

Diseño del sistema estructural de un telescopio de muones para la aplicación de
muografía en el volcán Cerro Machín

Darling Tatiana Sandoval Galvis y Laura Daniela Vasquez Durán

Trabajo de Grado para Optar al Título de Diseñadora Industrial

Directora

Jenny Katherine Rodriguez García

Magister Ingeniería Industrial

Codirector

Juan Alexis Mejía Iguarán

Diseñador Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Diseño Industrial

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por inspirarme, apoyarme y confiar en mí; por el valor que le dan a lo que hago y soy.

A Kevin, por ser parte de mi vida y hacerla más apacible; por hacerme ver un futuro.

Especialmente a mi nono y mi tío abuelo, por la inspiración que han sido a través de sus vidas; y a mi nona, cuya felicidad imagino si pudiera verme ahora.

Y para mis amigos, porque además de la alegría de compartir juntos el final de este proceso, también aprendí que la nostalgia forma parte de lo mucho que significaron.

- Darling.

Dedicatoria

Algo me hace pensar que los lápices que me traía papá cuando era niña contribuyeron a esto;
que ver a mi mamá tallando madera y pintando fue lo que despertó mi curiosidad;
que ayudarle a mi hermano a construir, me dio la primera alegría de crear.
A ustedes, por permitirme encontrar el significado de pertenecer.

Y a mis amigos, porque el trayecto recorrido fue más bonito en su compañía.
Por enseñarme a habitar en la ternura y llenarme de risa cuando esta faltaba.

- Daniela

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a nuestra directora de proyecto, Jenny Rodríguez, y a nuestro codirector, Juan Mejía, por su acompañamiento y su orientación en el proceso de diseño y desarrollo general de este trabajo.

Asimismo, agradecemos al profesor Luis Nuñez por permitirnos formar parte del proyecto general MuTe, así como al Grupo de Investigación en Relatividad General (GIRG), al cual se encuentra inscrito dicho proyecto, por integrarnos y acompañarnos durante la ejecución de este proceso. De manera especial, a sus integrantes Christian Sarmiento, Rafael Martínez, Diego Castillo y Jorge Perea, por su disposición y apoyo.

Los autores agradecen la financiación de este trabajo en el marco del proyecto «Integración de la muongrafía con métodos geofísicos estándar para la construcción de un modelo de densidad 3D: aplicación al volcán Cerro Machín», bajo el proyecto 82242 de la convocatoria 890 de 2020, Minciencias, administrado a través del contrato ICETEX 2022-0718.

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos el espacio, los recursos académicos y los fundamentos conceptuales necesarios para la realización de este proyecto.

Un especial agradecimiento a nuestras familias y amigos, por su apoyo incondicional, por escucharnos y motivarnos a continuar incluso en los momentos más exigentes.

Finalmente, nos agradecemos mutuamente por acompañarnos en esta etapa de nuestras vidas y por haber culminado juntas este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	16
1. Planteamiento del problema.....	17
1.1 Justificación.....	21
2. Objetivos.....	25
2.1 Objetivo general.....	25
3. Marco teórico.....	25
4.1.1. Muones.....	26
4.1.2 Muografía.....	26
4.1.3 Muograma.....	27
4.1.4 Instrumento científico.....	27
4.1.5 Telescopio para muones.....	27
4.1.6 MuTe.....	28
4.1.7 Tecnologías de detección de muones.....	28
4.1.7.1 Centelladores.....	28
4.1.7.2 Detector gaseoso.....	29
4.1.7.3 Emulsiones nucleares.....	29
4.1.8 PCB (Printed Circuit Board).....	30
4.1.9 SiPM (Silicon Photomultiplier).....	30
4.1.10 Fibra WLS (Wavelength Shifting Fiber).....	30

4.1.11 FERS (Fast Electronic Readout System).....	30
4.1.12 JANUS.....	31
4.1.13 Estructuras geo - antrópicas.....	31
4.1.14 Volcán Cerro Machín.....	31
5. Metodología.....	32
6. Ejecución del proyecto.....	36
6.1 Fase 1. Análisis de lo existente.....	37
6.1.1 Revisión de literatura y análisis de componentes.....	38
6.1.2 Estudio del sistema actual y condiciones del entorno.....	40
6.1.3 Requerimientos generales del telescopio.....	45
6.2 Fase 2. Planteamiento de propuesta.....	48
6.2.1 Componente 1. Componente de unión PCB - SiPM - Barra centelladora (Acople).....	49
6.2.1.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d de acople.....	51
6.2.1.2 Análisis y selección de materiales preliminares de Acople.....	53
6.2.1.3 Construcción de prototipos del componente (Acople).....	56
6.2.1.4 Verificaciones con experto para el acople.....	59
6.2.1.5 Validación del componente acople.....	61
6.2.2 Componente 2. Soporte para barras centelleadoras.....	63
6.2.2.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d de soporte para barras.....	65
6.2.2.2 Análisis y selección de materiales preliminares para prototipado del soporte para	

barras.....	67
6.2.2.3 Construcción de prototipos del componente de soporte para barras.....	69
6.2.2.4 Socialización con expertos del soporte para barras.....	70
6.2.2.5 Validación por componente de soporte para barras.....	74
6.2.2.6 Análisis y selección de materiales finales del soporte para barras.....	76
6.2.3 Componente 3. Trampa de luz para el sistema de cableado.....	80
6.2.3.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d de trampa de luz.....	81
6.2.3.2 Construcción de prototipos trampa de luz.....	83
6.2.3.3 Verificaciones del componente trampa de luz.....	85
6.2.3.4 Validación por componente de la trampa de luz.....	86
6.2.3.5 Análisis y selección de materiales preliminares para trampa de luz.....	87
6.2.4 Componente 5, Soporte para la electrónica.....	93
6.2.4.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d del soporte para la electrónica.....	96
6.2.4.2 Análisis y selección de materiales preliminares del soporte para la electrónica.....	97
6.2.4.3 Análisis preliminar de la estructura del soporte para la electrónica.....	98
6.2.4.4 Verificaciones del soporte para la electrónica.....	100
6.2.4.5 Construcción de prototipos del componente de soporte para la electrónica.....	104
6.2.5 Componente 6. Sistema de cableado (separador para cables).....	106
6.2.5.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3D del separador para cables.....	108

6.2.5.2 Análisis y selección de materiales preliminares del soporte para el separador de cables.....	111
6.2.5.3 Construcción de prototipos del componente separador para cables.....	112
6.2.6 Componente 7. Configuración de estructura.....	116
6.2.6.1 Requerimientos específicos de la estructura general.....	116
6.2.6.2 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3D (Estructura)....	118
6.2.6.3 Verificaciones de la estructura.....	121
6.2.6.4 Análisis preliminar estructural.....	122
6.2.6.5 Análisis y selección de materiales para estructura.....	126
6.2.6.6 Validación a través de análisis de la estructura por elementos finitos (FEA).....	129
6.2.6.7 Comparación del peso de la estructura en el uso de materiales. 61.....	135
6.2.6.8 Módulos para transporte de la estructura.....	136
7. Resultados concluyentes de la ejecución del proyecto.....	138
8. Conclusiones.....	142
9. Recomendaciones.....	145
Referencias Bibliográficas.....	146

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación de telescopios en términos estructurales.....	40
Tabla 2. Requerimientos generales del telescopio.....	46
Tabla 3. Requerimientos del componente 1 (Acople).....	51
Tabla 4. Análisis de propiedades del material.....	54
Tabla 5. Comparación de materiales poliméricos.....	56
Tabla 6. Matriz de materiales comerciales con propiedades similares fuera de la base de datos.....	57
Tabla 7. Comparación de alternativas.....	59
Tabla 8. Descripción de experto en instrumentación electrónica.....	60
Tabla 9. Comparación de alternativas respecto a requerimientos y valoración de experto.....	60
Tabla 10. Descripción del segundo experto en astroparticulas.....	61
Tabla 11. Resultados obtenidos de la validación.....	62
Tabla 12. Requerimientos específicos del componente 2 (soporte).....	65
Tabla 13. Cotización de materiales para prototipado (alternativa A y C).....	68
Tabla 14. Cotización de materiales para prototipado (alternativa B).....	68
Tabla 15. Descripción de experto en astropartículas.....	71
Tabla 16. Descripción de experto en astropartículas.....	72
Tabla 17. Comparación de alternativas respecto a requerimientos y valoración de experto.....	72
Tabla 18. Análisis de propiedades del material.....	76
Tabla 19. Comparación de materiales plásticos.....	78

Tabla 20. Matriz de materiales comerciales con propiedades similares fuera de la base de datos	79
Tabla 21. Requerimientos específicos componente 4 trampa de luz.....	80
Tabla 22. Comparación de alternativas respecto a requerimientos y valoración de experto.....	84
Tabla 23. Análisis de propiedades del material.....	87
Tabla 24. Comparación de materiales poliméricos.....	88
Tabla 25. Matriz de materiales de la base de datos.....	90
Tabla 26. Requerimientos específicos del soporte para la electrónica.....	93
Tabla 28. Requerimientos específicos del componente separador para cables.....	104
Tabla 29. Comparación de alternativas respecto a requerimientos.....	107
Tabla 30. Análisis de propiedades del material.....	108
Tabla 31. Requerimientos específicos del componente 7, estructura general.....	114
Tabla 32. Análisis de propiedades del material.....	123
Tabla 33. Comparación de metales.....	124
Tabla 34. Matriz de materiales con propiedades de la base de datos y comerciales.....	126

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diseño CAD del Telescopio MuTe 1.0.....	20
Figura 2. Aplicaciones de la muografía en múltiples campos.....	23
Figura 3. Muograma.....	28
Figura 4. Telescopio de muones MuTe 1.0.....	30
Figura 5. Esquema de una barra centelladora.....	31
Figura 6. CAEN FERS-5200 DAQ.....	32
Figura 7. Interfaz del Software de adquisición de datos Janus.....	33
Figura 8. Volcán Cerro Machín.....	34
Figura 9. Metodología de diseño centrado en el producto.....	35
Figura 10. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 1.....	39
Figura 11. Reunión con los integrantes del proyecto.....	43
Figura 12. Árbol de problemas generales del telescopio.....	44
Figura 13. Esquema de Descomposición Estructural del Telescopio.....	45
Figura 14. Diagrama de Descomposición Estructural del Telescopio.....	46
Figura 15. Moodboard conceptual y estético - formal del sistema.....	49
Figura 16. Diagrama de descomposición de actividades del objetivo específico 2.....	50
Figura 17. Esquema del primer componente.....	52
Figura 18. Alternativas de componente de unión PCB - SiPM - Barra Centelladora.....	53
Figura 19. Diagrama de Ashby.....	55

Figura 20. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 3.....	59
Figura 21. Alternativas prototipadas para toma de decisiones.....	60
Figura 22. Esquema de elementos que relacionan el segundo componente.....	66
Figura 23. Alternativas de Soporte para barras centelladoras.....	68
Figura 24. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 3.....	72
Figura 25. Alternativas prototipadas para toma de decisiones.....	73
Figura 26. Socialización con el grupo.....	74
Figura 27. Prototipado del componente (soporte para barras centelladoras).....	77
Figura 28. Simulación de detección de partículas de cada panel centelleador.....	78
Figura 29. Software de adquisición de datos. Janus.....	78
Figura 30. Diagrama de Ashby.....	81
Figura 31. Visualización de elementos en los que interviene el componente 3.....	83
Figura 32. Alternativas de Trampa de luz.....	85
Figura 33. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 3.....	86
Figura 34. Prototipo de alternativa A.....	86
Figura 35. Prototipo de alternativa B.....	87
Figura 36. Medición de entrada de partículas para ambos sistemas en software Janus.....	89
Figura 38. Visualización de propuesta del sistema panel centelleador.....	95
Figura 39. Visualización de elementos que une el componente 5.....	97
Figura 40. Alternativas Soporte para la electrónica.....	99
Figura 41. Descripción de lineamientos para la simulación.....	101

Figura 42. Simulación de concentración de esfuerzos.....	103
Figura 43. Simulación de desplazamiento.....	105
Figura 44. Simulación de deformaciones unitarias.....	106
Figura 45. Prototipo del soporte para la electrónica.....	107
Figura 46. Visualización de elementos con los que se relaciona el componente 6.....	109
Figura 47. Alternativas del separador para cables.....	111
Figura 48. Construcción de prototipo de separador para cables.....	115
Figura 49. Distribución de componentes en el módulo electrónico.....	117
Figura 50. Propuesta de módulo electrónico.....	118
Figura 51. Esquema que relaciona los elementos del componente 7.....	119
Figura 52. Propuestas de alternativas de estructura.....	121
Figura 53. Matriz QFD requerimientos vs. alternativas.....	125
Figura 54. Simulación de desplazamiento en el eje Z de la estructura.....	127
Figura 55. Propuesta de la estructura. Render.....	127
Figura 56. Diagrama de Ashby.....	131
Figura 57. Descripción de lineamientos para la simulación de la estructura general en la parte superior.....	134
Figura 68. Simulación de concentración de esfuerzos en el marco superior de la estructura general.....	136
Figura 59. Simulación de desplazamientos en el marco superior de la estructura general.....	137
Figura 60. Simulación de factor de seguridad en el marco superior de la estructura general.....	138

Figura 61. Comparación del peso estructural..... 139

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional.

Apéndice A: Benchmarking de componentes

Apéndice B: Recopilación de presentaciones del proceso de diseño para el seminario de astropartículas del grupo LIDeRa

Apéndice C: Encuesta de percepción de uso para el componente (separador para cables)

Apéndice D: Planos técnicos de componentes

Apéndice E: Diagrama de uso de los componentes

Apéndice F: Vídeo de uso y manipulación de componentes (Soporte de la electrónica y separador para cables)

Apéndice G: Análisis preliminar estático de la estructura

Apéndice H: Análisis con variaciones en la configuración estructural

Resumen

Título: Diseño del sistema estructural de un telescopio de muones para la aplicación de muografía en el volcán Cerro Machín¹

Autor: Darling Tatiana Sandoval Galvis, Laura Daniela Vasquez Durán²

Palabras Clave: Telescopio de muones, Muografía, Diseño Estructural, Instrumentación Científica

Descripción:

La muografía es un método que emplea sistemas de detección para el análisis de estructuras geo-antrópicas mediante el registro de la trayectoria de muones. El desarrollo de telescopios con detectores centelladores ha permitido el estudio de este tipo de estructuras; sin embargo, su implementación en entornos de difícil acceso presenta dificultades asociadas a condiciones ambientales, transporte y montaje de los instrumentos, factores que inciden en la precisión y durabilidad.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta de diseño del sistema estructural del telescopio de muones del Grupo de investigación en Relatividad General, GIRG para mejorar su precisión angular, permeabilidad lumínica y capacidad de transporte, considerando condiciones del entorno de operación para la obtención de la imagen de un muograma.

Para ello, se analizaron diferentes configuraciones estructurales, seguido a esto se diseñaron, se hizo prototipado, verificación y evaluación de los componentes prioritarios del sistema. Este proceso permitió optimizar el diseño en términos de distancia entre el SiPM y la fibra, el movimiento del sistema ensamblado y la entrada de luz no deseada para obtener mejor calidad de la imagen. Adicionalmente, se propuso un modelado 3D estructural del telescopio final donde se define el método del sistema de medición angular, alineación entre los paneles, la organización de sus elementos y los materiales, previendo facilitar el transporte y montaje para su futura construcción.

Los resultados obtenidos, muestran que la propuesta de diseño es una base para mejorar la estabilidad y funcionalidad de un telescopio de muones, facilitando su aplicación en estudios geofísicos, particularmente en la exploración de estructuras volcánicas como el Cerro Machín.

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Diseño Industrial. Directora: Jenny Rodríguez. Magíster en Ingeniería Industrial. Codirector: Juan Alexis Mejía. Diseñador industrial

Abstract

Title: Design of the Structural System of a Muon Telescope for the Application of Muography at Cerro Machín Volcano³

Author(s): Darling Tatiana Sandoval Galvis, Laura Daniela Vasquez Durán⁴

Key Words: Muon telescope, Muography, Structural design, Scientific instrumentation

Description:

Muography is a method that employs detection systems for the analysis of geo-anthropogenic structures through the recording of muon trajectories. The development of telescopes with scintillator detectors has enabled the study of this type of structure; however, their implementation in hard-to-access environments presents difficulties associated with environmental conditions, transportation, and instrument assembly- factors that affect accuracy and durability.

The objective of this work is to develop a proposed design of the structural system of the muon telescope of the General Relativity Research Group (GIRG) in order to improve its angular precision, light tightness, and transportability, taking into account the operating environment conditions for obtaining a muogram image.

To this end, different structural configurations were analyzed; subsequently, the priority components of the system were designed, prototyped, verified, and evaluated. This process made it possible to optimize the design in terms of the distance between the SiPM and the fiber, the movement of the assembled system, and the entry of unwanted light, in order to obtain improved image quality. Additionally, a final 3D structural model of the telescope was proposed, defining the angular measurement system, panel alignment, element organization, and materials, with the aim of facilitating transport and assembly for future construction.

The obtained results show that the proposed design provides a basis for improving the stability and functionality of a muon telescope, facilitating its application in geophysical studies, particularly in the exploration of volcanic structures such as Cerro Machín.

³Degree Work

⁴Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial Design. Industrial Design. Director: Jenny Rodríguez. Master's in industrial engineering. Co-Director: Juan Alexis Mejía. Industrial Designer

Introducción

Este documento aborda el diseño y desarrollo de la optimización estructural del telescopio de muones del proyecto MuTe 2.1 propuesto por el Grupo de investigación en Relatividad General (GIRG), interviniendo componentes técnicos que mejoren la precisión de los datos obtenidos en la imagen de un muograma mediante la técnica de muografía.

La muografía es una técnica no invasiva que a través de la detección de muones, partículas altamente penetrantes capaces de atravesar grandes espesores de material sólido (Riggi, F. 2025), permite analizar la densidad de estructuras geo-antrópicas y formaciones geológicas (Alvarez, L. 1970). Para ello, se emplean detectores gaseosos, emulsiones nucleares o centelladores, siendo estos últimos los más utilizados debido a su estabilidad y menor requerimiento de condiciones específicas para su uso (S. Procureur. 2017).

En este contexto, los telescopios de muones se han convertido en instrumentos científicos alternativos para la exploración de volcanes, estructuras subterráneas y otros objetos de interés en diferentes campos del conocimiento. Sin embargo, su aplicación en terrenos de difícil acceso presenta algunos problemas estructurales y operativos, como el peso y las dimensiones de la estructura, la dificultad en el ensamblaje y alineación de los paneles de detección, la interferencia lumínica y la resistencia a condiciones ambientales adversas, lo cual afecta su transportabilidad, estabilidad y precisión en la recolección de datos.

El grupo de GIRG de la Universidad Industrial de Santander (UIS) cuenta con el telescopio de muones MuTe, el cual, presentó dificultades en la medición de datos para la obtención de muogramas, asociadas principalmente a las condiciones de operación a la intemperie y limitaciones en su estructura física. Estos problemas se manifiestan en necesidades

de mejora relacionadas a variables como la permeabilidad lumínica, la alineación de los paneles, el transporte y la graduación del ángulo de inclinación del telescopio.

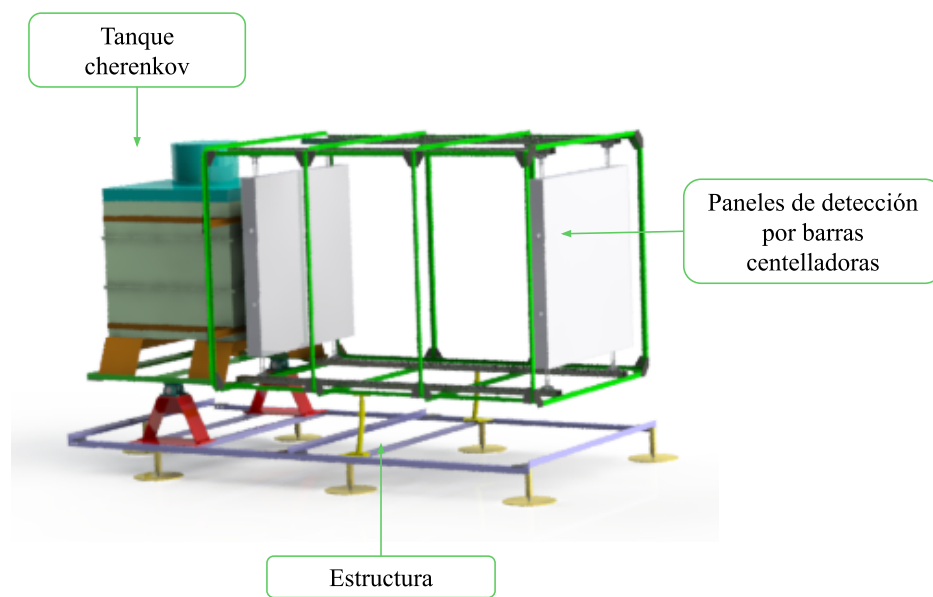
Este trabajo presenta el planteamiento del problema, la justificación del proyecto, los objetivos a alcanzar, el diseño de componentes priorizados mediante una metodología de diseño centrado en el producto que incluye el análisis del sistema actual, la generación de alternativas de solución a través de bocetos, modelado y procesos de verificación y validación de cada componente estructural para mejorar la funcionalidad y precisión del telescopio de muones, facilitando su implementación en estudios de muografía con aplicaciones científicas y de monitoreo de estructuras volcánicas de alto riesgo.

1. Planteamiento del problema

Los telescopios de muones facilitan la observación y experimentación dentro de distintos campos del conocimiento como la geología, la vulcanología, la arqueología y la seguridad, estos permiten la exploración de estructuras internas, como cámaras magmáticas, conductos, zonas fracturadas o colapsadas de los volcanes, sin necesidad de métodos invasivos (Luo et al., 2024). En los últimos años, su aplicación ha demostrado ser particularmente útil en la vulcanología (S. Procureur. 2017) lo que ha conducido a que en Colombia se lleven a cabo estudios en los que se analiza su viabilidad técnica para el análisis de estructuras volcánicas, entre estas el volcán Cerro Machín, considerado de alto riesgo debido a su peligrosidad y su posible impacto en comunidades cercanas como Cajamarca, Tolima (Peña Rodriguez J., 2021). Por esto, el grupo GIRG desarrolló el proyecto MuTe 1.0 (Muon Telescope, por sus siglas en inglés), un instrumento híbrido que utiliza centelleadores y un detector cherenkov, como se observa en la Figura 1, para determinar la dirección de las partículas que inciden en el detector después de

atravesar el objetivo geofísico (Asorey H, et Al. 2017). Sin embargo, la aplicación de estos telescopios en entornos de difícil acceso, como áreas volcánicas, presenta múltiples desafíos estructurales que afectan su eficiencia y operatividad. El telescopio MuTe 2.0 contiene en su diseño estructural: Dos paneles, compuestos por barras centelleadoras acopladas a sensores SiPM y una caja estructural externa diseñada para el bloqueo de luz y protección de los componentes. Junto con el sistema de graduación y alineación entre los paneles, y el soporte para su instalación en la intemperie. Por último el módulo de protección de la electrónica FERS de adquisición de datos.

Figura 1. *Diseño CAD del Telescopio MuTe 1.0*



Nota. El gráfico representa la configuración estructural del primer proyecto realizado Mute 1.0. Tomado del sitio web del grupo halley de la Universidad Industrial de Santander.

Para que este tipo de telescopios de muones obtengan datos correctos es necesario evitar la entrada de la luz en los paneles centelleadores, ya que puede generar ruido en la imagen final.

Independientemente de su configuración estructural exterior, estos telescopios usan en sus componentes técnicos material centelleante y sensores fotomultiplicadores (SiPM), lo que produce una emisión lumínica proporcional a la energía de la partícula (Duarte Carrasco, J. A. 2019). Por esta razón, es necesario evitar la entrada de luz que interfiera en la medición y afecte la calidad de los datos.

Los detectores de muografía por paneles centelleadores típicos tienen un área activa superior a 30×30 cm y pueden llegar a medir varios m^2 , característica que influye directamente en la transportabilidad del instrumento (S. Bouteille. 2016). Esta se ve afectada ya sea por carretera en automotores o transporte de tracción animal, especialmente si se consideran características como el material empleado, peso y construcción monolítica de algunos componentes en la estructura, y si se tiene en cuenta la inestabilidad del terreno en zonas de difícil acceso.

Siguiendo los lineamientos de Procureur (2017), el diseño estructural de estos telescopios requiere estabilidad y resistencia a factores externos ya que las condiciones del entorno pueden comprometer la integridad del detector afectando componentes sensibles de alto costo y difícil adquisición y reparación. Es por esto que la estructura del telescopio debe ser resistente a cambios ambientales como humedad, polvo, tormentas y variaciones de temperatura, ya que estas variables podrían afectar la eficiencia de detección o provocar el deterioro progresivo de los componentes. Además, aunque el mantenimiento y monitoreo de las mediciones se intervienen a distancia lo que permite la supervisión del instrumento, es difícil acceder al sitio de estudio en caso de fallas que requieran intervención física.

Por otro lado, el mismo autor citado anteriormente resalta la necesidad de garantizar una adecuada precisión angular para alinear los paneles, así como facilitar su ajuste y variación, son

algunos de los factores que influyen en la precisión de los estudios muográficos. Asimismo, un telescopio de muones debe ser autónomo, con un consumo energético optimizado, utilizando fuentes de energía locales como paneles solares (S.Procureur. 2017). Debido a esto, dichas variables y componentes que se adicionan fuera de los detectores deben tenerse en cuenta en el diseño de la estructura.

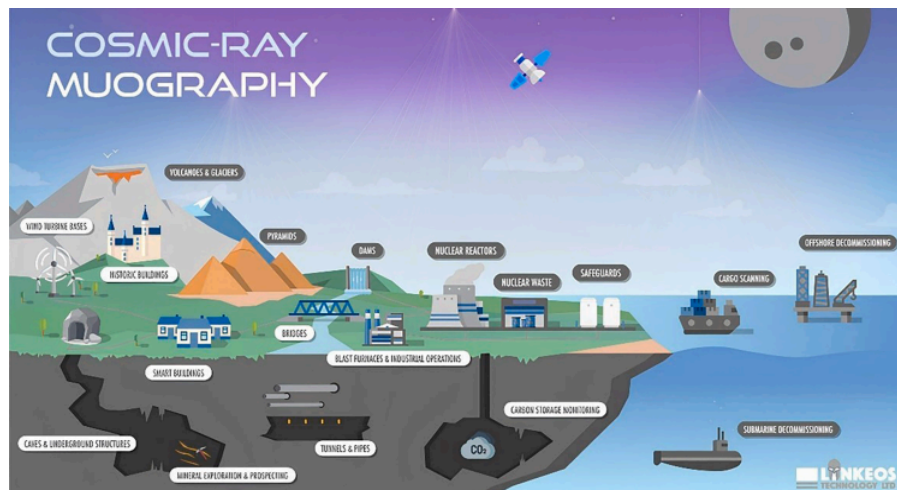
Por lo anterior, la problemática principal se centra en la deficiencia de la estructura del telescopio de muones del proyecto MuTe para su aplicación en muografía, lo que deriva de diversas causas, como el uso de estructuras monolíticas pesadas y de difícil ensamblaje, el peso y las dimensiones del dispositivo, la dificultad para alinear los paneles de detección y la permeabilidad lumínica dentro de las matrices de detección. Estas deficiencias generan consecuencias adversas, entre ellas, dificultades en el desarme del telescopio, daños en el sistema electrónico, baja confiabilidad en los datos obtenidos, problemas en el transporte y aumento del ruido en la señal.

Este proyecto se enfoca en resolver los desafíos estructurales que se presentan en el telescopio de muones de la segunda versión del proyecto MuTe, mediante una propuesta de diseño que conduzca a mejorar la adquisición precisa de los datos. Esto llegará a cambiar a menor frecuencia el reemplazo de componentes costosos y facilitar el monitoreo del volcán Cerro Machín. A su vez, se podría contribuir a futuros proyectos al proporcionar información para la toma de decisiones en la gestión del riesgo, al trabajar desde entornos interdisciplinarios que generan un precedente donde el diseño puede apoyar otras áreas del conocimiento. De esta forma, aunque el aporte de este trabajo sea de carácter técnico desde el Diseño Industrial, impacta indirectamente en áreas sociales, educativas y económicas relacionadas con el uso del telescopio.

2. Justificación

La muografía, al ser una técnica no invasiva, presenta un amplio rango de aplicaciones en diversas áreas de interés, entre las que destacan la vulcanología, la arqueología y la seguridad. En particular, la imagen obtenida a través de muografía ha demostrado ser una herramienta efectiva para la obtención de imágenes de la densidad de objetos de gran tamaño, esto es de gran interés para el análisis geológico y geomorfológico, explorando su potencial en estudios sobre la evolución interna de estructuras volcánicas y en la exploración de recursos minerales (Luo et al., 2024).

Figura 2. Aplicaciones de la muografía en múltiples campos.



Nota. La imagen presenta los campos en los que se aplica la muografía. Tomado de: Imaging technology based on the interaction between muon and material.

Además, como se puede observar en la Figura 2, la muografía se aplica en diversos campos. En infraestructura y construcción, permite evaluar la estabilidad de puentes, túneles y edificios mediante la identificación de fallas ocultas. En minería y exploración subterránea, facilita la detección de depósitos minerales y cavidades sin necesidad de realizar perforaciones

invasivas. En el ámbito de la seguridad nuclear, se emplea para la inspección de reactores y materiales radiactivos sin abrir las instalaciones. Finalmente, en el transporte marítimo, posibilita la inspección de contenedores en puertos para la detección de materiales ilegales o peligrosos. También se usa en la exploración de recursos naturales, analizando la distribución de materiales en el subsuelo, como agua o petróleo. Es una técnica versátil y de alta precisión para visualizar estructuras ocultas en distintos ámbitos científicos e industriales (Luo et al., 2024).

El proyecto MuTe, desarrollado por el Grupo de investigación en Relatividad General (GIRG), es un telescopio diseñado para el estudio de distintos escenarios geofísicos. Este telescopio de muones emplea un sistema de detección basado en centelleadores, con el fin de determinar la dirección de las partículas que inciden en el detector después de atravesar el objetivo geológico. Como parte de su implementación, se diseñó, construyó, calibró y puso en funcionamiento el prototipo de telescopio 2.0 compuesto por dos paneles centelleadores, destinado a detectar el flujo de muones atmosféricos a través del volcán Cerro Machín, ubicado en el departamento de Tolima, Colombia (Peña-Rodríguez J., 2021).

Dado que el volcán continúa activo y es considerado potencialmente peligroso, se busca continuar su estudio con fines de monitoreo y prevención de desastres naturales. Esta actividad no solo impacta a comunidades cercanas como Cajamarca e Ibagué (Peña-Rodríguez J., 2021), sino también a infraestructuras como la vía La Línea, ruta que conecta al puerto de Buenaventura, lo que tendría implicaciones sociales y económicas a nivel nacional (Cabrera - Trujillo, 2019).

Adicional a lo anterior, los detectores centelleadores tienen un coste menor y una mayor adaptabilidad ambiental, pero su resolución espacial suele estar limitada al nivel milimétrico. Además, en entornos de alta temperatura y vibración donde se encuentra el monitoreo de

volcanes, los detectores requieren mayor estabilidad y robustez mecánica. (Gangling Hou., et al, 2025). El diseño actual del sistema estructural de MuTe presenta limitaciones en su estructura en cuanto a calibración angular, control de entrada de luz, ensamblaje y transportabilidad.

En respuesta, este proyecto busca proponer una nueva propuesta de diseño estructural que mejore su funcionalidad, portabilidad y resistencia en condiciones adversas.

El volcán Cerro Machín se localiza en una zona de clima que varía entre templado y cálido, con una temperatura media aproximada de 20 °C, una precipitación pluviométrica anual cercana a 1150 mm y una humedad relativa promedio del 85 %. Las estaciones secas y lluviosas se alternan frecuentemente a lo largo del año. La región presenta un relieve montañoso y vegetación que, de acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Espinal, 1977), corresponde principalmente a bosque muy húmedo Premontano (bmh-PM) y bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB) (Servicio Geológico Colombiano [SGC], s. f.). Cabe recalcar que estas condiciones son tomadas en cuenta en la propuesta y selección y fichas técnicas de materiales, sin embargo la comprobación de los mismos tendrá que realizarse en etapas posteriores, por el costo de los materiales reales de los componentes y porque la forma de validar la resistencia de los mismos es de forma longitudinal. Se espera que una estructura optimizada no sólo facilite el montaje y operación en terrenos de difícil acceso, sino que también incremente la precisión y confiabilidad en la adquisición de datos.

Además, dada la dificultad de adquisición y el costo de algunos de sus componentes, que no siempre están disponibles en el mercado y requieren largos tiempos de espera en el proceso de compra (Procureur, 2017), entre estos componentes, uno de los más sensibles es la electrónica CAEN-FERS 5200, por esto, contar con un sistema estructural más estable podría reducir costos de mantenimiento. Asimismo, al minimizar interferencias externas como la entrada de luz y

adaptar la estructura a las condiciones reales de uso, puede mejorar considerablemente la confiabilidad y vida útil del equipo (Sarmiento, 2025).

Este proyecto resulta de interés para Grupo de investigación en Relatividad General (GIRG), investigadores en física de partículas quienes buscan la financiación de Minciencias por medio de la propuesta de diseño de este proyecto y, en una siguiente fase, que no se aborda en este proyecto, desarrollarlo para continuar su investigación y obtener una imagen del muograma del volcán Cerro Machín. Es necesario aclarar que este trabajo no tendrá el alcance a la construcción real, pero la propuesta de diseño, se especificó para que pueda ser útil eventualmente para disciplinas como las geociencias, además de entidades dedicadas al monitoreo de estructuras naturales y artificiales. Asimismo, comunidades ubicadas en zonas de riesgo volcánico podrían beneficiarse directamente de la continuidad de estos estudios mediante una estructura de telescopio más robusta, práctica y precisa.

A través del enfoque del Diseño Industrial, se permite abordar problemáticas asociadas a la interacción entre el usuario y el instrumento, la adaptabilidad a condiciones de intemperie, la modularidad, el transporte y el mantenimiento del telescopio, aspectos que afectan directamente en la precisión de los datos obtenidos. De este modo, actúa como un puente entre la investigación científica y la materialización de soluciones técnicas.

En este contexto, surge la necesidad de abordar la siguiente pregunta problema:
¿Cómo influyen las características estructurales y técnicas del telescopio de muones, teniendo en cuenta las condiciones del entorno, en la precisión de las mediciones para la obtención de un muograma?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta de diseño del sistema estructural de un telescopio de muones que permita mejorar su precisión angular, permeabilidad lumínica y transporte, teniendo en cuenta las condiciones del entorno para obtener un muograma.

3.2 Objetivos específicos

Analizar tecnologías existentes mediante la comparación de configuraciones mecánicas y sistemas de protección contra afectaciones externas, que permita la identificación de requerimientos para el diseño estructural del telescopio.

Plantear una propuesta estructural integral mediante modelado asistido por computador y simulación con análisis de elementos finitos considerando requerimientos de resistencia mecánica, precisión angular y permeabilidad lumínica.

Construir un prototipo de media fidelidad para componentes clave del sistema estructural que permita la evaluación de su comportamiento ante las condiciones ambientales previstas.

Evaluar el desempeño de la propuesta estructural mediante pruebas de laboratorio por ensayo de carga, permeabilidad lumínica y análisis de situación de uso observacional, con el fin de comprobar su respuesta frente a condiciones esperadas del entorno.

4. Marco teórico

4.1 Marco referencial conceptual

Para facilitar la comprensión de este proyecto, se establecen los conceptos relacionados a la muografía y los factores involucrados.

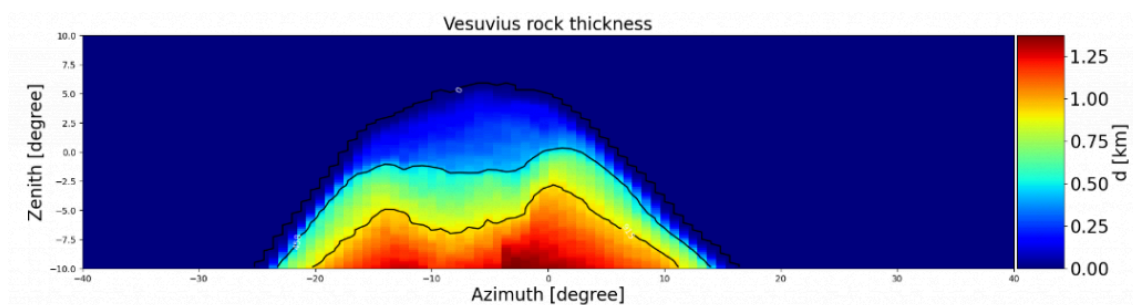
4.1.1. Muones

En el contexto del proyecto, los muones son utilizados para obtener información sobre la estructura interna del volcán a través de su detección y análisis mediante un telescopio de muones.

4.1.2 Muografía

Es una técnica de obtención de imagen que utiliza muones provenientes de rayos cósmicos para analizar la distribución de densidades en objetos de gran escala que se encuentran en entornos complejos donde los métodos tradicionales pueden resultar insuficientes (Tanaka et al., 2022; Holma, 2023).

Figura 3. Muograma



Nota: Imagen de un muograma y sus distribuciones de densidad. Tomado del sitio web Halley-MUSIC de la Universidad Industrial de Santander.

Esta técnica ha sido utilizada en diversos campos, incluyendo la geofísica, la arqueología y la seguridad, para el estudio de volcanes, la exploración de pirámides y la detección de estructuras ocultas (Vanini et al., 2019).

La muografía de volcanes utiliza el mismo principio que el de las radiografías de rayos-X, solo que en lugar de fotones se utilizan muones: a partir de un dispositivo se puede medir la atenuación del flujo de muones, de allí se calcula la opacidad del material al paso de estas partículas y entonces puede inferirse la densidad media del material a lo largo de la trayectoria del muones (Peña-Rodríguez J., 2021).

4.1.3 Muograma

El muograma observado en la figura 3 a la izquierda, se puede definir como un muograma 2D que integra la densidad del objeto a lo largo de la trayectoria del muón. (Peña-Rodríguez et al., 2024). Similar a una radiografía, el muograma es una imagen que contiene información sobre la densidad del objeto de estudio, por lo que es posible detectar las características internas del mismo (Muon Systems, 2025).

El telescopio diseñado en este proyecto generará simulaciones de muogramas para asegurar la calibración y efectivo funcionamiento de los paneles de este, proporcionando información para su monitoreo y estudio.

4.1.4 Instrumento científico

Dispositivo diseñado para obtener datos que facilita el registro constante y homogéneo de los fenómenos sujetos a observación, simplificando, por tanto, el control de la observación científica, permite mejorar la precisión de las observaciones y algunos detectan fenómenos para los cuales ninguno de los sentidos humanos está adaptado para encontrar. (de la Lama Zubirán et al., 2022).

4.1.5 *Telescopio para muones*

Es un instrumento científico diseñado para detectar y analizar la trayectoria de muones. Estos telescopios se emplean en diversas aplicaciones, como la exploración de estructuras geológicas y arqueológicas (Lesparre et al., 2012).

4.1.6 *MuTe*

El Telescopio de muones es un instrumento híbrido adecuado para el estudio de diferentes escenarios geofísicos. MuTe emplea un detector de centelleo de plástico para determinar la dirección de las partículas que inciden en el detector luego de cruzar el objetivo geofísico (Peña-Rodríguez J., 2021).

Figura 4. *Telescopio de muones MuTe 1.0*



Nota: La imagen representa el diseño de la estructura física de MuTe 1.0. Tomado del sitio web del grupo halley de la Universidad Industrial de Santander.

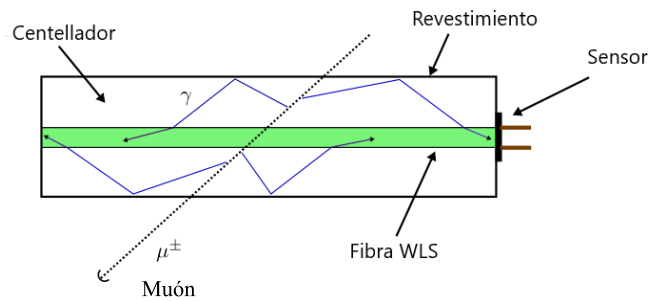
4.1.7 *Tecnologías de detección de muones*

Para el diseño del telescopio, se consideran diversas tecnologías de detección de muones, incluyendo:

4.1.7.1 Centelladores. Los detectores centelladores hacen uso de ciertos materiales que emiten destellos de luz cuando los muones interactúan con ellos. Estos destellos son detectados y

convertidos en señales eléctricas que permiten rastrear la trayectoria de las partículas. (International Atomic Energy Agency, 2022).

Figura 5. Esquema de una barra centelladora



Nota: La línea punteada identificada con el símbolo μ^\pm representa la trayectoria de un muón que atraviesa el centellador, produciendo la emisión de luz. Tomado del sitio web del grupo halley de la Universidad Industrial de Santander.

En la figura 5 se observan los componentes que interactúan dentro del sistema de la barra centelladora. El centellador posee un recubrimiento que mejora el transporte de los fotones. Los fotones producidos por el centelleo en el interior de la barra son captados por la fibra WLS y conducidos a un fotosensor para su posterior registro y análisis. (Peña-Rodríguez J., 2021).

El telescopio de este proyecto emplea centelladores, que ofrecen eficiencia en la detección y permiten construir una estructura portátil y resistente para el estudio del volcán.

4.1.7.2 Detector gaseoso. En muchos detectores, el material sensible está en forma gaseosa en geometrías cilíndricas llenas de gas inerte combinado con pequeñas fracciones de gases apagadores, en las que los muones ionizan las moléculas del gas, generando señales eléctricas que permiten su detección (IAEA, 2022).

4.1.7.3 Emulsiones nucleares. Son placas sensibles a la radiación en las que los muones dejan trazas detectables, proporcionando alta resolución en la medición de sus trayectorias (IAEA, 2022).

4.1.8 PCB (*Printed Circuit Board*)

Corresponde a una estructura con forma de placa construida a base de un sustrato que se caracteriza por su resistencia y por no ser conductora, cuyo fin es proveer conexión eléctrica y soporte mecánico para crear un circuito funcional (Bhunja y Tehranipoor, 2018).

4.1.9 SiPM (*Silicon Photomultiplier*)

Fotosensor de alta sensibilidad mediante el cual se obtiene información precisa del tiempo de llegada de fotones (Simon, 2019). Su ubicación en el sistema se puede observar en la Figura 5.

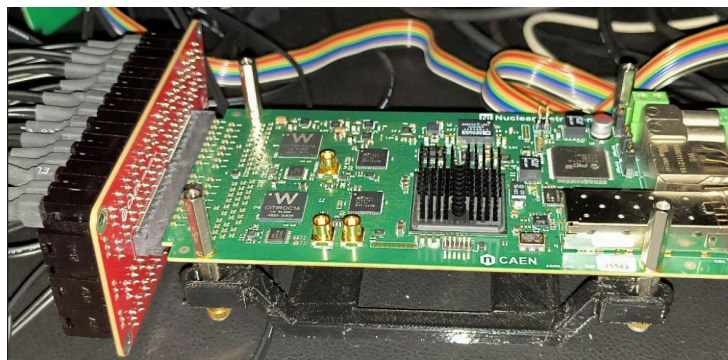
4.1.10 Fibra WLS (*Wavelength Shifting Fiber*)

Fibra óptica con moléculas fluorescentes que absorben fotones, para posteriormente ser detectadas por el sensor, en este caso el SiPM (Simon, 2019).

4.1.11 FERS (*Fast Electronic Readout System*)

Pertenece a una línea de productos con componentes electrónicos de adquisición de datos de CAEN, que digitaliza señales, proporciona rapidez en la lectura de matrices de detectores de gran tamaño (ABBA et al., 2022).

Figura 6. CAEN FERS-5200 DAQ

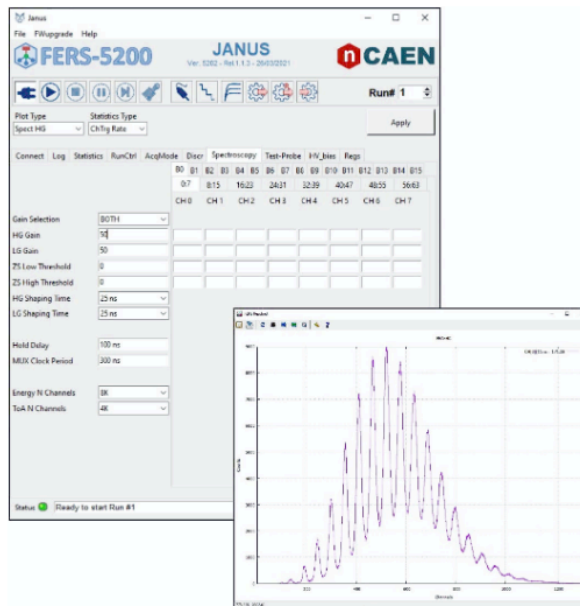


Nota: Fotografía tomada de la electrónica utilizada en el telescopio de muones.

4.1.12 JANUS

Software para el control y la lectura de las placas FERS-5200 utilizado en adquisición de datos (CAEN S.p.A, 2025).

Figura 7. Interfaz del Software de adquisición de datos Janus



Nota: La imagen representa los elementos de la interfaz del software. Tomado del sitio web de CAEN.

4.1.13 Estructuras geo - antrópicas

Las estructuras geo - antrópicas son formas del paisaje que han sido modificadas o creadas por la acción humana. Estas estructuras pueden incluir tanto intervenciones pequeñas como grandes obras de infraestructura, y se estudian dentro de la geografía (GT II. Mapa geontrópico 1:25.000 | ICGC, s.f.-b).

4.1.14 Volcán Cerro Machín

El Volcán Cerro Machín es un volcán localizado en la Cordillera Central de Colombia, a 17 Km de la ciudad de Ibagué (Tolima). Se han registrado mínimo seis eventos de erupción en

los últimos 5000 años, de estos el más reciente tuvo lugar hace aproximadamente 900 años (Piedrahita et al, 2018).

Desde el año 2000 se incrementó su actividad sísmica, su alto potencial explosivo y la extensión de sus depósitos, su composición dacítica y la magnitud de sus erupciones pasadas, es posible afirmar que este es uno de los volcanes activos con mayor amenaza en Colombia (Cortés, 2001a). Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC, s. f.), el volcán Cerro Machín tiene como coordenadas en latitud $4^{\circ} 29' N$ y en longitud $75^{\circ} 22' O$.

Figura 8. *Volcán Cerro Machín.*



Nota: Fotografía del volcán. Tomado del Portal del servicio geológico colombiano.

5. Metodología

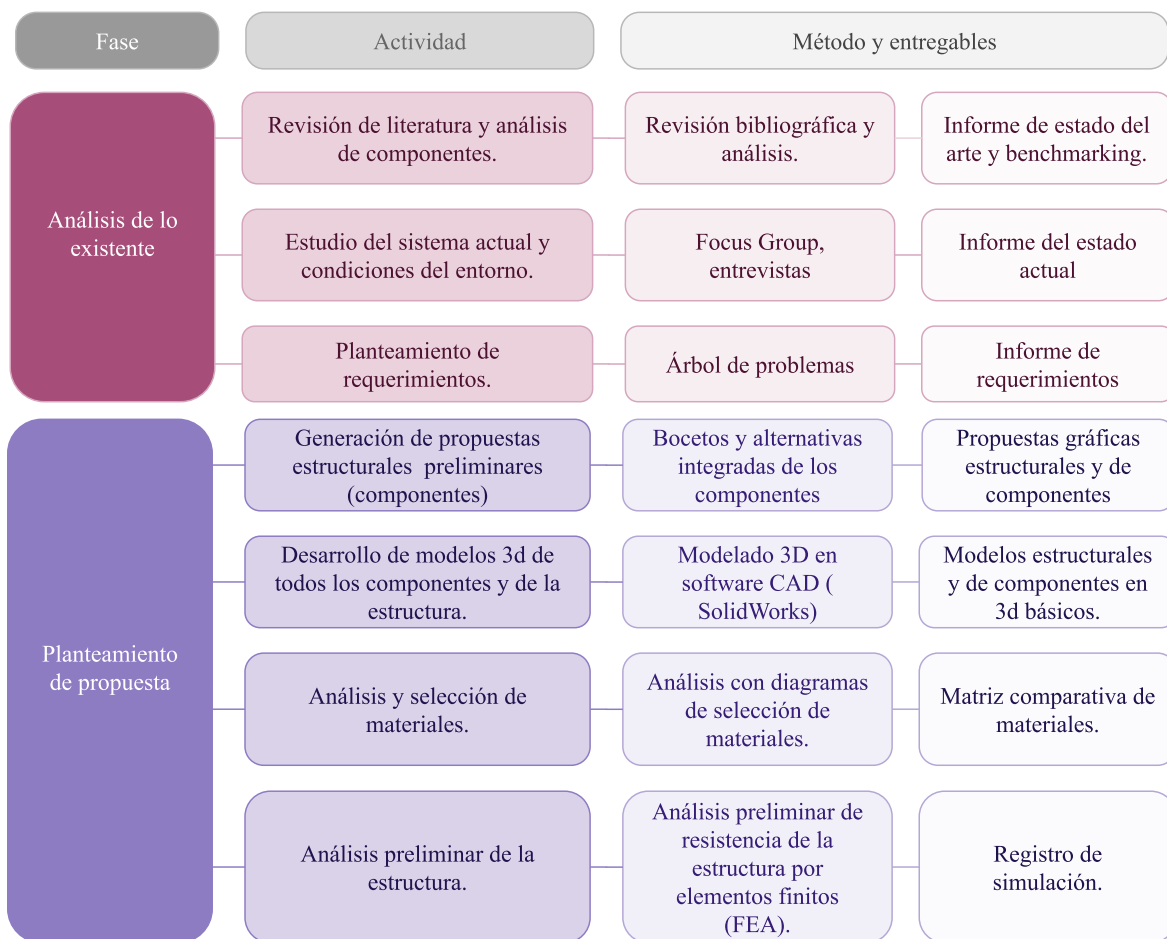
La metodología propuesta se centra en el producto y se orienta a la concepción, verificación y optimización del diseño del sistema estructural del telescopio de muones. Se fundamenta en un enfoque iterativo, que combina la comprensión global del sistema con el desarrollo progresivo de sus componentes hasta incorporarlos totalmente. Se realiza mediante fases alineadas a cada

objetivo específico del proyecto, como se muestra en la Figura 9. En esta se especifica cada objetivo con sus actividades y entregables.

El proceso metodológico se desarrolló por componentes, iniciando con la revisión bibliográfica, consulta con expertos, generación de ideas y bocetos. Posteriormente, se realizaron modelos y prototipos de media fidelidad para validar aspectos funcionales y constructivos. Este ciclo se repitió para los componentes críticos del sistema antes de su integración.

Una vez validado el diseño del panel centelleador, el proyecto siguió en la etapa de modelado CAD y simulación estructural mediante elementos finitos (FEA), orientada a evaluar el comportamiento del sistema completo y la coherencia geométrica del diseño. No se contempla la fabricación de un prototipo completo.

Figura 9. Metodología de diseño centrado en el producto





Nota: Se divide la metodología por objetivos específicos del proyecto, cada uno con las actividades, métodos y entregables a obtener para llegar cumplir el objetivo general de desarrollar la propuesta de diseño estructural del telescopio de muones.

La presente investigación es de tipo experimental, ya que se fundamenta en la realización de pruebas en laboratorio y simulaciones para evaluar la estructura del telescopio de muones, considerando criterios de resistencia mecánica, estabilidad, alineación geométrica y compatibilidad con los componentes electrónicos del sistema. La planificación del estudio es prospectiva, ya que los datos analizados se obtienen a partir de pruebas, prototipos y simulaciones desarrolladas durante el proceso de diseño. Asimismo, el estudio es de carácter transversal, puesto que el análisis se realiza en un solo punto en el tiempo, sin evaluar la

evolución del sistema en distintos periodos. El nivel de investigación es descriptivo, ya que busca documentar y analizar las características estructurales del telescopio y el impacto de distintos componentes sobre su desempeño global.

El trabajo adopta un enfoque de investigación a través del diseño, en el cual el proceso de diseño se utiliza como herramienta para abordar el problema, integrando procesos de análisis, ideación, modelado, prototipado y validación. La metodología del proyecto se llevó a cabo mediante un proceso cíclico e iterativo, este enfoque permitió realizar ajustes al diseño a partir de la retroalimentación obtenida en cada etapa. El objeto de estudio de este proyecto es el sistema estructural del telescopio de muones, un instrumento científico para la detección de partículas mediante la medición de su trayectoria. El telescopio MuTe está conformado por paneles compuestos por barras centelleadoras acopladas a sensores SiPM, una caja estructural diseñada para el bloqueo de luz y protección de los componentes, un sistema de soporte para su instalación en la intemperie y un módulo de protección de la electrónica que adquiere los datos. El alcance del diseño se limita al sistema estructural, excluyendo elementos complementarios como fuentes de energía externas, los cuales podrán ser abordados en fases posteriores del proyecto.

El desarrollo del trabajo contó con la participación de diferentes actores. La directora y el codirector del proyecto brindaron acompañamiento y asesoría técnica durante todo el proceso, aportando en la toma de decisiones relacionadas con el diseño, la selección de materiales y el análisis estructural. Adicionalmente, expertos en detección de partículas y análisis de datos, pertenecientes al Grupo de investigación en Relatividad General (GIRG) de la Universidad Industrial de Santander, contribuyeron en la definición de requerimientos y en la validación de criterios estructurales que optimicen la medición de muones. Asimismo, investigadores y

operadores del proyecto MuTe aportaron información relevante sobre condiciones operativas y necesidades en campo. La interacción entre los distintos actores se realizó mediante reuniones semanales, entrevistas técnicas y retroalimentación continua a lo largo del desarrollo del proyecto.

Como resultado del proceso metodológico, se obtuvo una propuesta de diseño estructural optimizada para el telescopio de muones, acompañada de planos técnicos, modelos digitales de alta fidelidad, selección de materiales y validaciones mediante simulaciones y pruebas en componentes específicos. Aunque no se contempla la fabricación ni prueba de un prototipo completo, el trabajo entrega los insumos necesarios para una eventual construcción y validación experimental en etapas posteriores.

6. Ejecución del proyecto.

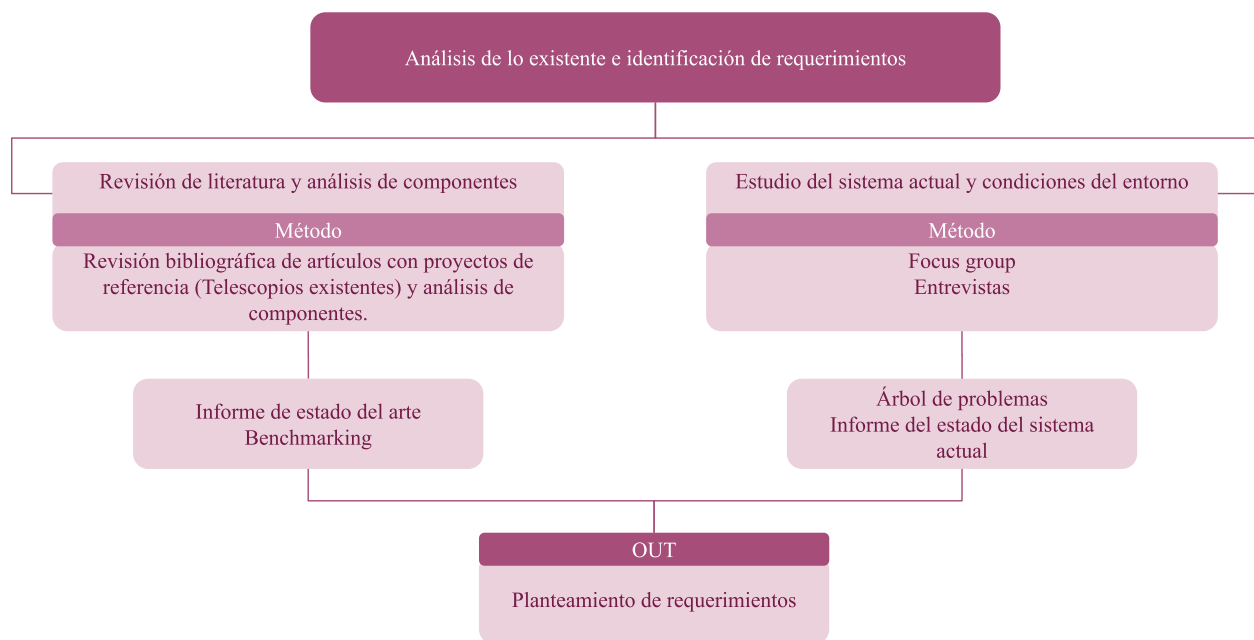
A continuación, se explica el proceso que se lleva a cabo para el alcance del objetivo general del proyecto que corresponde al desarrollo de una propuesta de diseño del sistema estructural de un telescopio de muones que permita mejorar su precisión angular, permeabilidad lumínica y transporte, teniendo en cuenta las condiciones del entorno para obtener un muograma.

Teniendo en cuenta esto, para la primera fase, orientada al primer objetivo específico del proyecto que corresponde al análisis de lo existente y a la identificación de requerimientos para el diseño estructural del telescopio, el sistema fue desglosado en sus principales componentes y subsistemas. A partir de este análisis, se estableció una priorización de componentes críticos, lo que permitió definir requerimientos estructurales, funcionales y ambientales de forma general para el telescopio de muones.

6.1 Fase 1. Análisis de lo existente.

Inicialmente se realizó la revisión bibliográfica de este tipo de detectores, el benchmarking de los componentes del telescopio presentado en el apéndice A, a su vez se buscó conocer la problemática del telescopio por medio de entrevistas y un grupo focal directamente con los miembros del proyecto MuTe para analizar y definir los requerimientos generales del telescopio. En la figura 10 se puede visualizar esquemáticamente las actividades, métodos y entregables obtenidos.

Figura 10. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 1.






Nota. Se desglosa el proceso para la fase inicial de análisis de lo existente e identificación de requerimientos, por un lado se realiza la revisión de la literatura y análisis de componentes y por otro el estudio del sistema actual y condiciones del entorno.

6.1.1 Revisión de literatura y análisis de componentes

Para llevar a cabo la revisión de literatura se realizó una búsqueda en ResearchGate, Google Academic empleando palabras clave relacionadas con diseño estructural de telescopios de muones. Con esta información se realizó una selección de tres tipos de telescopios, teniendo en cuenta instrumentos bastante diferenciados en tipo de sistema estructural pero con sistemas de detección basados en centelleadores.

Tabla 1. Comparación de telescopios en términos estructurales

Tipo de telescopio	Número de paneles	Configuración estructural	Sistema de soporte	Sistema de graduación e inclinación	Material
Telescopio de muones en Bélgica (Cashion et al., 2021) 	Conformado por 3 paneles con sistema de detección por centelleadores.	Los paneles de centellador pueden deslizarse longitudinalmente a lo largo del marco superior y bloquearse en posición.	Marco estructural tipo T invertida mediante perfiles estructurales.	Contiene una zona de pivote en la parte central de los paneles que permite su graduación de inclinación, permitiendo un giro completo.	Estructura de aluminio y foil de aluminio comercial y vinilo negro para el recubrimiento de los paneles.
Telescopio en el Volcán Etna, Sicilia, Italia (Carbone et al., 2020) 	Conformado por 2 paneles de detección.	Los paneles de centellador pueden deslizarse longitudinalmente a lo largo del marco superior y bloquearse en posición.	Los marcos fijan la inclinación de las matrices, y el marco inferior se equipa con patas ajustables para topografía irregular.	El sistema de graduación de inclinación, consta de un sistema de soporte que permite levantar la estructura, generando inclinación a partir de eso.	Perfiles de aluminio ranurados y anodizados. La caja electrónica tiene sellado hermético con membrana Gore Tex.

Tipo de telescopio	Número de paneles	Configuración estructural	Sistema de soporte	Sistema de graduación e inclinación	Material
Telescopio en el volcán Snæfellsjökull, Islandia (CNRS. 2023) 	Conformado por tres paneles de detección.	Los paneles se deslizan longitudinalmente a través de dos perfiles estructurales ubicados en el centro del lateral de cada panel.	Cuenta con un sistema estructural tipo prisma triangular como soporte junto con 4 ruedas móviles.	Tiene un eje central mediante el cual se puede establecer el punto de giro, hasta 90 grados. Por otro lado cuenta con un componente que permite visualizar el ángulo de inclinación	Perfiles de aluminio, junto con lonas de recubrimiento para los paneles.

Nota: La información contenida en la tabla fue tomada de bases de datos como, ResearchGate, Google Academic y CNRS

Así se realizó la revisión comparativa que se puede observar en la tabla 1, teniendo en cuenta el tipo de telescopio encontrado, el número de paneles con los que cuenta, la configuración estructural, sistema de soporte, graduación, inclinación y material con el que se desarrolló.

Teniendo en cuenta la información anterior, se hizo una comparación de tres sistemas estructurales de telescopio diferentes, entre los cuales, se puede observar que utilizan el aluminio como material (perfiles) para la fabricación de la estructura y como complemento materiales de recubrimiento para los paneles de detección, a su vez, presentan configuraciones estructurales diferentes donde se destaca el sistema del tercer telescopio ubicado en Islandia al presentar una optimización en términos estructurales, ya que cuenta con dos puntos de desplazamiento para los

paneles, lo que simplifica su movimiento, logrando una reducción en la cantidad de material utilizado (perfiles estructurales) para cumplir el mismo funcionamiento de los demás telescopios analizados. Además de esto, cuenta con un sistema que permite visualizar el ángulo de inclinación, aspecto que resulta diferenciador en comparación a los demás sistemas y es bastante útil para el equipo que instala el telescopio.

Por otro lado, en los tres telescopios analizados, a pesar de que el panel se toma como una unidad repetible, la estructura resultante los agrupa de forma estructural, generando una unidad monolítica, lo cual plantea oportunidades de mejora en términos de optimización estructural.

El análisis de estos telescopios es útil para identificar aspectos que se deben tomar en cuenta y aspectos en los que se puede mejorar para la generación de la propuesta del telescopio en términos estructurales generales.

6.1.2 Estudio del sistema actual y condiciones del entorno

Para el entendimiento de la problemática actual del sistema, se realiza una reunión con los integrantes del proyecto MuTe del Grupo de investigación en Relatividad General (GIRG) (Figura 11) quienes están directamente relacionados en términos de poner en funcionamiento el telescopio, es decir los expertos en detección de partículas y análisis de datos que pertenecen a LIDeRA (Laboratorio de Investigación para la Detección de Radiación y Astropartículas). Lo presentado en cada reunión con el grupo se presenta en el apéndice B.

Figura 11. Reunión con los integrantes del proyecto.



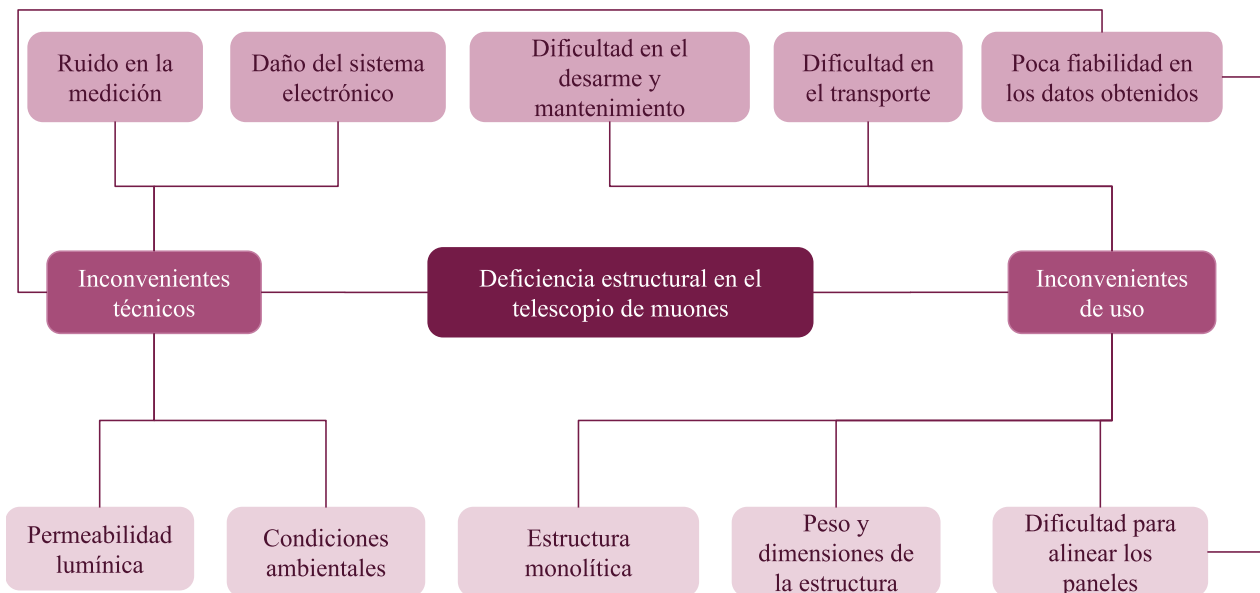
Nota: Fotografía tomada en el Edificio EDIC. Salón 302.

En esta reunión se realiza una entrevista mediante conversación fluida para obtener información acerca de las problemáticas que presenta el telescopio de muones, esta misma se jerarquiza en un árbol de problemas donde se divide en inconvenientes técnicos y de uso para los integrantes del grupo (Figura 12).

Como se observa en la Figura 12 se encontró que la problemática central para el grupo de investigación está en la precisión al obtener los datos para llegar a un muograma debido, en cierta medida, a la deficiencia estructural en el telescopio de muones. Parte de esto es la falta de permeabilidad lumínica en los componentes de cada panel detector, la luz que accede al panel ocasiona ruido en las mediciones, así como también el sistema actual no está adecuado para las condiciones ambientales del entorno, los componentes electrónicos que están a la intemperie

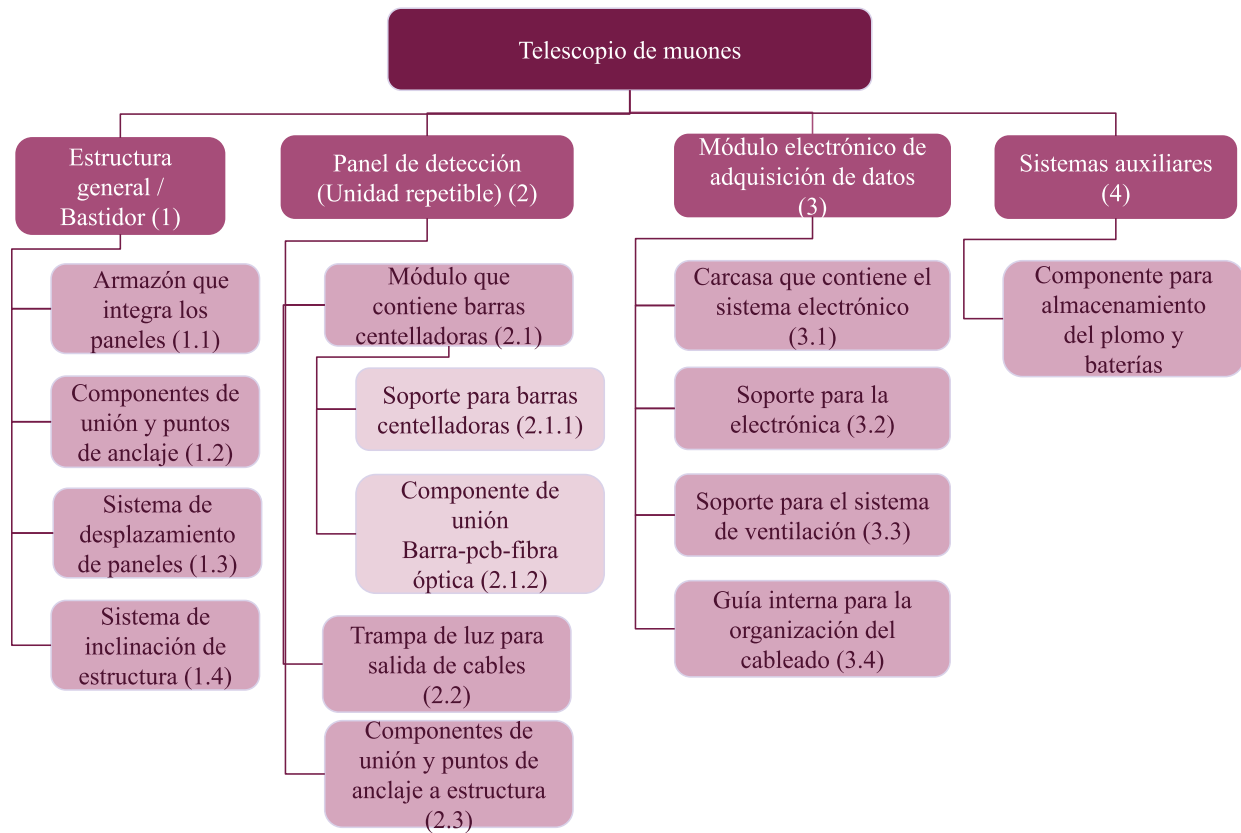
están en constante riesgo de daños por humedad, polvo, lluvia o animales que habitan el espacio donde se posiciona el telescopio.

Figura 12. *Árbol de problemas generales del telescopio.*



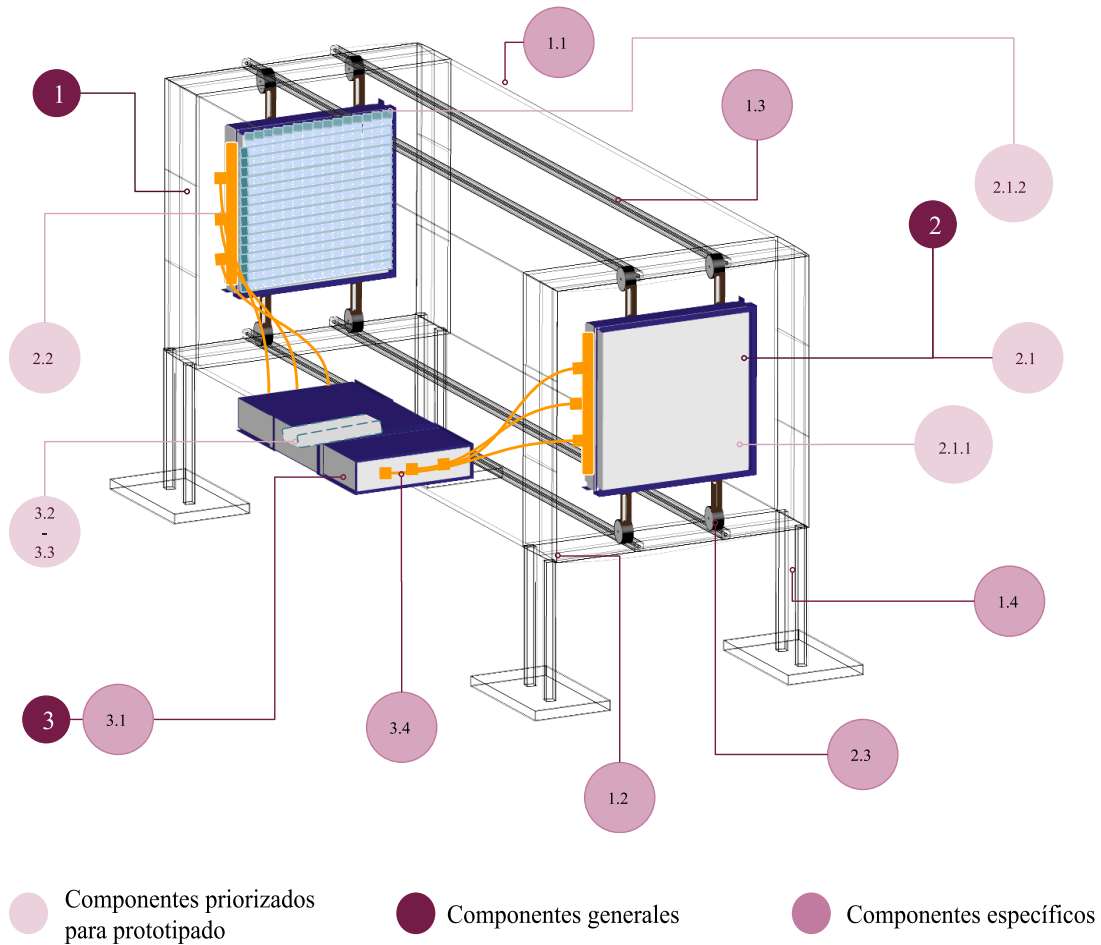
Nota. En el diagrama se desglosa la problemática de la deficiencia estructural, dividida en inconvenientes técnicos y de uso, en la parte inferior se muestran las causas y en la parte superior se especifican las consecuencias.

Para abordar este problema, se descompone la estructura en componentes específicos para facilitar la identificación de los requerimientos que orientarán el nuevo diseño, cómo se relacionan en la figura 13.

Figura 13. Esquema de Descomposición Estructural del Telescopio

Nota. Se muestra cada componente principal perteneciente al diseño estructural del telescopio de muones y a su vez los componentes que hacen parte del diseño de cada subsistema para el funcionamiento del instrumento.

En este diagrama se presenta la descomposición de forma jerárquica del telescopio de muones, partiendo de los componentes generales del sistema hasta los componentes de menor tamaño. Todos se encuentran identificados mediante una numeración específica y su representación gráfica puede observarse en la Figura 14.

Figura 14. Diagrama de Descomposición Estructural del Telescopio

Nota. Para facilitar el entendimiento del sistema general se señala en el diagrama, de acuerdo con la numeración de la figura 13, los componentes pertenecientes al telescopio de muones.

La representación visual muestra todos los componentes del sistema como también los priorizados para prototipado. Esta priorización se define a partir del focus group y se centra en los componentes que tienen mayor incertidumbre técnica, es decir aquellos que dependen de tolerancias geométricas o no se encuentran estandarizados en el mercado y tienen mayor impacto en el desempeño global del sistema, teniendo en cuenta que su validación temprana puede

reducir el riesgo de fallas funcionales y decisiones de diseño incorrectas en el desarrollo de los demás componentes.

A partir de esta descomposición se plantean los requerimientos generales para el telescopio de muones, que se pueden observar en la siguiente tabla 2. Estos están organizados por componentes, en donde cada uno de ellos cuenta con sus atributos, descripción, determinantes y tipo. En estos, se debe tener en cuenta que todos los que aquí se presentan son requerimientos taxativos debido a la pertinencia que se les dio con el equipo técnico del Grupo de investigación en Relatividad General (GIRG).

6.1.3 Requerimientos generales del telescopio

Tabla 2. *Requerimientos generales del telescopio*

Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Estructura general	Intemperie	El telescopio debe operar a la intemperie sin que las condiciones ambientales afecten su funcionamiento.	– Cumple – No cumple	RF
Paneles de detección / componentes dentro	Control lumínico	El diseño debe evitar el paso de luz externa hacia los paneles de barras centelladoras.	– Cumple – No cumple	RF
Paneles de detección	Transporte	El sistema debe permitir el transporte manual del telescopio de forma segura y controlada.	Peso \leq 30 kg por panel	RU
Sistema de inclinación	Ajuste de inclinación	El telescopio debe permitir el ajuste de inclinación del sistema para su correcta orientación.	Ángulo máximo de inclinación: 90°	RU
Paneles de detección / Estructura	Alineación	El diseño debe garantizar la correcta alineación entre los paneles de detección.	– Cumple – No cumple	RF
Estructura general	Modularidad	El telescopio debe estar compuesto por componentes modulares que faciliten el montaje, mantenimiento y reemplazo.	– Cumple – No cumple	FT

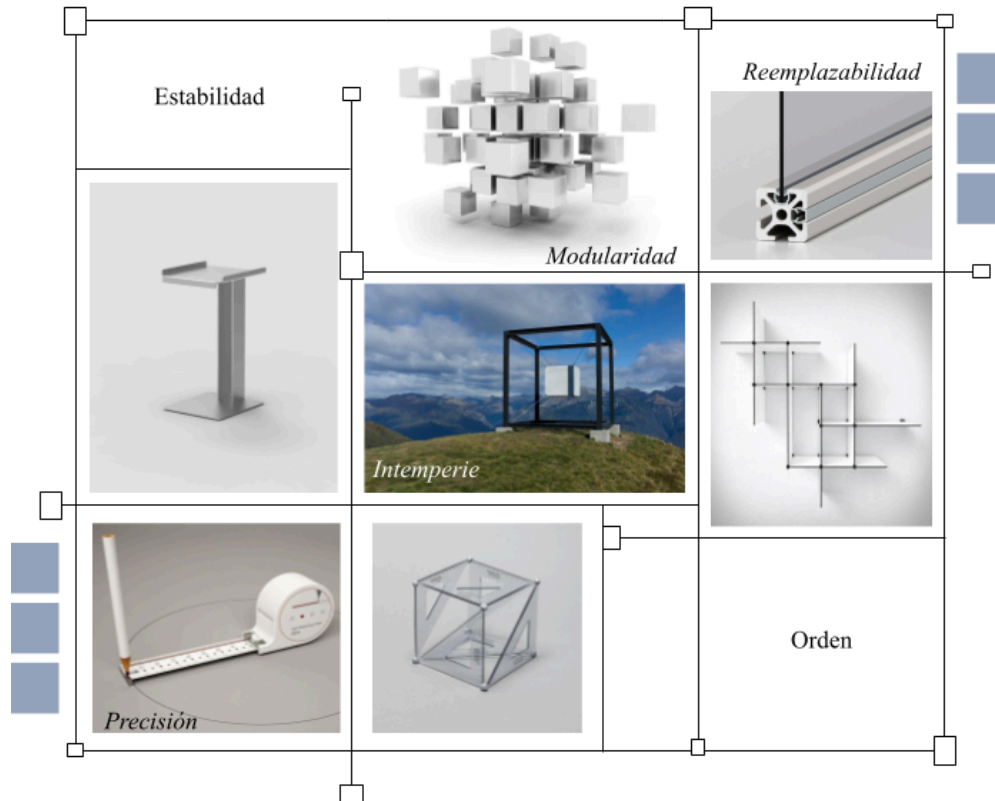
Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Paneles de detección	Configuración de barras	Cada panel debe contener 30 barras centelladoras de 60 cm de longitud, dispuestas en dos grupos de 15.	60 cm de longitud por barra 30 barras/panel	RF
Estructura general	Distancia entre paneles	El sistema debe permitir variar la distancia entre paneles de detección.	Distancia mínima: 1 m Distancia máxima: 3 m	RF
Sistema de cableado	Gestión de cableado	El diseño debe permitir el paso y organización de los cables de las barras sin generar interferencias.	Diámetro de cable: 0.7 cm 30 cables por panel	FT
Estructura general	Altura del sistema	El telescopio no debe quedar apoyado directamente sobre el suelo	– Cumple – No cumple	RU
Módulo de la electrónica	Integración de caja	La caja que contiene la electrónica debe ubicarse próxima a la estructura principal.	– Cumple – No cumple	FT
Sistema de alimentación	Alimentación	El sistema debe integrar baterías que permitan la operación autónoma del telescopio en campo.	– Cumple – No cumple	RF
Estructura general	Normalización de tornillería	El diseño debe minimizar la variedad de tornillos utilizados, empleando medidas estándar.	Uso de tornillería estándar	FT
Estructura general	Reemplazabilidad	Las piezas del telescopio deben ser fácilmente reemplazables mediante componentes estándar.	– Cumple – No cumple	FT

RF: Requerimiento funcional

RU: Requerimiento de uso

FT: Factor técnico

Es así que estos requerimientos funcionales, técnicos y de uso, establecen también las bases para el concepto del telescopio, el cual se representa en el moodboard (Figura 15).

Figura 15. Moodboard conceptual y estético - formal del sistema.

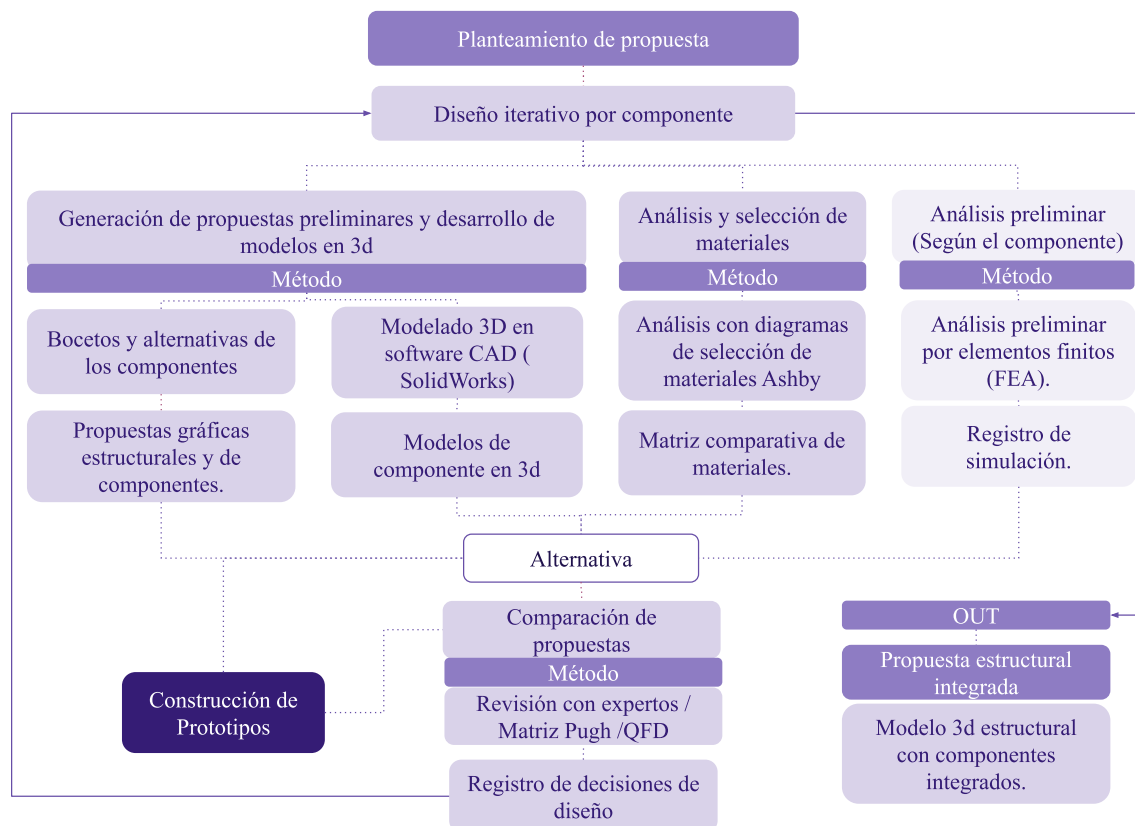
Nota. Normalmente en el proceso de diseño se realiza un moodboard donde se pueda visualizar de forma general el concepto y requerimientos que se quieren representar en el producto final a diseñar, si bien no se tenía establecido en la metodología realizar este tablero permitió englobar la configuración formal del diseño de cada componente.

El moodboard presentado en la figura 15 traduce requerimientos en valores formales como, modularidad, precisión, estabilidad y protección frente a la intemperie. Estos valores orientan las decisiones de diseño estructural, la selección de materiales y la configuración de los componentes, asegurando coherencia entre el concepto, la función y el contexto de uso del sistema. Asimismo, este enfoque sienta las bases para el planteamiento de la propuesta del telescopio.

6.2 Fase 2. Planteamiento de propuesta

La fase 2 correspondiente al segundo objetivo específico que se centra en el planteamiento de una propuesta estructural integral, se desarrolló de forma progresiva, iniciando por el componente más pequeño del sistema, en la Figura 14 se puede observar especificado en el número 2.1.2. donde se identifica como el componente de unión entre la PCB, el SiPM y la barra centelladora. Cada componente fue abordado iterativamente, comenzando por la generación de alternativas, modelado asistido por computador, análisis preliminares, hasta alcanzar una solución que cumpliera con los requerimientos definidos. Una vez validada cada propuesta a nivel de componente, esta se integró como base para el desarrollo del siguiente nivel del sistema, permitiendo avanzar de manera controlada hasta la definición de la estructura completa del telescopio. Este proceso se diagrama visualmente en la Figura 16.

Figura 16. Diagrama de descomposición de actividades del objetivo específico 2.



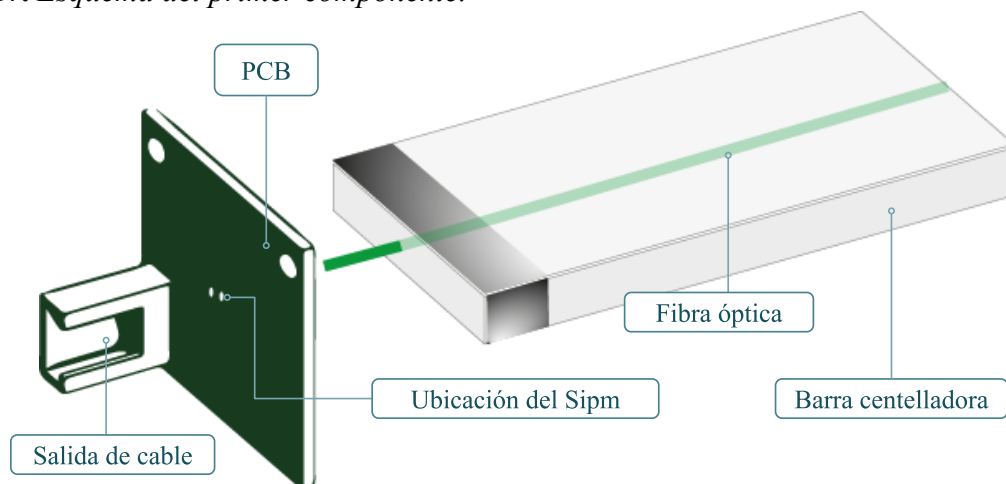
Nota. Representación del proceso a seguir en la fase 2 que está relacionada con el objetivo específico de plantear una propuesta estructural integral, esto se realiza con cada componente anteriormente priorizado en la figura 13.

Para el desarrollo de esta fase se tiene en cuenta el diagrama estructural del telescopio de muones (Figura 13) donde se identifica que el componente de menor tamaño del sistema es el componente de unión entre la PCB, el SiPM y la barra centelladora (acople), sus elementos se detallan en la Figura 17.

6.2.1 Componente 1. Componente de unión PCB - SiPM - Barra centelladora (Acople)

La visualización de elementos que relacionan el primer componente a diseñar se muestra a continuación.

Figura 17. Esquema del primer componente.



Nota. Representación visual a detalle del subsistema que interactúa con el componente de unión de la PCB con la barra centelladora.

Cada elemento del sistema impone restricciones funcionales, de uso y seguridad que condicionan el diseño del acople, esto se deriva en requerimientos que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3. *Requerimientos del componente 1 (Acople).*

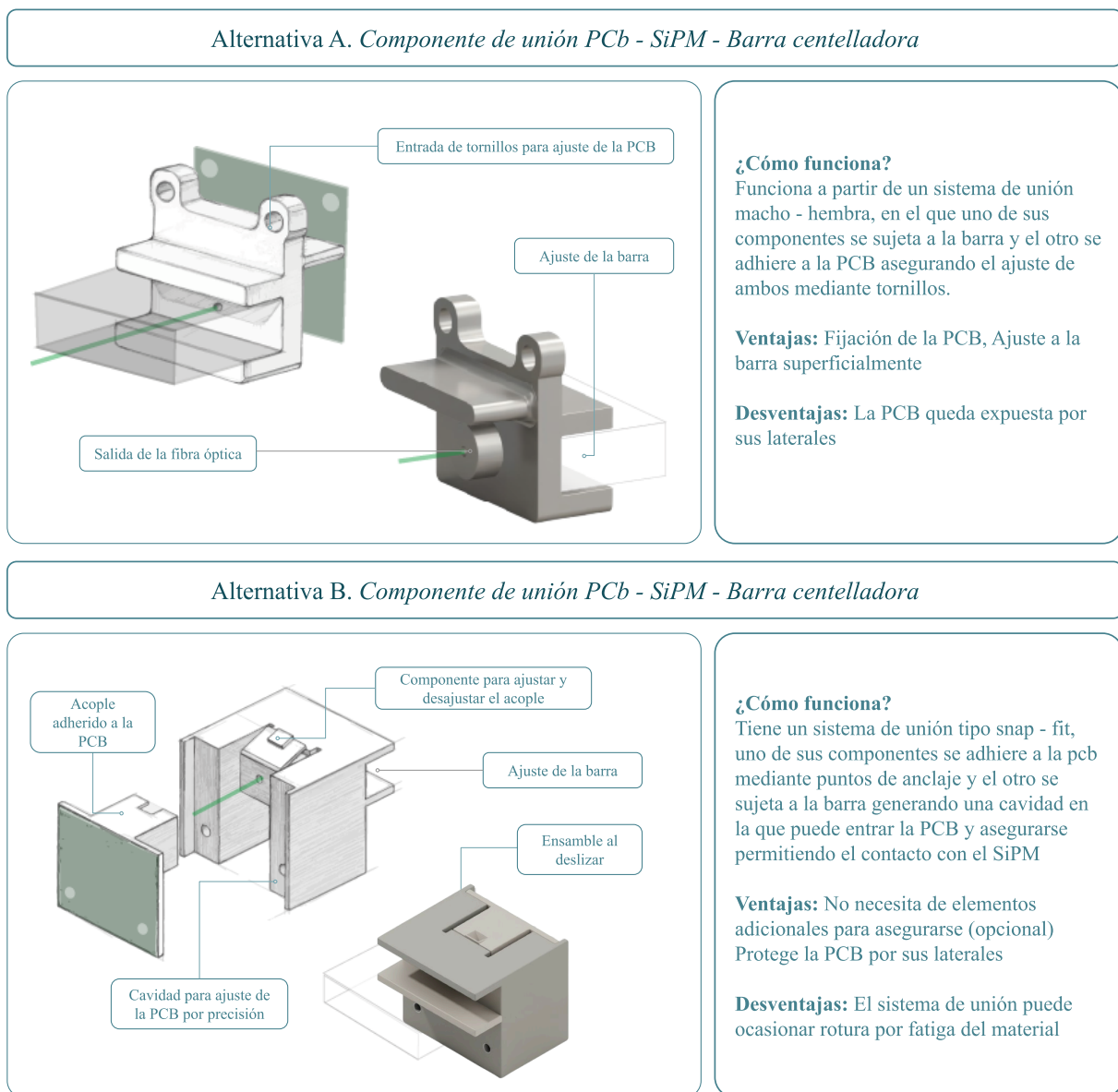
Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Adaptación geométrica	El sistema de acople debe adaptarse a la geometría de la barra centelladora sin realizar modificaciones, deformaciones o esfuerzos adicionales sobre esta.	Intervención geométrica sobre la barra: no permitida. Criterio de aceptación: acople completamente externo. Tolerancia dimensional: +/- 0.25 mm. Holgura funcional: 0.2 – 0.3 mm.	RF
Facilidad de ensamble	El acople debe permitir el montaje y desmontaje de la barra de forma controlada, evitando operaciones que impliquen forzar los componentes.	Número de pasos de ensamble: ≤ 3 . Tiempo de ensamble: ≤ 60 s. Uso de herramientas: permitido un (1) destornillador estándar.	RU
Estabilidad del conjunto	El sistema de acople debe restringir movimientos relativos entre la barra y la PCB que puedan afectar la alineación óptica del sistema.	Desplazamiento relativo barra-PCB: ≤ 0.3 mm. Rotación relativa PCB: $\leq 1^\circ$. Número de puntos de apoyo: ≥ 2 . Tipo de sujeción: rígida.	RF
Protección de la fibra óptica	El diseño del acople debe permitir el contacto con la fibra óptica sin generar presiones localizadas que puedan causar daño en la misma.	Radio de curvatura mínimo: $\geq 2 - 3$ mm Área mínima de contacto: ≥ 8.0 mm ²	RS
Protección del SiPM	El sistema de acople debe evitar cargas mecánicas directas sobre el SiPM que puedan comprometer su funcionamiento o integridad.	Holgura del canal para el paso de la fibra: 0.25 – 0.3 mm Transmisión de carga mecánica directa (Fibra/SiPM): no permitida	RS
Fijación de barra y PCB	El diseño debe incorporar características que aseguren una sujeción estable de la barra y la PCB durante la operación del telescopio.	Sistema de fijación: mecánico rígido. Estabilidad en condiciones de operación: sin deslizamiento ni aflojamiento. Desplazamiento máximo permitido: 0.25mm	RF

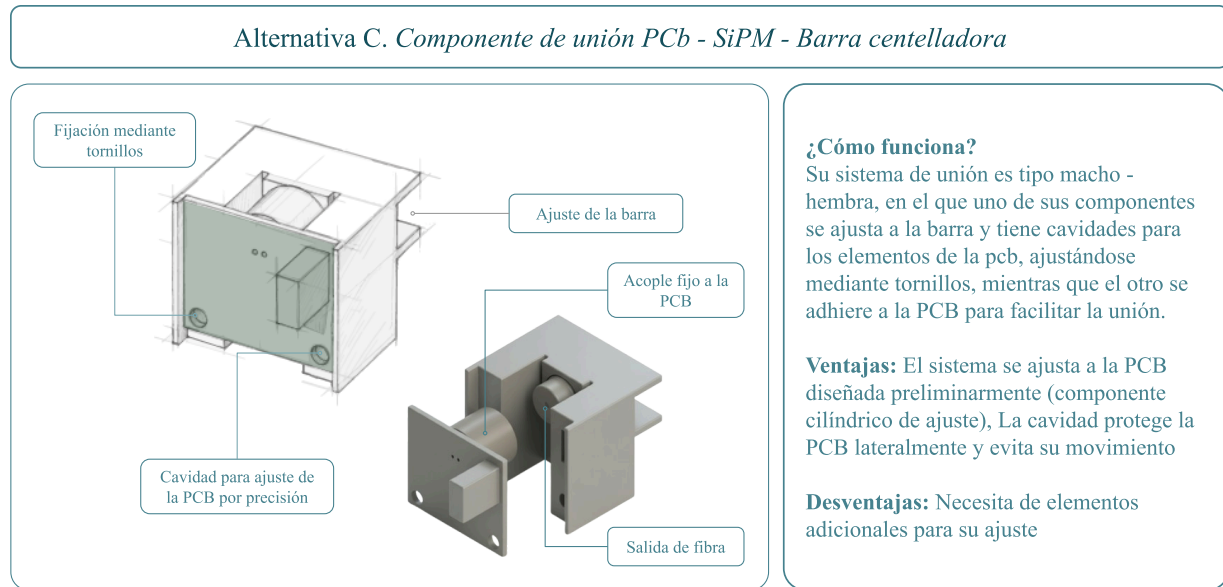
RF: Requerimiento funcional
RU: Requerimiento de uso
RS: Requerimiento de seguridad

Teniendo como base los requerimientos evidenciados en la tabla 3, se procede a responder a estos mediante diferentes alternativas de diseño.

6.2.1.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d de acople. En la figura 18 se puede observar las 3 alternativas finales generadas y su correspondiente explicación, donde se detalla con un gráfico que ilustra la solución, la explicación de su funcionamiento y las ventajas y desventajas que se consideran.

Figura 18. *Alternativas de componente de unión PCB - SiPM - Barra Centelladora.*





Nota. Se muestra cada alternativa en boceto y en modelado 3D, la explicación del funcionamiento, ventajas y desventajas.

Las alternativas presentadas en la Figura 18 fueron diseñadas considerando criterios de fabricación mediante impresión 3D; teniendo en cuenta la rigurosidad del componente, la necesidad de precisión dimensional en las medidas y la facilidad de acceso del grupo a este tipo de proceso de fabricación. En consecuencia, el material se mantuvo constante para la fabricación de las tres piezas permitiendo analizar el desempeño de cada alternativa a partir de su configuración geométrica.

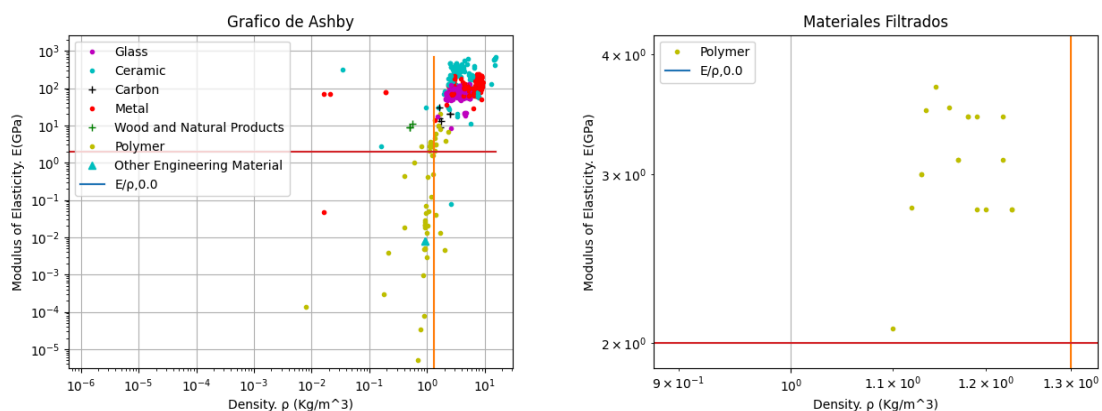
6.2.1.2 Análisis y selección de materiales preliminares de Acople. En la tabla 4 se muestra el resumen de las propiedades y características que se tienen en cuenta para seleccionar el material más adecuado para el posterior prototipado y construcción del componente.

Tabla 4. *Análisis de propiedades del material*

Componente	Función principal	Condiciones
<i>Acople de unión PCB/SiPM/Barra</i>	Ensamblar elementos (PCB /SiPM/Barra centelladora) asegurando alineación y precisión geométrica.	Disponibilidad comercial. Fabricación mediante impresión 3D FDM. Montaje y desmontaje ocasional. Resistencia a la intemperie.
Descripción del material		
Material que proporcione rigidez para garantizar estabilidad y alineación del conjunto, pero que permita deformaciones controladas durante el montaje para evitar fracturas.		
Propiedades	Índice de Ashby	
- Módulo de Young	$M = \frac{E}{\rho}$ Costo	
- Densidad		
- Bajo costo		

Las propiedades mecánicas de los materiales elegidos se obtuvieron a partir de un software de código abierto denominado OpenMaterialsSelector, que utiliza como base de datos Matweb. Para este componente se seleccionan materiales con módulo elástico medio/alto, capaces de mantener estabilidad dimensional en montaje y permitir un grado de deformación durante el ensamblaje evitando de esta forma la probabilidad de fractura, en la siguiente figura se puede observar la diagramación de los datos filtrados para la selección del material.

Figura 19. *Diagrama de Ashby*



Nota. Gráficas realizadas mediante el software de código abierto OpenMaterialsSelector para facilitar el proceso de selección de materiales según la metodología de Ashby.

Mediante la comparación de las familias de materiales vidrio, cerámicos, carbono, metales, madera y polímeros, representadas en la gráfica izquierda, se analiza la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad (E/ρ). En el caso de los materiales poliméricos, se establecieron como criterios de selección un valor mínimo del módulo de Young de 2,0 GPa, con el fin de descartar materiales excesivamente flexibles, correspondiente al eje vertical de la gráfica, y un valor mínimo de densidad de 1,3 g/cm³, ubicado en el eje horizontal, para priorizar materiales livianos.

Estos criterios se delimitan en la gráfica derecha mediante líneas de corte que se intersectan, permitiendo realizar el proceso de filtrado. Como resultado, se identifican los materiales que cumplen simultáneamente con ambas condiciones, los cuales se presentan con mayor detalle en la siguiente tabla.

Tabla 5. Comparación de materiales poliméricos.

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo (GPa)	Tipo
BASF Ultramid® A3W PA66 (Dry)	1.13	3.00	Nylon 6,6 (Poliamida 66)
Radici Radilon® N66-AFR Nylon 66	1.16	3.52	Nylon 6,6 (Poliamida 66)
Abatron AboCast/AboCure 8109-1	1.23	2.758	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-13	1.18	3.447	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-3	1.18	3.447	Resina termoestable

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo (GPa)	Tipo
Overview of materials for Thermoset Polyester Glass SMC	0.81	2.76	Material SMC
Abatron AboCast/AboCure 8109-6	1.22	3.102	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-7	1.23	2.758	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-5	1.22	3.447	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-10	1.10	2.068	Resina termoestable
Global EPP PA 66E Extruded Polyamide 66	1.145	3.7	Nylon 6,6 (Poliamida 66)
Abatron AboCast/AboCure 8109-8	1.19	3.447	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-9	1.17	3.102	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-12	1.20	2.758	Resina termoestable
DSM Somos® WaterShed® XC 11122 Water-resistant resin for stereolithography	1.12	2.77	Resina para SLA (impresión 3D)
Global EPP PA 6E Extruded Polyamide	1.135	3.5	Nylon 6 (Poliamida 6)
Abatron AboCast/AboCure 8109-4	1.17	3.102	Resina termoestable
Abatron AboCast/AboCure 8109-11	1.19	2.758	Resina termoestable

Nota: Los datos condensados en la tabla se obtienen mediante el software de código abierto.

De esta manera se extrae el material Nylon PA6, ya que puede fabricarse mediante impresión 3D por FDM y se realiza una matriz de comparación con materiales con propiedades similares que se encuentran comercialmente, Tabla 6. Esta comparación se realiza al identificar que el material seleccionado no cuenta con propiedades que resistan adecuadamente a la intemperie.

Tabla 6. *Matriz de materiales comerciales con propiedades similares fuera de la base de datos*

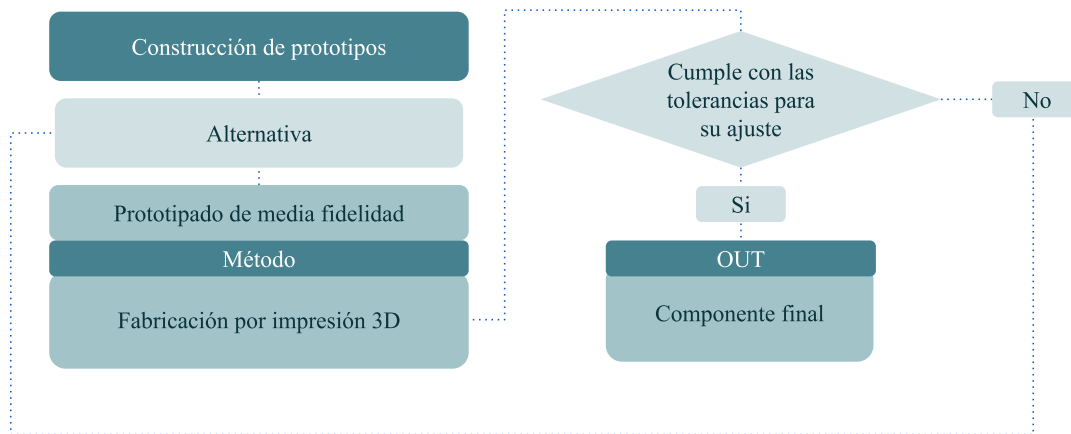
Material	Resistencia a la intemperie (40%)	Costo (COP/kg) (30%)	Módulo de Young (GPa) (20%)	Densidad (g/cm ³) (10%)	Puntaje
Nylon PA6	Baja	165,000	3.2	1.13	2.8
ASA	Alta	125,000	2.4	1.07	4.0
PETG	Media	94,000	2.0	1.27	3.4

Nota: La tabla fue elaborada a partir de datos obtenidos a partir de diferentes sitios web como BASF (2026), Impresoras3D.com (2026), 3dfylabs (2026) y tiendas comerciales locales.

Con base a esta información se selecciona para construcción de prototipos el material con menor costo y para construcción real, el prototipo con mejor puntaje en la matriz, siendo estos en términos de material óptimo para construcción el ASA y el material para construcción de prototipos PETG.

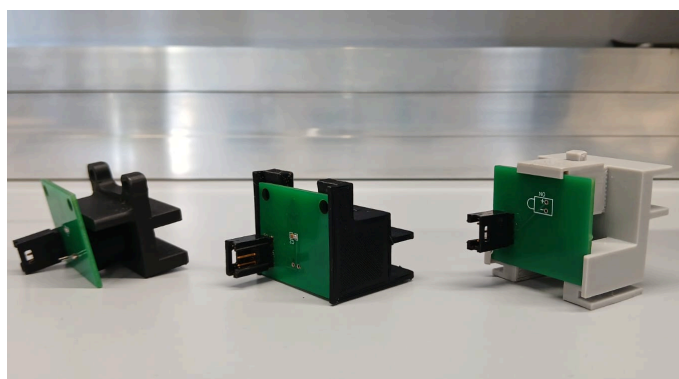
Posterior a la selección del material, se planifica el proceso para la fabricación de cada alternativa como se puede observar en la Figura 20.

6.2.1.3 Construcción de prototipos del componente (Acople). La construcción de prototipos en esta fase del componente se realiza para comparar y posteriormente verificar las alternativas, es necesario que en los prototipos se observe las oportunidades de mejora así como también las características que se deben mantener en el diseño del componente.

Figura 20. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 3.

Nota: Se detalla el proceso para cumplir con el objetivo de construir un prototipo de media fidelidad, este se repite para cada componente priorizado.

Para la fabricación de cada pieza se realizaron iteraciones, hasta que sus aspectos técnicos de aseguramiento de la PCB en el acople y protección contra la luz del SiPM, funcionaran correctamente, lo que dio como resultado, las alternativas que se observan en la siguiente figura.

Figura 21. Alternativas prototipadas para toma de decisiones

Nota: Fotografía tomada en el laboratorio LIDeRa. Salón 302 edificio EDIC en la Universidad Industrial de Santander.

En la tabla 7 se encuentra el resumen de las mejoras realizadas y deficiencias que se observan en cada iteración del componente, la numeración de las alternativas coincide con el orden en el que se muestran los prototipos en la Figura 21.


Tabla 7. *Comparación de alternativas*

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Mejoras realizadas	Se adaptó un soporte de la distancia del acople de la PCB para evitar que se incline al ser asegurada	Se cubre por completo la PCB y el componente que resguarda el SiPM	No es necesario el uso de tornillos para fijar ambos componentes.
Deficiencias que aún se observan	El componente de la PCB está al descubierto, se puede generar movimiento de la misma desde otros ejes	Es necesario el uso de tornillos para asegurar la PCB	El agarre y método de desensamblado se dificulta por el tamaño de las piezas

6.2.1.4 Verificaciones con experto para el acople. La selección de la alternativa a validar se realizó a partir de la socialización de las propuestas con expertos del grupo de investigación, cuyas observaciones técnicas orientan la toma de decisiones, cuyo perfil y rol dentro del proceso se resumen en la Tabla 8.

La verificación de los prototipos y la toma de decisiones de diseño se realizó con el acompañamiento de un experto, cuyo perfil y rol dentro del proceso se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. *Descripción de experto en instrumentación electrónica.*

	Experto en instrumentación electrónica para la verificación del diseño del acople de unión entre la PCB/SiPM/Barra centelladora: Diego Castillo
Área de especialización	Ingeniería electrónica, con experiencia en el diseño del sistema electrónico de la PCB y la integración del sensor SiPM.


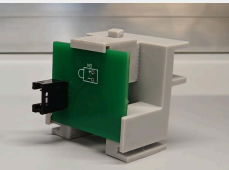




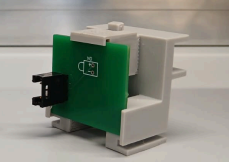

Experto en instrumentación electrónica para la verificación del diseño del acople de unión entre la PCB/SiPM/Barra centelladora: Diego Castillo

Experiencia en el proyecto	Participación en la construcción del telescopio para la implementación del sistema electrónico.
Intervención	Identificación de problemas de ajuste, evaluación de estabilidad del conjunto barra - PCB, recomendaciones para la elección de la alternativa a validar.
Momento de participación	Fase de construcción y verificación del prototipo.

Para su participación se muestran las alternativas y se le pide interactuar con cada una, ensamblado y desensamblado cada pieza. Posteriormente se realizan las observaciones con base a los requerimientos planteados, lo que se resume en la siguiente tabla.

Tabla 9. Comparación de alternativas respecto a requerimientos y valoración de experto.

Requerimiento	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
<input checked="" type="checkbox"/> cumple <input checked="" type="checkbox"/> No cumple <input type="checkbox"/> Cumple parcialmente			
Adaptación geométrica	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Facilidad de ensamble	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Estabilidad del conjunto	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Protección de la fibra óptica	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Protección del SiPM	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Requerimiento	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
<input checked="" type="checkbox"/> cumple <input checked="" type="checkbox"/> No cumple <input type="checkbox"/> Cumple parcialmente			
Fijación de barra y PCB	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total	2 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/>	6 <input checked="" type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>	5 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>

Observaciones generales



“Aunque la fijación está en la PCB, es importante que no quede tan expuesta.”


“El sistema de ensamble es sencillo y no necesita de elementos adicionales; sin embargo, no sería el adecuado para el tipo de acople que requieren las PCB que ya se encuentran ensambladas.”

“La alternativa protege bastante los componentes y el sistema de ensamble es adecuado para las PCB que se encuentran ya ensambladas.”

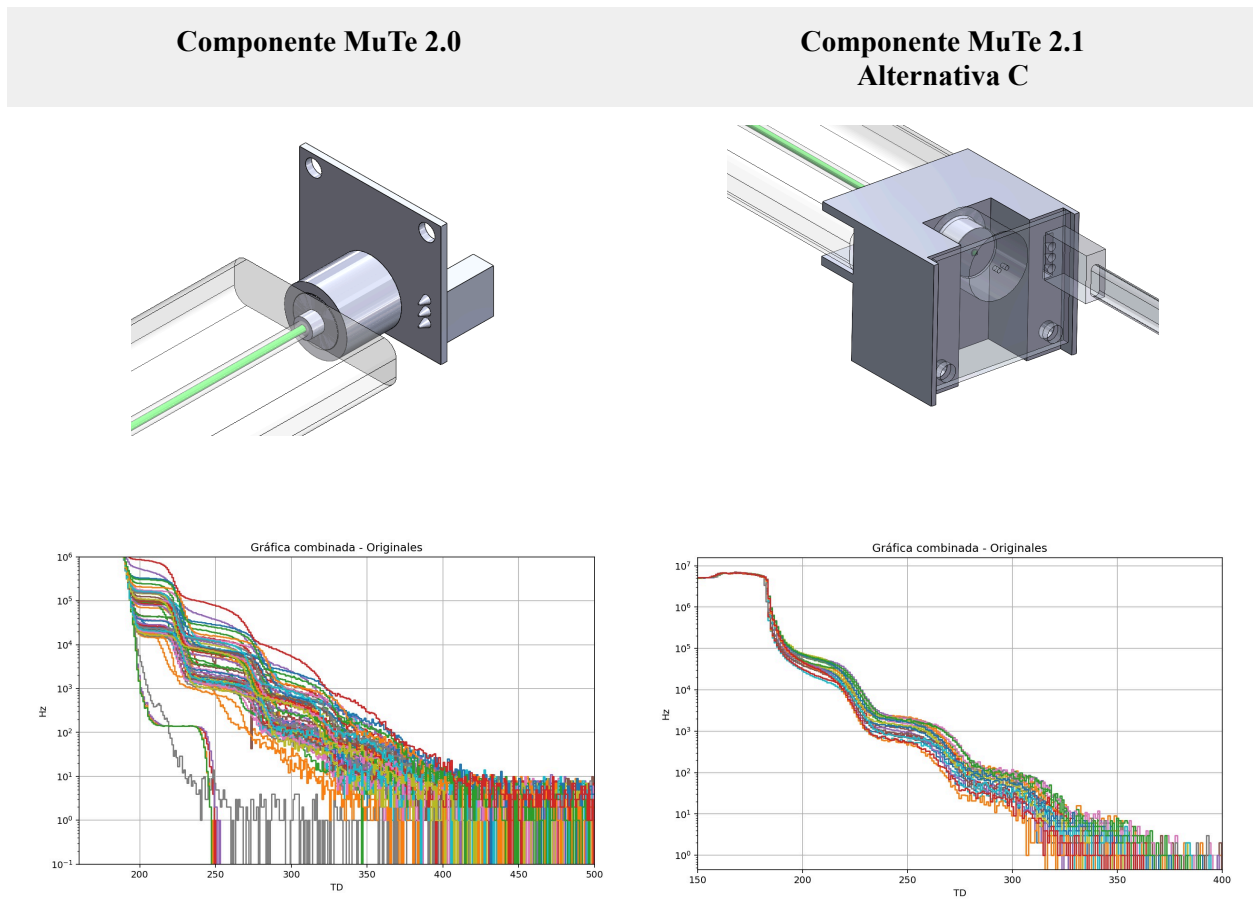
Teniendo en cuenta las observaciones generales del experto y la evaluación por criterios que se muestran en la Tabla 9, inicialmente la alternativa más destacada es la alternativa B, sin embargo, a pesar de tener una evaluación bastante alta respecto a los requerimientos, presenta un inconveniente relevante para el experto, por lo que la alternativa C es la más adecuada en términos de requerimientos y valoración por experto. Así la alternativa C es la elegida para el proceso de validación, y hace parte de la nueva versión del proyecto Mute 2.1

6.2.1.5 Validación del componente acople. Para la fase de validación se cuenta con la ayuda del experto que se evidencia en la Tabla 10, mediante el software JANUS se puso a prueba el subsistema del acople - PCB - SiPM - barra centelladora.

Tabla 10. Descripción del segundo experto en astropartículas.

	Experto en astropartículas para la validación del diseño del acople de unión entre la PCB/SiPM/Barra centelladora: Rafael Martinez
Área de especialización	Físico, con experiencia en procesos de adquisición y análisis de datos.
Experiencia en el proyecto	Participación en la construcción del telescopio de muones, en el análisis de los datos asociados a la medición de partículas.
Intervención	Proceso de validación del componente, comparándolo con la configuración inicial del sistema, midiendo la influencia de cada versión en el ruido de la medición.
Momento de participación	Fase de validación de prototipo.

Este proceso se llevó a cabo mediante el registro de mediciones donde se realiza una comparación entre el componente que se utilizaba previo al diseño y se realiza la comparación con la alternativa seleccionada a partir de las verificaciones. En la tabla 11 se puede observar la comparación.

Tabla 11. Resultados obtenidos de la validación

Nota: En la parte superior modelado de los acoples. En la parte inferior gráficas elaboradas con el software Janus.

Como se observa en la gráfica, al realizar el cambio de componente se logró una reducción significativa del ruido en las mediciones, lo que resultó en una señal más estable y consistente. En términos técnicos, esto implica que se garantizó el contacto adecuado entre el SiPM y la fibra óptica en los acoples, con una tasa de variación baja. Esto se debe a que el componente de unión presenta una distancia de ajuste constante para todos los casos, asegurando una condición de contacto uniforme y repetible a diferencia del primer sistema donde existe una

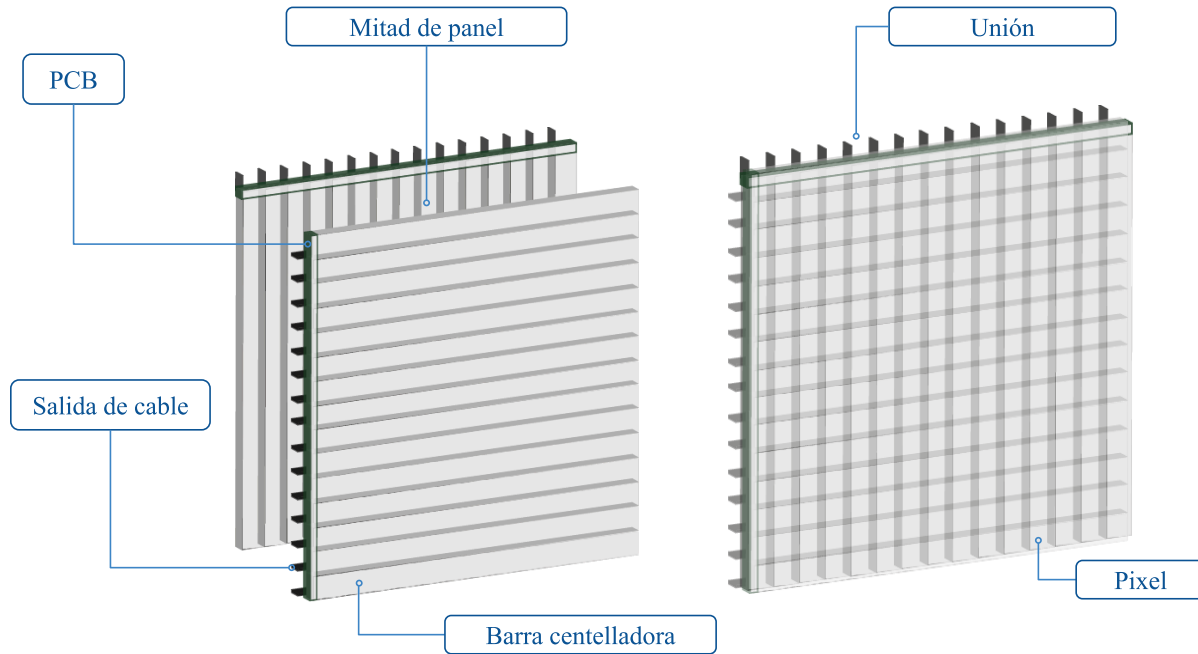
variación en la distancia de contacto entre el SiPM y la fibra óptica, que genera ruido en las mediciones bastante notable en las gráficas.

Esta decisión de diseño impacta directamente el desempeño global del telescopio de muones, ya que la reducción del ruido y la estabilidad de la señal mejoran la confiabilidad de los datos adquiridos, contribuyendo a una mayor precisión en la generación del muograma. Es importante destacar que el proceso de validación se llevó a cabo en un entorno controlado para ambos casos.

Los planos técnicos de diseño de este y cada componente se encuentran detallados en el apéndice D.

6.2.2 Componente 2. Soporte para barras centelleadoras

Este componente interno del panel centelleador es necesario para organizar, sostener y proteger las barras, asegurando una configuración precisa para obtener un muograma, el diseño debe mantener las capas de las barras a una distancia de menos de 6mm, mantener todas las barras completamente unidas y evitar que exista movimiento en cualquier de los ejes, el funcionamiento de los elementos que relacionan el componente a diseñar se puede visualizar en la siguiente figura.

Figura 22. Esquema de elementos que relacionan el segundo componente.

Nota: El componente 1 diseñado interactúa directamente con el componente 2, puesto que cada barra centelladora tiene el sistema de unión a la PCB, el componente 2 debe soportar y mantener fijas 15 barras horizontales y 15 barras verticales, cada una con su respectivo acople.

El componente a diseñar busca garantizar la alineación de las barras centelladoras durante su funcionamiento, cumpliendo con los requerimientos que se encuentran en la Tabla 12, que se especifican a continuación.

Tabla 12. Requerimientos específicos del componente 2 (soporte).

Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Panel de barras	Estabilidad	Las barras centelladoras deben quedar firmemente posicionadas, evitando desplazamientos accidentales durante el montaje o manipulación del sistema.	Geometría que limite el movimiento en los tres ejes (x, y, z). Tolerancia dimensional: +/- 0.25 mm. Rigidez mecánica del material del soporte.	RF

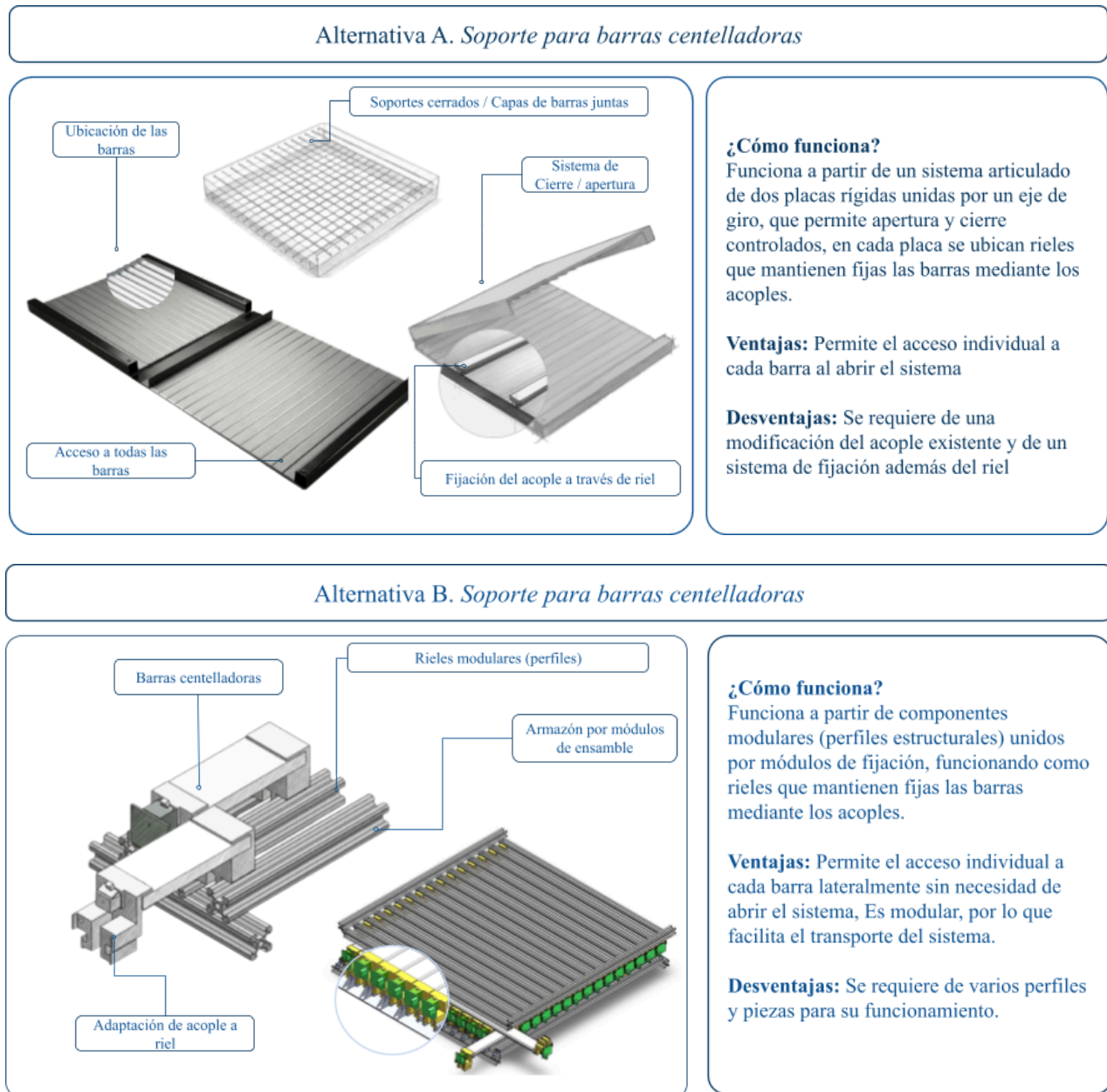
Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Panel de barras	Alineación	El soporte debe asegurar que las barras permanezcan alineadas entre sí a lo largo y ancho del panel.	– Cumple – No cumple	RF
Panel de barras	Contacto lateral entre barras	El diseño debe garantizar el contacto lateral entre las barras centelladoras, asegurando su posicionamiento dentro del panel.	Tolerancia dimensional del encastre lateral: $\leq \pm 0,1$ mm	RF
Panel de barras	Contacto entre capas	Las barras deben mantener un contacto adecuado entre capas (superior e inferior).	Tolerancia dimensional del contacto entre capas: ≤ 3 mm	FT
Panel de barras	Alineación con los demás componentes	El diseño debe asegurar que las barras queden alineadas con los acoples, la fibra óptica y el SiPM.	Paralelismo entre superficies de los componentes: Error máximo $\leq 0,2$ mm a lo largo del eje	RF
Panel de barras	Compatibilidad	Las barras centelladoras deben poder ser insertadas y retiradas individualmente sin necesidad de desmontar o mover individualmente las demás.	– Cumple – No cumple	RU
Panel de barras	Accesibilidad	El soporte debe permitir la revisión, mantenimiento o sustitución de cualquier barra sin alterar la posición ni afectar el funcionamiento de las demás.	– Cumple – No cumple	RU

RF: Requerimiento funcional

RU: Requerimiento de uso

FT: Factor técnico

6.2.2.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d de soporte para barras. Teniendo en cuenta estos requerimientos, se proponen las alternativas que se observan en la siguiente Figura 23.

Figura 23. *Alternativas de Soporte para barras centelladoras*



Nota: Se muestra cada alternativa en boceto y en modelado 3D, la explicación del funcionamiento, ventajas y desventajas.

Para esta fase, cabe mencionar que cada alternativa se realizó progresivamente, por lo que la última alternativa deriva de la iteración de las dos anteriores, teniendo en cuenta los comentarios de los integrantes del laboratorio, que se especifican en el proceso de construcción de los prototipos.

6.2.2.2 Análisis y selección de materiales preliminares para prototipado del soporte para barras. Previo a realizar el análisis de materiales para la construcción con material definitivo, se lleva a cabo una cotización y un análisis preliminar de materiales de media fidelidad. En esta etapa se realiza una estimación inicial de costos. Teniendo en cuenta que se construirán prototipos a escala real de esta propuesta en una etapa posterior a la de este proyecto, el costo de fabricación del componente se convierte en un criterio determinante; por lo tanto, se realiza la cotización de materiales que cuentan con las propiedades adecuadas y se encuentran en

el mercado. Esta información se socializa con el grupo, ya que se convierte en una variable para la toma de decisiones de diseño.

Para las alternativas A y C se lleva a cabo una comparación de materiales comercializados en forma de lámina, considerando que esto facilita el proceso de mecanizado requerido por las soluciones propuestas. La comparación se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Cotización de materiales para prototipado (alternativa A y C)

Materiales	Costo (COP)	Dimensiones	Propiedades
Acrílico	735.000	2 m x 70 cm x 9mm	Visibilidad y rigidez
Policarbonato	756.000	2m x 70 cm x 6mm	Resistencia y durabilidad
Madera (Triplex)	70.000	2.44 m x 1.22 m x 6 mm	Rigidez y resistencia

Con base en la cotización realizada, la madera se presenta como el material más económico para realizar verificaciones de media fidelidad. Por otro lado, para la alternativa B, que emplea perfiles estructurales, el material de base es el aluminio y su cotización se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 14. Cotización de materiales para prototipado (alternativa B)

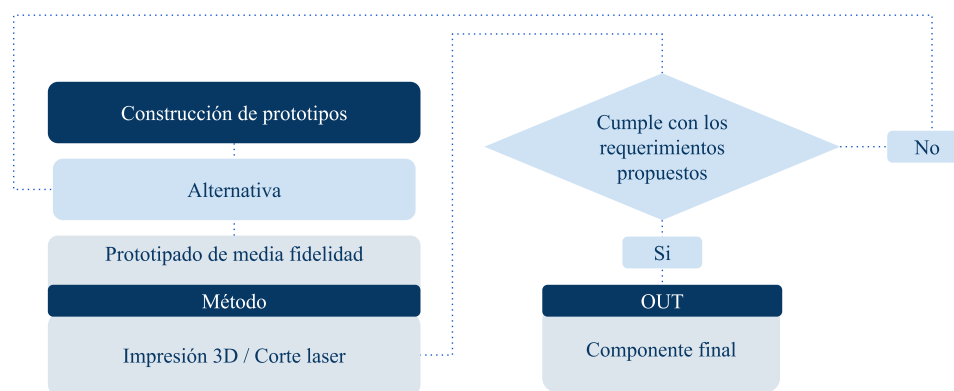
Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario (COP)	Subtotal (COP)
Perfil (1 m)	unid.	64	35.700	2.284.800
Componentes de unión (T)	unid.	60	12.000	720.000
Total general				3.004.800

Se evidencia una diferencia bastante amplia de costos con respecto a las alternativas planteadas, antes de realizar la construcción de prototipos a escala real, se realizan prototipos de media fidelidad a escala, para analizar el funcionamiento y socializar con expertos.

El análisis de costos permite concluir que la madera (triplex) resulta el material más adecuado para la construcción de prototipos de media fidelidad, debido a su bajo costo y facilidad de manufactura. En contraste, el uso de perfiles de aluminio implica una inversión significativamente mayor, por lo que en esta etapa del proyecto no se considera viable para prototipado a media fidelidad.

6.2.2.3 Construcción de prototipos del componente de soporte para barras. La construcción de prototipos en esta fase del componente se realiza para comparar y posteriormente verificar las alternativas, es necesario que en los prototipos se observe las oportunidades de mejora así como también las características que se deben mantener en el diseño del componente.

Figura 24. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 3.



Nota: Se detalla el proceso para cumplir con el objetivo de construir un prototipo de media fidelidad, este se repite para cada componente priorizado.

En esta fase se construyen modelos en materiales de baja fidelidad con el fin de explorar la materialización de las alternativas planteadas, como se observa en la Figura 25 (a). A partir de este planteamiento, la propuesta evoluciona hacia la construcción de un prototipo a escala mediante impresión 3D (Alternativa A), presentado también en la Figura 25 (b). Este prototipo se desarrolla para ser evaluado por expertos, considerando que se trata de un componente priorizado para prototipado. La retroalimentación se obtiene de expertos en astropartículas que financian la construcción de los prototipos del proyecto, mediante la presentación de las alternativas en el seminario de astropartículas realizado el 10 de octubre del 2025 en el edificio de Livianos salon 403 de la Universidad Industrial de Santander. Lo presentado en cada reunión del seminario se puede ver a detalle en el apéndice F.

Figura 25. *Alternativas prototipadas para toma de decisiones*



Nota: Fotografías tomadas en el laboratorio LIDeRA en el edificio EDIC de la Universidad Industrial de Santander.

6.2.2.4 Socialización con expertos del soporte para barras. En la Figura 26, se presenta la reunión en la cual se socializan los avances del proyecto, junto con la posible

materialización de las alternativas. La verificación de los prototipos y la toma de decisiones de diseño se realizaron mediante la discusión y retroalimentación colectiva dentro del grupo de astropartículas.

Figura 26. Socialización con el grupo



Nota: Fotografía tomada en el auditorio Alberto Elías Hernández del edificio CENTIC de la Universidad Industrial de Santander

En esta reunión se contó con la participación de evaluadores expertos, en la Tabla 15 y 16 se establecen sus perfiles, encargados de proveer retroalimentación necesaria para tomar decisiones en el proyecto.

Tabla 15. Descripción de experto en astropartículas 1.

	<p>Experto en astropartículas presente en las reuniones para la toma de decisiones de diseño de los componentes del telescopio, en este caso particular, del tipo de soporte a construir para las barras centelladoras : Christian Sarmiento</p>
<p>Área de especialización</p>	<p>Instrumentación científica aplicada a la física de partículas, encargado de coordinar la ejecución y desarrollo del proyecto MuTe.</p>



	
Experto en astropartículas presente en las reuniones para la toma de decisiones de diseño de los componentes del telescopio, en este caso particular, del tipo de soporte a construir para las barras centelladoras : Christian Sarmiento	
Experiencia en el proyecto	Participación en la construcción y ejecución del telescopio de muones.
Intervención	Intervención en todas las fases del proyecto.
Momento de participación	Reuniones semanales, donde se mostraban avances del proyecto.

Tabla 16. Descripción de experto en astropartículas 2.

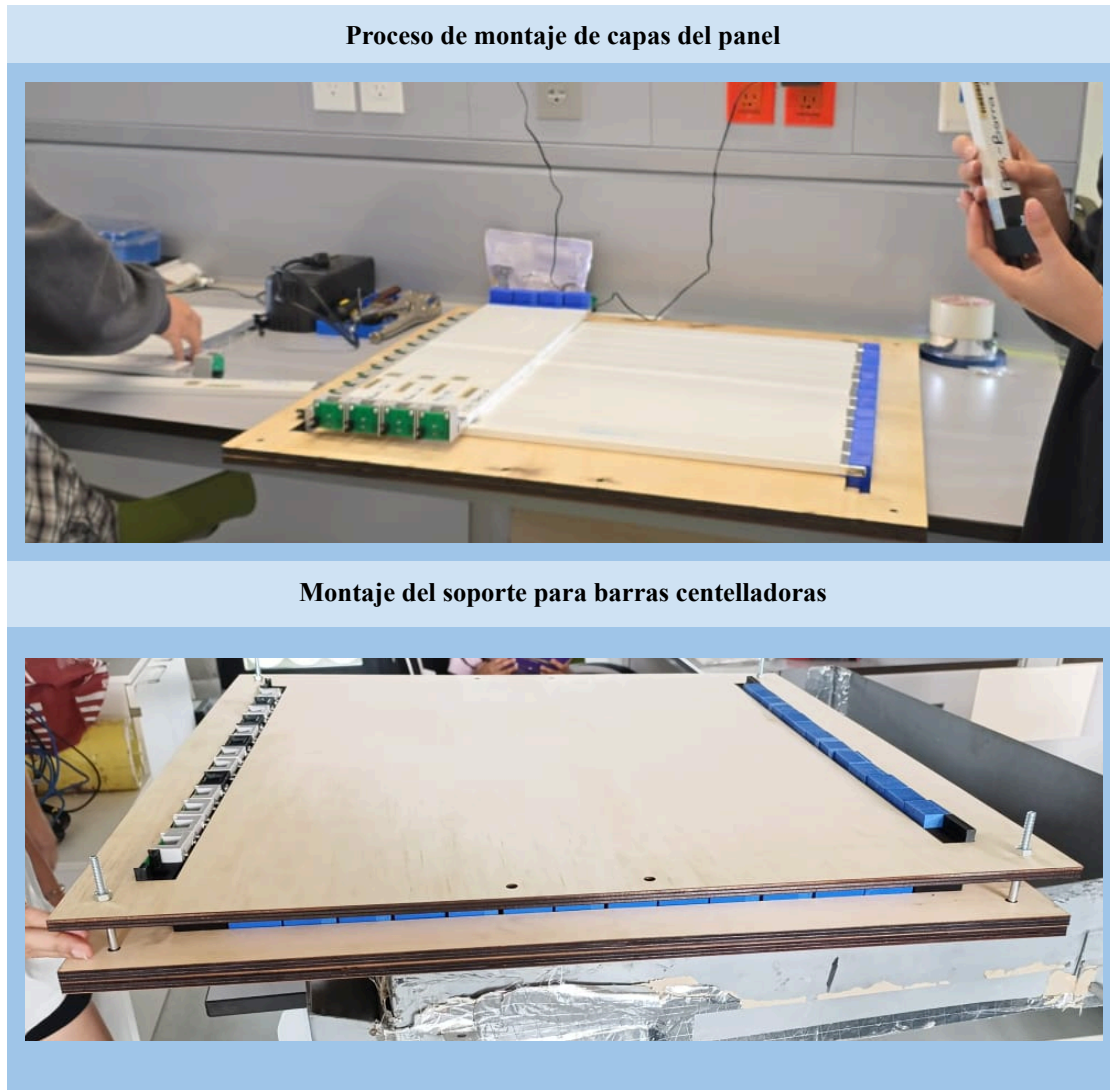
	
Experto en astropartículas presente en las reuniones para la toma de decisiones de diseño de los componentes del telescopio, en este caso, del tipo de soporte a construir para las barras centelladoras. Luis Nuñez	
Área de especialización	Líneas de investigación en astropartículas, física de los objetos compactos en relatividad general y el desarrollo de interfaces de colaboración en ambientes de computación avanzada.
Experiencia en el proyecto	Participación en el proceso de desarrollo y ejecución del telescopio de muones. Encargado de coordinar la ejecución y desarrollo del proyecto MuTe.
Intervención	Intervención en todas las fases del proyecto.
Momento de participación	Reuniones semanales, donde se mostraban avances del proyecto.

A partir de la socialización con expertos, sobre las alternativas, su funcionamiento y configuración se obtiene la siguiente evaluación comparativa.

Tabla 17. Comparación de alternativas respecto a requerimientos y valoración de experto.

Requerimiento	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
<input checked="" type="checkbox"/> cumple <input checked="" type="checkbox"/> No cumple <input type="checkbox"/> Cumple parcialmente			
Estabilidad	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Alineación	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Contacto lateral entre barras	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Contacto entre capas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Alineación con los demás componentes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Compatibilidad	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Accesibilidad	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total	4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>	7 <input checked="" type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>	6 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>
Observaciones generales	 <p>El mecanismo de apertura es bastante funcional, pero la carga generada por el peso de todas las barras podría incrementar el esfuerzo al momento de usarlo.</p>	<p>El sistema presenta un funcionamiento adecuado; sin embargo, el costo asociado a su implementación lo convierte en una alternativa no viable dentro de los criterios del proyecto.</p>	<p>El sistema muestra un desempeño funcional correcto, una configuración compacta y un costo acorde a los criterios del proyecto.</p>

Teniendo en cuenta lo anterior, se toma la decisión de prototipar la alternativa C a escala real y con el material seleccionado de prototipado, lo cual se puede observar en la siguiente figura.

Figura 27. *Prototipado del componente (soporte para barras centelladoras)*

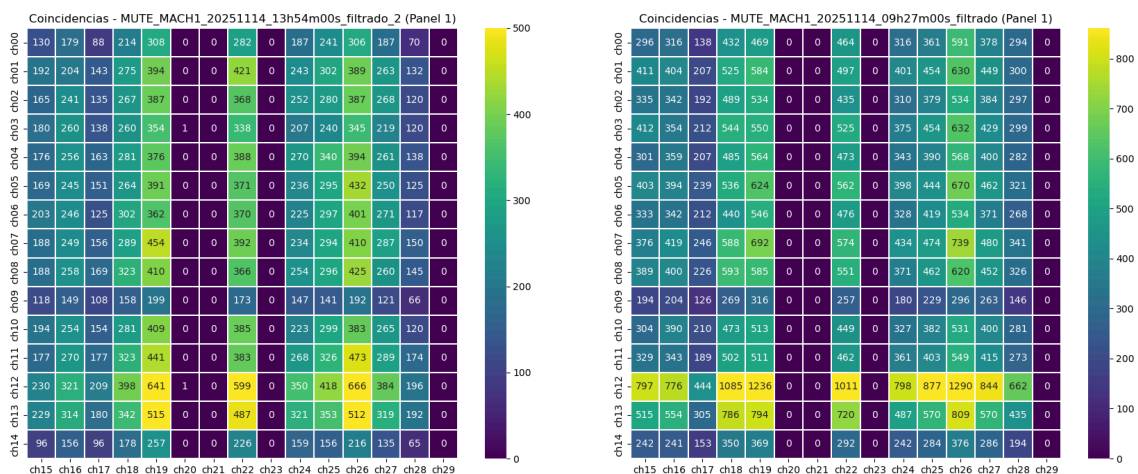
Nota: Fotografías tomadas en el laboratorio LIDeRA en el edificio EDIC de la Universidad Industrial de Santander.

Como esta alternativa prototipada a escala real, se terminan dos paneles y posteriormente se validan a nivel de componente.

6.2.2.5 Validación por componente de soporte para barras. En la Figura 28, a partir de simulaciones realizadas por el profesional en astropartículas, se evidencia que existe una

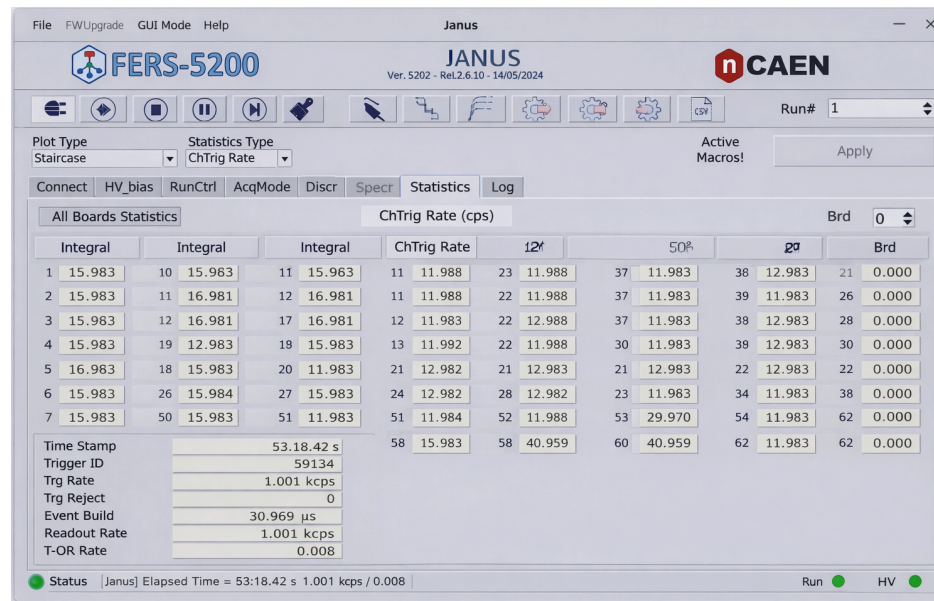
distribución del número de señales detectadas al mismo tiempo en los píxeles formados en los paneles. Dado que las capas de los paneles centelleadores se encuentran alineados y las barras están configuradas de forma estable y fija, se permite validar las dimensiones y la precisión en la construcción. Cualquier intermitencia observada en las mediciones se descarta que sea por variables de diseño, y pasa a ser de análisis los demás componentes que intervienen en la muografía, desde la física, electrónica o ingeniería de sistemas.

Figura 28. Simulación de detección de partículas de cada panel centelleador



Nota: Gráficas realizadas en python

Posterior a esto, en la Figura 29 corresponde a la medición multicanal de las barras centelleadoras configuradas en el prototipo del panel, donde se observa que la mayoría de los datos obtenidos son homogéneos en los canales activos, lo que valida la alineación y precisión de las capas del panel, ya que un desajuste mecánico se reflejaría en mayor diferencia numérica entre los canales.

Figura 29. Software de adquisición de datos. *Janus*

Nota: Datos obtenidos con el software Janus

De esta manera, la propuesta de diseño genera una correcta alineación y estabilidad dimensional de los paneles centelleadores, lo que impacta directamente en el desempeño global del telescopio de muones al garantizar la coherencia de las detecciones y contribuye a la confiabilidad en la reconstrucción de la imagen de un muograma.

6.2.2.6 Análisis y selección de materiales finales del soporte para barras. Para el análisis del material final, se hizo una búsqueda de materiales laminares resistentes a la intemperie comerciales, teniendo en cuenta el mecanizado del material sería en corte CNC. En la siguiente tabla se presenta el análisis del componente y los criterios considerados para la selección de material, integrando las propiedades requeridas para su funcionamiento.

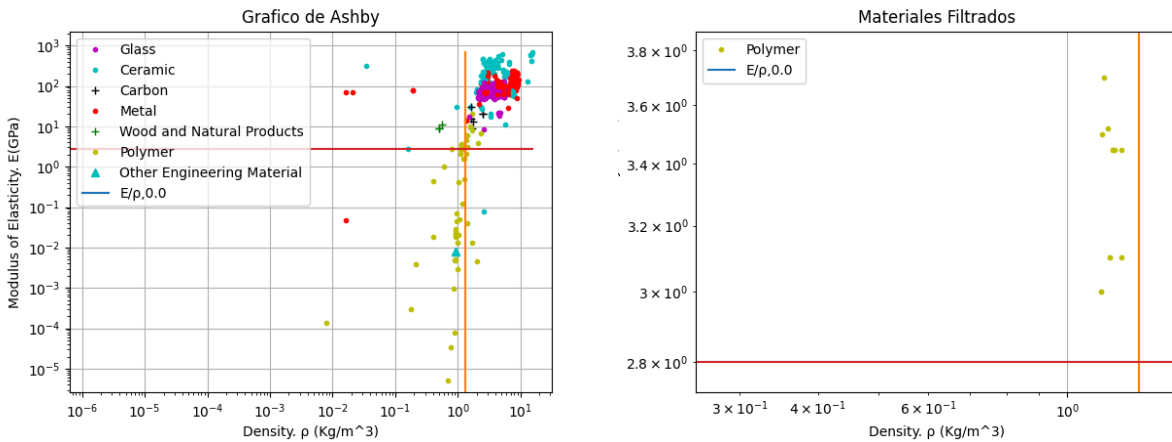
Tabla 18. *Análisis de propiedades del material*

Componente	Función principal	Condiciones de uso
<i>Soporte para barras centelleadoras</i>	Asegurar las barras de forma lateral, por capa y en su integración con los demás componentes del sistema.	Disponibilidad Uso en exterior (intemperie). Montaje y desmontaje ocasional. Mecanización por corte a láser o cnc.
Descripción del material necesario		
Material liviano que garantice rigidez y estabilidad geométrica, permitiendo tolerancias controladas para el montaje.		
Propiedades	Índice de Ashby	
- Módulo de Young	$M = \frac{E}{P}$	
- Densidad	<i>Costo</i>	
- El costo del material		

Se estableció un valor mínimo de módulo de Young de 2.8 GPa. Este umbral permite descartar materiales muy flexibles y se estableció un límite superior de densidad de 1.3 g/cm³. Con estos datos se realizó el proceso de filtrado siguiendo la metodología de Ashby, considerando la relación entre rigidez y densidad para seleccionar el material más adecuado.

La Figura 30 muestra el diagrama de Ashby utilizado para el proceso de selección de materiales del soporte para barras centelleadoras. En este gráfico se relaciona el módulo de elasticidad (módulo de Young) con la densidad los materiales vidrio, cerámica, carbono, metal, madera, polímeros, y otros materiales de ingeniería relaciones con el módulo de elasticidad; permitiendo visualizar su desempeño relativo en términos de rigidez y peso.

Figura 30. Diagrama de Ashby



Nota. Graficas obtenidas mediante el software de código abierto OpenMaterialsSelector para facilitar el proceso de selección de materiales según la metodología de Ashby

A partir de la comparación de materiales mediante la metodología de Ashby, se evaluó la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad (E/ρ), obteniendo que ninguno de estos cuenta con características de resistencia a las condiciones de la intemperie.

Tabla 19. Comparación de materiales plásticos.

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Tipo
Radici Radilon® N66-AFR Nylon 66	1.16	3.52	Nylon 66 (Poliamida 66)
Abatron AboCast/AboCure 8109-13	1.18	3.447	Resina epoxi o compuesto similar
Abatron AboCast/AboCure 8109-3	1.18	3.447	Resina epoxi o compuesto similar
Abatron AboCast/AboCure 8109-6	1.22	3.102	Resina epoxi o compuesto similar
Abatron AboCast/AboCure 8109-5	1.22	3.447	Resina epoxi o compuesto similar

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Tipo
Global EPP PA 66E Extruded Polyamide 66	1.145	3.7	Nylon 66 (Poliamida 66)
Abatron AboCast/AboCure 8109-8	1.19	3.447	Resina epoxi o compuesto similar
Abatron AboCast/AboCure 8109-9	1.17	3.102	Resina epoxi o compuesto similar
Global EPP PA 6E Extruded Polyamide 6	1.135	3.5	Nylon 6 (Poliamida 6)

Es por esto que se realiza una búsqueda en sitios web de venta de materiales usados en exteriores o fachadas de tipo laminar, datos con los cuales se hace una matriz, para comparar aspectos de importancia para la elección del material a usar, como se observa en la Tabla 20.

Tabla 20. Matriz de materiales comerciales con propiedades similares fuera de la base de datos

Material	Resistencia a la intemperie (40%)	Costo (30%)	Módulo de Young (GPa) (20%)	Densidad (g/cm ³) (10%)	Puntaje
Lámina Panelex	Alta	(6mm) \$230.000 m ²	9 - 12	1.3 - 1.5	4.0
Lámina de PVC	Alta	(3mm) \$41.655,47 m ²	2.5 - 3.5	1.3 - 1.5	4.1
Placa Sp Glass	Media	(8mm) \$58.750,42 m ²	2.5 - 3.5	1.35 - 1.45	3.4

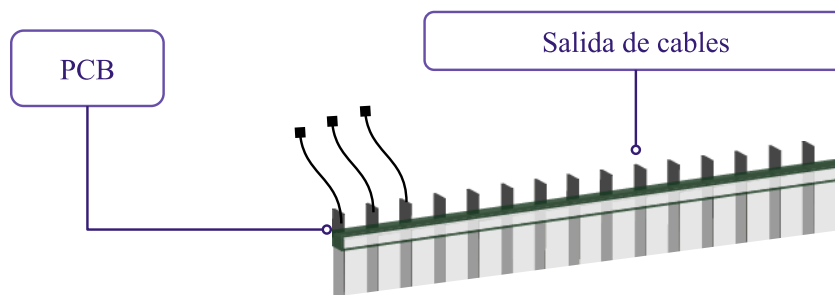
Nota: la información colocada en la tabla fue tomada de Lamitech, politi y sitios web como Homecenter y mercadolibre.

A partir de la matriz de selección se obtiene que el material óptimo para construcción es la lámina de PVC y como material para construcción de prototipos el triplex de pino. Para la forma de construcción y ensamble de los componentes internos del panel hasta este punto, se realiza el diagrama de uso del proceso, este se detalla en el apéndice E.

6.2.3 Componente 3. Trampa de luz para el sistema de cableado

El diseño del componente de trampa de luz, Figura 31, es necesario para el funcionamiento global del telescopio de muones, dado que el ingreso de luz externa introduce señales no deseadas que generan ruido en las mediciones y compromete la precisión del muograma. En condiciones de laboratorio, este componente permite aislar las señales estudiadas, garantizando que las detecciones correspondan a la interacción de los muones con los detectores y facilitando el análisis de otros factores que intervienen en el sistema.

Figura 31. Visualización de elementos en los que interviene el componente 3.



Nota: Representación gráfica del subsistema con el que interactúa el diseño de la trampa de luz.

Con base en la anterior figura, las trampas de luz intervienen en el sistema de cableado que parte de la PCB, estos componentes se diseñan a partir de los requerimientos que se muestran en la siguiente tabla.

Antes de definir la solución de diseño de la trampa de luz asociado a la salida de cables del panel centelleador, se establecen los requerimientos que debe cumplir el componente. Estos requerimientos constituyen la base para el desarrollo del diseño, ya que permiten garantizar su correcta integración dentro del panel del telescopio de muones por centelleadores, así como su

adecuado desempeño durante la operación del sistema. En la Tabla 21 se presentan los requerimientos considerados para el diseño del componente.

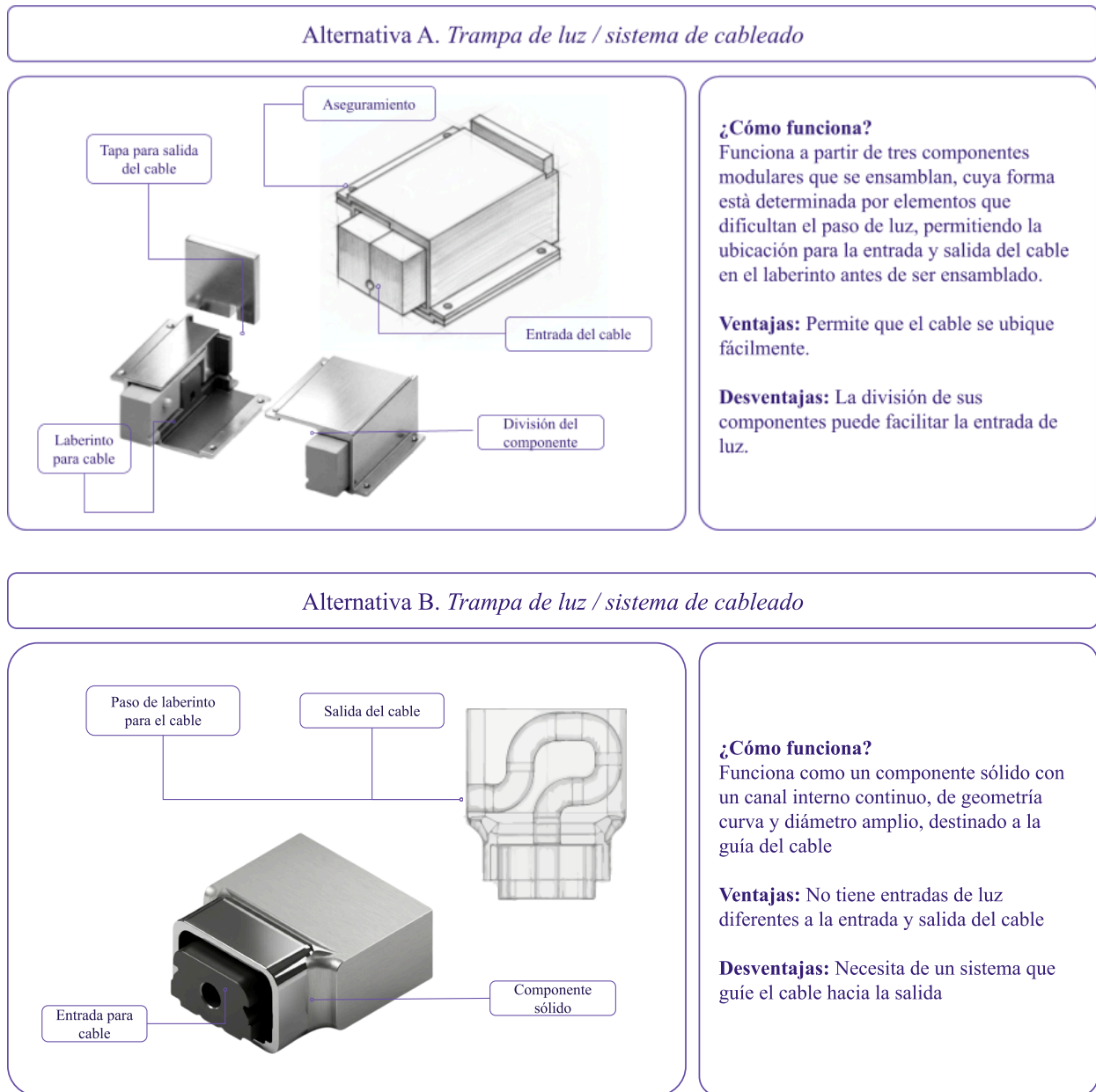
Tabla 21. *Requerimientos específicos componente 4 trampa de luz*

Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Trampa de luz	Bloqueo de luz	La trampa de luz debe impedir el ingreso de luz externa a través de la entrada del cable.	Recorrido interno ≥ 10 cm ≥ 3 cambios de dirección en la geometría interna Acabado interno mate de baja reflectancia	RF
Trampa de luz	Paso del cable	El diseño debe permitir el ingreso fácil del cable sin generar esfuerzos ni daños durante el ensamble.	$D = \text{diámetro del cable} + 0,5-1$ mm Tolerancias: $\pm 0,3$ mm (impresión FDM estándar)	RF
Trampa de luz	Facilidad de instalación	La trampa de luz debe ser sencilla de instalar y desmontar sin herramientas especiales.	Número total de piezas del acople: ≤ 3 piezas Uso de herramientas: No	RF
Trampa de luz	Compacidad	La trampa de luz no debe ocupar más volumen que el asignado a una barra centelladora.	Dimensiones máximas permitidas: 4cm * 3 cm	RF

RF: Requerimiento funcional

Teniendo en cuenta estos requerimientos se propusieron alternativas para realizar prototipos verificables en laboratorio y posteriormente escalarlos al sistema de los paneles.

6.2.3.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d de trampa de luz. En la figura 32 se visualizan las propuestas de solución finales, su explicación, ventajas y desventajas.

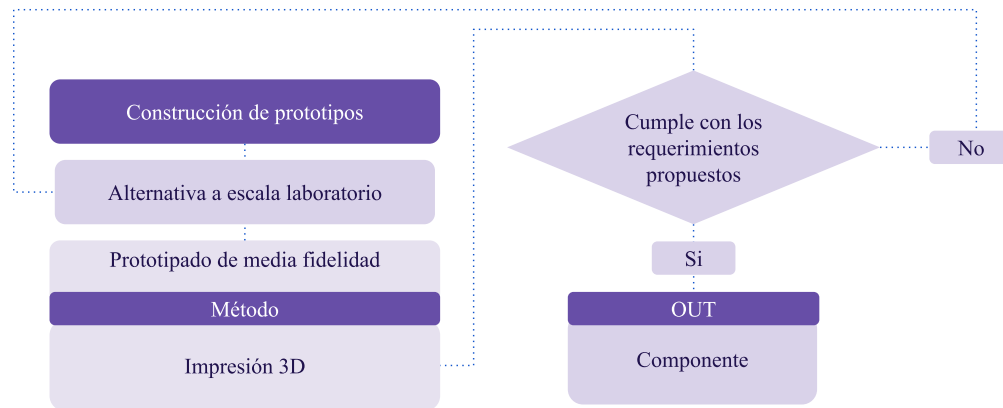
Figura 32. *Alternativas de Trampa de luz*

Nota: Se muestra cada alternativa en boceto y en modelado 3D, la explicación del funcionamiento, ventajas y desventajas.

Las alternativas se realizaron teniendo como referencia dos esquemas experimentales que se explican a continuación.

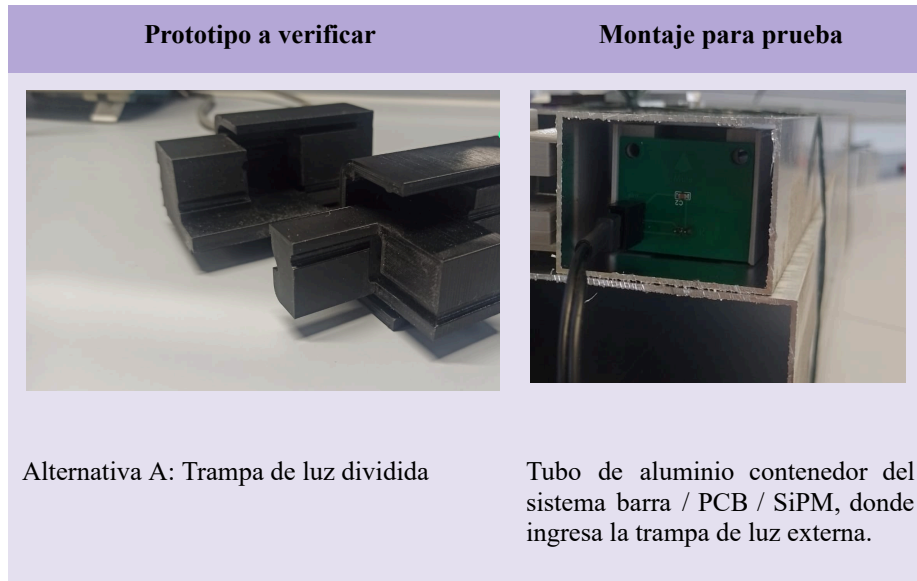
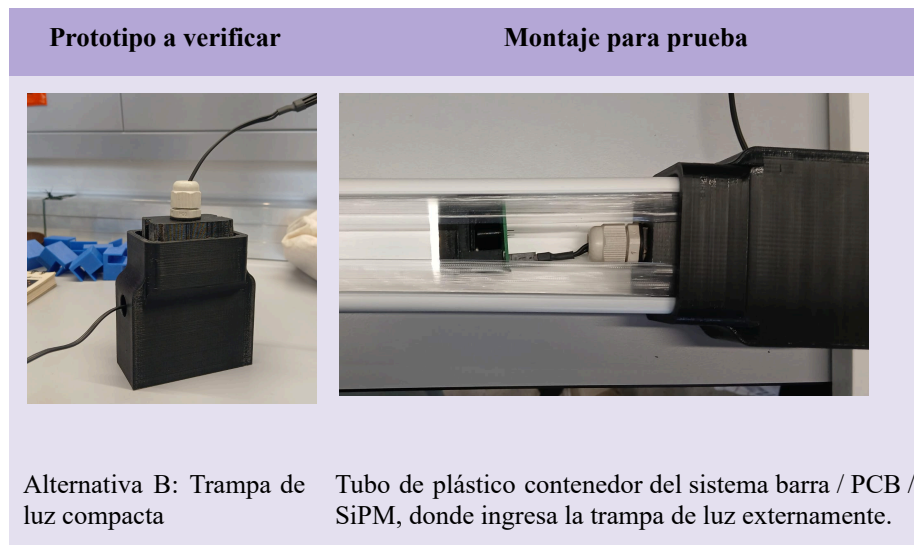
6.2.3.2 Construcción de prototipos. La construcción de prototipos en esta fase del componente se realiza para comparar y posteriormente verificar las alternativas, es necesario que en los prototipos se observe las oportunidades de mejora así como también las características que se deben mantener en el diseño del componente.

Figura 33. Diagrama de descomposición de actividades para el objetivo específico 3.



Nota: Se detalla el proceso para cumplir con el objetivo de construir un prototipo de media fidelidad, este se repite para cada componente priorizado.

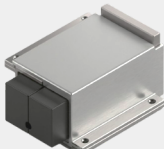

En esta fase se realiza, una prueba, por sistema individual, es decir, se realiza un prototipo figura 34 para observar en comportamiento para una barra/PCB/SiPM, conectada a la FERS, esta medición se realiza dentro de un tubo, esto para simular el sistema en el que se encuentran las PCB es decir dentro del panel de detección, como se puede observar en la Figura 34.

Figura 34. *Prototipo de alternativa A***Figura 35.** *Prototipo de alternativa B*

Nota: Fotografías tomadas en el laboratorio LIDeRA en el edificio EDIC de la Universidad Industrial de Santander.

6.2.3.3 Verificaciones del componente trampa de luz. Para las verificaciones de estos componentes, se hace una prueba de observación, colocando cada componente apuntando hacia un punto de luz, para determinar si permitía su paso al interior de este. Los resultados comparativos que se ilustran en la Tabla 22, dejan ver que la alternativa B es la más adecuada para continuar con su proceso de validación debido a que tiene mejor comportamiento en el bloqueo de luz, lo que evita la entrada de luz, requerimiento fundamental en el proyecto.

Tabla 22. Comparación de alternativas respecto a requerimientos y valoración de experto.

Requerimiento	Alternativa A	Alternativa B
<input checked="" type="checkbox"/> cumple <input checked="" type="checkbox"/> No cumple \ominus Cumple parcialmente		
Bloqueo de luz	\ominus	<input checked="" type="checkbox"/>
Paso del cable	<input checked="" type="checkbox"/>	\ominus
Facilidad de instalación	<input checked="" type="checkbox"/>	\ominus
Compacidad	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total	3 <input checked="" type="checkbox"/> 1 \ominus 0 <input checked="" type="checkbox"/>	2 <input checked="" type="checkbox"/> 2 \ominus 0 <input checked="" type="checkbox"/>

Observaciones generales



“ El sistema de unión, deja entrever luz”

“Al no subdividir el componente y generar trayectorias dentro para el paso del cable, se evita la entrada de luz”

Con las verificaciones anteriores, se procede a realizar una validación por componente de la alternativa B

6.3.3.4 Validación por componente de la trampa de luz. Para la validación de este componente se lleva a cabo una medición de la cantidad de partículas que ingresa al sistema (Tubo / Pcb / trampa de luz), mediante el software Janus, herramienta utilizada para la adquisición y visualización de datos provenientes del sistema de detección. El software permite registrar la tasa de conteo de partículas en tiempo real, así como almacenar los datos asociados a cada medición bajo condiciones controladas de laboratorio. Estas funcionalidades resultan pertinentes para el proyecto, dado que permiten cuantificar y comparar el ingreso de partículas al sistema diseñado sin intervenir directamente en la configuración física del detector. Posterior a eso se realiza una comparación entre la cantidad de partículas que ingresa a la trampa de luz diseñada y la cantidad que ingresa a un sistema de referencia preestablecido (Caja negra) por el laboratorio para realizar pruebas de ingreso de partículas, como se puede observar en la Figura 36.

Figura 36. Medición de entrada de partículas para ambos sistemas en software Janus



Nota: Fotografía tomada en el laboratorio LIDeRA en el edificio EDIC de la Universidad Industrial de Santander a la derecha. Datos obtenidos por el software Janus a la izquierda.

A la izquierda se puede observar el montaje de los dos sistemas, en la parte inferior, la alternativa diseñada y en la superior el sistema preestablecido (caja negra). Cada uno de ellos se conecta a un canal de la FERS para realizar la medición, la alternativa se encuentra conectada al canal 58 y la caja negra al canal 54. Posterior a su conexión, se empieza a medir durante un tiempo estimado, dando como resultado un promedio de partículas para la alternativa validada y para la caja negra. El fin de esta validación es asegurar que ingrese al sistema la menor cantidad de partículas, lo cual se traduce a menor ingreso de luz. El criterio de aceptación para la comparación de resultados está definido por los valores obtenidos en el sistema de referencia del laboratorio (caja negra), que de igual manera se muestran estas mediciones en la Figura 36.

Tomando como base la configuración formal de la trampa de luz validada a escala individual, se extrapola a nivel del panel centellador, tomando en cuenta sus principios base, en específico que el orificio de ingreso del cable se mantenga integrado a la pieza mediante su trayectoria con desplazamientos para formar paredes que detengan la entrada de la luz.

6.2.3.5 Análisis y selección de materiales preliminares para trampa de luz. La presente sección describe el proceso de análisis y selección preliminar de materiales para la trampa de luz del panel centelleador, considerando los requerimientos funcionales de bloqueo de luz y estabilidad geométrica, así como las condiciones de uso del componente.

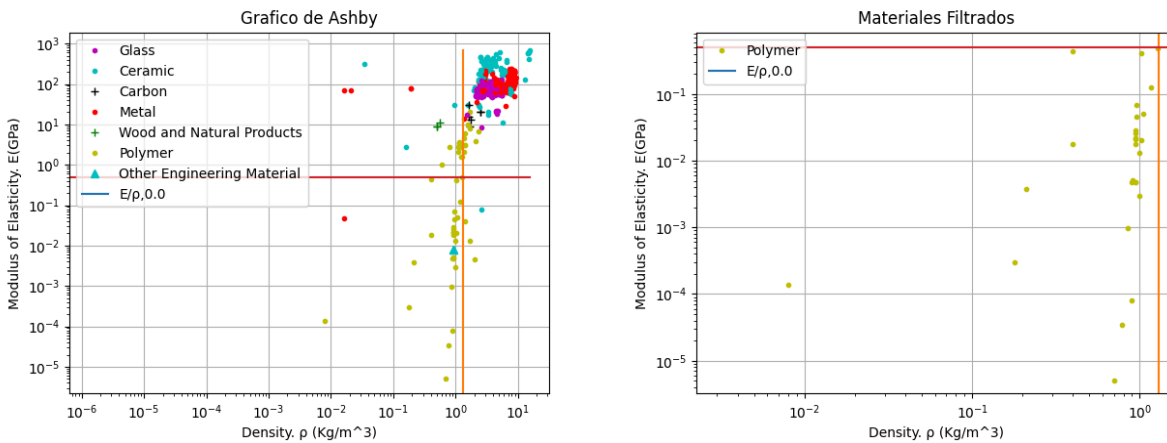
Tabla 23. *Análisis de propiedades del material*

Componente	Función principal	Condiciones de uso
<i>Trampa de luz (dentro del panel)</i>	Dirigir los cables mediante un trayecto que bloquee el paso de luz	Disponibilidad del material Uso en exterior (intemperie). Montaje y desmontaje ocasional.
Descripción del material necesario		
Material que sea flexible para el paso del cable y tenga estabilidad geométrica para el trayecto que se recorre.		
Propiedades	Índice de Ashby	
- Módulo de Young	$M = \frac{E}{P}$	
- Densidad	<i>Costo</i>	
- El costo del material		

De acuerdo a requerimientos técnicos del componente, se seleccionan materiales con módulo elástico medio-bajo, capaces de tolerar deformaciones elásticas, estableciendo un valor máximo de módulo de Young de 0.5 GPa. Este umbral permite encontrar materiales flexibles. Se estableció un límite de densidad de 1.3 g/cm³. Con estos datos se realizó el proceso de filtrado, que se puede observar en las siguientes gráficas.

La Figura 37 presenta el diagrama de Ashby utilizado para la selección preliminar de materiales para la trampa de luz, en el cual se relaciona el módulo de elasticidad (módulo de Young) con la densidad de distintos grupos de materiales.

Figura 37. Diagrama de Ashby



Nota. Graficas realizadas con el software de código abierto OpenMaterialsSelector para facilitar el proceso de selección de materiales según la metodología de Ashby

En la gráfica izquierda se encuentran familias de materiales generales que posteriormente se filtran a través de umbrales visualizados en la gráfica derecha, correspondientes a un valor máximo de módulo de Young de 0,5 GPa en el eje vertical y un límite de densidad de 1,3 g/cm³ en el eje horizontal, definidos a partir de los requerimientos funcionales del componente. Esta demarcación, da como resultado un grupo de materiales potenciales que se observan en la Tabla 24, cuyos valores permiten identificar aquellos con mayor rigidez relativa dentro del grupo de materiales flexibles, de los cuales serán considerados posteriormente en una matriz de decisión para la selección final del material más adecuado para la aplicación propuesta.

Tabla 24. Comparación de materiales poliméricos.

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Tipo
Aptek 7504LM-PMF UV Urethane Coating/Encapsulant	0.94	0.00483	Recubrimiento de uretano UV

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Tipo
Overview of materials for Styrenic Elastomer (TES)	0.4	0.018	Elastómero estirénico (TES)
Aptek 7503LM-PMF UV Urethane Conformal Coating	0.89	0.00483	Recubrimiento conformal de uretano UV
Overview of materials for Thermoplastic Polyurethane, Elastomer, Ether Grade	1.02	0.02	Poliuretano termoplástico elastomérico, grado éter
KKPC KOSYN KTR 402 Thermoplastic Elastomer (TPE)	0.94	0.026	Elastómero termoplástico (TPE)
Overview of materials for Thermoplastic Elastomer, Melt-Processible Rubber	0.18	0.0003	Elastómero termoplástico procesable por fusión
KKPC KOSYN KTR 302 Thermoplastic Elastomer (TPE)	0.94	0.018	Elastómero termoplástico (TPE)
Overview of materials for Thermoset Polyurethane, Liquid	0.4	0.44	Poliuretano termoestable líquido
KKPC KOSYN KTR 601 Thermoplastic Elastomer (TPE)	0.95	0.045	Elastómero termoplástico (TPE)
Overview of materials for Thermoset Polyurethane Foam, Unreinforced	0.008	0.000138	Espuma de poliuretano termoestable sin refuerzo
Overview of materials for Thermoplastic Olefinic Elastomer (TPO)	0.85	0.000986	Elastómero olefinico termoplástico (TPO)
KKPC KOSYN KTR 401 Thermoplastic Elastomer (TPE)	0.94	0.028	Elastómero termoplástico (TPE)
Overview of materials for Polyester Thermoplastic Elastomer	1.0	0.013	Elastómero termoplástico de poliéster
Overview of materials for Thermoplastic Polyurethane, éter Grade	1.15	0.005	Poliuretano termoplástico, grado éter
KKPC KOSYN KTR 301 Thermoplastic Elastomer (TPE)	0.94	0.022	Elastómero termoplástico (TPE)
Overview of materials for Polyether Ester Elastomer	1.05	0.05	Elastómero éster poliéter
Overview of materials for Thermoset Fluoroelastomer	0.9	0.00008	Fluoroelastómero termoestable
Overview of materials for Thermoset Polyurethane, Adhesive	0.78	0.000035	Adhesivo poliuretano termoestable

Se seleccionan los materiales que tienen el módulo de young superior, el poliuretano termoplástico (TPU), elastómero termoplástico (TPE) y elastómero éster poliéter, estos ofrecen el mejor comportamiento entre flexibilidad mecánica y resistencia ambiental, con módulos de elasticidad en el rango de 0.005 a 0.05 GPa, lo que permite absorber deformaciones, vibraciones y desalineaciones sin comprometer la integridad estructural ni la alineación del sistema de detección. Esta característica es especialmente relevante para el telescopio de muones, donde la estabilidad geométrica y la protección de los sensores son factores críticos para la precisión de las mediciones.

Posteriormente se realiza la matriz para la toma de decisión del material, teniendo en cuenta resistencia a la intemperie, costo, módulo de Young y densidad.

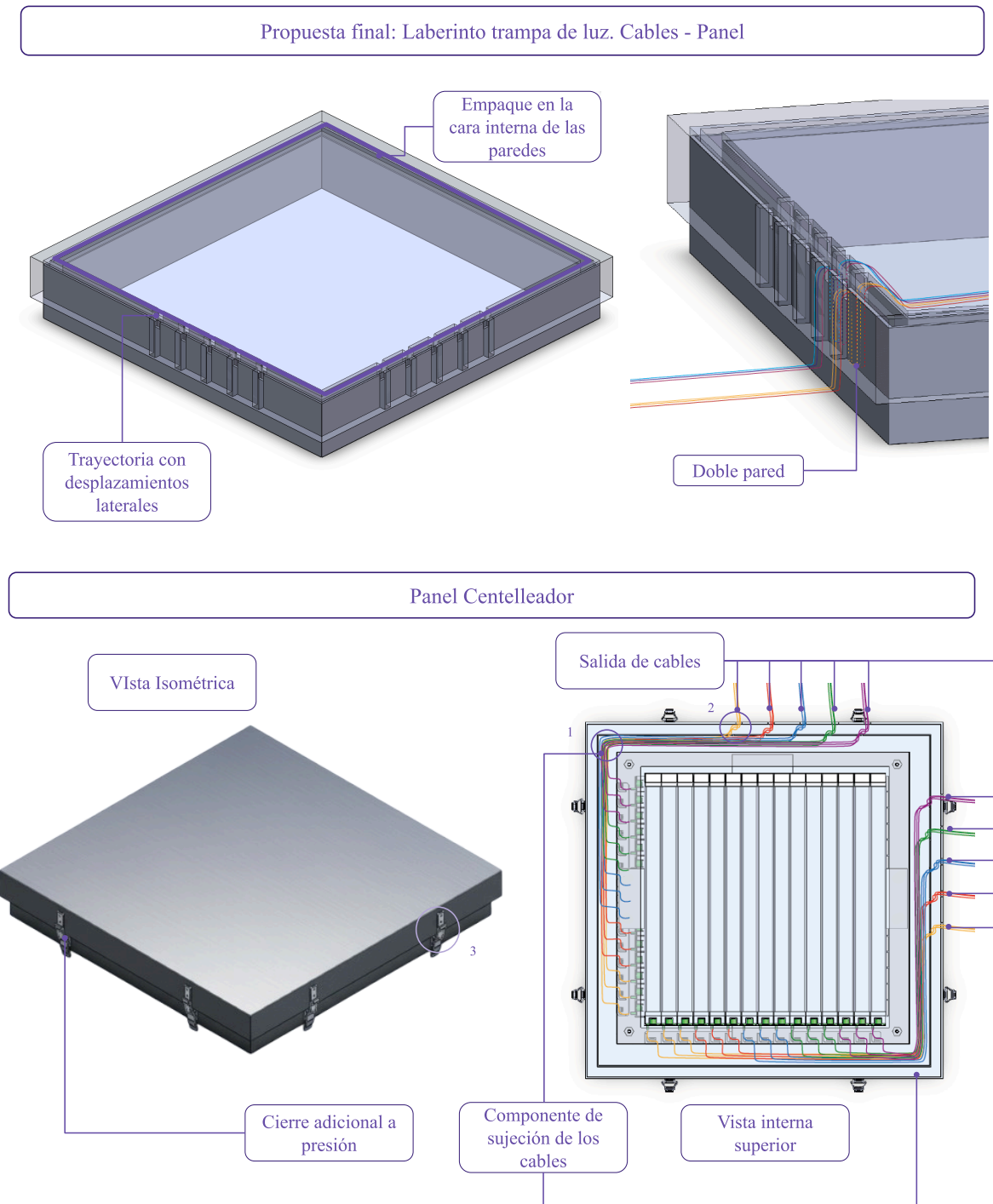
Tabla 25. *Matriz de materiales de la base de datos*

Material	Resistencia a la intemperie (40%)	Costo (30%)	Módulo de Young (GPa) (20%)	Densidad (g/cm ³) (10%)	Puntaje
Poliuretano termoestable	Media	\$125.000	0.4	0.44	4.3
Elastómero éster poliéter (TPE - E)	Media	\$160.000	1.05	0.045	3.9
Elastómero termoplástico (TPE)	Media	\$115.000	0.95	0.05	4.4

En conclusión se decide optar por el material TPE, al permitir la fabricación por impresión 3D y tener mejor resistencia a la intemperie.

En este sentido, se muestra en la Figura 38, la propuesta final del componente panel centelleador.

Figura 38. Visualización de propuesta del sistema panel centellador



Nota: Render de la propuesta del componente principal panel centelleador especificado en la figura 13, se muestra el exterior e interior del mismo, junto con la aplicación del laberinto antes diseñado como la trampa de luz individual.

Esta figura 38 en la parte inferior tiene en la derecha, la propuesta final del panel centelleador que integra componentes destinados a la organización del cableado. Para este fin, los cables se agrupan en conjuntos de tres unidades, sujetos de manera secuencial mediante elementos de fijación como abrazaderas plásticas o velcro así como en las esquinas (1), donde converge la totalidad del cableado. La salida de los cables a través del laberinto se realiza también en conjuntos de tres (2), decisión que reduce las dimensiones del laberinto y mantiene la pared interna lo más próxima posible. Esta configuración fue adoptada considerando criterios de optimización del espacio, reducción de costos de construcción y eficiencia en el uso de empaques dentro de las paredes del panel. Finalmente, se incorporan cierres de palanca (3) con el objetivo de generar la presión necesaria entre la tapa y la base del panel, asegurando un cierre firme y que sea impermeable a la luz. Hasta este punto, al ser todos los componentes de un mismo subsistema se realiza el diagrama de uso de todo lo anterior, este se puede ver a detalle en el apéndice E.

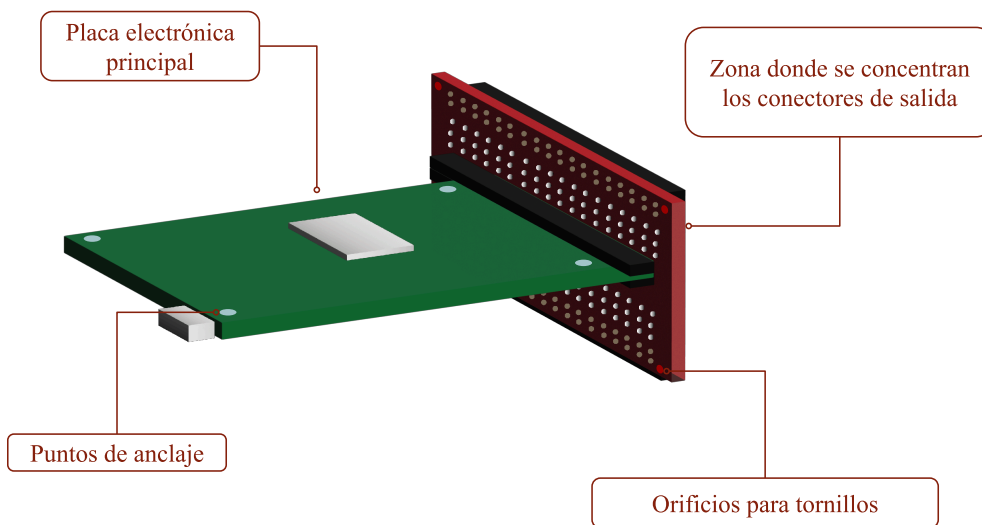
Con este sistema del telescopio (panel de detección) validado en aspectos técnicos, se procede al siguiente sistema, es decir, la caja en la que se encuentra la electrónica.

6.2.4 Componente 5, Soporte para la electrónica

El soporte de la electrónica FERS constituye un elemento estructural secundario del sistema, cuya función principal es alojar, fijar y dar estabilidad la placa electrónica principal, garantizando su correcta integración dentro de la caja de electrónica del telescopio de muones por centelleadores.

Este componente permite mantener la placa FERS en una posición estable y alineada, asegurando la altura a la que deben quedar los elementos de la electrónica para su funcionamiento y evitar ser desconectada, así como las distancias necesarias respecto a otros elementos internos, tales como el sistema de cableado y la zona de conectores de salida. De esta manera, se facilita tanto la conectividad eléctrica como el acceso para tareas de montaje y mantenimiento. Los elementos que se deben tener en cuenta para el diseño de este componente se muestran en la figura 39.

Figura 39. Visualización de elementos que une el componente 5.



Nota: Representación gráfica del subsistema con el que interactúa el diseño del soporte para la electrónica.

Antes de definir la solución de diseño del sistema de cableado asociado a la electrónica FERS, se establecen los requerimientos que debe cumplir el componente. Estos requerimientos constituyen la base para el desarrollo del diseño, ya que permiten garantizar su correcta integración dentro de la caja de electrónica del telescopio de muones por centelleadores, así

como su adecuado desempeño durante la operación del sistema. En la Tabla 26 se presentan los requerimientos considerados para el diseño del componente.

Tabla 26. *Requerimientos específicos del soporte para la electrónica*

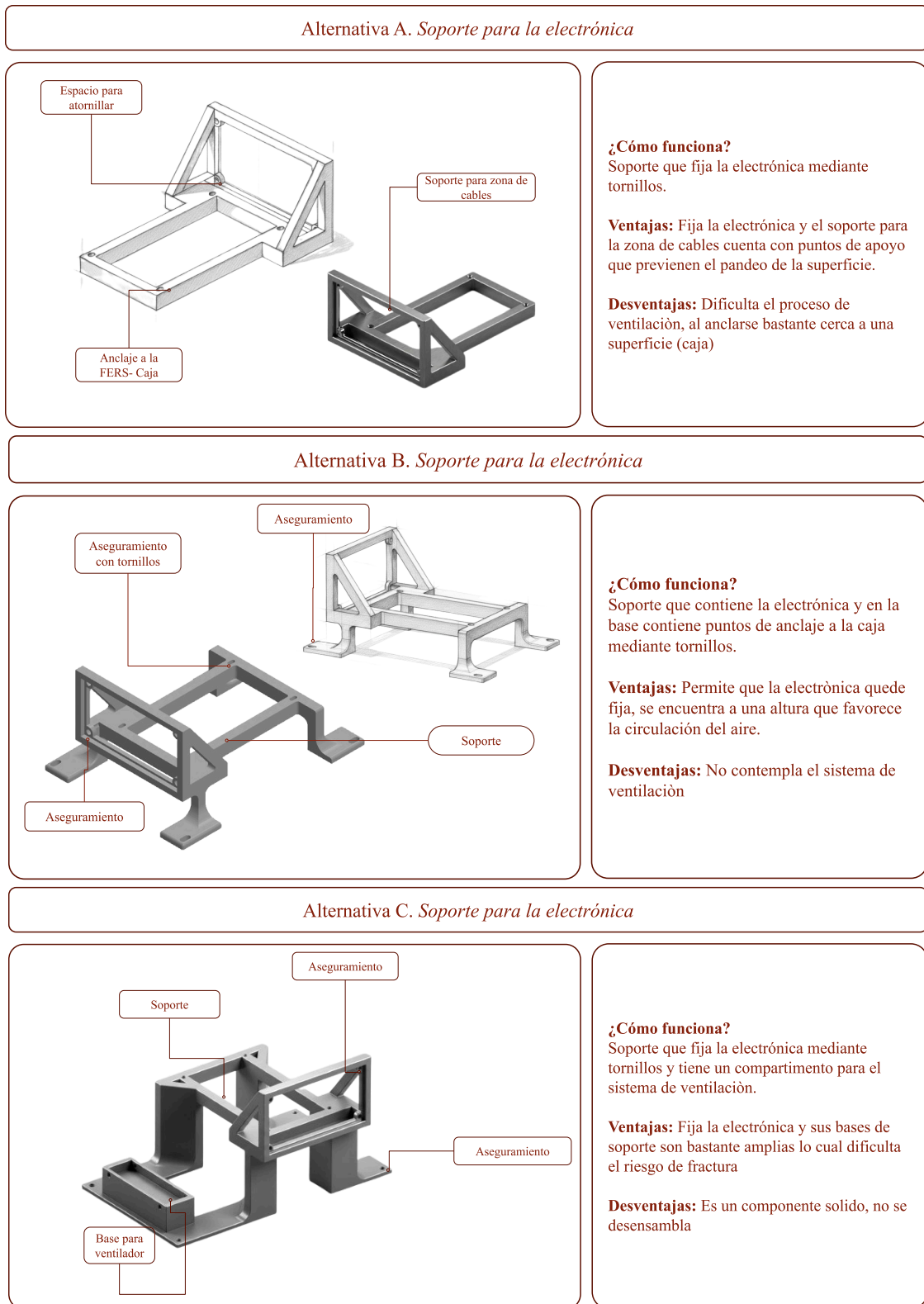
Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Soporte para FERS (Concepto referenciado en marco teórico)	Fijación	El soporte debe mantener la FERS fija, evitando desplazamientos o vibraciones durante la operación.	Espesor mínimo de paredes estructurales: ≥ 10 mm. Desplazamiento máximo permitido de la FERS: $\leq 0,25$ mm	RF
Soporte para FERS	Soporte de cableado	El soporte debe evitar el pandeo de la FERS en la zona con mayor concentración de cables.	Número mínimo de puntos de apoyo en la zona crítica: ≥ 2	FT
Soporte para FERS	Fijación a la caja	El soporte debe permitir el anclaje directo a la caja del sistema.	Tipo de anclaje: atornillado	RF
Soporte para FERS	Alineación	El soporte debe garantizar el paralelismo correcto de la FERS.	Número mínimo de superficies de referencia: ≥ 2 planos	FT

RF: Requerimiento Funcional

FT: Factor Técnico

6.2.4.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3d del soporte para la electrónica. A partir de estos requerimientos se generan alternativas, teniendo en cuenta que es un componente bastante técnico debido a la sensibilidad de la electrónica FERS, a la precisión requerida en su posicionamiento y a la necesidad de garantizar una correcta integración mecánica y de cableado. Las alternativas desarrolladas tuvieron variaciones en cuanto al tipo de soporte brindado, como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 40. *Alternativas Soporte para la electrónica*



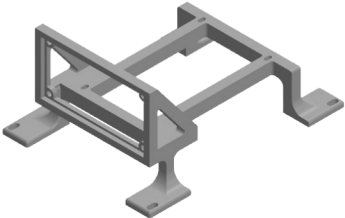
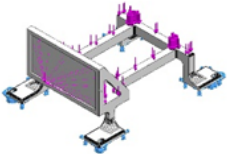
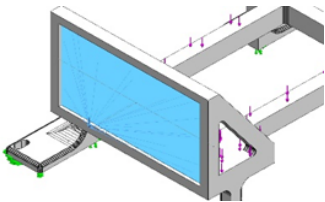
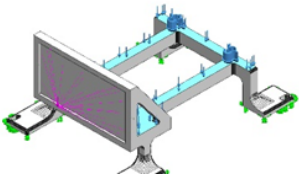
Nota: Se muestra cada alternativa en boceto y en modelado 3D, la explicación del funcionamiento, ventajas y desventajas.

Con las alternativas desarrolladas, teniendo en cuenta que su función principal es soportar la FERS, se realiza un análisis preliminar en el software solidworks 2024, para conocer el posible comportamiento estructural en condiciones de operación frente a 0.5kg gramos (FERS) y las cargas aplicadas 1.2kg (peso del cableado), y a partir de esto, tomar decisiones previo a su fabricación mediante impresión 3D.

6.2.4.2 Análisis y selección de materiales preliminares del soporte para la electrónica. Considerando que las características necesarias para el material son equivalentes a las del material utilizado en el acople, se establece la utilización del mismo material para ambos componentes, ASA para el material de construcción y PETG para prototipos.

6.2.4.3 Análisis preliminar de la estructura del soporte para la electrónica. En la siguiente figura se encuentran las propiedades del material, junto con la estructura simulada, las sujeciones que se plantearon en el software, como representación de las que tendría en el entorno real y los tipos de carga que soporta con sus valores aproximados.

Figura 41. Descripción de lineamientos para la simulación

Propiedades del material		Modelo
<p>Nombre: PETG Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Límite elástico: 2×10^7 N/m² Límite de tracción: $4,5 \times 10^7$ N/m² Módulo elástico (Young): $2,1 \times 10^9$ N/m² Coeficiente de Poisson: 0,38 Densidad: 1.270 kg/m³ Módulo cortante: $7,6 \times 10^8$ N/m²</p>		
Sujeción	Vista	Detalles
Fijo		<p>Entidades: 4 cara(s) Tipo: Geometría fija Fuerza de reacción(N): 2.06</p>
Carga	Vista	Detalles
Carga remota (conexión distribuida)		<p>Entidades: 1 cara(s) Tipo de conexión: Distribuida Factor de peso: Predeterminado (constante) Sistema de coordenadas: Coordenadas cartesianas globales Componentes traslacionales: 0,59 N</p>
Fuerza		<p>Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 1,47 N</p>

Nota: Obtenido del informe realizado mediante el software Solidworks

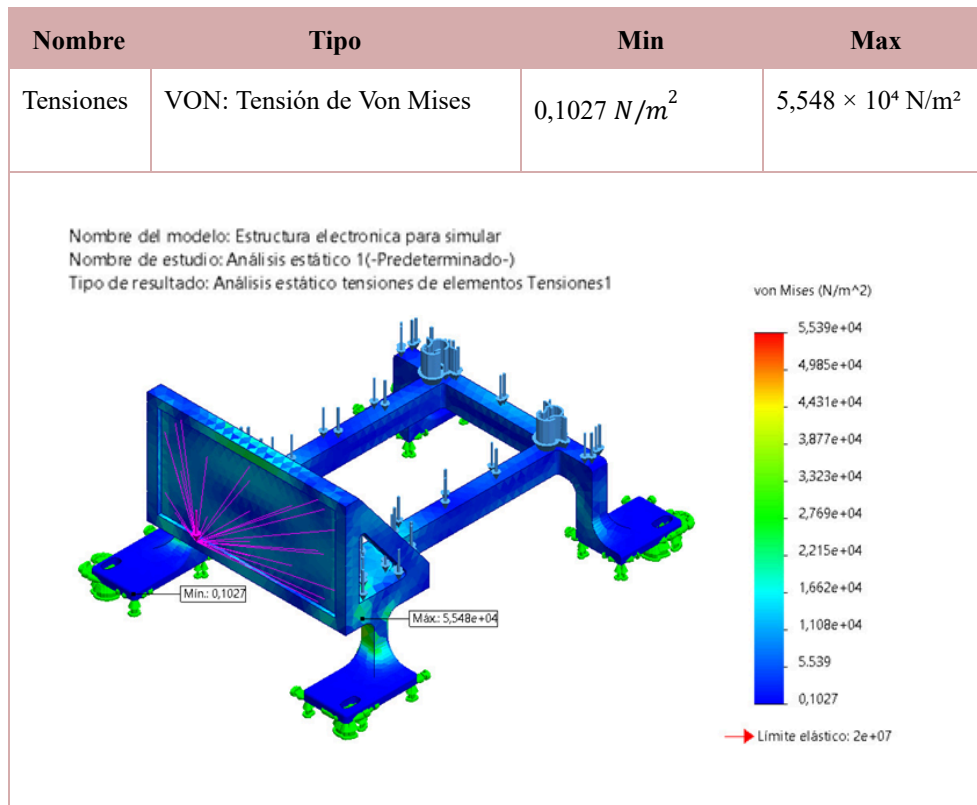
En lo que corresponde a las cargas, se define una carga distribuida que se posiciona en la zona en la que se conectan los cables con un valor de 0,59 N. Este se obtuvo considerando que a la placa se conectan alrededor de 30 cables con un peso aproximado a 2g por cable, considerando la fuerza de gravedad, da como resultado la carga total aplicada. Por otro lado, se aplica una fuerza vertical en la superficie horizontal del soporte que corresponde al peso de la FERS calculada a partir de su masa y la gravedad correspondiente, con un valor total de 1.47 N.

La definición de las cargas aplicadas al soporte de la electrónica FERS se realiza con el objetivo de representar de manera simplificada las condiciones mecánicas reales a las que estará sometido el componente durante la operación del telescopio de muones. Tanto la carga distribuida asociada al sistema de cableado como la fuerza vertical correspondiente al peso de la electrónica permiten evaluar la respuesta estructural del soporte frente a sollicitaciones que pueden influir en su estabilidad y rigidez. De este modo, el análisis posterior de tensiones y deformaciones proporciona información relevante sobre el comportamiento mecánico del componente y su impacto en la correcta fijación de la electrónica, aspecto directamente relacionado con la confiabilidad del sistema de adquisición y la precisión de las mediciones

6.2.4.4 Verificaciones del soporte para la electrónica. Teniendo estos datos se procede a realizar la simulación de las tensiones presentes en la estructura de soporte, la cual permite identificar la distribución de tensiones generadas en la estructura del soporte como consecuencia de las cargas aplicadas. Este análisis es necesario para evaluar si los niveles de tensión se mantienen por debajo del límite elástico del material y para detectar posibles concentraciones de esfuerzo asociadas a la geometría del componente. La localización de estas zonas críticas permite

proponer modificaciones en el diseño orientadas a mejorar la distribución de cargas y reducir el riesgo de falla estructural.

Figura 42. Simulación de concentración de esfuerzos



Nota: Simulación realizada en el Software solidworks.

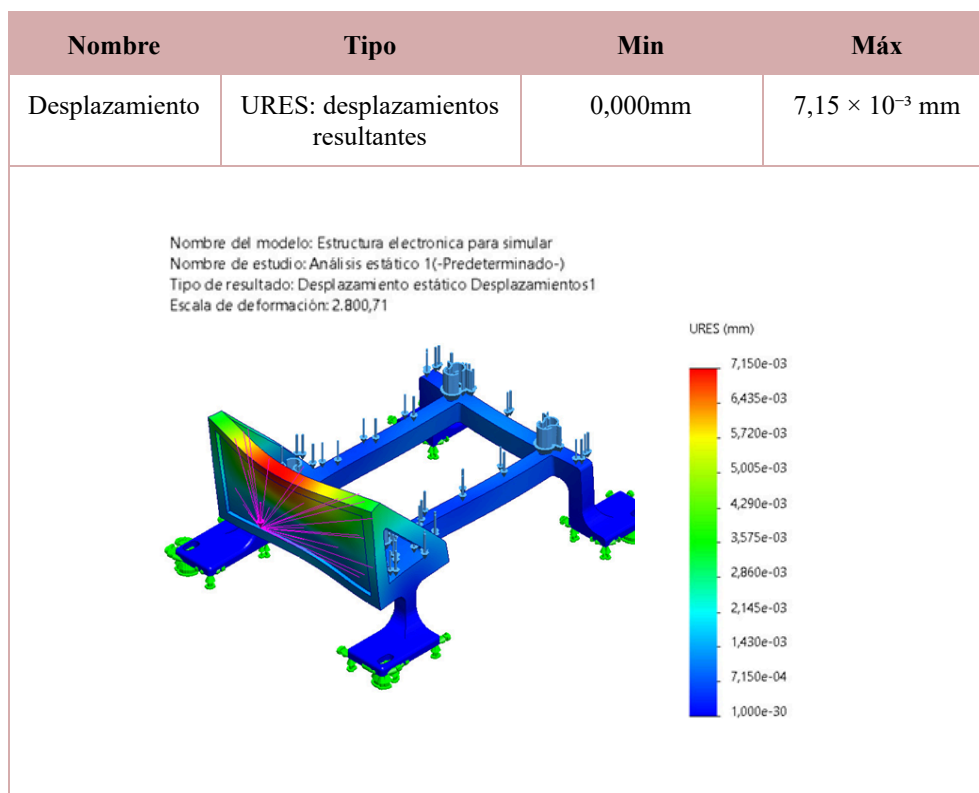
Se obtuvo como resultado un valor máximo de $5.5480 N/m^2$, teniendo en cuenta que el límite elástico del material es $20.000.000 N/m^2$ el valor de la máxima tensión se encuentra bastante alejado de lo que sería el límite de falla del material, sin embargo en la zona donde se presenta este valor, se realizan posteriores modificaciones en la configuración de la forma de la base del soporte, para disminuir la concentración de esfuerzos en el área, esto mediante el incremento de material en esa zona, la cual se encuentra señalada en la gráfica como valor de

tensión máximo. La concentración de esfuerzos se puede visualizar en la simulación detallada en la figura 31.

Posteriormente se realiza el análisis de desplazamientos, que tiene como objetivo evaluar la magnitud y la distribución de los movimientos del soporte bajo las condiciones de carga consideradas. Este resultado es relevante para verificar que las deformaciones globales del componente no comprometan la estabilidad ni la correcta posición de la electrónica FERS.

Desplazamientos excesivos podrían generar desalineaciones, tensiones adicionales en los conectores o afectar el funcionamiento del sistema de adquisición de datos, como se puede ver en la siguiente figura, la simulación arrojó un valor de desplazamiento máximo de 0.007150 mm, lo que lo convierte en un valor relativamente bajo para realizar consideraciones adicionales en esa área, indicando una deformación mínima de la estructura en condiciones de operación.

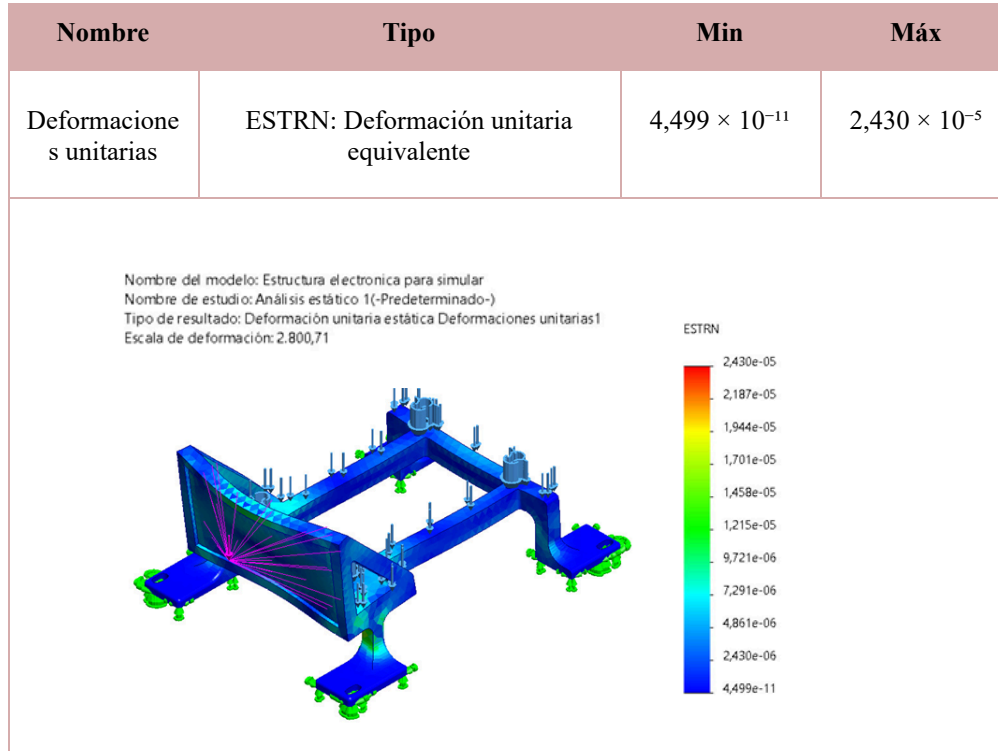
Figura 43. Simulación de desplazamiento



Nota: Simulación realizada en Software solidworks.

De manera complementaria, la deformación unitaria máxima obtenida equivale a 0.0000243 mm lo que resulta considerablemente bajo como deformación unitaria, y que confirma el adecuado comportamiento estructural del soporte.

Por último también se efectúa la simulación de deformaciones unitarias, la cual permite analizar el comportamiento elástico local del material, identificando regiones donde se concentran las mayores deformaciones. Este análisis complementa el estudio de esfuerzos, ya que permite evaluar cómo responde el material ante las cargas aplicadas y confirmar que las deformaciones se mantienen dentro del régimen elástico. La identificación de zonas con deformaciones elevadas resulta útil para optimizar la geometría del componente y mejorar su desempeño estructural.

Figura 44. Simulación de deformaciones unitarias

Nota: Simulación realizada en Software solidworks.

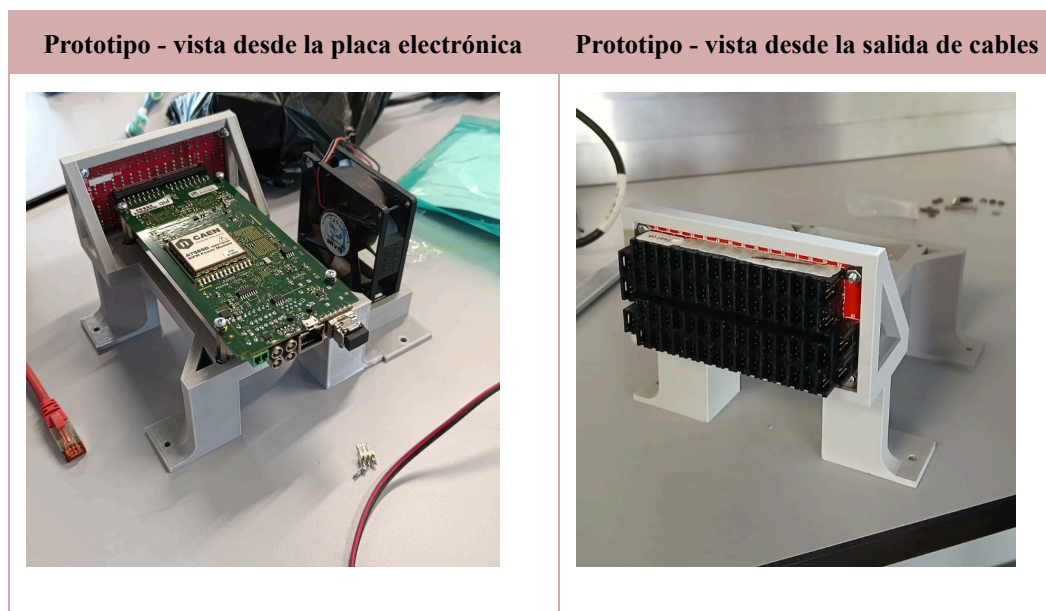
Teniendo como base estos resultados de simulación obtenidos, se procede a construir la alternativa C visualizada en la Figura 40, ya que desde el punto de vista estructural, comprende una mayor cantidad de material en la zona en la que se identificó una mayor concentración de esfuerzos que se identificaron en esta alternativa. En este sentido, la alternativa C, surge como iteración de esta alternativa simulada y se realiza orientada a mejorar su desempeño estructural. Por otro lado, la alternativa A mostrada en la Figura 40, queda descartada al no considerar el sistema de ventilación para la electrónica, lo cual representa un inconveniente para el adecuado funcionamiento de la FERS.

En adición a lo anterior, se propone separar el soporte de ventilación del soporte de la FERS, para facilitar el transporte al disminuir el volumen total por la separación de ambos componentes y disminuir el riesgo de rotura, al dejar de comportarse como estructura monolítica.

6.2.4.5 Construcción de prototipos del componente de soporte para la electrónica.

La construcción del prototipo del soporte de la electrónica FERS se realizó con el objetivo de validar la viabilidad geométrica y funcional del diseño propuesto, así como evaluar su compatibilidad con el proceso de fabricación seleccionado. Para la fabricación del prototipo se empleó tecnología de impresión 3D, debido a su flexibilidad para la producción de geometrías complejas, bajo costo y rapidez en la obtención de piezas, lo cual resulta adecuado para la etapa de desarrollo y validación del diseño. El prototipo de la alternativa C, mostrada en la Figura 40, se puede observar en la figura 45.

Figura 45. *Prototipo del soporte para la electrónica*



Nota: Fotografías tomadas en el laboratorio LIDeRA en el edificio EDIC de la Universidad Industrial de Santander.

A partir del prototipo construido se validaron las dimensiones propuestas para la placa electrónica y la FERS. El prototipo permitió comprobar el correcto ajuste dimensional entre ambos componentes, evidenciado en la adecuada alineación de los tornillos de fijación, el contacto preciso entre las piezas y la estabilidad del conjunto.

Asimismo, se verificó que la altura definida para la placa electrónica evita el pandeo durante su uso. Se realizaron pruebas de manipulación y movimiento del prototipo, en formato de video, esto se puede observar en el apéndice F, las cuales confirmaron que los componentes permanecen firmemente sujetos debido a la forma en la que se ensamblan los elementos en el componente, los movimientos controlados realizados por el profesional de electrónica hacia arriba - abajo y de izquierda - derecha, así como voltear el soporte y que aun así se mantenga fija la FERS.

La estabilidad dimensional de este componente impacta directamente el desempeño global del telescopio de muones, ya que reduce vibraciones y variaciones en la posición o desconexión de la electrónica, contribuyendo a la precisión de las señales adquiridas y a la calidad de los datos para la generación del muograma. Con el componente en funcionamiento, se procede a diseñar el siguiente que pertenece al sistema de la caja en la que se encuentra la electrónica.

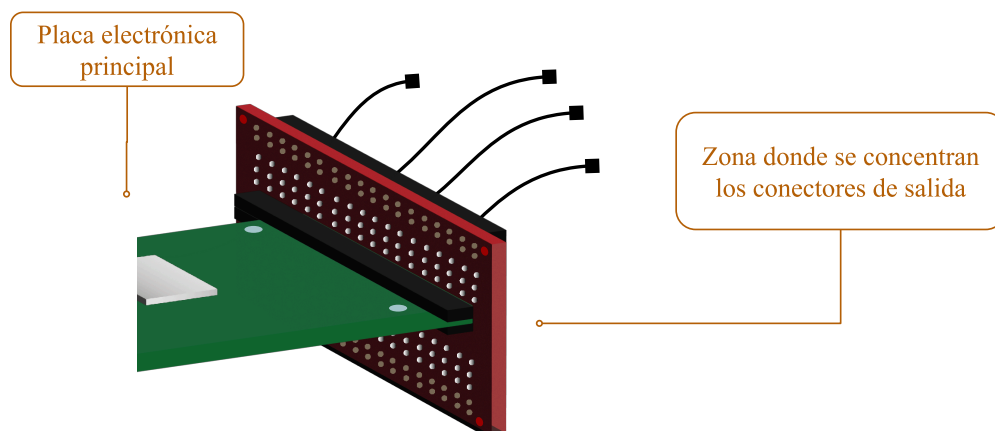
6.2.5 Componente 6. Sistema de cableado (separador para cables)

El sistema de cableado (separador) es un componente diseñado para organizar, guiar y mantener ordenados los cables de conexión entre los detectores por centelleadores y la electrónica de adquisición FERS. Su función principal es asegurar una disposición controlada de

los conductores, evitando cruces, tensiones mecánicas y posibles interferencias durante la operación del telescopio de muones.

Este componente se ubica entre la placa electrónica principal y la zona donde se concentran los conectores de salida, actuando como un elemento intermedio que define la trayectoria de los cables y mantiene una separación adecuada entre ellos. De este modo, se mejora la accesibilidad a los conectores y se reduce el riesgo de desconexiones accidentales o daños en los conductores. Este esquema se puede observar en la Figura 46.

Figura 46. Visualización de elementos con los que se relaciona el componente 6.



Nota: Representación visual del subsistema con el que interactúa el componente de separador de cables.

Debido a la cantidad de conductores involucrados y a la sensibilidad de la electrónica, resulta necesario definir requerimientos específicos que garanticen un ordenamiento adecuado del cableado, reduzcan esfuerzos mecánicos sobre los conectores y faciliten las tareas de montaje

y mantenimiento. En este contexto, se establecen a continuación los requerimientos de diseño del separador de cables, los cuales se pueden observar en la Tabla 28.

Tabla 28. *Requerimientos específicos del componente separador para cables*

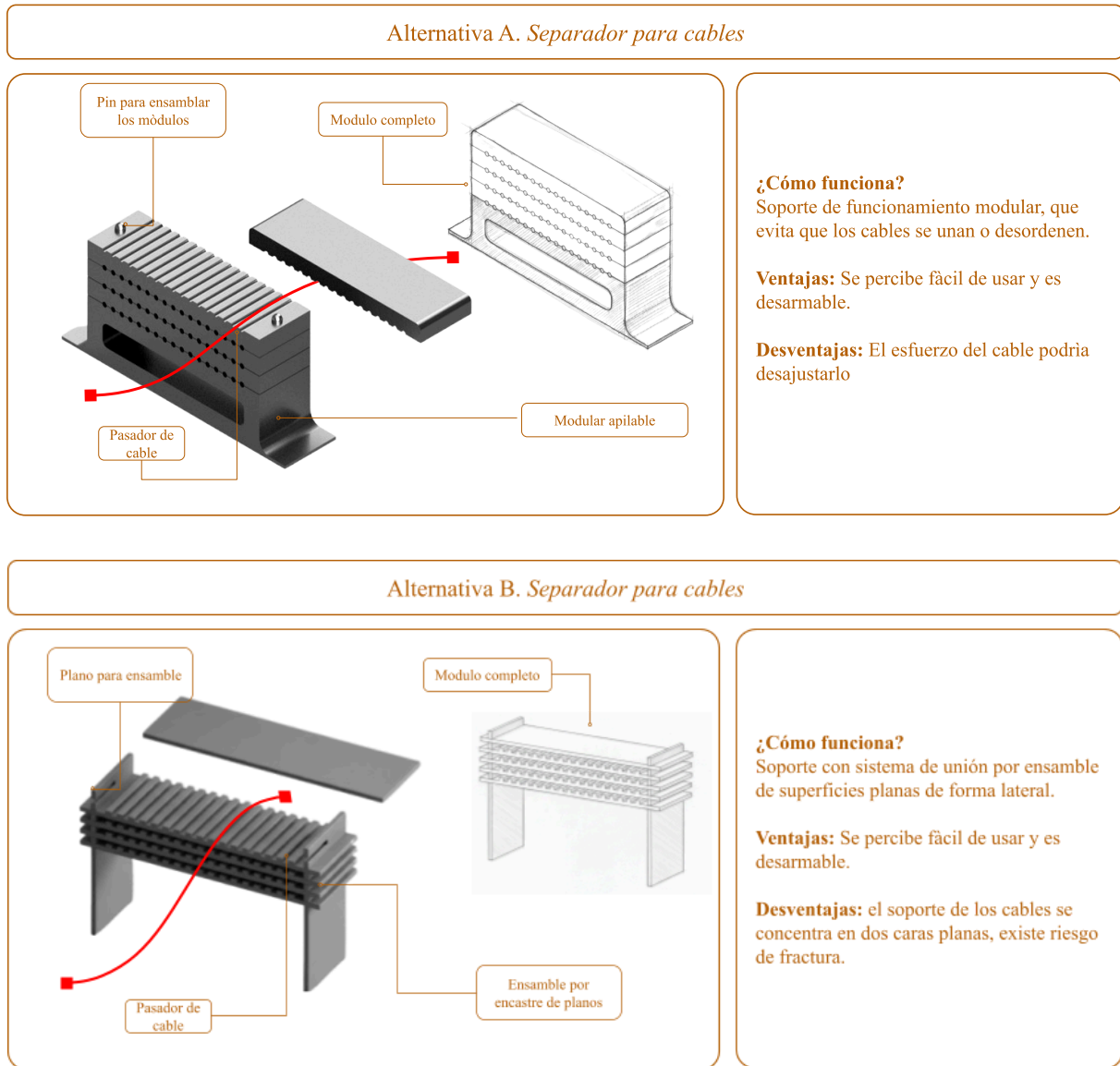
Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Separador de cables	Organización de cableado	El separador debe permitir identificar visualmente los cables, manteniéndolos ordenados y separados entre sí.	Distancia de separación ≥ 4 mm. 17 canales alineados en un mismo plano, por capa.	RF
Separador de cables	Facilidad de inserción y retiro	El separador debe permitir el ingreso y retiro de los cables de forma sencilla, sin requerir herramientas adicionales.	Diámetro de los canales: 4 mm Tolerancias: 0.3 mm por canal Tiempo de instalación de los cables > 2 min	RF
Separador de cables	Protección del cable	El separador debe evitar forzar o curvar el cable.	Canales alineados	RF
Separador de cables	Estabilidad	El separador debe mantener la posición de los cables durante la operación, evitando desplazamientos accidentales.	Sistema de fijación que limite el desplazamiento del cable a ≤ 0.3 mm del componente	FT
Separador de cables	Facilidad de Instalación	El separador debe ser sencillo de instalar, mediante una fijación estándar.	Tiempo de montaje del separador > 1 min	FU

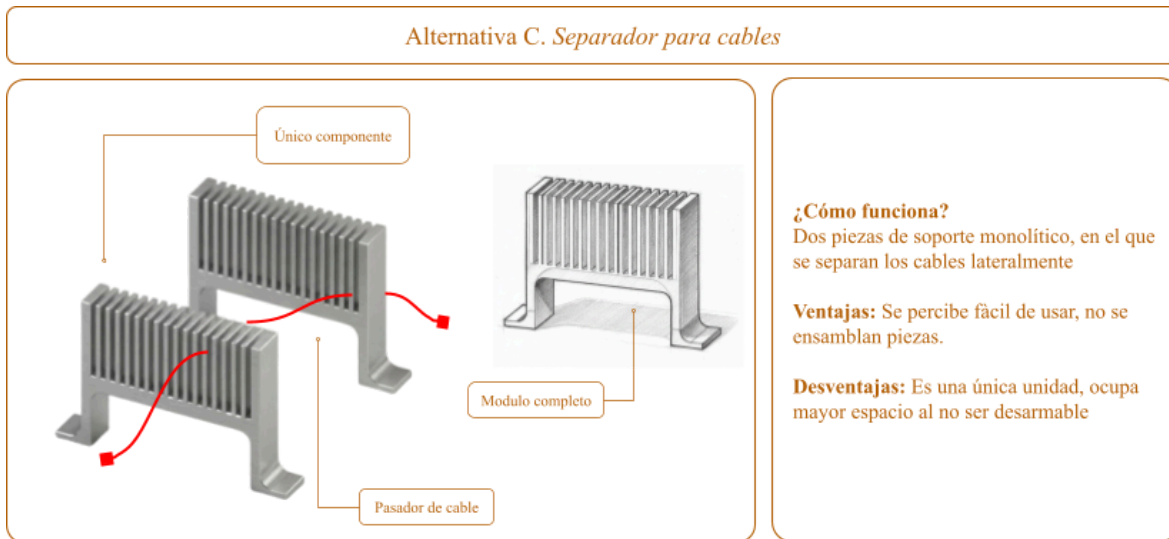
RF: Requerimiento funcional
RU: Requerimiento de uso
FT: Factor técnico

Teniendo como base los requerimientos evidenciados en la tabla 31, se procede a responder a estos mediante diferentes alternativas de diseño, la explicación de estas alternativas se encuentra descrita al lado derecho de la Figura 47. Allí se detallan con un gráfico que ilustra la solución, la explicación de su funcionamiento y las ventajas y desventajas que se consideran.

6.2.5.1 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3D del separador para cables.

Figura 47. Alternativas del separador para cables



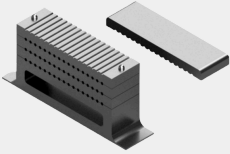
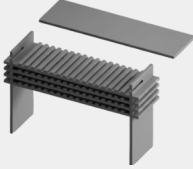
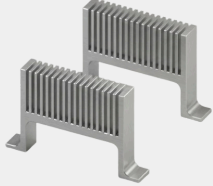


Nota: Se muestra cada alternativa en boceto y en modelado 3D, la explicación del funcionamiento, ventajas y desventajas.

Para la elección de la alternativa a prototipar, se realiza una encuesta de percepción de uso para los expertos, como se puede observar en el apéndice C y cuyos resultados, se pueden encontrar resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 29. Comparación de alternativas respecto a requerimientos.

Requerimiento	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
<input checked="" type="checkbox"/> cumple <input checked="" type="checkbox"/> No cumple <input type="checkbox"/> Cumple parcialmente			
Organización de cableado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Facilidad de inserción y retiro	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Protección del cable	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Estabilidad	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Requerimiento	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
<input checked="" type="checkbox"/> cumple <input checked="" type="checkbox"/> No cumple <input type="checkbox"/> Cumple parcialmente			
Facilidad de Instalación	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total	4 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>	3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>	4 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>

partir de la verificación realizada con los expertos mediante la encuesta de percepción de uso, se observa que las tres alternativas evaluadas cumplen de manera general con los requerimientos de organización del cableado y facilidad de inserción y retiro. Sin embargo, el análisis comparativo presentado en la Tabla 32 evidencia diferencias en el cumplimiento de otros criterios relevantes, tales como la estabilidad del componente y la facilidad de instalación. En este contexto, la alternativa C presenta el mejor balance global respecto a los requerimientos establecidos, destacándose especialmente en términos de estabilidad y facilidad de instalación. Si bien el criterio de protección del cable se cumple de manera parcial, este aspecto puede ser optimizado en etapas posteriores de diseño, razón por la cual la alternativa C se selecciona como la más adecuada para su prototipado.

6.2.5.2 Análisis y selección de materiales preliminares del soporte para el separador de cables. Considerando que las características necesarias para el material son equivalentes a las del material utilizado en el acople, se establece la utilización del mismo material para ambos componentes, ASA para el material de construcción y PETG para prototipos.

La Tabla 30 presenta el análisis de las propiedades del material requerido para el soporte de la electrónica FERS, considerando su función estructural y las condiciones de uso previstas.

Esta matriz permite identificar las características mecánicas y físicas necesarias para garantizar la estabilidad del componente, así como su viabilidad de fabricación mediante impresión 3D y su desempeño en condiciones de intemperie.

Tabla 30. *Análisis de propiedades del material*

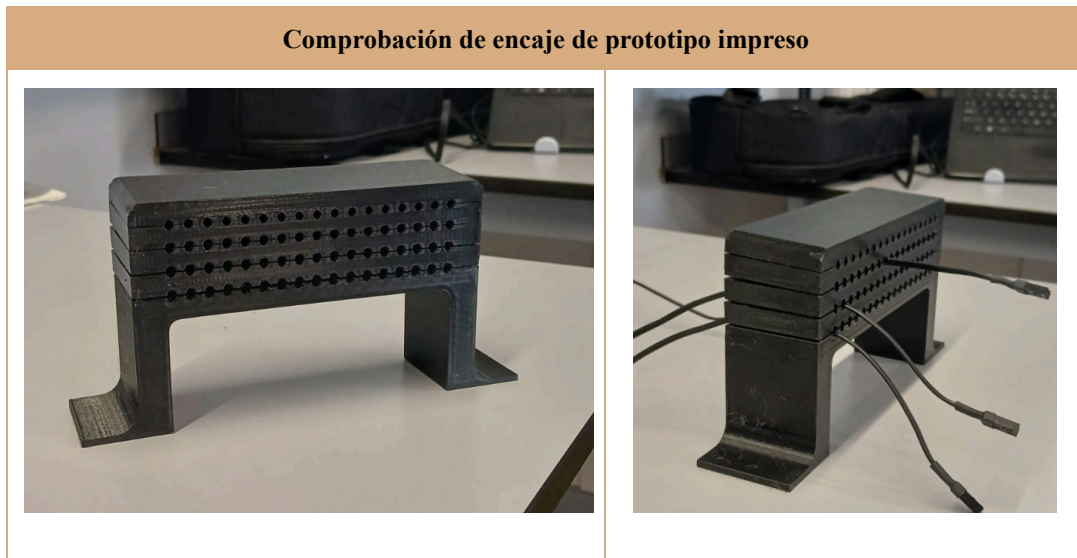
Componente	Función principal	Condiciones de uso
Separador de cables	Organizar los cables y mantener el separador fijo	Disponibilidad Uso en exterior (intemperie). Montaje y desmontaje ocasional. Fabricación por impresión 3D
Descripción del material necesario		
Material que proporcione rigidez para garantizar estabilidad, pero que permita deformaciones controladas durante el montaje para evitar fracturas.		
Propiedades		Índice de Ashby
<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de Young - Densidad - El costo del material 		$M = \frac{E}{P}$ <p>Costo</p>

6.2.5.3 Construcción de prototipos del componente separador para cables. La construcción del separador de cables se realizó con el objetivo de materializar la alternativa A mostrada en la figura 47 y evaluar su desempeño funcional en la organización del cableado asociado a la electrónica FERS. El componente fue fabricado mediante impresión 3D, lo que permitió reproducir con precisión la geometría definida en la etapa de diseño y facilitar la incorporación de ranuras destinadas al guiado individual de los cables.

En la Figura 48 se muestra el separador de cables construido, donde se puede observar la disposición de los canales que permiten mantener una separación uniforme entre los conductores, así como la geometría del componente diseñado. Esta configuración favorece un ordenamiento

claro del cableado, reduce la posibilidad de cruces o interferencias entre cables y facilita las tareas de inserción, retiro y mantenimiento del sistema.

Figura 48. *Construcción de prototipo de separador para cables*



Nota: Fotografías tomadas en el laboratorio LIDeRA en el edificio EDIC de la Universidad Industrial de Santander.

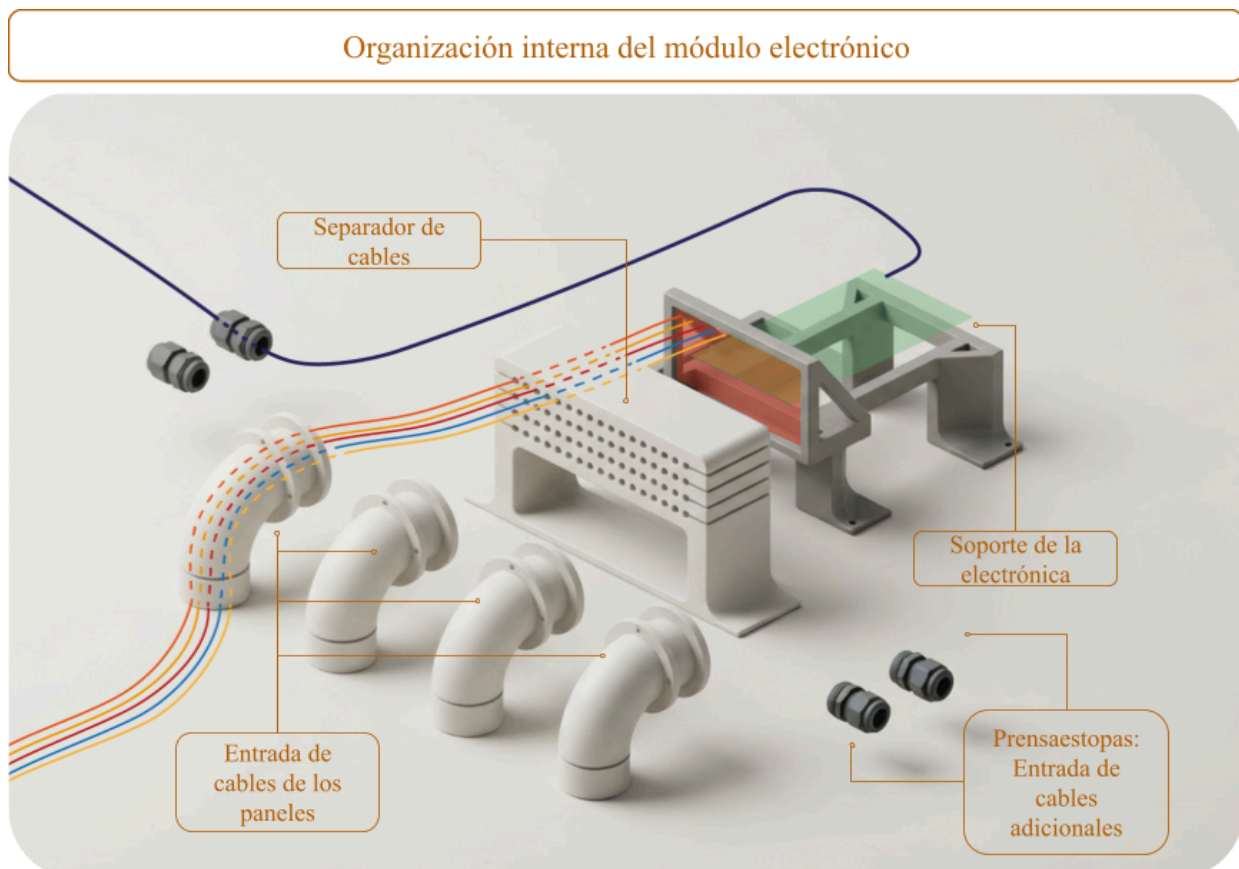
En el Apéndice F se presenta el proceso de ensamblaje de las piezas correspondientes al separador de cables, así como su integración con el soporte. La construcción del prototipo permitió validar el encaje dimensional entre las piezas impresas, evidenciando la estabilidad del conjunto durante la inserción y disposición de los cables.

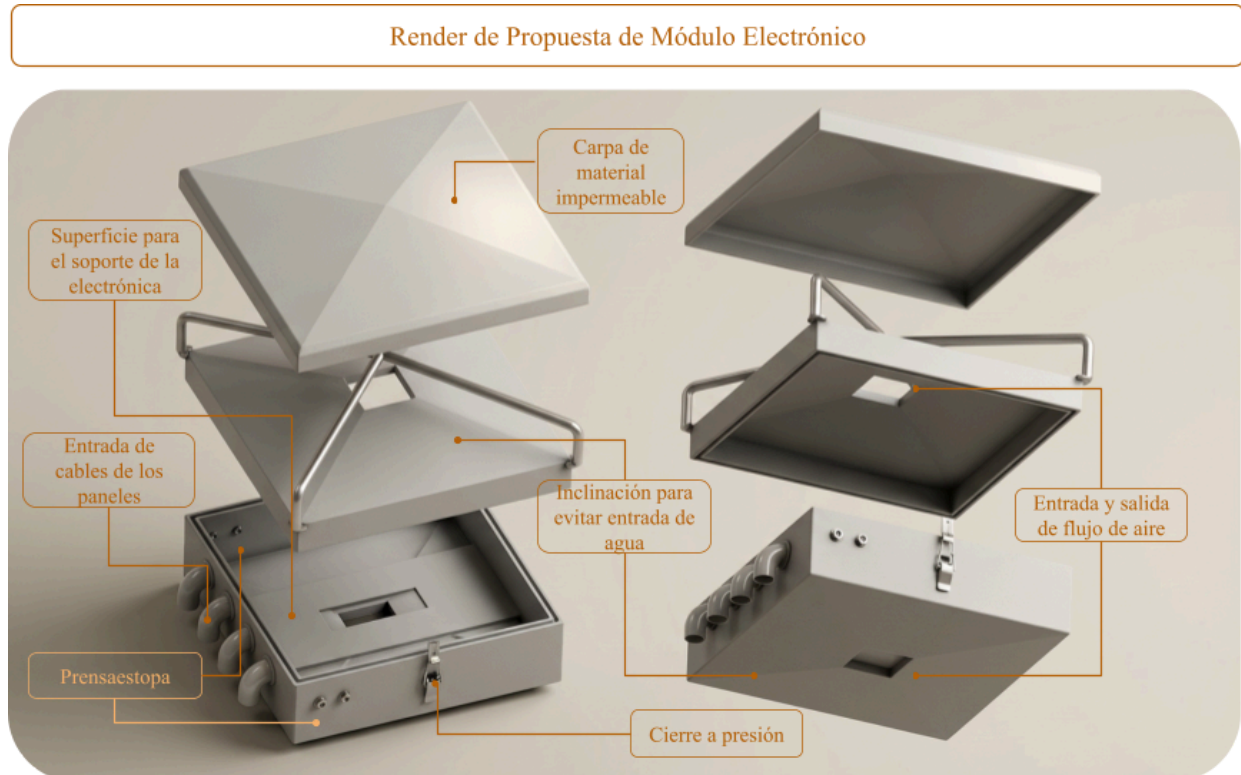
Asimismo, el prototipo permitió comprobar la optimización del espacio y la organización de los componentes, facilitando la identificación del recorrido de cada cable y su conexión con la electrónica FERS. Esta configuración contribuye a la verificación del funcionamiento integral del sistema, conformado por el Sipm, la fibra, la barra, cables y la electrónica.

El diseño del separador de cables impacta directamente el desempeño global del telescopio de muones, ya que reduce posibles interferencias mecánicas y eléctricas, minimiza el riesgo de desconexiones y contribuye a la estabilidad del sistema durante la operación y montaje de la estructura final, favoreciendo la precisión de los datos adquiridos para la generación del muograma.

A partir de las comprobaciones realizadas, se genera una propuesta de la organización de los componentes, tanto para separar los cables, el soporte de la electrónica y la ventilación del sistema. También se puede visualizar la trayectoria que realizan los cables, esto se puede ver en la Figura 49 en la parte superior.

Figura 49. *Distribución de componentes en el módulo electrónico*





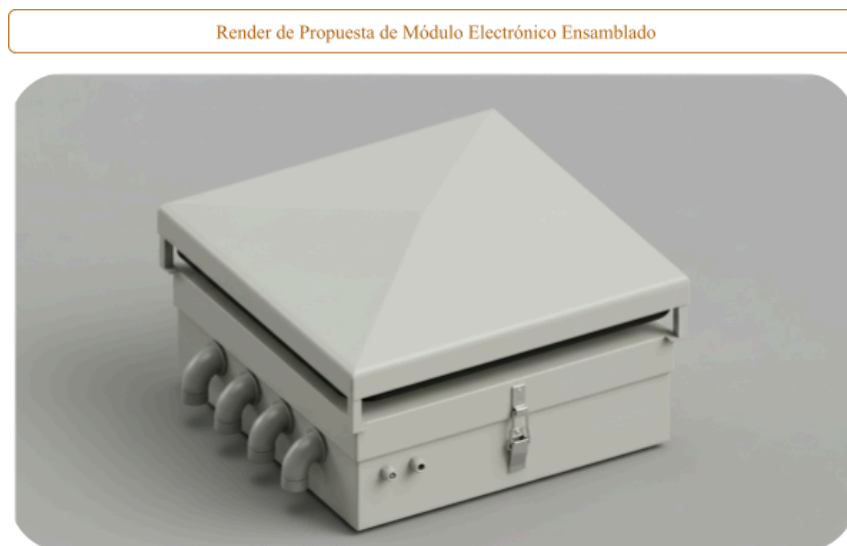
Nota: Render del componente principal del módulo electrónico, configuración interna y externa consecutivamente y los elementos adicionales necesarios para el funcionamiento que se deben tener en cuenta en el diseño.

En la Figura 49 inferior se presenta la propuesta del módulo de organización de la electrónica. En el diseño se contempla que la entrada de los cables esté curvada hacia abajo, con el fin de proteger el sistema frente a la lluvia. De manera similar, las aberturas de entrada y salida para la ventilación cuentan inclinaciones con el mismo propósito, evitando la infiltración directa de agua. Adicionalmente, se incluye como medida de protección un elemento tipo carpa, el cual estaría fabricado en material de lona, así como prensaestopas para los cables adicionales que deban conectarse. En el interior del módulo, la caja cuenta con una superficie plana destinada a la fijación de los componentes electrónicos para su estabilidad mecánica. Asimismo, se considera necesario que la propuesta incorpore algún tipo de recubrimiento o tratamiento antihumedad en

las paredes internas de la caja, con el objetivo de mejorar la protección frente a condiciones ambientales adversas. Finalmente, se emplean cierres de palanca a presión en cada uno de los laterales de la caja, asegurando un cierre firme entre la tapa y la base del módulo.

El conjunto de esta organización final se puede visualizar en la Figura 50, al ser otro subsistema del telescopio cuenta también con su respectivo diagrama de uso de tallado en el apéndice E.

Figura 50. *Propuesta de módulo electrónico*



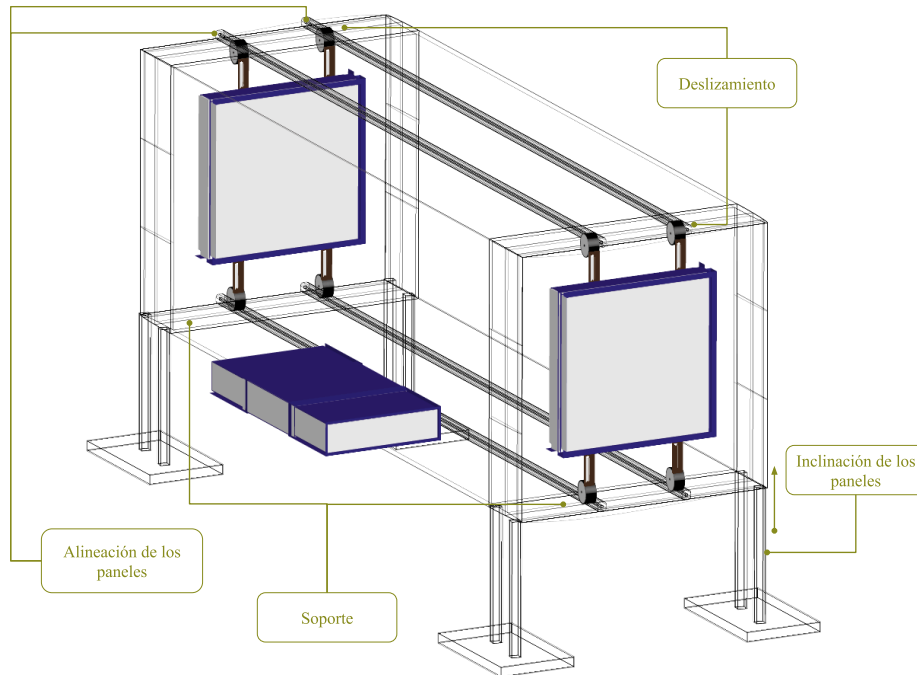
Nota: Render de la configuración externa del módulo electrónico completamente ensamblado.

6.2.6 Componente 7. Configuración de estructura

La estructura que sostiene los paneles detectores y la electrónica tiene como función principal garantizar la alineación y estabilidad del sistema, así como permitir la regulación del ángulo de orientación de los paneles. Esta capacidad de ajuste es lo que facilita el correcto funcionamiento del telescopio de muones, la adaptación del sistema a distintas configuraciones

de medición y la precisión de los datos a obtener. En la figura 51 se muestra el esquema general de lo que es necesario en la estructura de un telescopio de muones.

Figura 51. Esquema que relaciona los elementos del componente 7.



Nota: Representación gráfica de los elementos a tener en cuenta para el diseño de la configuración de la estructura que soporta los anteriores componentes principales, los paneles centelladores y el módulo electrónico.

6.2.6.1 Requerimientos específicos de la estructura general. A partir de la Tabla 1 se seleccionan los requerimientos que intervienen directamente con el diseño de la estructura, relacionados directamente con el transporte, el ajuste de inclinación, alineación, distancia entre los paneles, altura del soporte donde se encontrarán organizados los demás componentes del telescopio, y con la estandarización de los elementos. Siendo estos los conceptos necesarios para

el desarrollo posterior de la propuesta de la estructura general. Estos requerimientos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 31. *Requerimientos específicos del componente 7, estructura general*

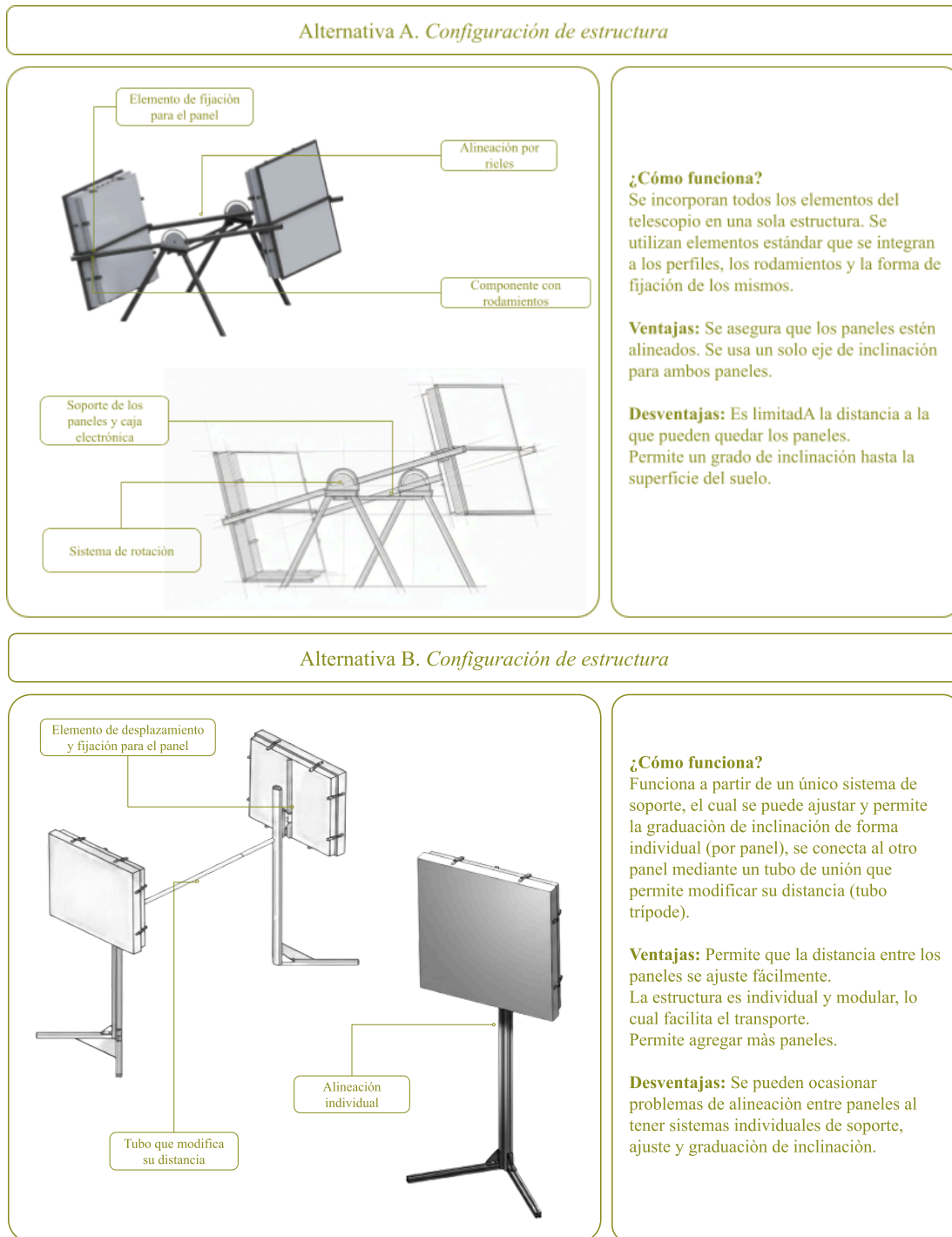
Componente	Atributo	Descripción	Determinantes	Tipo
Estructura general	Transporte	El sistema debe permitir el transporte manual del telescopio de forma segura y controlada.	Peso total ≤ 30 kg	RU
Sistema de inclinación	Ajuste de inclinación	El telescopio debe permitir el ajuste de inclinación del sistema para su correcta orientación.	Ángulo máximo de inclinación: 90°	RU
Paneles de barras / Estructura	Alineación	El diseño debe garantizar la correcta alineación entre los paneles de detección.	– Cumple – No cumple	RF
Sistema estructural	Modularidad	El telescopio debe estar compuesto por componentes modulares que faciliten el montaje, mantenimiento y reemplazo.	– Cumple – No cumple	FT
Sistema estructural	Distancia entre paneles	El sistema debe permitir variar la distancia entre paneles de detección.	Distancia mínima: 1 m Distancia máxima: 3 m	RF
Estructura de soporte	Altura del sistema	El telescopio no debe quedar apoyado directamente sobre el suelo	– Cumple – No cumple	RU
Sistema estructural	Normalización de tornillería	El diseño debe minimizar la variedad de tornillos utilizados, empleando medidas estándar.	Uso de tornillería estándar	FT
Sistema general	Reemplazabilidad	Las piezas del telescopio deben ser fácilmente reemplazables mediante componentes estándar.	– Cumple – No cumple	FT

Teniendo la definición de los requerimientos se procede, como parte del proceso de diseño del telescopio de muones, a plantear varias alternativas estructurales con diferentes enfoques de configuración y montaje.

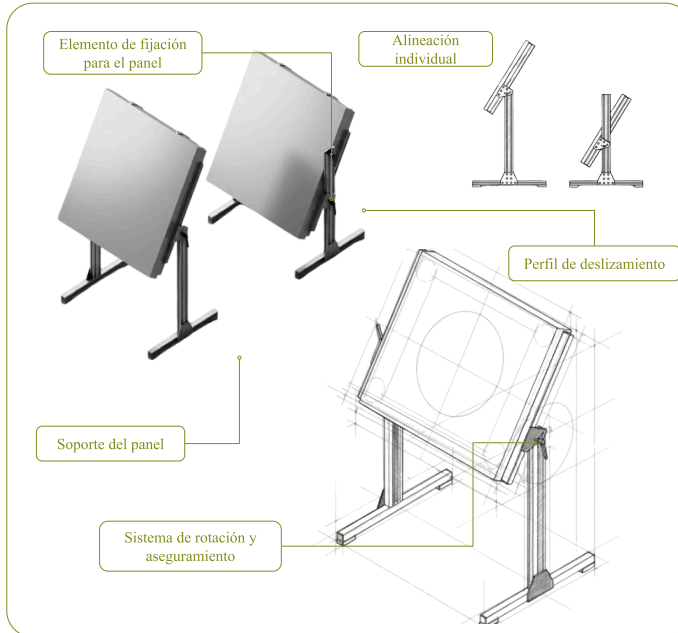
6.2.6.2 Generación de propuestas preliminares y desarrollo de modelos en 3D (Estructura). En la figura 52 se visualizan las alternativas finales donde se explica su

funcionamiento, ventajas y desventajas, junto con el modelado e ilustración a detalle para su posterior evaluación desde el enfoque del diseño por parte del equipo de investigación.

Figura 52. *Propuestas de alternativas de estructura*



Alternativa C. Configuración de estructura

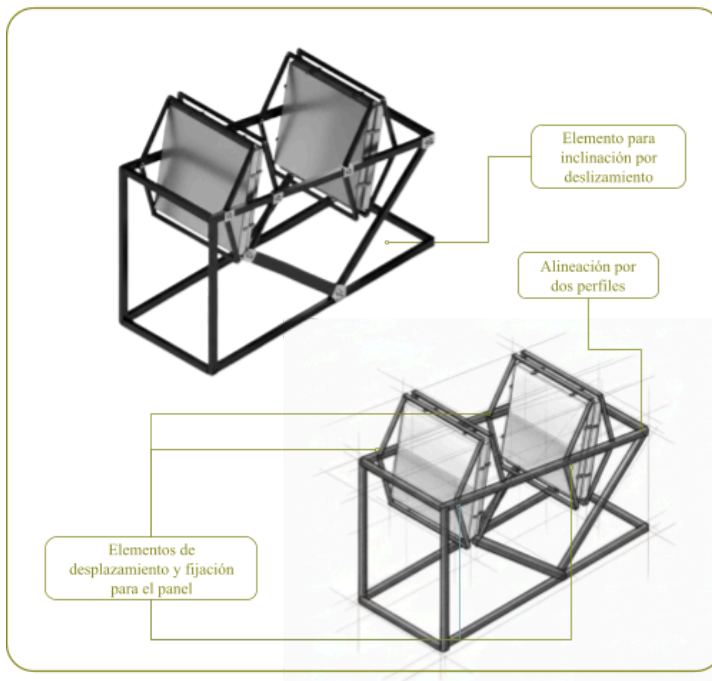


¿Cómo funciona?
 Funciona a partir de un sistema de soporte, ajuste y graduación de inclinación de forma individual (por panel).

Ventajas: Permite que la distancia entre los paneles se ajuste fácilmente. La estructura es individual y modular, lo cual facilita el transporte. Permite agregar más paneles.

Desventajas: Se pueden ocasionar problemas de alineación entre paneles al tener sistemas individuales de soporte, ajuste y graduación de inclinación.

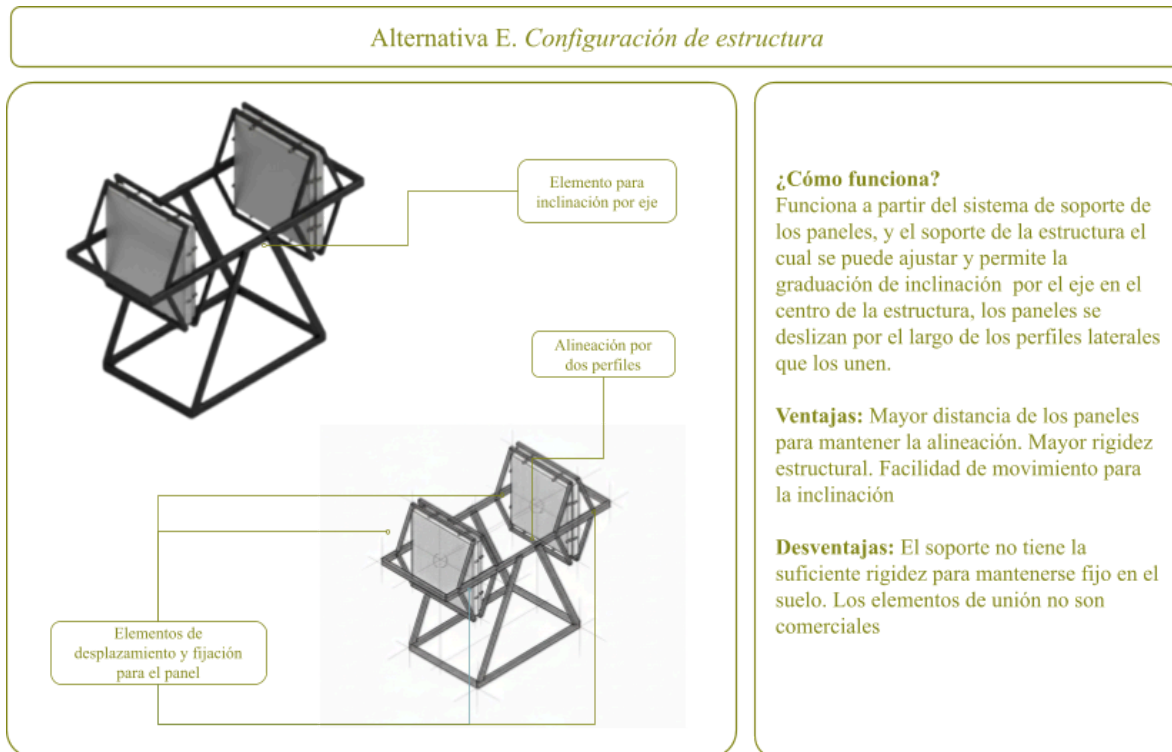
Alternativa D. Configuración de estructura



¿Cómo funciona?
 Funciona a partir del sistema de soporte, el cual se puede ajustar y permite la graduación de inclinación por un pivote en una esquina de la estructura, los paneles se deslizan por el largo de los perfiles laterales que los unen.

Ventajas: Mayor distancia de los paneles para mantener la alineación. Mayor rigidez estructural. Facilidad de movimiento para la inclinación

Desventajas: No genera mayor distancia de inclinación, o debería ser muy alta la estructura. Los elementos de unión no son comerciales



Nota: Se muestra cada alternativa en boceto y en modelado 3D, la explicación del funcionamiento, ventajas y desventajas.

6.2.6.3 Verificaciones de la estructura. Para evaluar las alternativas del diseño de la estructura se utilizó la metodología QFD (Quality Function Deployment), la cual relaciona los requerimientos del usuario dado por los integrantes del grupo GIRG, y ubicados en las filas del análisis QFD previamente presentados en la Tabla 35, con los requerimientos técnicos de diseño ubicados a partir de la tercera columna del mismo análisis. En reuniones previas se asignó el nivel de prioridad de cada requerimiento, ubicados en la segunda columna del gráfico. Posteriormente a esto, se relacionaron los parámetros técnicos ubicados a partir de la tercera fila en la primera columna, se pueden ver en el gráfico de forma vertical, definidos como las características físicas que podrían variar para cumplir cada requerimiento. Se utilizó una escala de valoración de 1 a 5.

Obteniendo la importancia de cada parámetro, la cual fue normalizada para determinar su peso dentro del diseño

A partir de estas valoraciones, se realizó la evaluación de las 5 alternativas de la estructura. Cada alternativa fue calificada según su desempeño respecto a los requerimientos y, posteriormente, ponderada con la importancia de los parámetros. El puntaje global obtenido permitió realizar una comparación objetiva entre las alternativas, lo cual se puede observar en la Figura 53.

Los resultados obtenidos indican que la alternativa 5 presenta el mayor puntaje total, lo que significa que cumple de mejor manera con los requerimientos establecidos. Por esta razón, dicha alternativa fue seleccionada como la opción más adecuada para el diseño de la estructura del telescopio.

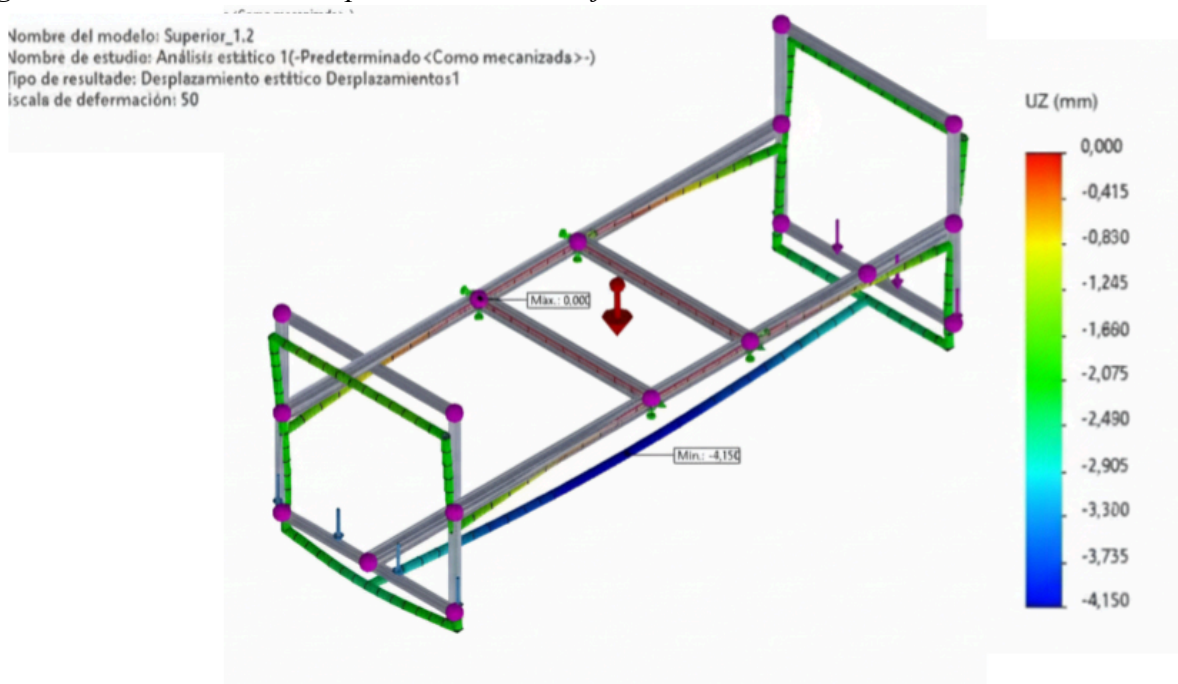
Figura 53. Matriz QFD requerimientos vs. alternativas

Requerimientos clientes - que's	Importancia que's	Requerimientos técnicos-como's								Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5	Escala	Concepto
		Material	Peso	Sistema de unión	Rigidez estructural	Sistema de ajuste angular	Sistema de separación	Altura de la base	Cantidad de tipos de tornillos							
Fácil transporte	4	5	5	5	5	3	5	5	4	4	5	5	3	3	1	Deficiente
Peso ≤ 30 kg	2	5	5	5	4	3	5	2	2	4	5	5	3	3	2	Regular
Inclinación máxima 90°	4	3	4	3	4	5	1	4	1	4	5	5	2	5	3	Satisfactorio
Alineación	5	4	2	5	5	3	5	1	4	4	2	1	4	5	4	Bueno
Modularidad	2	1	2	5	1	1	4	1	3	2	4	5	4	4	5	Sobresaliente
Distancia 1-3 m	3	1	3	4	1	2	5	1	3	4	4	5	4	5		
Altura	4	1	2	4	4	1	1	5	3	3	4	3	4	4		
Tornillería estándar	5	4	1	5	5	3	3	1	5	5	5	5	5	5		
Reemplazabilidad	5	4	1	4	1	4	2	1	5	4	4	4	4	4		
	Importancia cómo's	111	87	150	120	100	111	80	121	133	141	137	127	147		
	%Importancia	0.13	0.10	0.16	0.14	0.11	0.13	0.09	0.13	130.75	138.62	134.68	124.85	144.52	Total	

Nota: Herramienta utilizada en diseño para evaluar las alternativas diseñadas de acuerdo con las necesidades y prioridades del usuario.

6.2.6.4 Análisis preliminar estructural. Se realizó el análisis preliminar del modelado de la estructura simplificada para observar el comportamiento de la tensión, deformación y esfuerzo de los perfiles interactuando con el peso de los paneles y la gravedad. Cada punto especificado en el contexto de cómo estarían funcionando en realidad. Esto se puede ver a detalle en el apéndice G, donde se puede concluir que la estructura presenta un comportamiento mecánico que puede tener oportunidades mejoras desde el diseño frente a las cargas consideradas. Las tensiones máximas obtenidas se mantienen por debajo del límite elástico del aluminio 6061-T6, lo que evidencia que no se encuentra cercana a una condición de falla pero si a un desplazamiento que afectaría la alineación de los paneles. En consecuencia, los resultados de la simulación validan el diseño propuesto desde el punto de vista estructural para continuar con las siguientes etapas del desarrollo, tales como la optimización geométrica.

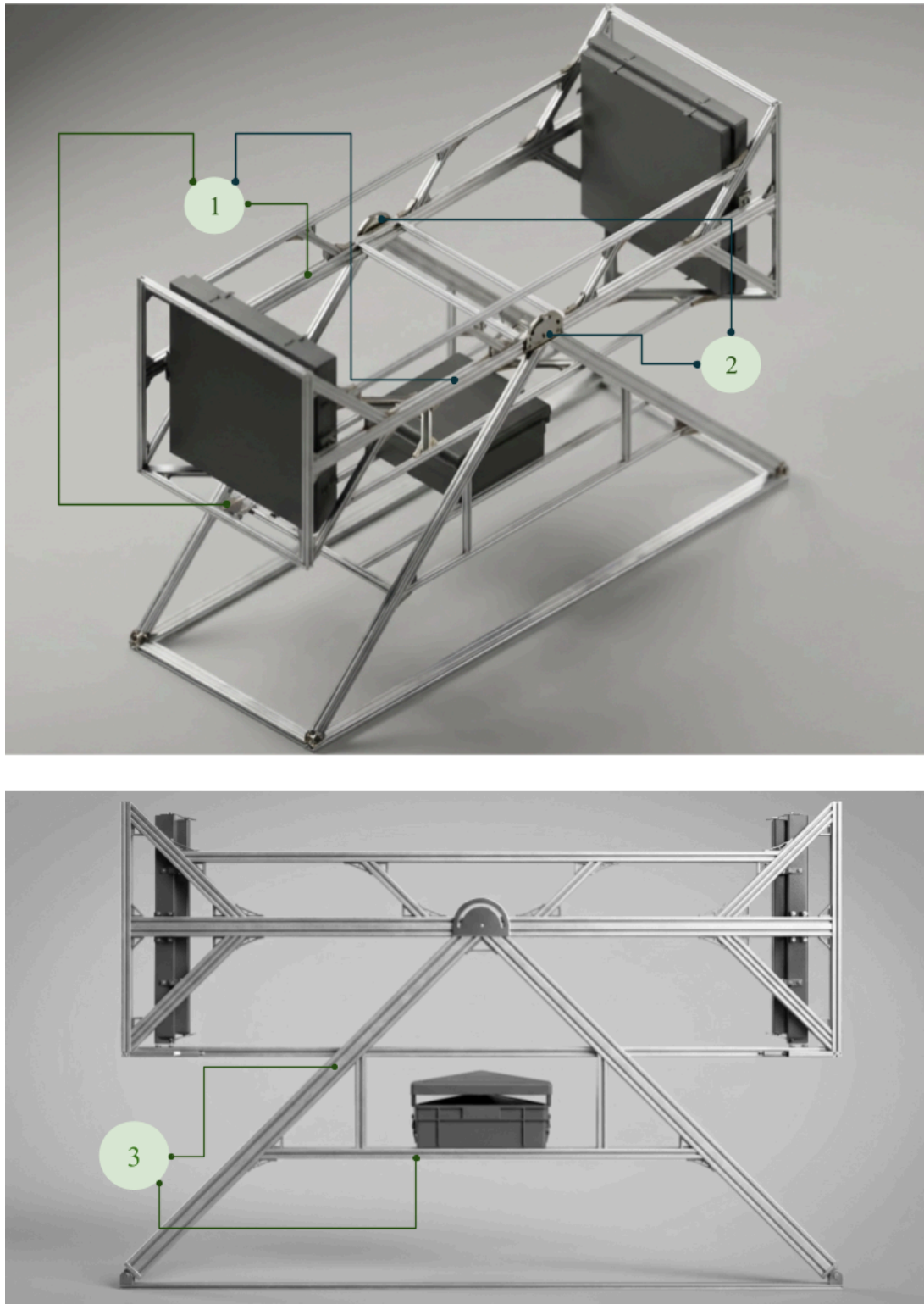
En la figura 54 se muestra la simulación del desplazamiento estructural en el eje Z, asociado a la acción de la gravedad. Se observa un desplazamiento máximo aproximado de $-4,15$ mm, localizado en el tramo longitudinal inferior de la estructura, mientras que las zonas próximas al eje central presentan desplazamientos menores.

Figura 54. Simulación de desplazamiento en el eje Z de la estructura

Nota: Simulación obtenida mediante el software Solidworks

A partir de los desplazamientos observados y la reunión con los integrantes del grupo de investigación y con los directores del proyecto, se identificaron elementos de la estructura que debían cambiar a nivel de rigidez y estabilidad. De esta forma, se decide modificar la configuración estructural como iteración de la propuesta inicial, mediante ajustes en la geometría y disposición de los perfiles, esto se puede observar en la figura 55.

Figura 55. Propuesta de la estructura. Render



Nota: Render del modelado 3d de la estructura realizado en Solidworks

La configuración de la estructura se basa en una geometría reticular similar a una telaraña, donde perfiles estructurales adicionales de menor longitud se incorporan para reforzar y reducir la deformación de los perfiles de mayor longitud. Esta distribución permite aumentar la rigidez sin incrementar significativamente el peso, ni la cantidad de material del sistema.

La estructura cuenta con tres perfiles para el deslizamiento y posicionamiento de los paneles detectores (1): dos laterales y uno inferior. Estos garantizan una alineación estable durante el montaje y la operación del telescopio. En la zona central se incorporan dos perfiles transversales cuya función es mantener una distancia constante entre los perfiles de alineación, asegurando el paralelismo y la precisión geométrica del sistema.

El diseño integra un sistema de medición del grado de inclinación (2) directamente en la estructura, el cual cumple una doble función: por un lado, permite conocer con precisión el ángulo de orientación del telescopio, y por otro, actúa como eje estructural principal para el soporte y conexión de los paneles.

El soporte inferior (3) está diseñado para sostener el módulo electrónico en una posición central, facilitando la organización de los cables provenientes de ambos paneles. Adicionalmente, este soporte permite fijar el eje central de inclinación a la altura media de la estructura superior, contribuyendo a una distribución de cargas y a la estabilidad general del sistema.

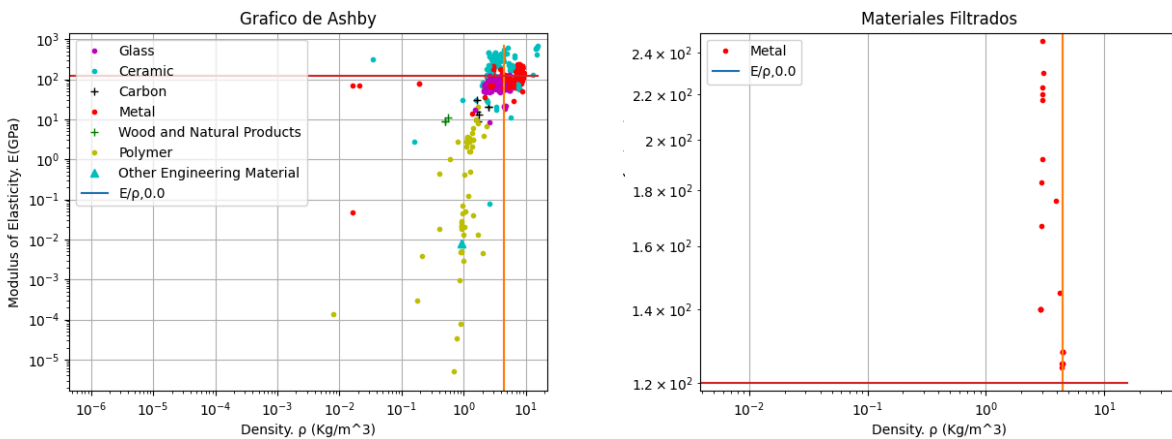
6.2.6.5 Análisis y selección de materiales para estructura. De acuerdo a la definición de la anterior propuesta, se procede con el análisis y selección de materiales teniendo en cuenta la función, condiciones y propiedades del material que debe cumplir el componente, descritas en la siguiente tabla.

Tabla 32. *Análisis de propiedades del material*

Componente	Función principal	Condiciones
<i>Estructura (perfiles)</i>	Soportar el peso y permitir la movilidad de sus componentes.	Disponibilidad comercial. Montaje y desmontaje ocasional. Intemperie
Descripción del material		
Material liviano para facilitar el transporte, que proporcione rigidez para garantizar estabilidad y alineación del conjunto.		
Propiedades		Índice de Ashby
<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de Young - Densidad - Costo 		$M = \frac{E}{\rho}$ <p><i>Costo</i></p>

Teniendo en cuenta esta información, se realiza el análisis ashby que se muestra en la figura 55, se evalúa la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad de los materiales mediante el índice de desempeño E/ρ . La comparación entre los materiales permite identificar que los metales presentan valores superiores de este índice en comparación con polímeros y materiales naturales, por lo que este tipo de materiales resulta mejor como respuesta a la necesidad de rigidez y masa.

Figura 56. Diagrama de Ashby



Nota. Graficas obtenidas mediante el software de código abierto OpenMaterialsSelector para facilitar el proceso de selección de materiales según la metodología de Ashby

En la selección de materiales, se buscaron Metales con módulo elástico alto, ya que se debe garantizar la rigidez de la estructura, se estableció un valor mínimo de módulo de Young de 120 GPa y en cuanto a la densidad un límite superior de 4.5 g/cm³, tomando los valores menores a este. Con estos datos se realizó el proceso de filtrado, que se visualiza en las gráficas.

El análisis de los metales que cumplen con esta relación se presentan en la tabla 33, esta comparación se realiza para el análisis detallado de una aleación específica que pueda ser seleccionada para la construcción futura del telescopio, que no será abordada en este proyecto.

Tabla 33. Comparación de metales.

Material técnico	Densidad (g/cm ³)	Módulo (GPa)	Nombre común
TIMET TIMETAL® 62S Titanium Alloy (Ti-6Al-2Fe-0.1Si); Alpha-Beta Forged, RA	4.44	128	Aleación Titanio 62S
PCC-Advanced Forming Technology 70% AlSiC Metal Matrix Composite	3.04	230	Composite Aluminio-AlSiC 70%

Material técnico	Densidad (g/cm ³)	Módulo (GPa)	Nombre común
Materion SupremEX® 640XA Aluminum - Silicon Carbide Metal Matrix Composite, T6 PGQ Billet	2.90	140	Composite Aluminio-AlSiC
Gamma Titanium Aluminide, TiAl	3.91	176	Titanio Aluminuro Gamma
PCC-Advanced Forming Technology 63% AlSiC Metal Matrix Composite	3.01	220	Composite Aluminio-AlSiC 63%
Gamma Titanium Aluminide, TiAl	4.20	145	Titanio Aluminuro Gamma
Materion SupremEX® 640XA Aluminum - Silicon Carbide Metal Matrix Composite, T7 Forged Plate	2.90	140	Composite Aluminio-AlSiC
TIMET TIMETAL® 685 (Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si) Titanium Alloy	4.45	125	Aleación Titanio 685
Materion SupremEX® 640XA Aluminum - Silicon Carbide Metal Matrix Composite, T6 CWQ Billet	2.90	140	Composite Aluminio-AlSiC
PCC-Advanced Forming Technology 68% AlSiC Metal Matrix Composite	3.03	223	Composite Aluminio-AlSiC 68%
Deutsche Titan Tikrutan LT 26 Alloyed Titanium	4.45	125	Aleación Titanio Tikrutan LT
Titanium Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-8-1-1) Duplex Anneal	4.37	124	Aleación Titanio 8-1-1
PCC-Advanced Forming Technology AlSiC-9, 63 vol% SiC	3.02	246	Composite Aluminio-AlSiC 63%
Titanium Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-.25Si, STA	2.96	167	Aleación Titanio Ti-6Al-2Sn
PCC-Advanced Forming Technology AlSiC-8, 70 vol% SiC	2.97	183	Composite Aluminio-AlSiC 70%
TIMET TIMETAL® 62S Titanium Alloy (Ti-6Al-2Fe-0.1Si); Annealed Sheet/Plate & Billet/Bar	4.44	128	Aleación Titanio 62S
TIMET 8-1-1 Titanium Alloy (Ti-8Al-1Mo-1V); Annealed Sheet	4.36	125	Aleación Titanio 8-1-1

A partir de la comparación de materiales que se visualiza en la tabla se seleccionaron aleaciones de aluminio, teniendo en cuenta que presentan un menor costo en el mercado.

En la tabla 34 se presenta la matriz de selección de materiales empleada para comparar las alternativas de metales previamente identificados como viables, considerando propiedades técnicas: como la resistencia a la intemperie, costo, módulo de young y densidad. Cada propiedad fue ponderada de acuerdo con su importancia relativa en el desempeño del sistema estructural, siendo lo más relevante para esta decisión el costo y la resistencia a la intemperie.

Tabla 34. *Matriz de materiales con propiedades de la base de datos y comerciales*

Material	Resistencia a la intemperie (40%)	Costo (30%) (COP kg)	Módulo de Young (GPa) (20%)	Densidad (g/cm ³) (10%)	Puntaje
Composite Aluminio-AlSiC	Alta	120.000	140	2.90	3.6
Composite Aluminio-AlSiC 68%	Alta	130.000	223	3.03	3.6
Aluminio 6061-T6 (SS)(comercial)	Alta	30.100	73	2.81	4.0

A partir del puntaje obtenido, se observa que, si bien los materiales compuestos Aluminio-SiC presentan valores elevados de módulo de elasticidad, su alto costo limita su conveniencia. Por el contrario el aluminio 60601-T6 comercial alcanza el mayor puntaje global debido a sus propiedades técnicas en comportamiento mecánico, menor densidad, alta disponibilidad y costo reducido, dado el caso, este es el material seleccionado para la estructura del telescopio de muones.

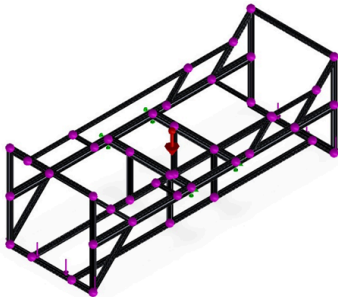
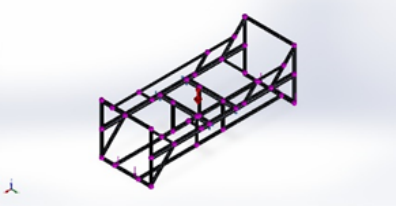
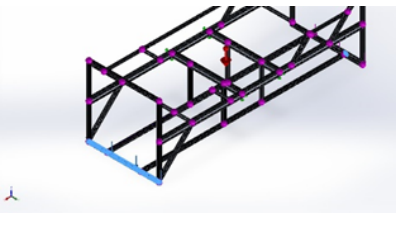
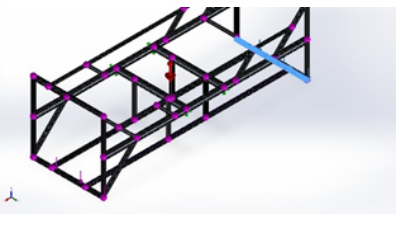
5.2.6.6 Validación a través de análisis de la estructura por elementos finitos (FEA).

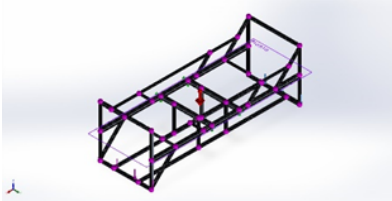
Para la validación estructural se realizó la evaluación del comportamiento mecánico de la estructura que soporta los paneles de detección, con el fin de verificar su rigidez estructural y precisión en la alineación bajo las condiciones de carga previstas durante su operación.

Se realizó un análisis estructural de tensiones, desplazamientos y factor de seguridad en la parte superior de la estructura, debido a su función crítica en la alineación de los paneles de detección, los cuales son soportados directamente por este componente.

El análisis de tensiones permite identificar las zonas de mayor sollicitación mecánica y verificar que los esfuerzos generados se mantengan por debajo del límite admisible del material. Por su parte, el análisis de desplazamientos evalúa las deformaciones de la estructura bajo las condiciones de carga, ya que desviaciones excesivas podrían afectar la correcta alineación del sistema y, en consecuencia, la precisión de las mediciones y el factor de seguridad permite evaluar el margen entre las tensiones máximas obtenidas y la resistencia del material, garantizando un comportamiento estructural seguro frente a posibles sobrecargas o variaciones en las condiciones de operación. Las simulaciones correspondientes a estos análisis se presentan en las Figuras 58 a 60. En la figura 57 se detallan, los lineamientos utilizados para realizar la simulación, en términos de material, sujeciones y los tipos de carga que soporta.

Figura 57. Descripción de lineamientos para la simulación de la estructura general en la parte superior

Propiedades del material		Modelo
<p>Nombre: 6061-T6 (SS) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: $2,75 \times 10^8$ N/m² Límite de tracción: $3,1 \times 10^8$ N/m² Módulo elástico: $6,9 \times 10^{10}$ N/m² Coeficiente de Poisson: 0,33 Densidad: 2.700 kg/m³ Módulo cortante: $2,6 \times 10^{10}$ N/m² Coeficiente de dilatación térmica: $2,4 \times 10^{-5}$ /Kelvin</p>		
Sujeción	Vista	Detalles
Fijo		<p>Entidades: 4 Juntas Tipo: Geometría fija</p>
Carga	Vista	Detalles
Fuerza 1		<p>Entidades: 1 Viga(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: 300 N</p>
Fuerza 2		<p>Entidades: 1 Viga(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: 300 N</p>

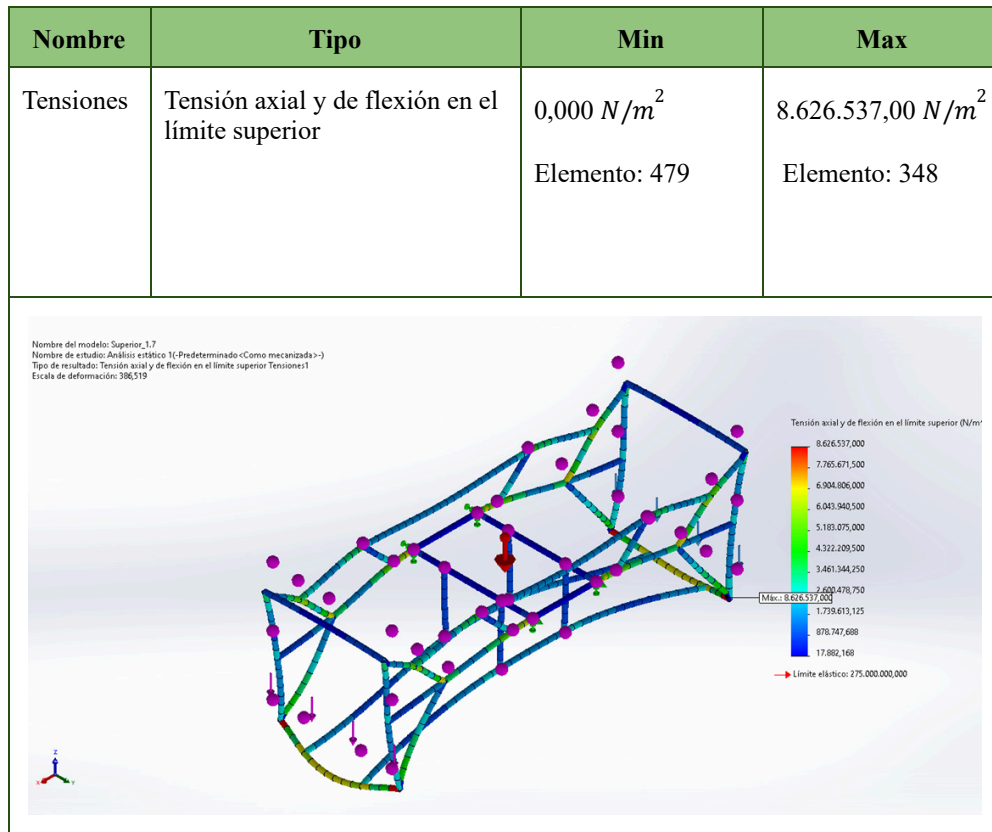
Carga	Vista	Detalles
Gravedad		Referencia: Planta Valores: -9,81 Unidades: m/s ²

Nota: Simulación obtenida mediante el software Solidworks

En lo que corresponde a fuerzas, se definen a partir de las cargas generadas por los paneles de detección, estas equivalen a 300N en cada punto, valor que se da a partir de un peso aproximado de 30 kg por panel, teniendo en cuenta la fuerza de gravedad, da como resultado la fuerza aplicada, tomando un valor máximo. Por otro lado, la zona donde se aplica la carga es un punto crítico donde se podría generar mayor momento flector, debido a la distancia del centro donde se ubica el punto de soporte para la estructura, lo que conduce a mayores esfuerzos y deformaciones en esa zona estructural y por esta razón se toma la decisión de ubicación de la carga.

Teniendo estos datos definidos, se procede a realizar la simulación de tensiones presentes en la estructura, para detectar las concentraciones de esfuerzo en la estructura con relación al límite elástico del material, como se puede ver en la siguiente figura.

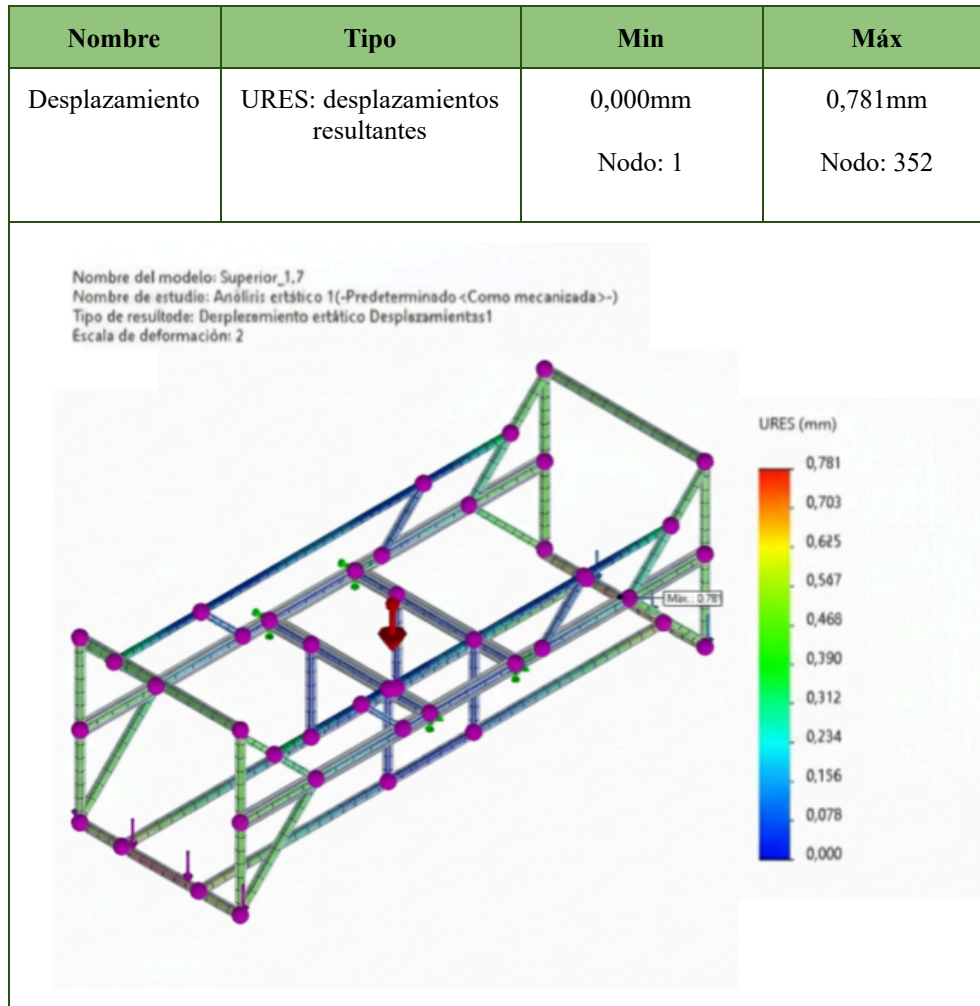
Figura 68. Simulación de concentración de esfuerzos en el marco superior de la estructura general



Nota: simulación obtenida mediante el software Solidworks

El valor máximo obtenido de tensión, equivalente a $8.626.537,00 \text{ N/m}^2$ teniendo en cuenta el límite elástico del material es bastante bajo, debido a las propiedades estructurales del material, por lo que no tiene una influencia negativa relevante en términos estructurales.

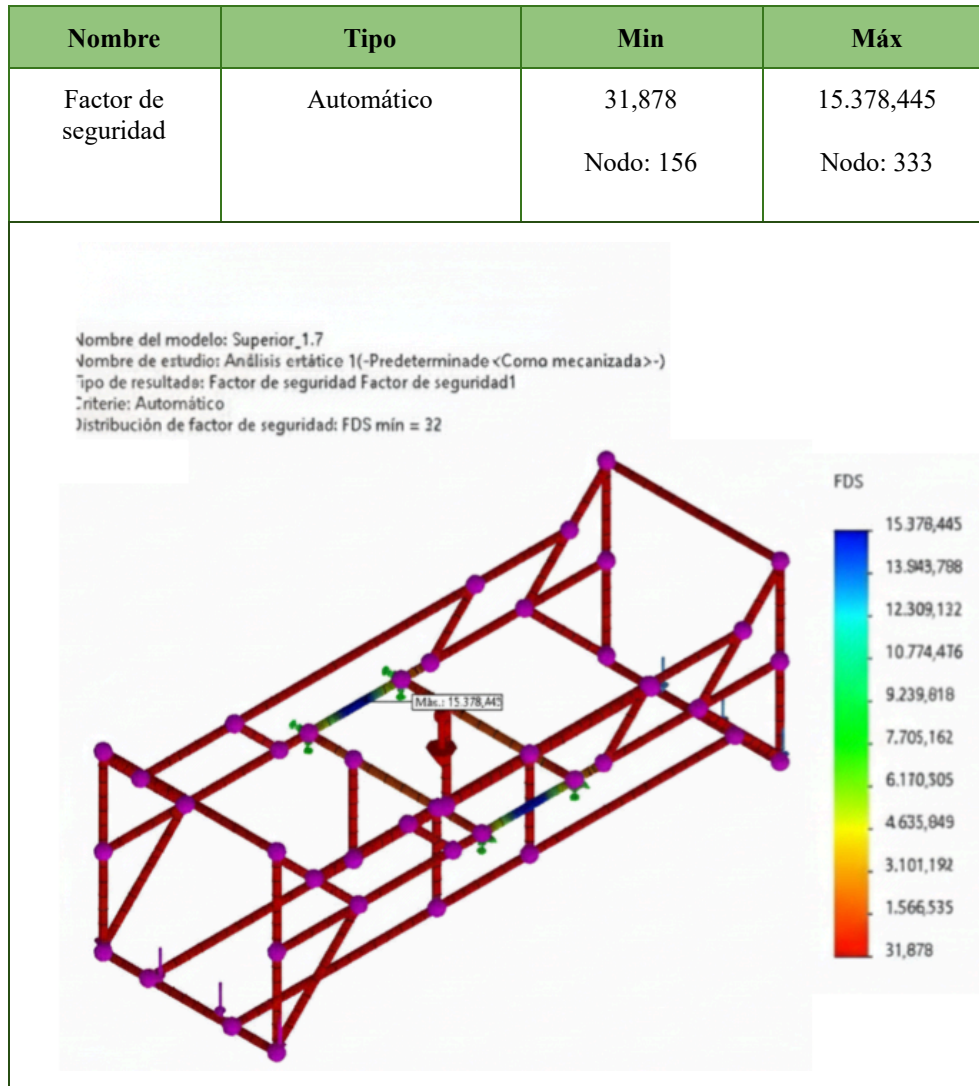
Considerando que la alineación de los paneles depende de la rigidez de la estructura y de los puntos en los que se apoyan los paneles de detección, se realiza el análisis de desplazamientos para la estructura, el cual se puede ver en la siguiente figura.

Figura 59. Simulación de desplazamientos en el marco superior de la estructura general

Nota: simulación obtenida mediante el software Solidworks

Se obtiene como desplazamiento máximo 0.781 mm, este valor se da teniendo en cuenta el escenario de soporte para los paneles en el área inferior de la estructura, sin embargo, como los paneles se encuentran apoyados en los laterales, permite una mejor distribución de la carga y por ende, una disminución de ese valor de desviación estructural.

Por otro lado, se analiza el factor de seguridad del material, como se puede ver en la figura 60.

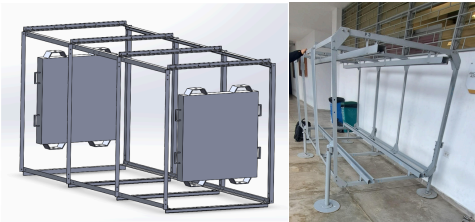
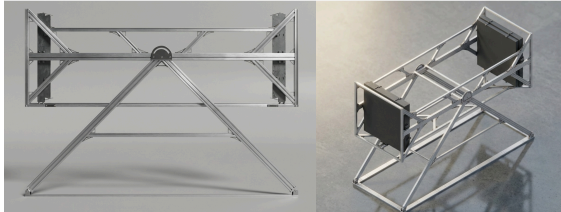
Figura 60. Simulación de factor de seguridad en el marco superior de la estructura general

Nota: simulación obtenida mediante el software Solidworks

El análisis del factor de seguridad arrojó un valor mínimo de 15,38 en las zonas críticas del modelo, lo que indica que los esfuerzos máximos se encuentran muy por debajo del límite del material. Este resultado evidencia un comportamiento estructural seguro bajo las condiciones de carga analizadas.

6.2.6.7 Comparación del peso de la estructura en el uso de materiales. Como parte del proceso de validación del diseño, se realizó una comparación entre el material utilizado en la estructuras previa en el proyecto Mute 2.0 y el material propuesto para el presente diseño, con el objetivo de evaluar su incidencia en el peso total del sistema y su comportamiento estructural. Esta comparación se puede observar en la figura 61.

Figura 61. *Comparación del peso estructural*

Configuración estructural Mute 2.0	Propuesta de configuración estructural Mute 2.1
	
<p>Material: Acero Peso a nivel estructural: 500kg</p>	<p>Material: Aluminio 6061-T6 (SS) Peso a nivel estructural: 150kg</p>

Nota: A la derecha estructura en Solidworks del proyecto MuTe 2.0 junto con la estructura real ubicada en el 4to piso del edificio Livianos de la Universidad Industrial de Santander. A la derecha Render de la propuesta del diseño estructural para el proyecto MuTe 2.1

El material propuesto permite una reducción de la masa total de la estructura, el diseño incorpora un mayor grado de complejidad formal y modularidad para establecer la rigidez estructural sin afectar el peso total. El peso total de la estructura del proyecto mute 2.0 es de 500 kg estimación aproximada por los expertos, es decir, aun si se usa el mismo material que en el proyecto el peso se reduciría debido a la densidad del material.

La validación mediante elementos finitos anteriormente expuesta respalda las decisiones de diseño adoptadas, confirmando que el sistema presenta un comportamiento mecánico adecuado. Adicionalmente, en el anexo H, se pueden encontrar las iteraciones estructurales realizadas que guiaron el proceso a la estructura final expuesta.

6.2.6.8 Módulos para transporte de la estructura. En la siguiente tabla se plantea la distribución de módulos con sus respectivas dimensiones de la estructura para facilitar su transporte, sub-dividiéndose en parte superior e inferior, junto con los paneles de detección y el módulo electrónico.

Tabla 35. *Descomposición en módulos para el transporte de la estructura general.*

Descomposición estructural	Módulos para el transporte	Dimensiones (cm)
		<p>3 Marcos modulares de 300 x 142 x 4 que contienen:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 perfil estructural de 300 x 2 x 6. 4 perfiles estructurales de 68 x 2 x 4. 4 perfiles estructurales de 32.6 x 2 x 2. 2 perfiles estructurales de 250 x 2 x 2. <p>Paneles de detección: 93 x 93 x 14.5</p>

Descomposición estructural	Módulos para el transporte	Dimensiones (cm)
		<p>Estructura de soporte 2 Perfiles estructurales de 300 x 2 x 6 4 Perfiles estructurales de 192 x 2 x 4 4 Perfiles estructurales de 185 x 2 x 4 4 perfiles estructurales de 102 x 2 x 4 4 perfiles estructurales de 39 x 2 x 2</p> <p>Caja para la electrónica: 58.5 x 58.5 x 32</p>

Nota: Distribución de módulos de la estructura general para el transporte con sus respectivas medidas.

7. Resultados concluyentes de la ejecución del proyecto

Las características estructurales y técnicas de los componentes que conforman el telescopio de muones, influyen en la precisión de las mediciones para la obtención de un muograma, teniendo en cuenta las condiciones del entorno. Esto, mediante la reducción de variables significativas que pueden incidir negativamente en la medición, teniendo en cuenta cada componente del sistema.

En cuanto a la estructura general, se realiza una intervención donde se prioriza una estructura rígida que permita el funcionamiento conjunto de ambos paneles como una única unidad de detección y que a la vez pueda ser desarmable para facilitar su transporte, esto a través de perfiles tipo V- Slot con uniones estandarizadas. Para este componente se realizan diferentes

análisis en términos estructurales, utilizando como material el aluminio 6061-T6 (SS) donde el propósito es determinar desplazamientos en áreas estructurales priorizadas (soporte inferior del marco de los paneles de detección), garantizando que ese rango de desplazamiento sea bajo para que se encuentre dentro de los estándares de alineación.

La configuración final presenta un desplazamiento máximo de 0.78mm, resultado obtenido mediante análisis que se hicieron bajo el escenario más extremo considerado, teniendo en cuenta que, los paneles de detección no se apoyan únicamente en el miembro inferior del marco, sino que también se encuentran apoyados en los laterales, lo cual permite una mejor distribución de la carga y por ende, una disminución de la desviación estructural. Una correcta alineación entre los paneles asegura la correspondencia directa entre los píxeles de detección, evitando desfases geométricos que podrían inducir errores en la obtención del muograma. Adicionalmente a esto, la estructura diseñada cuenta con un componente cuya geometría permite observar el grado de inclinación del sistema, esto facilita la precisión en el ángulo que se requiera para la detección. Por otro lado la estructura total, incluyendo todos los componentes ensamblados cuenta con un peso de 150 Kg aproximadamente, valor que optimiza el peso en comparación con la estructura general de la versión de MuTe 2.0, cuyo material utilizado presenta mayor densidad, en comparación, al utilizar acero.

Para el panel de detección, iniciando por el componente más pequeño del sistema, correspondiente al acople de unión entre la barra, fibra óptica y el SiPM, la comparación con el diseño que se tenía previamente en el telescopio Mute 2.0, evidenció una reducción del ruido en las mediciones. Al estandarizar la distancia de contacto entre el SiPM y la fibra óptica, evitando variaciones geométricas que influyen en la forma en la que el SiPM capta la señal, así como también un sistema de unión que favorece el aseguramiento de la PCB, mediante una cavidad

que evita su movimiento y el uso de un único sistema para todas las barras, contribuye a disminuir las variables que pueden afectar la precisión en las mediciones, por otro lado, teniendo en cuenta las condiciones del entorno se plantea para su construcción un material resistente a la intemperie, como el ASA.

En el componente posterior en desarrollo, correspondiente al soporte de unión para barras centelladoras, se plantea una estructura compacta que mediante su aseguramiento favorece la alineación precisa de los componentes, esto se obtiene al emplear un método de mecanización automatizada que favorece la exactitud en las tolerancias de las dimensiones para el ajuste a través de corte a láser permitiendo generar verificaciones de medición por panel, resultados que presentan un comportamiento de la respuesta de cada canal dentro del conjunto. En términos de materiales se plantea el PVC para su construcción teniendo en cuenta las condiciones ambientales esperadas, junto con una densidad del material baja para evitar aumentar el peso del panel.

Para complementar el anterior componente, se desarrollan las trampas de luz, orientadas a la salida de los cables, ya que es un área donde la entrada de luz podría influir negativamente en la precisión de los datos obtenidos, se desarrollaron componentes que se verifican realizando una comparación de la entrada de partículas entre la alternativa diseñada y el sistema de referencia, es decir la caja negra, donde las características como, el desarrollo de un laberinto en el recorrido del cable, junto a una pared compacta en la entrada del cable, posibilitó los resultados obtenidos, este componente se desarrolla a escala de un canal y posteriormente se extrapola a nivel de panel. El material que se selecciona para llevar a cabo la construcción, dentro de los elastómeros presenta mejor desempeño frente a las condiciones esperadas, como lo es el TPE.

En el planteamiento del diseño del módulo para el panel de detección, se realiza una consideración para el recorrido de los cables, incorporando una trampa de luz adicional en el área de unión de la caja, esto con el fin de reducir la probabilidad de ingreso de luz parásita en el sistema, minimizando posibles interferencias en las mediciones. Como material para este módulo se plantea, el tipo de aluminio estructural que se encuentra comercialmente, 6061-T6 (SS).

En el módulo electrónico de adquisición de datos, el componente denominado soporte para la FERS, cuenta con características geométricas que posibilitan la fijación de la electrónica a través de elementos de aseguramiento mecánico, como tornillos, adicionalmente su estructura de soporte es diseñada para soportar bajas deformaciones teniendo en cuenta el peso de los cables. Estas características se dieron mediante modificaciones geométricas para aumentar el área del elemento de soporte, las cuales partieron del análisis preliminar de la estructura. De este modo el soporte evita que se genere algún tipo de desconexión de la electrónica al fijar la estructura, reduciendo la probabilidad de errores en la medición. Por otro lado se plantea como material de fabricación el ASA para facilitar el desempeño del componente frente a las condiciones ambientales previstas, lo que favorece la durabilidad y su estabilidad.

El componente correspondiente al separador de cables se desarrolla con el propósito de facilitar la identificación y organización del cableado por parte de los expertos, teniendo en cuenta criterios de reparación, como también, el uso de este componente permite asistir el peso del cableado del soporte para la FERS, evitando sobrecargas que podrían afectar la estabilidad del sistema. Esto contribuye indirectamente a favorecer la precisión en la toma de datos, al reducir posibles errores asociados a conexiones incorrectas o problemas de estabilidad durante la operación. Seleccionando como material de fabricación el ASA.

En el planteamiento del diseño del módulo que contiene los componentes electrónicos, se priorizan, características como el sistema de ventilación y la prevención de entrada de agua mediante un sistema externo que funciona como protección para el módulo. Esto para evitar posibles afectaciones o daños en la electrónica de adquisición (FERS) por sobrecalentamiento o infiltración de agua, polvo y demás afectaciones externas debido al ambiente donde se encuentra el sistema, teniendo en cuenta que este módulo constituye el núcleo del sistema donde se adquieren los datos provenientes de los paneles de detección. Cualquier falla en este sistema comprometería directamente la correcta lectura y registro de las mediciones. Como material para este módulo se plantea, el tipo de aluminio estructural que se encuentra comercialmente, 6061-T6 (SS).

8. Conclusiones

La intervención realizada en este proyecto mediante la propuesta estructural planteada del telescopio de muones, contribuye a la profesionalización de la instrumentación científica mediante criterios de diseño.

El análisis de tecnologías existentes, junto con la revisión de configuraciones mecánicas previamente utilizadas y los sistemas de protección frente a condiciones ambientales, permitió identificar los requerimientos estructurales necesarios para el diseño del telescopio de muones. Este proceso se verificó a través de reuniones con expertos del grupo de investigación, lo que facilitó la comprensión de diseños anteriores. Los requerimientos definidos a partir de este análisis, establecieron criterios para la toma de decisiones en el desarrollo de la propuesta del sistema estructural general y de los componentes priorizados.

El modelado asistido por computador y las simulaciones mediante análisis de elementos finitos permitieron desarrollar una propuesta estructural de los componentes que cumple con los requerimientos de rigidez mecánica, precisión angular y permeabilidad lumínica. Estas herramientas ayudaron a realizar la evaluación del comportamiento estructural del sistema, permitiendo optimizar la geometría, la distribución de cargas, la selección de materiales, y reduciendo riesgos de desalineaciones entre los paneles.

La construcción de prototipos de media fidelidad para los componentes estructurales priorizados permitió evaluar su comportamiento, en la manipulación, vibración y exposición a luz. Estos prototipos hicieron posible validar dimensiones, sistemas de fijación y estabilidad, así como identificar ajustes necesarios antes de una posible construcción final del sistema completo. Por otro lado, el diseño de precisión contribuyó a la fabricación parametrizada de las piezas para prototipado (impresión 3D y corte láser), lo que hizo posible un proceso basado en múltiples ajustes por componente, para obtener una mayor exactitud en sus dimensiones.

Las pruebas de laboratorio realizadas en los componentes priorizados, incluyendo ensayos de carga, evaluación de permeabilidad lumínica y análisis de situaciones de uso observacional, permitieron comprobar el desempeño de las propuestas frente a condiciones esperadas del entorno. Los resultados obtenidos muestran que las decisiones de diseño reducen la afectación de variables mecánicas y lumínicas en el sistema de detección, para obtener precisión en la adquisición de datos.

A partir del desarrollo de múltiples alternativas del sistema estructural del telescopio de muones, se llegó a una iteración final correspondiente a la alternativa 5, resultado de un proceso de evaluación y retroalimentación conjunta con el grupo de investigación y los directores del

proyecto. Esta propuesta final representa una optimización integral del sistema, particularmente en términos de precisión angular, transporte y control de la permeabilidad lumínica.

La precisión angular se ve mejorada mediante la integración de un sistema de medición directamente incorporado a la estructura, el cual permite variar la orientación del telescopio a distintos ángulos y conocer con exactitud el grado de inclinación, sin que la alineación del sistema se vea afectada por el diseño estructural, el peso de los paneles o el movimiento durante su manipulación.

En cuanto al transporte, la propuesta facilita el desplazamiento y montaje del telescopio al prescindir de componentes monolíticos de gran volumen y al incorporar materiales livianos, como el aluminio, junto con perfiles estructurales estándar tipo V-slot. Esta configuración permite el desmontaje y ensamblaje del sistema directamente en el lugar de estudio, favoreciendo su implementación en entornos de difícil acceso.

Respecto a la permeabilidad lumínica, el diseño integrado de los componentes del panel, incluyendo el soporte de las barras centelladoras, los acoples y la salida de los cables, permitió optimizar el control de la entrada de luz externa. Las pruebas realizadas en laboratorio evidencian una mejora en la estabilidad de las mediciones, lo cual puede ser extrapolado a una construcción final del telescopio.

9. Recomendaciones

En futuras iteraciones del diseño, se recomienda explorar el uso de nuevos materiales y tecnologías de fabricación, tales como polímeros técnicos, materiales compuestos o procesos de

manufactura avanzada, que permitan mejorar la resistencia a las condiciones ambientales de intemperie, incrementar la durabilidad y reducir los costos de mantenimiento del telescopio.

Extender el diseño desde las bases desarrolladas hacia la estructura completa, desarrollando la validación para la propuesta planteada en sistema estructural, lo cual incluye, bastidores, soportes y elementos de unión entre paneles en condiciones reales de uso a la intemperie, así como su impacto directo en la calidad de las mediciones obtenidas.

Adicionalmente, se sugiere seguir profundizando en el desarrollo de un diseño modular y escalable, que facilite el transporte, el montaje, la alineación y el reemplazo de componentes, permitiendo adaptaciones del sistema a distintos escenarios de medición o configuraciones experimentales.

Referencias Bibliográficas

- Abba, A., Tintori, C., Venturini, Y., Venaruzzo, M., Paoli, N., & Garosi, P. (2022). *FERS-5200: A distributed front-end readout system for multidetector arrays* (Contribution to the 11th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, póster). <https://indico.cern.ch/event/1094055/contributions/4933224/contribution.pdf>
- Alvarez, L. W., Anderson, J. A., Bedwei, F. E., Burkhard, J., Fakhry, A., Girgis, A., ... Yazolino, L. (1970). Search for hidden chambers in the pyramids: The structure of the second pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption. *Science*, *167*(3919), 832–839. <https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832>
- Asorey, H., Calderón-Ardila, R., Forero-Gutiérrez, K., Núñez, L., Peña-Rodríguez, J., Salamanca-Coy, J., Sanabria-Gómez, D., Sánchez-Villafrades, J., & Sierra-Porta, D. (2018). miniMuTe: A muon telescope prototype for studying volcanic structures with cosmic ray flux. *Scientia et Technica*, *23*(3), 386–390. <https://doi.org/10.22517/23447214.17501>
- Bhunja, S., & Tehranipoor, M. (2018). Printed circuit board (PCB): Design and test. En *Hardware security: Design, threats, and safeguards* (pp. 81–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812477-2.00009-5>
- Bouteille, S., Attié, D., Baron, P., Calvet, D., Magnier, P., Mandjavidze, I., ... Riallot, M. (2016). Large resistive 2D Micromegas with genetic multiplexing and some imaging applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, *834*, 187–191. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.07.046>

CAEN S.p.A. (2025). *JANUS – FERS-5200 DAQ software*. <https://www.caen.it/products/janus/>

Carbone, D., Gibert, D., Marteau, J., Diament, M., Zuccarello, L., & Galichet, E. (2013). An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy). *Geophysical Journal International*, 196(2), 633–643. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt403>

Cashion, A., Cieslewski, G., Foris, A., Su, J., Schwellenbach, D., & Bonal, N. (2021). Muon Tracker with Unsegmented Plastic Scintillator Panels. *Journal of Science and Medicine*, 4(2), 1–23. <https://doi.org/10.37714/josam.v2i4.68>

CNRS News. (2023). CNRS News. <https://news.cnrs.fr/slideshows/detecting-muons-in-iceland>

Cortés, G. P. (2001a). *Estudio geológico de los depósitos del lahar asociados a la actividad eruptiva del volcán Cerro Machín, Colombia* (Informe interno). INGEOMINAS.

De la Lama Zubirán, P., De la Lama Zubirán, M. A., & De la Lama García, A. (2022). Los instrumentos de la investigación científica: Hacia una plataforma teórica que clarifique y gratifique. *Horizonte de la Ciencia*, 12(22), 189–202. <https://doi.org/10.26490/uncp.horizonteciencia.2022.22.1078>

Duarte Carrasco, J. A. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para muones* [Trabajo de grado].

GT II. Mapa geotrópico 1:25.000 | icgc. (s. f.-b). https://www.icgc.cat/es/Geoinformacion-y-mapas/Datos-y-productos/Geoinformacion-geologica-y-geofisica/Cartografia-geologica/GT-II-Mapa-geotropico-125000?utm_source

- Holma, M. (2023). Beyond traditional methods: Muography's integration into applied geophysics for enhanced mineral discovery. En V. Laakso (Ed.), *Sovelletun geofysiikan XXIV neuvottelupäivät* (pp. 24–27). Vuorimiesyhdistys ry. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202403042084>
- Hou, G., Yang, M., Zhou, Y., He, M., Hu, J., Zhang, M., & Hou, R. (2025). Recent research progress on cosmic ray muon imaging technology. *Nuclear Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.104091>
- International Atomic Energy Agency. (2022). *Muon imaging (IAEA-TECDOC-2012)*. <https://www.iaea.org/publications/15182/muon-imaging>
- Jourde, K., Gibert, D., Marteau, J., De Bremond d'Ars, J., Gardien, S., Girerd, C., Ianigro, J.-C., & Carbone, D. (2013). Effects of upward-going cosmic muons on density radiography of volcanoes. *Geophysical Journal International*. <https://www.researchgate.net/publication/260628881>
- Kaiser, R. (2018). Muography: overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2137), 20180049. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0049>
- Lesparre, N., Marteau, J., Déclais, Y., Gibert, D., Carlus, B., Nicollin, F., & Kergosien, B. (2012). Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 1, 33–42. <https://doi.org/10.5194/gi-1-33-2012>

- Luo, S. Y., Xiao, W. C., He, L., Zhang, H. F., & Wang, X. D. (2024). Imaging technology based on the interaction between muon and material. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 344, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2023.12.007>
- Muon Systems. (2025). *Muon Systems*. <https://muon.systems/>
- Peña-Rodríguez, J. (2021). *Diseño y calibración de un telescopio de muones híbrido para estudios vulcanológicos* [Tesis doctoral, Universidad Industrial de Santander]. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42203>
- Peña-Rodríguez, J., Jaimes-Teherán, J. A., Dlaikan-Castillo, K., & Núñez, L. A. (2024). MUYSC: An end-to-end muography simulation toolbox. *Geophysical Journal International*, 237(1), 540–556. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae064>
- Piedrahita, D. A., Aguilar-Casallas, C., Arango-Palacio, E., Murcia, H., & Gómez-Arango, J. (2018). Estratigrafía del cráter y morfología del volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(3), 29–48. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018002>
- Procureur, S. (2018). Muon imaging: Principles, technologies and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 878, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.065>
- Riggi, F. (2025). Muografía con i contatori Geiger. En *Esperimenti didattici e amatoriali con i contatori Geiger* (pp. 403–407). Springer Nature.

Sarmiento, C. (2025). *Informe muografía MuTe: Alcances y limitaciones en la ejecución del proyecto.*

Servicio Geológico Colombiano. (s. f.). *Volcán Cerro Machín.* <https://www.sgc.gov.co/>

Simon, F. (2019). Silicon photomultipliers in particle and nuclear physics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 926, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.042>

Tanaka, H. K. M., Gluyas, J., Holma, M., Joutsenvaara, J., Kuusiniemi, P., Leone, G., Lo Presti, D., et al. (2022). Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. *Scientific Reports*, 12, 16710. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>

Teixeira, P., Blanco, A., Caldeira, B., Tomé, B., Matos, J., Borges, J. F., ... Adringa, S. (2022). *Projeto LouMu-Muografia no Lousal.* Jornadas do Instituto de Ciências da Terra.

Vanini, S., Calvini, P., Checchia, P., Rigoni Garola, A., Klinger, J., Zumerle, G., & Bonomi, G. (2018). Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137), 20180051. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0051>

Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., Jaimes-Motta, A., Calderón-Ardila, R., Peña-Rodríguez, J., Sánchez-Villafrades, J., Sanabria-Gómez, J. D., Asorey, H., & Núñez, L. A. (2020). Simulated response of MuTe, a hybrid muon telescope. *Journal of Instrumentation*, 15(08), P08004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/P08004>

