencionada anteriormente del hueco entre el módulo y la placa, se suma la delicadeza que se debe tener durante la instalación. Es importante destacar que las fibras son mucho más delicadas que los cables convencionales de cobre porque el componente central es vidrio y, si se dobla demasiado, se puede partir. Por tanto, al añadir un sistema mecánico se deberán tener en cuenta ambas cuestiones, sujeción del módulo en la placa y protección de los cables de fibra.

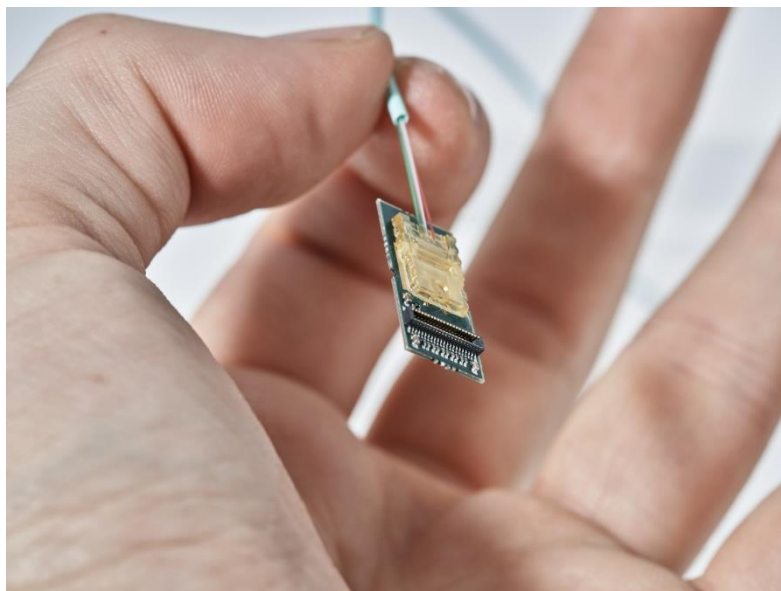


Figura 51. Imagen del módulo VTRx+ optical transceiver para mostrar su tamaño y terminación de fibras. [17]

Otro de los retos de diseño consistía en establecer el sistema de anclaje de la pieza mecánica adicional a la OBDT-Theta y conseguir su acoplamiento sin interponerse con el elevado número de componentes que hay en la tarjeta. Se puede observar el espacio disponible en la Figura 52.

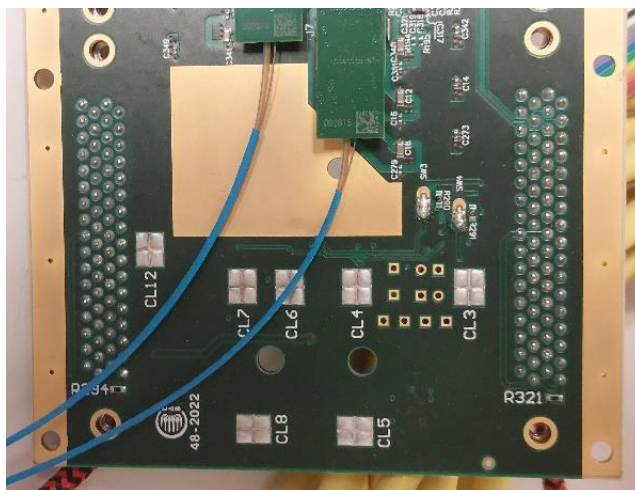


Figura 52. VTRx+ conectados en la OBDT-Theta.

Se pensaron varias opciones para fijar la pieza mecánica a la placa, considerando que los VTRx+ se conectan en la cara inferior de la tarjeta. La unión con adhesivos quedó descartada en un primer momento por la dificultad durante el ensamblaje y por las dudas del comportamiento del adhesivo bajo radiación, ya que existen amplias restricciones que impone el CERN respecto al uso de materiales con el objetivo de que mantengan su comportamiento bajo radiación. Otra de las opciones de unión sería utilizar una pieza metálica soldada a los paneles destinados para ello en la placa, pero esta opción provocaría un riesgo de cortocircuito que no se pretendía asumir. Por tanto, se pensó en utilizar los agujeros ya existentes en la tarjeta y hacer una unión atornillada. En la Figura 52 se pueden ver cuatro agujeros de los conectores de FE (*Front-End*) dentro de la zona interna de la placa que no iban a ser utilizados.

Para poder utilizar estos agujeros se debía encontrar el tipo de tornillo que encajaba en el roscado de los conectores. Esta tarea no fue evidente debido a que no se trataba de rosca métrica de uso común en el ensamblaje de estos componentes. Se realizaron varios pedidos con diferentes tipos de tornillos que parecían tener características similares para conseguir establecer cuáles eran los correctos. Finalmente, los tornillos *Machine Screw Pan Phillips 4-40* (ver Figura 53) permitían enroscar correctamente en los agujeros de los conectores. Se trata de un tipo de tornillo de uso común en componentes electrónicos. El tipo de cabeza *Phillips* permite el uso de destornilladores con punta de estrella y están fabricados en acero inoxidable. Las dimensiones del tornillo se encuentran en un sistema en pulgadas cuya especificación de la rosca es 4-40, designación que proporciona información sobre el diámetro y el paso de rosca. La longitud del tornillo varía según la necesidad y en este caso, tras probar varias longitudes, se estableció que la longitud de rosca ideal sería 1/2" (12,70mm).



Figura 53. Tornillo *Machine Screw Pan Phillips 4-40* de referencia 36-9902-ND. [26]

Tras establecer todos los requisitos de diseño, se procedió a hacer un boceto sobre la tarjeta que se puede observar en la Figura 54.

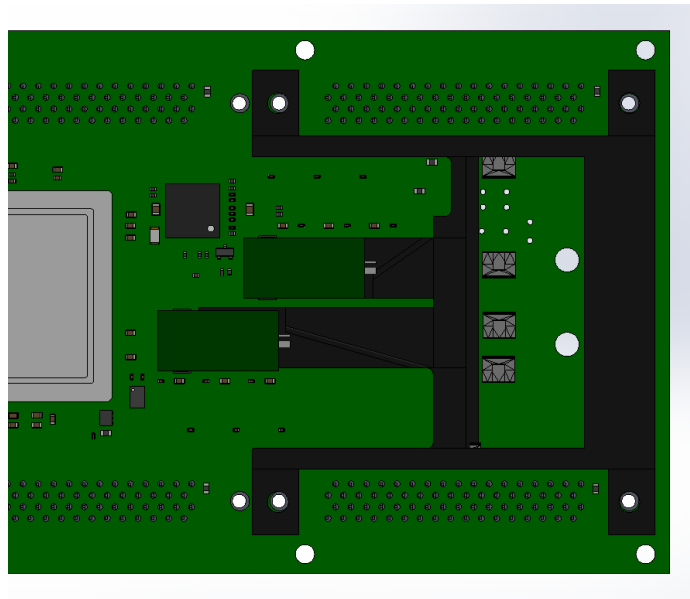


Figura 54. Primer boceto de la pieza fibers support sobre la OBDT-Theta.

Con el boceto planteado se conseguía una geometría que permitiera anclar la pieza a los cuatro agujeros roscados disponibles, evitar los obstáculos intermedios de la placa y rellenar el hueco entre los módulos VTRx+ y la placa para no perder potencia óptica. Con este boceto se dio lugar al diseño tridimensional de una pieza que siguiera cumpliendo con los requisitos establecidos, denominada “fibers support” porque actúa como soporte de las conexiones de fibra de la tarjeta. Se puede observar la pieza en la Figura 55.

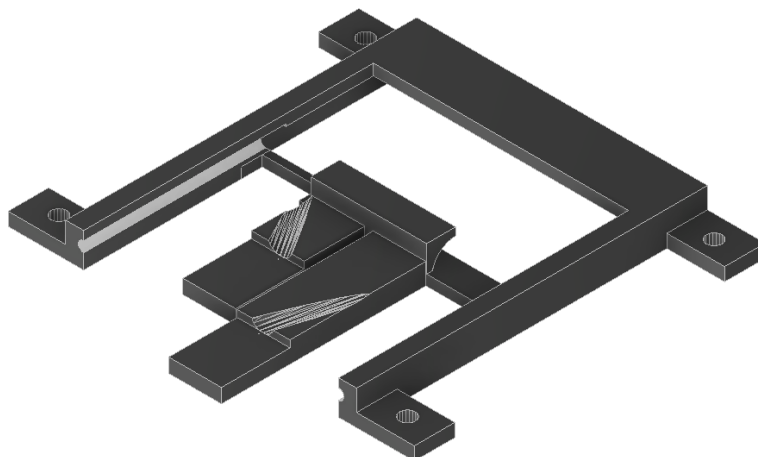


Figura 55. Primer diseño de fibers support.

En el diseño de la Figura 55 se puede ver como las dos palas principales están situadas para adaptarse a la geometría de los VTRx+ con la altura con la que teóricamente deberían rellenar el hueco que quedaba libre para fijar el módulo. Seguidamente se ha incorporado una elevación con dos surcos diseñados para alojar los cables de fibra. Se han añadido las cuatro pestañas externas en las esquinas para lograr el anclaje de la pieza a la placa. En la zona central se ha diseñado una especie de voladizo y una cubierta cuyo objetivo es proteger y contener un tramo de los cables de fibra que salen del módulo VTRx+, se almacenan en este espacio dando con una vuelta y salen de la pieza por las guías laterales desembocando en los conectores MTP.

La asignación de material se basó desde el primer momento en buscar una opción polimérica por su condición primordial como aislante eléctrico. Las propiedades mecánicas que necesitaba la pieza eran poco exigentes puesto que la única función que tiene es actuar como soporte, sin recibir ningún esfuerzo mecánico más allá de la compresión que se ejerza con los tornillos que la anclarán a la placa.

Dadas las dimensiones de la pieza, su geometría personalizada y la asignación de un material polimérico, se consideró que la mejor tecnología para la producción de las piezas sería la impresión 3D. En principio, esta tecnología se usaría para fabricar prototipos y probar que las piezas funcionaban correctamente. En los siguientes apartados de este documento se hablará del material y la tecnología de impresión 3D empleados. Se puede observar uno de los primeros prototipos realizados en impresión 3D en la Figura 56.

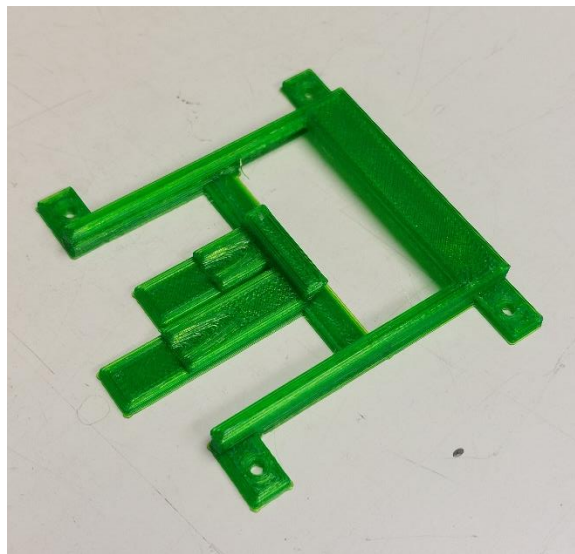


Figura 56. Primer prototipo de fibers support.

Se siguieron realizando modificaciones y se volvieron a imprimir más prototipos para pulir el diseño final de la pieza. En la Figura 57 se observa el ensamblaje de uno de los prototipos sobre la tarjeta OBDT-Theta, incluyendo los tornillos de anclaje.

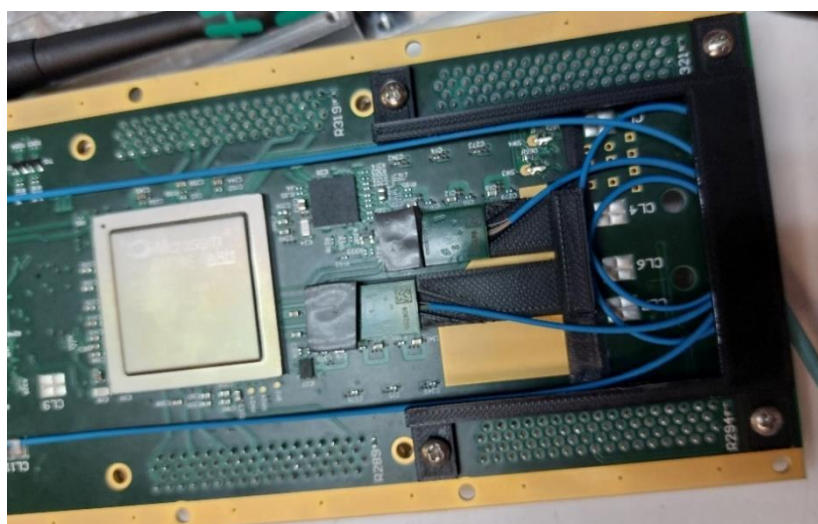


Figura 57. Ensamblaje de prototipo previo de fibers support en la OBDT-Theta.

Tras la impresión de los primeros prototipos y su ensamblaje en la tarjeta, se midió la potencia óptica emitida por los VTRx+ con la pieza 3D mediante el *Optical Power Meter*, medidor que se puede ver en la Figura 58. Esta verificación es el factor decisivo para concluir si el diseño funciona correctamente o necesita ser modificado, ya que la función principal de la pieza es mejorar la conexión de fibra con la tarjeta.

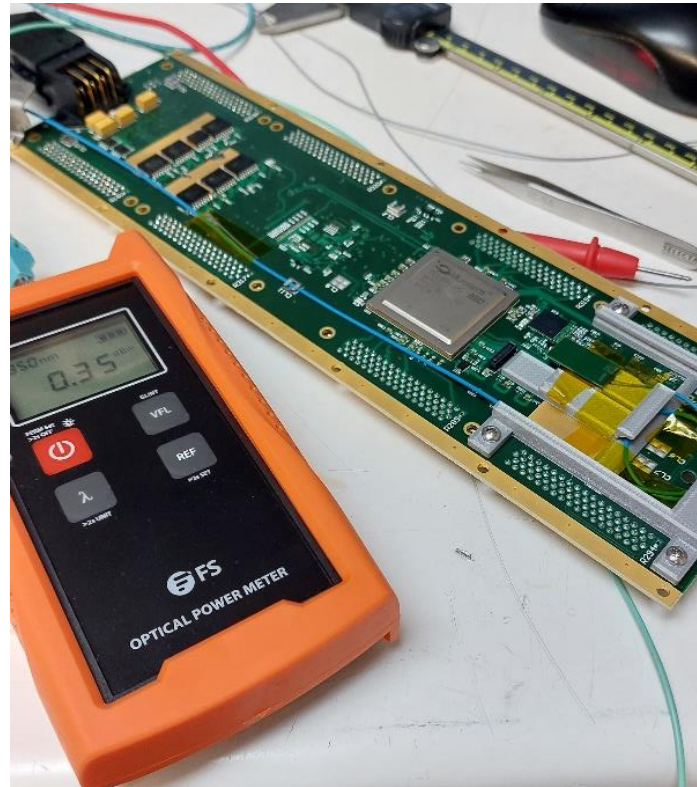


Figura 58. Medidor de potencia óptica usado para verificar la pieza de fibers support.

Los valores obtenidos con el medidor muestran los niveles de potencia de la señal óptica que se mide en decibelios referenciados a un milivatio (dBm). A diferencia del dB que es una medida relativa entre dos valores, el dBm es una medida absoluta de potencia y su conversión es $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$ (dBm es una ratio con respecto al valor fijo de 1 mW). Los valores cercanos a 0 dBm o ligeramente por debajo son considerados como una señal fuerte y saludable que permiten una transmisión fiable. En la última medición que se realizó en el laboratorio, todos los valores medidos con la pieza 3D ensamblada estaban entre 0 dBm y -1 dBm, indicando que la señal estaba a un nivel cercano al de referencia y dando por bueno el sistema.

Como se ha comprobado, en el funcionamiento de los módulos juega un papel importante la altura de la pieza 3D que rellena el hueco entre el módulo y la placa. Con esa altura se conseguirá que el VTRx+ quede completamente horizontal, produciéndose de esta manera una conexión ideal. Cuando la altura varíe, ya sea haciendo la pieza con mayor o menor grosor, se generará una inclinación en la conexión y provocará un deterioro en la señal. Se definió que la altura ideal para rellenar el hueco sería la del último prototipo que daba una señal óptica razonable, marcada con un valor de 2,51 mm en el modelo 3D, indicado en la Figura 59. Una vez fijada esta altura y sabiendo que el sistema funcionaba, el siguiente reto se establece en asegurar que, tras la fabricación, la altura de las piezas se mantiene dentro de un rango de valores marcado con tolerancias.

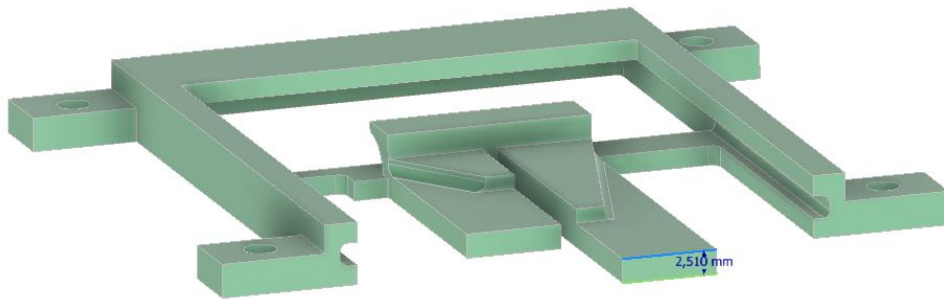


Figura 59. Cota de altura 2,51mm para la pieza fibers support.

En la Figura 60 se puede observar un esquema de cómo se transmitirá el calor desde la conexión de los VTRx+ en la tarjeta hasta el frame de aluminio, pasando por la almohadilla térmica y una lámina de *mylar* que se usará para que la almohadilla no se quede pegada al frame. En esta imagen se puede ver la incorporación de la pieza diseñada para lograr rellenar el hueco entre el módulo y la tarjeta, destacando la importancia de mantener la altura indicada en el diseño para su correcto funcionamiento.

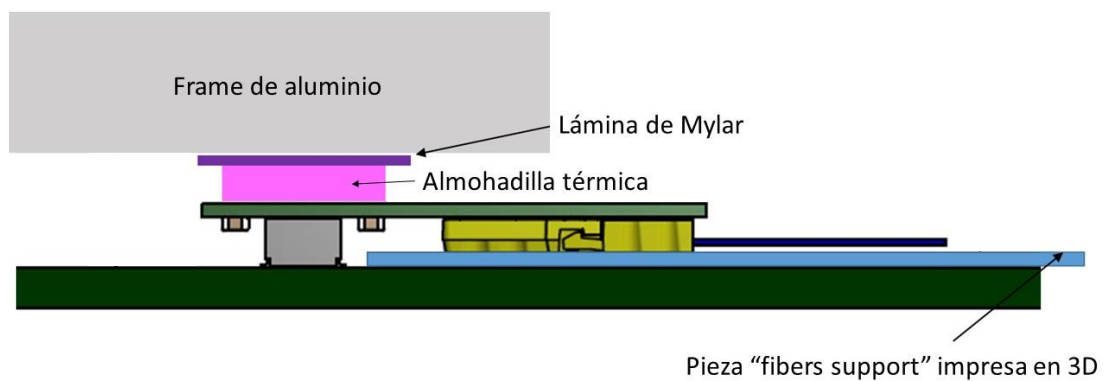


Figura 60. Esquema de disipación de calor desde los VTRx+ hasta el frame de la OBDT-Theta.

Posteriormente a la verificación del diseño de la pieza con respecto a su funcionamiento principal, se incorporaron ciertas modificaciones para conseguir una geometría óptima.

Se detectó que con los tornillos elegidos la rosca sobresalía por la cara inferior al realizar el apriete. Se buscó la opción de modificar las dimensiones del tornillo, pero la siguiente opción ofrecía un tornillo demasiado corto para esta aplicación.

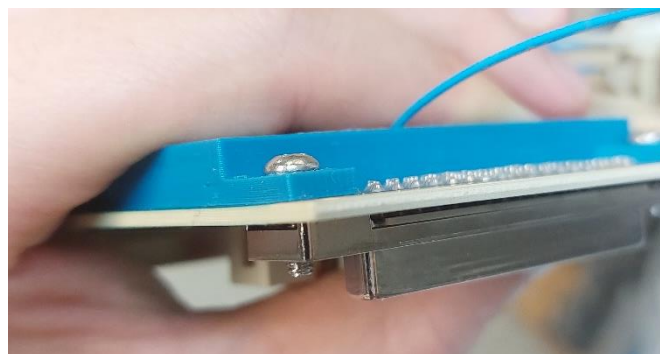


Figura 61. Problema detectado en el ensamblaje del prototipo de fibers support con el tornillo.

De la imposibilidad de reducir la longitud del tornillo surgió la solución de aumentar la altura de las pestañas de sujeción de la pieza hasta 3,5mm (ver en la Figura 62), más grosor con respecto a los prototipos iniciales para conseguir así que el tornillo especificado no sobresaliera por la otra cara y la rosca quedara completamente dentro del conector. Esta modificación implicaba la adición de material a la pieza, pero a su vez le daba mayor seguridad en la unión provocando un anclaje más robusto y menos susceptible a la rotura.



Figura 62. Medición de la altura las pestañas del fibers support.

Dado que la fabricación se realizaría con impresión 3D, también se realizaron modificaciones teniendo en cuenta varios aspectos que mejoran la calidad de la impresión. Se intentaron minimizar los voladizos y las áreas con grandes ángulos para reducir la necesidad de usar soportes, ya que estos pueden afectar a la calidad superficial y complican el posprocesado porque son difíciles de quitar. Se siguió la regla de los 45 grados, es decir, si la inclinación de la pared es menor de 45 grados no necesitará soporte. Se aumentó ligeramente el tamaño de los agujeros ya que, normalmente durante la impresión, los orificios de menos de 10 mm suelen salir con un tamaño inferior al nominal. Se redondearon algunas aristas de la pieza buscando así una distribución más uniforme de las tensiones térmicas para evitar la deformación y contracción.

En el primer prototipo se realizaron dos surcos para guiar los cables que salen de los módulos VTRx+. Se comprobó, durante la instalación del cableado, que los dos surcos no eran efectivos y el cable se salía de esta hendidura. Por ello, se decidieron eliminar estas cavidades cilíndricas para realizar una elevación con un redondeado que guiase al cable de forma diagonal hacia la zona de almacenaje, sin intentar que se quedara insertado dentro, logrando así que el cable se ajustara a la guía. En el ensamblaje final los cables se fijarán con adhesivo por lo que con la guía sería suficiente. Se puede ver el ensamblaje del prototipo modificado con esta disposición en la Figura 63 y comparar con las hendiduras del diseño de la Figura 55.

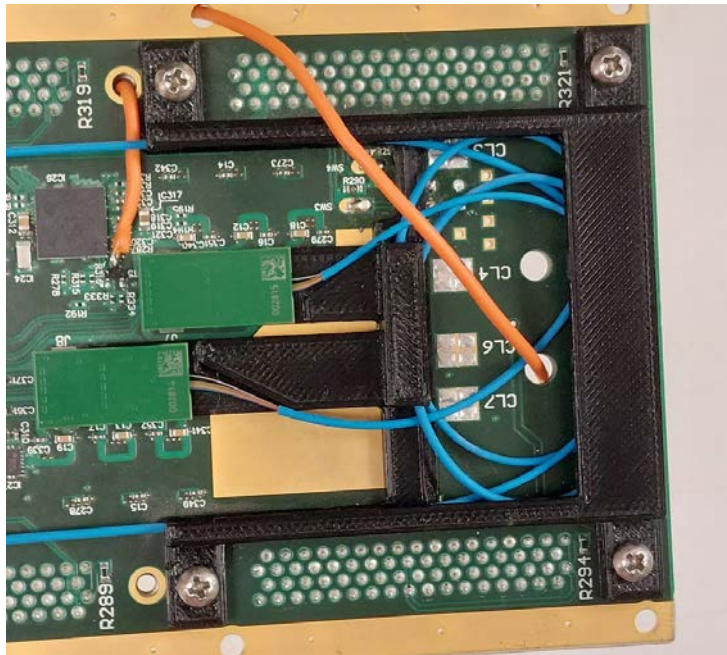


Figura 63. Cambio realizado en las guías de los cables del fibers support.

Con la incorporación de los cambios mencionados, se finalizó el diseño definitivo de la pieza fibers support, que se puede observar en la Figura 64 y Figura 65. De esta pieza no se ha realizado plano de fabricación porque será fabricado por impresión 3D. La llegada de la impresión 3D elimina la necesidad de generar planos detallados con cotas precisas ya que lo único que se necesita para su fabricación es un archivo tridimensional en formato STL⁸ o compatible. Esto simplifica el intercambio de datos y agiliza el diseño. No obstante, muchas veces los planos siguen siendo necesarios para la comunicación. En este caso, para lanzar la producción de todas las piezas finales, se obtuvieron unas anotaciones para indicar las dimensiones generales de la pieza y especificar que una de las dimensiones estuviera dentro de una tolerancia de 0,05 mm, mostradas en la Figura 66.

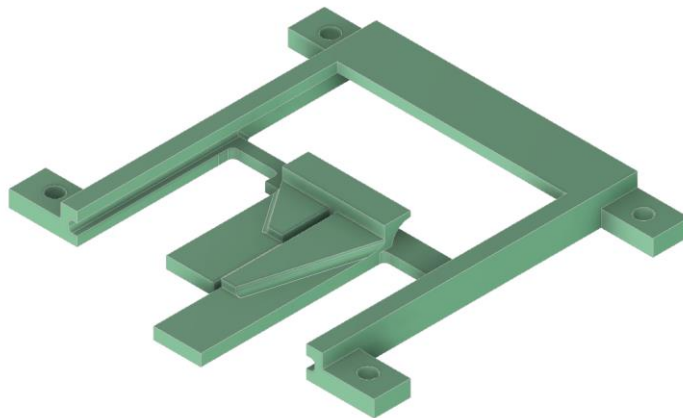


Figura 64. Vista superior de la pieza definitiva fibers support.

⁸ Es un formato de archivo cuyas siglas vienen del inglés “*S*Tereo*L*ithography” (estereolitografía), “*S*tandard *T*riangle *L*anguage” (Lenguaje de triángulo estándar) o “*S*tandard *T*essellation *L*anguage” (Lenguaje de teselación estándar). Este archivo contiene la información de la geometría de objetos 3D y es de uso muy común en la industria de prototipado rápido y sistemas de fabricación asistida por computadora [43].

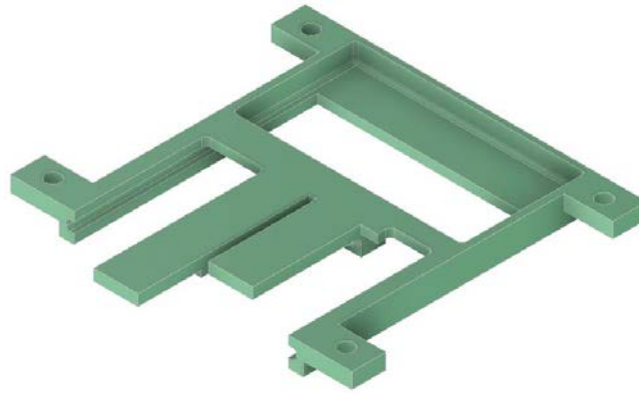


Figura 65. Vista inferior de la pieza definitiva fibers support.

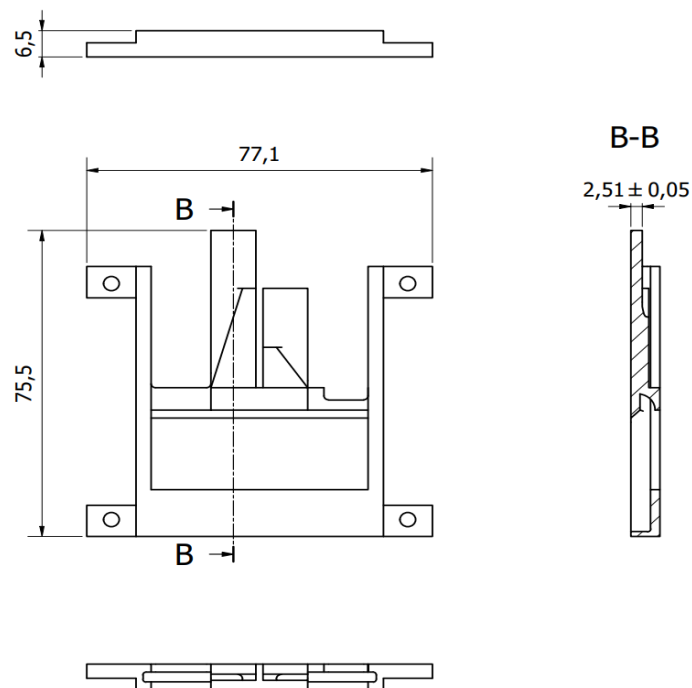


Figura 66. Especificaciones dimensionales de la pieza fibers support.

4.5.2. Materiales para impresión 3D

Conseguir un objeto impreso en 3D con calidad y buen rendimiento depende de numerosos factores, siendo uno de los más importantes la selección adecuada del material para el objeto determinado. La elección de un material u otro para una pieza afecta directamente a la funcionalidad, durabilidad y viabilidad en el proceso de fabricación aditiva. En este caso, la decisión se ve limitada al ámbito de los materiales poliméricos como se ha mencionado con anterioridad y, en concreto, materiales poliméricos que se puedan usar en tecnologías de impresión 3D.

Para la asignación de materiales se deben analizar en primer lugar las propiedades específicas que demanda su aplicación. La pieza fibers support no estará sometida a grandes esfuerzos, por lo que no requiere priorizar factores como la resistencia mecánica para soportar cargas y tensiones. Tampoco requiere especial atención en cuanto a densidad, tenacidad, ductilidad y otros atributos, se usará un polímero industrial que permita estar dentro de unos valores convencionales. Es importante que el

material sea aislante eléctrico (condición que cumple por limitar la selección a polímeros) y que tenga una buena estabilidad dimensional.

Establecidas las condiciones anteriores, el factor más importante a tener en cuenta es que la pieza estará sometida a radiación. Por ello, una propiedad que se debe analizar es la estabilidad química. Esta puede alterar el comportamiento de la pieza, dependiendo del tipo y nivel de radiación al que esté expuesta. Por ejemplo, en aplicaciones médicas y nucleares, el uso de materiales con una sólida estabilidad química es primordial para atenuar los efectos negativos de la radiación y garantizar la conservación de propiedades.

Cuando la radiación electromagnética ionizante interacciona con la materia se pueden inducir cambios a través de fenómenos primarios de ionización, formación de radicales o excitación de moléculas. Esto puede provocar una alteración de las propiedades que podría suponer una mejora de su comportamiento o, de manera negativa, una degradación de sus parámetros. Si se desencadenan reacciones químicas en el material se pueden acelerar los procesos de corrosión provocando defectos en su integridad estructural y sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo [27].

Valorando diferentes opciones, en términos de resistencia bajo radiación, los materiales utilizados para impresión 3D que a priori presentan mejores propiedades debido a su buena estabilidad química son polímeros avanzados como el PEEK (Poliéter éter cetona), ULTEM (Polieterimida), PPS (Sulfuro de polifenileno). Estos polímeros garantizarían un adecuado comportamiento, pero se trata de materiales especiales cuya fabricación para un número elevado de piezas dificultaría y encarecería demasiado el proceso. Es cierto que la pieza estará sometida a radiación, pero los niveles no son tan elevados como para usar un polímero avanzado. Por ello, en el análisis de materiales se buscará la opción que menos se deteriore a lo largo del tiempo con la radiación dentro de los materiales más comunes de impresión 3D.

Los primeros prototipos de las piezas impresas en 3D (ver Figura 67) se realizaron con PLA (ácido poliláctico). Este material es frecuente en impresión 3D por su facilidad de uso, biodegradabilidad y su capacidad para producir piezas con buenos acabados. Sin embargo, su estructura molecular y composición química hacen que no se considere altamente resistente a la radiación ionizante. Con una exposición prolongada se puede degradar y perder sus propiedades físicas.

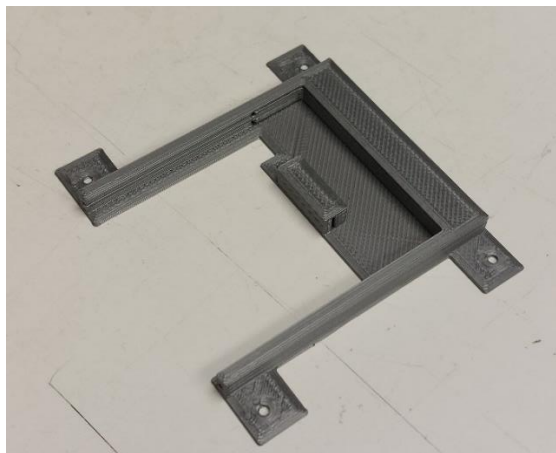


Figura 67. Prototipo de pieza impresa en 3D en PLA.

Otra opción es PLA Tough (PLA endurecido), también muy frecuente en las impresoras 3D. Este material está formulado para ser más flexible y resistente, se usa para aplicaciones en las que se requiere mayor tenacidad. Lo que se consigue con el PLA Tough es mejorar las propiedades mecánicas manteniendo las ventajas de facilidad en la impresión y biodegradabilidad del PLA estándar. La cuestión es que esta mejora se consigue con aditivos o incorporando agentes de refuerzo como fibras, pero la composición química es la misma que el PLA, por lo que no se consideró su uso para la pieza fibers support.

El material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) también es un estándar en impresoras 3D. Es usado por sus buenas capacidades mecánicas y resistencia a altas temperaturas. Además, parece tener una resistencia relativamente alta a la radiación ionizante. En un estudio [28] se muestra que una dosis de radiación de 60 Gy de rayos X tuvo un efecto mínimo en las dimensiones de las muestras impresas en 3D con ABS, resultando en una contracción máxima de menos del 1% y cambios en la dureza del ABS insignificantes. El problema que se encuentra en la impresión de ABS es que necesita un ambiente de temperatura controlado para la buena adhesión de las capas. Esto dificulta el proceso de impresión, hace que se requiera más tiempo y más número de piezas defectuosas, por lo que se continuó analizando más opciones.

El PETG (Tereftalato de Polietileno modificado con Glicol) es un termoplástico ampliamente utilizado en impresión 3D. Algunas marcas comerciales lo venden como la combinación perfecta entre ABS y PLA, más funcional que el ABS y con la fiabilidad del PLA. Por tanto, este material sería una opción favorable ya que cuenta con facilidad de impresión y buenas propiedades mecánicas. No se han encontrado estudios detallados del comportamiento del PETG bajo radiación, pero se sabe que es un material resistente y químicamente estable, lo que lleva a pensar que podría comportarse relativamente bien bajo radiación ya que se usa en aplicaciones que requieren buena estabilidad química. J. Kočí, en su artículo, explica que se está desarrollando un material compuesto para protecciones contra radiación en el que el material matriz es PETG [29]. En este artículo han mezclado PETG con tungsteno y han realizado objetos de prueba en impresión 3D para determinar la atenuación de la radiación. Aunque este estudio no proporciona detalles específicos de cómo se comporta el PETG sin tungsteno, el hecho de que se esté usando como matriz del compuesto sugiere que el PETG impreso en 3D tendrá cierta resistencia bajo radiación a lo largo del tiempo. En la Figura 68 se pueden observar varios prototipos impresos en 3D en material PETG.

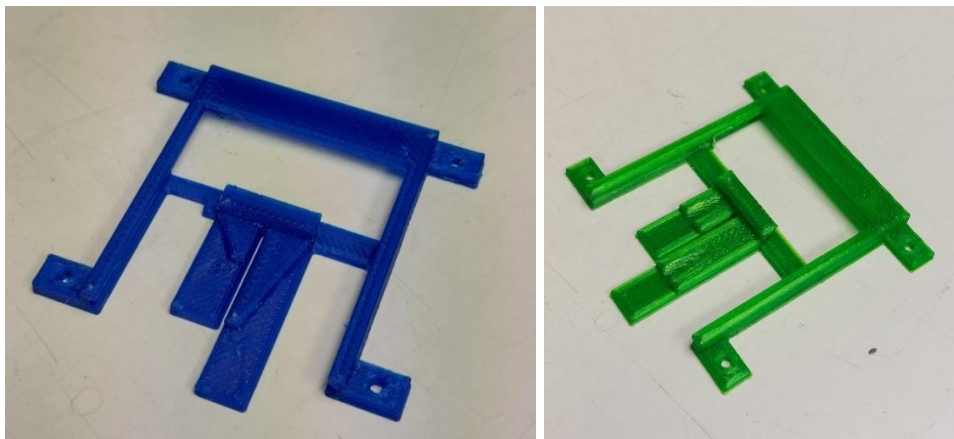


Figura 68. Prototipos de piezas impresas en 3D en PETG.

La poliamida o nylon también es un material usado con frecuencia en la fabricación aditiva. Se trata de un material que ofrece acabado superficial de calidad y alta resistencia mecánica, similar al ABS. Algunas de sus propiedades más destacadas son su resistencia a la abrasión, a altas temperaturas, al estiramiento y su baja contracción de material. Se ha considerado esta opción porque el nylon se utiliza en ciertas aplicaciones que requieren resistencia a la radiación, como dispositivos médicos, electrónicos o aeroespaciales [30].



Figura 69. Prototipo de pieza impresa en 3D en Nylon.

La poliamida involucra más dedicación a la hora de imprimir en 3D porque precisa de una alta temperatura de impresión y configuraciones específicas. No obstante, se realizaron prototipos en nylon para probar su funcionamiento (ver Figura 69). El hecho de usar nylon como material también ofrecía la ventaja de usar diferentes tecnologías de impresión, no solo FDM (*Fused Deposition Modeling*) sino también SLS (*Selective Laser Sintering*), cuyas diferencias están desarrolladas en el apartado 4.5.3.

El nylon es un material higroscópico, tiene tendencia a absorber humedad del entorno. Esta característica puede ser una ventaja en determinadas aplicaciones, pero, en el caso de la pieza que se estaba diseñando, era un gran inconveniente. El hecho de absorber agua puede provocar un hinchamiento de la pieza. En el entorno de las cámaras DT puede haber fugas de agua del sistema de refrigeración. Si el agua llega a la pieza y esta se hincha, provocaría un aumento de las dimensiones afectando negativamente a las conexiones de fibra óptica de la tarjeta. Identificando este riesgo, se descartó la idea de usar nylon como material porque si se produce el hinchamiento afectaría directamente a la funcionalidad de la pieza.

En definitiva, después de la información expuesta sobre materiales de impresión 3D, se optó por la selección de PETG como material de fabricación para la pieza fibers support. Es difícil saber si el material elegido será la mejor opción ya que no hay una unidad de medida clara para asegurar el comportamiento bajo radiación. No obstante, para asegurar la decisión, se hizo una prueba de irradiación de materiales impresos en 3D para ver si se apreciaban cambios en su comportamiento mecánico. Esta prueba queda descrita en el apartado 4.5.4.

En cualquier selección de material destinado a estar en el interior de la caverna de CMS se debe asegurar un buen funcionamiento bajo las condiciones medioambientales presentes, un entorno cerrado a 100 metros bajo la superficie con intensos campos magnéticos y elevados niveles de radiación. Una de las restricciones básicas es la utilización de material no inflamable y libre de halógeno.

El CERN tiene sus propios documentos con instrucciones de seguridad que se deben seguir para el uso de ciertos materiales. En este caso, además de las consideraciones mencionadas, se ha procedido a comprobar el documento que especifica “El uso de plásticos y otros materiales no metálicos en el CERN en relación con la seguridad contra incendios y la resistencia a las radiaciones” [31]. Al tratarse de un documento antiguo, no aparecen los materiales de impresión 3D que se utilizan a día de hoy, pero se ha encontrado que el PET (tereftalato de polietileno) no está prohibido. En consecuencia, el PETG es una variante del PET con un monómero adicional, glicol modificado, una composición química tan similar hace que tengan un comportamiento muy semejante.

4.5.3. Tecnologías de impresión 3D utilizadas

De forma paralela a la selección de material se analizó la tecnología de fabricación aditiva que se iba a emplear para la pieza. Cada tecnología ofrece sus ventajas e inconvenientes y no todos los materiales se pueden emplear en cada una de ellas, tienen sus limitaciones. La forma de impresión de un objeto en 3D influye en su geometría ya que cada tecnología ofrece una precisión y resolución diferente. Para la realización de los prototipos de fibers support se han utilizado dos de las tecnologías más comunes actualmente en la fabricación aditiva, FDM y SLS.

Evaluando el uso de material, al plantear la opción de nylon, surgió la posibilidad de realizar las piezas mediante impresión 3D por sinterizado selectivo por láser (SLS). El nylon se usa en SLS por la adecuación de sus propiedades mecánicas al proceso, garantizando resistencia, rigidez y durabilidad. La tecnología SLS consiste en sinterizar pequeñas partículas de polímero en polvo mediante un láser de alta potencia y convertirlo en un objeto sólido basado en el modelo 3D.

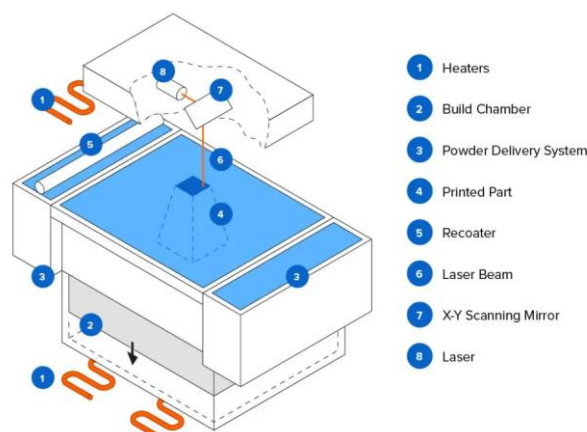


Figura 70. Esquema de funcionamiento del proceso de impresión 3D SLS. [32]

En la Figura 70 se observa un esquema del proceso de impresión 3D por SLS. Se dispersa el polvo precalentado sobre una fina capa encima de la plataforma dentro de la cámara de impresión. El láser recorre una sección transversal del modelo 3D calentando el polvo hasta que funde las partículas las

una creando una pieza sólida. El polvo sin fundir actúa como soporte durante la impresión, eliminando la necesidad de crear estructuras soporte adicionales. La plataforma va descendiendo una altura de capa hasta que las piezas están terminadas. Una vez acabada la impresión y tras un proceso de enfriamiento, de la cámara se obtiene un “pastel” con las piezas terminadas incrustadas en un bloque de polvo. Este “pastel” se lleva a la zona de posacabado donde se separan y se limpia el exceso de polvo (que se puede reciclar), proceso que se puede ver en la Figura 71. Cuando se obtienen las piezas, es recomendable añadir un posacabado mediante granallado o pulido para lograr mejorar el acabado superficial y evitar restos de polvo [32].



Figura 71. Posacabado de las piezas impresas en 3D en SLS.

El uso de SLS para las piezas permitiría obtener piezas de calidad, buen acabado superficial y dimensional, lo que garantizaría una funcionalidad favorable de la pieza diseñada. Otra ventaja que ofrecía el uso de SLS es que la fabricación de piezas es más rápida comparando con otras tecnologías 3D, en una misma cubeta de impresión es posible fabricar gran cantidad de piezas en un tiempo relativamente reducido. Se pueden emplear otros materiales, pero lo más común para garantizar el buen funcionamiento de las máquinas de SLS es usar poliamida 11 (PA11) o poliamida 12 (PA12). Ambos materiales se usan en forma de polvo fino, la principal diferencia es su origen. El PA12 es un polvo sintético derivado del petróleo mientras que el PA11 es un bioplástico basado en materia prima renovable, tienen propiedades mecánicas similares.

Para la realización de un prototipo de la pieza se usó la impresora Fuse 1+ 30W de Formlabs. Se trata de una impresora 3D SLS industrial de trabajo que ofrece alta calidad en un espacio reducido. Tiene un volumen de impresión disponible de 165 x 165 x 300 mm³.

Como para cualquier proceso de fabricación aditiva, después de generar el modelo 3D con un archivo “.STL” se usa un software de preparación que, en el caso de las impresoras de la serie Fuse, es el software Preform. En la Figura 72 se pueden ver las configuraciones marcadas, donde indica que la altura de capa es de 0,11mm y la duración para el modelo es de 2 horas y 8 minutos.

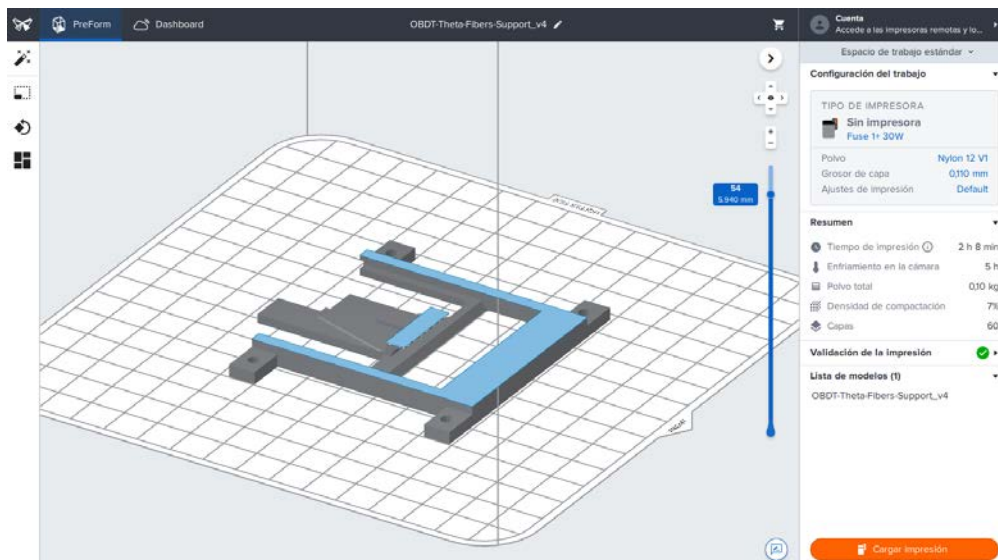


Figura 72. Captura de pantalla del software Preform en la preparación de una pieza fibers support.

Como se trata de una impresora industrial, se debe aprovechar al máximo el espacio de la cubeta de impresión. Así, se estableció una configuración en la que se optimizara el tiempo de impresión. En la Figura 73 se ve como para una distribución de 28 piezas tardaría 6 horas y 24 minutos, el tiempo por pieza se reduce a 14 minutos.

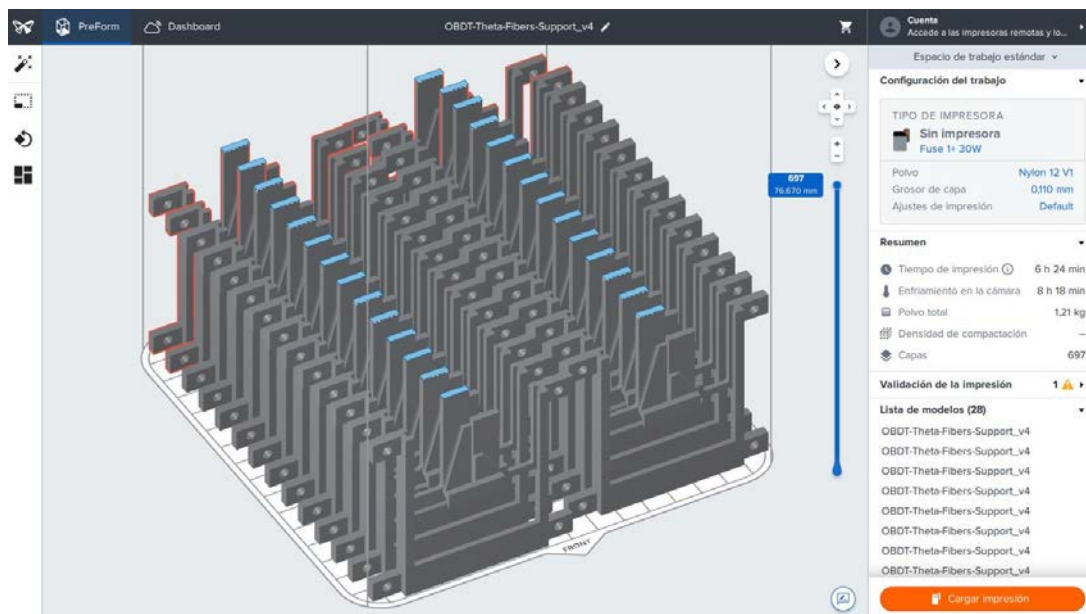


Figura 73. Captura de pantalla del software Preform en la preparación de 28 piezas fibers support.

Se lanzó la impresión de un prototipo en SLS con material PA12, se puede observar en la Figura 74. Tras analizar el prototipo en el laboratorio, la calidad superficial era excelente y las dimensiones se ajustaban muy bien a las establecidas. El problema que se detectó en la pieza fue que en su superficie se encontraron residuos de polvo. Si se inserta una pieza con partículas de polvo y estas entran en la pieza de epoxi de los VTRx+, podrían entorpecer la transmisión de luz y, por tanto, atenuar la señal óptica en la tarjeta. Al detectar estos residuos de polvo, los requerimientos técnicos hacen que se priorice la integridad de la pieza frente al buen acabado. Es cierto que estos residuos se pueden eliminar con la mejora del posacabado y realizando un granallado, pero ante la duda de si este polvo se puede encontrar en ciertas piezas, se siguieron estudiando otras opciones.

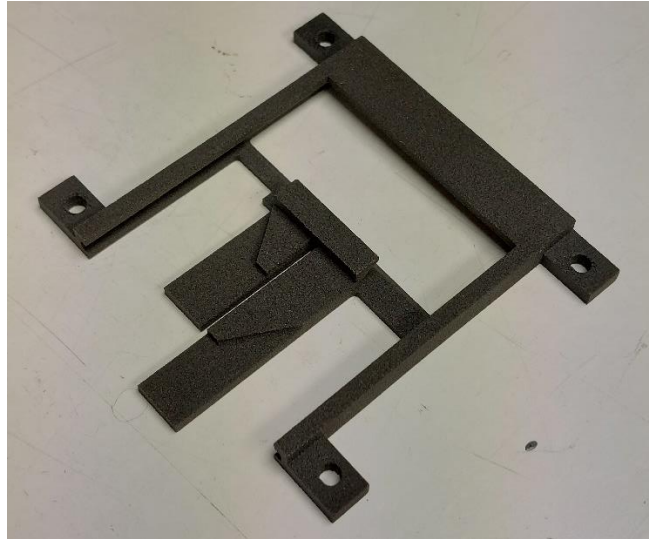


Figura 74. Prototipo de pieza fibers support impresa en 3D SLS en PA12.

Tras la no conformidad con el resultado de las piezas impresas en SLS y la limitación de material a nylon con esta tecnología, se optó por el estudio de la fabricación de las piezas mediante modelado por deposición fundida (FDM). Esta tecnología se basa en la deposición de material en capas que van conformando la pieza. El material sale por una boquilla que se encuentra a una temperatura mayor a la temperatura de fusión del filamento utilizado.

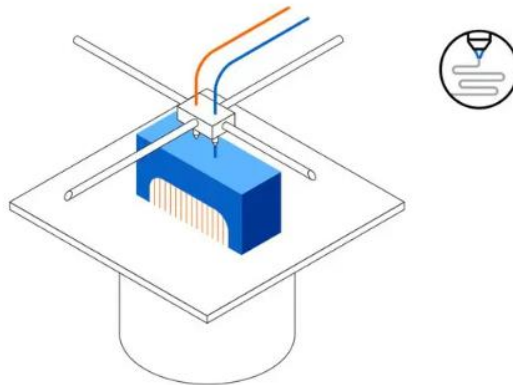


Figura 75. Esquema de funcionamiento del proceso de impresión 3D FDM. [32]

En comparación con la tecnología SLS, se perdería resolución y calidad tanto dimensional como superficial en las piezas, pero se tendrían más opciones para la selección de material, ya que con SLS se limita al uso de nylon. En cuanto a tiempo de impresión y precio, al estar tan estandarizado su uso, los materiales son más baratos y la oferta de marcas que dan servicio de impresión por FDM es muy amplia. El tiempo de impresión por pieza será mayor que con SLS, pero el precio por pieza será muy similar o incluso más bajo.

Para la realización de prototipos de piezas en FDM se ha usado la impresora Ultimaker S5. Es una impresora eficiente y robusta que se usa en el área industrial. Tiene un volumen de impresión de 330 x 240 x 300 mm³ y un sistema de doble extrusión que permite imprimir con dos materiales de manera simultánea. Esta impresora funciona con el software Ultimaker Cura [33].

Aunque se ha mencionado que la precisión de las piezas en FDM será menor que en SLS, las máquinas de FDM llegan a ofrecer una precisión de posicionado del orden de 3 micras en el eje Z. Imprimiendo a 250 micras de altura de capa se agilizaría la impresión y se aseguraría que los 2,5 mm de altura requeridos en la pieza estén dentro de tolerancias. En la Figura 76 se puede observar el proceso de impresión de la pieza y el tiempo estimado de impresión, que serían 1 hora y 22 minutos. En esta configuración se ha especificado el uso de material PETG genérico y material de soporte soluble. A la derecha se ve la torre de temperatura que es usada cuando se utiliza la doble extrusión, imprimiendo con dos materiales simultáneamente. Esta torre se imprime para asegurar que el material está fluyendo a la temperatura adecuada durante la impresión de la pieza, mejorando la calidad y evitando las gotas residuales.

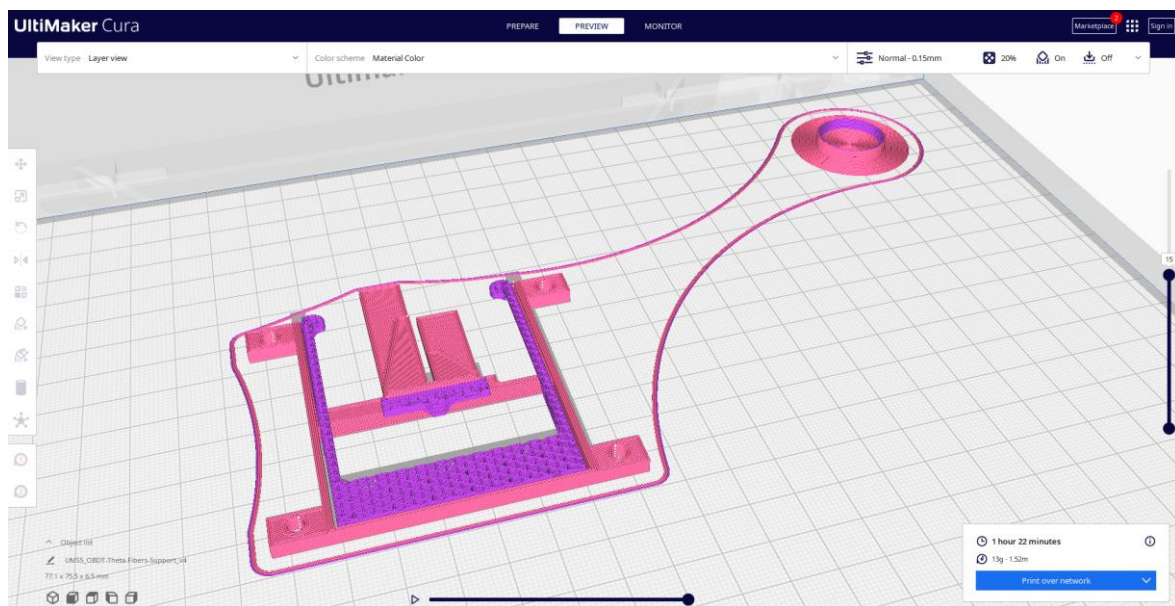


Figura 76. Captura de pantalla del software Ultimaker Cura en la preparación de una pieza fibers support en PETG usando soportes con material soluble.

Otra desventaja con respecto a la impresión por SLS es que en FDM son necesarios los soportes estructurales durante la fabricación de la pieza. Se pueden usar soportes de materiales solubles en agua u otros líquidos, como el disolvente biodegradable de limoneno. Si la máquina tiene más de una boquilla de filamento, se puede usar una boquilla con el material de la pieza y la otra con material soluble para los soportes. Así, la eliminación posterior de los soportes es más sencilla y completa, logrando un buen acabado superficial. El problema de usar material soluble es que el tiempo de impresión es mayor. Como en esta pieza lo importante es la altura de 2,5 mm, el resto de la pieza no requiere una precisión especial, se pueden usar soportes del mismo material para agilizar el tiempo de fabricación. En la Figura 77 se puede observar la configuración de la pieza imprimiendo con la misma boquilla el modelo y los soportes, que además se han aligerado para que sean más fáciles de retirar. En este caso no es necesaria la torre de temperatura porque no se cambia de material durante la impresión y se reduce el tiempo a 56 minutos.

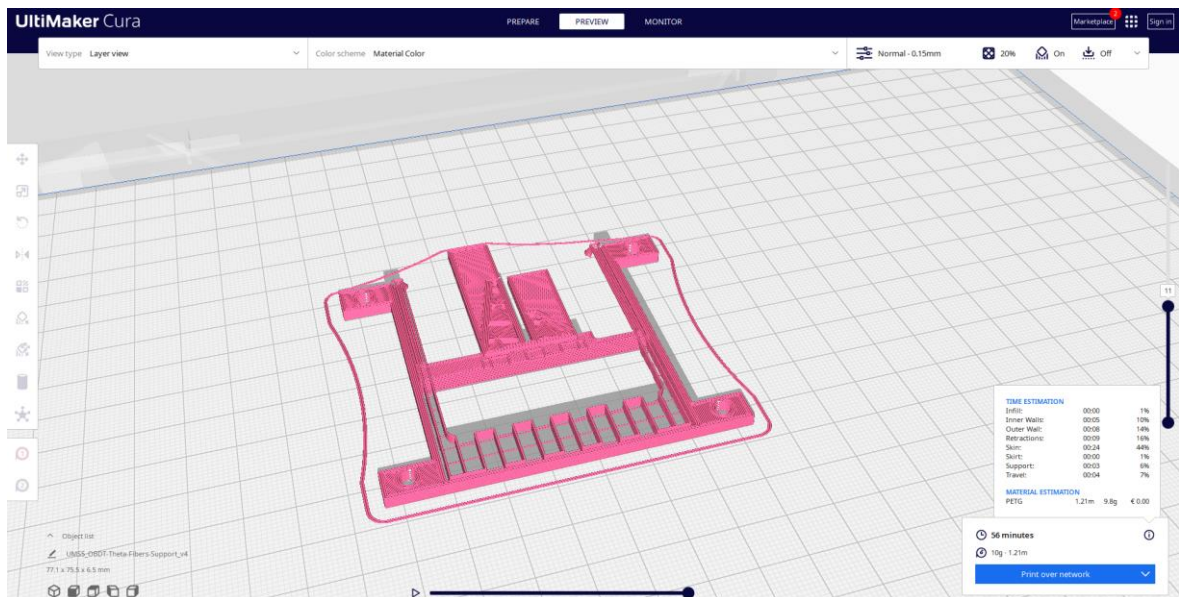


Figura 77. Captura de pantalla del software Ultimaker Cura en la preparación de una pieza fibers support en PETG usando soportes del mismo material.

De este modo, analizadas dos tecnologías de impresión 3D diferentes, se ha optado por realizar las piezas finales mediante FDM. Es cierto que cada una de estas tecnologías ofrece sus ventajas, pero, tras los prototipos que se han realizado y las pruebas de potencia óptica mencionadas en el apartado 4.5.1, se puede verificar que la pieza fibers support funcionará correctamente y cumplirá con las especificaciones de diseño aplicando la tecnología FDM.

4.5.4. Ensayo de piezas impresas en 3D bajo radiación

Dado que la radiación ionizante puede provocar una degradación de las propiedades de la materia con el tiempo, se ha desarrollado una prueba para comprobar si las piezas impresas en 3D sufrirían transformaciones en sus propiedades mecánicas al estar sometidas bajo radiación. Estas pruebas de irradiación gamma se han llevado a cabo en la instalación Náyade del CIEMAT.

La instalación Náyade está clasificada como IR06 en el catálogo de instalaciones radioactivas del CIEMAT, perteneciendo a la División de materiales de interés energético del Departamento de Tecnología. Esta instalación se usa para evaluar el envejecimiento acelerado de materiales y equipos simulando el deterioro que experimentarían en condiciones normales de funcionamiento en la industria nuclear, espacial y otros campos de investigación y desarrollo.

La instalación cuenta con una piscina de agua de 1,2 m de lado y 4,5 m de profundidad (ver Figura 78) en cuyo interior se encuentran una serie de fuentes de Cobalto-60⁹ distribuidas en 72 fuentes agrupadas en seis lotes de diferente actividad [34].

⁹ El Cobalto-60 (⁶⁰Co) es un isótopo radiactivo sintético del cobalto que en su proceso de desintegración emite rayos gamma. Los rayos gamma emitidos tienen energías alrededor de 1,3 MeV y son altamente penetrantes. El ⁶⁰Co se usa principalmente como elemento traza en reacciones químicas, esterilización de equipo médico y como fuente de radiación para numerosas aplicaciones (radioterapia, radiografía, irradiaciones, etc.). [41]



Figura 78. Vista superior de la piscina de la Instalación Náyade donde se muestra la distribución de fuentes en 6 lotes.

La instalación dispone de portamuestras cilíndricos en los que se pueden irradiar distintos tipos de materiales a diferentes tasas de dosis dependiendo de las fuentes que se dispongan a su alrededor y del tiempo que permanezcan en el interior.

En el caso del ensayo realizado se usó un portamuestras cilíndrico de 6 cm de diámetro. Como no entraba la pieza completa en el portamuestras, se realizaron cortes en una esquina a diferentes piezas para poder ensayar varios materiales. En la Figura 79 se pueden observar las piezas recortadas e introducidas en una bolsa de plástico antes de meterlas en el portamuestras.



Figura 79. Recortes de piezas impresas en 3D para introducir en el portamuestras en el ensayo de irradiación.

La bolsa de plástico se introdujo en el portamuestras, un recipiente hermético que se sumerge en la piscina y se coloca junto a las fuentes radiactivas en una posición determinada para recibir una irradiación uniforme.

Esta instalación posee los equipos y sistemas necesarios para garantizar la seguridad con controles de nivel de agua, detectores de radiación, control de la pureza del agua a través de medidas de conductividad y pH. Todos estos sistemas se controlan desde una consola de control que además proporciona el posicionamiento y extracción automáticos de los portamuestras [27].

Para esta prueba se ha realizado una dosimetría en la que se indican las tasas de dosis cuyos resultados se han llevado a cabo con 3 dosímetros y que se puede ver en el Anexo 7. El objetivo de la prueba estaba marcado en que la muestra se irradiara a unos 100 Gy, más de diez veces la dosis que se espera que la pieza reciba en el detector. Los dosímetros marcaron una dosis media de 0,105 kGy/h con una falta de uniformidad de 3,76% (siendo esta la incertidumbre de la dosis recibida). Esta dosis se traduce en 1,75 Gy/min, que, tras 57 minutos y 4 segundos de irradiación con la muestra introducida en las fuentes, se obtienen los 100 Gy buscados en el ensayo. Tras este tiempo se sacó el portamuestras de la piscina.

Se utilizó un microscopio para analizar las muestras de las piezas tras la irradiación. Las imágenes de las muestras después de la prueba se pueden observar en Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83 y Figura 84.

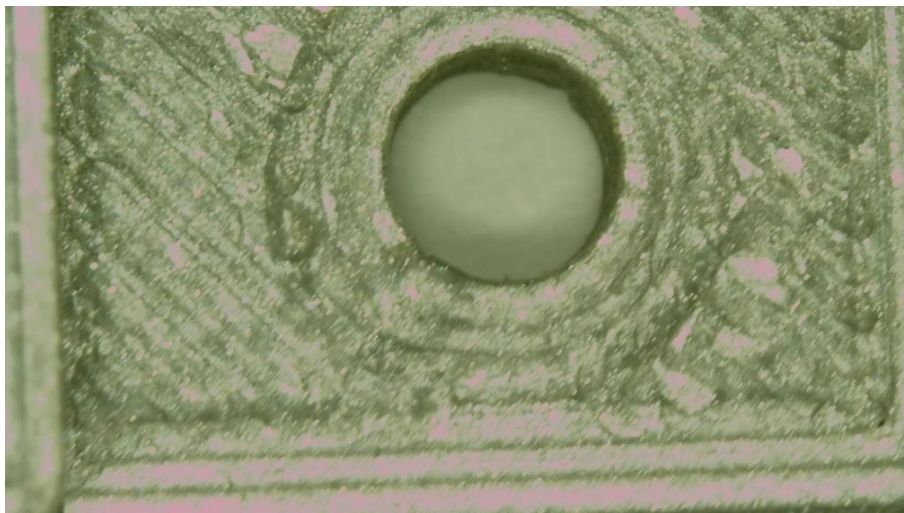


Figura 80. Muestra de material PLA impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.

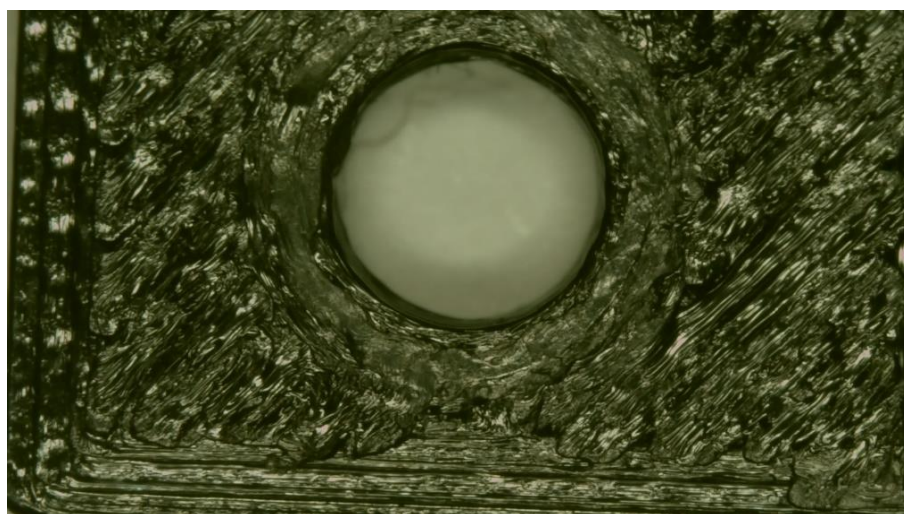


Figura 81. Muestra de material Nylon impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.

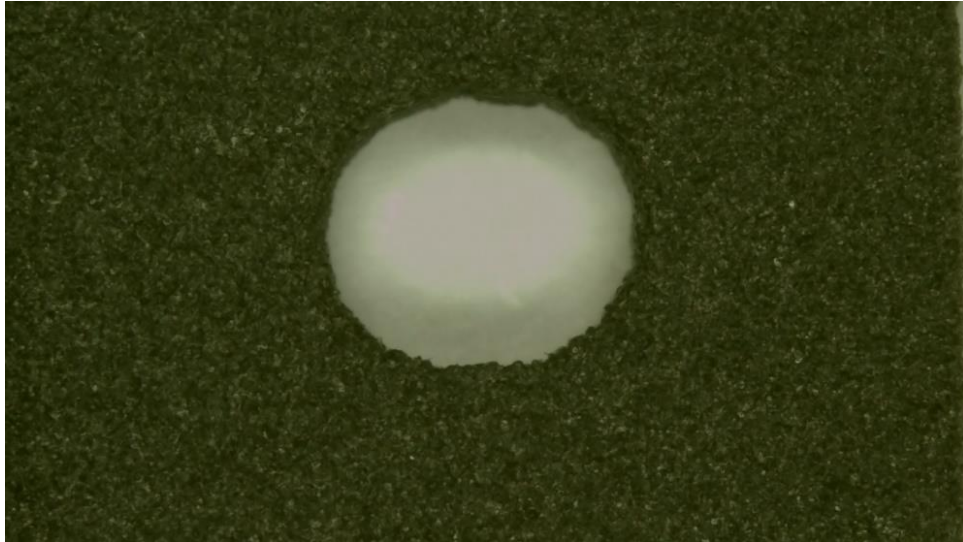


Figura 82. Muestra de material Nylon impreso en 3D SLS tras la prueba de irradiación de 100 Gy.

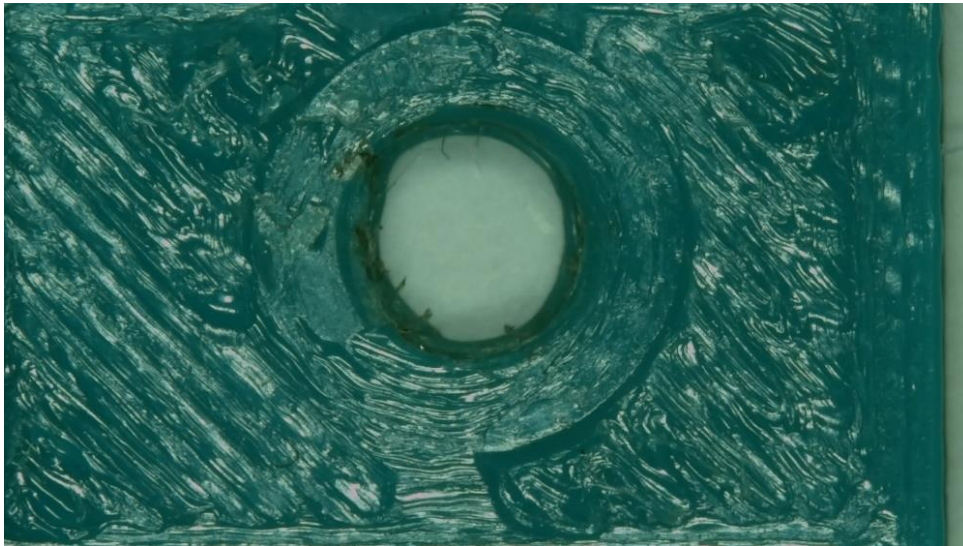


Figura 83. Muestra de material PETG azul impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.

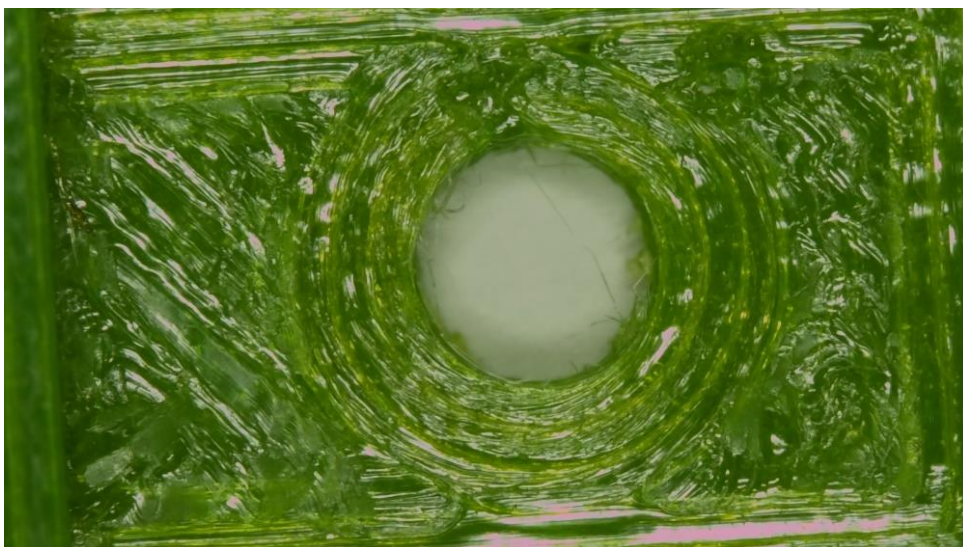


Figura 84. Muestra 2 de material PETG verde impreso en 3D FDM tras la prueba de irradiación de 100 Gy.

Después de la observación de las muestras tras la irradiación, se verifica que los materiales no han sufrido degradación de las propiedades mecánicas. Tanto al tacto como a la vista, las piezas mantienen su integridad física y no han sufrido deformaciones. Como conclusión, se puede afirmar que el uso de cualquiera de estos materiales analizados se puede usar para la fabricación de la pieza diseñada porque, tras una dosis de diez veces la que se espera recibir dentro del detector de partículas, no sufre transformaciones.

Fuera de la aplicación del ensayo para verificar la selección de material de esta pieza en concreto, un estudio más eficaz para poder caracterizar estos materiales sería la realización de probetas y ensayos mecánicos de cada material de impresión 3D antes y después de la irradiación. Además, viendo que a 100 Gy no han sufrido ninguna deformación, lo apropiado sería hacer el ensayo a una dosis mayor para examinar a partir de qué dosis comienza a degradarse. Esto podría desarrollarse como una línea de trabajo futura, no siendo oportuno para el tema relacionado con este trabajo.

4.5.5. Costes y especificaciones de fabricación

Se necesita una pieza fibers support por cada tarjeta OBDT-Theta, lo que equivale a 180 unidades. A esta cantidad inicial se debe sumar un número adicional de piezas que se fabricará como repuesto. Se estableció la cantidad total de piezas a fabricar en 200 unidades.

Con el modelo 3D definido, el material asignado y la cantidad de piezas total, se pidieron ofertas a diferentes empresas. En la solicitud de las ofertas se especificaron los datos que aparecen en la Tabla 13.

Tabla 13. Especificaciones de fabricación para la pieza fibers support.

Descripción de la pieza:	Piezas impresión 3D Fibers support
Dimensiones generales:	77,1 x 75,5 x 2,51 mm
Material:	PETG
Cantidad:	200 unidades
Operaciones a realizar:	Impresión 3D por FDM con cabezal de 0,4 mm y altura de capa 0,25 mm

Se especificó a las empresas que no requerían de una gran precisión dimensional pero sí que era muy importante mantener la altura de 2,51 mm de las palas centrales de la pieza para que cumpliera con su funcionamiento. Algunas de las empresas ofrecían directamente su servicio de impresión SLS para poder cumplir con la especificación dimensional y por el alto número de piezas, ya que con SLS la producción en serie es mucho más rápida. Se recibieron distintos precios por la impresión en SLS con PA12, siendo el más económico 4,6€/pieza y el más caro 12,2€/pieza.

Como se había definido en el diseño, la impresión se quería en FDM para evitar cualquier residuo de polvo y se siguieron solicitando ofertas con las especificaciones mencionadas. Finalmente, se recibieron ofertas de 4,83€/pieza, 4,5€/pieza y 3,95€/pieza. Su fabricación se llevó a cabo con la empresa más económica, tras asegurar que cumplían con los requisitos establecidos mediante el envío previo de prototipos de prueba. Por tanto, los costes finales fueron 3,95€/unidad por 200 unidades, en total, 790€ (IVA no incluido).

4.6. Fiber caps y nuts. Corte y plegado de aluminio.

El objetivo del que se hablará en este apartado era crear un sistema que permitiera fijar los adaptadores MTP al frame de la OBDT-Theta.

Volviendo de nuevo a las conexiones de fibra óptica que se realizan en la OBDT-Theta, los módulos VTRx+ de la tarjeta se conectan con los adaptadores *MTP (MPO) TO MT Optical*, cuya geometría se puede ver en la Figura 85. Se trata de un adaptador de dimensiones generales aproximadas de 25 mm x 13 mm x 23 mm. Cada tarjeta llevará asociados dos adaptadores que necesitan ser alojados junto a esta para poder realizar las conexiones. Por ello, al diseñar el frame se ha facilitado un espacio donde poder fijarlos al soporte.



Figura 85. Imagen de un adaptador MTP (MPO) TO MT Optical. [25]

Estos adaptadores llevan dos ranuras en los laterales para su fijación, por lo que la propia figura marca el diseño de la pieza que deberá alojarlos. Se plantea un sistema con la siguiente configuración: soporte estructural - adaptador - tuerca. Estos componentes serán unidos por dos tornillos (uno en cada ranura) cuya cabeza apoyará en el soporte creado y cuyo cuerpo enroscará en la tuerca.

El diseño de la tuerca se ha realizado sobre una proyección de la geometría del adaptador en un plano vertical. Al realizar la proyección, se marcó el contorno octogonal del adaptador y la ubicación de los agujeros en los que se introducirán los tornillos. A continuación, se realizó un recorte de la parte central rectangular para permitir introducir la tuerca en el adaptador. Este proceso se puede seguir en la Figura 86.

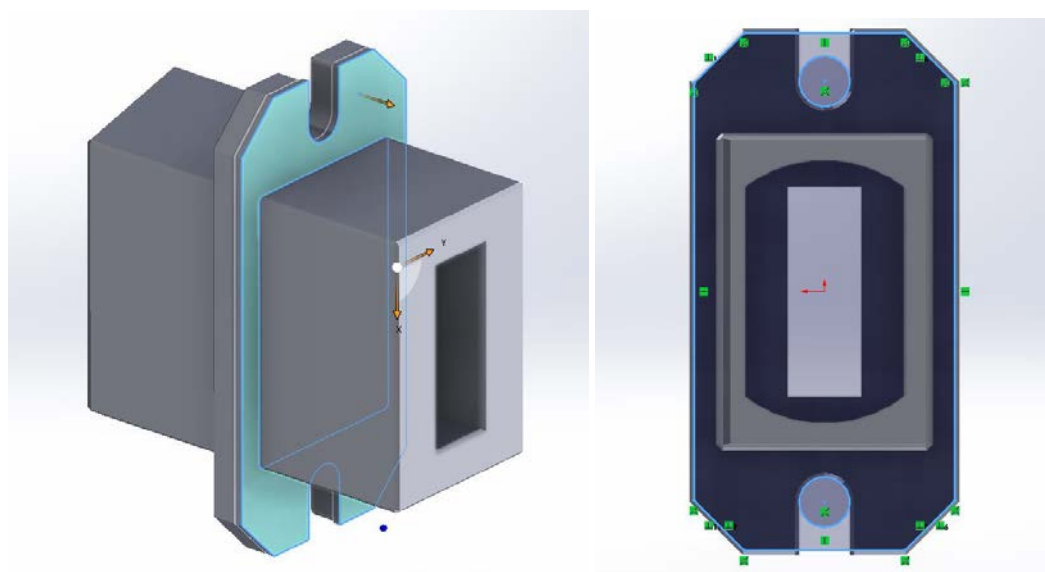


Figura 86. Proceso de diseño de la tuerca para los fiber caps.

A través de una extrusión del contorno mencionado se definió la pieza que actuará como tuerca, denominada como *nut*. La pieza se puede observar en la Figura 87 y los planos se encuentran en el Anexo 5 con la identificación “OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut: 27.00.00.03.08”.

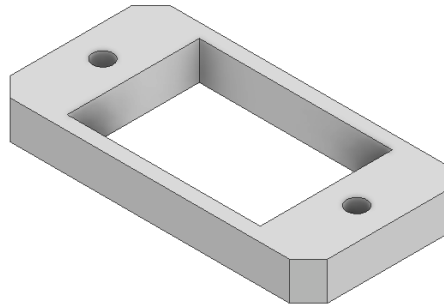


Figura 87. Modelo 3D de la pieza nut que unirá los adaptadores MTP con los fiber caps.

La pieza *nut* se ha fabricado mediante corte por chorro de agua en los talleres del CIEMAT. Se realizó una matriz en el plano XY multiplicando el diseño 400 unidades, por el número total de piezas a fabricar. Partiendo de una plancha de aluminio de 3 mm de espesor se realizó el corte, como se puede observar en la Figura 88 y Figura 89.



Figura 88. Fabricación por corte con chorro de agua de las piezas nut en los talleres del CIEMAT.

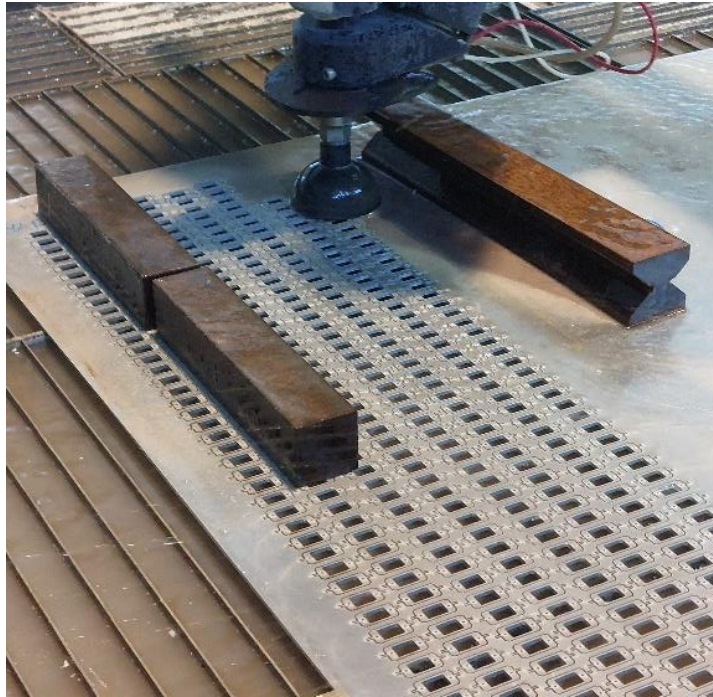


Figura 89. Detalle del corte con chorro de agua de las piezas nut en los talleres del CIEMAT.

Tras el corte, las piezas se pasaron a la sección de ajuste para realizar el taladro roscado en los dos orificios y limpiar las rebabas que pudieran quedar del corte. La especificación para el roscado fue M2-6H a través de toda la pieza.

Para el diseño de los fiber caps se planteó una pieza que permitiera tener una pestaña horizontal de unión con el frame y otra pestaña vertical para sujetar el adaptador MTP. Debido a la delicadeza de la unión del cable de fibra con el adaptador, se procedió a incorporar una pestaña adicional en voladizo que actuaría como protección del cable. Todas las uniones relacionadas con estas piezas se realizan por tornillos que van unidos a taladros roscados, del frame y del nut. Por tanto, para los fiber caps simplemente fue necesario incorporar los agujeros en la ubicación correcta. Se realizó un primer esquema para entender el funcionamiento del sistema y el diseño de la pieza, que se puede observar en la Figura 90.

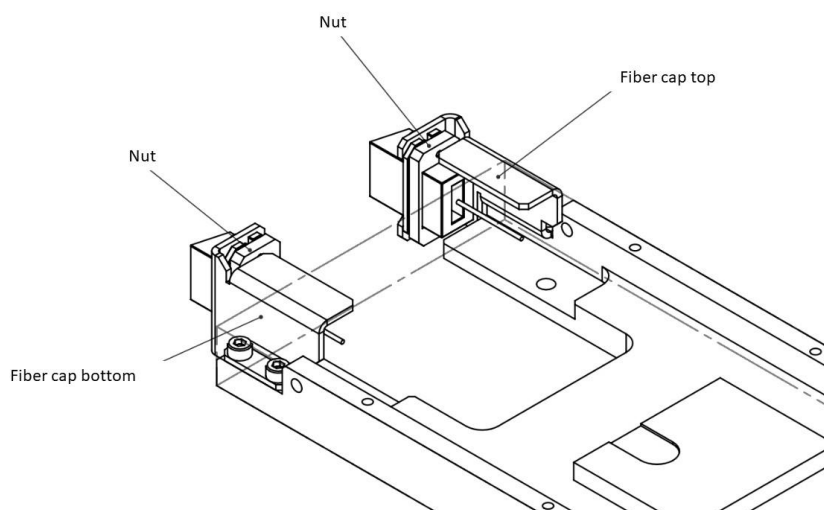


Figura 90. Esquema de unión de los fiber caps, nuts, adaptadores MTP y frame.

Se diseñaron dos fiber caps, uno para cada conexión de fibra, siendo simétricos respecto a un plano intermedio. El método de fabricación establecido para estas piezas es el corte por chorro de agua del desarrollo plano de su geometría, en la misma máquina que se realizaron las nuts mencionadas anteriormente. Una vez cortadas todas las piezas, se pasa a la máquina de plegado de chapa. Estas piezas han sido diseñadas para fabricarse partiendo de chapa de aluminio de 1,5 mm de espesor. El aluminio que se ha especificado para su fabricación es EN AW-5754-H24, aleación de aluminio con magnesio sometido a un proceso de endurecimiento por deformación en frío seguido de un recocido parcial. Este aluminio proporciona las condiciones necesarias para que la chapa se pueda introducir en la máquina de plegado y se deforme sin romperse.

Uno de los cambios posteriores aplicados al diseño de las piezas fiber caps, además de corregir errores dimensionales con la fabricación de prototipos, fue la identificación de cada una de estas. A pesar de que sus diseños son diferentes y no intercambiables, se decidió seguir la filosofía *poka-yoke*, una técnica de calidad de origen japonés que consiste en implementar un sistema de montaje determinado con el fin de evitar errores en el proceso industrial. Con esta idea, se añadió el grabado de una letra en la pestaña superior de cada pieza para identificarlas. En la fiber cap top se incorporó la letra "S", indicando que en esa pieza se producirá la conexión de *Slow Control* de la tarjeta. En la fiber cap bottom se incorporó la letra "T", indicando que en esa pieza se producirá la conexión de *Trigger* de la tarjeta. Estas marcas se incorporaron en los planos de fabricación logrando así que en el mismo proceso de corte de la chapa se realizase el corte de la letra de identificación, sin necesidad de añadir ningún proceso de grabado posterior. En la Figura 91 se puede observar una pieza cortada por chorro de agua con la marca, proceso previo a introducir la pieza en la máquina de plegado para llegar a su geometría final.



Figura 91. Corte de chapa por chorro de agua de las piezas fiber caps previo al plegado en el taller del CIEMAT.

El diseño final de las piezas fiber caps se puede ver en la Figura 92 y los planos de fabricación se pueden encontrar en el Anexo 5 con las referencias “OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top” y “OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom”. El procedimiento de montaje detallado de estas piezas, indicando los tornillos necesarios para el ensamblaje, se desarrollará en el siguiente capítulo de este documento.

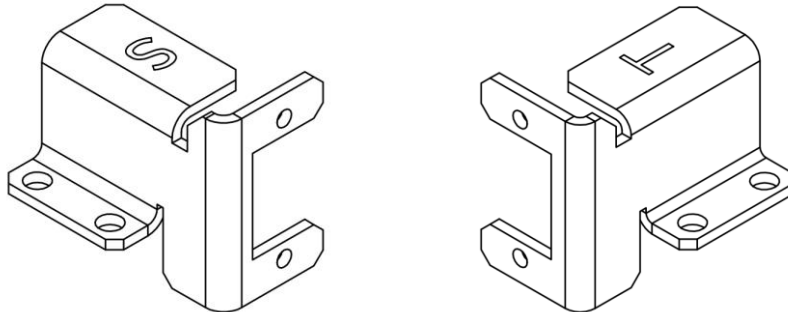


Figura 92. Modelo 3D de las piezas fiber caps. [Imagen extraída de los planos del Anexo 5]

4.7. Cubiertas de protección. Diseño para instalación y transporte de Minicrates.

En este apartado se explica la solución planteada para la protección del Minicrate durante su transporte hasta el CERN e instalación dentro de las cámaras DT, una vez se encuentre completamente ensamblado y con el cableado incorporado.

4.7.1. Planteamiento del problema y propuestas preliminares

Tras el ensamblaje de los componentes electrónicos en la estructura del Minicrate, además de las piezas mecánicas involucradas, se procede a instalar el cableado necesario para el funcionamiento de la parte de lectura y control. Los cables más voluminosos son los de los conectores de FE (*Front-End*, explicados en el apartado 3.3). Estos cables unen las tarjetas OBDT con las tarjetas de FE de las cámaras DT. Para tener una referencia del cableado que se está describiendo, en la Figura 93 se puede ver el sistema de pruebas de un Minicrate legacy con las conexiones de FE.

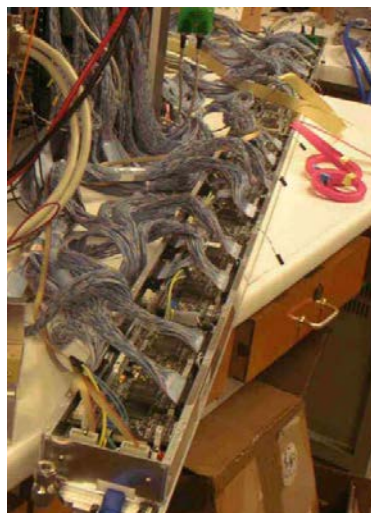


Figura 93. Imagen del sistema de pruebas para validar los Minicrate legacy con los cables de FE incorporados. [1]

En la instalación de los nuevos Minicrates, se reemplazarán los cables de FE que unen las SL-Phi con las OBDT-Phi. En cambio, se mantendrán los cables de FE ya instalados que unen las SL-Theta con la OBDT-Theta. Por lo tanto, los cables que irán incorporados al Minicrate son los cables de FE de las OBDT-Phi. Estos cables reemplazados incorporarán unos conectores más actualizados cuyo diseño es diferente y ocupa un espacio mayor, sobresaliendo por la parte delantera abierta del perfil Minicrate. Se puede observar un prototipo de los nuevos MiC2 en la Figura 94, donde los nuevos cables de FE en color gris se encuentran distribuidos a lo largo del perfil. También se debe tener en cuenta el cable de LV, cable negro de mayor tamaño que se observa en la misma imagen.



Figura 94. Imagen de un prototipo de MiC2 MB1 en SX5 con el cableado incorporado.

Una vez identificado el manojo de cables que lleva asociado el Minicrate, surge la necesidad de crear un sistema que permita proteger, inmovilizar y fijar el cableado al perfil. El ensamblaje de los Minicrates se realizará en distintas ubicaciones, como se ha mostrado anteriormente en la Tabla 1. En las instalaciones de ensamblaje se instalará el cableado del Minicrate, que se debe proteger para que no sufra ninguna modificación durante el transporte hasta la ubicación del detector CMS. Una vez recibido en el Punto 5 de CMS, se deberá bajar hasta la caverna subterránea y proceder a su instalación dentro de cada cámara DT. Este procedimiento no es evidente ya que el hueco donde se instalará el Minicrate está rodeado de cables, por ejemplo, los cables de las conexiones a las cámaras RPC. Al tratarse de un espacio tan obstaculizado, el Minicrate debe estar lo más compacto posible para deslizarse como un único bloque por los huecos que queden libres entre el cableado.

El objetivo de diseño es crear un sistema que permita desarrollar de la manera más favorable posible el transporte y la instalación de los Minicrates, fijando los cables incorporados en el perfil y logrando una estructura compacta fácil de deslizar. Otra de las consideraciones es que este sistema de protección debe ser fácil de quitar una vez se haya instalado el Minicrate dentro de la cámara DT. Para dar solución a este problema se plantearon varias propuestas iniciales.

En un primer escenario se diseñaron unas placas metálicas que se insertarían como tapas en la parte abierta del Minicrate para proteger los componentes electrónicos, un sistema similar se usó para los Minicrates legacy. En el caso de incluir estas tapas, se planteó la idea de realizar ranuras en el centro para atar los manojos de cables con velcro o bridas uniéndolos al perfil, como se muestra en la Figura 95.

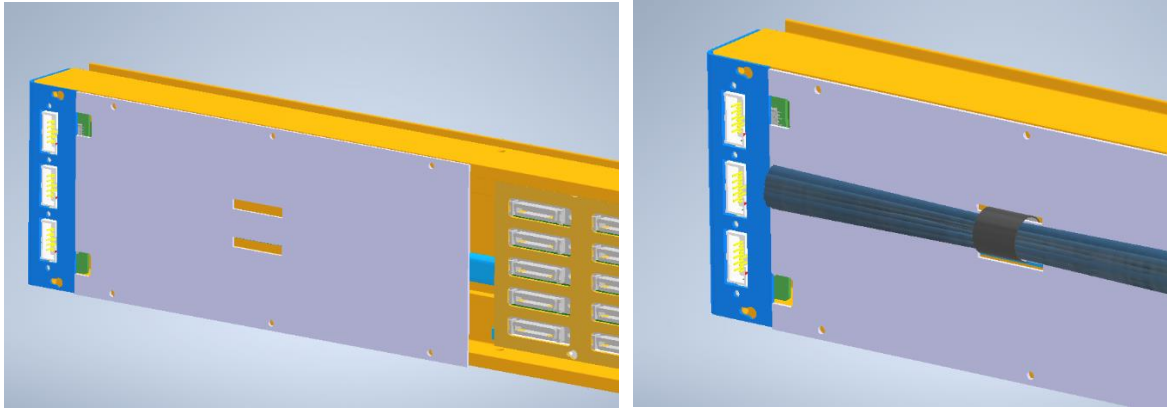


Figura 95. Propuesta de ranuras para unir los cables al Minicrate.

La utilización de estas tapas metálicas generó dudas durante las pruebas de prototipado, ya que los nuevos conectores de FE de las OBDT-Phi ocupaban más espacio y no suponían grandes ventajas. Además, el hecho de tapar el Minicrate dificultaría el acceso a las tarjetas electrónicas internas, haciendo más tediosas las tareas de mantenimiento posteriores a la instalación. Tras descartar esta primera idea, se continuó planteando opciones para diseñar nuevas piezas que solventaran el problema mencionado. Estas piezas se denominarían como “protection covers” por su funcionalidad como cubiertas de protección para los Minicrates.

Una de las ideas preliminares fue usar como cubierta el mismo perfil extruido de aluminio enfrentado al Minicrate ensamblado, cuyo esquema se puede ver en la Figura 96. Esta propuesta surge como aprovechamiento del excedente de perfiles de extrusión de aluminio. El problema que se detectó fue el aumento de peso del ensamblaje, siendo un factor importante el aligeramiento para facilitar la instalación dentro del detector. Otro de los inconvenientes fue la dificultad de fijar un perfil sobre otro de manera que fuera fácil de desinstalar.

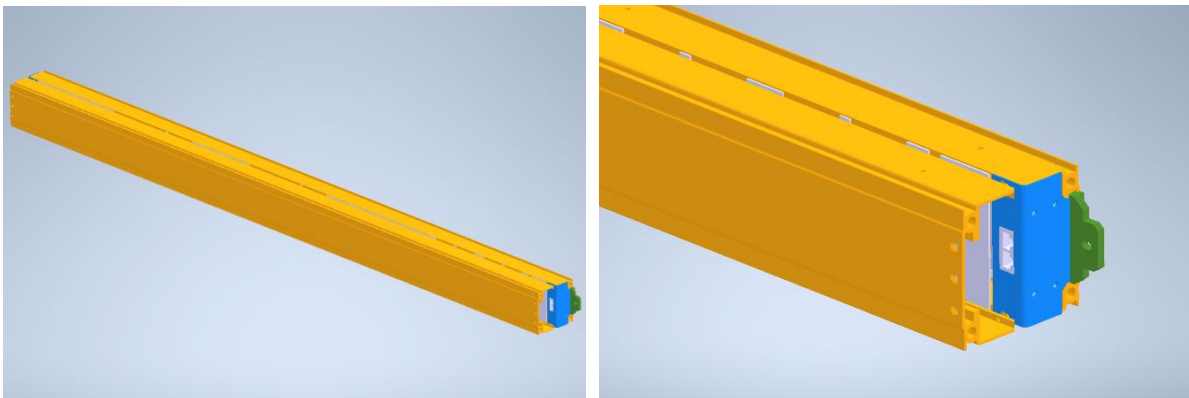


Figura 96. Primera propuesta de diseño de cubiertas de protección usando los mismos perfiles de aluminio del Minicrate.

La segunda propuesta consistió en utilizar piezas de protección de plástico con forma de canalón atornilladas al perfil, como se puede observar en la Figura 97.

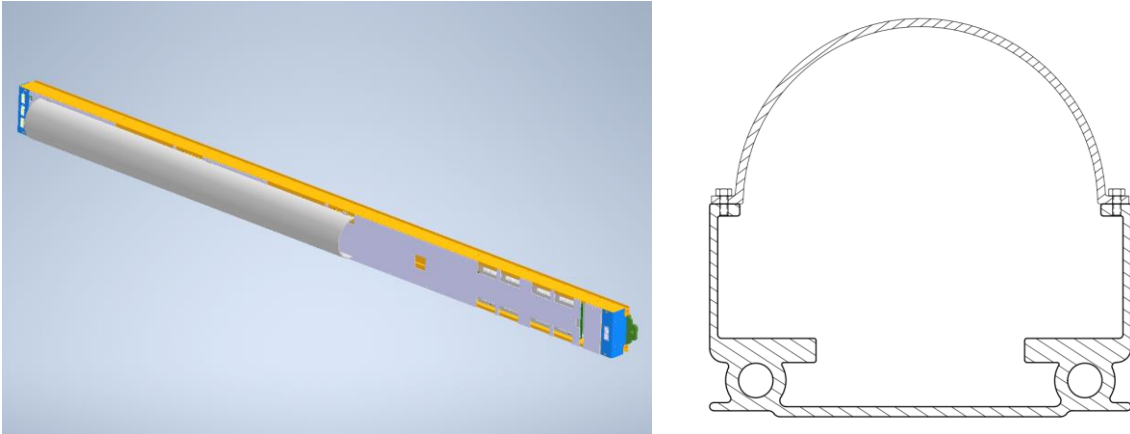


Figura 97. Segunda propuesta de diseño de cubiertas de protección usando una pieza atornillada con forma de canalón.

La idea anterior evolucionó a un sistema muy similar, pero cambiando la forma de unión del canalón al perfil. Como se trata de una pieza de plástico, existe la posibilidad de realizar por extrusión un perfil cuya forma se ajuste al Minicrate. La idea es aprovechar las propiedades flexibles del material sin usar tornillos, facilitando el desmontaje. Esta propuesta se puede observar en la Figura 98.

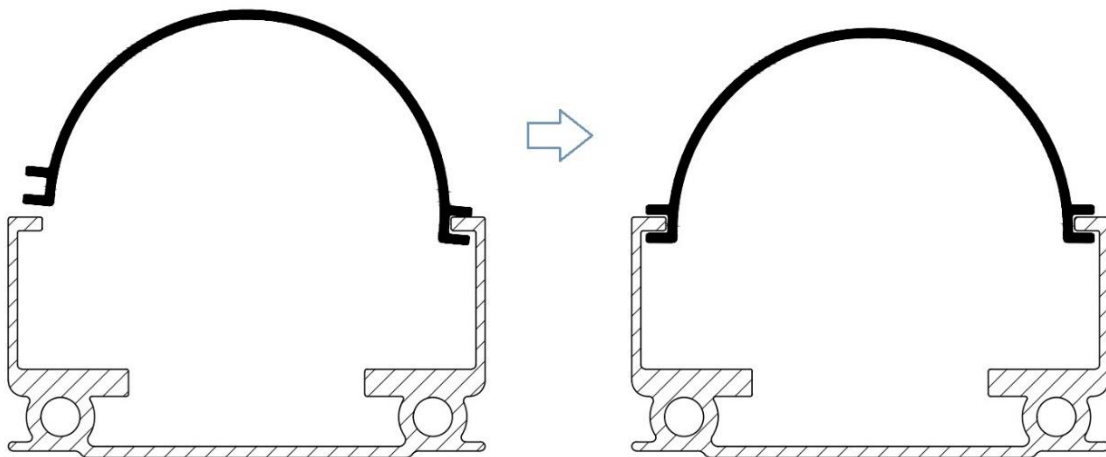


Figura 98. Tercera propuesta de diseño de cubiertas de protección usando una pieza con forma de canalón sin atornillar.

Siguiendo con la idea de utilizar las propiedades del material flexible, surgió la opción de sujetar la protección en el exterior del perfil, como se ve en la Figura 99. Esta idea fue descartada porque la protección no puede sobresalir por los laterales del Minicrate durante la instalación en la cámara DT, solo puede sobresalir por la parte superior donde está el cableado y, aun así, habría que evitar que sobresalga lo menos posible.

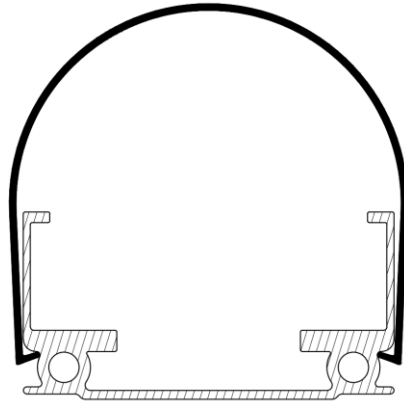


Figura 99. Cuarta propuesta de diseño de cubiertas de protección usando una pieza flexible por el exterior.

Otra de las soluciones planteadas fue usar piezas de plástico, perfiles con forma de U disponibles en el mercado. Estas piezas se podrían comprar con facilidad y se podrían atornillar a las aletas internas del Minicrate, como se muestra en la Figura 100.

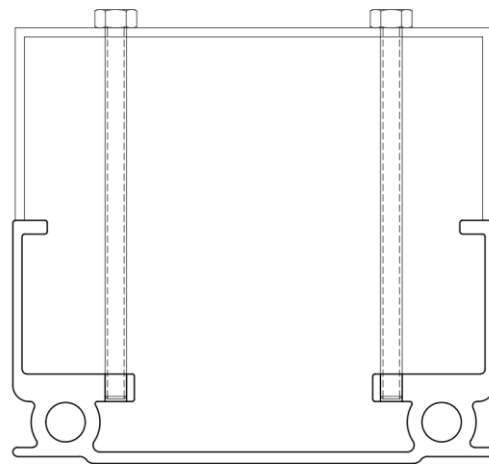
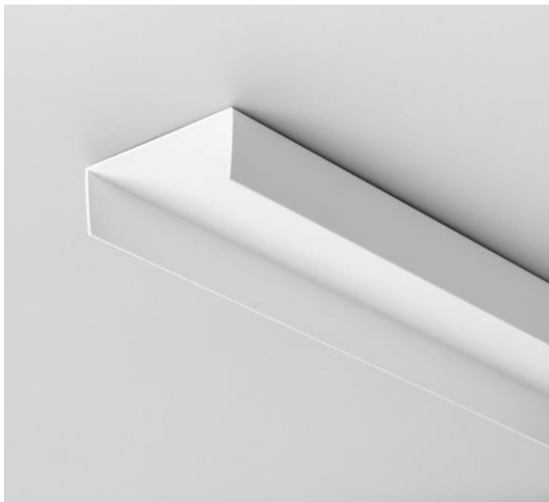


Figura 100. Quinta propuesta de diseño de cubiertas de protección usando un perfil en U atornillado. [A la izquierda, imagen de [35]]

El uso de un perfil de plástico extruido con forma de U resultó llamativo porque daría lugar a un sistema compacto que cubriría completamente el perfil recogiendo los cables y no excedería demasiado de las dimensiones disponibles para la instalación. El problema detectado en la última propuesta era la unión, ya que los tornillos serían demasiado largos para introducir en las aletas internas, además de la complicación que llevaría atornillarlos sin guías ni visión del agujero roscado interno.

Otro de los factores que afectaban al diseño fue la incorporación de un nuevo sistema de fijación para los cables. El sistema de fijación de cables consistía en dos placas metálicas separadas con un espaciador y atornilladas al perfil del Minicrate, como se ve en la Figura 101 y la Figura 102. Estas fijaciones permiten cierta flexibilidad para unir los cables en los puntos que se consideren necesarios ya que los agujeros superiores están distribuidos a lo largo de todo el perfil.

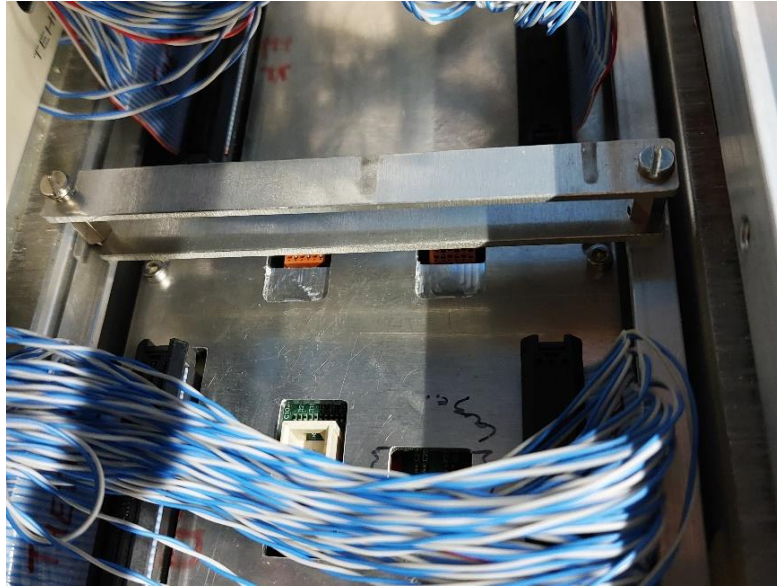


Figura 101. Nuevo sistema de fijación de cables con dos placas y un espaciador para los Minicrates.

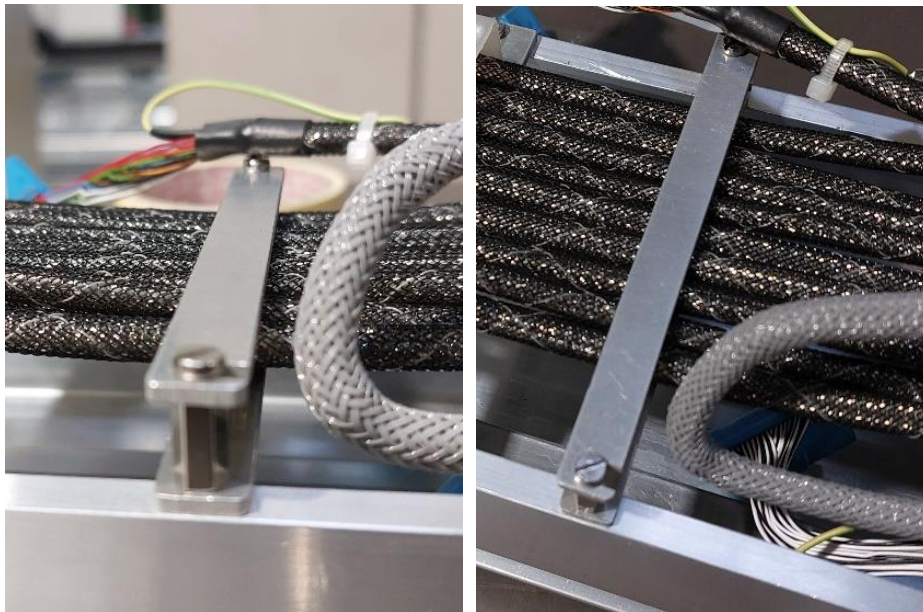


Figura 102. Prototipo del nuevo sistema de fijación de cables para los Minicrates.

Tras los requerimientos de diseño especificados, se continuó buscando una solución relacionada con el uso de perfiles en forma de U cuya unión al perfil fuese compatible con el sistema de fijación de cables.

4.7.2. Prototipado y evolución de la propuesta

Partiendo de una sección del Minicrate con el nuevo sistema de fijación de cables de doble placa con espaciador, se desarrolló un boceto de un sistema de unión que permitiese evitar este obstáculo y asegurar el anclaje de la cubierta al perfil. En la Figura 103 se puede ver el esquema planteado, a la izquierda sin las placas de sujeción de cables y a la derecha con las placas de sujeción incorporadas. Estas piezas permitirían elevar la cubierta para dejar hueco a la sujeción de cables y seguirían actuando como protección del Minicrate.

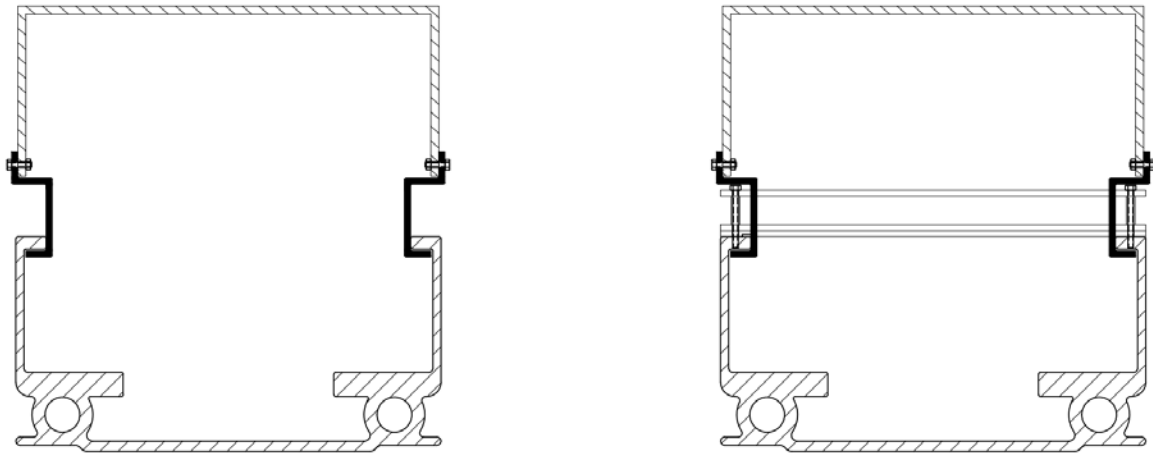


Figura 103. Propuesta de cubiertas de protección compatible con las placas de sujeción de cables del Minicrate.

En un principio la idea fue usar un perfil que cubriera todo el Minicrate y piezas metálicas que sirvieran de unión en determinados puntos, como se puede ver en la Figura 104.

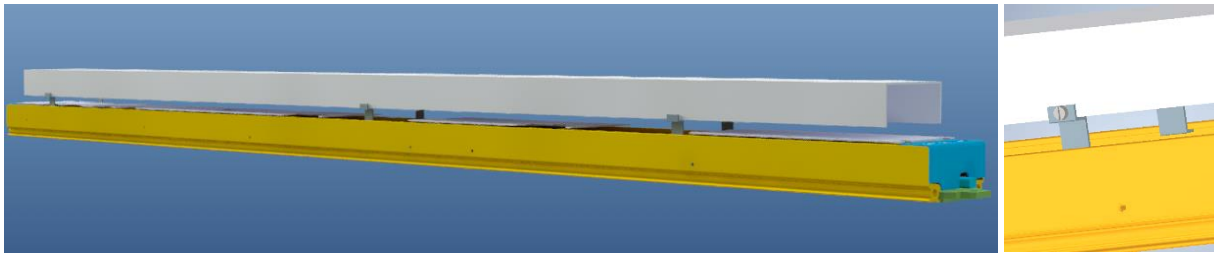


Figura 104. Esquema de una cubierta en U a lo largo de todo el Minicrate con piezas de anclaje.

El problema detectado en la última propuesta era la dificultad de desinstalar la cubierta una vez realizado el montaje del Minicrate. Tener un perfil tan largo complicaba el desmontaje. En consecuencia, la idea evolucionó al uso de varias cubiertas a lo largo del perfil para lograr facilitar la desinstalación. Además, se pensó en realizar cubiertas a diferentes alturas y con diferentes longitudes, permitiendo así tener la cubierta más cerca del perfil en los tramos donde no hubiera fijaciones de cables. De esta manera también se conseguían diferentes disposiciones para poder adaptar la cubierta a cada tipo de Minicrate. Esta idea se materializó con imágenes renderizadas que se pueden observar en la Figura 105 y Figura 106.

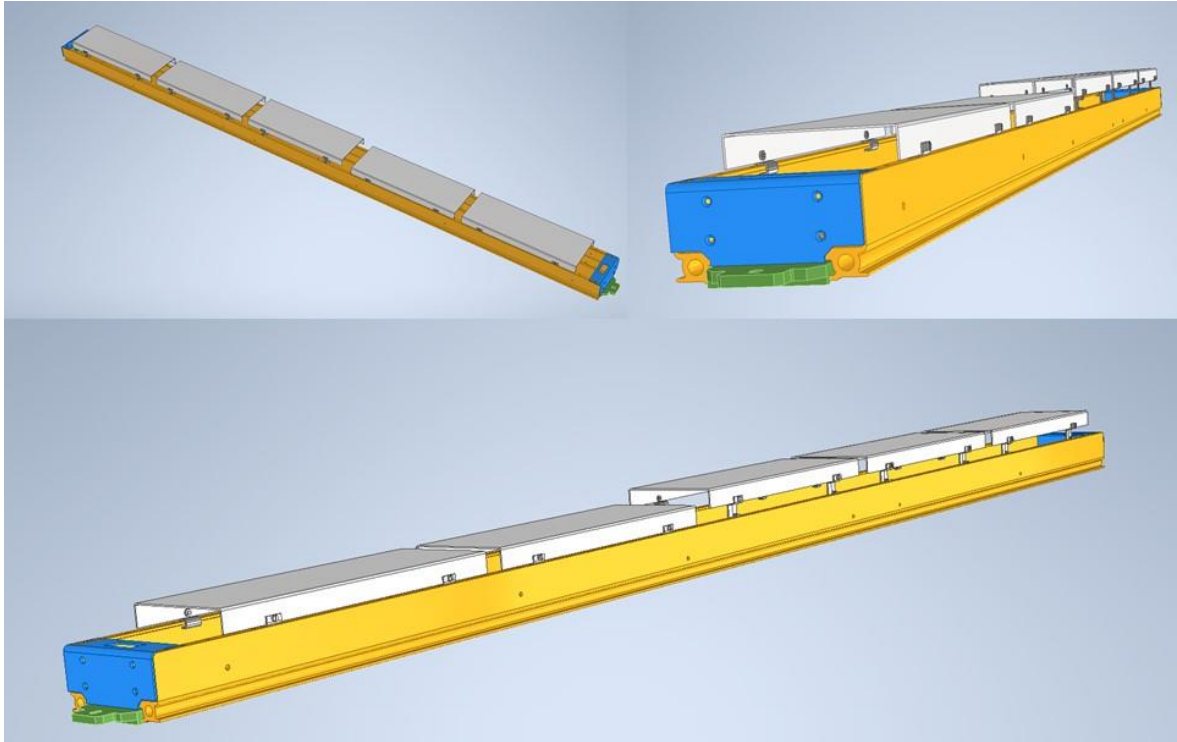


Figura 105. Imágenes renderizadas de varias cubiertas en U a lo largo de todo el Minirate con piezas de anclaje.

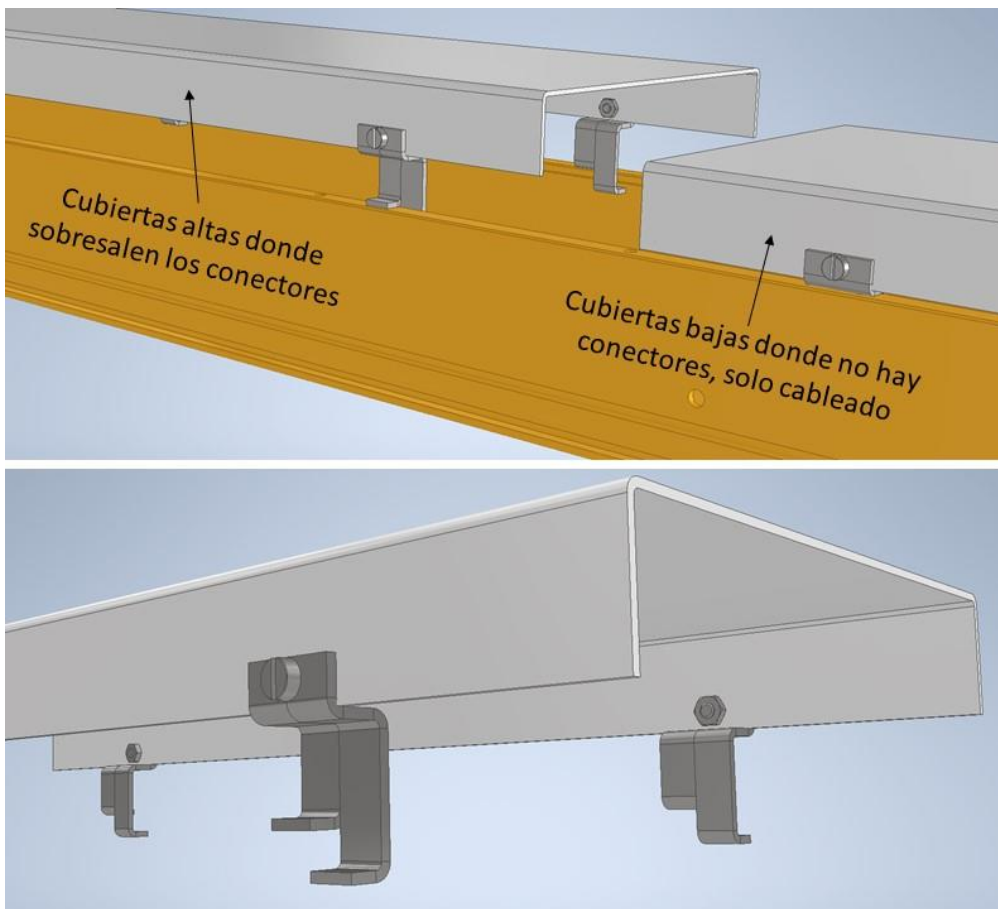


Figura 106. Detalle de la propuesta inicial de las cubiertas en U con las piezas de anclaje a diferentes niveles.

El diseño de las piezas de unión se desarrolló para que su fabricación fuera lo más sencilla posible. La geometría estaba pensada para realizar un corte perimetral en chapa de 1,5 mm y posteriormente un plegado con cuatro líneas de curvado, como se puede observar en la Figura 107.

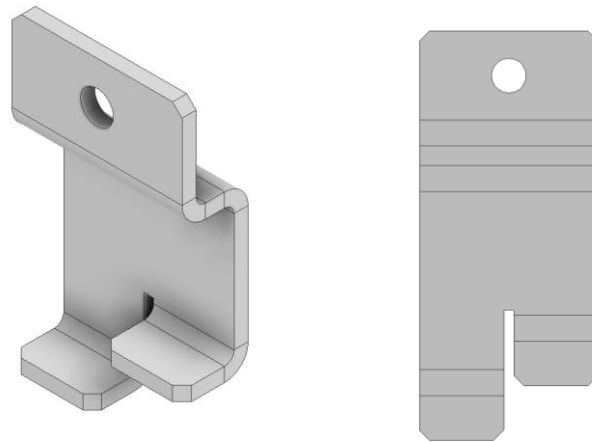


Figura 107. Propuesta inicial de piezas de anclaje cortadas y plegadas para cubiertas de protección. A la izquierda, el modelo 3D; a la derecha, la chapa desplegada.

Para comprobar que el diseño funcionaba correctamente y se ajustaba al perfil del Minicrate, se realizó un prototipo en nylon impreso en 3D con FDM. Este prototipo estaba formado por un perfil en U de 8 cm de largo, cuatro piezas de unión y los tornillos y tuercas correspondientes. Como se puede comprobar en la Figura 108, la pieza se ajustaba adecuadamente al perfil, dejando espacio en la parte superior para los cables y en la parte inferior para las placas de fijación.

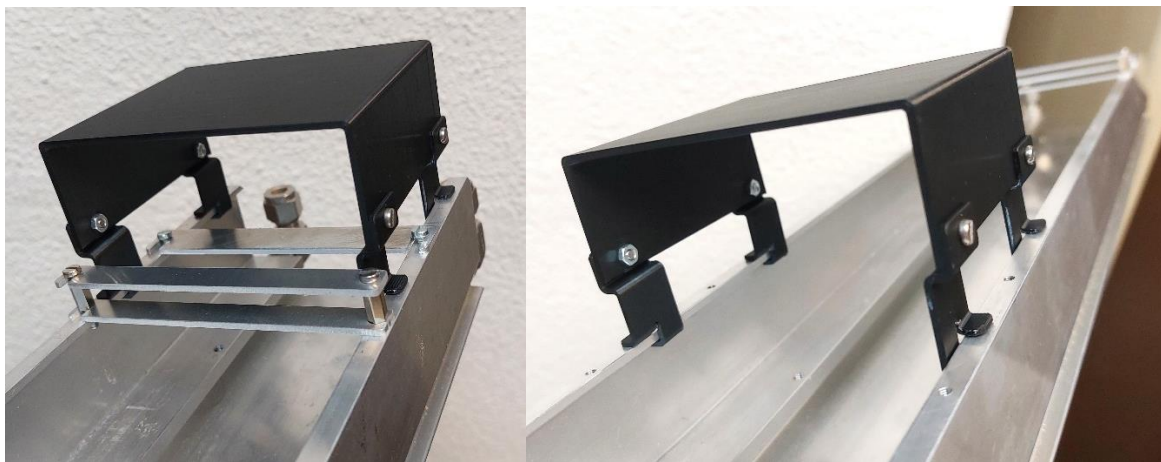


Figura 108. Prototipo de la propuesta de cubiertas de protección impreso en 3D.

4.7.3. Definición de la propuesta final

Se determinó que la opción de hacer cubiertas a diferentes alturas generaría “escalones” que podrían ser un impedimento en la instalación en el detector. Al estar en un entorno rodeado de cables, las cubiertas se deben hacer con el mínimo número posible de “escalones” para que los cables deslicen por encima y no se puedan quedar enganchados en los cambios de altura. Por ello, la idea final consistió en hacer todas las cubiertas a la misma altura, aunque manteniendo la propuesta de utilizar cubiertas de diferentes longitudes a lo largo del perfil.

Para definir la fabricación de las piezas de unión, finalmente se descartó la idea de hacerlas en chapa. Con las piezas de unión en chapa el proceso de fabricación se encarecería y sería más complejo. Puesto que las piezas del prototipo impresas en 3D funcionaban correctamente, se optó por la alternativa de imprimir las piezas en nylon (PA12) en una impresora SLS, consiguiendo así acelerar su producción y abaratar costes manteniendo la funcionalidad. Además, al ser piezas impresas en 3D, el diseño ya no tenía por qué adaptarse a la fabricación de chapa con corte y plegado. Se modificó la geometría mejorando el agarre, como se ve en la Figura 109 y cuyas dimensiones se pueden comprobar en Figura 110. No se han realizado planos de fabricación de esta pieza porque no son necesarios para el procesamiento digital ya que se elaborará con impresión 3D.

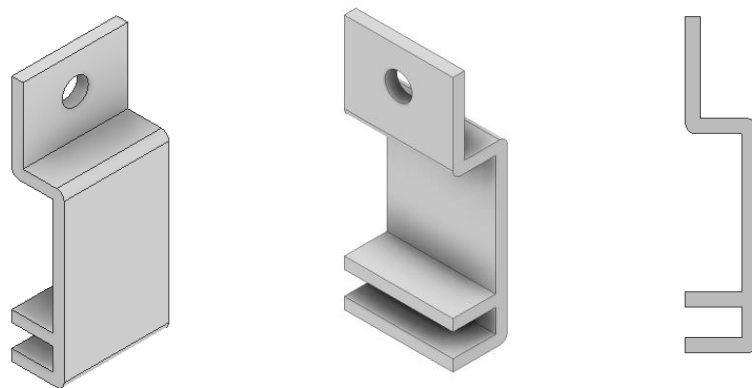


Figura 109. Vistas de las piezas de anclaje de las cubiertas de protección para los Minicrates.

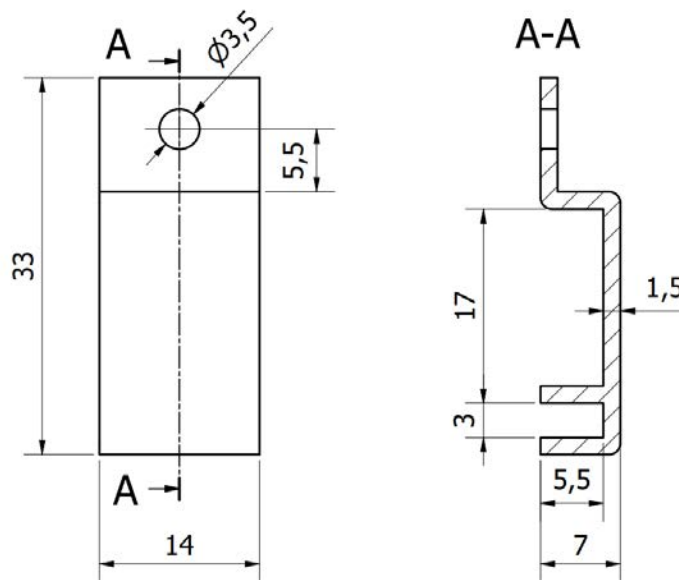


Figura 110. Dimensiones en mm de las piezas de anclaje de las cubiertas de protección para los Minicrates.

En la Figura 111 se puede ver un prototipo de las piezas impresas en 3D por SLS en PA12. Con este prototipo se comprobó el ajuste de las piezas con la solapa del perfil de aluminio. Para que el sistema funcione, la geometría debe actuar como una pinza presionando y evitando su desplazamiento a lo largo del perfil.



Figura 111. Prototipo en PA12 impreso en SLS de piezas de anclaje de las cubiertas de protección para los Minicrates.

Con el objetivo de verificar finalmente el diseño, también se realizaron prototipos de las cubiertas en U en chapa de aluminio. Estos prototipos se diseñaron con una longitud de 40 cm y su plano se puede encontrar en el Anexo 5 con la referencia “27.00.00.05.00-A_Prot40cm”. Se lanzó la fabricación de 10 unidades realizando el corte en chapa de espesor 0,8 mm para conseguir que la cubierta tuviera cierta flexibilidad, simulando el comportamiento que tendrían las piezas definitivas, que serían de plástico. En la Figura 112 se puede ver una imagen de los prototipos de cubiertas en chapa fabricados en el CIEMAT.

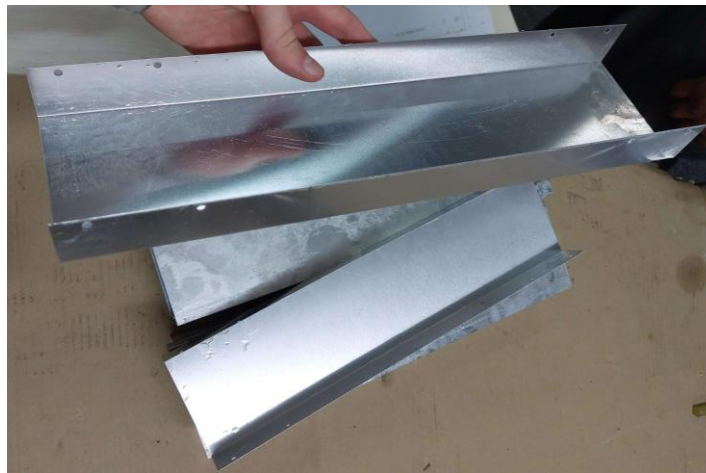


Figura 112. Prototipo de cubiertas de protección de 40 cm de longitud realizado en chapa.

Estos prototipos de cubiertas de protección se llevaron al CERN para realizar pruebas de instalación en las cámaras DT. Cuando el detector está en funcionamiento no se tiene acceso a la caverna, por ello se aprovecha durante las paradas del detector para realizar pruebas de instalación. En este caso, las pruebas se realizaron durante el periodo de EYETS23-24¹⁰ entre los meses de noviembre y diciembre de 2023. Durante estas fechas estaba abierto el detector CMS y por tanto se disponía de acceso a las cámaras de deriva y a su electrónica.

¹⁰ La expresión EYETS23-24 se utiliza en el CERN para referirse a la parada técnica anual del acelerador, cuyas siglas se corresponden con *Extended Year-End Technical Stop*.

En este proceso de pruebas, se llevó a cabo la preparación y el ensamblaje de los nuevos Minicrates MiC2 en la zona de SXA5 del Punto 5 donde está ubicado el experimento CMS. En la Figura 113 se puede comprobar cómo se realizó la preparación de un MiC2 en SXA5 añadiendo los prototipos en chapa de cubiertas de protección fabricados en el CIEMAT.

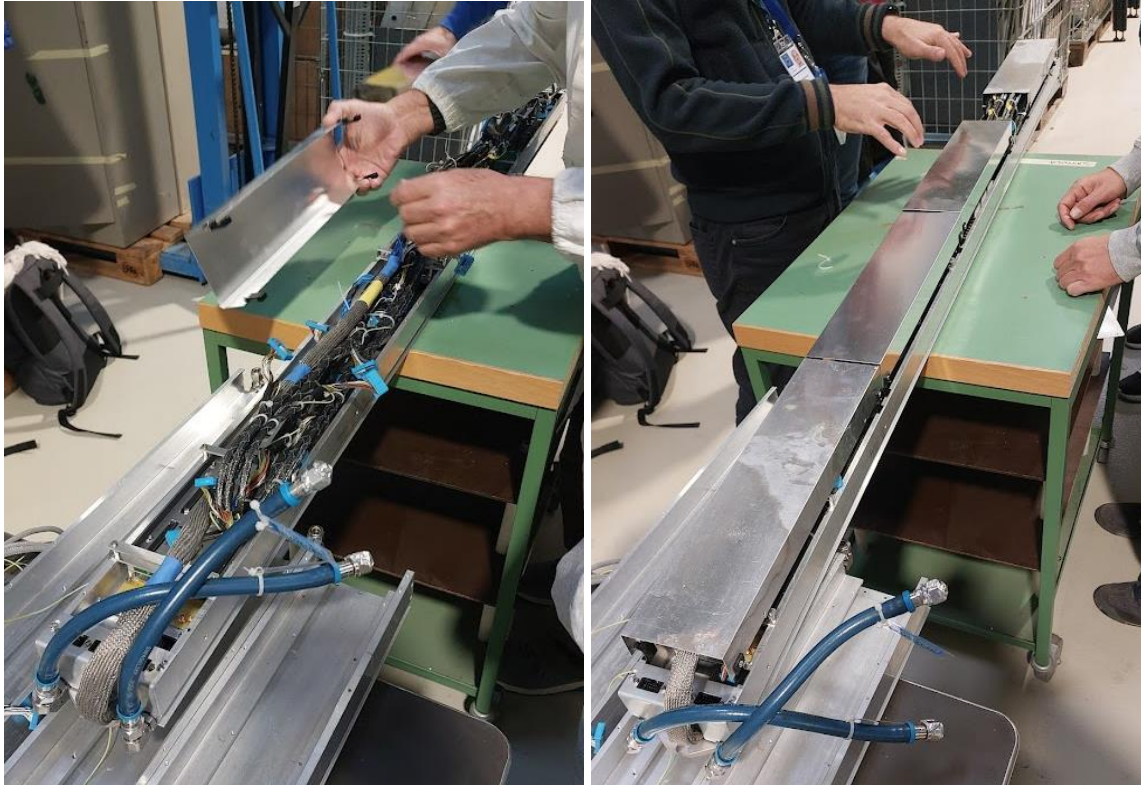


Figura 113. Preparación de un MiC2 con los prototipos de cubiertas de protección en las pruebas de instalación realizadas durante EYETS23-24.

En la Figura 114 se observa un detalle del ensamblaje de las cubiertas de protección en los MiC2. Tanto las chapas metálicas como las piezas impresas en 3D se ajustaban correctamente a la geometría del Minicrate, permitiendo alojar en su interior los cables.

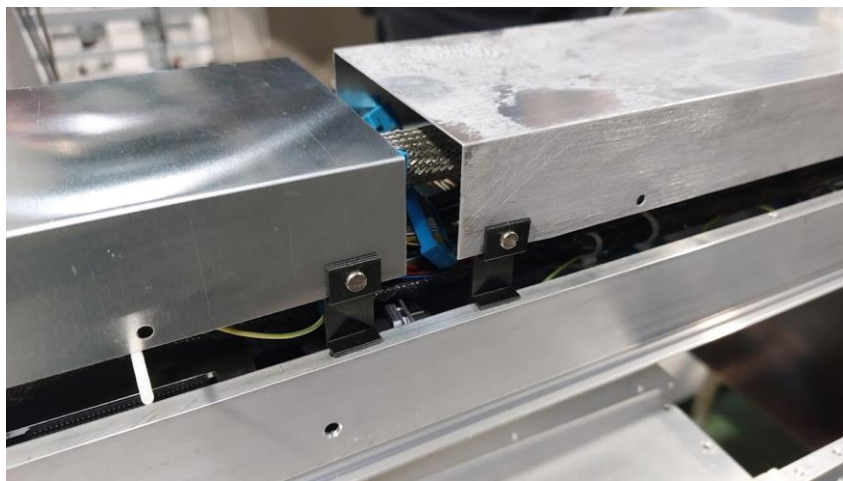


Figura 114. Detalle de un MiC2 con los prototipos de cubiertas de protección en las pruebas de instalación realizadas durante EYETS23-24.

Se realizó una simulación del procedimiento real de instalación de los nuevos MiC2 en las cámaras de deriva del detector. El primer paso del proceso es la desinstalación del antiguo Minicrate legacy de la cámara DT. Una vez realizadas todas las desconexiones necesarias de cables, refrigeración y gas, se procede a instalar el nuevo MiC2. En la Figura 115 se puede observar el proceso de inserción del MiC2 en la cámara. En este caso, se ha metido el Minicrate deslizándolo desde la parte inferior. La instalación requiere de mínimo dos personas para sujetar el Minicrate y poder posicionarlo correctamente. Esta instalación se realiza desde una plataforma elevadora para poder alcanzar la altura a la que se encuentra la cámara, por lo que realmente harían falta tres personas ya que una de ellas se debe encargar del manejo de la plataforma elevadora. En la Figura 116 se puede comprobar la cantidad de conexiones que se encuentran obstaculizando el acceso a la cámara DT y que quedan por delante del Minicrate una vez instalado.

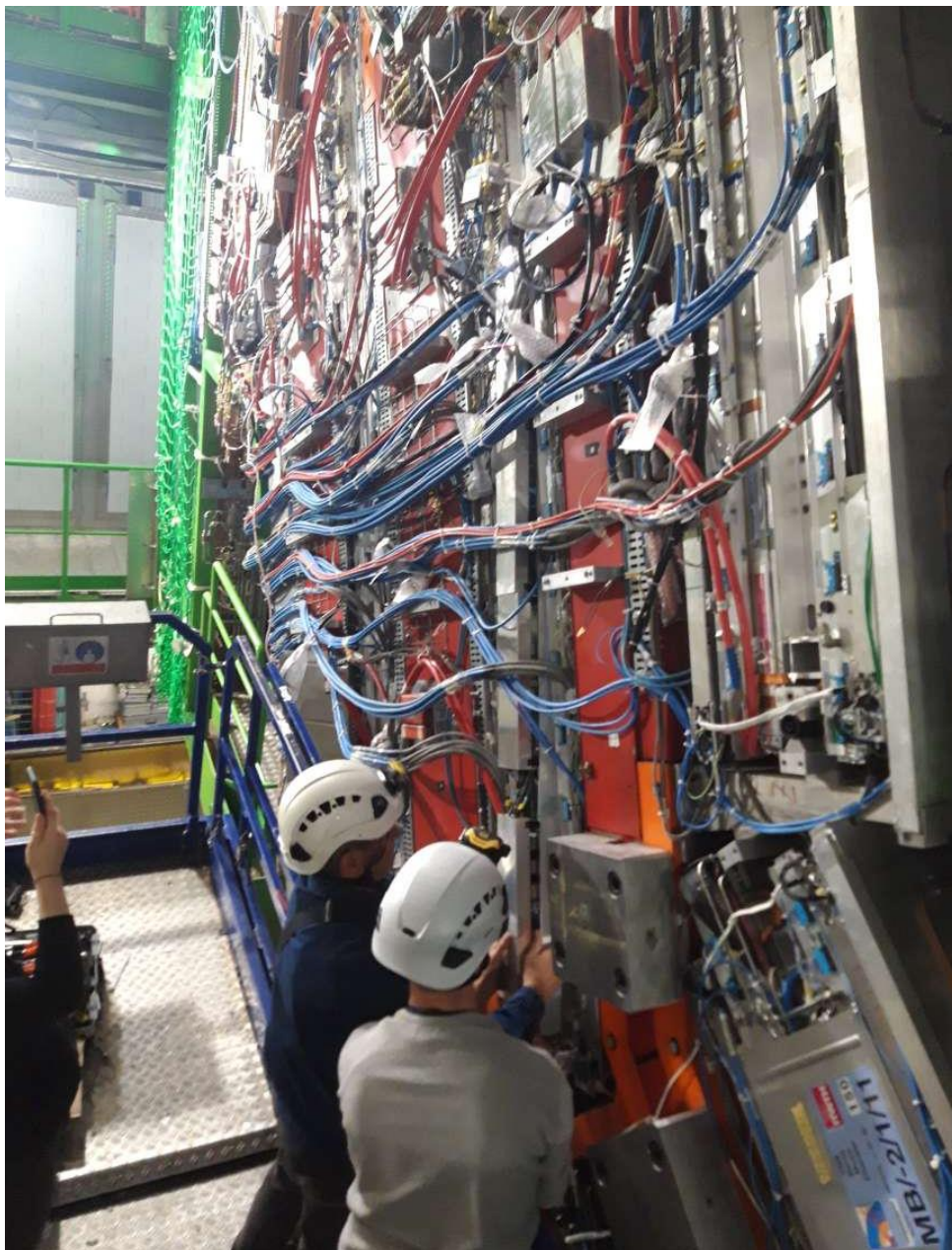


Figura 115. Prueba de instalación de un MiC2 en una cámara de deriva durante EYETS23-24.

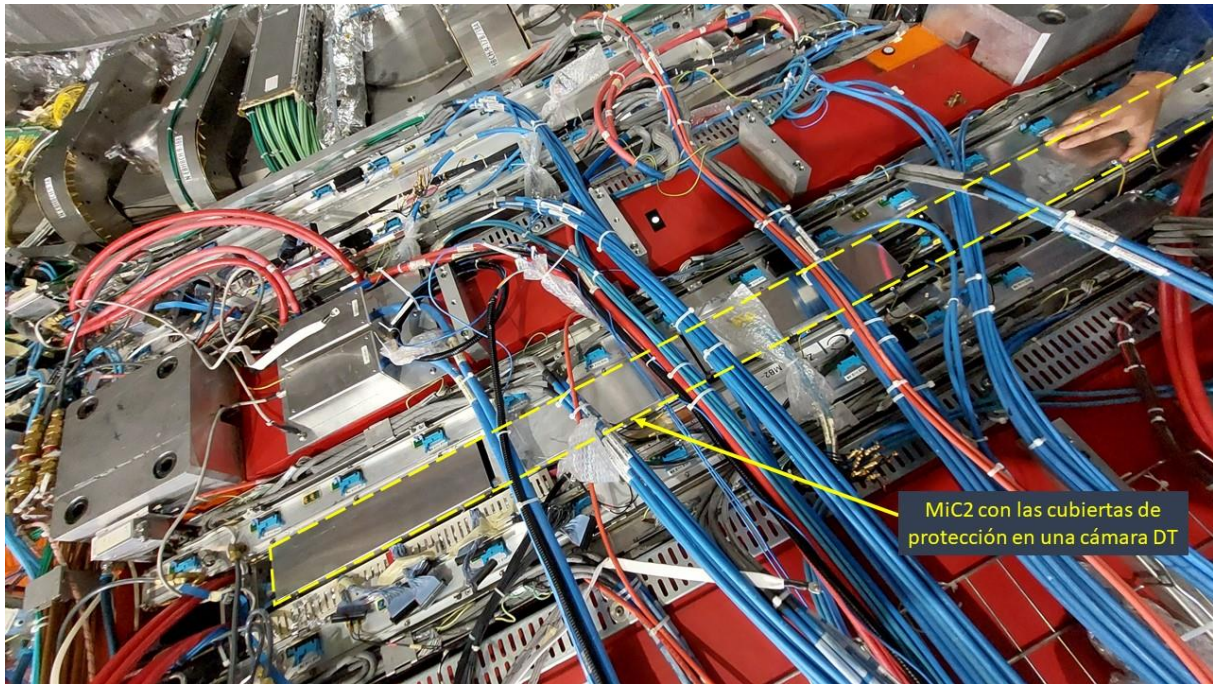


Figura 116. MiC2 instalado en una cámara de deriva con las cubiertas de protección durante EYETS23-24.

Durante este proceso se comprobó que las cubiertas de protección funcionaban correctamente y cumplían su cometido permitiendo tener un bloque compacto y protegiendo los cables en su interior. No obstante, se tomaron nota de ciertas mejoras. Una de ellas fue la falta de puntos de anclaje para sujetar el Minicrate durante la instalación, lo que generó la idea de incorporar mangos en el Minicrate para poder agarrarlo con las manos. También se detectó que durante el deslizamiento de los Minicrates en la instalación se adentraban cables en los saltos entre las cubiertas. Esto podía provocar que se interrumpiera el deslizamiento del Minicrate o el propio desprendimiento de las cubiertas. Se pensó que una solución podría ser la incorporación de cinta adhesiva uniendo unas cubiertas con otras y evitando ese hueco intermedio, como en la Figura 117.



Figura 117. Recubrimiento con cinta de los saltos entre cubiertas de protección.

Tras definir el diseño de varios componentes involucrados en el ensamblaje de la nueva electrónica, este capítulo concluye presentando el método desarrollado para proteger el sistema durante el transporte e instalación. Una vez que se han expuesto con detalle los diseños y procesos de fabricación de las piezas correspondientes, el siguiente tema a tratar en este trabajo se centrará en el ensamblaje de dichos componentes.

Capítulo 5. Diseño del procedimiento de montaje

La actualización de la electrónica frontal de las cámaras de deriva lleva asociada un largo procedimiento de montaje que se distribuirá en años de trabajo entre las distintas instituciones involucradas. Se trata de una tarea muy extensa que incorpora ensamblajes mecánicos, montaje de componentes electrónicos y conexiones entre ellos, puesta en funcionamiento, diseño y construcción de los sistemas de pruebas en cada laboratorio, a lo que sigue una amplia lista de labores implicadas. En este capítulo se desarrollará el procedimiento de montaje que se llevará a cabo en el CIEMAT, centrado en el montaje de las tarjetas OBDT-Theta y en el montaje y verificación del circuito de refrigeración de los Minicrates.

5.1. Evaluación de requerimientos

Como cualquier centro de montaje, el proceso comienza por la realización de un estudio de los requerimientos, los recursos disponibles y los trabajos a realizar, previamente a comprometerse como responsable de las tareas. El CIEMAT fue responsable de una parte de la fabricación de las cámaras DT, esto supone una ventaja ya que tras esa práctica cuenta con experiencia e instalaciones relacionadas.

En primer lugar, se analizaron las infraestructuras disponibles para llevar a cabo la colaboración. La División de física de partículas del CIEMAT cuenta con espacios en las instalaciones de CIEMAT-Moncloa. Para el desarrollo de las tareas de ensamblaje se disponía de un laboratorio de electrónica en el edificio 22 y una zona del edificio 75, nave industrial que se usó previamente para el montaje de las cámaras DT.

En cuanto a mano de obra, para este montaje se cuenta con el personal técnico de apoyo de la división y la ayuda de los colaboradores en el proyecto. Por tanto, se tenía a operarios experimentados y formados en la utilización de las herramientas necesarias.

En relación con los medios y herramientas, al ser un centro de investigación con amplia experiencia, se tienen útiles especializados para el montaje. No obstante, no solo cuenta los medios que ya se tienen sino también los medios que se pueden conseguir. Los presupuestos anuales del centro dotan de cierto dinero para aumentar el inventario de instrumentación en caso necesario.

Verificando que era factible llevar a cabo el montaje, se especificaron las tareas de las que el CIEMAT formaría parte, como se ha mencionado en el apartado 4.1.2.

5.2. Puestos de trabajo y herramientas necesarias

La mayor parte del montaje de los Minicrates se llevará a cabo en el edificio 75 del CIEMAT. Se trata de una nave industrial con espacio suficiente para desarrollar las tareas que se tienen previstas. Cuenta con infraestructura eléctrica y de iluminación, además de ventilación y climatización. Aunque no se necesitarán grandes cargas, el suelo está preparado para ser resistente al uso de maquinaria pesada. Tiene un puente grúa que permitirá la manipulación de cargas y el movimiento de los medios necesarios para acondicionar el espacio. Considerando la conectividad tecnológica para los operarios, está habilitada con Wifi para su acceso a internet con los equipos que se dispongan. Cada cadena de montaje requiere unas especificaciones, pero, en este caso, con las características generales de la nave

se aseguró que se podía realizar el ensamblaje. Una vez que se habían asegurado los medios, se procedió a la organización del espacio. En la Figura 118 se puede observar la zona de la nave en la que se tenía pensado realizar el montaje de los Minicrates, previamente al comienzo de las tareas.



Figura 118. Zona del edificio 75 del CIEMAT previamente al montaje de los Minicrates.

Se elaboró una propuesta de distribución en planta en la nave con los puestos de trabajo necesarios para el ensamblaje. Se realizó un boceto con la propuesta sobre el plano del edificio 75, como se puede ver en el Anexo 8 y una imagen del detalle en la Figura 119.

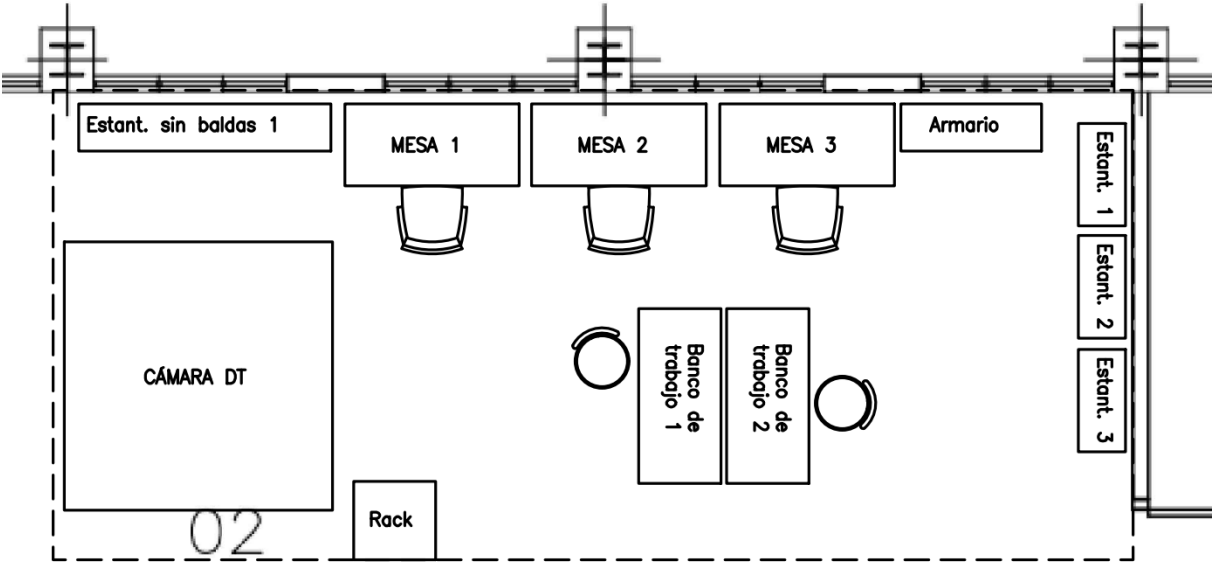


Figura 119. Propuesta de distribución del espacio para el montaje de Minicrates en el CIEMAT. [Imagen detalle del plano del Anexo 8]

En la distribución se fijaron dos puestos de trabajo fundamentales dedicados a la limpieza y el ensamblaje de la parte mecánica. Para estas actividades se establecieron dos bancos de trabajo enfrentados en mitad de la zona central, con el objetivo de facilitar espacio suficiente para manipular el material y tener acceso al banco de trabajo en 360 grados, por todo su alrededor, sin una pared limitante. Se incorporaron tres mesas en frente de la pared para desarrollar en ellas los trabajos más delicados y limpios como los montajes de la electrónica, separados de la zona de tareas mecánicas que generan más suciedad. Se estiman dos puestos de trabajo para la electrónica, lo que se traduce en dos mesas, pero se añadió una tercera para habilitar otro puesto de trabajo en el que se pudiera tener un ordenador.

En esta misma zona se añadieron estanterías para el almacenaje de material y una estantería sin baldas con brazos de sujeción para situar los perfiles de aluminio. El armario se destinaría a guardar material más delicado y tendría puertas que se podrían cerrar con llave.

A la izquierda de la zona de trabajo se encontraría la cámara DT y el rack para situar la electrónica asociada. El objetivo es crear un sistema de validación de las tarjetas OBDT-Theta y probarlas una a una para verificar tanto su integración como su correcto funcionamiento en la cámara DT.

La distribución en planta incluye los espacios necesarios para el movimiento del material y su almacenamiento. El objetivo de la distribución es establecer una localización de puestos de trabajo y equipos que permita reducir los costes de fabricación y, a su vez, proporcione seguridad y satisfacción del personal. Se ha procurado que con esta ubicación las distancias para movimiento de material y personal sean mínimas, evitando las actividades de transporte que no añaden valor, pero a la vez dando flexibilidad para adaptarse a los cambios que se puedan producir o las actividades imprevistas.

De esta forma, se tendría asegurada la línea de ensamblaje utilizando las estanterías para el almacenamiento previo, los bancos de trabajo centrales como primera estación para la limpieza de las partes mecánicas y montaje del sistema de refrigeración, las mesas para el segundo proceso de ensamblaje de la electrónica y la última estación de puesta en funcionamiento en la cámara DT. El almacenaje de producto acabado se realizaría en la estantería sin baldas con brazos de sujeción.

Una vez distribuido el espacio, se elaboró una lista de herramientas necesarias para equipar la zona de trabajo en relación con las tareas que se desarrollarían en ella. Entre otras herramientas, la lista consistía en los siguientes elementos:

- Almohadillas de lijado de fibra sintética y grano grueso (para la limpieza de los perfiles de aluminio)
- Juego de llaves hexagonales en L de métrica entre 1.5 y 10 mm
- Hoja de desbarbado (para quitar rebabas)
- Juego de avellanadores cónicos a 90°
- Juego de brocas helicoidales de 25 piezas de 1 a 13 mm
- Tijeras de uso general con hoja de acero inoxidable
- Juego de llaves fijas de 8 piezas
- Juego de destornilladores estándar de punta hexagonal
- Juego de destornilladores de precisión de punta Phillips y ranurada
- Alicates universales de ángulo recto

- Alicates de corte lateral
- Trapos para limpieza
- Acetona para la limpieza de los perfiles
- Cinta métrica

Con la distribución del espacio establecida y las herramientas mencionadas, los puestos de trabajo estarían disponibles para el comienzo del montaje.

5.3. Descripción de la secuencia de montaje

Entendiendo la secuencia de montaje como una sucesión de pasos que se deben seguir para ensamblar un producto, para la actualización de la electrónica de las cámaras DT se desarrollarán múltiples procedimientos de montaje de manera paralela. Por este motivo, es importante marcar la diferencia entre los distintos montajes que se llevarán a cabo, ya que ningún manual recogerá la información de ensamblaje completa para esta actualización, entre otros motivos, por la extensión y dificultad de comprensión que llevaría el documento. En consecuencia, no se establecerá un solo manual de montaje ni tampoco una misma secuencia, se distribuirá en los procedimientos de montaje atribuidos a las tareas en cada lugar de trabajo.

En este documento se establecerán dos procedimientos de montaje diferentes relacionados en todo momento con las tareas de ensamblaje que se desarrollarán en el CIEMAT, en los cuales intervienen las piezas cuyo diseño y fabricación se ha descrito en el Capítulo 4.

Una de las secuencias de montaje descritas será el ensamblaje de la tarjeta OBDT-Theta y su estructura mecánica. Para ello, se ha definido el proceso de montaje que precisan los componentes electrónicos y se han incorporado modificaciones tras evaluar los requerimientos que han ido surgiendo durante los prototipos realizados en el laboratorio. Siguiendo la secuencia de montaje establecida se conseguirá tener la tarjeta lista para las pruebas de verificación de la electrónica y su posterior instalación en el detector. Para recoger la información relacionada con el montaje se ha creado un manual que se puede ver en el Anexo 9 y cuyo diseño se describe en detalle en el apartado 5.4.

Por otro lado, se desarrollará el montaje del sistema de refrigeración del Minicrate, además de su test de validación. En este procedimiento se establecerán las normas a seguir para que el sistema de refrigeración funcione correctamente en el Minicrate, evitando cualquier tipo de fugas en el circuito. Para elaborarlo se han seguido las pautas de recomendación propuestas por los fabricantes de las piezas involucradas y se han ido incorporando las mejoras necesarias previstas sobre los prototipos realizados en los laboratorios del CIEMAT. Siguiendo esta secuencia de montaje, el Minicrate estará listo para instalar los componentes electrónicos en su interior y poder ser unido al sistema de refrigeración de las cámaras DT. En el Anexo 11 se puede ver el manual creado para recoger la información del montaje y en el apartado 5.5 se encuentra la descripción en detalle del manual.

5.4. Diseño del manual de montaje de la OBDT-Theta

En este apartado se hablará en detalle del proceso de diseño y del documento final del manual elaborado para el montaje de la OBDT-Theta, añadido al completo en el Anexo 9 con la versión final en inglés y traducido al castellano en la versión que aparece en el Anexo 10.

5.4.1. Requisitos previos

El manual de montaje de la tarjeta OBDT-Theta proporcionará un documento con las instrucciones paso a paso sobre cómo ensamblar la placa y los componentes mecánicos involucrados, realizando también las conexiones de fibra óptica internas.

Para lograr el éxito de cualquier manual de montaje es necesario establecer de manera clara cuál es el propósito del documento. En este caso, el manual se desarrollará para que el montaje de la tarjeta se realice de manera correcta y segura, minimizando posibles errores por parte del usuario. Por tanto, será importante guiar a los operarios a través del proceso de montaje, desde la identificación de cada una de las piezas que intervienen hasta la conexión y configuración final.

Otro de los aspectos que se han de considerar es el público objetivo, es decir, a quién está dirigido el manual. En este caso, este manual será usado mayoritariamente por los operarios del laboratorio de electrónica del CIEMAT que forman parte del proyecto. A pesar de que el público objetivo sean los operarios, esta tarjeta electrónica se está desarrollando de manera exclusiva en el CIEMAT y, puesto que se usará en una colaboración internacional y será instalada en el experimento CMS, también se debe pensar que el público del manual puede ser cualquier persona que tenga relación con el proyecto o quiera informarse sobre este. Es por ello que, en cuanto al público establecido, se considerarán tanto los operarios de montaje como los investigadores que participan en el proyecto a nivel internacional. Este hecho da lugar a la decisión de que el idioma del manual sea el inglés, idioma establecido para la comunicación en el proyecto. No obstante, se ha elaborado una versión del manual en castellano, a pesar de que la versión oficial que se distribuya sea en inglés.

Además del idioma, otro de los objetivos con respecto al lenguaje es la búsqueda de una redacción clara y concisa, que no dé pie a ambigüedades. Lo prioritario del documento es la comprensión y se intentarán reducir los términos técnicos a lo esencial, teniendo en cuenta que los operarios conocen la terminología empleada porque están familiarizados con ella.

Para lograr que el texto sea lo más fácil de leer posible, se desarrollará intencionadamente información visual, combinando diseño gráfico con diseño 3D. Se incluirán ilustraciones de los ensamblajes realizados en 3D y fotografías tomadas en el laboratorio durante el proceso de prototipado. Estas imágenes se integrarán con instrucciones escritas para facilitar la comprensión.

En cuanto a la organización del manual, se pretende seguir una línea secuencial. En primer lugar, se establecerá una breve introducción y una descripción de las piezas necesarias para el montaje y posteriormente se llevará a cabo la secuencia de montaje, separando por apartados los distintos procesos paso a paso.

Por tanto, analizados los requisitos previos que debe cumplir el documento y los objetivos principales, se marcan las directrices base del manual. Los pasos posteriores serán establecer un esquema para su estructura centrada en el usuario, crear las ilustraciones técnicas y las fotografías, dar formato al texto, maquetar el contenido y presentar su forma final.

5.4.2. Formato, identidad y maquetación

Para la orientación del manual se llevó a cabo un estudio previo del contenido que se pretendía introducir. Al tratarse de un ensamblaje, el documento tendría más páginas con imágenes que con cuadros de texto. Estas imágenes serían en su mayoría dedicadas a la tarjeta OBDT-Theta, cuya geometría es rectangular y el marco de referencia para trabajar con la tarjeta es normalmente en horizontal, situando la conexión de LV (conexión de baja tensión) en el lado izquierdo. Dada la referencia de observación de la tarjeta y su forma alargada, las imágenes se desarrollarían con la misma vista y, por tanto, lo más adecuado para el manual es que sus páginas tuvieran una orientación horizontal. Con la disposición apaisada de las páginas del manual será más sencillo adaptar las imágenes, fomentando así el aprovechamiento del espacio de la página.

Se deberá preparar un documento que sirva tanto para imprimir como para visualizar en el ordenador. La forma más utilizada para compartir documentos es el archivo “PDF” pero, se deberá preparar también para que se pueda imprimir en papel ya que en los talleres de montaje es una forma más cómoda de trabajo para los operarios. En consecuencia, el manual se ha desarrollado en formato A4 horizontal (29,7 cm x 21 cm) por su adecuación a los diferentes soportes.

Uno de los objetivos del manual es garantizar la legibilidad y claridad. Para conseguirlo, es necesario el cuidado del diseño general de las páginas, el espaciado, el uso de imágenes precisas y la tipografía. Se elaboró una prueba tipográfica para garantizar la comprensibilidad del documento. Dentro de las categorías tipográficas se eligieron las de tipo “sans serif”, sin serifas ni adornos en los extremos de las letras para hacer los textos más limpios y fáciles de leer. Se evaluaron seis tipografías cuya estética se puede comprobar en la Figura 120, donde se indica la identificación de la tipografía y un texto de prueba para poder realizar la comparación entre estas.

Nunito Sans Condensed

The OBDT-theta board

Time digitization for the theta view of Drift Tubes chambers.

DM Sans Medium

The OBDT-theta board

Time digitization for the theta view of Drift Tubes chambers.

Questrial

The OBDT-theta board

Time digitization for the theta view of Drift Tubes chambers.

Lexend

The OBDT-theta board

Time digitization for the theta view of Drift Tubes chambers.

Manrope

The OBDT-theta board

Time digitization for the theta view of Drift Tubes chambers.

Poppins

The OBDT-theta board

Time digitization for the theta view of Drift Tubes chambers.

Figura 120. Prueba tipográfica para los textos del Manual de la OBDT-Theta.

Dentro de las tipografías expuestas, se decidió usar la opción de combinarlas para marcar diversidad en el texto, pero sin llegar a confusión, limitando el uso a solo dos tipografías diferentes. Se buscó la opción que mejor cumpliera con los requisitos de claridad aportando a su vez cierta atracción estética. Finalmente se establecieron las tipografías de “Lexend” para los títulos y “Manrope” para los textos del manual. El hecho de no usar las tipografías convencionales que aparecen por defecto en los editores de texto fomenta la motivación a lectura del documento por parte del usuario.

Aprovechando el recurso de documento en formato digital y, sin perjuicio de la impresión física, se ha realizado un detalle jugando con el encabezado de una página y el pie de página de la siguiente, mostrado en la Figura 121.

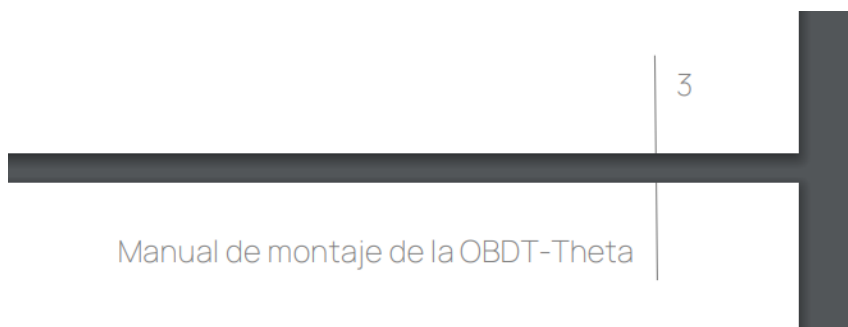


Figura 121. Detalle del encabezado y pie de página del manual.

De este modo, cuando el documento se abra con un visor de PDF, al arrastrar el ratón para avanzar sobre el documento se verá la continuidad de una línea recta de una página sobre la siguiente, como se observa en la Figura 122. A la derecha de esta línea se identifican los números de página que aparecen en el pie, mientras que a la izquierda de la línea aparece el encabezado con la identificación del documento. Este recurso permite dar uniformidad al documento, además de añadir un detalle estético. Al imprimir el manual en papel, este efecto no se percibirá, pero no involucra ninguna distracción ya que su objetivo es que al visualizar una página de manera individual se siga entendiendo la información transmitida y la estética no se distorsione.

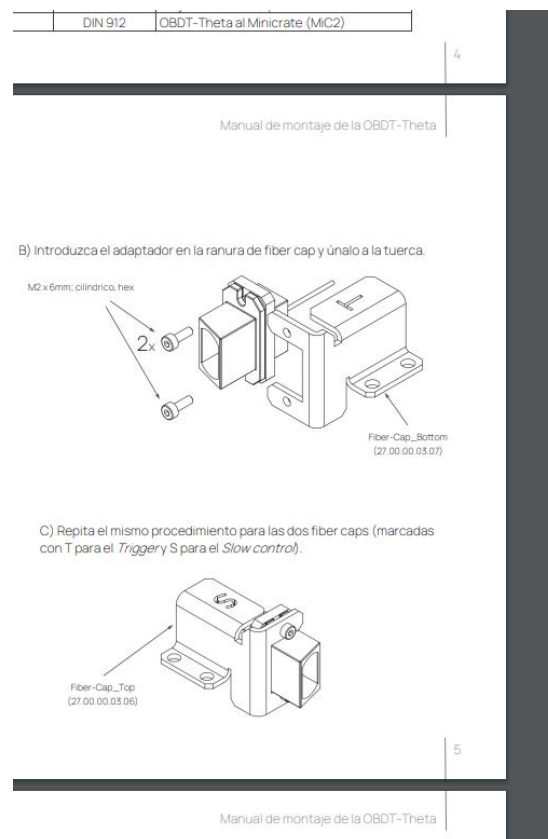


Figura 122. Visualización del detalle de continuidad del encabezado del manual.

Se ha usado la alineación del texto a la izquierda, los párrafos que aparecen en el documento no están justificados. Al justificar los textos se generan espacios irregulares entre las palabras para lograr llenar uniformemente el ancho de la línea que en muchos casos pueden afectar de manera negativa a la lectura fluida. El formato del texto afecta a la apariencia visual y, puesto que en el manual no habrá grandes bloques de texto, este formato da mayor libertad sobre el diseño y la apariencia, además de fomentar el dinamismo del documento.

Se utiliza un marco de aluminio (frame) como soporte y sistema de refrigeración de la tarjeta. El frame tiene "islas" en la zona central para mejorar la refrigeración en determinados puntos de la placa. Estas islas se han diseñado con la altura específica para estar en contacto con los elementos a través de almohadillas térmicas que se colocarán en la parte superior.

Figura 123. Texto extraído del manual donde se observa la alineación a la izquierda.

Se ha dado libertad para la creación de bloques de texto de diferentes tamaños en función de la información que se pretendía introducir en cada página, pero se ha mantenido el tamaño de fuente para marcar la jerarquía de información del documento. Para los títulos, se ha establecido un tamaño de 24 puntos en los de primer nivel y un tamaño de 14 puntos en los de segundo nivel. El tamaño de fuente se mantiene a 10 puntos en los textos que explican las instrucciones y comentarios, mientras que se disminuye a 8 puntos para la identificación de piezas. La diferencia de tamaño de los textos se puede apreciar en la Figura 124. Con esta disposición se marcan de manera clara las diferencias en los niveles de información, logrando una jerarquía de relevancia en la lectura.

III | Montaje paso a paso

1. Adaptadores de fibras

El primer paso es preparar los adaptadores para la conexión de fibra.

B) Introduzca el

M2 x 6mm; cilíndrico

Figura 124. Bloques de texto durante la edición del manual para mostrar la jerarquía de información.

La maquetación del documento ha respetado los espacios en los márgenes para todo el manual, pero dejando libre la estructura en el interior de cada página. Por ello, se ha distribuido la información y las imágenes en función del contenido. Se ha seguido un estilo similar al que se usa para los manuales de instrucciones de montaje de muebles en casa, ya que el objetivo es la facilidad de comprensión para cualquier usuario. Este estilo se ha perseguido introduciendo el dibujo de los ensamblajes 3D de manera simplificada, sin color y a simple línea, como se ve en la Figura 125. No obstante, se han combinado también fotografías tomadas durante la realización de prototipos en los casos en los que la información con los modelos 3D no se consideraba suficiente.

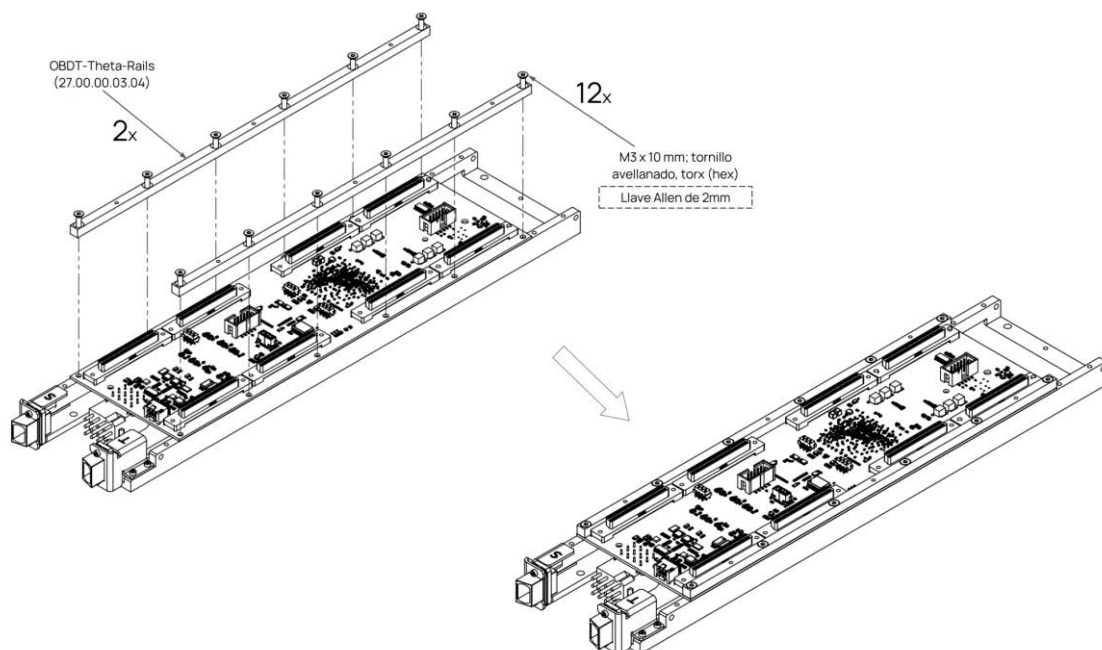


Figura 125. Detalle de un dibujo de ensamblaje en 3D del manual de montaje de la OBDT-Theta.

En cuanto a color, no se ha establecido una paleta cromática para no distraer la atención del usuario. Se han utilizado diferentes tonalidades de gris para diferenciar el título de primer nivel y el de segundo nivel. Los únicos elementos a color que aparecen en el texto son las fotografías y ciertas anotaciones en naranja. El uso del color naranja se ha empleado para destacar las palabras importantes que definen los elementos del montaje como se puede ver en la Figura 126, donde además se han añadido flechas del mismo color para identificarlas.

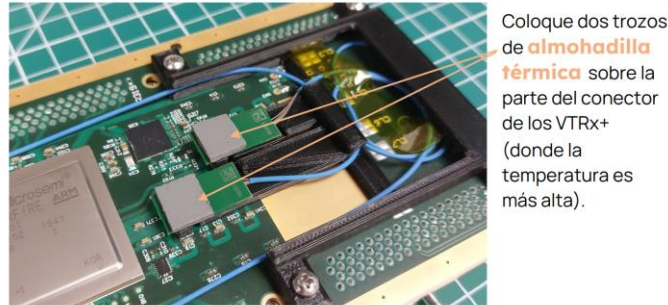


Figura 126. Anotaciones en color naranja para la identificación de elementos destacados.

El diseño establecido permitió distribuir la información cumpliendo con el principal objetivo del documento, la facilidad de lectura y comprensión del montaje. Asimismo, la identidad y formato de este documento se han mantenido para Manual de montaje de MiC2 en el que se habla del sistema de refrigeración, desarrollado en el apartado 5.5 y mostrado en el Anexo 11.

5.4.3. Desarrollo del manual

En la portada del manual se ha incluido la información básica para su identificación. Como se puede ver en la Figura 127, la estructura de página se ha hecho de manera intencionada para que cuando el usuario mire de forma general centre la vista en las palabras “OBDT-Theta” y “MiC2”. Se han añadido los logotipos del experimento CMS en el que irá instalado el montaje y también los logotipos oficiales de la financiación del proyecto.



Figura 127. Portada del Manual de montaje de la OBDT-Theta.

Tras la portada, se ha añadido un índice para mostrar el contenido del documento y la numeración de páginas, ver en la Figura 128. El índice se ha añadido para organizar la información y para que durante el montaje se pueda buscar con más facilidad el contenido de cada parte.

Manual de montaje de la OBDT-Theta	
Índice	
I Introducción	3
II Piezas requeridas para el montaje	4
III Montaje paso a paso	5
1. Adaptadores de fibras	5
2. Fibers support a la OBDT	6
3. Instalación y cableado de VTRx+	7
4. Almohadillas térmicas sobre el frame	9
5. OBDT-Theta y fiber caps en el frame	11
6. Railes al frame	12
7. Cubierta de la OBDT-Theta	13
8. Tarjeta Theta-TestPulse	14
9. Insertar el montaje OBDT-Theta en el Minicrate (MIC2)	15

2

Figura 128. Índice del Manual de montaje de la OBDT-Theta.

Se ha añadido una breve introducción donde se explica de qué trata el manual y una descripción de la tarjeta OBDT-Theta. Como se aprecia en la Figura 129, se ha incluido una foto del ensamblaje 3D de la tarjeta con las piezas mecánicas que se irán describiendo en el manual.



Figura 129. Página de introducción del Manual de montaje de la OBDT-Theta.

En la página 4 del manual se ha añadido el apartado que especifica las piezas requeridas en el montaje. Este contenido es importante para mostrar de forma clara cuáles son las piezas y los tornillos que se deben tener preparados previamente al comienzo del procedimiento de montaje. Se ha añadido una columna de “observaciones” en las tablas para incluir información que facilite el montaje y se han dejado espacios en blanco para que el usuario pueda añadir sus propias anotaciones.

Manual de montaje de la OBDT-Theta

II | Piezas requeridas para el montaje

Lista de piezas para el ensamblaje:

N° PIEZAS/ENS	NOMBRE	NUMERACIÓN	OBSERVACIONES
1	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Board	27.00.00.03.01	
1	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Frame	27.00.00.03.02	
1	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Cover	27.00.00.03.03	
2	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Rails	27.00.00.03.04	
1	CMS_MIC2_OBDT-Theta-TestPulse-Board	27.00.00.03.05	
2	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top	27.00.00.03.06	
2	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom	27.00.00.03.07	
2	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut	27.00.00.03.08	
1	CMS_MIC2_OBDT-Theta-Fibers-Support	27.00.00.03.09	
2	VTRx+		
2	Adaptadores MTP		
-	Almohadillas térmicas		
-	Cinta de Kapton		

Lista de tornillos:

N° PIEZAS/ENS	NOMBRE	NORMA	OBSERVACIONES
4	Machine Screw Pan Phillips 4-40 (36-9902-ND)	-	Fibbers support a la OBDT-Theta
4	M2 x 6mm, cilíndrico, hex	DIN 912	Nuts, MTP y Fiber caps
4	M3 x 6 mm, cilíndrico, hex	DIN 912	Fiber caps al frame
12	M3 x 10 mm, avellanado, torx (hex)	DIN 7991	Raíles a la OBDT-Theta
6	M2.5 x 6 mm, cilíndrico, hex	DIN 912	Cubierta OBDT-Theta a los raíles
4	M3 x 6 mm, cilíndrico, hex	DIN 912	Tarjeta Theta-testpulse al frame
4	M4 x 10 mm, cilíndrico, hex	DIN 912	OBDT-Theta al Minicrate (MIC2)

4

Figura 130. Página 4 del Manual de montaje de la OBDT-Theta.

A partir de la página 5 del manual se empieza a guiar al usuario en el proceso de montaje. Se ha dividido el procedimiento en nueve puntos diferentes. Como se observa en la Figura 131, la información se ha distribuido de manera clara en las páginas para que no cause confusión y requiera el mínimo tiempo posible en la comprensión. Las siguientes páginas del manual se van adaptando de la misma forma al contenido, como se puede seguir en el Anexo 10.

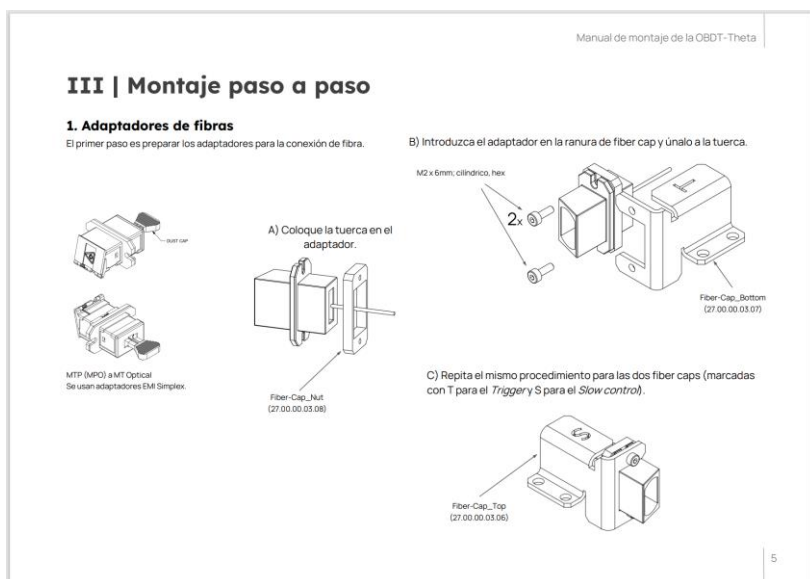


Figura 131. Página 5 del Manual de montaje de la OBDT-Theta.

A pesar de que las piezas que intervienen en el montaje son las definitivas, el procedimiento puede variar ligeramente ya que se siguen haciendo prototipos en los laboratorios. Por tanto, esta versión del manual no es única y definitiva, se puede actualizar si durante las pruebas realizadas se detectan cambios de mejora. Estas modificaciones serán mínimas y, sobre todo, estarán relacionadas con el montaje de las almohadillas térmicas para la disipación de calor de la tarjeta.

5.4.4. Imágenes de ensamblajes

Para la realización del contenido visual del manual se han elaborado ensamblajes 3D utilizando el software Solidworks. Durante el proceso de diseño y fabricación de las piezas descrito en el Capítulo 4, se han ido desarrollando los modelos 3D de cada una de estas piezas. Con los archivos de las piezas más el archivo STEP¹¹ generado por el software de diseño de la tarjeta electrónica, se ha seguido el ensamblaje añadiendo las restricciones de posicionamiento en el programa. El software cuenta con una biblioteca de tornillos normalizados que se han podido usar para el ensamblaje. En la Figura 132 se puede observar el montaje de la tarjeta en el software de diseño por ordenador.

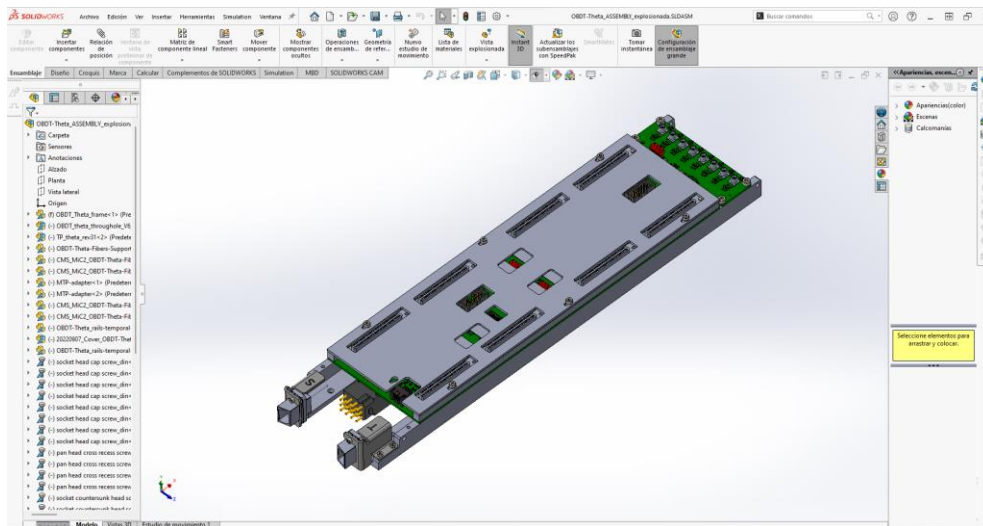


Figura 132. Vista en perspectiva del ensamblaje 3D de la OBDT-Theta en Solidworks.

Con el ensamblaje finalizado, se procedió a generar una vista explosionada para marcar el despiece del conjunto. En la Figura 133 se observa la vista explosionada generada con Solidworks.

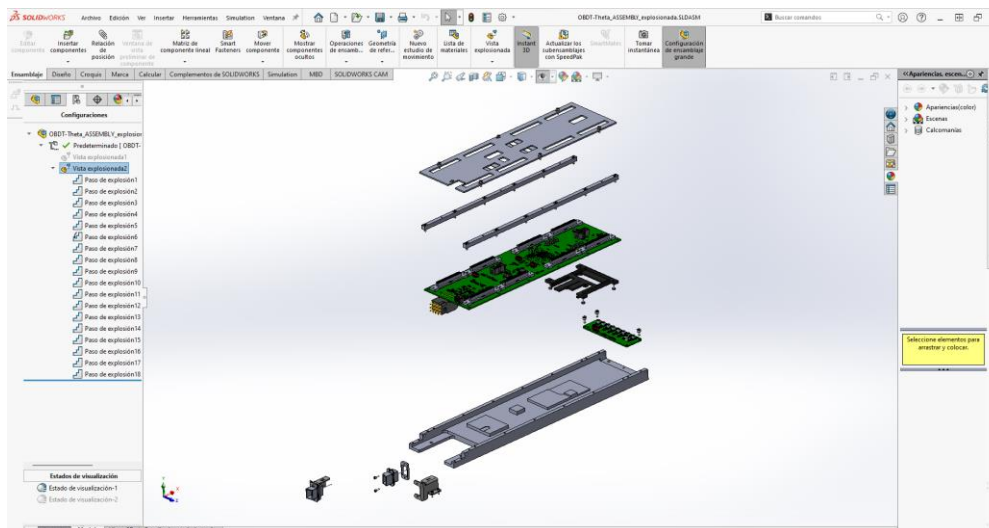


Figura 133. Vista explosionada del ensamblaje 3D de la OBDT-Theta en Solidworks.

¹¹ STEP, por sus siglas en inglés "Standard for the Exchange of Product Data", es un formato de archivo que se utiliza para el intercambio de modelos tridimensionales compatible con diferentes programas de diseño asistido por ordenador (CAD, *Computer Aided Design*) y de impresión en 3D [44].

Se fueron obteniendo las imágenes para el manual de montaje aislando ciertos componentes para marcar con exactitud cada paso de montaje y no distraer la atención del usuario. Se establecieron guías y ejes en algunos de los pasos para señalar de forma más clara el posicionamiento relativo de las piezas para el montaje. Una vez establecida en pantalla la imagen que se pretende mostrar, el software permite crear un dibujo desde el ensamblaje, como se ve en la Figura 134.

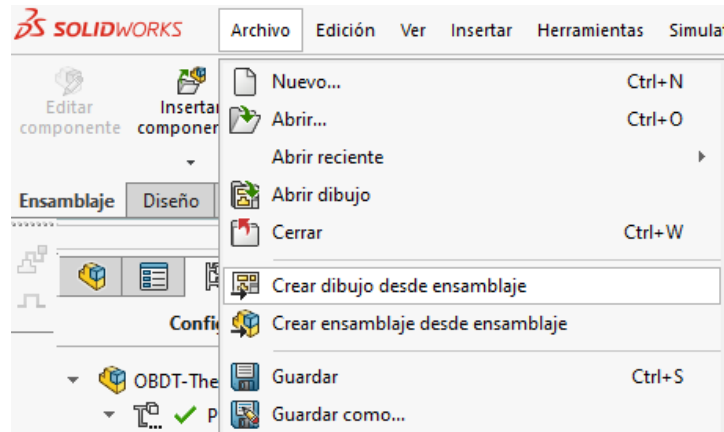


Figura 134. Opción para crear dibujo desde ensamblaje en Solidworks.

Con la opción de dibujo del software se fueron estableciendo los diferentes ensamblajes marcando como estado de visualización líneas de contorno sin sombreado ni aristas ocultas, como se muestra en la Figura 135.

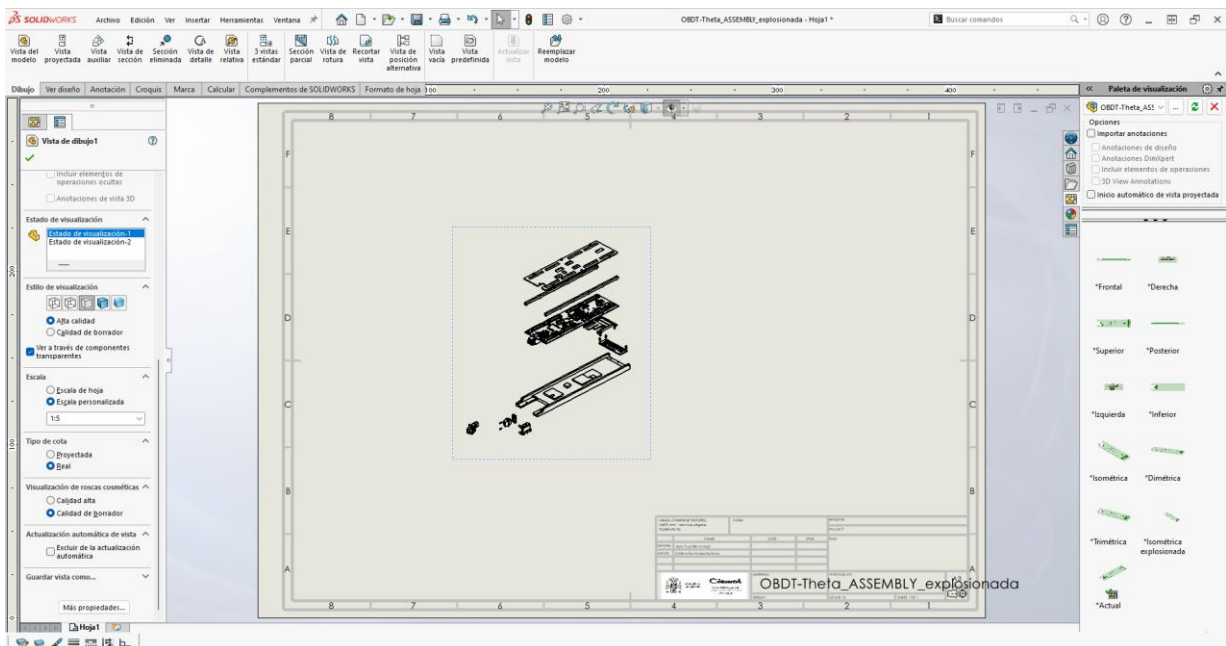


Figura 135. Opción de dibujo del ensamblaje en Solidworks.

Tras establecer la vista del ensamblaje con la configuración requerida, se exportaron los dibujos como imágenes para recortarlos e insertarlos en el manual de montaje. De esta forma se elaboró el contenido visual del montaje, además de incluir las fotografías reales que se tomaron en el laboratorio.

5.5. Diseño del manual de montaje y verificación del sistema de refrigeración de los Minicrates

Para llevar a cabo el montaje del sistema de refrigeración de los Minicrates y su verificación se ha desarrollado el manual añadido en el Anexo 11 y cuya descripción se encuentra detallada en este apartado.

5.5.1. Especificaciones del manual

El objetivo principal del documento es proporcionar a los usuarios pautas claras y fáciles de seguir para la instalación eficaz del sistema de refrigeración de los Minicrates. Su diseño se debe centrar en la claridad, proporcionando instrucciones detalladas para que los operarios de todos los niveles puedan realizar el procedimiento con confianza y precisión. En las páginas del manual debe aparecer información útil y pasos prácticos para facilitar la tarea, garantizando el rendimiento óptimo de la refrigeración de la electrónica.

Se ha mantenido el mismo formato visual del Manual de montaje de la OBDT-Theta mencionado en el apartado 5.4.2, aunque adaptado al contenido específico de este montaje. Sin embargo, no se han realizado imágenes de ensamblajes 3D ya que en este caso se tenían numerosas fotografías que ayudaban mejor a la comprensión del procedimiento de montaje.

Este manual se ha desarrollado directamente en castellano porque se usará como un documento interno y el público objetivo son los técnicos del CIEMAT que llevarán a cabo el montaje. En principio, este manual no está pensado para ser distribuido a otras instituciones, aunque puede servir de apoyo en caso necesario.

En el procedimiento de montaje que se va a elaborar intervienen numerosas piezas normalizadas que cuentan con instrucciones de montaje específicas marcadas por los fabricantes. La creación de este manual ha seguido las directrices de recomendación establecidas por los proveedores de las piezas implicadas, integrando las mejoras desarrolladas durante los prototipos probados en los laboratorios del CIEMAT. Siguiendo las pautas de los fabricantes se podría asegurar que el sistema de refrigeración funcionará correctamente sin tener fugas de presión o de fluido, pero, al tratarse de un sistema concreto con ciertas especificaciones que no cumplen con lo general, es necesario este manual para poder adaptar las instrucciones al sistema creado para el Minicrate.

5.5.2. Desarrollo del manual

El manual comienza con la página de portada, siguiendo el mismo estilo del manual desarrollado en el apartado 5.4.3 pero, en este caso, dando importancia a la palabra "MiniCrate2". Se especifica que el manual tratará de la preparación e instalación del sistema de refrigeración.



Figura 136. Portada del Manual de montaje del MiC2.

En la página 2 del manual se ha incluido una breve introducción del contenido y una clasificación de los perfiles de los Minicrates. Esta clasificación es importante para que los operarios puedan llevar un seguimiento de la producción, ya que los perfiles irán llegando a la nave de montaje según tipo de Minicrate. Con el número de perfiles se podrá saber el estado del montaje, estableciendo el número de perfiles que se van acabando y los que van llegando nuevos. Se pueden ver los apartados mencionados en la Figura 137.



Figura 137. Página con introducción y clasificación de perfiles en el Manual de montaje del MiC2.

En la página 3 del manual se ha elaborado una descripción de cómo se deben limpiar los perfiles. Los perfiles llegan del taller con residuos del mecanizado, sobre todo de taladrina, mezcla de agua y aceites que se usa como lubricante y refrigerante en la fabricación. Estos residuos deben ser limpiados para no contaminar el fluido refrigerante que circulará por los perfiles, evitando ensuciar la electrónica que va en su interior.

3 | Limpieza de los perfiles

Es necesario realizar una limpieza profunda de los perfiles de aluminio para eliminar los residuos que quedan después del mecanizado (sobre todo de taladrina, mezcla de agua y aceites que se usa como lubricante y refrigerante en la fabricación).

Los perfiles se entregan del taller en un palé y tras su limpieza se irán almacenando en las estanterías preparadas para ello.

PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA:

Eliminar primero las rebabas de material que resultan de los taladros haciendo uso de una cuchilla desbarbadora. Se puede soplar con una pistola de aire comprimido.

Después se limpiarán las zonas laterales roscadas con acetona o quitagrasas para conseguir disolver los residuos y evitar que durante el funcionamiento se contamine el sistema de refrigeración. Se puede usar un trapo y un destornillador para entrar por los agujeros laterales.

Passar un trapo humedecido con acetona por todos los recovecos del perfil.

Cuando el perfil esté limpio de grasa y no tiene tacto pringoso, como último paso, humedecer un trapo con alcohol y pasar por todas las superficies del perfil.



3

Figura 138. Página de descripción de limpieza en el Manual de montaje del Mic2.

En la página 4 del manual se empieza a hablar del montaje del sistema de refrigeración. El primer proceso es realizar el premontaje de las férulas en los tubos en forma de “U”.

4 | Montaje. “Crimpaje” de los tubos en “U”

Herramientas necesarias: Llaves fijas de 15, 16 y 17mm; Rotulador permanente; Galgas de inspección; Tornillo de banco; Útil de premontaje

INSTRUCCIONES:

1. Marcar con un rotulador la medida de inserción del tubo según plano a tamaño real (aprox. 14,50mm).
2. Poner tuerca con las férulas sobre el útil de premontaje anclado al torno de banco.
3. Introducir uno de los extremos del tubo en U en el útil anclado asegurándose de que el tubo ha entrado hasta el tope y apretar la tuerca a mano.
4. Hacer una señal en la tuerca con un rotulador en la posición de las 6 en la esfera de un reloj.
5. Apretar la tuerca girándola **uno vuelta y un cuarto (1 y 1/4)** hasta que coincida con la posición de las 9.
6. Desapretar la tuerca y desconectar el tubo del útil.
7. Repetir el mismo proceso en ambos extremos del tubo en U. Una vez realizado en ambos extremos, se pasará a la instalación en el perfil.



4

Figura 139. Página de descripción de premontaje de férulas en tubos en el Manual de montaje del Mic2.

En la página 5 del manual se desarrolla en profundidad cómo se deben instalar los elementos del circuito, con anotaciones a tener en cuenta para que el montaje se haga de la forma correcta.

5 | Montaje. Racores codo 90° SWAGELOK

INSTRUCCIONES:

1. Comprobar que el codo lleva las dos arandelas metálicas y la junta tórica ensambladas para asegurar el cierre.
2. Llevar la tuerca hasta la superficie del codo dejando visible la zona roscada completa. Enroscar los codos con la mano hasta que la zona roscada quede dentro del perfil de aluminio.
3. Apretar ligeramente la tuerca del codo con la llave para posicionarlo. Repetir el mismo proceso con los dos codos.
4. Introducir el tubo en U con las férulas preensambladas dentro del cuerpo de los racores y girar la tuerca con la mano.
5. Una vez se ha comprobado que todos los elementos están en la posición correcta, apretar las tuercas progresivamente. Se recomienda girar la tuerca que une la U entre un cuarto y media vuelta.
6. Comprobar que la parte superior de la tuerca se queda sobre la línea de inserción marcada en el crimpaje.
7. Situar la galga frente al espacio entre la tuerca y el hexágono del cuerpo. Si la galga no entra en el hueco, está suficientemente apretado.



IMPORTANTE: diferenciar entre Minicrate tipo LEFT y tipo RIGHT porque la "U" no va en la misma posición. De cada tipo de Minicrates se deben hacer la mitad con la "U" en un extremo y la otra mitad con la "U" en el extremo contrario.

* Es necesario tener especial cuidado en la unión del racor con el perfil de aluminio. Estos racores están preparados para una unión acero-acero en la que no importa pasarse con el apriete pero, en este caso, al ser aluminio-acero, el apriete debe ser más ligero para que la unión se haga correctamente y no deforme el aluminio provocando fugas en el circuito.

5

Figura 140. Página de descripción de instalación de racores en el Manual de montaje del MiC2.

La última página del manual trata sobre las pruebas de verificación del sistema. Estas pruebas se deben realizar para comprobar que el montaje de todos los elementos se ha hecho de forma adecuada. Si el montaje no se ha hecho correctamente, en las pruebas se verán los resultados ya que el sistema tendrá fugas de fluido o pérdidas de presión.

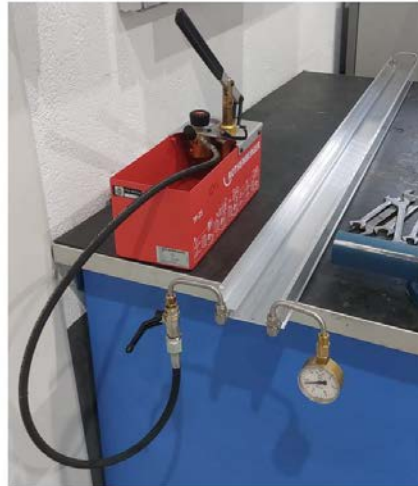
6 | Pruebas de presión. Verificación del montaje

Para realizar las pruebas del sistema de refrigeración del Minicrate se empleará una bomba manual de comprobación TP25 de la marca Rothenberger (presión máxima 25 bares).

Se deben comprobar TODOS los Minicrates para poder verificar el sistema de cooling y su correcto funcionamiento en CMS.

INSTRUCCIONES:

1. Llenar el tanque de agua desionizada hasta una altura de 1/3 de su capacidad.
2. Conectar en uno de los codos del Minicrate el manómetro y en el otro codo el circuito preparado para las pruebas de presión.
3. Comprobar las válvulas de la bomba: la válvula con el fondo rojo (V1) debe estar abierta y la otra válvula (V2) cerrada.
4. Desapretar ligeramente la unión del lado del manómetro al codo del Minicrate como punto de purga de la instalación. Retirar el gancho de bloqueo del mango y bombear líquido hasta que se haya purgado todo el aire del circuito. Cerrar el punto de purga.
5. Seguir bombeando hasta alcanzar la presión de comprobación. El Minicrate se deberá comprobar a 15-16 bares pero, para asegurar su funcionamiento, se elevará hasta 20 bares.
6. Cerrar la válvula V1. Si al bombear se sobrepasa la presión, se puede abrir la válvula V2 ligeramente y después cerrar.
7. Comprobar que el manómetro marca la misma presión que la bomba y girar la válvula de bola (mango negro) para cerrar el circuito.
8. En caso de no haber fugas, no habrá caídas de presión en la lectura del manómetro. Al finalizar, abrir todas las válvulas de bola, V1 y V2.



6

Figura 141. Página de descripción de las pruebas de verificación en el Manual de montaje del MiC2.

Una vez finalizado el ensamblaje del sistema de refrigeración de los Minicrates y su verificación, estarán listos para el siguiente paso de la cadena de montaje. Desde las instalaciones del CIEMAT, se enviarán los Minicrates con el sistema de refrigeración instalado a las distintas ciudades donde se llevará a cabo el montaje de la electrónica y su puesta en funcionamiento. Solo una parte de ellos, como se ha mencionado anteriormente, se quedará en el CIEMAT para continuar el montaje.

Capítulo 6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

La exploración inicial que se ha realizado sobre el experimento CMS y su contexto ha permitido profundizar en cada detalle de los retos planteados durante el desarrollo del proyecto. En este trabajo se han dado soluciones a diferentes cuestiones relacionadas con el funcionamiento y la instalación de la electrónica de las cámaras de deriva.

La singularidad de este trabajo es su ejecución interna y su conexión intrínseca con la realidad del proyecto, incidiendo de manera directa en la actualización del acelerador de partículas, que actualmente se encuentra en fase de fabricación. La oportunidad de trabajar desde dentro del proyecto no solo ha proporcionado una perspectiva privilegiada, sino que también ha permitido llevar a cabo la instalación de los prototipos in situ. Esta proximidad se ha traducido en una validación en tiempo real de las piezas diseñadas, constituyendo un avance fundamental en la trayectoria de las actividades. La interacción directa ha permitido ajustar y perfeccionar cada componente, garantizando su funcionalidad y rendimiento óptimo.

En el transcurso del trabajo se ha seguido un enfoque técnico que combina los métodos tradicionales de fabricación industrial con tecnologías innovadoras. La aplicación de los métodos tradicionales ha sido esencial para la manufactura de las piezas, asegurando la calidad y precisión requeridas. No obstante, el privilegio de contar con tecnologías de impresión 3D de última generación ha permitido demostrar que este método de fabricación va más allá de su uso para prototipado, posicionándose como una alternativa muy competitiva para la producción de piezas en serie.

La selección de materiales ha sido una fase fundamental en el diseño de las piezas, destacando la preocupación por mantener la integridad de los componentes en entornos exigentes por la presencia de radiación. Este aspecto ha hecho que no solo se haya dado respuesta a los estándares convencionales de durabilidad y resistencia, sino que se hayan tenido en cuenta los desafíos específicos asociados con la exposición a radiación.

Una consideración primordial ha sido la eficaz disipación de calor generada por los componentes electrónicos en operación. El diseño del sistema de refrigeración es esencial para mantener las temperaturas adecuadas y prevenir posibles degradaciones debido al sobrecalentamiento de las tarjetas. La implementación de soluciones que optimizan la conducción térmica ha sido resultado del análisis de la geometría de las piezas y la selección cuidadosa de materiales. Este trabajo no es solo una prueba de innovación técnica, también de la capacidad de adaptación y resolución de problemas en la búsqueda constante de la excelencia en el diseño industrial.

La distribución y el establecimiento de las secuencias de montaje desarrolladas es consecuencia de un proceso de implementación de mejoras y modificaciones realizadas en las pruebas de los laboratorios. Estos procedimientos hacen que se garantice la ejecución de cada paso, se minimicen los tiempos de inactividad, se eviten errores y se establezca una relación cercana entre la teoría y la aplicación práctica.

La presentación de información de manera coherente y ordenada ha sido la prioridad en el proceso de diseño de los manuales elaborados. La eficacia de un proceso de ensamblaje depende en gran medida

de la capacidad del usuario para comprender de manera rápida cada paso. La estructura lógica de la información junto con una presentación visual ergonómica no solo facilita la asimilación de los detalles, sino que minimiza la posibilidad de errores. En este contexto, se demuestra que el diseño desempeña un papel fundamental en la maquetación de documentos técnicos. La estética no solo sirve para embellecer, sirve para mejorar significativamente la experiencia del usuario al interactuar con los gráficos y la iconografía.

Es importante remarcar que el proyecto del que se está tratando se encuentra en pleno desarrollo, actualmente está en curso y su instalación comenzará en el 2026. Esto implica que, dada la naturaleza continua del proyecto, muchas de las piezas desarrolladas y los manuales establecidos puedan sufrir modificaciones adicionales durante los procesos de fabricación y ensamblaje posteriores. La flexibilidad y adaptabilidad son rasgos que van ligados a proyectos de tal magnitud. El trabajo continuará evolucionando hasta su instalación final.

Como se comentaba en los objetivos, este documento servirá como repositorio para futuras publicaciones científicas y técnicas relacionadas con la participación del CIEMAT en el experimento. Es un proyecto muy amplio en el que intervienen numerosas instituciones, un gran número de personas trabajando de manera paralela y muchos años de trabajo por delante. Aquí solo se ha tratado una parte muy pequeña de lo que conlleva el sistema de las cámaras de deriva. En los años que faltan hasta su instalación final se seguirán generando nuevos escenarios como los que se han seguido en este trabajo, surgirá el diseño de nuevos componentes y se seguirán elaborando procedimientos de montaje. No solo se diseñarán componentes que se integrarán en el detector, también se verá involucrado un proceso de fabricación para la creación de los sistemas de pruebas que se van a construir en cada laboratorio con el objetivo de validar la electrónica.

El desarrollo de la nueva electrónica ha seguido la directriz de garantizar el mínimo consumo de potencia posible en cada componente y sistema. La adopción de esta búsqueda no sólo está marcada por optimizar el rendimiento de la electrónica sino también por minimizar su huella medioambiental. Al igual que ocurre en las fases de diseño de los componentes planteados, se ha buscado la optimización de material y recursos con una visión de futuro donde la tecnología debe respetar el entorno que nos rodea. Este proyecto recibe financiación de los fondos europeos “*Next Generation*” en los que la toma de decisiones incorpora de manera integral la adopción de prácticas sostenibles siguiendo el principio de “*DNSH*” (*Do No Significant Harm*) o, en español, “*No Causar Daño Significativo*”, aplicado como criterio obligatorio desde la planificación hasta la implementación de las actividades.

La investigación básica es aquella que se centra en explorar teorías con el objetivo de comprender la naturaleza y el funcionamiento del Universo, teniendo como objetivo principal la generación de conocimiento fundamental sin una aplicación práctica directa. Sin embargo, con este trabajo se puede demostrar que el desarrollo de experimentos de tal calibre sugiere retos ingenieriles que dan lugar a nuevos conocimientos técnicos. La investigación básica también contribuye a la formación de ingenieros y profesionales, formando en muchos casos la base de desarrollo de tecnologías emergentes.

La conclusión final de este trabajo destaca la versatilidad y la amplitud de la influencia del diseño industrial en diversos ámbitos, más allá del desarrollo de productos para el consumo directo por parte del usuario final. El diseño industrial desempeña un papel fundamental en la resolución de problemas en una amplia variedad de contextos. En este trabajo se ha evidenciado cómo el diseño ha contribuido significativamente al desarrollo de sistemas mecánicos, métodos de ensamblaje eficientes y la creación de documentación que mejora la funcionalidad y la experiencia del usuario en una amplia gama de aplicaciones industriales y tecnológicas.

Referencias

- [1] C. Fernández Bedoya, Diseño, construcción y validación del sistema de adquisición de datos de las Cámaras de Deriva del experimento CMS, Universidad Complutense de Madrid, Spain, 2009.
- [2] «Wikipedia Commons, media file repository» 2018. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_Anti.svg. [Último acceso: 2023].
- [3] P. Jenni y V. Tejinder S, «The Discovery of the Higgs Boson at the LHC» *Particle physics - Theory and experiments*, 2020.
- [4] P. Mouche, «CERN Document Server» 2014. [En línea]. Available: <https://cds.cern.ch/record/1708847>.
- [5] «Status of the CMS Detector Control System. International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2012)» *Journal of Physics: Conference Series 396 (2012) 012023*, p. 10, 2012.
- [6] CERN, «CMS Experiment» [En línea]. Available: <https://home.cern/science/experiments/cms>. [Último acceso: 2023].
- [7] D. Barney, An overview of the CMS experiment for CERN guides, 2003.
- [8] CERN, «CMS Detector» [En línea]. Available: <https://cms.cern/detector>. [Último acceso: 2023].
- [9] «The Muon Project. Technical Design Report» CERN/LHCC 97-32, 1997.
- [10] «The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors. Technical Design Report.» CERN-LHCC-2017-012, 2017.
- [11] «Longer term LHC schedule» 2023. [En línea]. Available: <https://lhccommissioning.web.cern.ch/schedule/LHC-long-term.htm>.
- [12] CERN, «Muon Drift Tubes» [En línea]. Available: <https://cms.cern/detector/detecting-muons/muon-drift-tubes>. [Último acceso: 2023].
- [13] J. Puerta Pelayo, Estudio sobre las cámaras de tubos de deriva para el espectrómetro de muones del experimento CMS, Universidad Autónoma de Madrid, Spain, 2004.
- [14] C. I. De Lara Rodríguez, Test de validación de tarjetas electrónicas OBDT-Theta para la digitalización a alta resolución de pulsos analógicos, UNED, 2023.
- [15] CERN, «lpGBT Documentation: Release» 2022. [En línea]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2809058?ln=es>. [Último acceso: 2024].
- [16] CERN, «The GBT-SCA, a radiation tolerant ASIC for detector control and monitoring applications in HEP experiments» 2014. [En línea]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2158969?ln=es>. [Último acceso: 2024].
- [17] CERN, «Optical Data Transmission for LHC Experiment Phase-2 Upgrades» 2019. [En línea]. Available: <https://ep-news.web.cern.ch/content/optical-data-transmission-lhc-experiment-phase-2-upgrades>. [Último acceso: 2024].
- [18] Hydro, «Aleaciones para perfiles extruidos» [En línea]. Available: <https://www.hydro.com/es-ES/aluminium/products/perfiles-extruidos/aleaciones-para-perfiles-extruidos/>. [Último acceso: 2023].

- [19] Alumafel, Aluminio para la industria.
- [20] Swagelok Company, «Swagelok Tube Fitter's Manual» 2021.
- [21] Pressol, «Rácor Whitworth cilíndrico siguiendo DIN/ISO 228» [En línea]. Available: <https://www.pressol.com/informationen/spezifikationsdokumente-gewinde/zyndrisches-whitworth-rohrgewinde-nach-diniso-228/?lang=es>. [Último acceso: 2023].
- [22] KACHEMBO, «DOBLADORAS DE TUBO CNC CC60 Y CC90 NARGESA» 2023. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=tPmXOX2AAXg>.
- [23] Sarcon, Fujipoly, «Thermal interface materials» [En línea]. Available: <https://www.fujipoly.com/usa/products/sarcon-thermal-management-components/thermal-gap-filler-products/standard-performance-gap-filler-pads/>.
- [24] Panasonic, «Circuit board materials» [En línea]. Available: <https://na.industrial.panasonic.com/products/electronic-materials/lineup/circuit-board-materials/series/127605>. [Último acceso: 2024].
- [25] «MTP (MPO) to MT Optical Adapter» [En línea]. Available: <https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/1061141150>. [Último acceso: 2024].
- [26] Digikey, «Keystone Electronics 9902, Producto nº 36-9902-ND» [En línea]. Available: <https://www.digikey.es/es/products/detail/keystone-electronics/9902/317323?s=N4IgtTCBcDaIMwDYC0BOFAGMSByAREAugL5A>. [Último acceso: 2024].
- [27] E. Calvo Alamillo, Caracterización de las propiedades mecánicas de uniones pegadas sometidas a ambientes radiactivos en sistemas de alineación de detectores de partículas, Universidad de Cantabria, Spain, 2015.
- [28] K. Jezierska, A. Sękowska, W. Podraza, H. Gronwald y M. Łukowiak, «The effect of ionising radiation on the physical properties of 3D-printed polymer boluses» 2021.
- [29] J. Kočí, «We're launching a brand new Prusament PETG Tungsten 75% for radiation shielding use» 2023.
- [30] Go3dPrint, «El filamento de nylon y la impresión 3D» [En línea]. Available: <https://go3dprint.es/blog/el-filamento-nylon-y-la-impresion-3d/>. [Último acceso: 2024].
- [31] CERN, «The Use of Plastic and other Non-Metallic Materials at CERN with respect to Fire Safety and Radiation Resistance. IS41 Rev.1» 1995.
- [32] Formlabs, «Sinterizado selectivo por láser (SLS)» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>. [Último acceso: 2024].
- [33] Ultimaker, «S-Series, Ultimaker S5» [En línea]. Available: <https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s5/>. [Último acceso: 2024].
- [34] CIEMAT, «Instalaciones Radiactivas (IR)» [En línea]. Available: <http://rdgroups.ciemat.es/es/web/materiales/LaboratorioRadiactivo>. [Último acceso: 2024].
- [35] Cayfi, «Tienda de perfiles de PVC» [En línea]. Available: <https://cayfi.com/tienda-de-perfiles-de-pvc/perfiles-u-pvc/perfil-u-de-100x42x2-mm>. [Último acceso: 2024].

- [36] «LHC. The guide (facts and figures)» [En línea]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2809109/files/CERN-Brochure-2021-004-Eng.pdf?version=1>.
- [37] I. Redondo, «The CMS muon drift tubes HL-LHC Upgrade demonstrator at Run 3 start.» *Journal of Instrumentation* 18.01, nº C01072, 2023.
- [38] CIEMAT-Particle Physics, «Report of activities 2020-mid2023» 2023.
- [39] C. De Lara Rodríguez, J. Sastre Álvaro, A. Navarro Tobar, D. Redondo Ferrero, C. Fernández Bedoya, I. Redondo Fernández, J. León Holgado, R. Paz Herrera, D. Francia Ferrero, J. Mora Martínez y J. Cuchillo Ortega, «Sistema de pruebas para la electrónica de las cámaras de deriva de CMS para el HL-LHC» CIEMAT, Madrid, 2023.
- [40] L. Olantera, «Versatile Link+Transceiver Production Readiness» de *Topical Workshop on Electronics for Particle Physics*, 2019.
- [41] «Production of Cobalt-60» 2006. [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20060921161654/http://www.princeton.edu/~chirata/cobalt.html>. [Último acceso: 2024].
- [42] CERN, «Accelerating science» [En línea]. Available: <https://home.cern/>.
- [43] Adobe, «STL File» [En línea]. Available: <https://www.adobe.com/la/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html>. [Último acceso: 2024].
- [44] Adobe, «Archivos STEP» [En línea]. Available: <https://www.adobe.com/es/creativecloud/file-types/image/vector/step-file.html>. [Último acceso: 2024].

Anexos

Anexo 1. Lista de piezas mecánicas MiniCrate2

Ver tabla en la siguiente página.

LISTA DE PIEZAS MECÁNICAS MiniCrate2

NOMBRE**	NUMERACIÓN*	OBJETO	ud/Mic2	Total uds	RESPONSABILIDAD	Enviar a	Fecha finalización
CMS_MiC2_BaseProfile_MB1L	27.01.01.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB1R	27.01.02.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB2L	27.02.01.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB2R	27.02.02.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB3	27.03.01.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB4L	27.04.01.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB4R	27.04.02.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB4-4/10L	27.05.01.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB4-4/10R	27.05.02.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB4-9/11L	27.06.01.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_BaseProfile_MB4-9/11R	27.06.02.00.00		1		CIEMAT	Cada sitio de ensamblaje	Primero
CMS_MiC2_Cooling-U	27.00.00.00.01	Us	1	250	CIEMAT		
CMS_MiC2_Cooling-Connectors	27.00.00.00.02	cooling Swagelok connectors	4	1000	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Board	27.00.00.03.01	OBDT-theta		180	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame	27.00.00.03.02	OBDT theta frames		180	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top	27.00.00.03.06	fiber cap theta (6A) SC	1	180	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom	27.00.00.03.07	fiber cap theta (6B) TRG	1	180	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut	27.00.00.03.08	fiber cap theta nut	2	360	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fibers-Support	27.00.00.03.09	fibers support 3D printed	1	180	CIEMAT	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_ThetaTP_Cable		Theta-Testpulse cable		180	CIEMAT		
CMS_MiC2_Cable_Fixing_Plate	27.00.00.05.01	Fixing bar		3500	CIEMAT		
CMS_MiC2_MBx-Mounting-bracket	27.00.00.01.01	same for left and right	1	190	INFN BO	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_OBDT-Phi-Frame	27.00.00.02.02	OBDT Phi frames		630	INFN BO	Legnaro	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Phi-Fiber-Cap	27.00.00.02.05	fiber caps phi (6)	1	630	INFN BO	Legnaro	Primero
CMS_MiC2_EndCap_DSS	27.00.00.04.01	end plate for the DSS side	1	250	INFN TO	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_DSS-Board	27.00.00.04.02	DSS board	1	250	INFN TO	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_DSS_Cable		DSS cable	1	190	INFN TO	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
		Sector fibers		Aprox. 180	INFN TO	CERN?	Segundo
Muchos tipos	27.00.00.05.xx	MIC covers			INFN TO	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_OBDT-Phi-Board	27.00.00.02.01	OBDT-phi		630	Legnaro	Legnaro	Primero
		Input phi cables			Legnaro	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_MB1_Mounting_bracket	27.01.00.01.01	same for left and right	1	60	RWTH Aachen	RWTH Aachen	Segundo
CMS_MiC2_LV-Cable-Clamp	27.00.00.01.02	Cable clamp plastic for loop/bracket end with LV cable (L&R type) (4)	1	250	RWTH Aachen	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_EndCap_I2C	27.00.00.01.03	end plate, LV side, right Mic	1	250	RWTH Aachen	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_I2C-Board	27.00.00.01.04	RPC&Align board	1	250	RWTH Aachen	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_OBDT-Phi-Cover	27.00.00.02.03	OBDT phi covers		630	RWTH Aachen	Legnaro	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Phi-Rails	27.00.00.02.04	OBDT phi cover bars		630	RWTH Aachen	Legnaro	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Cover	27.00.00.03.03	OBDT theta covers		180	RWTH Aachen	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-Rails	27.00.00.03.04	OBDT theta cover bars		180	RWTH Aachen	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_OBDT-Theta-TestPulse-Board	27.00.00.03.05	Testpulse-theta board		180	RWTH Aachen	CIEMAT	Primero
CMS_MiC2_LV-Power_Cable	27.AA.0B.01.10	LV cable	1	250	RWTH Aachen	Cada sitio de ensamblaje	Segundo
CMS_MiC2_I2C_Cable		RPC& Align cables	1	60	RWTH Aachen	Cada sitio de ensamblaje	Segundo

*Numeración:

27: MiniCrate2 (Phase-2 Upgrade)

BB: Lado de servicios: 0= Left, 1 = Right

DD: Identificación numérica de pieza, aleatorio

27.AA.BB.CC.DD-XX

AA: Tipo de MiniCrate (MB1, MB2, ...); 00 si es para todos los tipos

CC: Sub-Ensamblaje: 0 = Base, 1 = LV-Entry, 2 = Phi, 3 = Theta, 4 = DSS, 5=Top-Cover

XX: versión id: A, B, C, etc.

** L significa LVphi, que el cable LV entra por el lado phi. R significa LVtheta, que el cable LV entra por el lado theta.

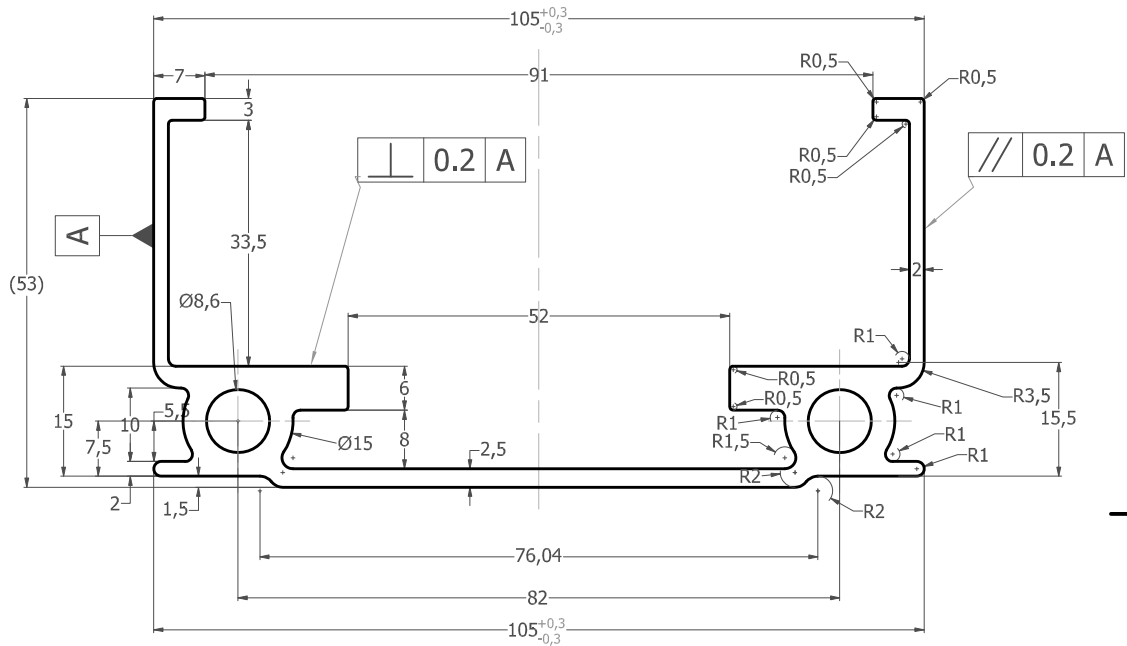
Anexo 2. Plano del perfil de extrusión de MiC2

Ver plano en la siguiente página.

TOLERANCIAS GENERALES/GENERAL TOLERANCES (mm)			
DIMENSIONES/DIMENSIONS	<=6	>6	>30
FABRICACION MEDIA/MEDIUM MACHINING	±0.1	±0.2	±0.3
			>120
			>315
			>1000
			>2000

REV	DESCRIPTION	Checked DRAWN	Signature DATE
V1.	Redesign of the profile.	E. Calvo.	25-06-2019.
V2.	Redesign of the profile.	E. Calvo.	03-12-2019.
V3.	Redesign of the profile.	E. Calvo.	03-02-2022.
V4.	Redesign of the profile.	E. Calvo.	06-02-2022.

Custom extrusion profile (Extrusión según plano)



DISEÑO, RUGOSIDAD, TOLERANCIAS SEGUN NORMA ISO
DRAWING, RUGOSITY, TOLERANCES ACCORDING TO ISO STANDARDS
Este dibujo no puede ser utilizado en usos comerciales, salvo autorización escrita.
This drawing may not be used for commercial purposes without written authorisation.



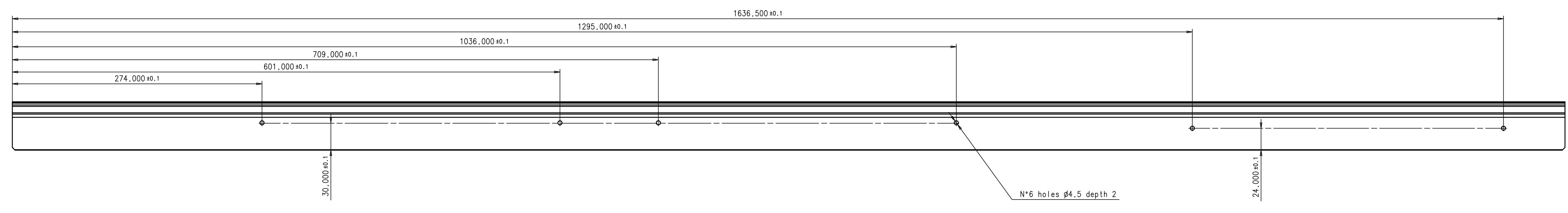
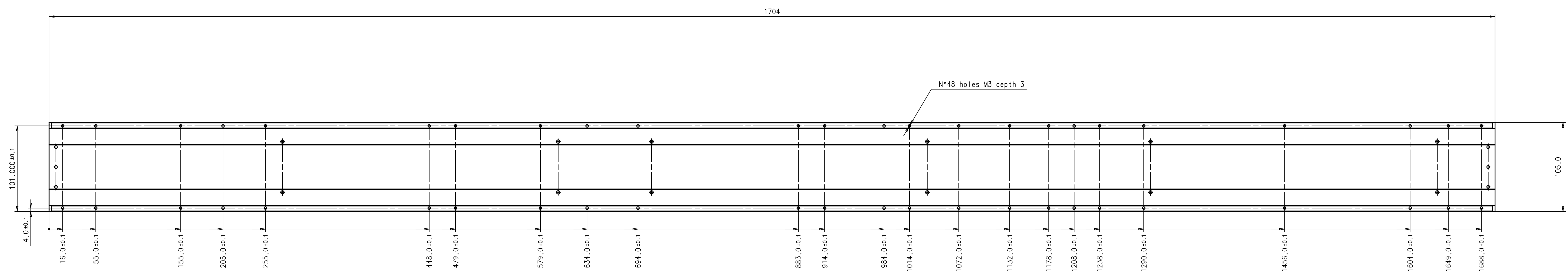
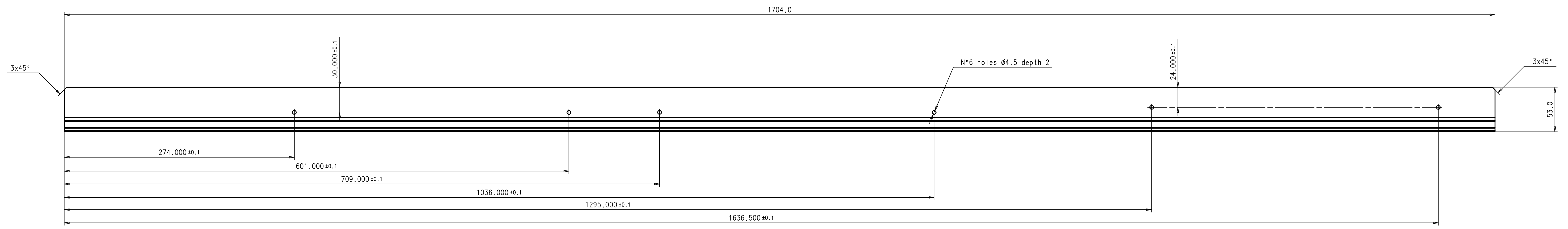
Perímetro de extrusión/Extrusion perimeter (external+internal): $477,353 + 2x(27,018) = 531,389$ mm.
Sección extruida/Extrusion section: 791,726 mm².
Peso/weight: 2,1377 kg/m.
Aleación/Alloy: EN AW 6060 /6063.
Tratamiento térmico/heat treatment: T6.
Anodizado/Anodized: Anodizado sulfúrico/Sulfuric Acid Anodization (SAA).

RUGOSIDAD/RUGOSITY	
ANTIGUA/OLD	Nº
NUEVA/NEW	Nº
Ra. (micras)	
	0.05
	0.4
	3.2
	12.5

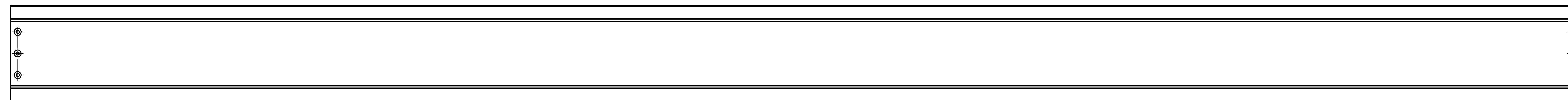
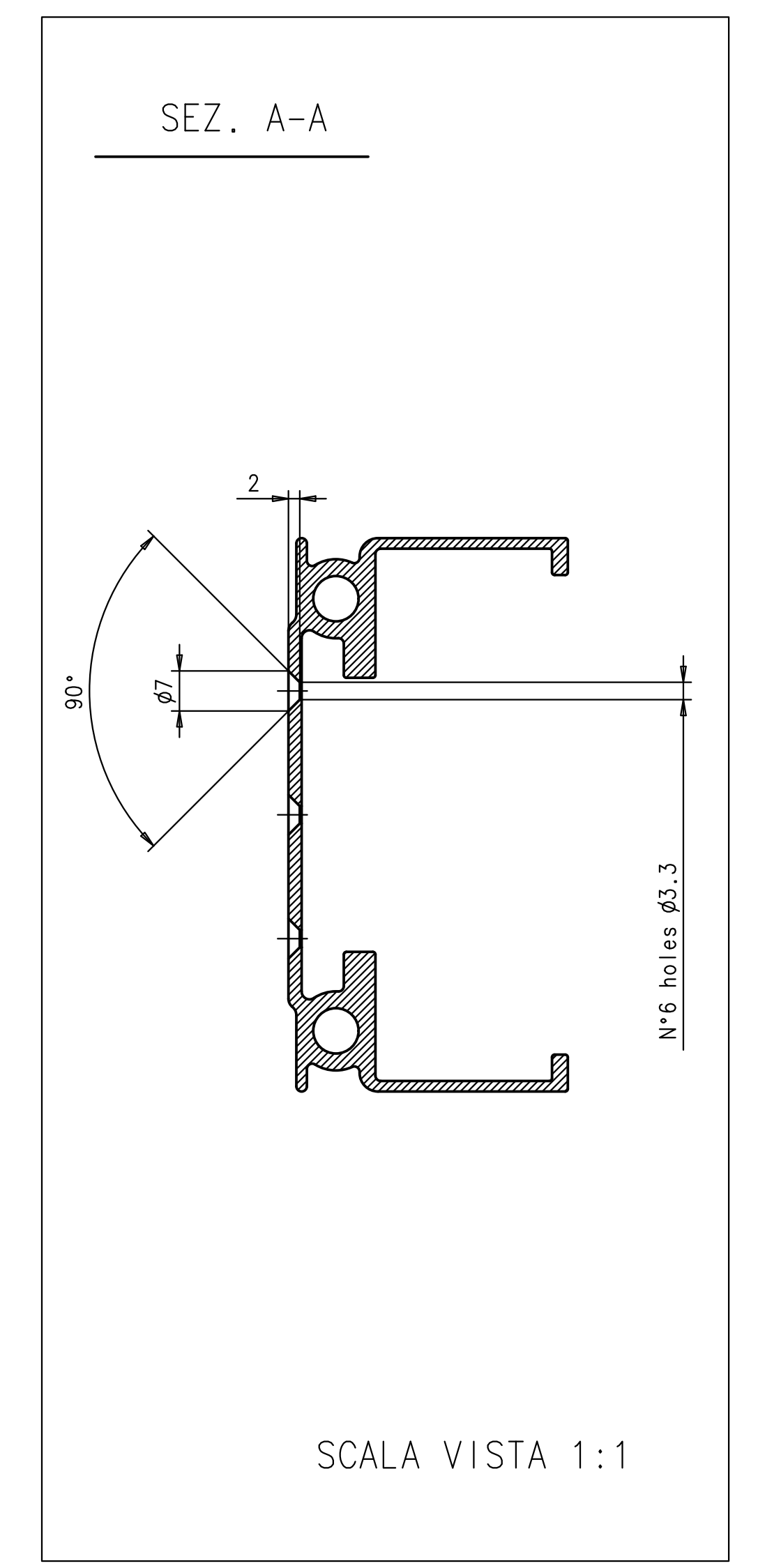
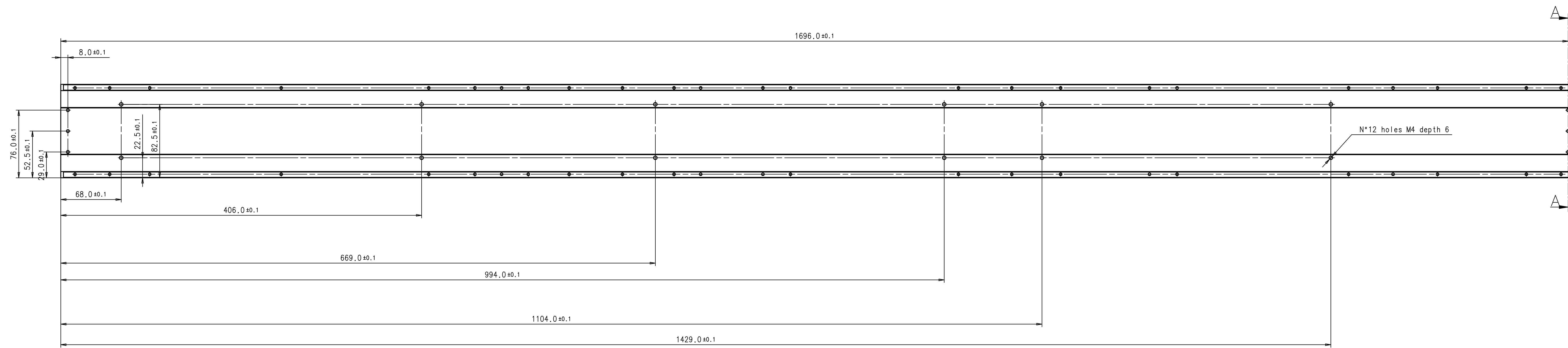
550 m.	Piece 1 (Custom extrusion profile)	EN AW 6060/6063 (T6)	3	CMS_UG_MC_P1	3	
Nº units	Description	Observations	Material	Nº.Ref.	File Name	Draw N.
NOMBRE DE ARCHIVO(File name) CMS_UG_MC_P1.dwg		Nº FSCM	HOJA(Sheet) 1 of 1	ESCALA 1:1	E-mail enrique.calvo@ciemat.es	
TAMAÑO A4		FECHA(Date) 3-March-2017				
DIBUJADO/Disenado Enrique Calvo Alamillo		COMPROBADO(Controlled) Cristina Fdez/Ignacio Redondo		CMS-Upgrade MiniCrate Extrusion profile (Piece 1)		
DIRECCION FICHERO CAD(CAD File address): http://www.wae.ciemat.es/~calvo/CMS/Upgrade/MiniCrate		REALIZADO(Realized) Enrique Calvo Alamillo				
REV	Phone: ++34 91 346 6587	Nº Ref. DIBUJO(Ref. Draw Number)				
CONTRATO Nº	Unids. Lineal (mm) (Units)Angular (decimal degrees)	CMS_UG_MC_P1				

Anexo 3. Plano para el mecanizado de los perfiles MB1

Ver planos en las siguientes páginas.



DATE:	DRAWN:	CHECKED:	APPROVED:	QUANTITY:	REV.:
03/23	C. Guandalini		M. Guerzoni		
MATERIAL: Aluminum			SCALE: 1:2	ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE	
DRAWING TITLE: CMS_MiC2_BaseProfile_MB1			GEN. TOLL.: ±0.1	I.N.F.N. Sez. di Bologna	
ASSEMBLY NAME: CMS_MiC2_MB1 Minirate			GEN. RAD.:		
PROJECT: CMS Dt Upgrade			DRAWING NUMBER: 27.01.01.00.00 CMS	SIZE: A0	SHEET: 1/2



DATE:	DRAWN:	CHECKED:	APPROVED:	QUANTITY:	REV.:
11/22	C. Guandalini		M. Guerzoni		
MATERIAL: Aluminum			SCALE: 1:2	ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE	
DRAWING TITLE:			GEN. TOLL.: ±0,1	I.N.F.N.	
CMS_MiC2_BaseProfile_MB1			GEN. RAD.:		
ASSEMBLY NAME:			DRAWING NUMBER:	Sez. di Bologna	
CMS_MiC2_MB1 mictrate			27.01.01.00.00 CMS	SIZE: A0	
PROJECT: CMS Dt Upgrade				SHEET: 2/2	

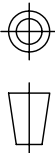
Anexo 4. Plano archivado de la tubería en forma de “U” de los Minicrate Legacy (Pipe 6)

Ver plano en la siguiente página.



ORGANISATION EUROPEENNE POUR
LA RECHERCHE NUCLEAIRE
EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
GENEVE

Ce dessin ne peut être utilisé à des fins commerciales sans autorisation écrite
This drawing may not be used for commercial purposes without written authorisation



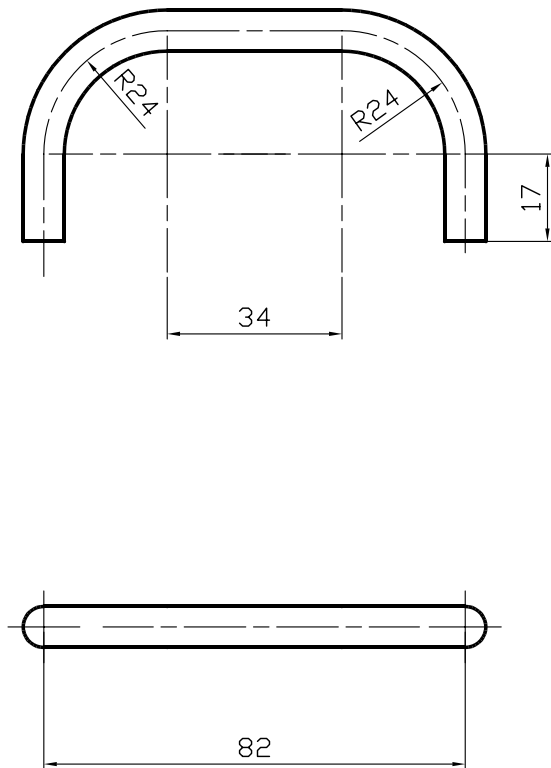
PROJECTION

DESSIN, RUGOSITE, TOLERANCES
SELON NORMES ISO
DRAWING, RUGOSITY, TOLERANCES
ACCORDING TO ISO STANDARDS

GENERAL
TOLERANCES
GENERAL

DIMENSION	<=6	> 6	> 30	> 120	> 315	>1000	>2000
USINAGE MOYEN/MEDIUM MACHINING	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 0.8	± 1.2	± 2
MECANO. SOUDURE/WELDED STRUCTURE	± 0.5	± 1	± 2	± 3	± 5	± 7	± 10

IND.	DATE	NOM/NAME	ZONE	MODIFICATION
7				
6				
5				



Pipe 6	ECHELLE SCALE	DES/DRA.	N.Smiljkovic	2003-06-01
	1:1	CONTROLLED		
		RELEASED		
		APPROVED		
		Pipe 6.dwg		
		REPLACE/REPLACES		
	NON VALABLE POUR EXECUTION NOT VALID FOR EXECUTION	QAC		
			SIZE	IND.
			3	

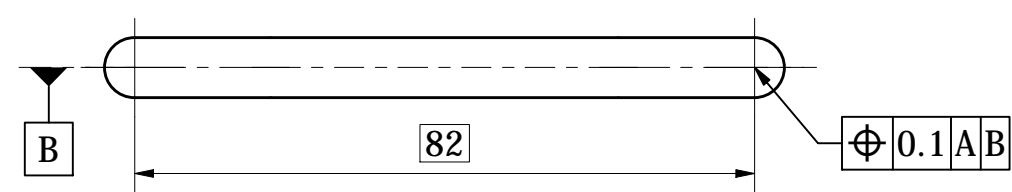
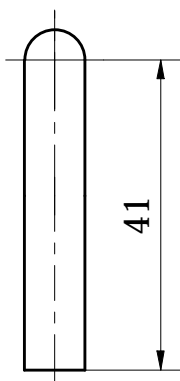
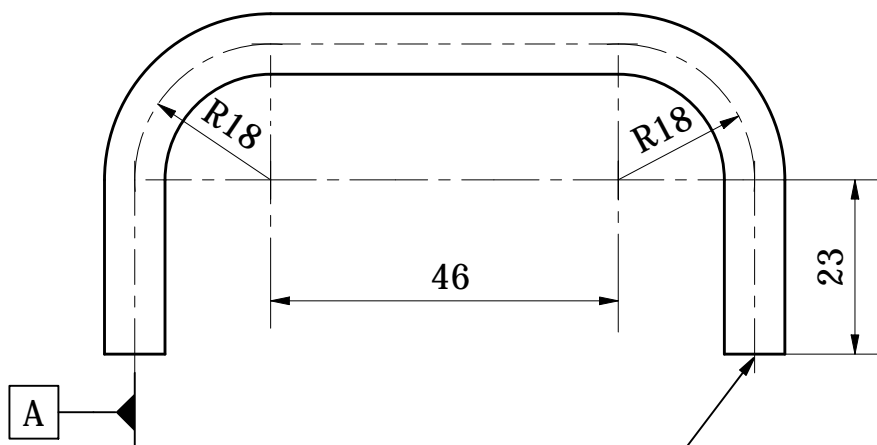
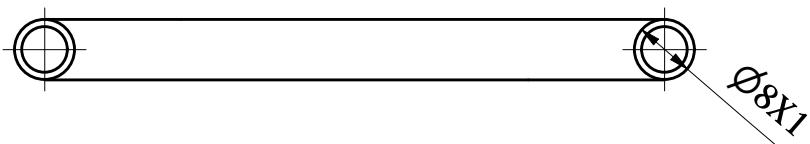
7 6 5 4 3 2 1

e
d
c
b
a

Anexo 5. Planos de fabricación

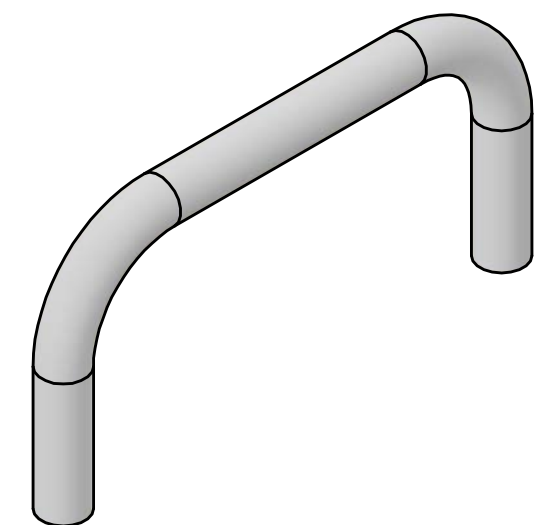
Cada pieza representada tiene un número de identificación que coincide con el número de plano. Por tanto, los planos de fabricación se pueden ver en las siguientes páginas con la siguiente identificación:

- Plano de Cooling-U: 27.00.00.00.01 (1 página)
- Plano de OBDT-Theta-Frame: 27.00.00.03.02 (7 páginas)
- Plano de OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top: 27.00.00.03.06 (1 página)
- Plano de OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom: 27.00.00.03.07 (1 página)
- Plano de OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut: 27.00.00.03.08 (1 página)
- Plano del prototipo de protection covers en chapa: 27.00.00.05.00-A_Prot40cm (1 página)



$\parallel 0.1 A$

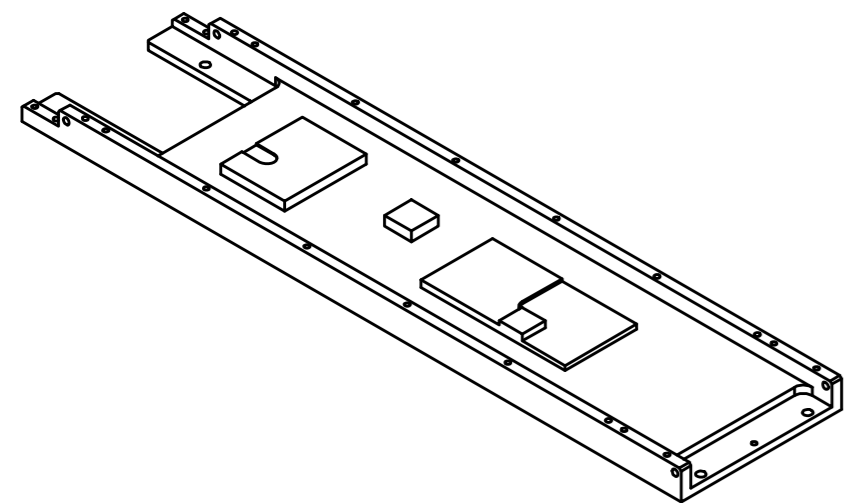
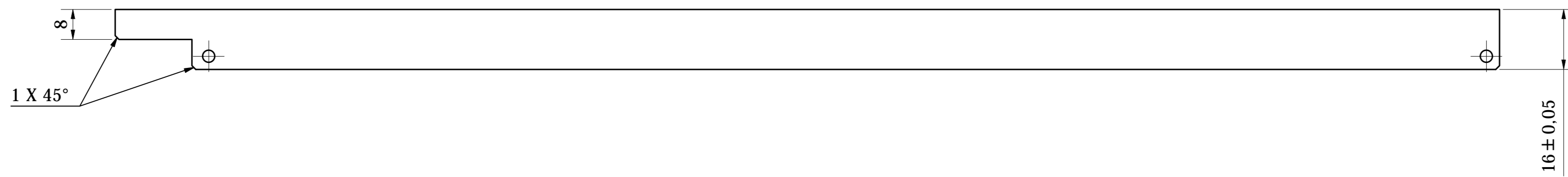
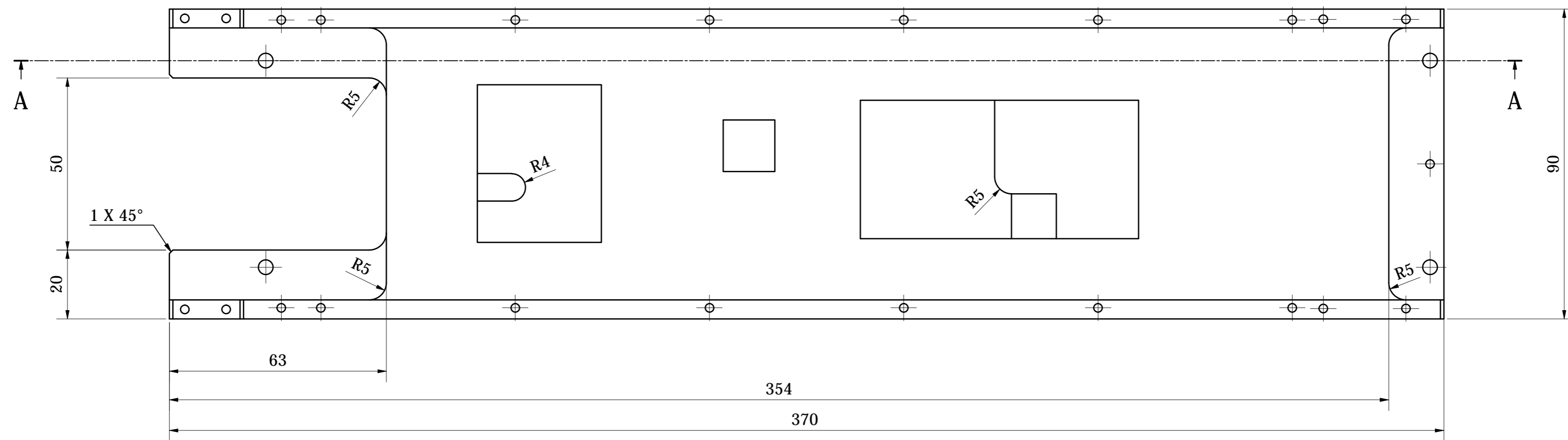
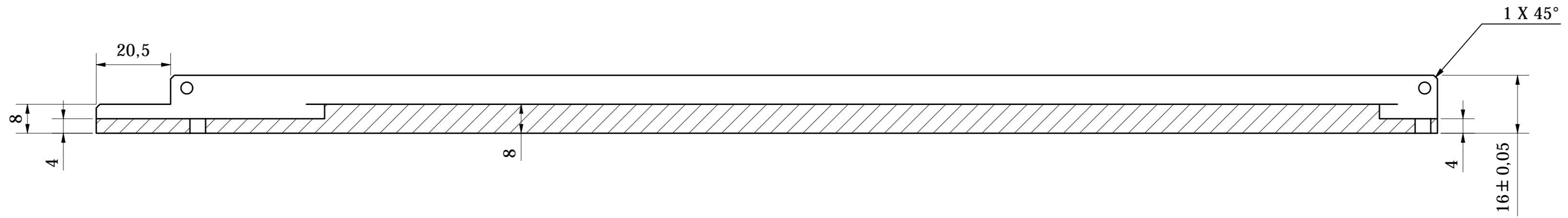
$\text{Ø} 0.1 A B$



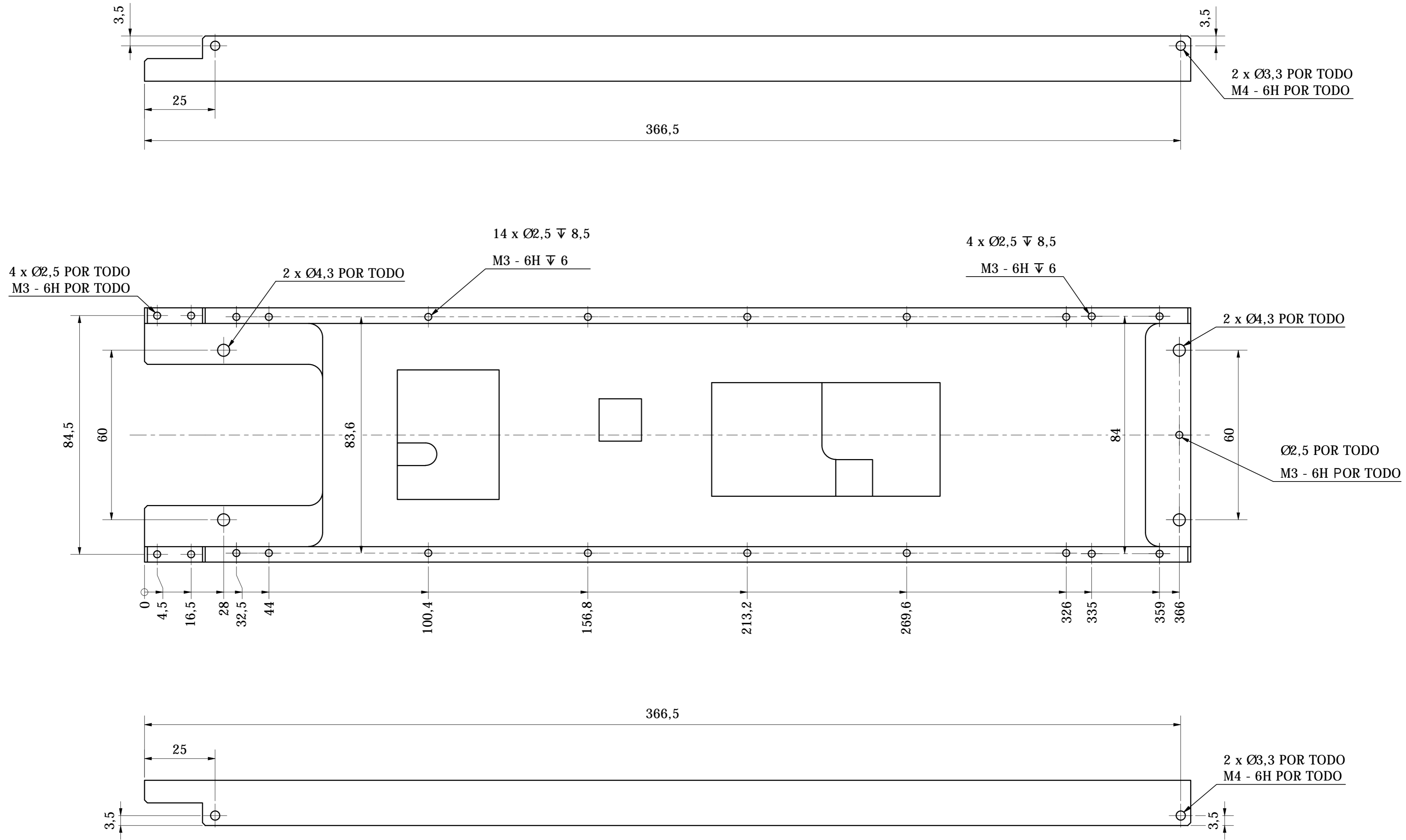
Using 148,55mm long tube of $\text{Ø}e=8\text{mm}$ $\text{Ø}i=6\text{mm}$.

Material: Stainless Steel AISI 316 (EN 1.4401)		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 08/06/2023	
SCALE		Name	Project: CMS Upgrade		
1 : 1	Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:		
Size A4	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
		SHEET	MiC2_Cooling-U (27.00.00.00.01)		
		1 / 1			

A-A (1 : 1)



Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 29/09/2023	
SCALE 1 : 1	Name	Project: CMS-Upgrade			
Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:			
Size A2	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
			SHEET 1 / 7	CMS_Mic2_OBDT-Theta-Frame 27.00.00.03.02	



4 x Ø2,5 POR TODO
M3 - 6H POR TODO

2 x Ø4,3 POR TODO

14 x Ø2,5 ∇ 8,5

M3 - 6H ∇ 6

4 x Ø2,5 ∇ 8,5

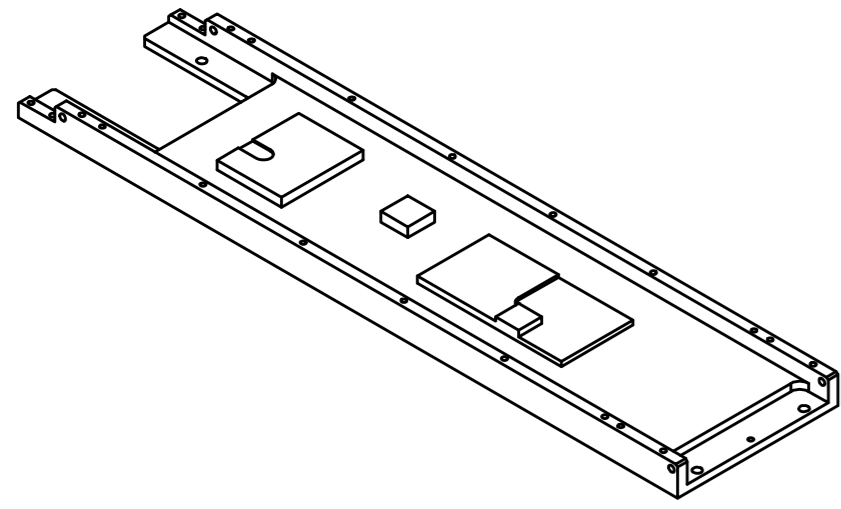
M3 - 6H ∇ 6

2 x Ø3,3 POR TODO
M4 - 6H POR TODO

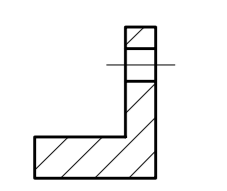
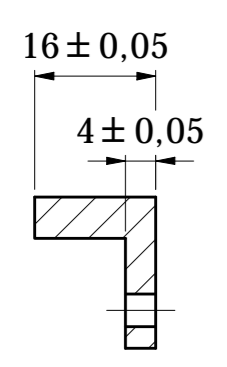
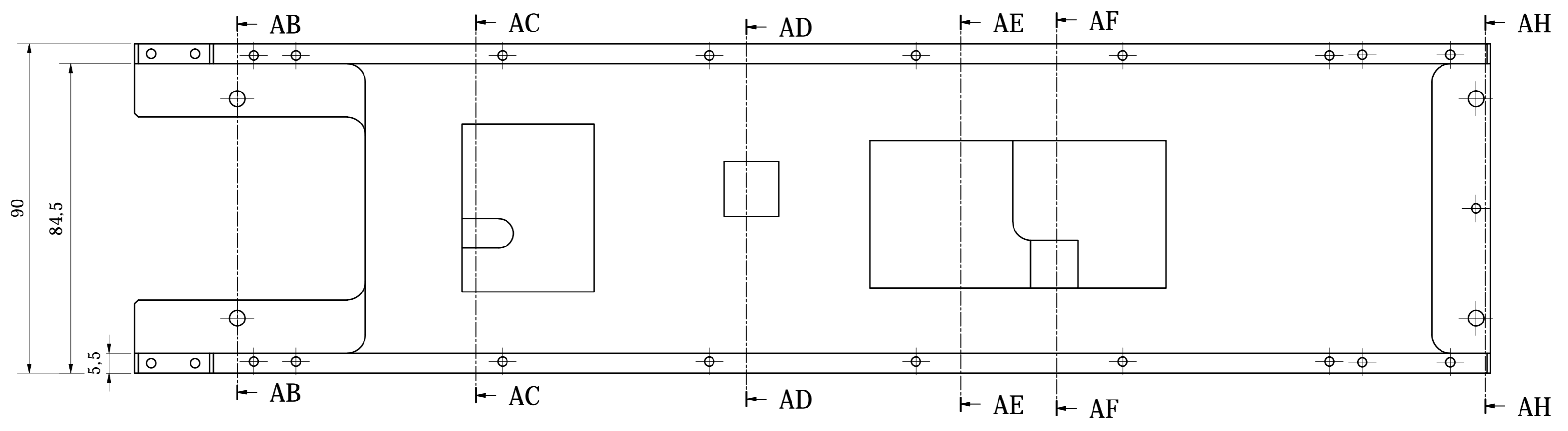
2 x Ø4,3 POR TODO

Ø2,5 POR TODO
M3 - 6H POR TODO

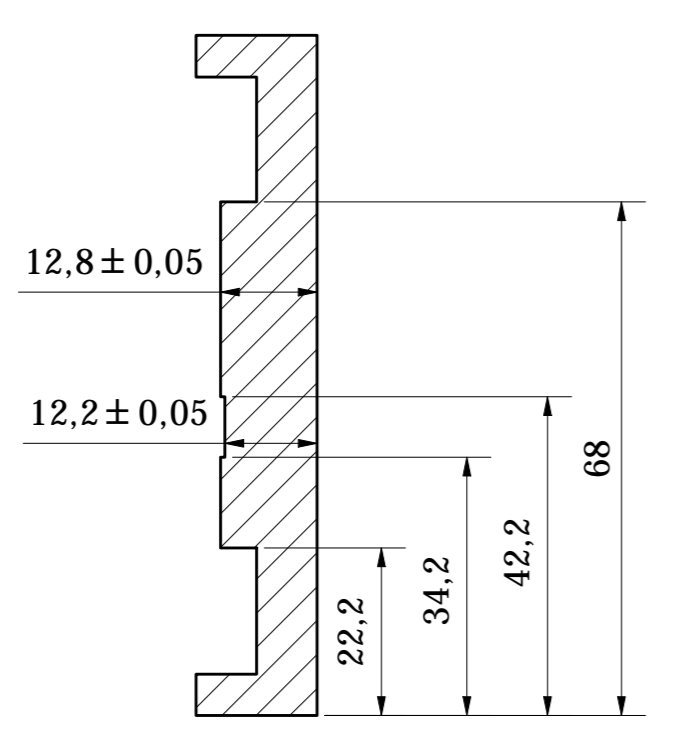
2 x Ø3,3 POR TODO
M4 - 6H POR TODO



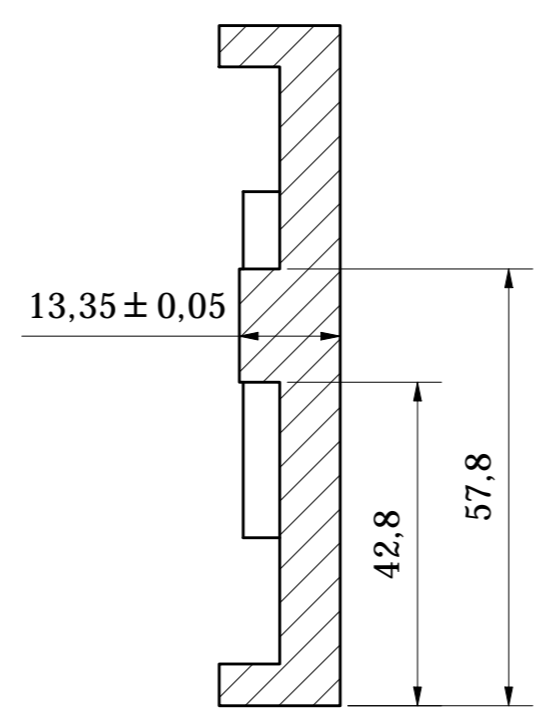
Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 29/09/2023	
SCALE 1 : 1	Name	Project: CMS-Upgrade			
Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:			
Size A2	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
		SHEET 2 / 7	CMS_Mic2_OBDT-Theta-Frame 27.00.00.03.02		



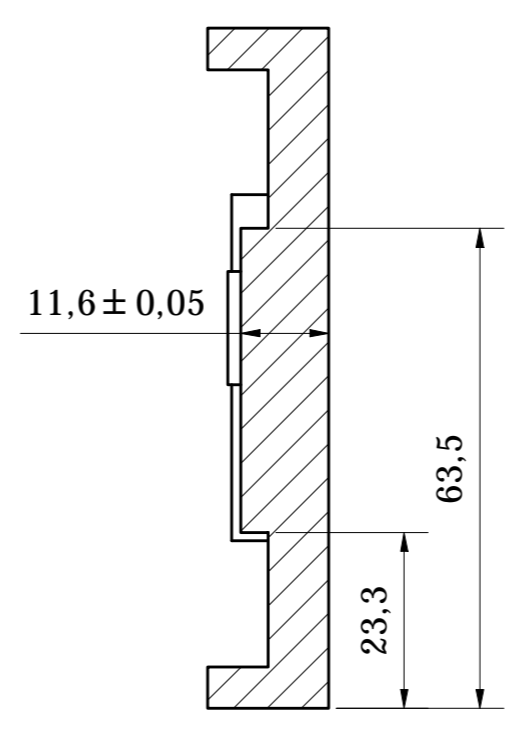
AB-AB



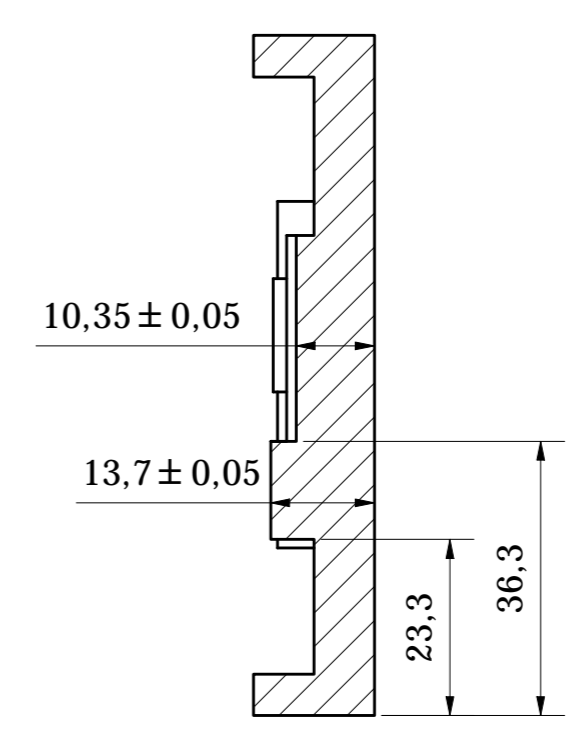
AC-AC



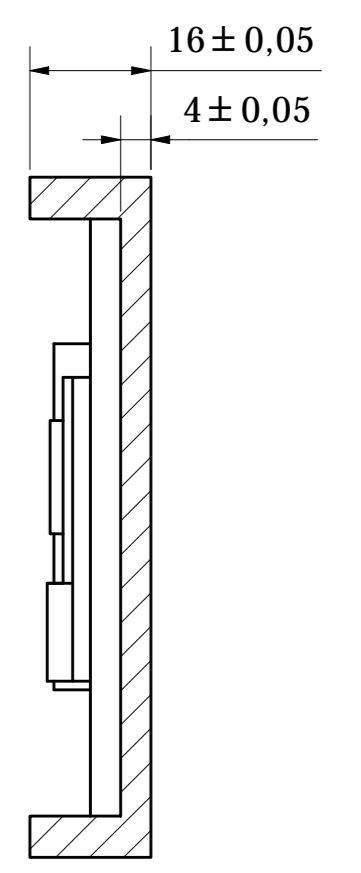
AD-AD



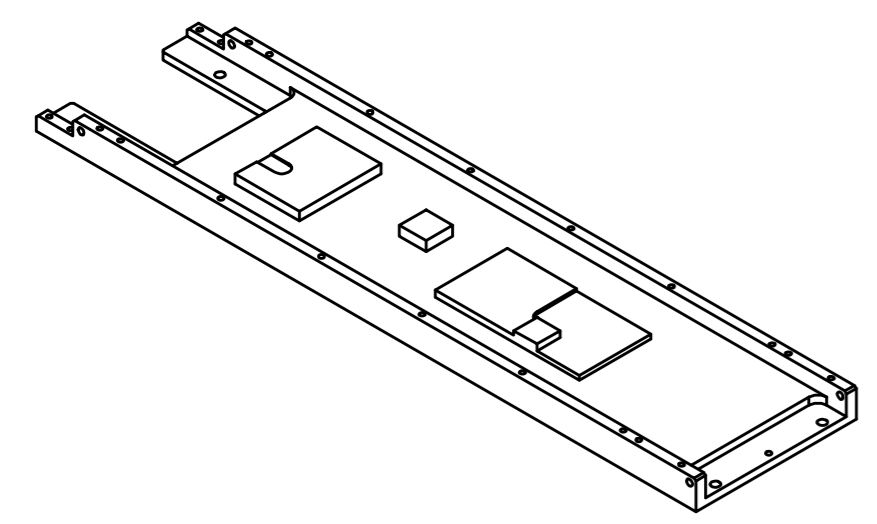
AE-AE



AF-AF



AH-AH

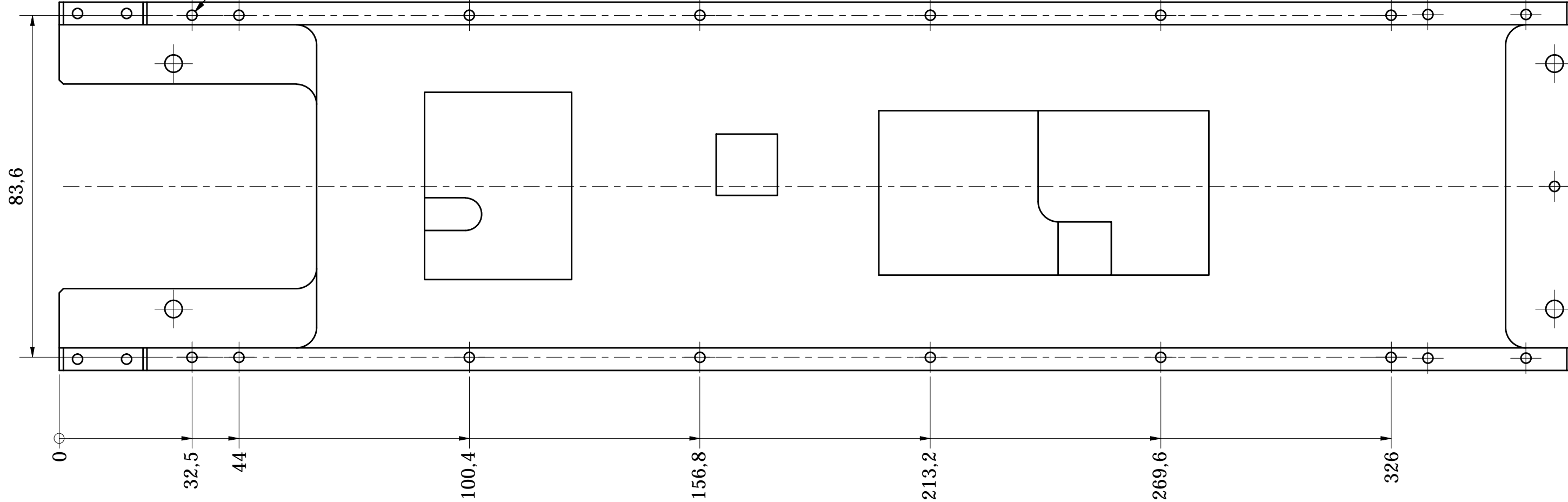


Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 29/09/2023	
SCALE 1 : 1	Name	Project: CMS-Upgrade			
Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:			
Size A2	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
		SHEET 3 / 7	CMS_Mic2_OBDT-Theta-Frame 27.00.00.03.02		

ICD 1: OBDT Theta

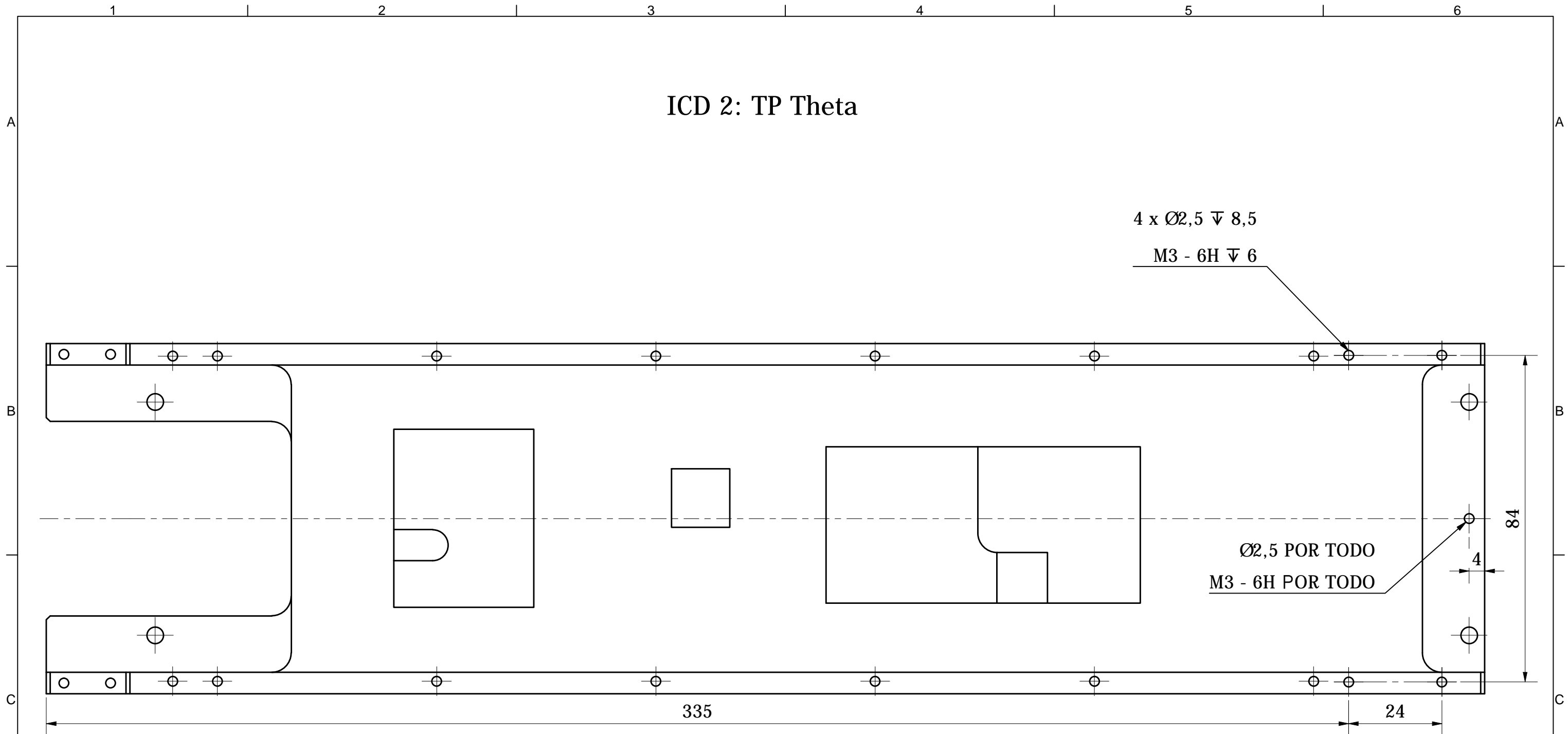
14 x Ø2,5 √ 8,5

M3 - 6H √ 6



Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 29/09/2023	
SCALE 1 : 1	Drawn	Name Jesús Cuchillo Ortega	Project: CMS-Upgrade		
Size A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya	File name:		
			SHEET 4 / 7	Assembly name: CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame 27.00.00.03.02	

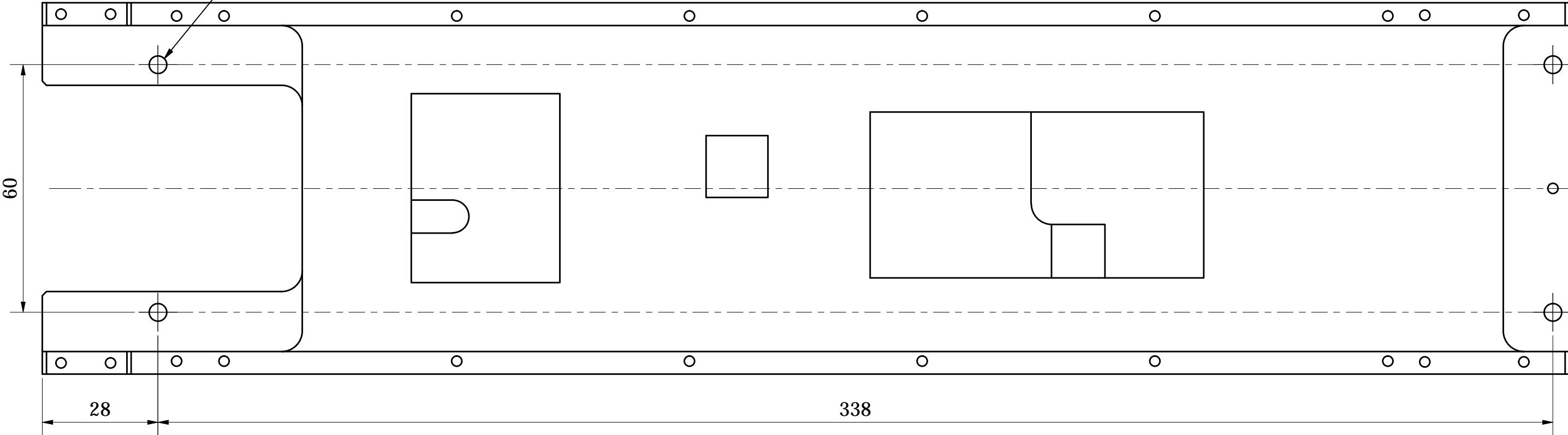
ICD 2: TP Theta



Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 29/09/2023	
SCALE 1 : 1	Drawn	Name Jesús Cuchillo Ortega	Project: CMS-Upgrade		
Size A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya	File name:		
			SHEET 5 / 7	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame 27.00.00.03.02	

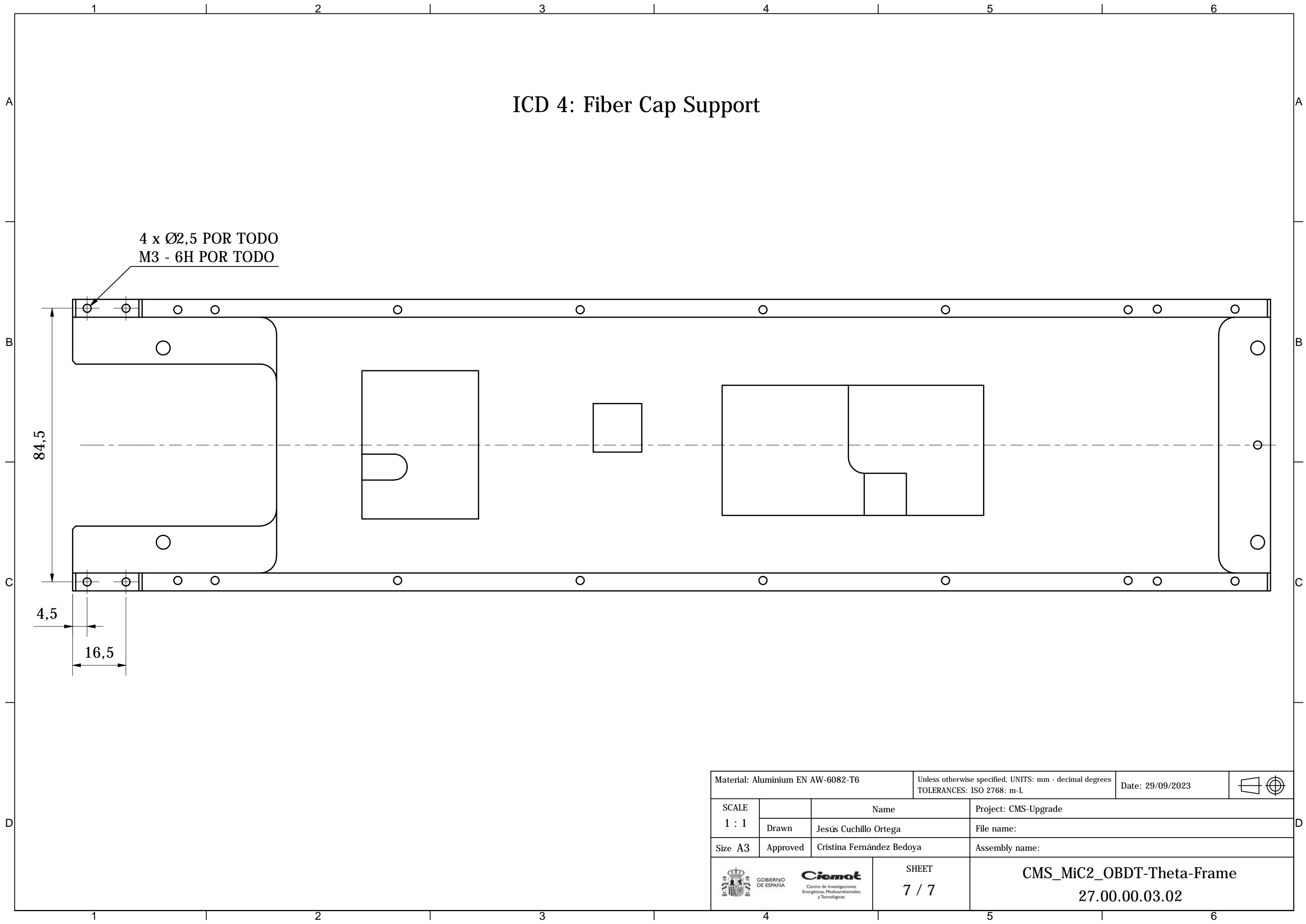
ICD 3: Minicrate

4 x Ø4,3 POR TODO

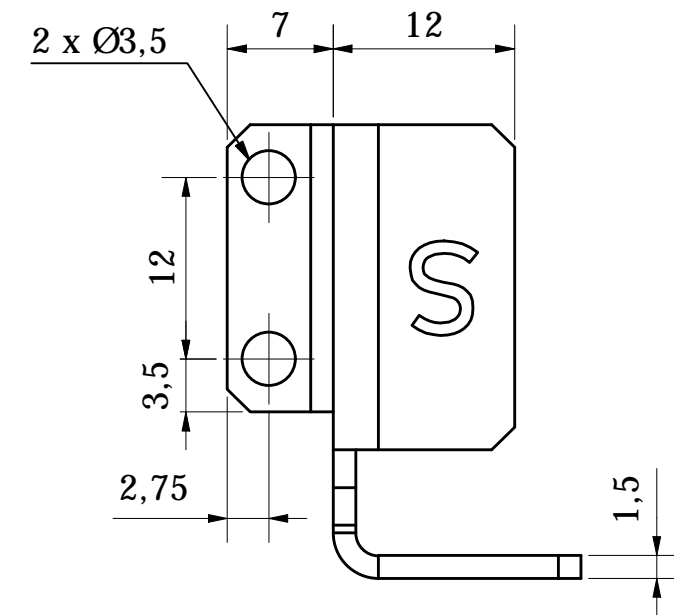
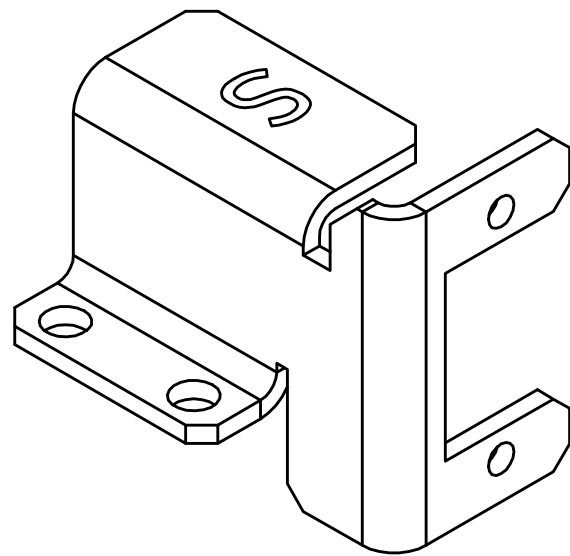
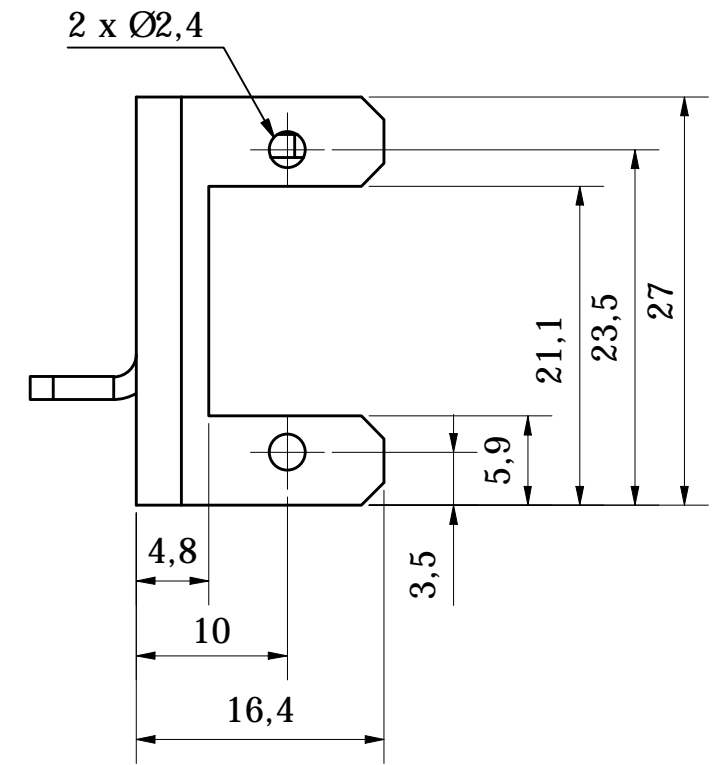
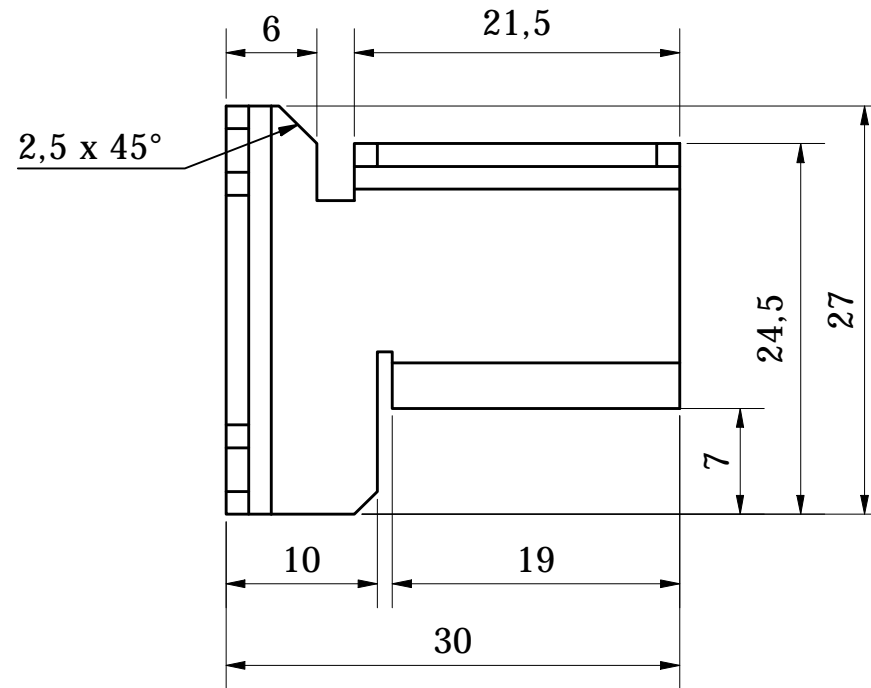
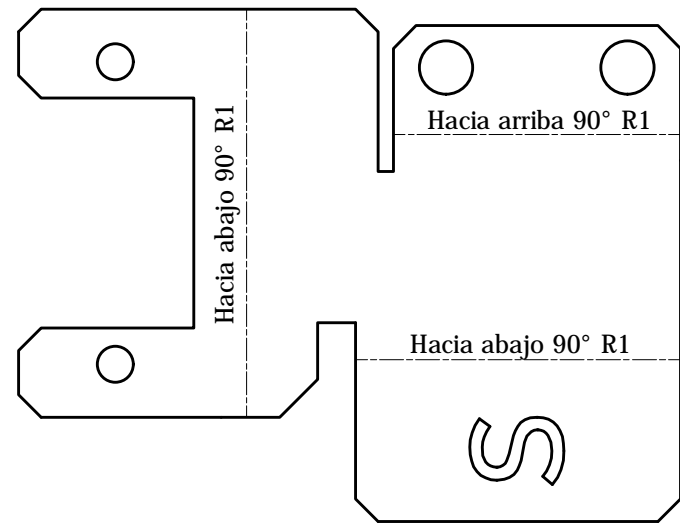


Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees		Date: 29/09/2023	
TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Project: CMS-Upgrade		File name:	
SCALE 1 : 1	Drawn	Name Jesús Cuchillo Ortega	Assembly name:		
Size A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya			
			SHEET 6 / 7	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame 27.00.00.03.02	

ICD 4: Fiber Cap Support

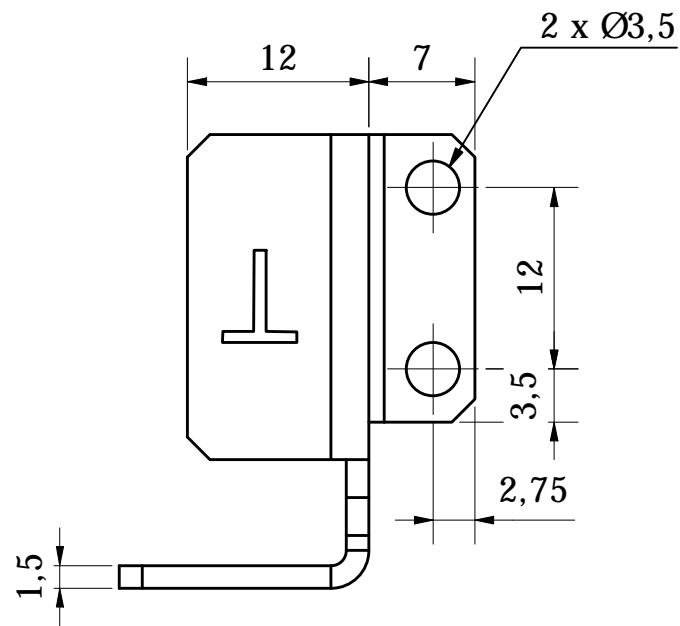
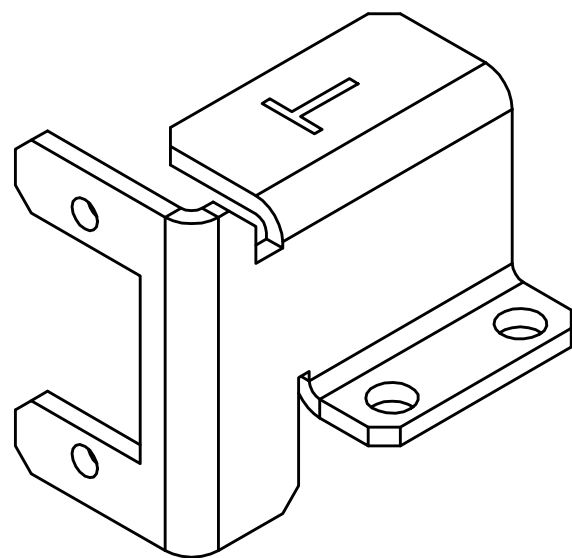
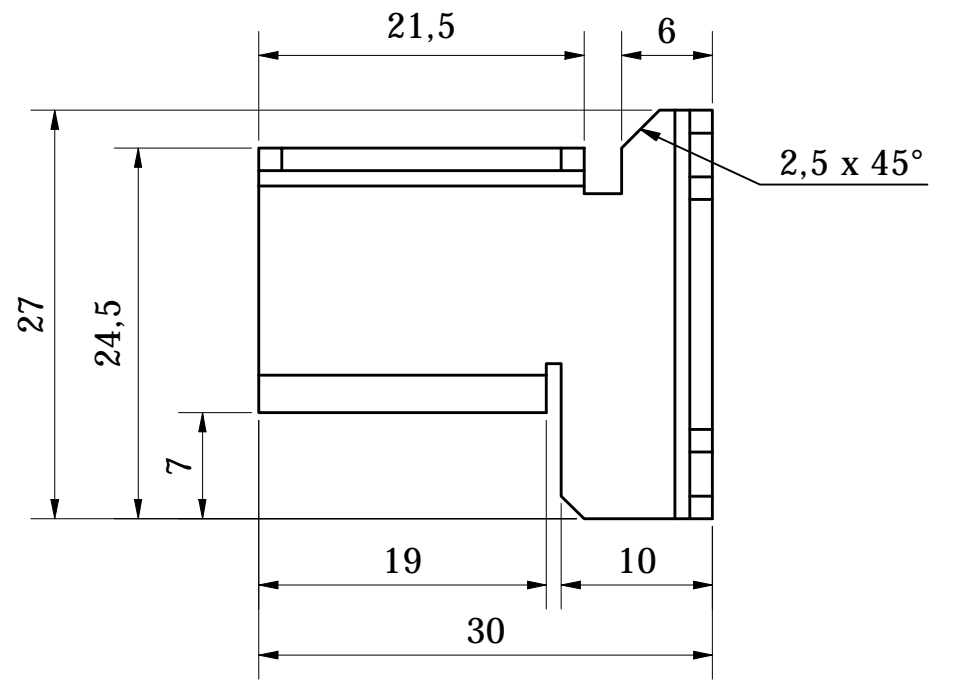
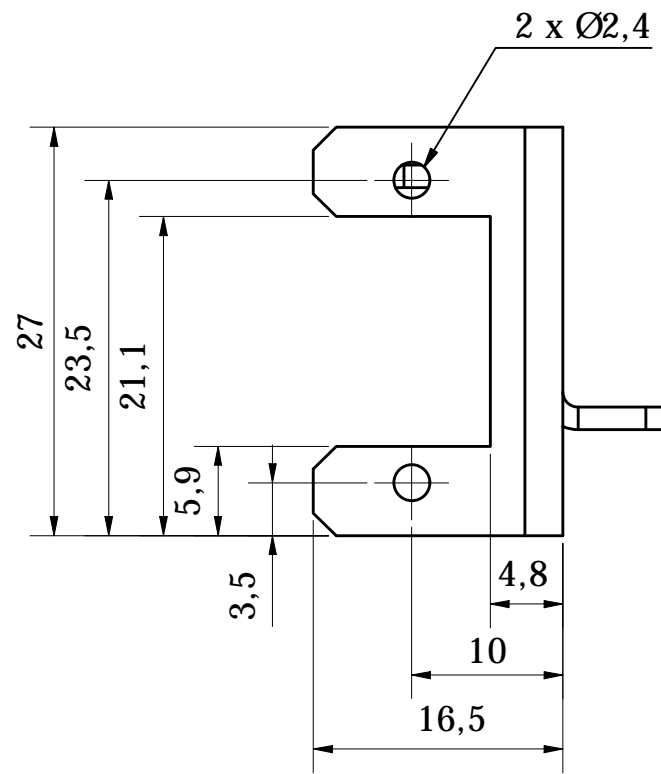
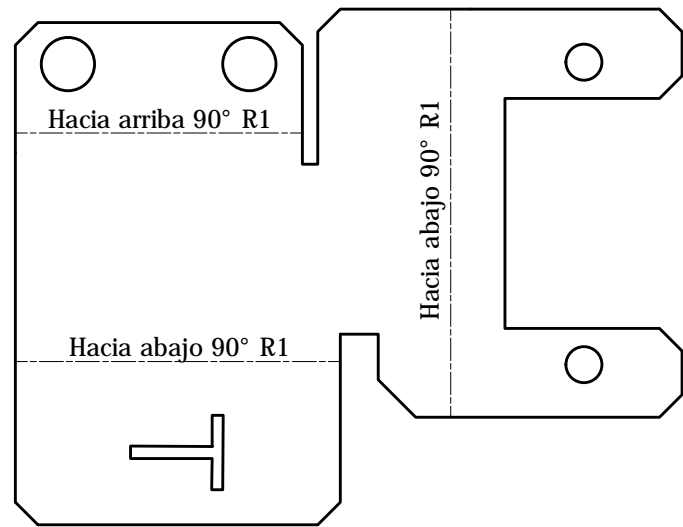


Material: Aluminium EN AW-6082-T6		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 29/09/2023	
SCALE		Name	Project: CMS-Upgrade		
1 : 1	Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:		
Size A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
			SHEET	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame	
			7 / 7	27.00.00.03.02	



All Chamfers are 1,5 x 45° except for the one that is annotated.

Material: Aluminium EN AW-5754-H24		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 28/03/2023	
SCALE 2 : 1		Name	Project: CMS-Upgrade		
	Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:		
Size A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
			SHEET 1 / 1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top 27.00.00.03.06	



All Chamfers are 1,5 x 45° except for the one that is annotated.

Material: Aluminium EN AW-5754-H24		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees TOLERANCES: ISO 2768: m-L		Date: 15/06/2023	
SCALE		Name	Project: CMS-Upgrade		
2 : 1	Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:		
Size A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
			SHEET	CMS_Mic2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom	
			1 / 1	27.00.00.03.07	

1

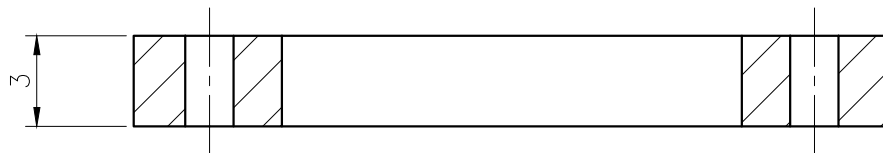
2

3

4

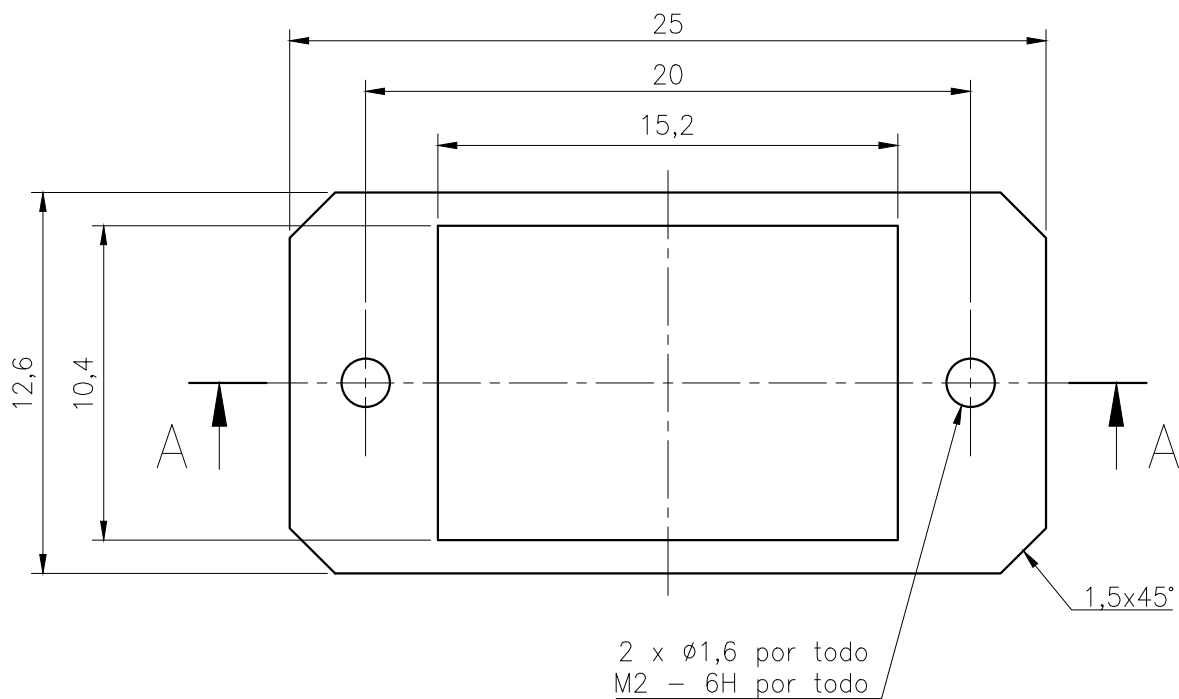
A

A-A



B

C



D

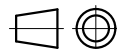
E

F

Material: Aluminium EN AW-5754-H24

Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees
TOLERANCES: ISO 2768: m-L

Date: 27-04-2023



SCALE

4:1

Name

Project: CMS

Drawn

Jesús Cuchillo Ortega

File name: CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut.dwg

Size: A4

Approved

Cristina Fernández Bedoya

Assembly name:

GOBIERNO
DE ESPAÑA

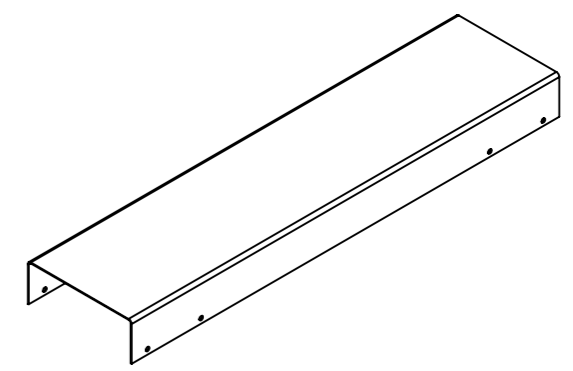
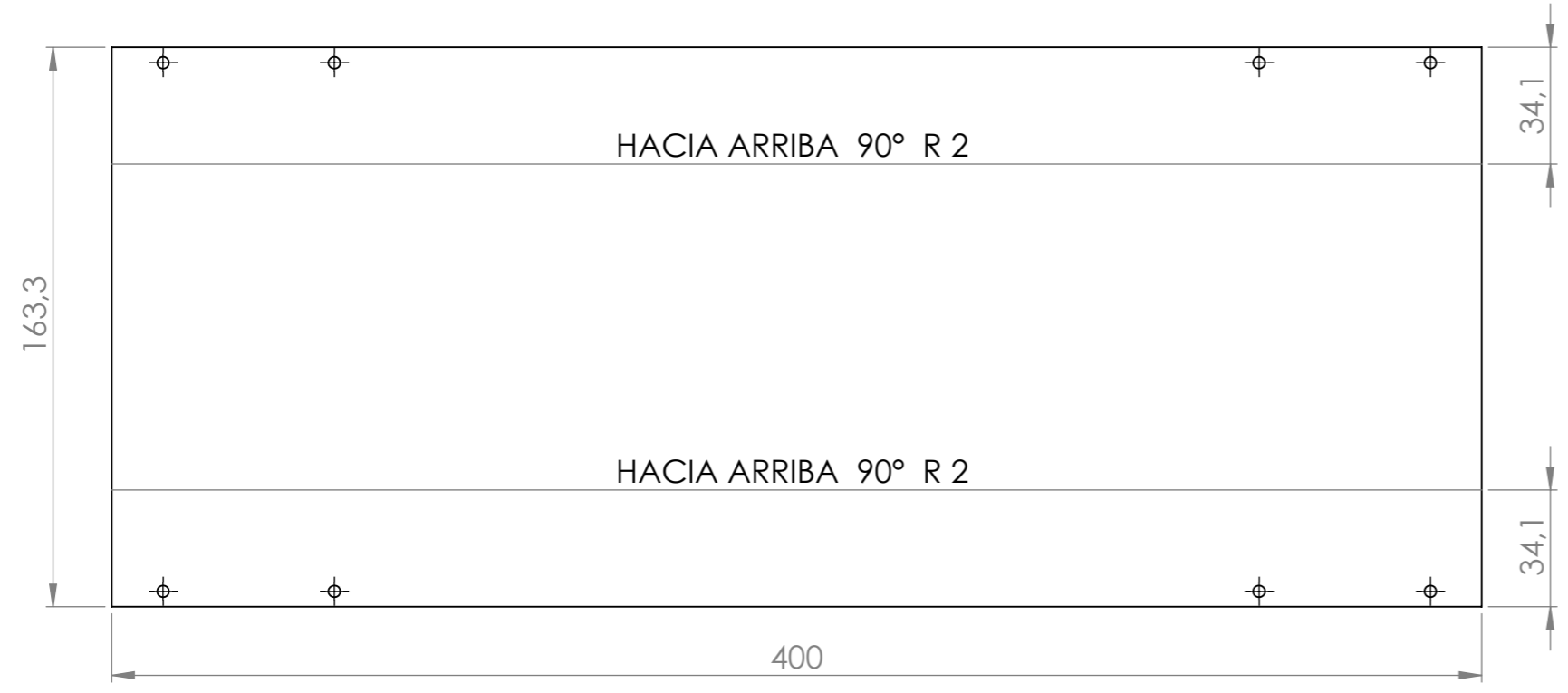
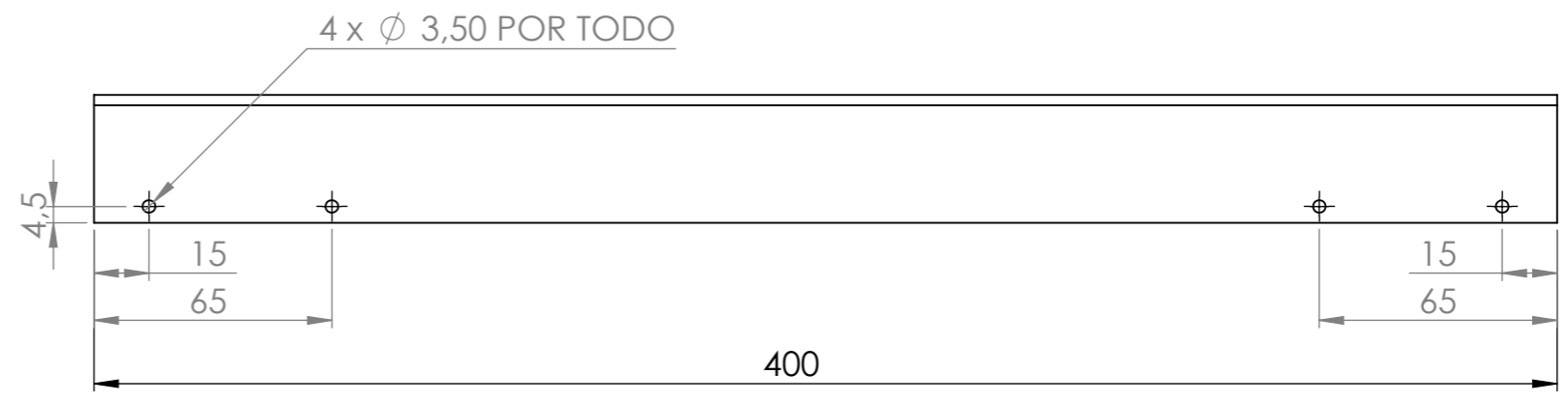
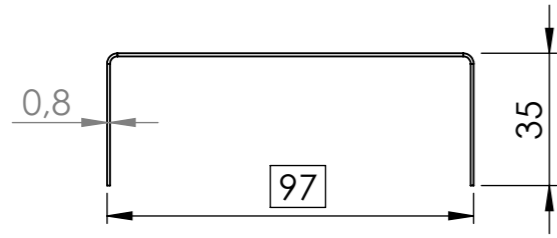
Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

SHEET N°

1/1

CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut

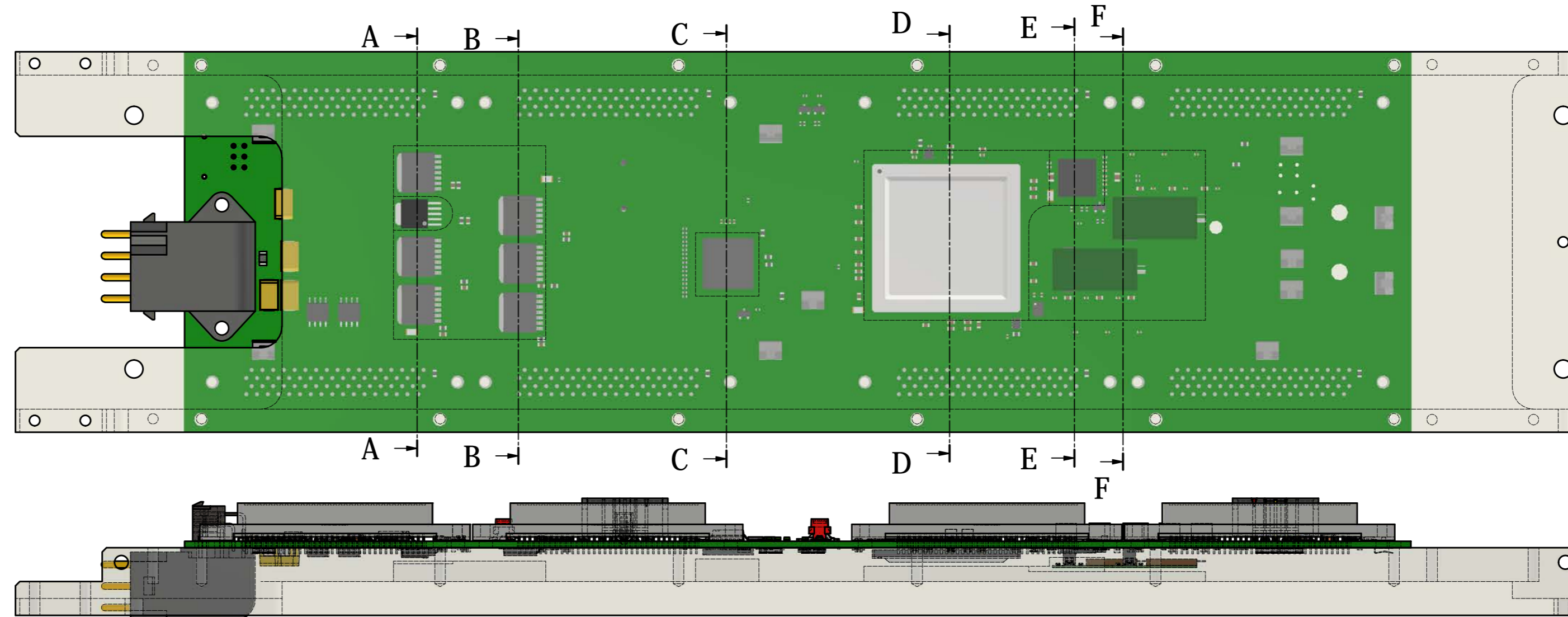
27.00.00.03.08



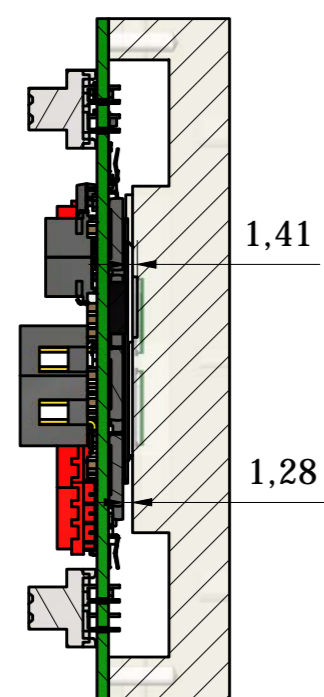
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ. J. CUCHILLO				11/10/23		PROTOTIPO PROTECTION COVERS EN CHAPA			
VERIF.						N.º DE DIBUJO			
APROB.						27.00.00.05.00-A_Prot40cm			
FABR.						MATERIAL:		A3	
CALID.						PESO:		ESCALA:1:2	
								HOJA 1 DE 1	

Anexo 6. Plano con secciones para marcar las elevaciones del OBDT-Theta frame

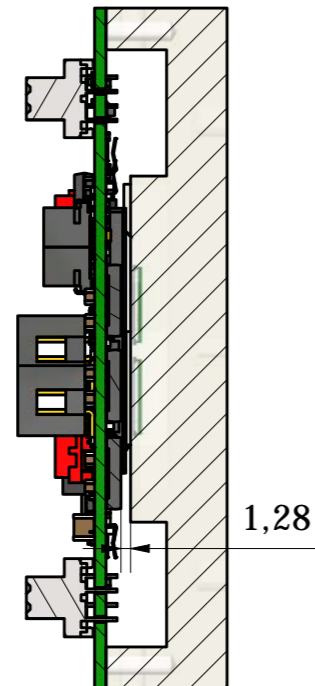
Ver en la siguiente página.



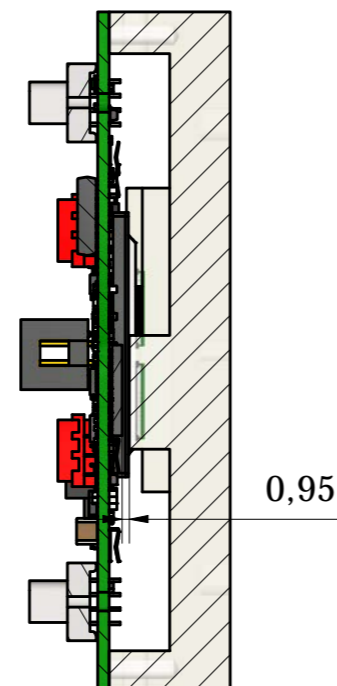
A-A (1 : 1)



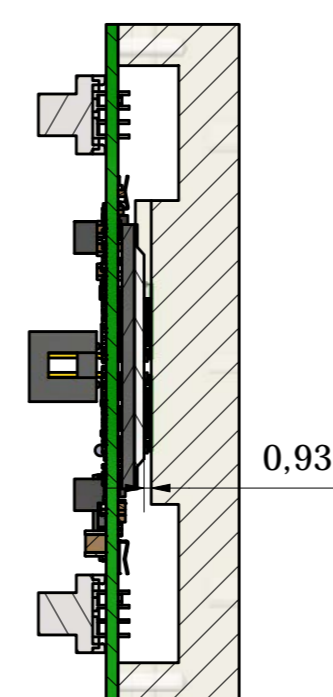
B-B (1 : 1)



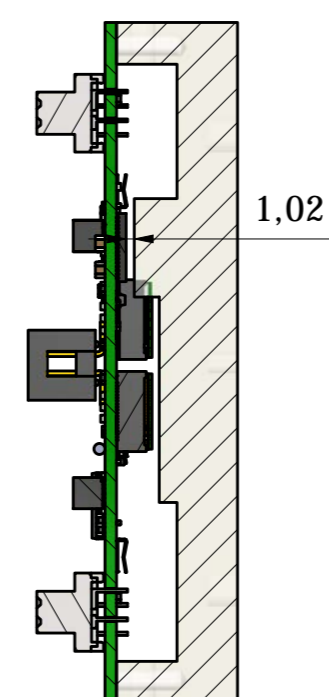
C-C (1 : 1)



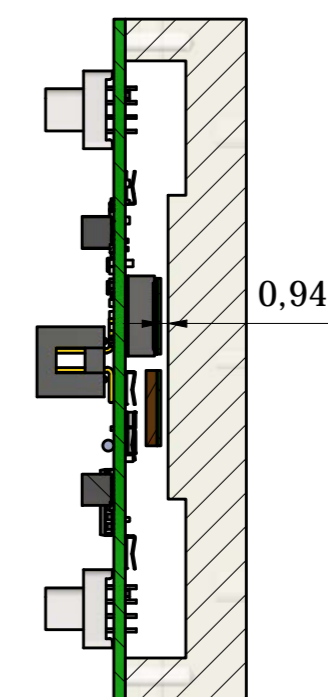
D-D (1 : 1)



E-E (1 : 1)



F-F (1 : 1)



Material:		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees		Date: 24/08/2023	
SCALE		Name	Project: CMS		
1 : 1	Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:		
Size A2	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
				SHEET	OBDT-Theta Frame - Sketch
				1 / 1	

Anexo 7. Dosimetría del ensayo de irradiación en la Náyade

Ver en la siguiente página.

DOSIMETRÍA FRICKE

Usuario: Física de Altas Energías	Fecha: 12/07/2023
Referencia: CIE/FAE-01.23	

Dispositivo:	G-II 6 cm
Fuentes radiactivas:	(12D)int
Tasa de Dosis solicitada:	kGy/h

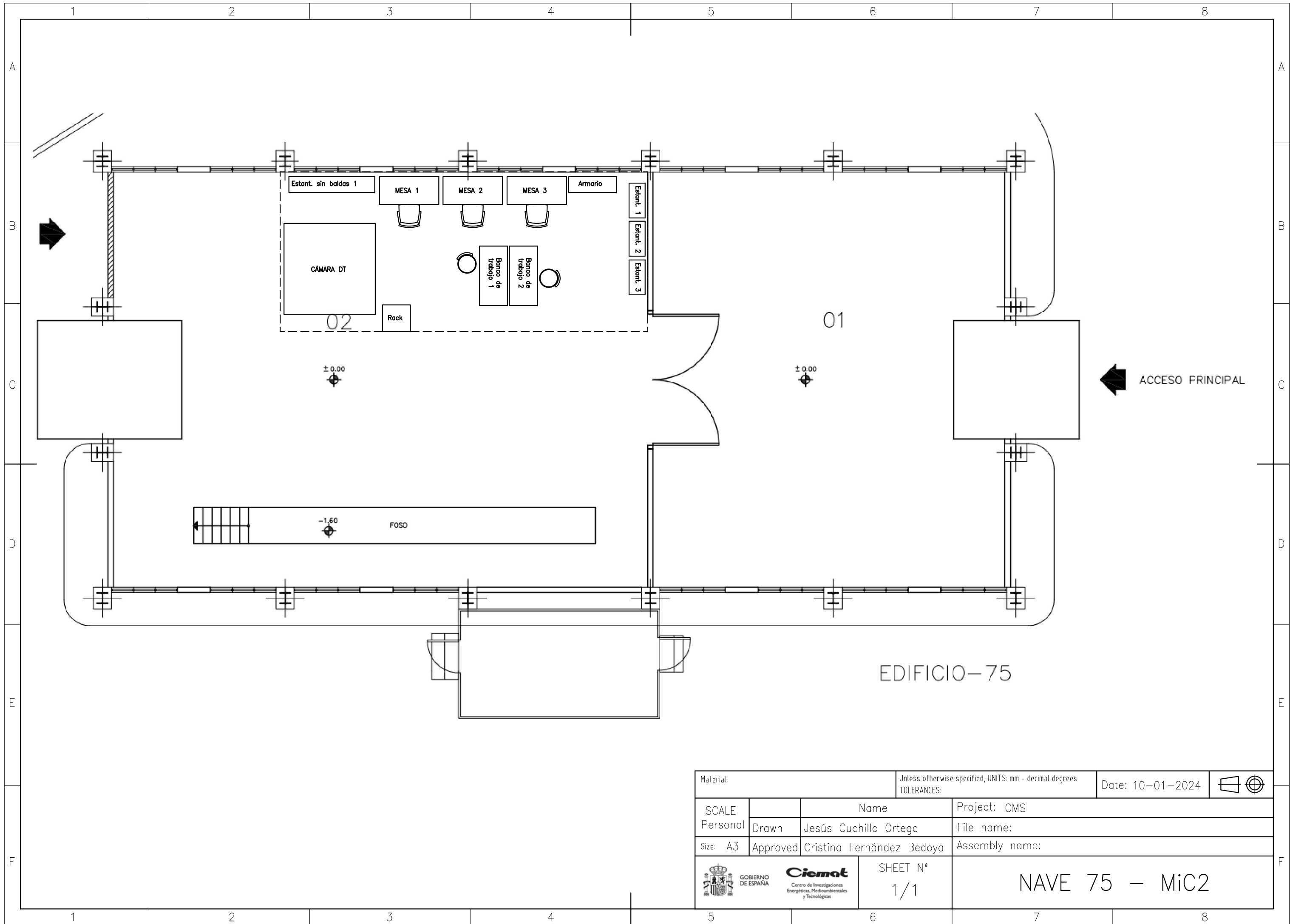
DOSIMETRÍA	
Número de dosímetros:	3
Posición:	Vial normal Fricke
Coefficiente extinción molar:	2181

DATOS DOSIMÉTRICOS						
Dosímetro	Tiempo (min)	D. Óptica (A)	T ^a Espect. (°C)	Coefficiente Conversión	Dosis (Gy)	T.de dosis (Gy/min)
1	120,0	0,777	28,1	269,76	209,60	1,747
2	120,0	0,800	29,0	268,12	214,49	1,787
3	120,0	0,771	29,0	268,12	206,72	1,723
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
T.de dosis media (kGy/h)				0,105		
Falta de uniformidad de dosis				3,76%		

IRRADIACIÓN					
Muestra	Dosis (kGy)	Tiempo de irradiación			
		Días	Horas	Minutos	Segundos
I	0,100	0	0	57	4

Anexo 8. Plano del edificio 75 del CIEMAT con la zona de montaje para MiC2

Ver en la siguiente página.



Material:		Unless otherwise specified, UNITS: mm - decimal degrees		Date: 10-01-2024	
TOLERANCES:					
SCALE		Name	Project: CMS		
Personal	Drawn	Jesús Cuchillo Ortega	File name:		
Size: A3	Approved	Cristina Fernández Bedoya	Assembly name:		
				SHEET N°	
				1/1	
			NAVE 75 - MiC2		

Anexo 9. Manual de montaje de la OBDT-Theta (MiC2) (versión en inglés)

Ver en las siguientes páginas.

Assembly manual OBDT-Theta (MiC2)

Manual prepared by Jesús Cuchillo Ortega

Team involved in the work C.F. Bedoya, S. Cuadrado, J. Cuchillo, D. Francia, C. de Lara,
A. Navarro, R. Paz, I. Redondo, D. Redondo, J. Sastre.



Proyecto PID2020-116262RB-C42 financiado por:



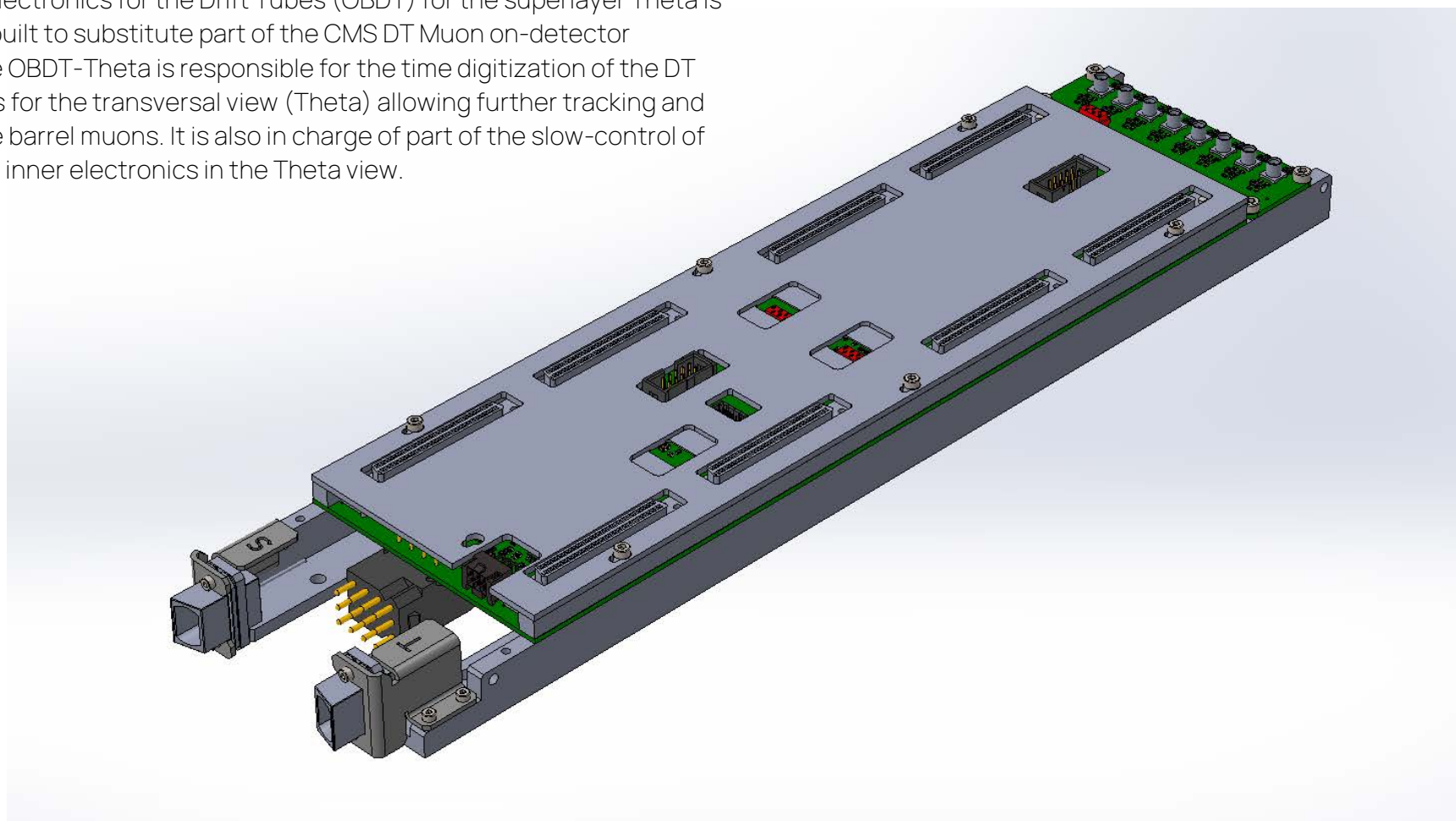
Index

I Introduction	3
II Required parts list for the assembly	4
III Assembly step by step	5
1. Fiber adapters	5
2. Fibers support to the OBDT	6
3. VTRx+ installation and routing on OBDT	7
4. Thermal pads on the frame	9
5. OBDT-Theta and fiber caps in the frame	11
6. Rails to the frame	12
7. OBDT-Theta cover	13
8. Theta-TestPulse Board	14
9. Insert the OBDT-Theta Assembly into the Minicrate (MiC2)	15

I | Introduction

This manual will describe the assembly procedure for the OBDT-Theta, the integration of mechanical parts and the process to ensure its correct operation. The assembly will be carried out at CIEMAT facilities in Madrid (Spain).

The On-Board electronics for the Drift Tubes (OBDT) for the superlayer Theta is the new board built to substitute part of the CMS DT Muon on-detector electronics. The OBDT-Theta is responsible for the time digitization of the DT chamber signals for the transversal view (Theta) allowing further tracking and triggering of the barrel muons. It is also in charge of part of the slow-control of the DT chamber inner electronics in the Theta view.



II | Required parts list for the assembly

Assembly parts list:

N° PCS/ASS	NAME	NUMBERING	OBSERVATIONS
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Board	27.00.00.03.01	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame	27.00.00.03.02	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Cover	27.00.00.03.03	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Rails	27.00.00.03.04	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-TestPulse-Board	27.00.00.03.05	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top	27.00.00.03.06	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom	27.00.00.03.07	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut	27.00.00.03.08	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fibers-Support	27.00.00.03.09	
2	VTRx+		
2	MTP Adaptors		
-	Thermal pad		
-	Kapton tape		

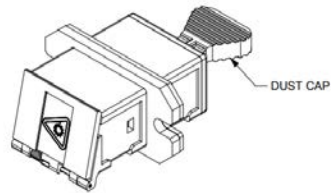
Screws list:

N° PCS/ASS	NAME	NORM	OBSERVATIONS
4	Machine Screw Pan Phillips 4-40 (36-9902-ND)	-	Fibbers support 3D printed to OBDT-Theta
4	M2 x 6mm; cylindrical, hex	DIN 912	Nuts, MTP and Fiber caps
4	M3 x 6 mm; cylindrical, hex	DIN 912	Fiber caps to the frame
12	M3 x 10 mm; countersunk screw, torx (hex)	DIN 7991	Rails to the OBDT-Theta
6	M2.5 x 6 mm; cylindrical, hex	DIN 912	OBDT-Theta Cover to the rails
4	M3 x 6 mm; cylindrical, hex	DIN 912	Theta-testpulse board to the frame
4	M4 x 10 mm; cylindrical, hex	DIN 912	OBDT-Theta Frame to MiC2 profile

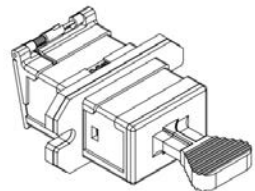
III | Assembly step by step

1. Fiber Adapters

First step is to prepare the adaptors for the fiber connection.

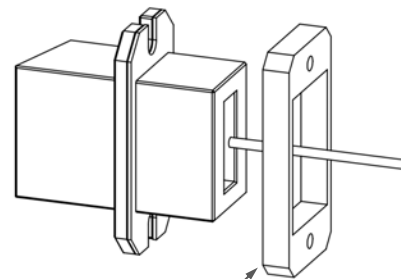


DUST CAP



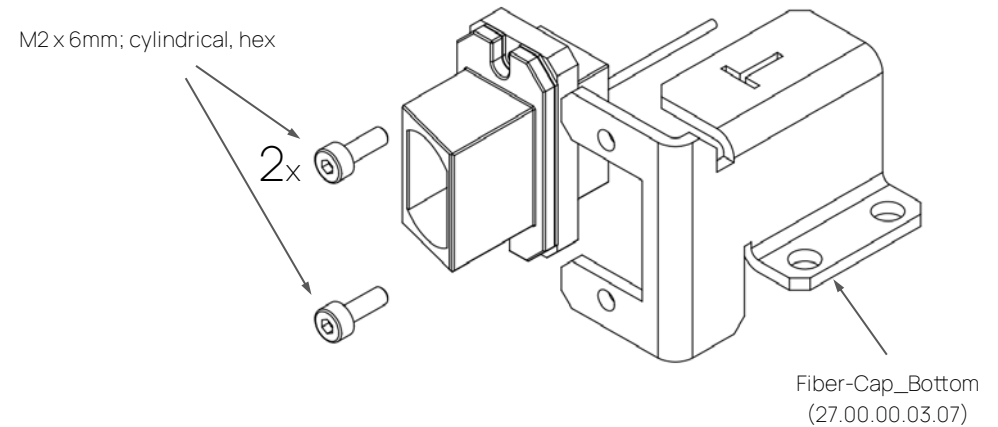
MTP (MPO) to MT Optical EMI Simplex Adapters are being used.

A) Put the nut into the adaptor.

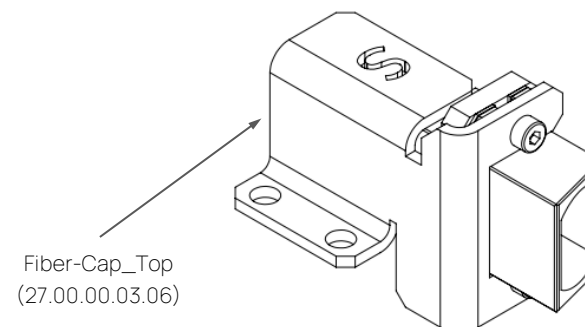


Fiber-Cap_Nut
(27.00.00.03.08)

B) Introduce the adaptor into the fiber cap slot and screw into the nut.

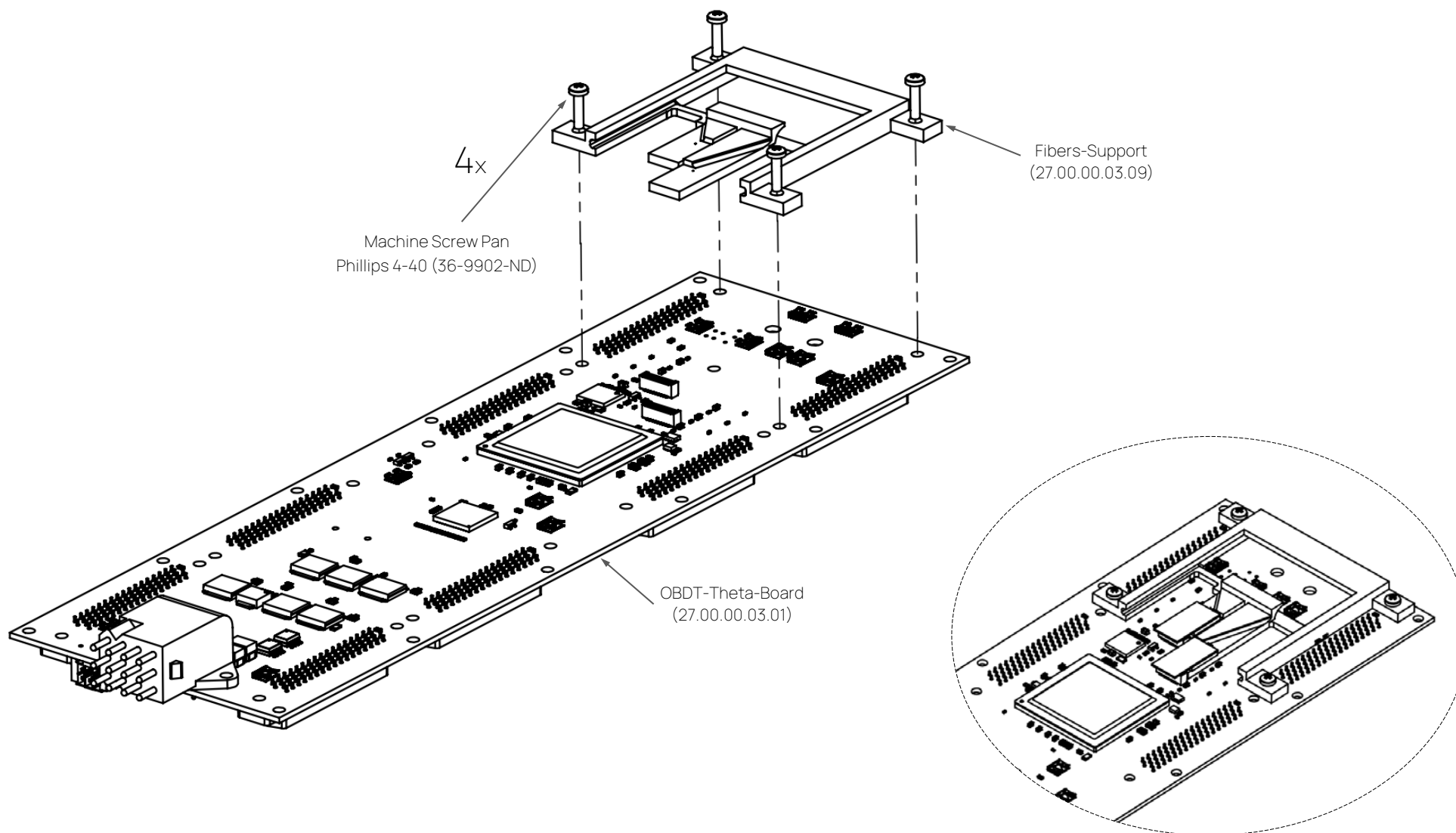


C) Repeat the same procedure for both fiber caps (marked with T for the Trigger and S for the Slow control).



2. Fibers support to the OBDT

Second step is to attach the 3D printed Fibers support piece to the OBDT in the rear holes of the FEB connectors marked in next drawing.

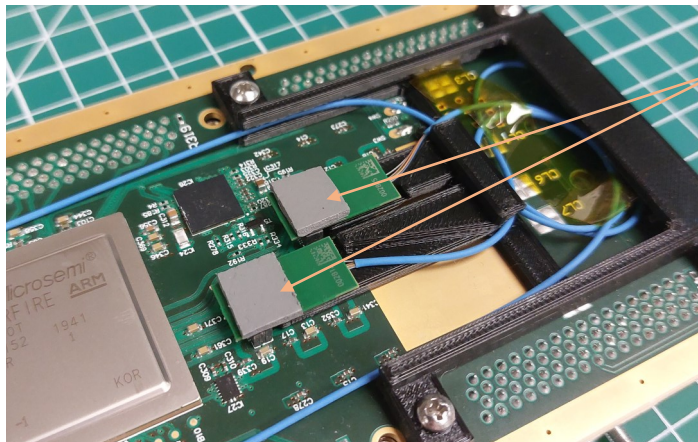


3. VTRx+ installation and routing on OBDT

Connect the VTRx+ to the board carefully (VTRx+ cables unions are delicate and very easy to break). Fiber slack is turned and stored inside the fibers support previously shown.

The VTRx+ on the top (in image at right) is the one for the Slow Control. It is routed to the fiber cap top (marked with "S").

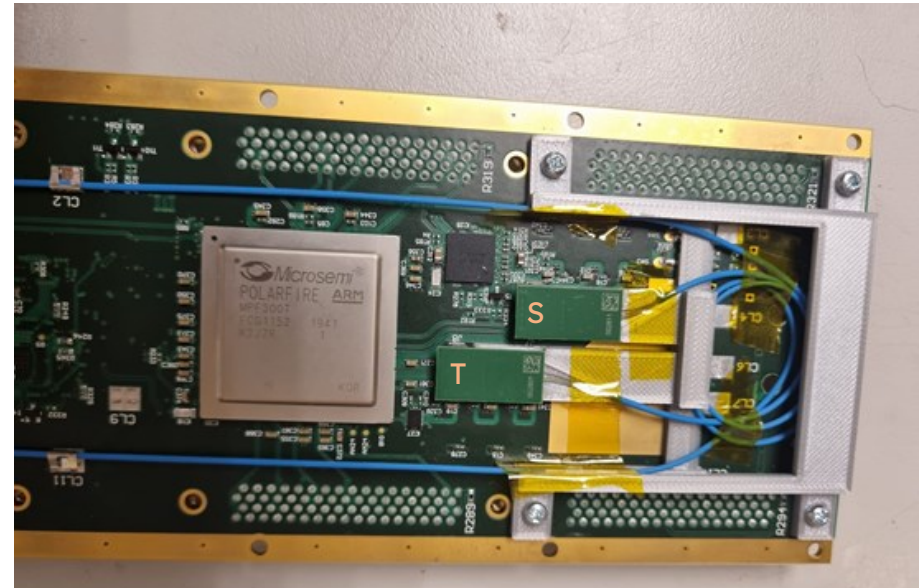
The VTRx+ on the bottom (in image at right) is the one for the Trigger. It is routed to the fiber cap bottom (marked with "T").



Place two pieces of **thermal pad** on the connector side of the VTRx+ modules (where temperature is higher).

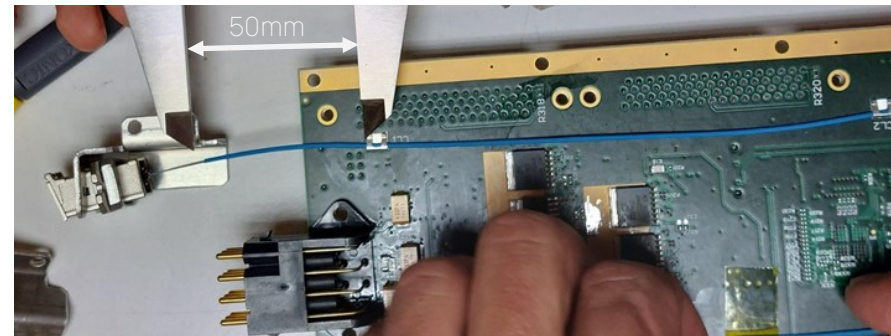
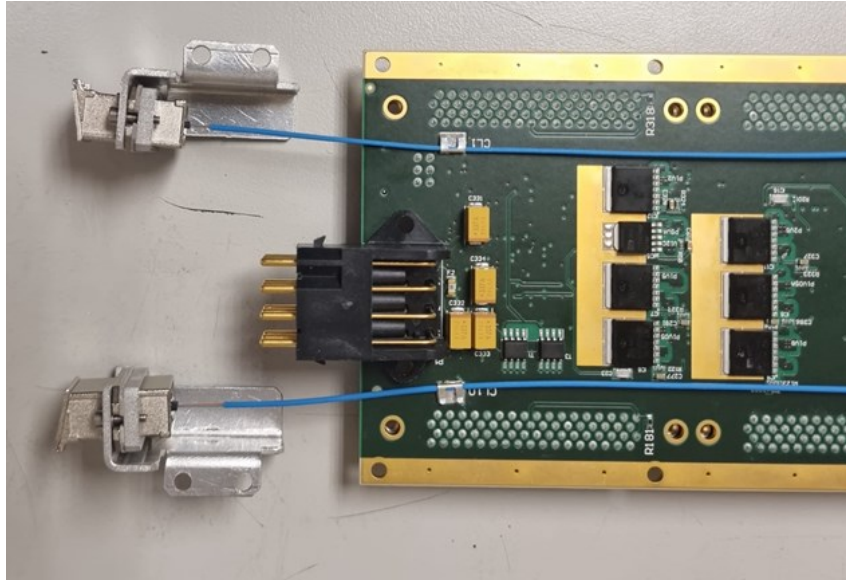
Use **Kapton tape** to fix the cables to the support, to the board and wherever needed.

The part in contact with the thermal pad is particularly important. It gets stuck and the fiber can break. To prevent this, it is used two pieces of **Mylar foil** to cover the thermal pads on the connectors.



3. VTRX+ installation and routing on OBDT

Fiber cables on the second half of the OBDT are fixed with metal clips that are soldered in the board.



It is important to leave a cable distance of **50mm** from the last metal clip to the fiber caps to avoid tensioning the cable.

4. Thermal pads on the frame

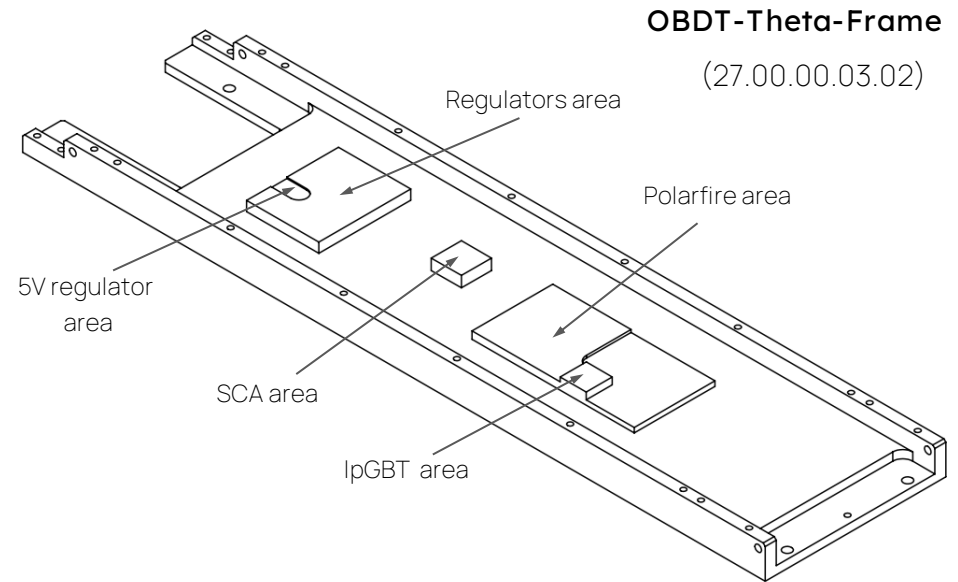
An aluminium frame is used as a support and cooling system for the board. The frame has "islands" in the middle to improve the cooling in certain points of the board. These islands have been design with the specific height to be in contact with the elements through thermal pads that will be placed on the top.

Identify the areas of each board element with the drawing at right.

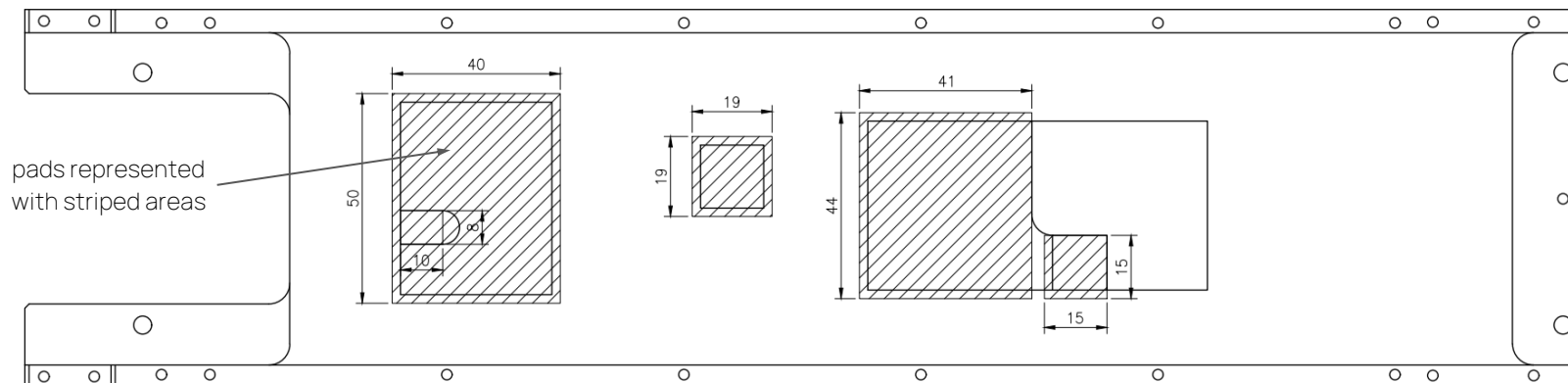
Thermal pad to be used:

- 1.5 mm SARCON® GR14B-0H-150PK

The thermal pads will be cut to the specific dimensions for each area.

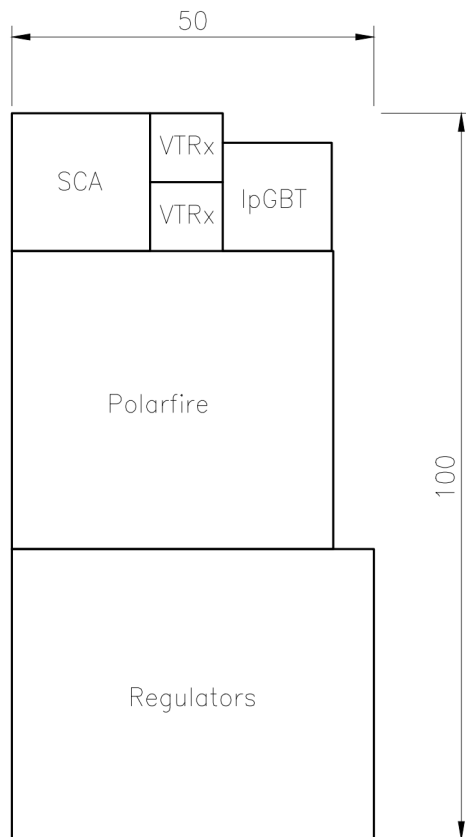


Position of thermal pad on each area:

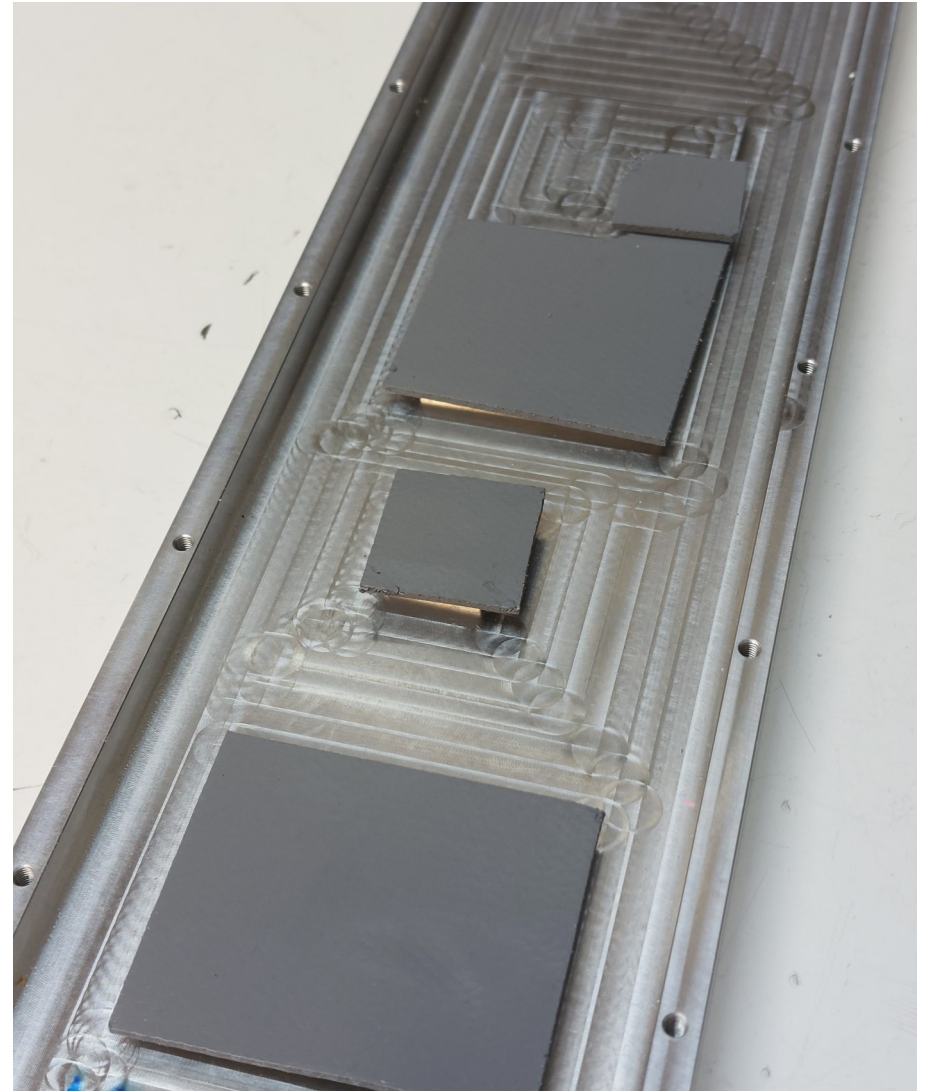


4. Thermal pads on the frame

The overall dimensions of the pads required per board are approximately 100 mm x 50 mm.

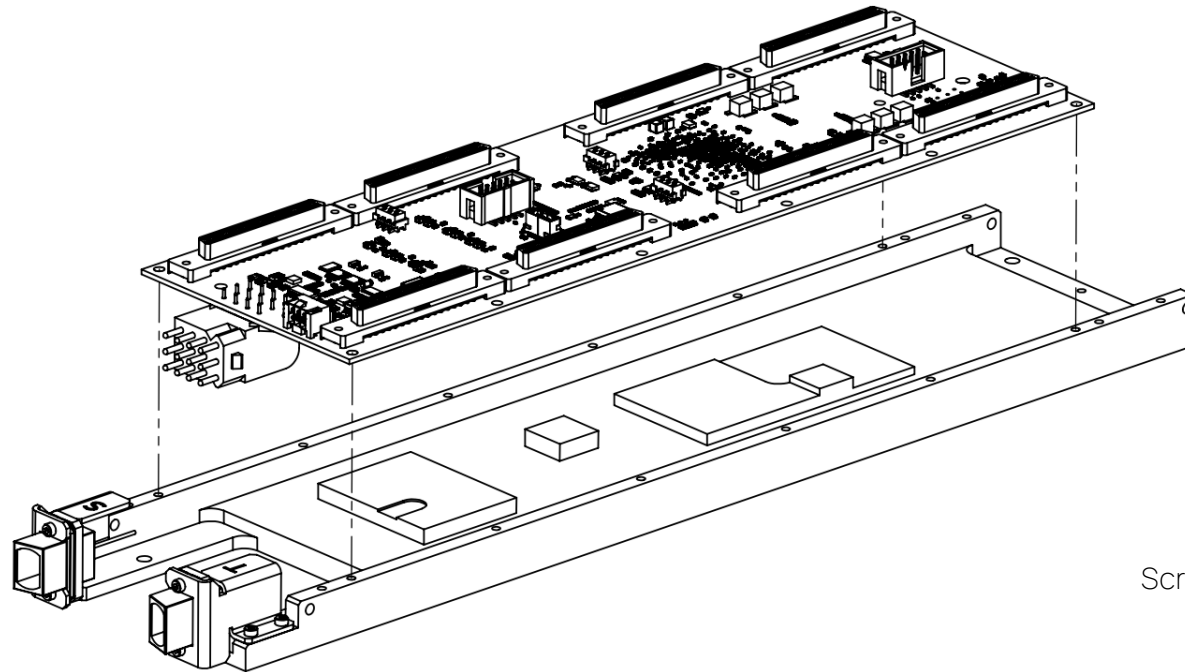


Cover the indicated areas with the thermal pad.



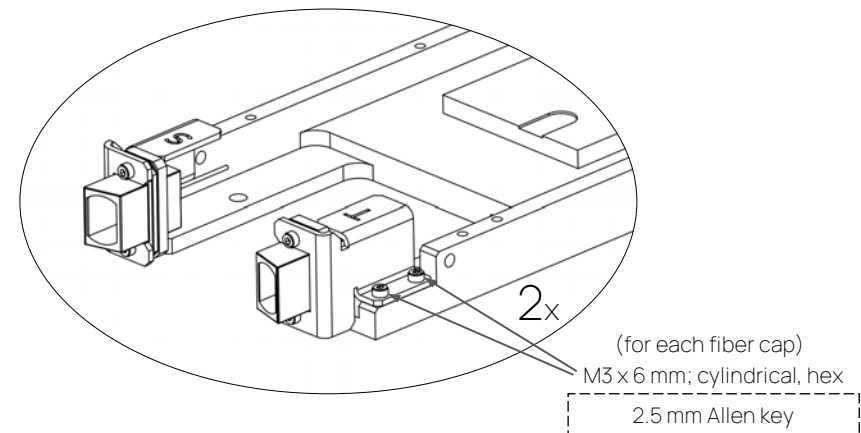
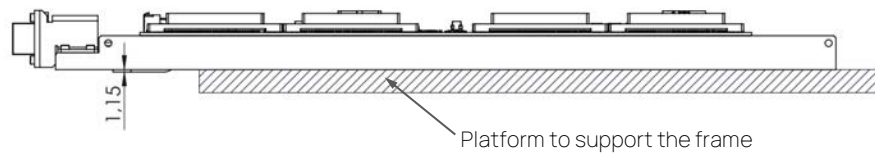
5. OBDT-Theta and fiber caps in the frame

Turn the OBDT over and place in the correct position on the frame, taking care with the cables attached to the fiber caps.



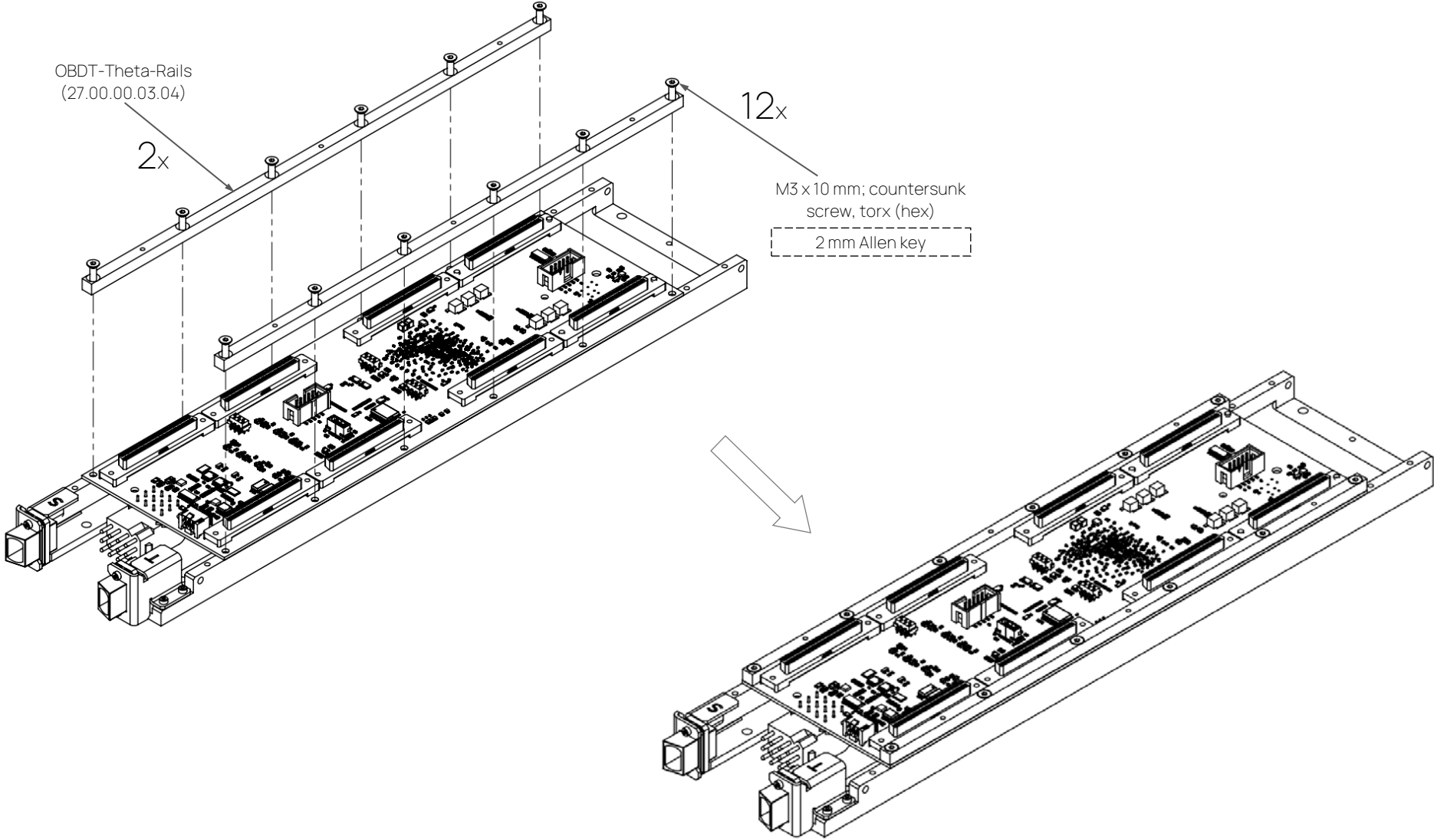
Screw the fiber caps (previously assembled with MTP and nuts) to the frame.

** When mounting the board on the frame, the LV connector protrudes 1.15mm underneath. The frame should be supported on a flat platform that leaves the connector free underneath.



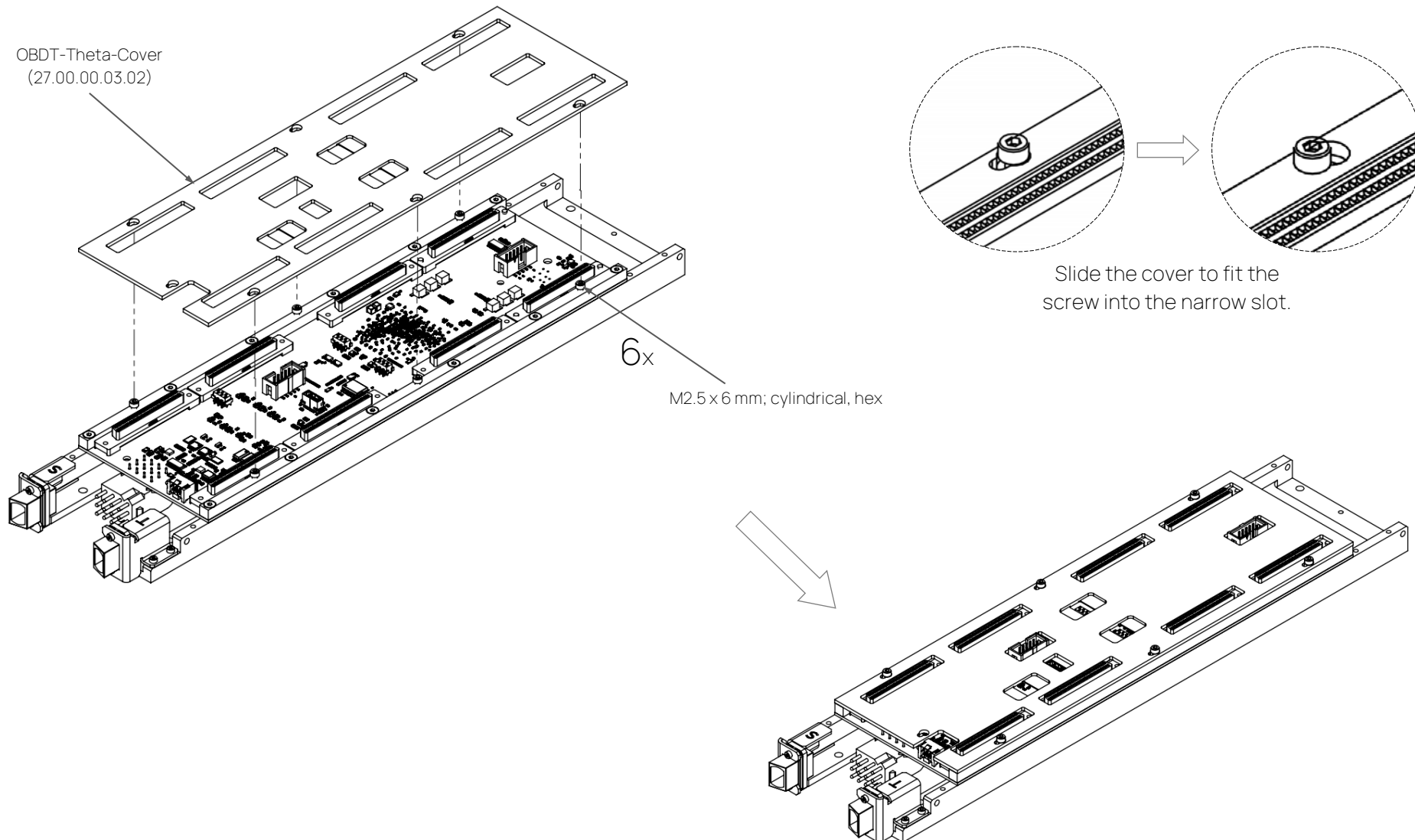
6. Rails to the frame

Put the rails to attach the OBDT-Theta to the frame.



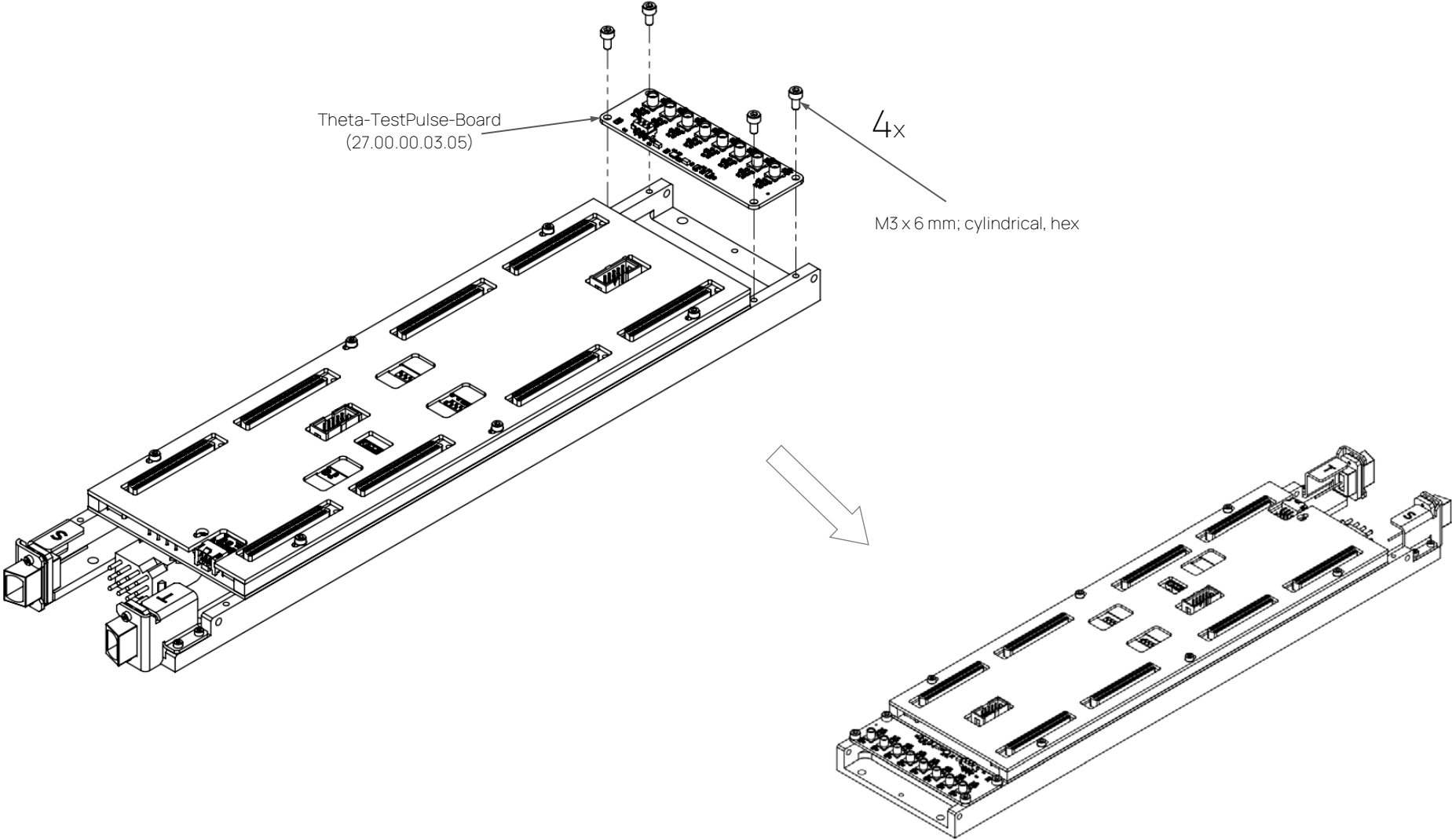
7. OBDT-Theta cover

Loosely fit the screws to the rails remaining a gap. Then, position the cover, slide and tight the screws.

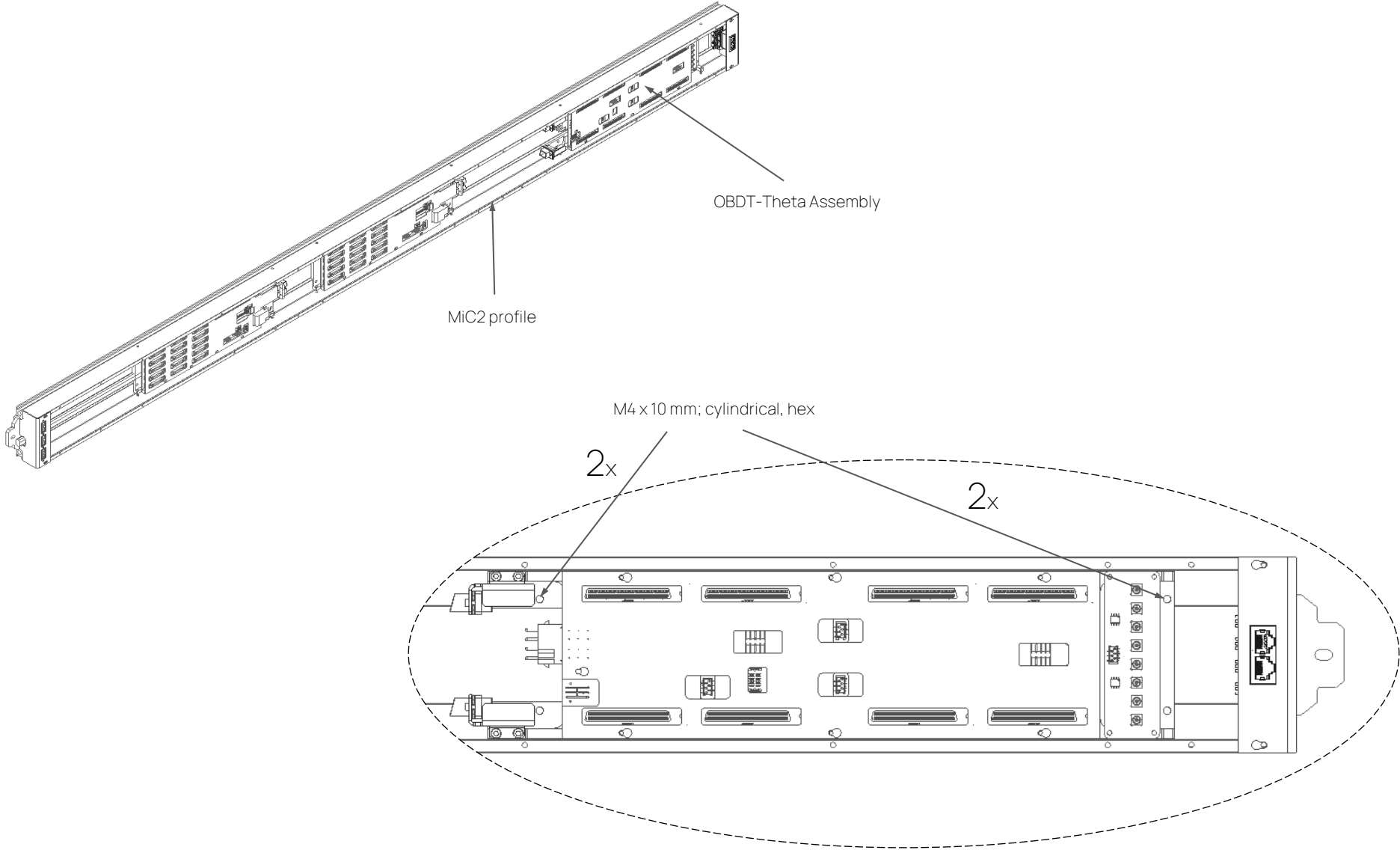


8. Theta-TestPulse Board

Position the Theta-TestPulse Board and tight the screws.



9. Insert the OBDT-Theta Assembly into the Minicrate (MiC2)



Anexo 10. Manual de montaje de la OBDT-Theta (MiC2) (versión en castellano)

Ver en las siguientes páginas.

Manual de montaje OBDT-Theta (MiC2)

Manual elaborado por Jesús Cuchillo Ortega

Equipo involucrado C.F. Bedoya, S. Cuadrado, J. Cuchillo, D. Francia, C. de Lara,
A. Navarro, R. Paz, I. Redondo, D. Redondo, J. Sastre.



Proyecto PID2020-116262RB-C42 financiado por:



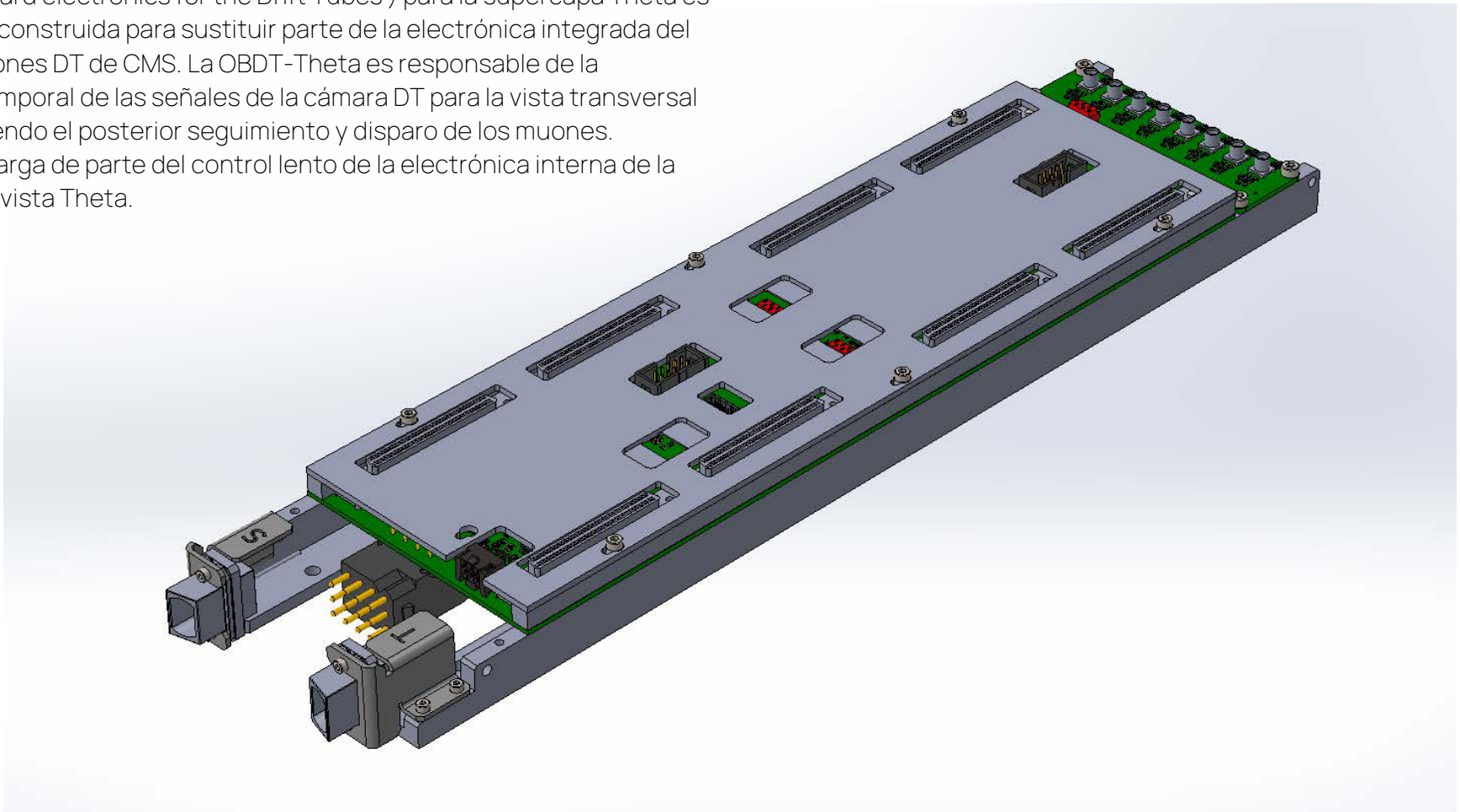
Índice

I Introducción	3
II Piezas requeridas para el montaje	4
III Montaje paso a paso	5
1. Adaptadores de fibras	5
2. Fibers support a la OBDT	6
3. Instalación y cableado de VTRx+	7
4. Almohadillas térmicas sobre el frame	9
5. OBDT-Theta y fiber caps en el frame	11
6. Railes al frame	12
7. Cubierta de la OBDT-Theta	13
8. Tarjeta Theta-TestPulse	14
9. Insertar el montaje OBDT-Theta en el Minicrate (MiC2)	15

I | Introducción

Este manual describirá el procedimiento de montaje de la tarjeta OBDT-Theta, la integración de partes mecánicas y el proceso para asegurar su correcto funcionamiento. El montaje se realizará en las instalaciones del CIEMAT en Madrid (España).

La OBDT (On-Board electronics for the Drift Tubes) para la supercapa Theta es la nueva tarjeta construida para sustituir parte de la electrónica integrada del detector de muones DT de CMS. La OBDT-Theta es responsable de la digitalización temporal de las señales de la cámara DT para la vista transversal (Theta) permitiendo el posterior seguimiento y disparo de los muones. También se encarga de parte del control lento de la electrónica interna de la cámara DT en la vista Theta.



II | Piezas requeridas para el montaje

Lista de piezas para el ensamblaje:

Nº PIEZAS/ENS	NOMBRE	NUMERACIÓN	OBSERVACIONES
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Board	27.00.00.03.01	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Frame	27.00.00.03.02	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Cover	27.00.00.03.03	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Rails	27.00.00.03.04	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-TestPulse-Board	27.00.00.03.05	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Top	27.00.00.03.06	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Bottom	27.00.00.03.07	
2	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fiber-Cap_Nut	27.00.00.03.08	
1	CMS_MiC2_OBDT-Theta-Fibers-Support	27.00.00.03.09	
2	VTRx+		
2	Adaptadores MTP		
-	Almohadillas térmicas		
-	Cinta de Kapton		

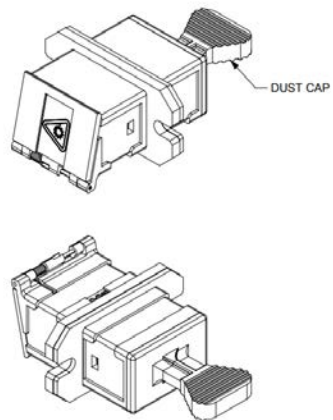
Lista de tornillos:

Nº PIEZAS/ENS	NOMBRE	NORMA	OBSERVACIONES
4	Machine Screw Pan Phillips 4-40 (36-9902-ND)	-	Fibbers support a la OBDT-Theta
4	M2 x 6mm; cilíndrico, hex	DIN 912	Nuts, MTP y Fiber caps
4	M3 x 6 mm; cilíndrico, hex	DIN 912	Fiber caps al frame
12	M3 x 10 mm; avellanado, torx (hex)	DIN 7991	Raíles a la OBDT-Theta
6	M2.5 x 6 mm; cilíndrico, hex	DIN 912	Cubierta OBDT-Theta a los raíles
4	M3 x 6 mm; cilíndrico, hex	DIN 912	Tarjeta Theta-testpulse al frame
4	M4 x 10 mm; cilíndrico, hex	DIN 912	OBDT-Theta al Minicrate (MiC2)

III | Montaje paso a paso

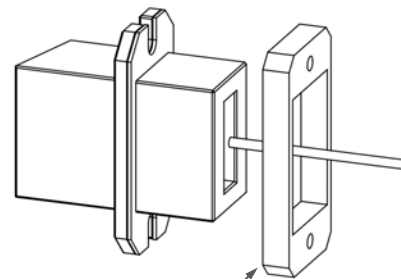
1. Adaptadores de fibras

El primer paso es preparar los adaptadores para la conexión de fibra.



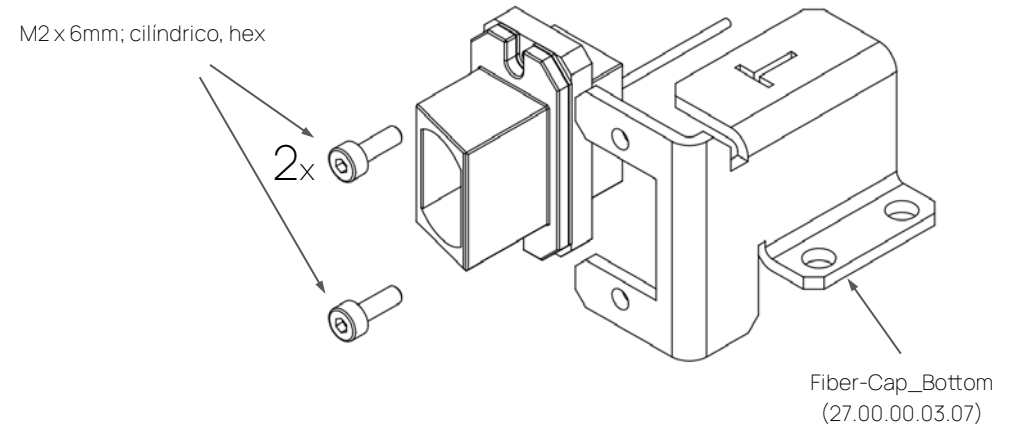
MTP (MPO) a MT Optical
Se usan adaptadores EMI Simplex.

A) Coloque la tuerca en el adaptador.

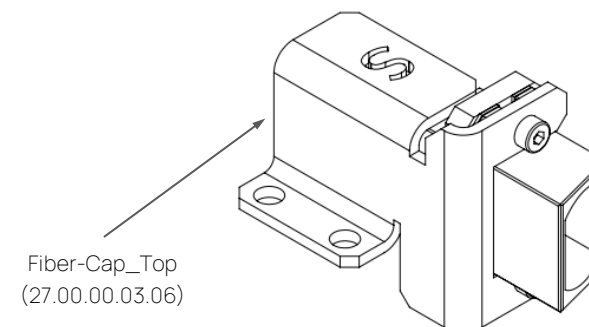


Fiber-Cap_Nut
(27.00.00.03.08)

B) Introduzca el adaptador en la ranura de fiber cap y únalo a la tuerca.

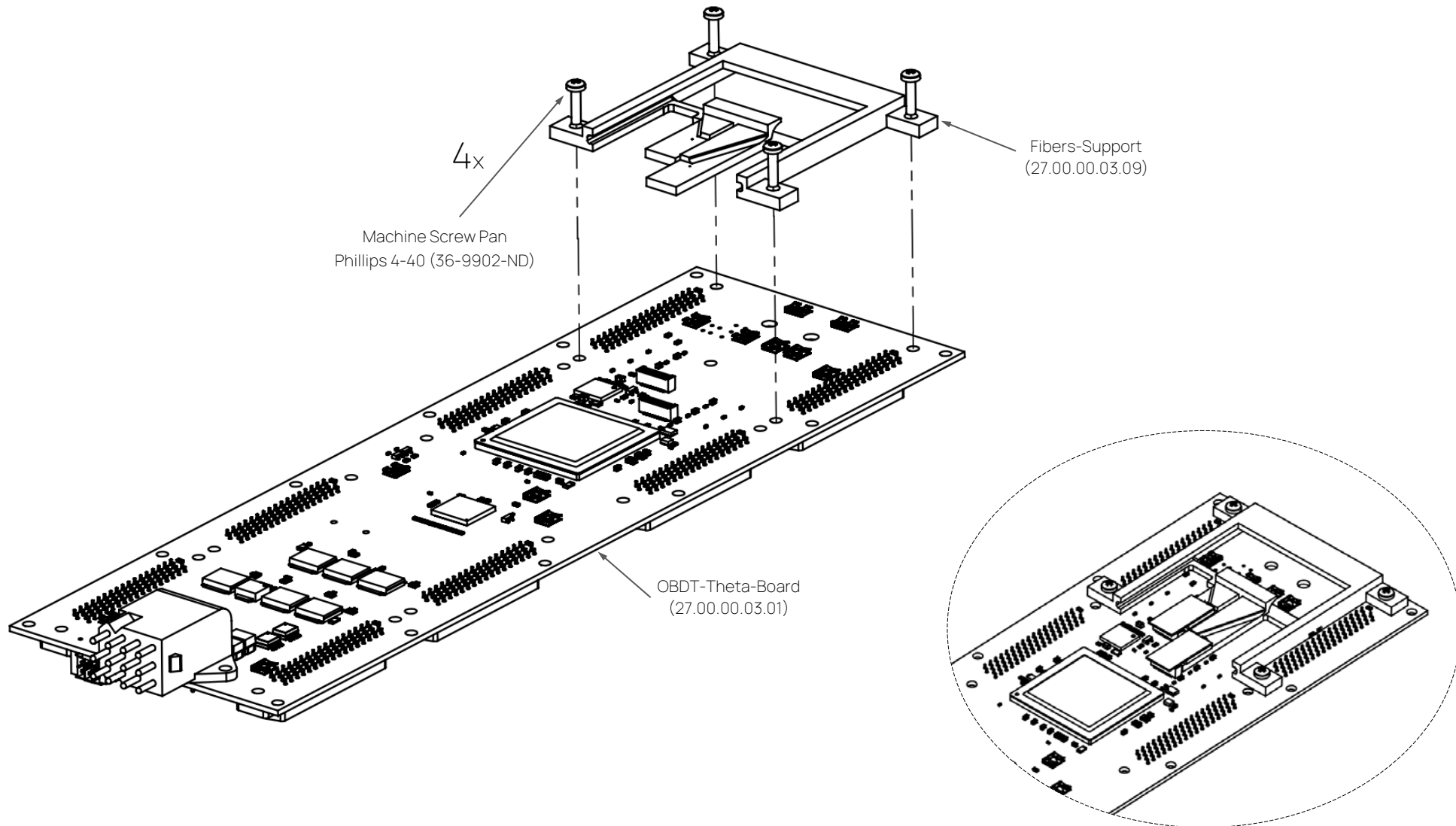


C) Repita el mismo procedimiento para las dos fiber caps (marcadas con T para el *Trigger* y S para el *Slow control*).



2. Fibers support a la OBDT

El segundo paso es fijar la pieza fibers support impresa en 3D a la OBDT en los agujeros traseros de los conectores FEB marcados en el siguiente dibujo.

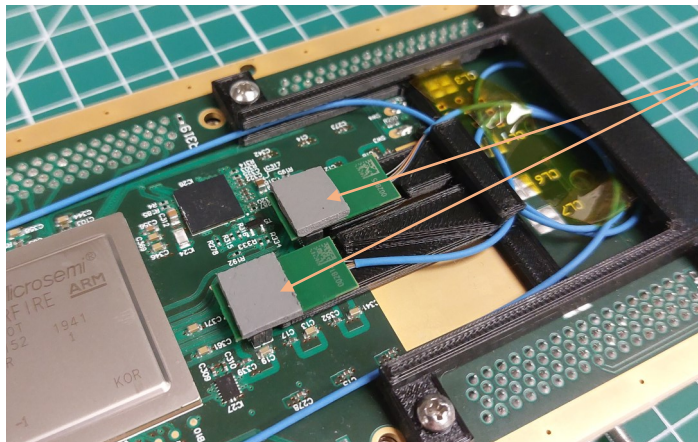


3. Instalación y cableado de VTRx+

Conecte el VTRx+ a la placa con cuidado (las uniones de los cables VTRx+ son delicadas y muy fáciles de romper). El cable de las fibras se dobla y se guarda dentro del soporte de fibras mostrado anteriormente.

El VTRx+ de la parte superior (en la imagen de la derecha) es el del *Slow Control*. Se dirige al fiber cap top (marcado con una "S").

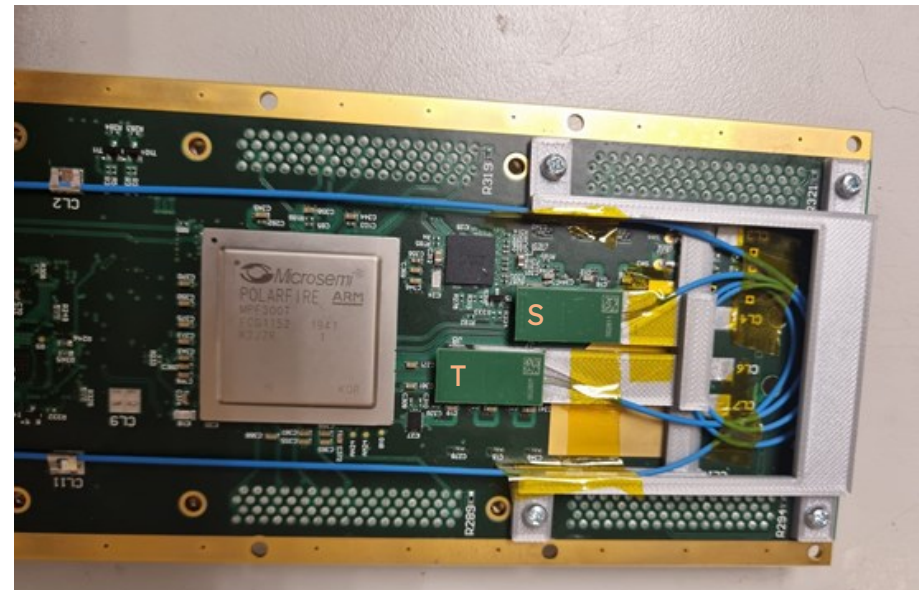
El VTRx+ de la parte inferior (en la imagen de la derecha) es el del *Trigger*. Se dirige al fiber cap bottom (marcado con una "T").



Coloque dos trozos de **almohadilla térmica** sobre la parte del conector de los VTRx+ (donde la temperatura es más alta).

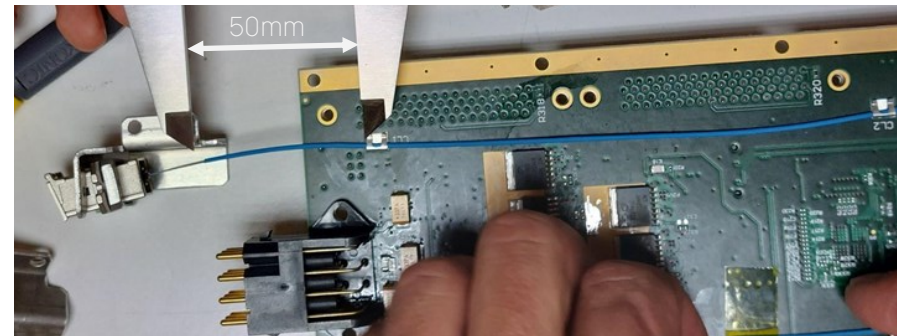
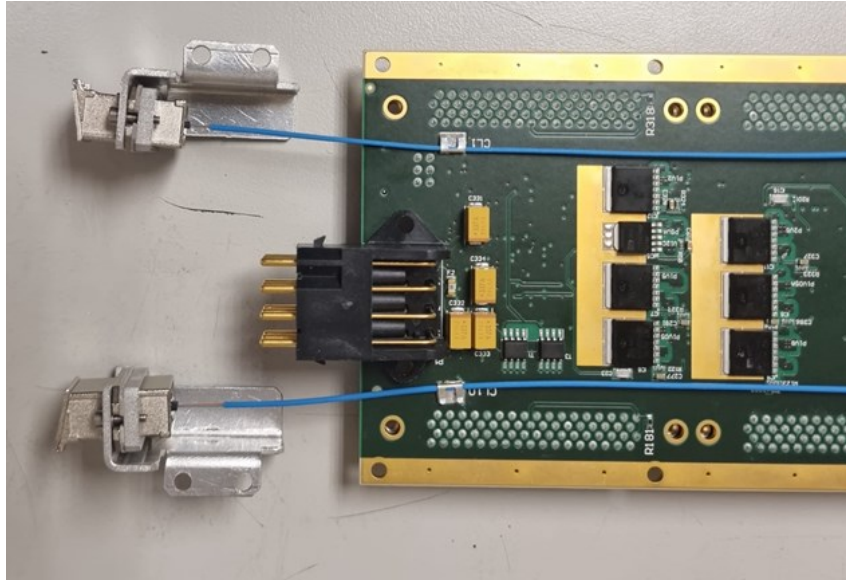
Usar **cinta de Kapton** para fijar los cables al soporte, a la placa y donde sea necesario.

La parte que está en contacto con la almohadilla térmica es especialmente importante. Se atasca y la fibra puede romperse. Para evitarlo, se utilizan dos piezas de **Mylar** para cubrir los conectores.



3. Instalación y cableado de VTRx+

Los cables de fibra de la segunda mitad de la OBDT se fijan con clips metálicos soldados en la placa.



Es importante dejar una distancia de cable de **50mm** desde el último clip metálico hasta los fiber caps para evitar tensar el cable.

4. Almohadillas térmicas sobre el frame

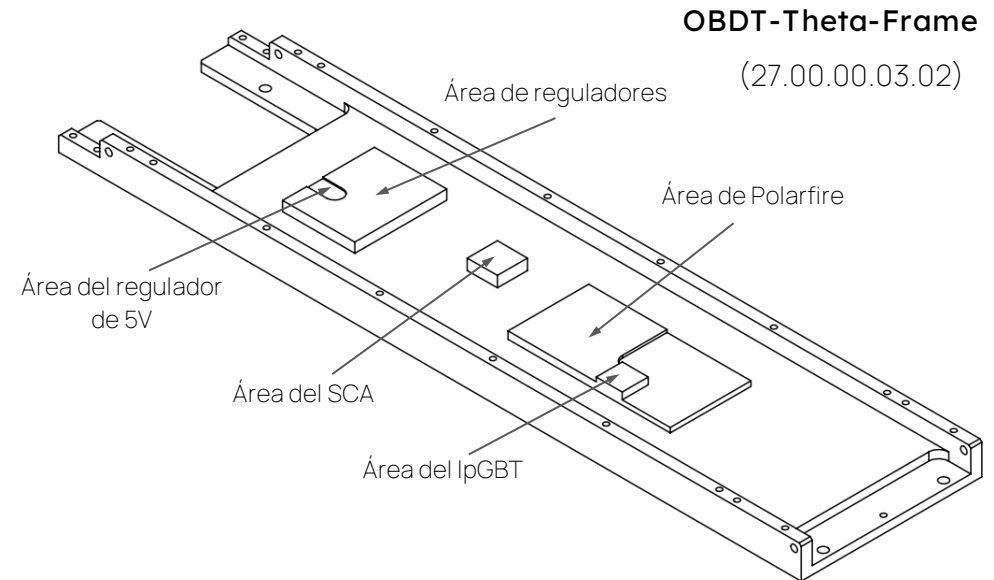
Se utiliza un marco de aluminio (frame) como soporte y sistema de refrigeración de la tarjeta. El frame tiene "islas" en la zona central para mejorar la refrigeración en determinados puntos de la placa. Estas islas se han diseñado con la altura específica para estar en contacto con los elementos a través de almohadillas térmicas que se colocarán en la parte superior.

Identifique las zonas de cada elemento de la placa con el dibujo de la derecha.

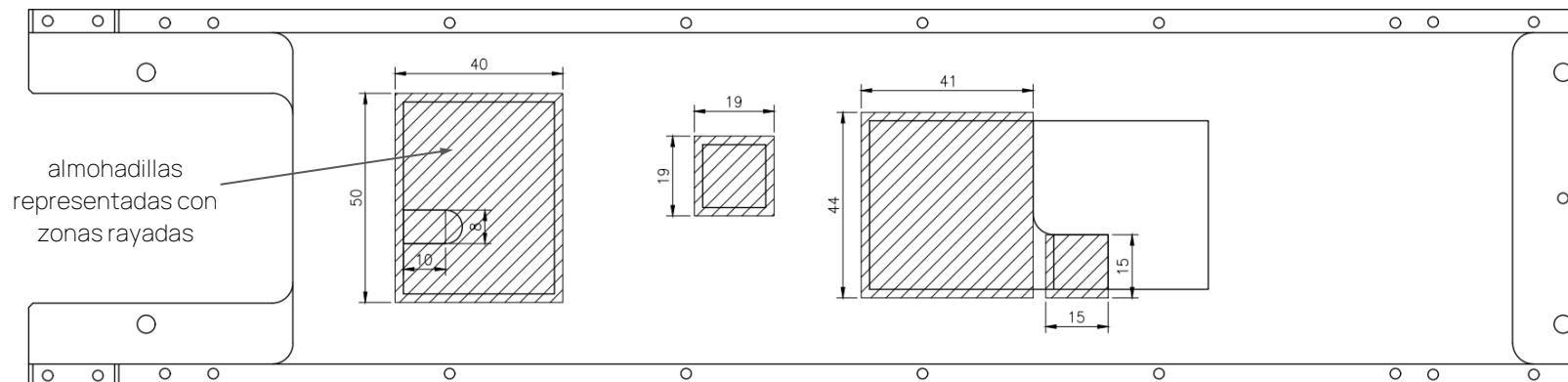
Almohadillas térmicas que deben utilizarse:

- 1,5 mm SARCON® GR14B-0H-150PK

Las almohadillas térmicas serán cortadas con las dimensiones específicas para cada área.

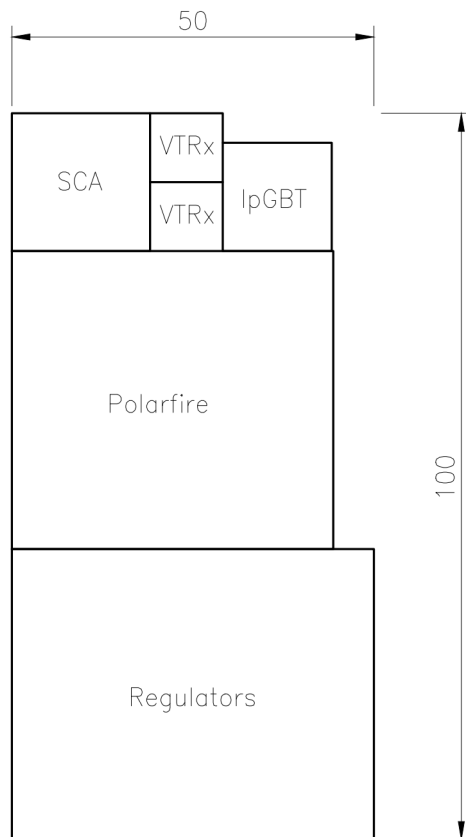


Posición de la almohadilla térmica en cada zona:

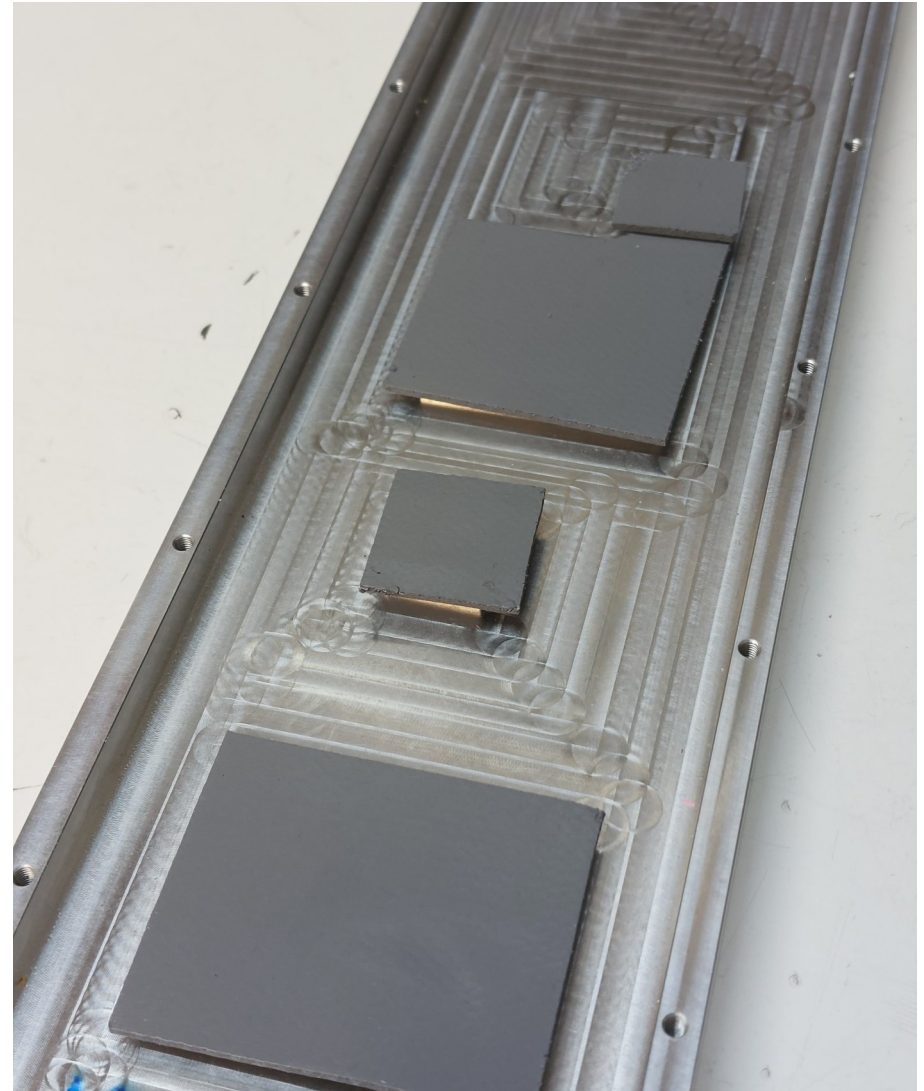


4. Almohadillas térmicas sobre el frame

Las dimensiones totales de las almohadillas necesarias por placa son aproximadamente 100 mm x 50 mm.

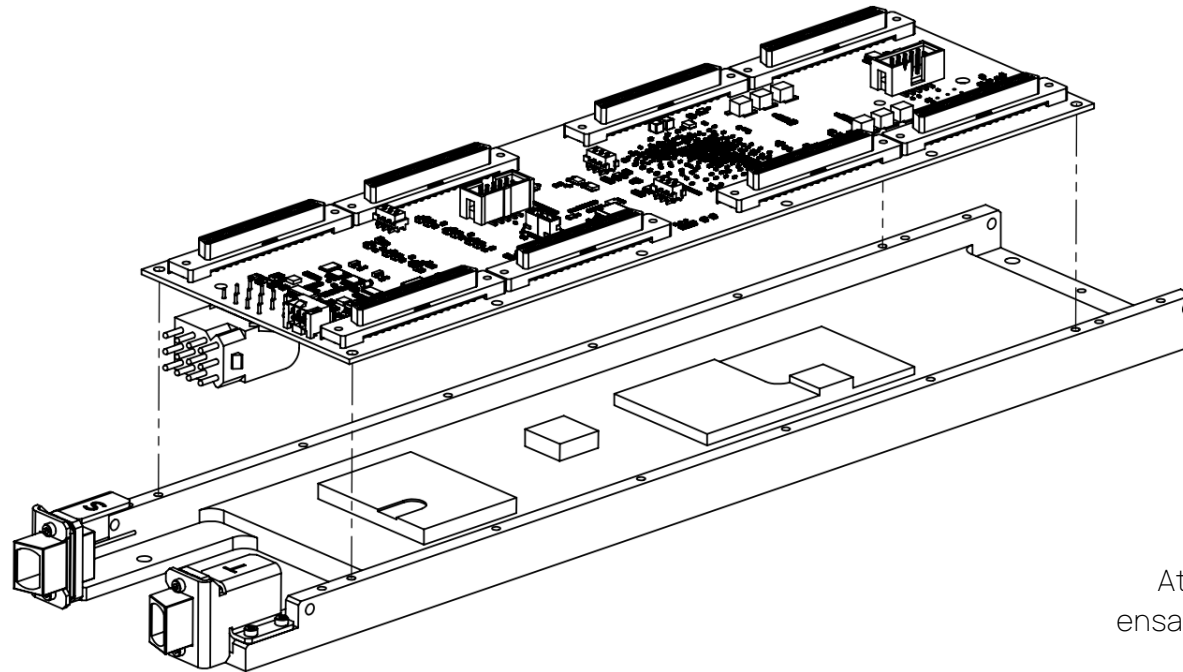


Cubra las zonas indicadas con la almohadilla térmica.



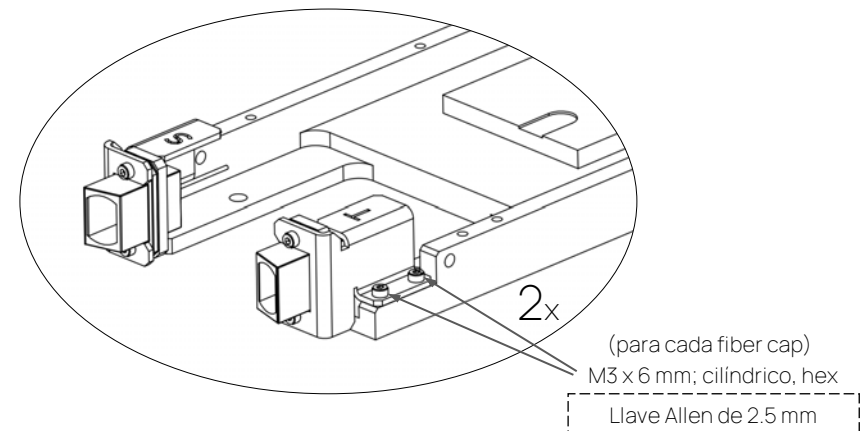
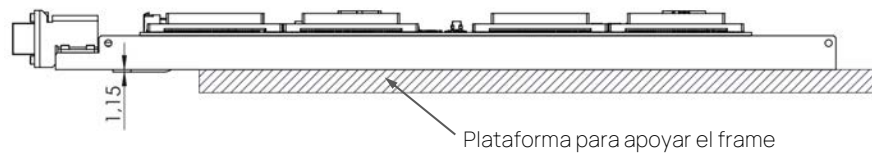
5. OBBD-Theta y fiber caps en el frame

Dé la vuelta a la OBBD y colóquela en la posición correcta en el frame, teniendo cuidado con los cables conectados a las fiber caps.



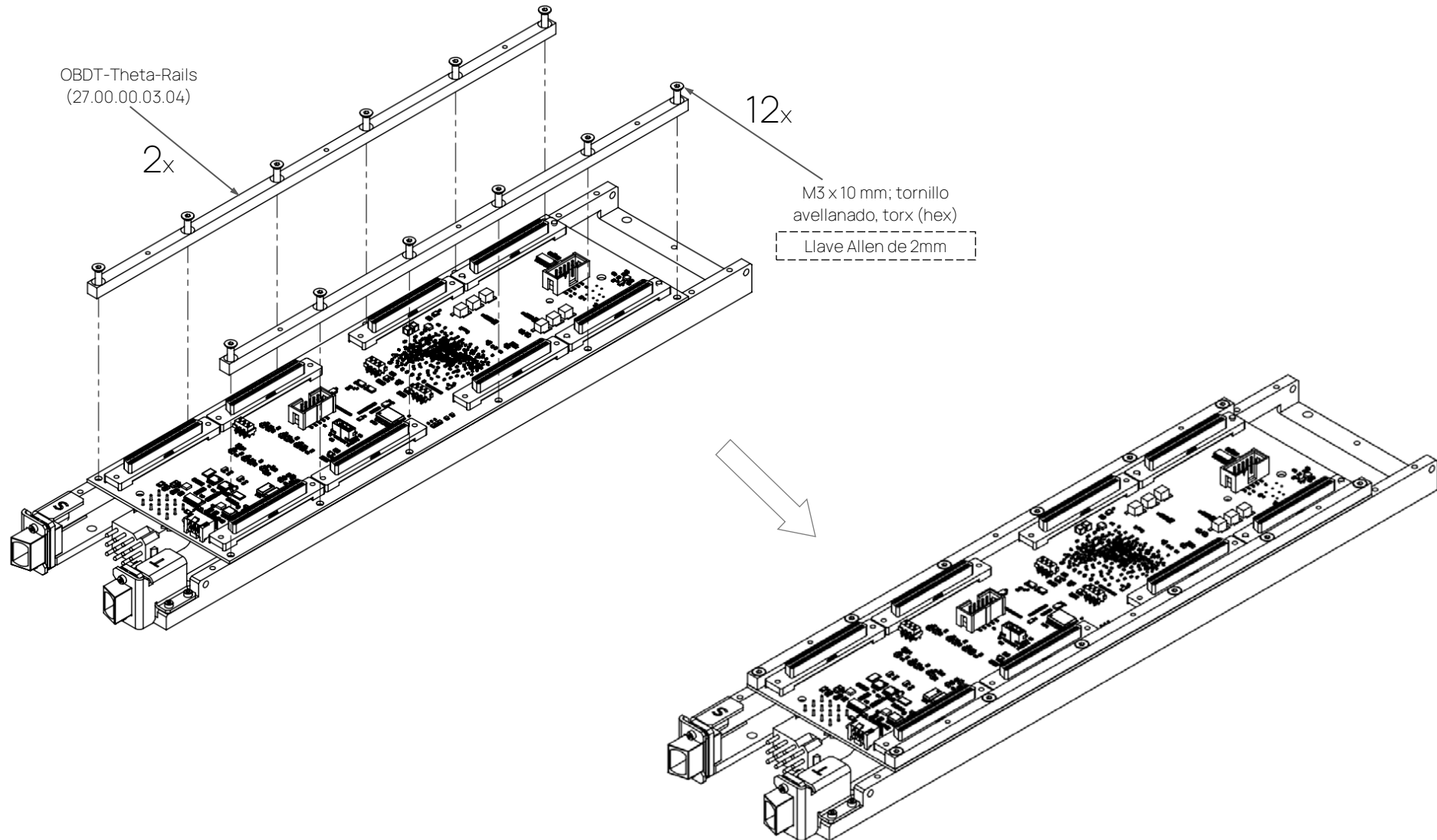
Atornille las fiber caps (previamente ensambladas con MTP y tuercas) al frame.

** Al montar la placa en el frame, el conector LV sobresale 1,15 mm por debajo.
El frame debe apoyarse sobre una plataforma plana que deje libre el conector por debajo.



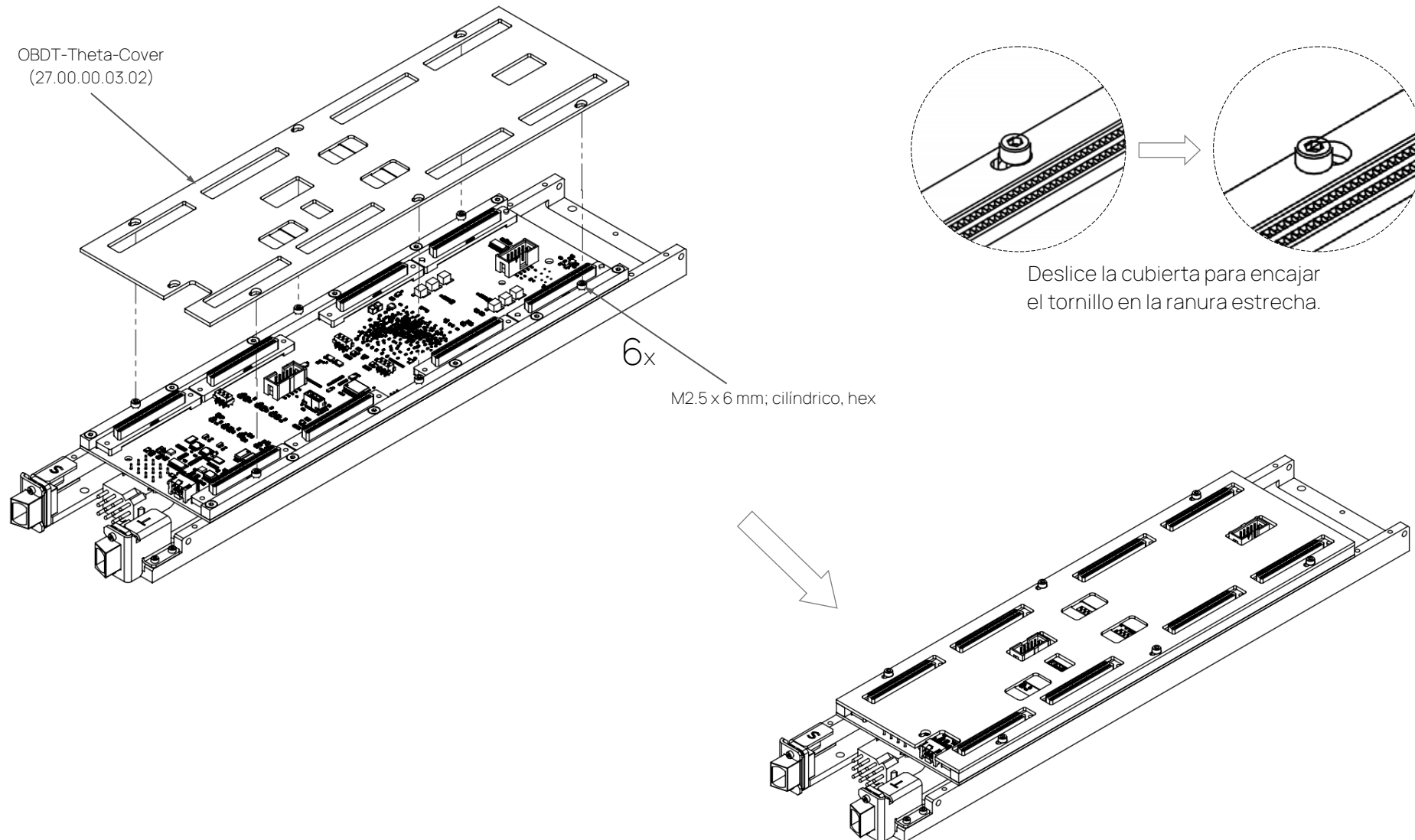
6. Raíles al frame

Coloque los raíles para fijar la OBDT-Theta al frame.



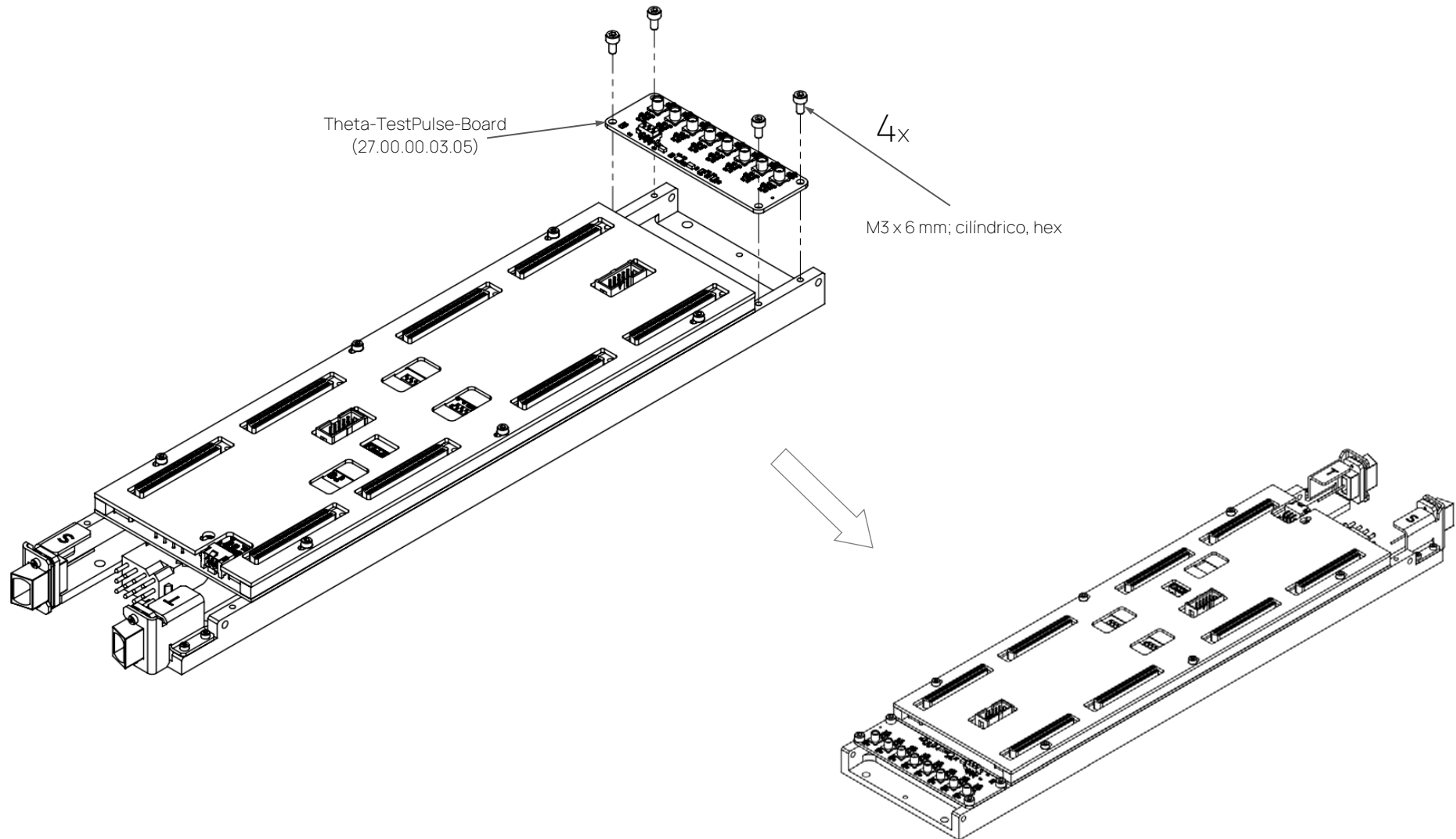
7. Cubierta de la OBDT-Theta

Coloque los tornillos sin apretar en los rales, dejando un hueco. A continuación, coloque la cubierta, deslice y apriete los tornillos.

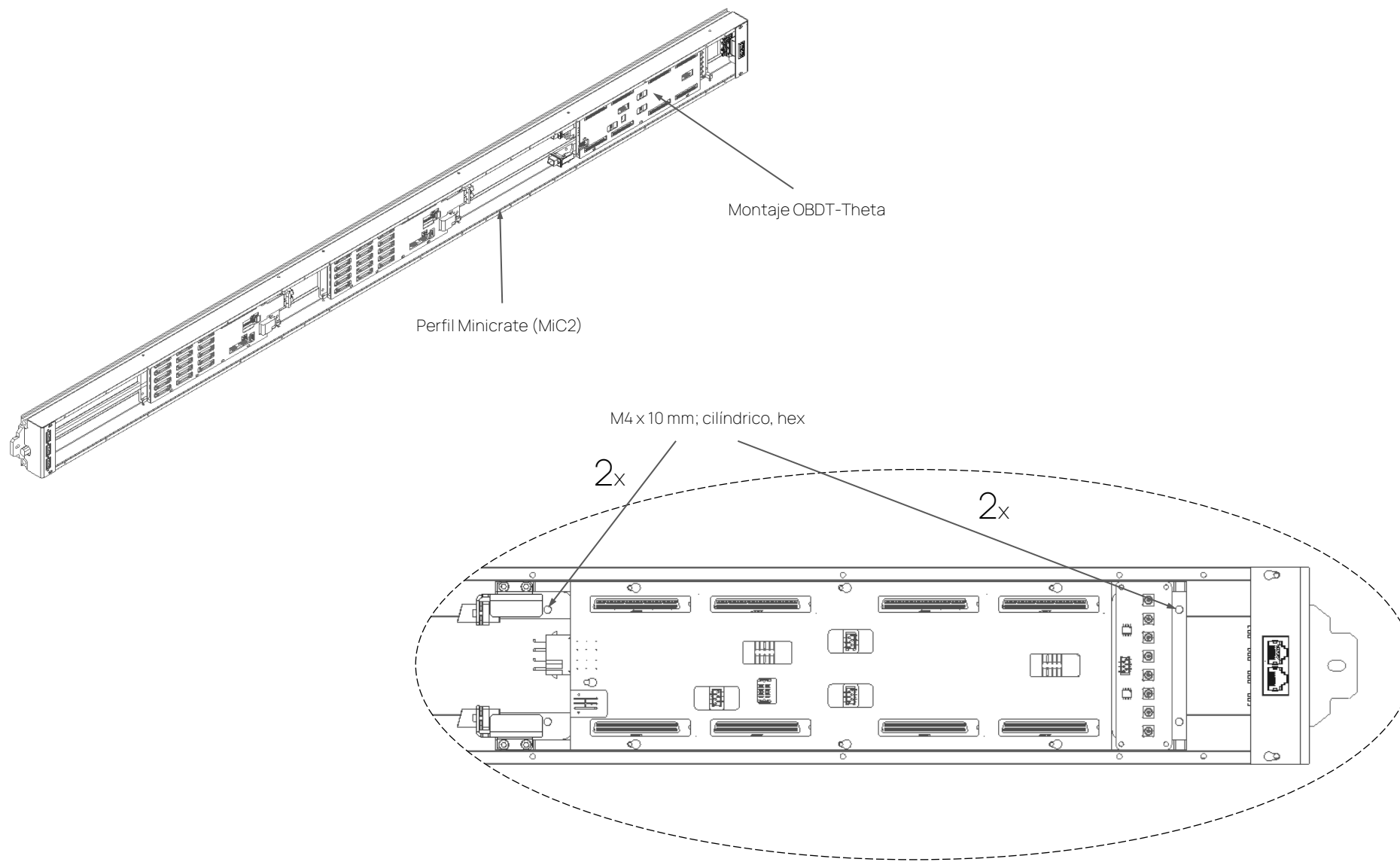


8. Tarjeta Theta-TestPulse

Coloque la tarjeta Theta-TestPulse y apriete los tornillos.



9. Insertar el montaje OBDT-Theta en el Minicrate (MiC2)



Anexo 11. Manual de montaje de MiC2. Preparación e instalación del sistema de refrigeración

Ver en las siguientes páginas.

Manual de montaje MiniCrate2 (MiC2)

Preparación e instalación del sistema de refrigeración

Manual elaborado por Jesús Cuchillo Ortega



Proyecto PID2020-116262RB-C42 financiado por:



1 | Introducción

Este manual está destinado al montaje de Minicrates que se llevará a cabo en el CIEMAT para la colaboración en la actualización del experimento CMS del CERN para la "Phase-2". Sus objetivos son facilitar el montaje y asegurar un correcto procedimiento.

2 | Clasificación de los perfiles minicrates

La clasificación de Minicrates depende principalmente del sector, tipo de cámara y lado de los servicios, entre otros factores. Obviando algunos criterios que no intervienen en este montaje, se ha hecho una lista simplificada para garantizar el seguimiento de los perfiles de aluminio en las instalaciones del CIEMAT.

Se establece la siguiente clasificación indicando tipo de Minicrate, longitud del perfil de aluminio, cantidad requerida, cantidad de repuesto y cantidad total:

TIPO MINICRATE	LONGITUD (mm)	Nº REQUERIDO	Nº REPUESTO	Nº TOTAL PERFILES
MB1	1704	60	5	65
MB2	1834	60	11	71
MB3	2085	60	6	66
MB4-4/10	1583	20	7	27
MB4-9/11	1081	10	5	15
MB4	1834	40	8	48

Para cada tipo de Minicrate se diferencia entre LEFT (Izq.) y RIGHT (Dcha.) según conexiones externas. Por tanto, de cada tipo de Minicrate la mitad serán LEFT y la otra mitad serán RIGHT. Esta distinción es importante para el montaje de las piezas de refrigeración.

Cada uno de estos tipos dispone de una relación de componentes diferente. Para su consulta se dispone de los documentos precisos que indican el despiece.

3 | Limpieza de los perfiles

Es necesario realizar una limpieza profunda de los perfiles de aluminio para eliminar los residuos que quedan después del mecanizado (sobre todo de taladrina, mezcla de agua y aceites que se usa como lubricante y refrigerante en la fabricación).

Los perfiles se entregan del taller en un palé y tras su limpieza se irán almacenando en las estanterías preparadas para ello.

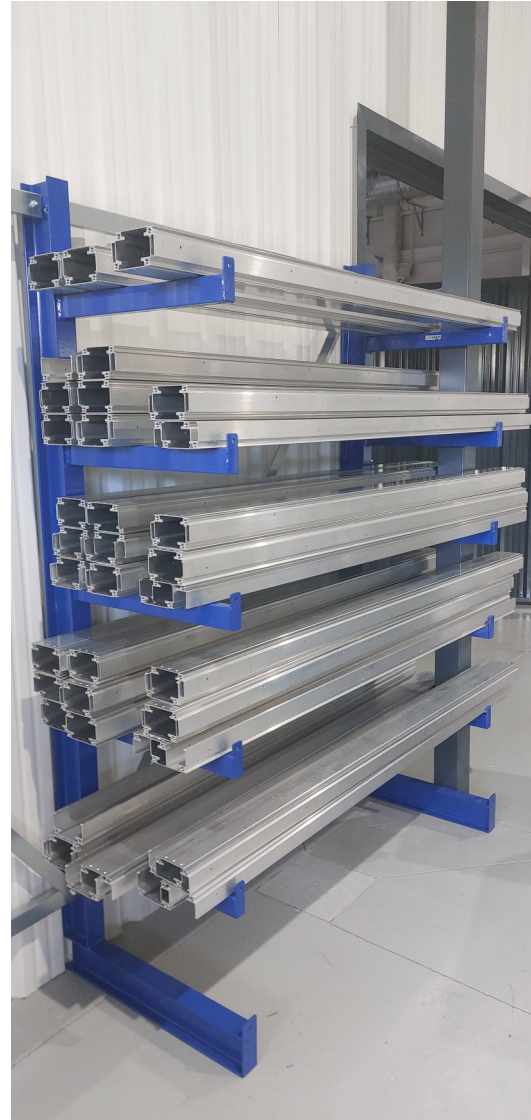
PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA:

Eliminar primero las rebabas de material que resultan de los taladros haciendo uso de una cuchilla desbarbadora. Se puede soplar con una pistola de aire comprimido.

Después se limpiarán las zonas laterales roscadas con acetona o quitagrasas para conseguir disolver los residuos y evitar que durante el funcionamiento se contamine el sistema de refrigeración. Se puede usar un trapo y un destornillador para entrar por los agujeros laterales.

Pasar un trapo humedecido con acetona por todos los recovecos del perfil.

Cuando el perfil esté limpio de grasa y no tiene tacto pringoso, como último paso, humedecer un trapo con alcohol y pasar por todas las superficies del perfil.



4 | Montaje. “Crimpaje” de los tubos en “U”

Herramientas necesarias: Llaves fijas de 15, 16 y 17mm; Rotulador permanente; Galgas de inspección; Tornillo de banco; Útil de premontaje

INSTRUCCIONES:

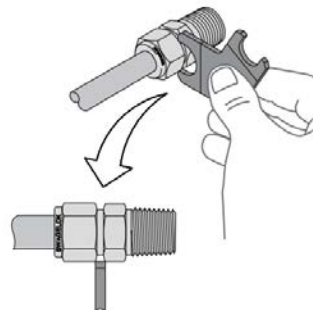
1. Marcar con un rotulador la medida de inserción del tubo según plano a tamaño real (aprox. 14,50mm desde extremo).
2. Poner tuerca con las férulas sobre el útil de premontaje anclado al tornillo de banco.
3. Introducir uno de los extremos del tubo en U en el útil asegurándose de que el tubo ha entrado hasta el tope y apretar la tuerca a mano.
4. Hacer una señal en la tuerca con un rotulador en la posición de las 6 en la esfera de un reloj.
5. Apretar la tuerca girándola **una vuelta y un cuarto (1 y 1/4)** hasta que coincida con la posición de las 9.
6. Desapretar la tuerca y desconectar el tubo del útil.
7. Repetir el mismo proceso en ambos extremos del tubo en U. Una vez realizado en ambos extremos, se pasará a la instalación en el perfil.



5 | Montaje. Racores codo 90° SWAGELOK

INSTRUCCIONES:

1. Comprobar que el codo lleva las dos arandelas metálicas y la junta tórica ensambladas para asegurar el cierre.
2. Llevar la tuerca hasta la superficie del codo dejando visible la zona roscada completa. Enroscar los codos con la mano hasta que la zona roscada quede dentro del perfil de aluminio.
3. Apretar ligeramente la tuerca del codo con la llave para posicionarlo. Repetir el mismo proceso con los dos codos.
4. Introducir el tubo en U con las férulas preensambladas dentro del cuerpo de los racores y girar la tuerca con la mano.
5. Una vez se ha comprobado que todos los elementos están en la posición correcta, apretar las tuercas progresivamente. Se recomienda girar la tuerca que une la U entre un cuarto y media vuelta.
6. Comprobar que la parte superior de la tuerca se queda sobre la línea de inserción marcada en el "crimpaje".
7. Situar la galga frente al espacio entre la tuerca y el hexágono del cuerpo. Si la galga no entra en el hueco, está suficientemente apretado.



IMPORTANTE diferenciar entre Minicrate tipo LEFT y tipo RIGHT porque la "U" no va en la misma posición. De cada tipo de Minicrates se deben hacer la mitad con la "U" en un extremo y la otra mitad con la "U" en el extremo contrario.

* Es necesario tener especial cuidado en la unión del racor con el perfil de aluminio. Estos racores están preparados para una unión acero-acero en la que no importa pasarse con el apriete pero, en este caso, al ser aluminio-acero, el apriete debe ser más ligero para que la unión se haga correctamente y no deforme el aluminio provocando fugas en el circuito.

6 | Pruebas de presión. Verificación del montaje

Para realizar las pruebas del sistema de refrigeración del Minicrate se empleará una bomba manual de comprobación TP25 de la marca Rothenberger (presión máxima 25 bares).

Se deben comprobar TODOS los Minicrates para poder verificar el sistema de cooling y su correcto funcionamiento en CMS.

INSTRUCCIONES:

1. Llenar el tanque de agua desionizada hasta una altura de 1/3 de su capacidad.
2. Conectar en uno de los codos del Minicrate el manómetro y en el otro codo el circuito preparado para las pruebas de presión.
3. Comprobar las válvulas de la bomba: la válvula con el fondo rojo (V1) debe estar abierta y la otra válvula (V2) cerrada.
4. Desapretar ligeramente la unión del lado del manómetro al codo del Minicrate como punto de purga de la instalación. Retirar el gancho de bloqueo del mango y bombear líquido hasta que se haya purgado todo el aire del circuito. Cerrar el punto de purga.
5. Seguir bombeando hasta alcanzar la presión de comprobación. El Minicrate se deberá comprobar a 15-16 bares pero, para asegurar su funcionamiento, se elevará hasta 20 bares.
6. Cerrar la válvula V1. Si al bombear se sobrepasa la presión, se puede abrir la válvula V2 ligeramente y después cerrar.
7. Comprobar que el manómetro marca la misma presión que la bomba y girar la válvula de bola (mango negro) para cerrar el circuito.
8. En caso de no haber fugas, no habrá caídas de presión en la lectura del manómetro. Al finalizar, abrir todas las válvulas: de bola, V1 y V2.

