

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA E INTERFACES
MECÁNICAS DE UNA CÁMARA MULTIESPECTRAL PARA UN SATÉLITE TIPO
CUBESAT 3U

JUAN DIEGO ESPINOSA RONDÓN
VALENTINA SÁNCHEZ CHAVARRO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA E INTERFACES
MECÁNICAS DE UNA CÁMARA MULTIESPECTRAL PARA UN SATÉLITE TIPO
CUBESAT 3U

JUAN DIEGO ESPINOSA RONDÓN
VALENTINA SÁNCHEZ CHAVARRO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

HELLER GUILLERMO SÁNCHEZ ACEVEDO
Doctor en Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional

Codirector:

JULIÁN RODRÍGUEZ FERREIRA
Doctor en Astronomía y Astrofísica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento va dirigido a la vida, por enseñarme y formarme, por aprender a quererla y sentirme pleno como persona.

Doy gracias a mis padres, que me han apoyado y siempre han creído en mí, por toda su guía en este proceso, a mi hermana con sus locuras siempre sabe como ponerme de buen humor.

A mis compañeros de carrera que siempre fueron un apoyo en todo mi proceso, a Juan Pablo por su compañía y conocimiento, a Erwing por sus ocurrencias, Daniel por su apoyo y a todos mis amigos que de forma directa o indirecta me apoyaron.

Agradezco a mi director de tesis Heller por su guía y apoyo, a mi codirector Julián por brindar la oportunidad de participar en este proyecto y un especial agradecimiento al profesor Hans García, por su genuino apoyo y motivación.

Un especial agradecimiento a mi compañera y amiga Valentina Sánchez, que por su fuerza y valentía en todo momento, que ante cualquier adversidad siempre se mantuvo nuestra amistad y cariño, por alentarme a seguir adelante más allá de solo este proyecto.

Juan Diego Espinosa Rondón.

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo a mi abuelo Carlos, al que extraño cada día, espero ser su orgullo y transmitir su espíritu.

Juan Diego Espinosa Rondón.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento primordialmente a mis padres, por brindarme la oportunidad y la confianza de poder emprender un camino académico y profesional en la universidad que siempre quise para mí; de igual forma por su incansable apoyo, palabras de aliento y optimismo en las épocas más difíciles, siendo juntos el pilar que sostuvo, sin esperar nada a cambio, mi vida en cada paso que di.

Un profundo agradecimiento a mi hermana Gabriella, sin ella ninguno de mis logros hubiese sido posible, es el motor que mueve mi vida a diario y ocasiona que luche por cada uno de mis sueños y me convierta en una profesional integral y pueda ser el mejor ejemplo para ella.

Especial agradecimiento a mis primos Jorge Charris, Mauricio Charris y Oswaldo Castro, gracias a su apoyo incondicional, su cariño y su confianza inagotable en mí y en mis capacidades, me motivaban cada día para brindar lo mejor de mí y convertirme en lo que soy hoy.

Gran agradecimiento a mi director y codirector de tesis Heller Guillermo Sánchez y Julián Rodríguez, por la confianza depositada en el proyecto y por sus valiosos aportes y orientaciones, ya que sin ellos nada de esto hubiese sido posible

Un cálido agradecimiento a Hans García, docente de la Universidad Industrial de Santander, por su esfuerzo, guía y apoyo durante todo el proyecto.

A José L, un cariñoso agradecimiento, por su ciega confianza en mí, por su gran apoyo y palabras de aliento en los momentos difíciles.

Y finalmente un agradecimiento muy especial a mi compañero de tesis y gran amigo Juan Diego Espinosa, por confiar en mí para ser su compañera en este proyecto, por su apoyo incondicional y sobre todo por la entrega, dedicación y comunicación mutua, con las cuales pudimos llevar a término juntos este proyecto.

DEDICATORIA

A Lilia Jiménez, mi abuela; desde que tengo memoria nunca estuvo ausente en ninguno de los logros personales y académicos en los que estuve involucrada y pesar de que en esta ocasión, no se encuentra de forma física para compartirlo conmigo, sé que está presente en alma y corazón.

A Adriana Sánchez, mi más grande ejemplo en la vida, la persona que más motivó a cumplir mis sueños, porque estaba segura que podría alcanzar cualquier cosa que me propusiera, sé que en el lugar donde se encuentre en este momento, celebrará siempre cada paso que dé en el camino.

A Judith Sánchez, mi tía, mi segunda mamá; una gran parte de lo que soy a día de hoy, es gracias a tu cariño, a tu tiempo, a tu entrega, al amor incondicional que siempre me has brindado y este logro lo celebro y comparto contigo con todo el amor del mundo.

Valentina Sánchez Chavarro.

CONTENIDO

	Pág.
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
2. OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	22
4. MARCO TEÓRICO	23
4.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS	23
4.1.1 Libros.	23
4.1.2 Artículos.	24
4.1.3 Tesis.	25
4.2 REFERENTES TEÓRICOS	25
4.2.1 Nanosatélites	26
4.2.2 Cubesats	26
4.2.2.1 Elementos principales de un Cubesat	27
4.2.2.2 Subsistemas de un Cubesat	28
4.2.2.3 Tipos de Cubesat	29
4.2.3 Banda Espectral	30
4.2.4 Imágenes multiespectrales	30
4.2.5 Cámara multiespectral	32

4.2.5.1 Elementos de una cámara multiespectral	32
4.2.5.2 Factores que influyen en el desempeño de la cámara multiespectral	33
4.2.6 Método de elementos finitos	37
4.2.7 CAE	37
4.2.8 CAD	37
4.2.9 ANSYS 2022 R1.	37
4.2.10 SOLIDWORKS 2019	38
5. DISEÑO MECÁNICO DE LA CÁMARA MULTIESPECTRAL	39
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE	40
5.2 REQUERIMIENTOS GENERALES DE LA CARGA ÚTIL	45
5.3 DISEÑO PRELIMINAR DE LA CARGA ÚTIL	45
5.4 PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA CARGA ÚTIL.	47
5.4.1 Dimensionamiento de la cámara multiespectral	47
5.4.2 Desarrollo de bocetos a partir del dimensionamiento de la cámara multiespectral	48
5.4.3 Diseño de componentes mecánicos de la carga útil	49
5.4.3.1 Chasis	49
5.4.3.2 Banco óptico	50
5.4.3.3 Soportes	51
5.4.3.4 Elementos de sujeción	56
5.5 MODELO CAD	60
5.5.1 Modelo detallado	61
6. VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE MÉTODOS COMPUTACIONALES	64

6.1 ASPECTOS GENERALES	64
6.2 CONDICIONES DE CONTORNO	65
6.3 CONDICIONES DE VALIDACIÓN DE LA CARGA ÚTIL	67
6.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	68
6.4.1 Mallado y refinamiento	69
6.4.2 Análisis modal.	70
6.4.3 Análisis de vibraciones aleatorias	72
6.4.4 Análisis de aceleraciones cuasi estáticas	73
7. VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE PROTOTIPADO	75
7.1 CONDICIONES DE CONTORNO EN ANSYS	75
7.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	76
7.3 CONDICIONES DE LABORATORIO	79
7.4 EJECUCIÓN ENSAYO MODAL	81
7.4.1 Instrumentación	81
7.4.1.1 Sistema de adquisición de datos	81
7.4.1.2 Martillo excitador	83
7.4.1.3 Acelerómetro	84
7.4.2 Tipo de montaje	85
7.4.3 Metodología	86
7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
8. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	93
8.1 CONDICIONES DE EJECUCIÓN	93
8.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS	94

8.3 VALIDACIÓN EN SIMULACIÓN	95
9. CONCLUSIONES	98
10. RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	100
ANEXOS	106

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Determinación de los parámetros generales de la carga útil	45
Tabla 2. Dimensionamiento de la carga útil	47
Tabla 3. Propiedades de los espejos	52
Tabla 4. Dimensiones de los soporte M1, M3 ,M4, M5	52
Tabla 5. Diámetros de las arandelas	56
Tabla 6. Dimensiones acoples plásticos	57
Tabla 7. Características de la tornillería	58
Tabla 8. Masa de la carga útil	60
Tabla 9. Propiedades Aleación Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn	66
Tabla 10. Niveles de prueba para cargas útiles menores a 22.7 kg	68
Tabla 11. Primera frecuencia natural con distinta calidad de mallado	70
Tabla 12. Primeras frecuencias naturales del modelo con una malla de 310.670 elementos	71
Tabla 13. Propiedades Plástico PLA Negro 0.75 kg 2.85 mm de diámetro	76
Tabla 14. Refinamiento de malla de la primera frecuencia natural	77
Tabla 15. Primeras frecuencias naturales del sistema	78
Tabla 16. Características de las salidas dinámicas analizador OROS OR35	82
Tabla 17. Propiedades del análisis FFT OROS OR35	83
Tabla 18. Características Martillo Dytran 5850B	84
Tabla 19. Características acelerómetro Dytran 3224B	85
Tabla 20. Primeras frecuencias naturales obtenidas, ensayo 1	89
Tabla 21. Primeras frecuencias naturales obtenidas, ensayo 2	90
Tabla 22. Resultado asociación entre ensayos 1 y 2 mediante promedio	90
Tabla 23. Cálculo de error de las primeras frecuencias naturales del sistema	91
Tabla 24. Clasificación de las especificaciones técnicas	107
Tabla 25. Matriz calidad de requerimientos	108

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Unidad Cubesat	27
Figura 2. Elementos principales de un Cubesat	28
Figura 3. Modelos estándar de Cubesat	30
Figura 4. Ejemplo de las imágenes derivadas del análisis multiespectral en vegetación	31
Figura 5: Diagrama representativo de la Ecuación de movimiento	34
Figura 6: Entrada aleatoria en un rango de frecuencias de 0 -100 Hz	36
Figura 7. Diagrama proceso de diseño de cámara multiespectral	39
Figura 8. Modelo CAD Satélite MISC-3, perteneciente a la Misión LEOPAR	40
Figura 9. Subsistema EPS	41
Figura 10: Subsistema OBS	41
Figura 11: Subsistema ADACS	42
Figura 12: Subsistema COMM	43
Figura 13: Subsistema Carga útil	44
Figura 14. Plano de elementos del sistema óptico	45
Figura 15. Boceto de la cámara multiespectral	46
Figura 16. Vista lateral de la carga útil	48
Figura 17. Vista frontal de la carga útil	48
Figura 18. Diseño del chasis	50
Figura 19. Diseño banco óptico	50
Figura 20: Diseño de soporte genérico	53
Figura 21. Diseño soporte M2	53
Figura 22. Diseño soporte del grating	54
Figura 23. Diseño soporte del slit	55
Figura 24. Diseño de arandelas	57
Figura 25. Diseño de acoples plásticos	58

Figura 26. Tornillo sujeción de espejos	59
Figura 27: Tornillo sujeción unión chasis-banco óptico	59
Figura 28. Modelo CAD de la cámara multiespectral en SolidWorks	60
Figura 29. Modelo renderizado del chasis y estructura externa	61
Figura 30: Modelo renderizado del chasis y estructura externa en vista isométrica	62
Figura 31. Modelo renderizado del banco óptico y los elementos sujetos a este	62
Figura 32. Metodología de validación en Ansys	64
Figura 33. Modelo a evaluar en Ansys	65
Figura 34. Puntos de anclaje del sistema	66
Figura 35. Refinamiento de malla con 729.983 nodos y 310.670 elementos	69
Figura 36. Gráfico de convergencia de malla	70
Figura 37. Deformación estructura mecánica de la carga útil en el primer armónico	71
Figura 38. Simulación con parámetros establecidos por la normativa	72
Figura 39. Esfuerzos de la estructura mecánica de la carga útil en vibraciones aleatorias.	73
Figura 40. Distribución de esfuerzos del modelo	73
Figura 41. Modelo a evaluar	75
Figura 42. Análisis modal modelo en PLA	76
Figura 43. Convergencia de malla primera frecuencia natural	77
Figura 44. Montaje de la estructura mecánica de la carga útil	79
Figura 45. Mallado del elemento	80
Figura 46. Estructura mecánica de la carga útil con el sensor posicionado	81
Figura 47. OROS OR 35	82
Figura 48. Martillo de impulso Dytran 5850B	83
Figura 49. Acelerómetro Dytran 3224B	85
Figura 50. Montaje adhesivo del acelerómetro	86
Figura 51. Montaje del ensayo	86
Figura 52. Conexión del sensor y del martillo en el analizador	87

Figura 53. Configuración de ubicación del sensor	87
Figura 54. Determinación de parámetros del acelerómetro y el excitador	88
Figura 55. Configuración de la frecuencia y número de impactos por punto	88
Figura 56. Ejecución del ensayo modal	89
Figura 57. Esfuerzos presentes en el banco óptico previo a la optimización	94
Figura 58. Banco óptico optimizado en Ansys	95
Figura 60. Esfuerzos equivalentes de banco optimizado manualmente en aceleraciones cuasiestáticas	96
Figura 61. Esfuerzos equivalentes de banco optimizado en vibraciones aleatorias	96
Figura 62. Alternativa 1	109
Figura 63. Alternativa 2	110
Figura 64. Alternativa 3	111
Figura 65. Primera etapa de diseño de la carga útil	113
Figura 66. Segunda etapa de diseño de la carga útil	114
Figura 67. Modelo final de la carga útil	115
Figura 68. Plano general carga útil	116
Figura 68. Esquema de la estructura de simulación en ANSYS	117
Figura 69. Propiedades características del Aluminio EN-AW 5093	118
Figura 70. Geometría del modelo	118
Figura 71. Parámetros de mallado	119
Figura 72. Desplazamiento resultantes del primer armónico.	120
Figura 73. Esquema de optimización topológica.	121
Figura 74. Puntos de anclaje para la optimización	121
Figura 75. Optimización topológica obtenida en Ansys	122

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diseño mecánico de una cámara multispectral para un satélite tipo Cubesat 3U	106
Anexo B. Simulación y evaluación de las estructuras mecánicas de una cámara multispectral	117
Anexo C. Optimización topológica del banco óptico y soportes de una cámara multispectral	121

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA E INTERFACES MECÁNICAS DE UNA CÁMARA MULTIESPECTRAL PARA UN SATÉLITE TIPO CUBESAT 3U^{1*}

AUTOR: JUAN DIEGO ESPINOSA RONDÓN, VALENTINA SÁNCHEZ CHAVARRO^{2**}

PALABRAS CLAVE: CUBESAT, INGENIERÍA AEROESPACIAL, ENSAYO MODAL, FRECUENCIA NATURAL, PLA, CAE ANSYS, OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto de investigación estipula el proceso de diseño y validación de las estructuras mecánicas de una cámara multiespectral que corresponde a la carga útil de un satélite tipo Cubesat de tres unidades (3U). El propósito fundamental de desarrollo de la cámara, es la adquisición de datos mediante imágenes multiespectrales de la deforestación presentada en la Selva Amazónica, con el fin de que las entidades pertinentes cuenten con información veraz y acertada y puedan tomar las acciones pertinentes para la recuperación de la zona.

Para la ejecución del trabajo de investigación, se llevó a cabo el proceso de diseño mediante la metodología de selección de alternativas, las cuales fueron planteadas de acuerdo a los requerimientos de espacio del Cubesat y también a los planteados por los subsistemas que conforman el desarrollo de la carga útil: Óptico y electrónico.

Al plantear el modelo a partir de las condiciones establecidas, se sometió a un análisis bajo la normativa General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects standard, para evaluar frecuencias naturales y determinar si el sistema entra en resonancia, esfuerzos y deformaciones en el software CAE ANSYS; para validar los resultados obtenidos por metodología analítica, se desarrolló un prototipo en PLA del modelo, con el objetivo de someterlo a un ensayo modal.

Finalmente, al ser exitosa la validación de los resultados obtenidos en el método analítico y experimental, se llevó a cabo un proceso de optimización topológica de la estructura y reducir así la masa de la misma, conservando a plenitud su funcionalidad estructural.

^{1*} Proyecto de grado

^{2**} Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo. Doctor en Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL INTERFACES OF A MULTISPECTRAL CAMERA FOR A CUBESAT 3U SATELLITE^{3*}

AUTHOR: JUAN DIEGO ESPINOSA RONDÓN, VALENTINA SÁNCHEZ CHAVARRO^{4**}

KEY WORDS: CUBESAT, AEROSPACE ENGINEERING, MODAL TESTING, NATURAL FREQUENCY, PLA, CAE ANSYS, TOPOLOGICAL OPTIMIZATION.

DESCRIPTION:

The present research project stipulates the design and validation process of the mechanical structures of a multispectral camera that corresponds to the payload of a Cubesat type satellite of three units (3U). The main purpose of developing the camera is the acquisition of data through multispectral images of deforestation in the Amazon Rainforest, so that the relevant entities have accurate and reliable information so they can take appropriate actions for the recovery of the area. For the execution of the research work, the design process was carried out by means of the alternative selection methodology, which were proposed according to the space requirements of the Cubesat and also to those proposed by the subsystems that make up the development of the useful side: Optical and electronic.

When the model was designed based on the established conditions, it was subjected to an analysis under the General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects standard to evaluate natural frequencies and determine if the system enters in resonance, stresses and deformations in the CAE ANSYS software; to validate the results obtained by analytical methodology, a PLA prototype of the model was developed, with the objective of submitting it to a modal test.

Finally, upon successful validation of the results obtained in the analytical and experimental method, a topological optimization process of the structure was carried out, thus reducing its mass while fully preserving its structural functionality.

^{3*} Bachelor Thesis

^{4**} Faculty of Physicomechanics. School of Mechanical Engineering. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD in Applied Mechanical and Computational Engineering.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La Selva Amazónica es la selva tropical más extensa del planeta, la cual corresponde al 40% del continente sudamericano⁵ y se extiende en 9 países del continente, de los cuales Brasil y Perú, poseen la mayor extensión de la selva, seguidos de: Colombia, Bolivia, Ecuador, Guyana, Venezuela, Surinam y Guyana Francesa.

Al ser un terreno tan amplio, es importante resaltar que a nivel de fauna, la Amazonía alberga una de cada cinco especies de aves que habitan en la Tierra, es decir aproximadamente 1300 especies; de igual forma en este espacio se pueden encontrar 378 especies de reptiles, 400 especies de anfibios y 427 especies de mamíferos. A nivel de flora, el Amazonas alberga más de 80.000 especies de plantas, de las cuales 40.000 hacen parte imprescindible en la regulación del clima global y en el mantenimiento del ciclo del agua.⁶

Pero la mayor región de bosque tropical del planeta desde el año 1970 se ha visto afectada por la masiva deforestación, en la cual se ha perdido terreno selvático equivalente a una superficie forestal más grande que Francia, es decir, más de 800 mil hectáreas destruidas; en la década de los 90, en la Amazonía se absorbía 2000 millones de toneladas de CO₂ y en la actualidad está reducida a la mitad, todo esto debido a la tala ilegal, el aumento exponencial en la ganadería y la construcción de autopistas transamazónicas⁷.

⁵ DELGADO NIETO, Laura Janneth. El papel de Brasil en relación a la protección de preservación de la cuenca amazónica [en línea]. Monografía. BOGOTÁ D.C.: Universidad Militar Nueva Granada, 2014 [consultado el 2, agosto, 2022]. 89 p. Disponible en Internet: <<http://hdl.handle.net/10654/12658>>.

⁶ PAZMIÑO MORALES, Bertha Elizabeth. Análisis jurídico del Tratado de Cooperación Amazónica de 1978. Propuesta de reforma que incorpore mecanismos de protección y conservación del Ecosistema Amazónico [en línea]. Trabajo de grado. Quito: UCE, 2014 [consultado el 26, julio, 2022]. 127 p. Disponible en Internet: <<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/5208>>.

⁷ LAPEYRE, Tatiana; ALEGRE, Julio y ARÉVALO, Luis. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en san martín, peru. En: Ecología

Pero para encontrar soluciones sostenibles en el tiempo a la deforestación en la Selva Amazónica, la cual indiscutiblemente ha alcanzado su tasa de deforestación más alta en una década⁸, es necesario identificar y cartografiar las zonas que son sometidas a diario a la quema o tala ilegal, afectadas por incendios forestales generados por el aumento de temperatura a nivel global y también las fracciones de selva utilizadas de manera indiscriminada por empresas aparentemente autorizadas; esta tarea se ve truncada debido a la escasez de personal preparado para realizar veeduría y exploración de una zona tan extensa como la Selva Amazónica.

Este inconveniente puede ser solucionado mediante herramientas como la observación satelital, con la cual se podrán tomar datos mediante la captura de imágenes de buena calidad de las zonas afectadas por el fenómeno de la deforestación, lo cual permitirá observar a mayor detalle la causa y consecuencia de cada sección identificada para que así, las entidades pertinentes, puedan tomar las acciones correctivas necesarias para mitigar el daño causado.

Aplicada [en línea]. 25, abril, 2016. vol. 3, no. 1-2 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 35. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.21704/rea.v3i1-2.269>>. ISSN 1993-9507.

⁸ ARMENTERAS, Dolors, et al. Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. En: Ecological Indicators [en línea]. Abril, 2006. vol. 6, no. 2 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 353-368. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.014>>. ISSN 1470-160X.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar la estructura de soporte, chasis, banco óptico e interfaces mecánicas para la cámara multispectral de un satélite tipo Cubesat 3U, perteneciente a la misión satelital LEOPAR.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar los componentes mecánicos de la carga útil: Soporte, chasis, banco óptico e interfaces de la carga útil del satélite tipo Cubesat 3U, cumpliendo con la restricción de dimensiones menores a 160 mm x 98 mm x 98 mm y una masa máxima de 600 gr.
- Modelar en ANSYS la estructura de la carga útil con el fin de evaluar su comportamiento respecto a las condiciones establecidas en la norma General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects.
- Validar las frecuencias naturales obtenidas en el modelo analítico desarrollado en Ansys, por medio de la elaboración y ejecución de ensayos modales en un prototipo desarrollado mediante manufactura aditiva en PLA.
- Realizar un proceso de optimización topológica del modelo de la estructura mecánica de la carga útil, asegurando una frecuencia natural mayor a 100 Hz.

3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Debido al aumento desmesurado de la tasa de deforestación que se ha presentado en la Selva Amazónica, especialmente en las regiones ubicadas en Brasil y Colombia, se considera fundamental realizar inspecciones mediante dispositivos especializados, como lo son los satélites de observación terrestre, con el objetivo de identificar causas y nivel de daño provocado a fracciones de selva determinadas; esto con el fin de proporcionar datos con alto grado de confiabilidad a las entidades pertinentes que cuentan con la capacidad de implementar soluciones efectivas y mitigar el daño ambiental que conlleva a esta problemática, por lo cual, el propósito de este proyecto se encuentra enfocado en el diseño y fabricación del prototipo de la estructura mecánica, para una cámara multiespectral que conforma la carga útil de un satélite tipo Cubesat 3U, la cual permitirá captar datos importantes para las instituciones interesadas en el proceso de la toma de decisiones y medidas correctivas, respecto al fenómeno de la deforestación amazónica.

Al ser un dispositivo de observación terrestre que desempeñará su función en órbita, esta estructura mecánica cuenta con múltiples consideraciones que son fundamentales para el cumplimiento de su función: Debe contar con un diseño liviano y versátil, debido a las condiciones de funcionamiento del Cubesat, adicionalmente debe ser diseñado para requerir el mínimo mantenimiento posible ya que se encuentra en órbita, adjunto a esto se debe asegurar que los materiales seleccionados para el prototipo soporten las cargas y características de la misión.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

Para el diseño de la cámara multispectral como carga útil de un satélite con sus respectivas consideraciones, se tomaron como referencia y material de apoyo libros, artículos y tesis de grado; existen múltiples referencias que fueron utilizadas durante el desarrollo del proyecto y los referentes principales serán mencionados a continuación.

4.1.1 Libros.

Satélites Hiperespectrales y Diseño de Sistemas (“Hyperspectral Satellites and System Design”) (Shen-En Qian, Taylor and Francis Group, 2020).

“Es el primer libro sobre este tema. Proporciona un análisis sistemático y un diseño detallado de todo el proceso de desarrollo de satélites hiperespectrales.

Derivado de la experiencia de primera mano de 25 años del autor como líder técnico de misiones espaciales en la Agencia Espacial Canadiense, el libro ofrece a ingenieros, científicos y tomadores de decisiones conocimientos detallados y pautas sobre el diseño de sistemas de satélites hiperespectrales, compensaciones, modelos de rendimiento y simulación, optimización desde el componente hasta el nivel del sistema, diseño de subsistemas y estrategias de implementación. Esta información ayudará a reducir el riesgo, acortar el período de desarrollo y reducir el costo de las misiones de satélites hiperespectrales”⁹

Además de brindar un contexto completo sobre los satélites con cámaras hiperespectrales y el funcionamiento a nivel óptico, el capítulo 8 del libro denominado “Diseño térmico y mecánico”, brinda información detallada sobre las consideraciones que se deben tener en cuenta en la selección de materiales, los

⁹ QIAN, Shen-En. *Hyperspectral Satellites and System Design*. [s.l.]: Taylor & Francis Group, 2020. 632 p. ISBN 9780429565649.

mecanismos en la estructura de un satélite y distintos ejemplos de proyectos de este tipo realizados en los últimos años.

4.1.2 Artículos.

Optimización topológica y fabricación aditiva aplicada a un soporte de cámara para un CubeSat 3U (M Serrano, E M Andrés e I González, 2021)

En este trabajo se presenta un análisis y optimización de un soporte de cámara CubeSat 3U. A través del software OptiStruct Inspire de Altair, se logra una reducción de masa de más del 85%, cumpliendo con todos los requisitos de diseño. Se fabrica un prototipo del soporte de la cámara en PLA utilizando una impresora 3D Artillery Genius. Este trabajo muestra las oportunidades prometedoras para el diseño con el uso de software especializado, y sus ventajas para la industria espacial.¹⁰.

Este artículo presentado en la Conferencia Internacional de la Sociedad de Ingeniería de Manufactura (MESIC 2021), se muestra la aplicación de la manufactura aditiva en el prototipado de un soporte para la cámara de un satélite tipo Cubesat 3U, de igual forma, indica el proceso de optimización topológica implementado para dicha pieza, con el requerimiento de mantener suficiente rigidez para soportar las cargas de lanzamiento.

Diseño e Implementación de Arquitectura de Plataforma para Cubesat 3U (Sua Song, Hongrae Kim,y Young-Keun Chang, 2018)

Este documento describe el concepto principal y el desarrollo de una arquitectura de plataforma estándar de 3U Cube Satellite, cuyo diseño y rendimiento se implementaron y verificaron mediante el desarrollo de KAUSAT-5 3U CubeSat. El rendimiento de KAUSAT-5 que adopta la

¹⁰ SERRANO, M.; ANDRÉS, E. M. y GONZÁLEZ, I. Topology optimization and additive manufacturing applied to a camera bracket for a 3U CubeSat. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [en línea]. 1, octubre, 2021. vol. 1193, no. 1 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 012092. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1193/1/012092>>. ISSN 1757-899X.

plataforma estándar se verificó montando el VSCMG (Giro de momento de control de velocidad variable), que es una carga útil para demostración técnica, en la parte inferior de la plataforma y la cámara infrarroja (IR), que es la otra carga útil para la misión científica, en la parte superior. El 3U CubeSat equipado con la cámara óptica electrónica está en desarrollo implementando la plataforma estándar para reducir el costo y el cronograma de desarrollo al minimizar la verificación adicional.¹¹.

El artículo presenta de manera detallada el desarrollo de la arquitectura de un satélite tipo Cubesat 3U, de igual forma recalca la importancia de los ensayos vibratorios de esta clase de aplicaciones mecánicas e indica el procedimiento, condiciones y resultados de las pruebas de vibraciones aleatorias y choque.

4.1.3 Tesis.

Diseño estructural de un sistema CubeSat con recubrimiento de barrera térmica (Jorge Enrique Herrera Arroyave, 2015)

La estructura de un satélite juega un papel importante en el segmento de lanzamiento de una nave espacial, debido a que soporta las cargas estáticas, sinusoidales (debido a los motores), así como también el ruido generado durante el vuelo y las vibraciones de choque generadas por la separación de las partes del cohete en las diferentes etapas de lanzamiento (la ignición y la expulsión del carenado) [Navarrete, 2013]. Una vez en órbita, la estructura protege la carga útil del entorno espacial, es por esta razón que la estructura debe cumplir con los requerimientos estructurales con el fin de garantizar sus propiedades mecánicas, así como también los requerimientos de masa, volumen y forma.¹²

4.2 REFERENTES TEÓRICOS

¹¹ SONG, Sua; KIM, Hongrae y CHANG, Young-Keun. Design and Implementation of 3U CubeSat Platform Architecture. En: International Journal of Aerospace Engineering [en línea]. 24, diciembre, 2018. vol. 2018 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 1-17. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1155/2018/2079219>>. ISSN 1687-5974.

¹² HERRERA ARROYAVE, Jorge Enrique. Diseño estructural de un sistema CubeSat con recubrimiento de barrera térmica [en línea]. Trabajo de grado. San Nicolás de los Garza, Nuevo León: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2015 [consultado el 28, julio, 2022]. 139 p. Disponible en Internet: <<https://core.ac.uk/download/pdf/76599666.pdf>>.

Para realizar un trabajo de investigación, como lo es una tesis de grado, es de vital importancia ampliar y profundizar en el área específica en la que se desarrolla el proyecto; esto con el fin de contar con las suficientes bases teóricas que permitirán el desarrollo adecuado del mismo, mediante el cumplimiento de los objetivos planteados; a partir de lo anterior, se establecen los conceptos fundamentales para el desarrollo del proyecto.

4.2.1 Nanosatélites Un nanosatélite corresponde a cualquier tipo de satélite que tenga una masa menor a 10kg; este tipo de dispositivos tiene la capacidad de cumplir funciones similares a los de tamaño convencional, pero con la diferencia de que llevan a cabo funciones muy específicas en órbita baja (800 km - 1600 km de altitud)¹³ .

Si se requiere que el nanosatélite cumpla funciones más complejas, con mayor alcance, se requiere generar una constelación de nanosatélites, donde estos se agrupan aumentando el respaldo y calidad de servicios o funciones que ofrecen, siendo más sencillo renovar una parte de la constelación cada 2-4 años, sin necesidad de desmontar el satélite de forma completa, lo que permite aumentar la vida útil del sistema.

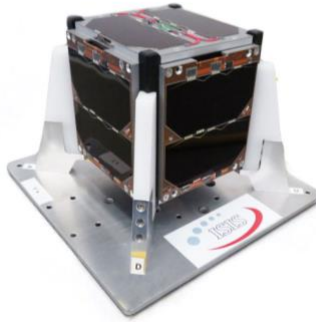
4.2.2 Cubesats Un Cubesat corresponde a un estándar de medida representada en un cubo de 10 cm de arista, el cual se muestra en la figura 1; cuenta con una masa que oscila entre 1 kg - 1.3 kg.

El desarrollo de este estándar se inició en 1999 entre la Universidad Politécnica Estatal de California (Cal Poly) y la Universidad de

¹³ LACCEI LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN CONFERENCE - INTERNATIONAL COMPETITION OF STUDENT POSTERS AND PAPERS (LACCEI 2012) (10: 2012, julio, 23-27, julio: Ciudad de Panamá, Panamá). Montaje e implementación de una estación terrena satelital para el seguimiento de satélites de órbita baja. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2012, 10p.

Stanford. La intención original del proyecto CubeSat fue proporcionar un acceso asequible al espacio para los investigadores de las universidades¹⁴.

Figura 1. Unidad Cubesat



Fuente: ISIS SPACE. *1U CubeSat Bus*. [En línea] [Citado el 1 de agosto de 2022]
Disponible en: <https://www.isispace.nl/product/1u-cubesat-bus/>.

La incorporación de la medida estándar Cubesat al mercado, ha permitido que las empresas fabriquen este tipo de componentes en masa, ofreciendo piezas listas para usar, permitiendo así el fácil acceso a este tipo de tecnología y la disminución de costos asociados con el transporte y despliegue del dispositivo en el espacio.

4.2.2.1 Elementos principales de un Cubesat Un Cubesat se encuentra formado por dos componentes principales, evidenciados en la figura 2.

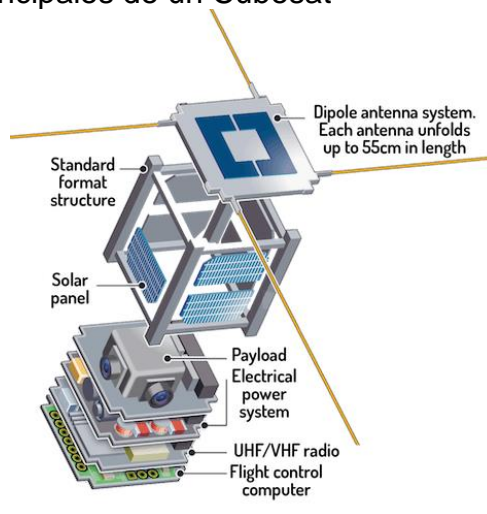
- **Carga útil:** Corresponde al conjunto de elementos que cuentan con la función de llevar a cabo la misión para la cual fue desarrollado el satélite; es decir, es la encargada de transmitir la información útil. Actualmente, la carga útil de los cubesats suele tener campos de estudio y acción amplios, como lo son la observación terrestre, monitoreo de señales, comunicaciones, entre otras

¹⁴ GUÍA BÁSICA de nanosatélites | Alén Space [Anónimo]. Alén Space [página web]. [Consultado el 1, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <<https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>>.

aplicaciones científicas. Entre sus componentes se encuentran paneles solares, sistema eléctrico y de comunicaciones.

- Plataforma: Estructura encargada de proteger y preservar el funcionamiento de los elementos que componen la carga útil del satélite, garantizando especialmente que los elementos de comunicación que se encuentran en órbita puedan cumplir su propósito.

Figura 2. Elementos principales de un Cubesat



Fuente: ALÉN SPACE. *Guía básica de nanosatélites* [En línea]. [Citado el 2 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites>.

4.2.2.2 Subsistemas de un Cubesat Para que se pueda llevar a cabo la misión satelital, el Cubesat se encuentra conformado por múltiples subsistemas que aportan en gran medida a la preservación y correcto funcionamiento de los componentes de la carga útil y de todo el sistema.

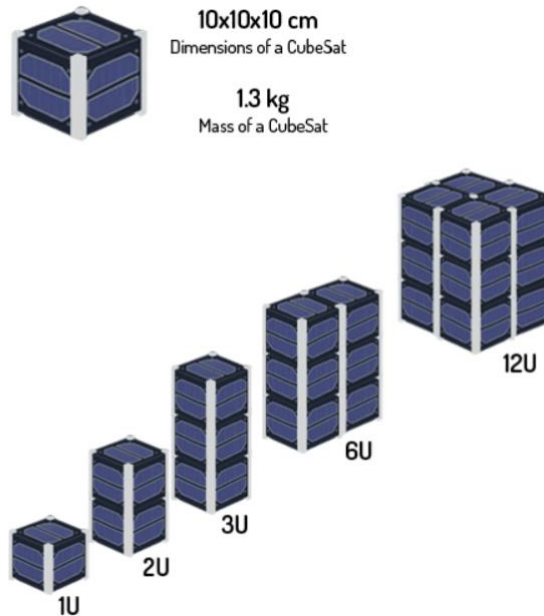
- Subsistema estructural: Encargado de diseñar, implementar y manufacturar la estructura donde se instalan los subsistemas, validando su uso en pruebas de resistencia, esfuerzos y vibraciones

- Subsistema de comunicaciones: Su función es garantizar la recepción y envío de información o comandos a las estaciones terrenas, compuesto principalmente por antenas y transpondedores.
- Subsistema de computador de vuelo: Almacenamiento y ejecución de la programación que permite la emisión de comandos a todos los subsistemas.
- Subsistema de potencia: Encargado de la generación, almacenamiento, suministro y regulación de energía a todos los subsistemas del satélite, compuesto principalmente por paneles solares y baterías.
- Subsistema de control térmico: Su función primordial es garantizar el funcionamiento de los componentes del satélite, dado el rango de temperatura requerido, se validan sus funciones mediante pruebas y simulaciones térmicas.
- Subsistema de control de actitud: Garantiza el posicionamiento óptimo del satélite para la recepción y transmisión de información.
- Subsistema de propulsión: Se encarga de la regulación de la velocidad del dispositivo para mantenerlo en órbita o trasladarlo.

4.2.2.3 Tipos de Cubesat A partir de la incorporación de la unidad “Cubesat” en el mercado aeroespacial y la facilidad de acceder a tecnología aeroespacial, se inició el desarrollo de los satélites tipo Cubesat de mayor tamaño basados en la medida estándar de 1 unidad. En los modelos estandarizados cuentan con dimensiones y disposiciones como se evidencia en la figura 3, algunos de ellos se encuentran enlistados a continuación:

- 2U: 20x10x10 cm
- 3U: 30x10x10 cm
- 6U: 30x20x10 cm
- 12U: 30x20x20 cm

Figura 3. Modelos estándar de Cubesat



Fuente: ALÉN SPACE. *Guía básica de nanosatélites* [En línea]. [Citado el 2 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites>.

4.2.3 Banda Espectral Las bandas espectrales corresponden a la capacidad de un sistema para capturar información en rangos determinados del espectro electromagnético; se encuentra definida bajo su perfil de transmisión, refiriéndose a la fracción de intensidad luminosa transmitida por una longitud de onda dada.¹⁵

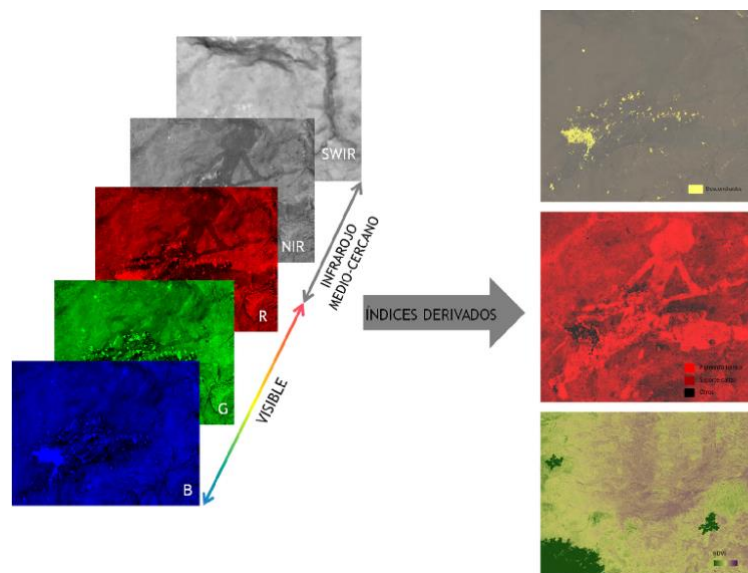
4.2.4 Imágenes multiespectrales Una imagen multiespectral corresponde a una matriz de datos numéricos que representan la intensidad de energía electromagnética ya sea emitida o reflejada por distintos objetos que se encuentran en la superficie terrestre.

¹⁵ SILVESTER, Sandra. *Óptica Física*. [Material de clase]. Departamento de Materias Básicas, Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina. [En línea] [Citado el: 3 de agosto de 2022.] disponible en: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/\(4\)%20POLARIZACI%C3%93N.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/(4)%20POLARIZACI%C3%93N.pdf)

El principal objetivo de este tipo de imágenes es poder detectar ciertos componentes que solo se ven en ciertas bandas del espectro de luz o que tienen un mayor valor numérico en bandas concretas.¹⁶

La combinación de imágenes adquiridas en distintas bandas del espectro de luz dan origen a las multiespectrales, las cuales se pueden observar en la figura 4.

Figura 4. Ejemplo de las imágenes derivadas del análisis multiespectral en vegetación



Fuente: LOPEZ, Sebastián, *et al. Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multiespectrales. Ensayos en la cueva del tío Garroso*. [En línea] 2013. [Citado el: 02 de agosto de 2022.] disponible en: https://www.researchgate.net/publication/259338560_Metodos_de_documentacion_analisis_y_conservacion_no_invasivos_para_el_arte_rupestre_postpaleolitico_ra

¹⁶ LEBRON CASAS, Luis. Desarrollo de cámara multiespectral: captura y análisis de sus imágenes [en línea]. Trabajo Fin de Grado. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2016 [consultado el 2, agosto, 2022]. 12 p. Disponible en Internet: <https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/tfg_49267/Desarrollo_de_camara_multiespectral_captura_y_analisis_de_sus_imagenes-Luis_Lebron_Casas.pdf>.

4.2.5 Cámara multispectral Es un dispositivo con la capacidad de detectar y capturar múltiples espectros de luz, generando imágenes que contenga la información e índices necesarios para cumplir un propósito particular. Este tipo de cámaras puede llegar a procesar la información de entre 6 y 10 bandas espectrales distintas.

4.2.5.1 Elementos de una cámara multispectral Para que una cámara multispectral funcione de manera adecuada debe contener los siguientes elementos en su estructura:

- Sistema óptico: Corresponde al conjunto de elementos, entre los cuales se encuentran los lentes y sensores de captación de luz dispuestos en una posición determinada, con el objetivo de formar una imagen gracias a la convergencia de los rayos generados por el objeto.
- Hardware electrónico: Hace referencia a todos los componentes electrónicos que contribuyen al procesamiento de imágenes, entre los cuales se encuentran: sensores, tarjetas gráficas, matriz de pruebas lógicas de campo (FPGA), elementos de administración de energía, entre otros.
- Computador a bordo: El objetivo de la presencia de un computador a bordo, radica en la comunicación y configuración de distintos elementos que conforman la cámara. En este dispositivo se deben almacenar las imágenes capturadas para ser procesadas posteriormente.
- Estructura mecánica: Corresponde al diseño y validación de las estructuras de soporte de los elementos que conforman la cámara. De igual forma debe garantizar el cumplimiento de los requerimientos del sistema y la integración de todos los componentes.

4.2.5.2 Factores que influyen en el desempeño de la cámara multiespectral Una cámara multiespectral, al ser un dispositivo de tamaño reducido y sometido a condiciones externas consideradas abruptas, en especial las que tienen propósitos de vuelo u observación espacial, se presentan factores externos que pueden deteriorar el funcionamiento de la cámara, entre los que se encuentran:

4.2.5.2.1 Esfuerzos Bajo las condiciones extremas a las que puede ser sometido el dispositivo en momentos de lanzamiento, los esfuerzos que se dan a raíz de las fuerzas generadas por las aceleraciones en el sistema son considerables, por tanto se debe realizar el análisis de esfuerzos pertinentes para preservar la funcionalidad de la estructura.

Estas condiciones generan esfuerzos estructurales que determina la vida del CanSat desde el instante que realiza su primer lanzamiento, los esfuerzos críticos se presenta durante el lanzamiento, en este tiempo existen fuerzas que se pueden considerar como estacionarias ejemplo de ello el empuje, otras son de comportamiento transitorio al momento de apagar y encender un motor del cohete, por otro lado se encuentran las fuerzas acústicas, que son ondas con varias frecuencias que causan vibración aleatoria en la estructura, el choque pirotécnico provocado por la explosión comúnmente utilizado para separar etapas del cohete produce vibración de alta frecuencia con valores mayores a 1000 Hz¹⁷.

4.2.5.2.2 Vibraciones La cámara experimenta condiciones de despegue y vuelo con aceleraciones considerables, se deben diseñar estructuras con suficiente rigidez para evitar que el sistema entre en resonancia.

¹⁷ GÓMEZ ROA, Antonio, et al. Análisis dinámico estructural de satélite educativo cansat. En: Computación y Sistemas [en línea]. 1, julio, 2018. vol. 22, no. 2 [consultado el 4, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.13053/cys-22-2-2942>>. ISSN 2007-9737.2018. vol. 2018 [consultado el 4, agosto, 2022], p. 1-17. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1155/2018/2079219>>. ISSN 1687-5974.

Mediante softwares especializados, es posible realizar el análisis y cálculo estructurales, siendo sometido a condiciones de vibraciones, frecuencias naturales y formas modales.¹⁸ Este comportamiento dinámico se analiza mediante la siguiente ecuación, bajo ciertas consideraciones:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F, (1)$$

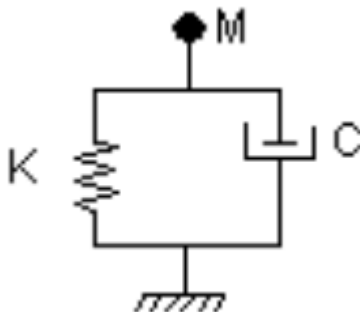
Donde, M corresponde a la matriz de masa, C hace referencia a la matriz de amortiguamiento y K indica la matriz de rigidez. Con referente a los subíndices, \ddot{u} es el vector de aceleración nodal, \dot{u} indica el vector de velocidad nodal, u corresponde el vector de desplazamiento nodal. F , por su parte, es el vector de fuerzas nodales.

La ecuación (1), se interpreta también como un balance de fuerzas, representado en el diagrama expuesto en la figura 5:

- $M\ddot{u}$: Fuerza Inercial
- $C\dot{u}$: Amortiguamiento
- Ku : Rigidez
- F : Fuerza aplicada

Figura 5: Diagrama representativo de la Ecuación de movimiento

¹⁸ MORGAN, Kelly. Shock & Vibration using ANSYS Mechanical. En: ANSYS INC [en línea] [consultado el 4, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2021/02/Shock_and_Vibration_using_ANSYS_Mechanic.pdf>.



Fuente: MORGAN, KELLY. *Shock & Vibration using ANSYS Mechanical*. ANSYS INC. [En línea]. [Citado el: 04 de agosto de 2022.] disponible en: https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2021/02/Shock_and_Vibration_using_ANSYS_Mechanic.pdf

Cabe resaltar que para la resolución del sistema y obtención de información fundamental, como las frecuencias naturales, el valor de la matriz de amortiguamiento y la fuerza, deben ser igual a 0; por tanto la ecuación (1) quedaría reducida a:

$$M_{\ddot{u}} + C_{\dot{u}} = 0, (2)$$

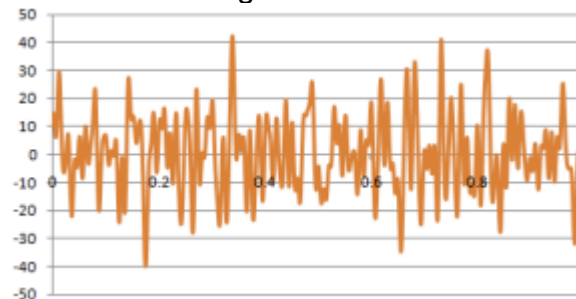
4.2.5.2.2.1 Análisis modal Es considerado el análisis dinámico fundamental para los análisis referentes a vibraciones, es utilizado para determinar las características vibratorias de las estructuras como son:

- Frecuencias naturales: Frecuencias a las que la estructura tiende a vibrar naturalmente.
- Formas de modo: Determina la manera en la que la estructura vibra en ciertos rangos de frecuencia.
- Factores de participación del modo: Hace referencia a la cantidad de masa que interviene en una dirección dada para cada modo.

La ventaja fundamental de este análisis es que permite evaluar de forma detallada el desempeño del sistema, evitando las frecuencias naturales para evitar el fenómeno de resonancia.

4.2.5.2.2 Análisis de vibraciones aleatorias Este tipo de análisis es muy frecuente en las etapas de lanzamiento y vuelo de dispositivos aeronáuticos, ya que bajo estas condiciones las amplitudes de estas frecuencias varían de forma aleatoria a través del tiempo, como se muestra en la figura 6, por lo tanto es imprescindible describir y cuantificar la excitación.

Figura 6: Entrada aleatoria en un rango de frecuencias de 0 -100 Hz



Fuente: MORGAN, KELLY. *Shock & Vibration using ANSYS Mechanical*. ANSYS INC. [En línea]. [Citado el: 04 de agosto de 2022.] disponible en: https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2021/02/Shock_and_Vibration_using_ANSYS_Mechanic.pdf

Para realizar de manera óptica el análisis de vibraciones aleatorias se debe considerar que:

A nivel estructural:

- La masa, el amortiguamiento y la rigidez son invariables en el tiempo.
- Las fuerzas, desplazamientos, presiones y temperaturas que se ejercen sobre el sistema no varían en el tiempo.

- Las fuerzas de amortiguamiento son considerablemente menores a las fuerzas elásticas e inerciales.

4.2.6 Método de elementos finitos Una cantidad considerable de fenómenos y estructuras, pueden ser modelados matemáticamente por medio de ecuaciones diferenciales si se cuenta con condiciones iniciales y de contorno; muchas de estas expresiones matemáticas cuentan con un grado de complejidad alto y es por esto que se requieren de herramientas computacionales para la resolución de problemas por lo cual surge el método de elementos finitos.

El método de elementos finitos se basa en transformar un cuerpo continuo en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos¹⁹.

4.2.7 CAE La ingeniería asistida por computador, corresponde al empleo de softwares especializados con el propósito de resolver problemas de alta complejidad u optimización del diseño de un dispositivo o producto de cualquier campo de acción.

4.2.8 CAD El diseño asistido por computadora corresponde a la implementación de tecnologías, con el objetivo de facilitar los distintos procesos que intervienen en la representación gráfica y computacional de elementos, como son: diseño, modificación, análisis y documentación.

4.2.9 ANSYS 2022 R1.

¹⁹ FRÍAS VALERO, Eduardo. Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos [en línea]. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2004 [consultado el 5, agosto, 2022]. 352 p. Disponible en Internet: <<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6294/06Efv06de23.pdf>>.

Ansys es el Software líder de simulación CAE multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA). Incluye las fases de pre-proceso, resolución y post-proceso en una única plataforma de trabajo. Ansys ejecuta análisis a piezas o conjuntos usados en ingeniería y diseño mecánico que están sometidos a uno o varios fenómenos físicos de manera individual o simultánea.²⁰

4.2.10 SOLIDWORKS 2019

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.²¹

²⁰ CAD-PLM SOFTWARE. ANSYS. [En línea] [Citado el: 5 de agosto de 2022.] disponible en: <https://www.nysplm.com/ansys/>.

²¹ SOLIDBI. SOLIDWORKS. [En línea] [Citado el: 5 de agosto de 2022.] disponible en: <https://solid-bi.es/solidworks/>.

5. DISEÑO MECÁNICO DE LA CÁMARA MULTIESPECTRAL

Para el diseño mecánico y estructural de la cámara multiespectral, se tomaron como puntos de partida, los requerimientos determinados por la estructura y dimensiones de un satélite tipo Cubesat 3U y el diseño óptico que permitirá el funcionamiento del dispositivo.

A partir de lo anterior, en la figura 7 se establece el proceso propuesto para el diseño de la cámara multiespectral.

Figura 7. Diagrama proceso de diseño de cámara multiespectral



Fuente: Elaboración por autores

Nota: En el apartado de anexos, **Anexo A**, se encuentra detallado el proceso de diseño de la cámara multiespectral para un satélite tipo Cubesat 3U.

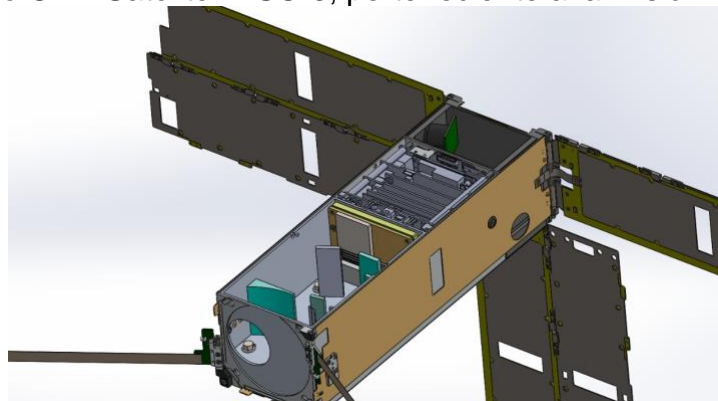
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE

Un satélite tipo Cubesat 3U, cuenta con dimensiones y características estandarizadas (volumen de 300×100×100 mm y una masa máxima de 4 kg)²²; esto con el fin de facilitar la producción en masa y disminuir los costos que la personalización de un dispositivo requiere.

Pero a pesar de esto, de acuerdo a la misión del satélite, los subsistemas y algunas características inherentes a estos pueden variar.

Por esta razón, para el diseño mecánico de la carga útil del satélite MISC-3, representado en la figura 8, es fundamental conocer los subsistemas que conforman el satélite, para determinar las dimensiones disponibles para la cámara multiespectral.

Figura 8. Modelo CAD Satélite MISC-3, perteneciente a la Misión LEOPAR

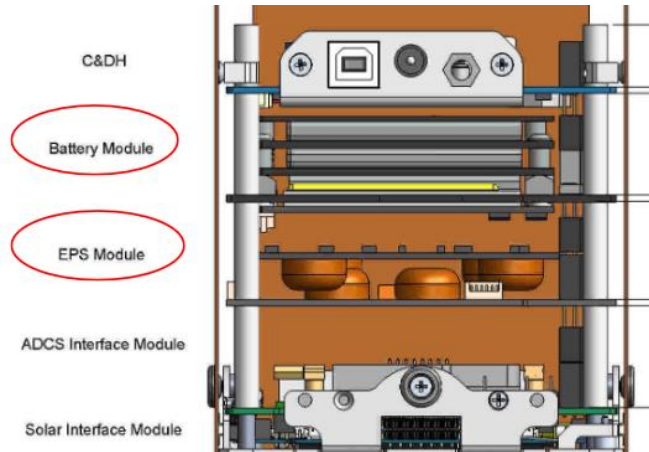


Fuente: Elaboración por autores

²² PUMPKIN SPACE SYSTEMS. CubeSat-class Payload Carrier Nanosatellite Assembly User Manual-Rev B. Manual. San Francisco, CA, 2013 [consultado el 15 de septiembre, 2022]. 72 p.

- EPS: El Sistema de Energía Eléctrica, mostrado en la figura 9, se encuentra conformado por interfaces eléctricas, módulos de baterías y generadores de potencia. Se encuentra ubicado bajo el computador a bordo; cuenta con dimensiones de 95.8x90.17x1.06 mm y una masa de 430g.

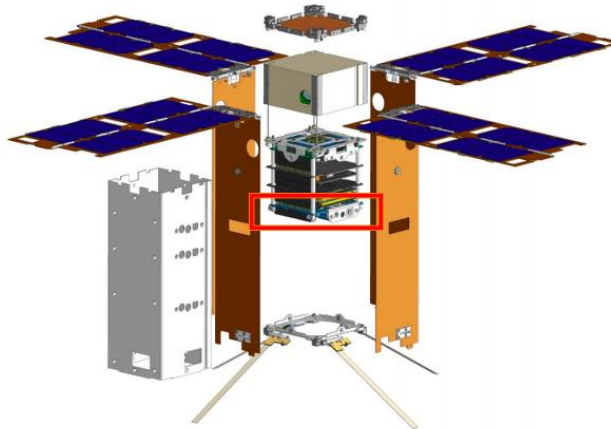
Figura 9. Subsistema EPS



Fuente: DÍAZ, Jonathan. Documento de interfaces del subsistema EPS. [s.l.]: [s.n.], 2021. 17 p. Informe de Análisis de Misión y Estudio de factibilidad para una misión satelital CubeSat 3U.

- OBC: Encargado del almacenamiento y procesamiento de datos, el Computador A Bordo, es parte fundamental de la misión satelital; cuenta con conexión directa al subsistema electrónico de la carga útil. Consta de dimensiones de 95.8x90.17x1.06 mm y se encuentra ubicado en la parte media del satélite, como se evidencia en la figura 10, y cuenta con una masa de 103 g.

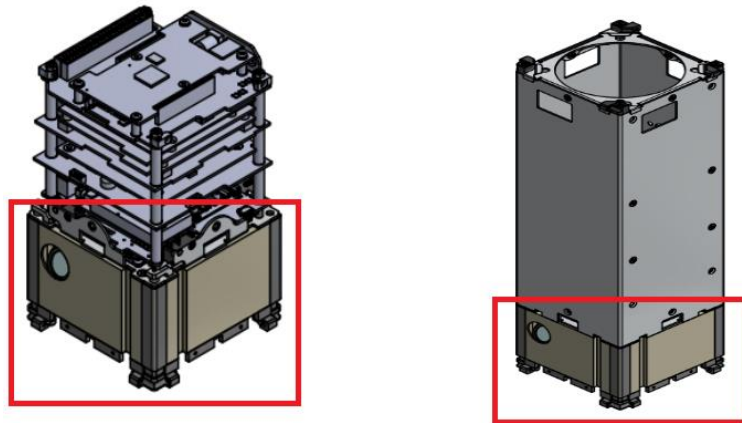
Figura 10: Subsistema OBS



Fuente: Fuente: REALPE, Carlos. Documento de interfaces del subsistema OBC. [s.l.]: [s.n.], 2021. 22 p. Informe de Análisis de Misión y Estudio de factibilidad para una misión satelital CubeSat 3U.

- ADACS: El Sistema de Control y Definición de Actitud consta de 3 ejes en un gabinete herméticamente sellado de 100x100x56 mm, el cual es ideal para la toma de imágenes en tierra, magnetómetro, sensores solares y sensores terrestres CMOS. Se encuentra en el extremo inferior del satélite, como se señala en la figura 11 y cuenta con una masa de 907g.

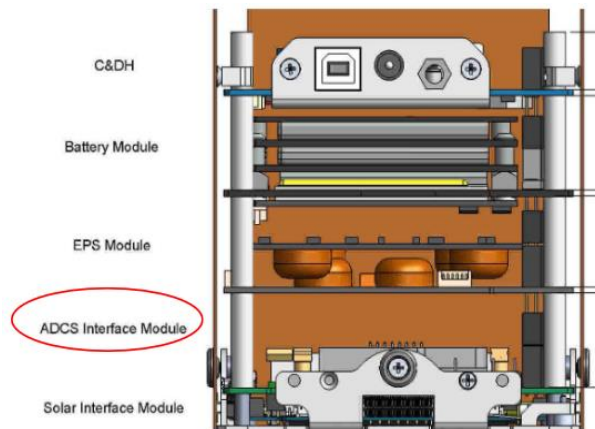
Figura 11: Subsistema ADACS



Fuente: QUIROGA, Carlos. Documento de interfaces del subsistema ADACS. [s.l.]: [s.n.], 2021. 43 p. Informe de Análisis de Misión y Estudio de factibilidad para una misión satelital CubeSat 3U.

- COMM: Subsistema de radio y comunicación del sistema, encargado de recepción y transmisión de información. Se encuentra adscrito al módulo ADACS, indicado en la figura 12 y cuenta con una masa de 91g.

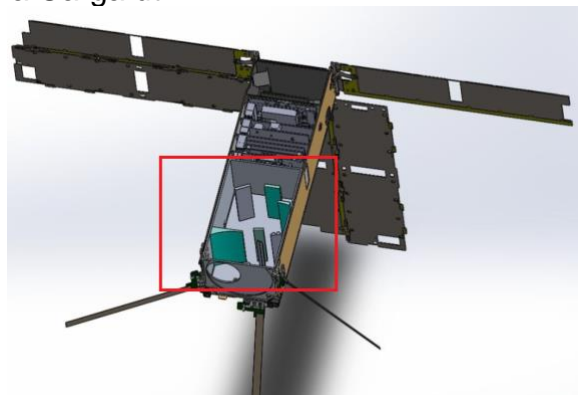
Figura 12: Subsistema COMM



Fuente: DÍAZ, Jonathan. Documento de interfaces del subsistema COMM. [s.l.]: [s.n.], 2021. 19 p. Informe de Análisis de Misión y Estudio de factibilidad para una misión satelital CubeSat 3U.

- Carga útil: Conformado por interfaces mecánicas, ópticas y eléctricas que componen a la cámara multispectral, encargada de llevar a cabo el propósito de la misión. Ubicada en la parte superior del satélite, como se indica en la figura 13 y de acuerdo a las proporciones de volumen y masa de los subsistemas anteriormente mencionados, la carga útil debe contar con un volumen menor a 160x98x98 mm y una masa inferior a 1.2 kg.

Figura 13: Subsistema Carga útil



Fuente: Elaboración por autores

5.2 REQUERIMIENTOS GENERALES DE LA CARGA ÚTIL

Adicional a las restricciones de diseño proporcionadas por las dimensiones, la carga útil, debido a las condiciones extremas a las que se encuentra sometido el satélite en el espacio, debe cumplir con los siguientes requerimientos generales expuestos en la tabla 1:

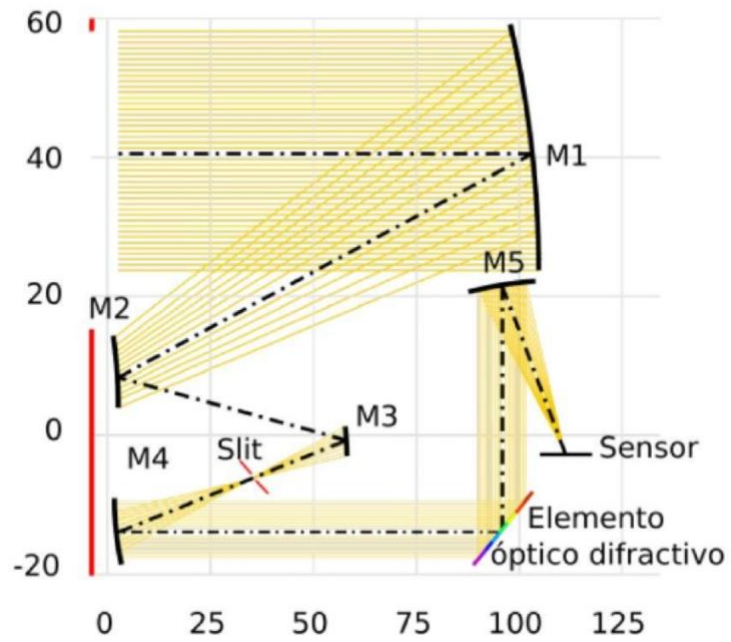
Tabla 1. Determinación de los parámetros generales de la carga útil

REQUERIMIENTOS GENERALES DE LA CARGA ÚTIL
Volumen menor a 16×9.8×9.8cm
Masa inferior a 1.2kg
Masa de las estructuras mecánicas menor a 600g
Tamaño reducido
Precio moderado
Disponibilidad de espacio para dispositivos de almacenamiento de datos
Facilidad de integración de los componentes de cada subsistema

5.3 DISEÑO PRELIMINAR DE LA CARGA ÚTIL

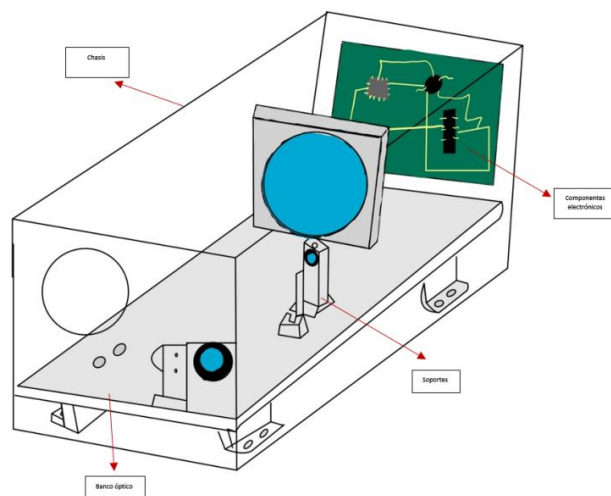
Teniendo en cuenta los requerimientos generales presentados en la tabla 1, junto con la disposición de los elementos que conforman el subsistema óptico, tal como se evidencia en la figura 14 y las dimensiones que requerirá el sistema electrónico, se realiza el primer boceto de carga útil mostrado en la figura 15.

Figura 14. Plano de elementos del sistema óptico



Fuente: Elaboración por grupo de óptica división Carga útil de la misión satelital LEOPAR

Figura 15. Boceto de la cámara multispectral



Fuente: Elaboración por autores

5.4 PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA CARGA ÚTIL.

A partir del modelo inicial, se hizo necesaria la determinación de parámetros de los elementos que conforman la carga útil, esto con el fin de garantizar la funcionalidad de la cámara multiespectral y la óptima integración de sus componentes.

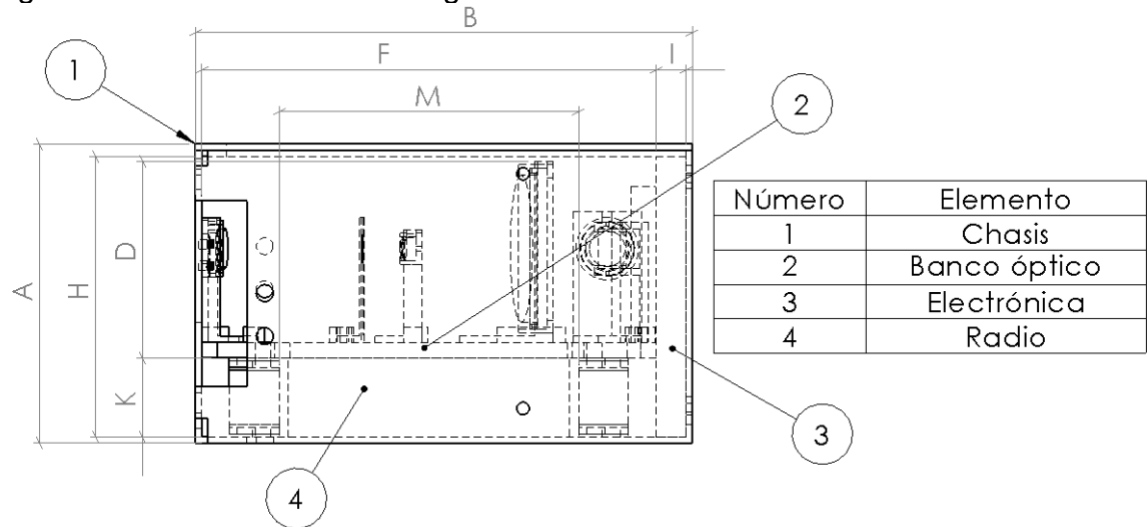
5.4.1 Dimensionamiento de la cámara multiespectral Para garantizar los requerimientos de volumen, masa y disponibilidad de espacio de la cámara multiespectral, es fundamental determinar las dimensiones y cotas imprescindibles de los elementos que conforman la carga útil; estos se encuentran consignados en la tabla 2.

Tabla 2. Dimensionamiento de la carga útil

DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA MULTIESPECTRAL		
ELEMENTO	MEDIDA (mm)	COTA
Altura del chasis	95,89	A
Profundidad del chasis	159,2	B
Ancho del chasis	97,21	C
Altura banco óptico	63	D
Profundidad banco óptico	145,6	F
Ancho banco óptico	93,21	G
Altura del espacio dispuesto para la electrónica	89,89	H
Ancho del espacio dispuesto para la electrónica	93,21	I
Profundidad del espacio dispuesto para la electrónica	9,6	J
Altura del espacio dispuesto para el radio	25,32	K
Ancho del espacio dispuesto para el radio	58	L
Profundidad del espacio dispuesto para el radio	96	M

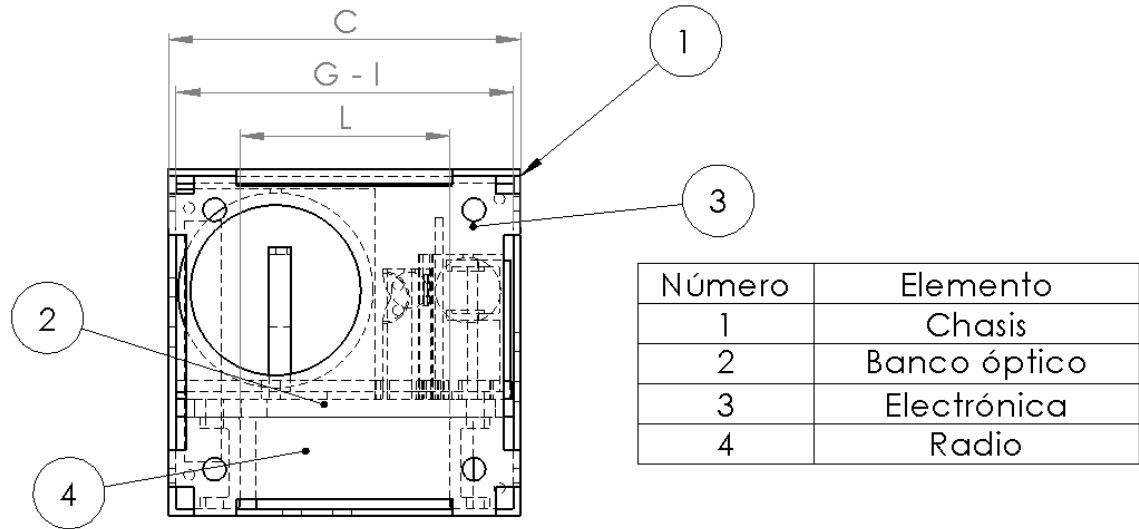
5.4.2 Desarrollo de bocetos a partir del dimensionamiento de la cámara multispectral Teniendo en cuenta las medidas correspondientes a la posición de los elementos fundamentales en la carga útil del satélite, se realiza un boceto digitalizado, evidenciado en las figuras 16 y 17, señalando las dimensiones fundamentales en el diseño del elemento.

Figura 16. Vista lateral de la carga útil



Fuente: Elaboración por autores

Figura 17. Vista frontal de la carga útil

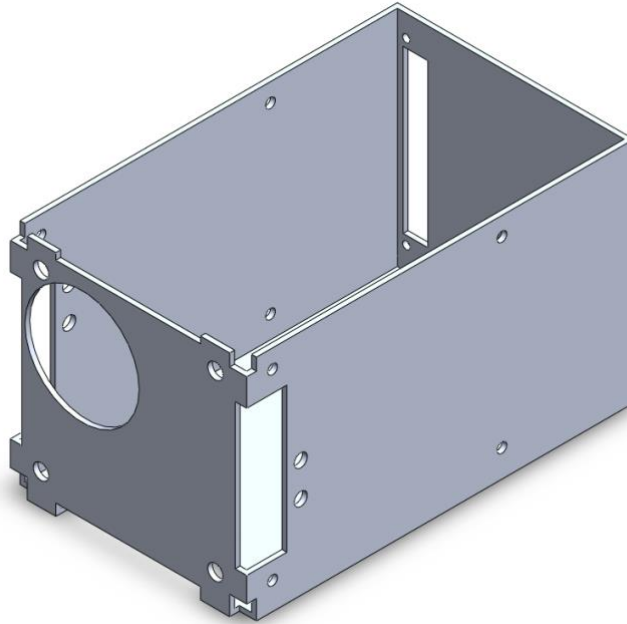


Fuente: Elaboración por autores

5.4.3 Diseño de componentes mecánicos de la carga útil una vez establecido el dimensionamiento general de la cámara multispectral, se realiza el diseño de los componentes mecánicos tales como: Chasis, banco óptico, soportes y elementos de sujeción.

5.4.3.1 Chasis Su diseño mostrado en la figura 18 se basó principalmente en la restricciones de espacio de la carga útil; esta restricción imponía un volumen de 1462.83 centímetros cúbicos, por lo tanto, se estableció que el chasis contaría con dimensiones de 159.2 mm x 97.21 mm x 95.89 mm, y se encuentra formado por 5 láminas mediante sujeción en soldadura. Adicionalmente, en una de las láminas del chasis, se encuentran soldados 4 elementos de anclaje en forma de L, que permitirán la unión con el banco óptico. El material seleccionado para este componente es Aleación Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn, debido a su excelente relación costo-beneficio y sus propiedades de resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, ductilidad, maleabilidad y ligereza, lo hacen idóneo para aplicaciones aeroespaciales. El diseño propuesto cuenta con una masa de 293,76 g.

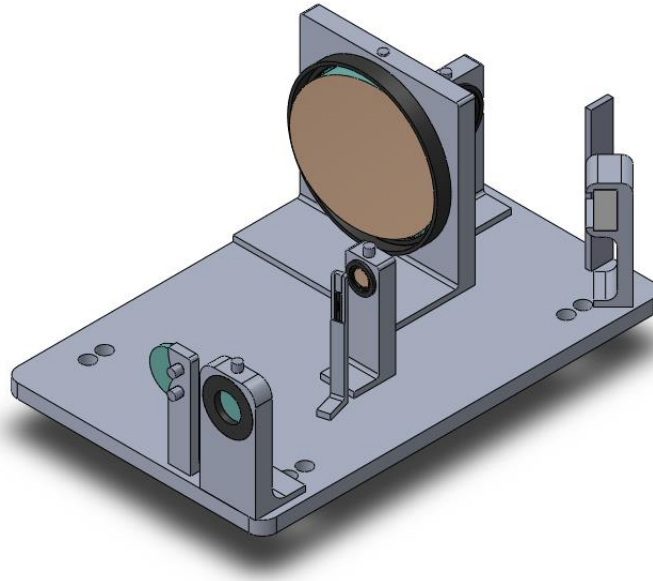
Figura 18. Diseño del chasis



Fuente: Elaboración por autores

5.4.3.2 Banco óptico: Considerando las dimensiones del chasis, el banco óptico es la estructura sobre la cual se posicionarán los elementos del sistema óptico, como se evidencia en la figura 19; es decir, los espejos que permitirán el funcionamiento de la cámara multiespectral y sus respectivos soportes. El banco cuenta con dimensiones de 93.21 mm x 63 mm x 145.6 mm y se encuentra unido a los elementos de anclaje dispuestos en el chasis mediante elementos de sujeción. El material implementado para este elemento es la Aleación Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn, elegido por las propiedades mencionadas en el inciso anterior. El banco óptico cuenta con una masa de 176,76 g.

Figura 19. Diseño banco óptico



Fuente: Elaboración por autores

5.4.3.3 Soportes El diseño de los soportes se encuentra directamente relacionado con la forma de los espejos, la cual se encuentra determinada por la ecuación Schwarzschild (2) para superficies cónicas²³:

$$\frac{Or^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)O^2r^2}} \quad (2)$$

Donde:

O : Curvatura en el vértice de cualquier superficie cartesiana, también conocida como curvatura axial.

K : Constante de Schwarzschild; equivale a la excentricidad de la cónica, elevada al cuadrado.

r : radio de curvatura

²³ SILVA-LORA, Alberto y TORRES, Rafael. Superconical aplanatic ovoid singlet lenses. En: Journal of the Optical Society of America A [en línea]. 25, junio, 2020. vol. 37, no. 7 [consultado el 10, septiembre, 2022], p. 1155. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1364/josaa.392795>>. ISSN 1520-8532.

A partir de lo anterior, cada espejo cuenta con un valor de O y K particular, indicado en la tabla 3, lo cual indica que cada uno contará con propiedades físicas distintas, conllevando a que no todos los soportes tengan la misma forma o dimensiones.

Tabla 3. Propiedades de los espejos

PROPIEDADES DE LOS ESPEJOS		
ESPEJO	K	O
M1	-1.2855294922379	-0.003571429
M2	-8.7946239392175	-0.0075000000000000001875
M3	-1.6869765190548	-0.01526914570393
M4	-0.998321616979	0.0119113481418774
M5	-0.8927213202935	-0.012494991435354

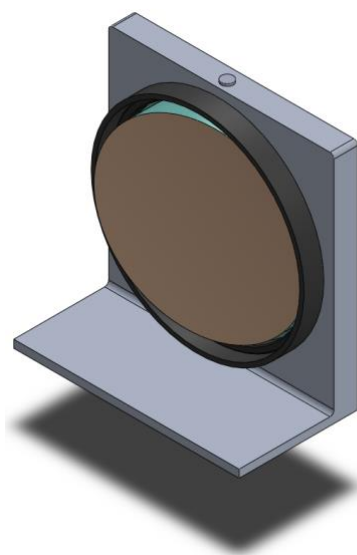
Como requerimiento para los soportes, es necesario que mantengan todos la misma altura tomando como referente M1.

Diseño de soporte genérico: Aplica para los espejos M1, M3, M4 y M5. Se planteó un modelo de soporte en forma de L, como se muestra en la figura 20, manufacturado directamente sobre el chasis, para evitar desplazamientos indeseados en los espejos, afectando directamente a la calidad de la imagen capturada por la cámara multiespectral, al ser manufacturados junto con el banco óptico deben concordar con el material empleado, siendo este la Aleación Aluminio-Magnesio-Manganeso previamente mencionada. Los soportes cuentan con una apertura circular sobre la cual se posicionará cada espejo con sus respectivos elementos de sujeción y con una apertura en la parte superior para insertar un tornillo de apriete; las dimensiones de los soportes se encuentran consignadas en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones de los soporte M1, M3 ,M4, M5

DIMENSIONES DE LOS SOPORTES DE ESPEJOS M1, M3, M4, M5					
ESPEJO	Ancho (mm)	Alto (mm)	Profundidad (mm)	Diámetro de la apertura (mm)	Masa (g)
M1	55	58	30	54	24,59
M3	12	36	15	10	6,2
M4	20	40	18	18	9,97
M5	22	42	16	20	10,87
Total					51,63

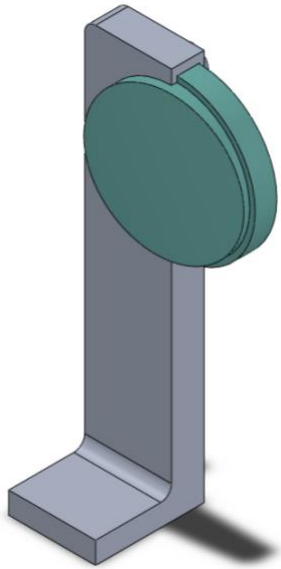
Figura 20: Diseño de soporte genérico



Fuente: Elaboración por autores

Diseño de soporte de M2: Debido a la ubicación del espejo en el sistema óptico y para evitar al máximo las interferencias durante el paso del haz de luz, a través de la configuración de los espejos, se opta por diseñar un soporte que sujetara el espejo de forma lateral, contando con dos perforaciones para insertar los respectivos tornillos de apriete, como se evidencia en la figura 21, contando con una masa de diseño de 2,02 g.

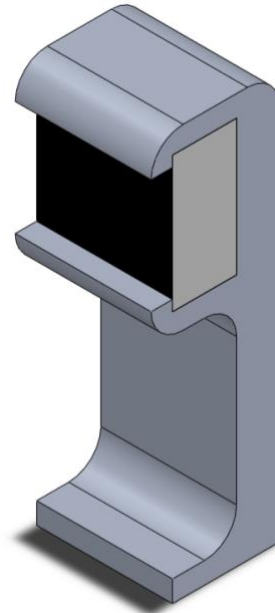
Figura 21. Diseño soporte M2



Fuente: Elaboración por los autores

Diseño soporte grating: Al ser un dispositivo imprescindible para el procesamiento de datos, con un alto nivel de sensibilidad, se optó por diseñar un soporte con dos plataformas evidenciadas en la figura 22, que permiten el ajuste del sensor, con el cual se graduará de forma precisa y disminuye las posibilidades de daño del elemento, cuenta con una masa de 6.74 g.

Figura 22. Diseño soporte del grating



Fuente: Elaboración por los autores

Diseño soporte slit: Para el soporte de este elemento óptico se toma como referencia el modelo genérico, sin embargo al ser una tarjeta, se opta por realizar una apertura en la parte superior presentada en la figura 23 para permitir el deslizamiento del elemento, contando con una masa de 0,83 g.

Figura 23. Diseño soporte del slit



Fuente: Elaboración por los autores

5.4.3.4 Elementos de sujeción Para permitir el acople adecuado entre el espejo y el soporte, se realizó la selección de arandelas de sujeción para cada pareja de elementos, del fabricante Thorlabs, especialista en elementos ópticos, las cuales se encuentran evidenciadas en la figura 24; a continuación se enlistan en la tabla 5 las dimensiones de cada una.

Tabla 5. Diámetros de las arandelas

DIMENSIONES ARANDELAS		
ESPEJO	Diámetro interno de la arandela (mm)	Masa (g)
M1	48,26	0.66
M3	5,84	0,025
M4	12,7	0,09
M5	14,48	0,146
Total		0,921

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: THORLABS. *Retaining Rings*. [Ficha técnica]

Figura 24. Diseño de arandelas



Fuente: Elaboración por los autores

También, dentro de esta categoría de elementos se encuentran los acoples plásticos, exhibidos en la figura 25, manufacturados en PF, que tienen como objetivo mejorar la sujeción del espejo a su respectivo soporte, a continuación se consignan en la tabla 6 sus dimensiones.

Tabla 6. Dimensiones acoples plásticos

DIMENSIONES ACOPLES PLÁSTICOS		
ESPEJO	Diámetro interno del acople (mm)	Masa (g)
M1	51,69	4,03
M3	7,5	0,44
M4	15,5	0,96
M5	17,5	1,09
Total		6,52

Figura 25. Diseño de acoples plásticos



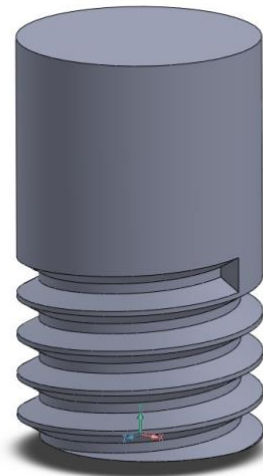
Fuente: Elaboración por autores

- Como elementos de sujeción también se considera la tornillería utilizada, sus propósitos principales son el ensamblaje de los espejos a los soportes y la unión del chasis al banco óptico; se utilizaron dos referencias de tornillos: uno de calibración para la sujeción de los espejos como indica la figura 26 y otro autorroscante para la unión chasis-banco óptico evidenciado en la figura 27. Las características de la tornillería se encuentran definidas en la tabla 7.

Tabla 7. Características de la tornillería

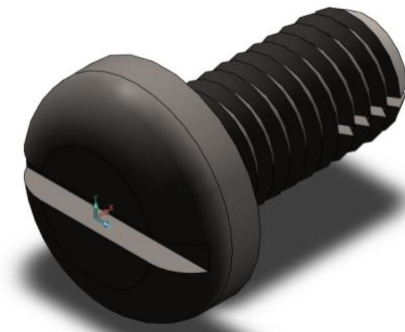
CARACTERÍSTICAS DE LA TORNILLERÍA			
TORNILLO	Tipo de tornillo	Unidades	Masa total (g)
M5X10-4.8	Autorroscante	6	1,3488
TM3X5-4.8	Calibración	4	0,18
Total			1,5288

Figura 26. Tornillo sujeción de espejos



Fuente: Elaboración por autores

Figura 27: Tornillo sujeción unión chasis-banco óptico



Fuente: Elaboración por autores

Teniendo en cuenta las características de los componentes mencionados en el presente apartado, se valida mediante la tabla 8 que el modelo propuesto cumple

con el requerimiento de masa inferior a 600 g. Es importante mencionar, que a pesar de que se cumple el requerimiento, se recomienda implementar un proceso de optimización topológica para reducir en mayor medida la masa de la estructura mecánica de la carga útil.

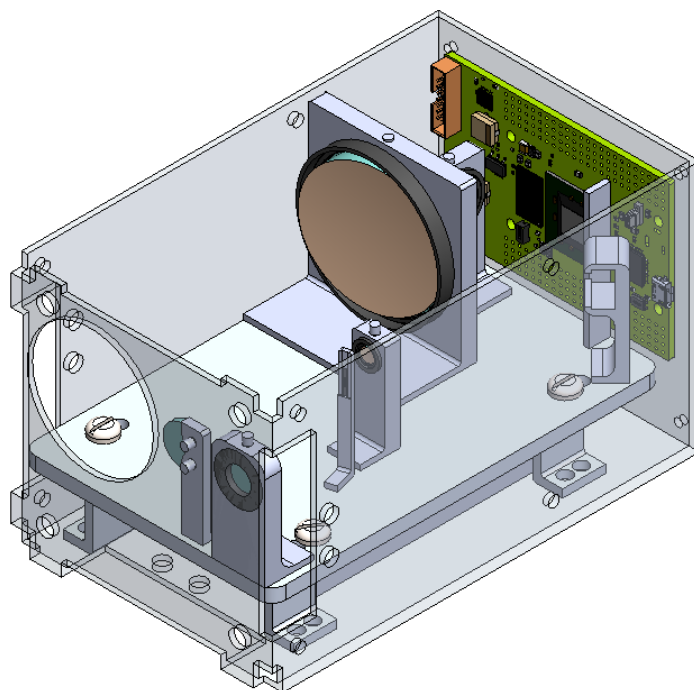
Tabla 8. Masa de la carga útil

COMPROBACIÓN DE MASA ESTRUCTURA MECÁNICA DE LA CARGA ÚTIL	
ELEMENTOS	MASA (g)
Soportes de espejos	51,63
Acoples	6,52
Arandelas	0,921
Tornillería TM3X5-4.8	0,18
Tornillería M5X10-4.8	1,3488
Soportes banco óptico	18,6
Banco óptico	176,76
Chasis	293,76
Total	531,1198

5.5 MODELO CAD

A partir de las consideraciones de diseño a nivel de volumen y los requerimientos específicos de cada componente mecánico, se realiza a través del software Solidworks, el modelo en 3D de la carga útil de la misión satelital LEOPAR, correspondiente a una cámara multiespectral como se muestra en la figura 28.

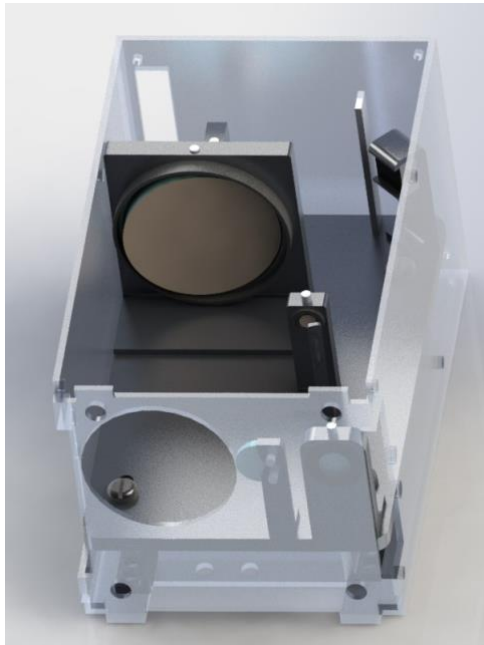
Figura 28. Modelo CAD de la cámara multiespectral en SolidWorks



Fuente: Elaboración por los autores

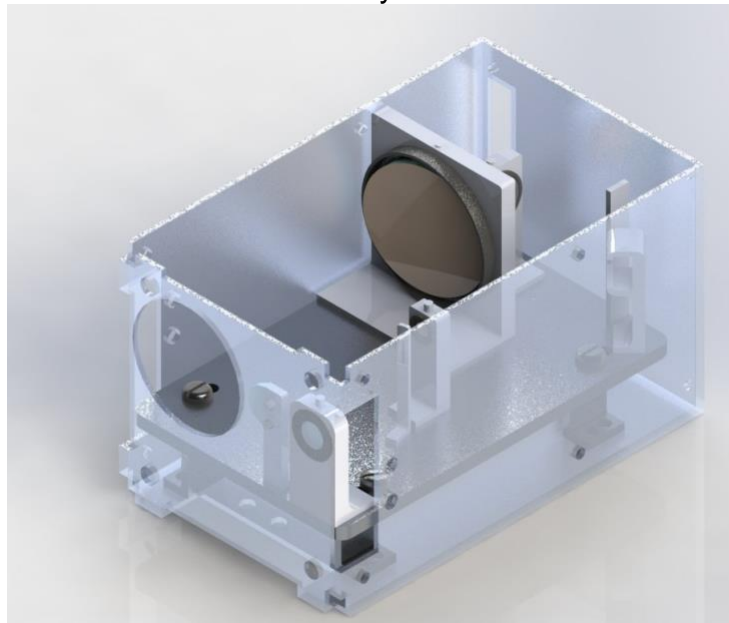
5.5.1 Modelo detallado En el presente apartado se muestra el modelo 3D renderizado de la cámara multispectral, exhibidos en la figura 29 y 30, para visualizar de forma óptima los elementos que la conforman y su respectiva distribución, se muestra de igual forma el banco óptico en la figura 31.

Figura 29. Modelo renderizado del chasis y estructura externa



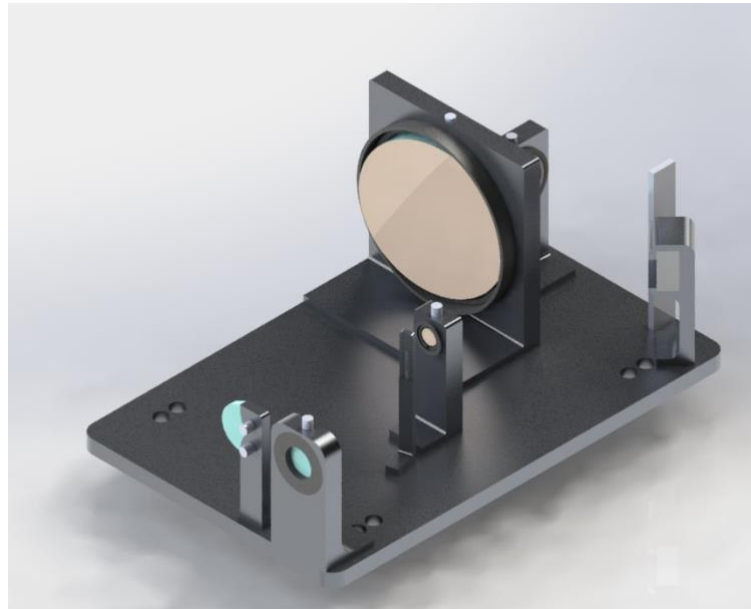
Fuente: Elaboración por los autores

Figura 30: Modelo renderizado del chasis y estructura externa en vista isométrica



Fuente: Elaboración por los autores

Figura 31. Modelo renderizado del banco óptico y los elementos sujetos a este



Fuente: Elaboración por los autores

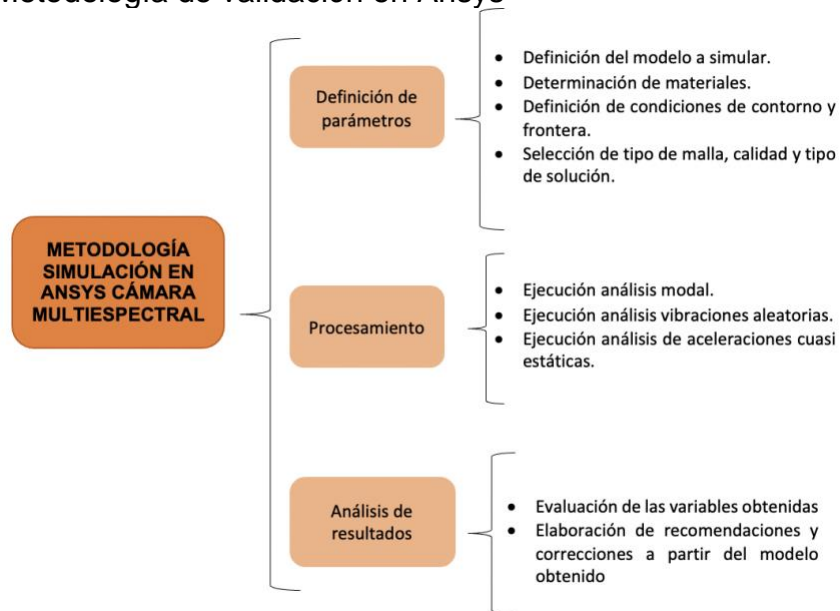
6. VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE MÉTODOS COMPUTACIONALES

A partir del modelo CAD realizado, es fundamental validar si el modelo propuesto cumple a cabalidad con los requisitos operacionales: Presentar frecuencias naturales mayores a 100 Hz y cumplir con las condiciones determinadas por la norma General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects. Para esto se propone el desarrollo de un modelo numérico en Ansys, que permita verificar el cumplimiento de los parámetros estipulados.

6.1 ASPECTOS GENERALES

La validación del modelo propuesto mediante el software Ansys se realizó mediante una metodología compuesta por tres etapas, dispuestas en la figura 32.

Figura 32. Metodología de validación en Ansys



Fuente: Elaboración por autores

El proceso detallado de simulación se encuentra descrito en su totalidad; adjunto en el **ANEXO B**.

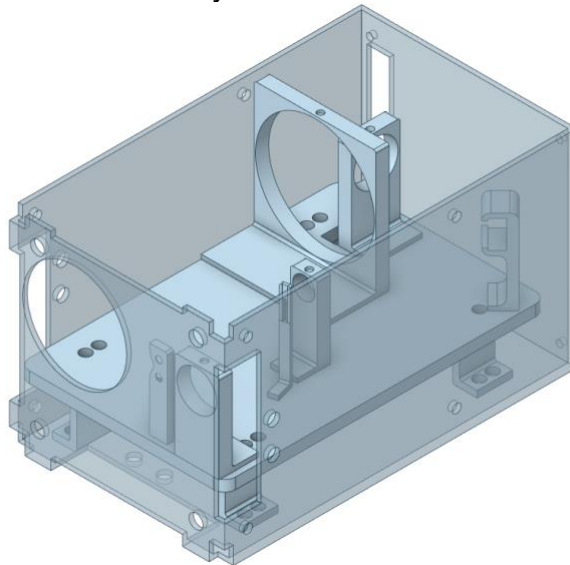
6.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Para el desarrollo de la simulación es fundamental definir de manera acertada las condiciones de contorno a las cuales será sometida la cámara multispectral, esto con el fin de que los resultados obtenidos presenten el mayor grado de fidelidad posible a los esperados en ensayos o pruebas de laboratorio.

A continuación, se enuncian las condiciones fundamentales para la simulación:

- Se realizará el análisis de la totalidad de las estructuras mecánicas de la carga útil: Chasis, banco óptico y soportes, exceptuando elementos de sujeción, tal como se evidencia en la figura 33.

Figura 33. Modelo a evaluar en Ansys

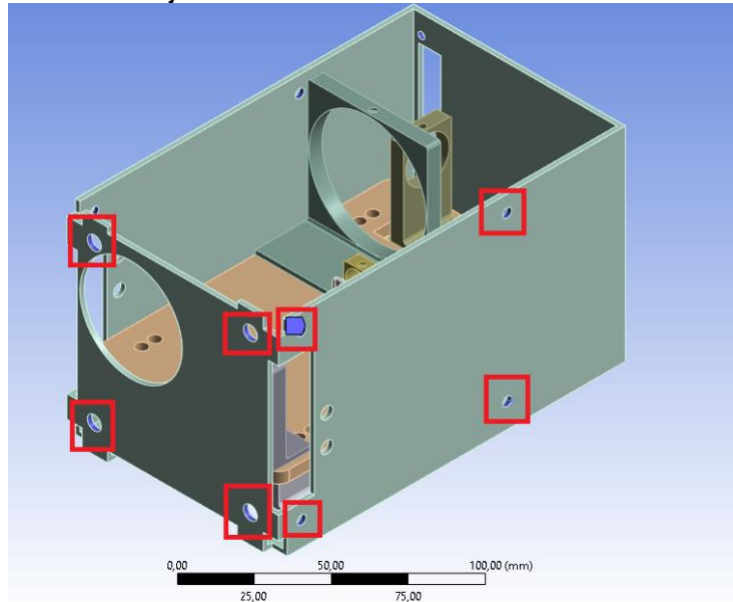


Fuente: Elaboración por autores

- Al realizar la simulación sin los elementos de sujeción, se considera que todas las caras en contacto se encuentran soldadas entre sí. Adicionalmente

se determinan los 16 puntos de anclaje, señalados en la figura 34 del sistema con el bus satelital.

Figura 34. Puntos de anclaje del sistema



Fuente: Elaboración por autores

- El chasis, banco óptico y soportes, se le asignará el material Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn con aplicaciones en el sector aeronáutico debido a la ligereza que proporciona la aleación, el efecto reforzante sobre el aluminio puro, la resistencia a la corrosión y sobre todo su relación costo-beneficio, estas características se presentan debido a las propiedades intrínsecas del material, las cuales se encuentran consignadas en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades Aleación Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn

PROPIEDADES ALEACIÓN ALUMINIO-MAGNESIO-MANGANESO AlMg4,5Mn		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Módulo elástico	70000	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.3897	
Densidad de masa	2660	Kg/m^3
Límite de tracción	345	N/mm^2
Límite elástico	270	N/mm^2
Coefficiente de expansión térmica	2.4e-05	K^{-1}
Conductividad térmica	204	$W/(m \cdot K)$

Fuente: Elaboración por autores

6.3 CONDICIONES DE VALIDACIÓN DE LA CARGA ÚTIL

Los parámetros y las simulaciones a los cuáles será evaluada la carga útil, se encuentran determinados por la normativa *General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects*²⁴ enfocada en establecer las pautas para la verificación ambiental de cargas útiles, subsistemas y componentes del Goddard Space Flight Center (GSFC).

De acuerdo a lo establecido en la normativa, con especial énfasis en la sección “2.4 *Mecánica y Estructura*” se recomienda evaluar la carga útil mediante las siguientes pruebas:

- Análisis modal: El objetivo principal de su ejecución es describir el comportamiento dinámico de la carga útil ante distintas frecuencias, por lo

²⁴ NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. GENERAL ENVIRONMENTAL VERIFICATION STANDARD (GEVS) For GSFC Flight Programs and Projects [en línea]. GSFC-STD-7000A. Greenbelt, Maryland: [s.n.], 2013 [consultado el 17, junio, 2022]. 203 p. Disponible en Internet: <https://explorers.larc.nasa.gov/2019APSMEX/MO/pdf_files/gsfsc-std-7000a_final_3-28-18.pdf>.

tanto este análisis busca definir las frecuencias naturales del sistema, siendo críticas para el mismo, y los desplazamiento en dichas condiciones.

- Vibraciones aleatorias: El propósito de este análisis es observar el comportamiento del sistema al ser sometido a las aceleraciones y frecuencias expuestas en la tabla 10.
- Aceleraciones cuasi estáticas:Consta del estudio del sistema ante ser expuesto a aceleraciones de 10 G, observando el comportamiento tanto de los esfuerzos como desplazamientos.

Tabla 10. Niveles de prueba para cargas útiles menores a 22.7 kg

NIVELES DE PRUEBA PARA CARGAS ÚTILES MENORES A 22.7 Kg		
FRECUENCIA (Hz)	NIVEL ASD (g^2/Hz)	
	VALOR	TOLERANCIA
20	0.026	0.013
20-50	+6 dB/oct	+6 dB/oct
50-800	0.16	0.013
800-2000	-6 dB/oct	-6 dB/oct
2000	0.026	0.013
Total	14.1 G_{rms}	10 G_{rms}

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. *General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects*. [Norma]

6.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

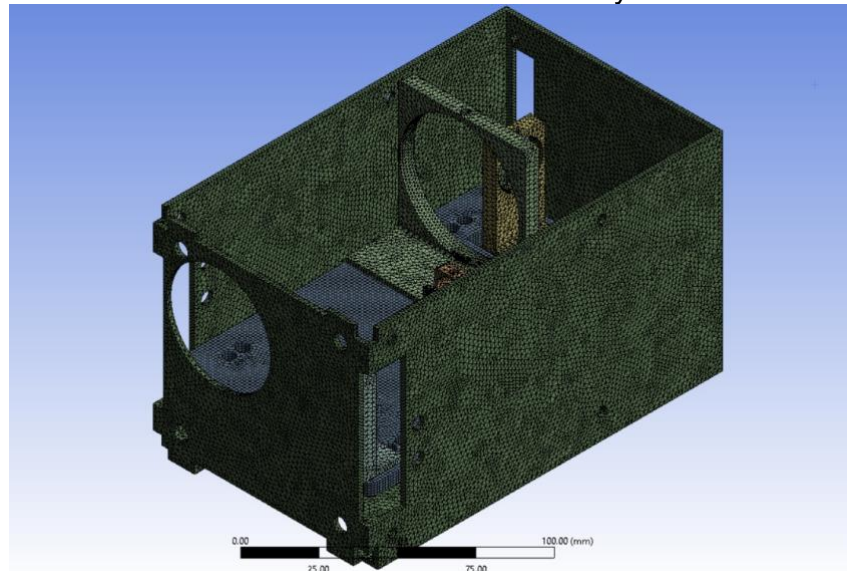
La presente sección tiene como objetivo evaluar los resultados obtenidos al desarrollar los análisis estipulados por la norma *General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects*, y determinar si el modelo desarrollado cumple con los requerimientos designados por esta. El proceso de simulación detallado para cada análisis se encuentra estipulado en el Anexo B.

6.4.1 Mallado y refinamiento El mallado es una parte crucial en el análisis del diseño, el cual consta en dividir el modelo de estudio en una cantidad finita de elementos conectados entre sí en los nodos.

Una malla sin refinamiento, permite visualizar de manera general el comportamiento del modelo, pero al refinar el mallado y aumentando el número de elementos en el que se divide el modelo se obtienen resultados que tienden a converger, por tanto se espera que presente un comportamiento fiel a la realidad.

Al aumentar la calidad del mallado, se aumenta el costo computacional de la operación, es por esto que para los análisis estipulados en el inciso anterior se realizará un refinamiento de malla con 729.983 nodos y 310.670 elementos, como se evidencia en la figura 35, tanto para el análisis modal como para todos los análisis del presente inciso.

Figura 35. Refinamiento de malla con 729.983 nodos y 310.670 elementos



Fuente: Elaboración por autores

6.4.2 Análisis modal Al realizar el análisis modal, se obtienen resultados en referencia a dos variables fundamentales: Frecuencias naturales y deformaciones.

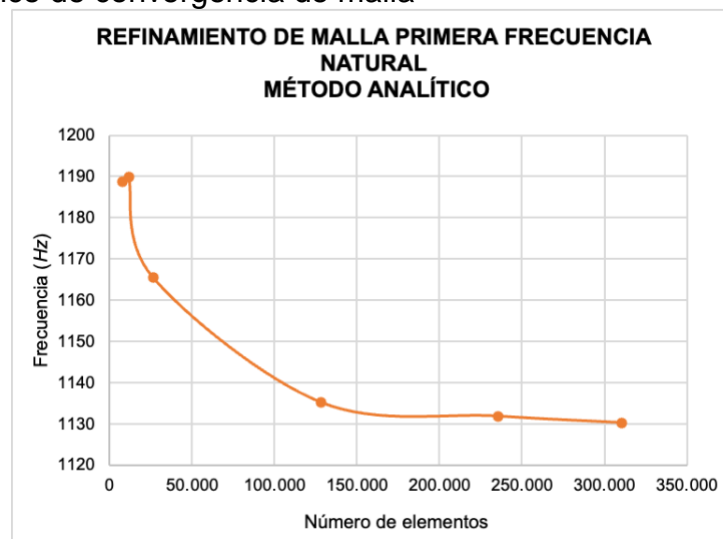
Para el análisis de las frecuencias naturales, se enuncia en la tabla 11, la primera frecuencia natural del modelo al ser sometido a múltiples refinamientos de malla.

Tabla 11. Primera frecuencia natural con distinta calidad de mallado

REFINAMIENTO DE MALLA PRIMERA FRECUENCIA NATURAL	
NÚMERO DE ELEMENTOS	FRECUENCIA (Hz)
7.533	1188,8
11.493	1189,8
26.368	1165,5
128.184	1135,3
235.353	1132,0
310.670	1130,4

A partir de lo anterior y graficado en la figura 36, se puede apreciar una tendencia de convergencia del valor de la primera frecuencia natural a medida que aumenta la cantidad de elementos.

Figura 36. Gráfico de convergencia de malla



Fuente: Elaboración por autores

Se selecciona la calidad superior de malla, que corresponde a la de mayor cantidad de elementos y se establecen las primeras frecuencias naturales del modelo en la tabla 12.

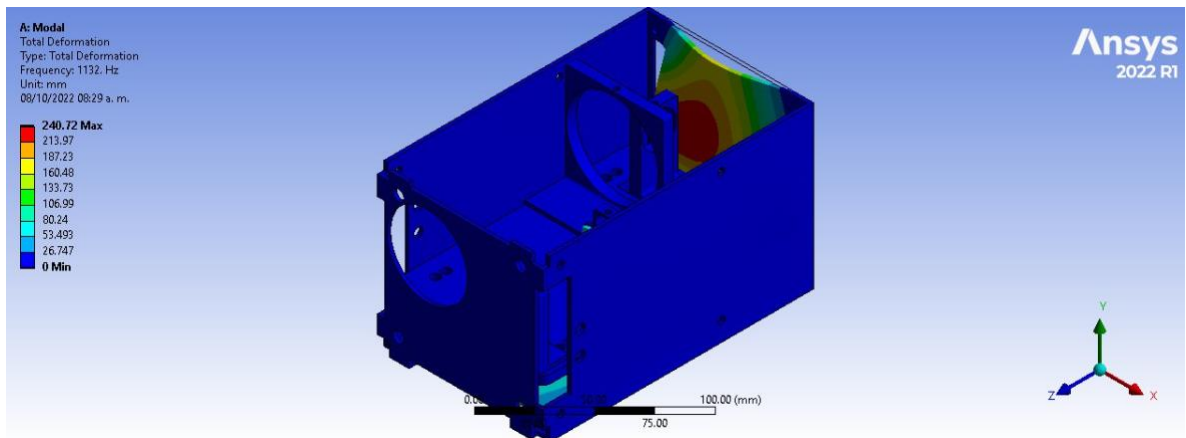
Tabla 12. Primeras frecuencias naturales del modelo con una malla de 310.670 elementos

FRECUENCIAS NATURALES MÉTODO ANALÍTICO AlMg4,5Mn (Hz)
1130,4
1157,4
1185,2
1409,8
1419
1545,8

Al analizar los resultados obtenidos, se afirma que el sistema no entrará en resonancia, ya que la primera frecuencia natural del modelo es mucho mayor a 100Hz, valor establecido en los requerimientos del modelo como la frecuencia máxima de trabajo del sistema.

Con referencia a las deformaciones evidenciadas en la figura 37, se establecen la deformación máxima del sistema en el primer armónico, indicada en la zona de color rojiza, la cual corresponde a 240.72 mm. Esta deformación es considerablemente grande, ya que evidencia de forma clara el efecto que causaría la resonancia sobre el sistema.

Figura 37. Deformación estructura mecánica de la carga útil en el primer armónico



Fuente: Elaboración por autores

6.4.3 Análisis de vibraciones aleatorias En el presente análisis se evalúa el comportamiento del modelo, en relación de esfuerzos y desplazamientos, mediante aceleraciones variables establecidas según la norma *General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects*, como se indica en la figura 38:

Figura 38. Simulación con parámetros establecidos por la normativa

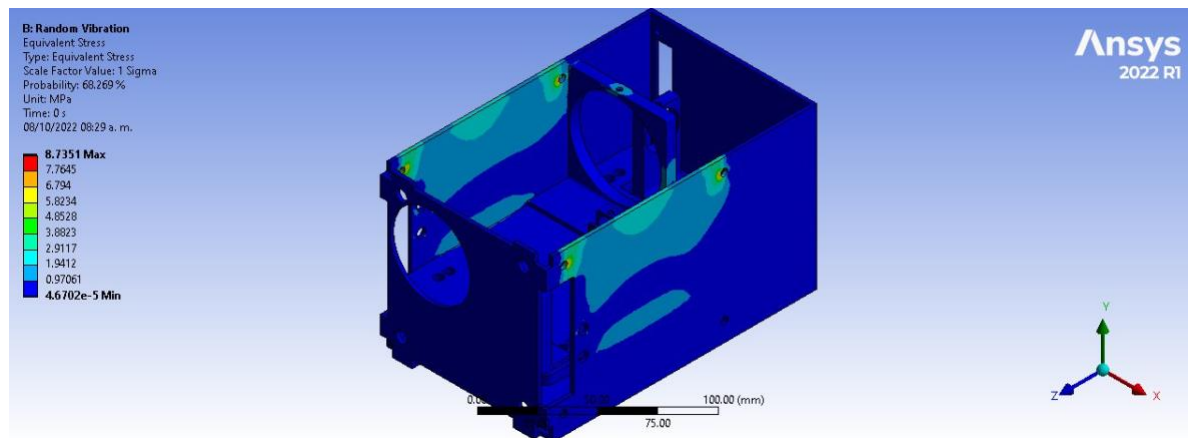


Fuente: Elaboración por autores

De acuerdo a la condiciones pautadas por la normativa para el análisis, el modelo fue sometido inicialmente a 0.026 G con frecuencia de 20 Hz que progresivamente se incrementó hasta 0.16 G, en este punto la frecuencia presentó una variación a 50 Hz y posteriormente hasta los 800 Hz; finalizando el ensayo, la aceleración disminuyó nuevamente hasta los 0.026 G, con una frecuencia de 2000 Hz.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo presentó esfuerzos debido a las aceleraciones. En la figura 39 se evidencia el comportamiento de los esfuerzos debido a la excitación del sistema, en el cual, la coloración en tonalidad roja representa los puntos de mayor concentración de carga y debido a la naturaleza del material, estos valores se encuentran dentro los rangos aceptables propios de la aleación.

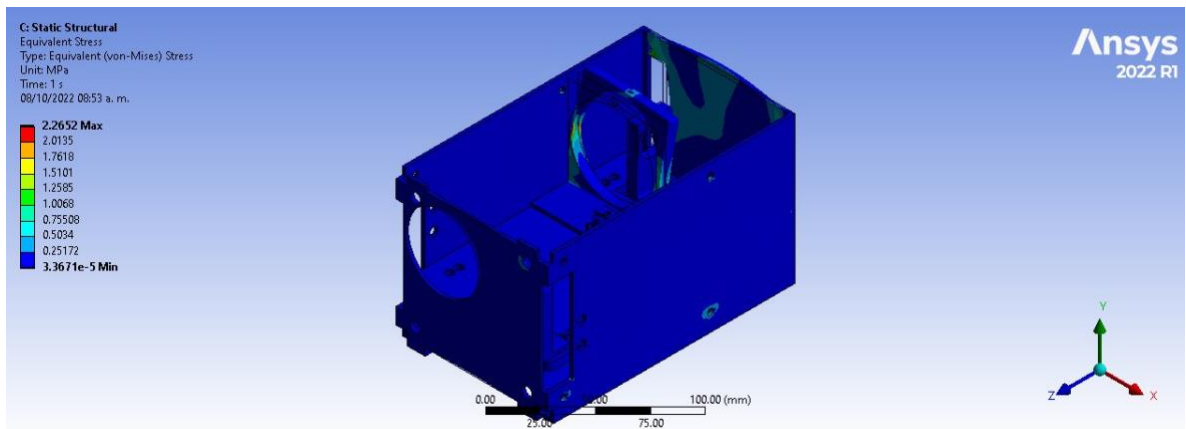
Figura 39. Esfuerzos de la estructura mecánica de la carga útil en vibraciones aleatorias.



Fuente: Elaboración por autores

6.4.4 Análisis de aceleraciones cuasi estáticas Al someter el modelo a aceleraciones cuasi estáticas en Ansys, se obtiene como resultado el comportamiento del sistema frente a las cargas generadas al momento del lanzamiento, en la figura 40 se aprecia la distribución de esfuerzos al inducir una aceleración de 10 G en dirección z.

Figura 40. Distribución de esfuerzos del modelo



Fuente: Elaboración por autores

El mayor esfuerzo al que es sometido el sistema bajo las condiciones estipuladas es de 2.26 Mpa, es válido afirmar que se encuentra dentro de los rangos admisibles del material.

7. VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE PROTOTIPADO

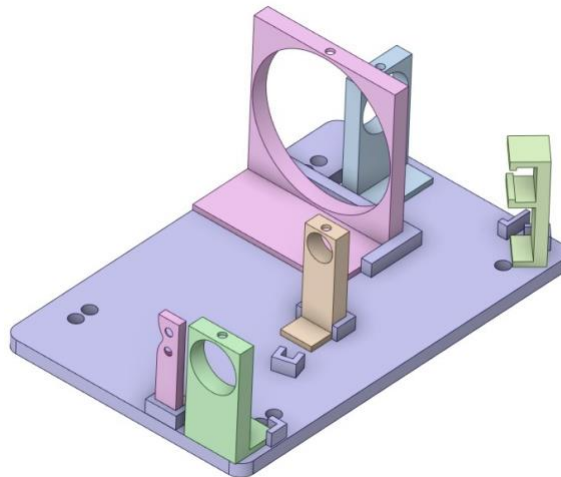
Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos a nivel computacional mediante las simulaciones en el software Ansys fueron favorables, se propuso validarlos mediante la elaboración de un prototipo con manufactura aditiva en PLA; esto con el fin de garantizar la integración de la carga útil en el bus satelital corroborando las frecuencias naturales obtenidas en el software versus las generadas mediante ensayos modales llevados a cabo a nivel de laboratorio.

7.1 CONDICIONES DE CONTORNO EN ANSYS

Al elaborarse el prototipo mediante manufactura aditiva en PLA, es necesario simularlo bajo las mismas condiciones en Ansys, es por esto que a continuación se enlistan las condiciones necesarias para evaluar el modelo a nivel computacional de la manera más fiel a la realidad.

- Se realizará el análisis de la estructura del banco óptico, dado a simplificaciones en el ámbito de laboratorio, como se observa en la figura 41.

Figura 41. Modelo a evaluar



Fuente: Elaboración por autores

- El modelo a simular se evaluará sin puntos de anclaje, por lo cual se encontrará en su totalidad libre y suspendido en el aire.
- El material seleccionado para llevar a cabo la simulación es Plástico PLA, con las propiedades determinadas por el fabricante Ultimaker, consignadas en la tabla 13, para la referencia “*Plástico PLA Negro 0.75 kg 2.85 mm de diámetro*”, el cual fue utilizado para elaboración del prototipo.

Tabla 13. Propiedades Plástico PLA Negro 0.75 kg 2.85 mm de diámetro

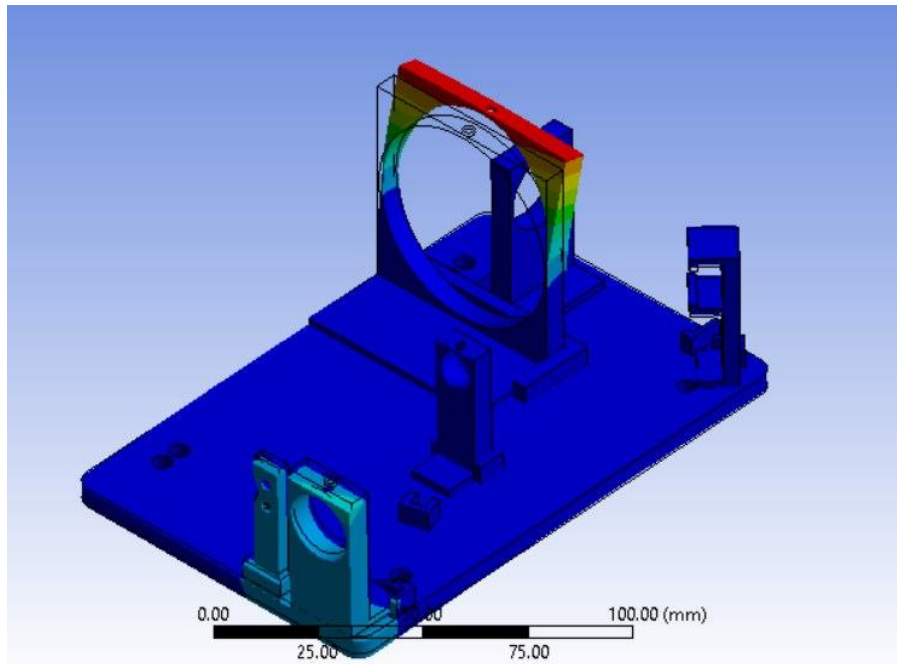
PROPIEDADES PLÁSTICO PLA NEGRO 0.75 kg 2.85 mm DE DIÁMETRO		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Módulo de Young	1.82	<i>GPa</i>
Coefficiente de Poisson	0.39	
Densidad	1240	<i>Kg/m³</i>
Módulo de compresibilidad	2.75e+09	<i>Pa</i>
Módulo de cizallamiento	6.54e+08	<i>Pa</i>

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: ULTIMAKER. *Technical Data Sheet Tough PLA*. [Ficha técnica]

7.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Al someter bajo las condiciones mencionadas en el inciso anterior al modelo, se realiza nuevamente un análisis modal, como se muestra en la figura 42, para identificar las primeras frecuencias naturales del sistema; esto con el fin de realizar el mismo procedimiento a nivel de laboratorio.

Figura 42. Análisis modal modelo en PLA



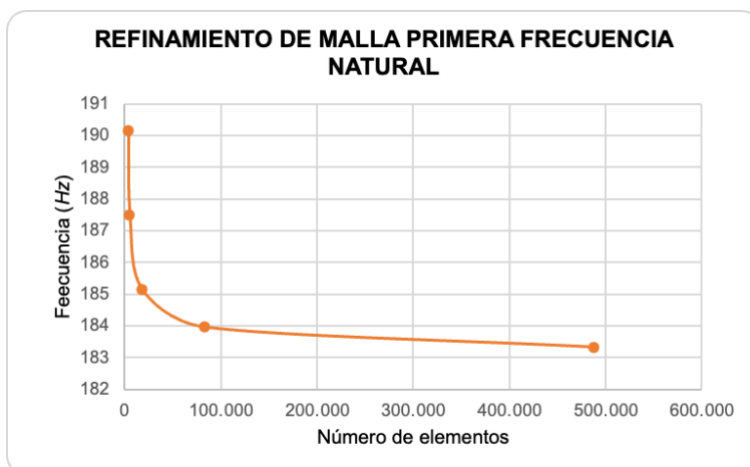
Fuente: Elaboración por autores

Al realizar el análisis modal, se obtuvieron las primeras 5 frecuencias naturales del modelo, con el propósito de tener una mayor precisión en los resultados y garantizar un análisis comparativo entre el modelo analítico y experimental, se realiza un refinamiento de malla, tal como se muestra en la tablas 14 y se evalúa la convergencia de las primera frecuencia natural de la estructura mecánica de la carga útil, como se evidencia en las figura. 43.

Tabla 14. Refinamiento de malla de la primera frecuencia natural

REFINAMIENTO DE MALLA PRIMERA FRECUENCIA NATURAL	
NÚMERO DE ELEMENTOS	FRECUENCIA (Hz)
3734	190.15
5124	187.5
17843	185.15
83328	183.96
487732	183.33

Figura 43. Convergencia de malla primera frecuencia natural



Fuente: Elaboración por autores

A partir de los datos obtenidos, se evidencia que ambas frecuencias convergen a un valor, es por esto que se considera que el refinamiento de malla fue un procedimiento acertado.

Debido al costo computacional y a la similitud entre la información obtenida, se opta por realizar el análisis comparativo con los datos de frecuencia en el mallado con 83.328 elementos. A continuación se encuentran consignadas en la tabla 16, las primeras frecuencias naturales del sistema con la calidad de mallado determinada. Cabe resaltar que se realizará el análisis comparativo únicamente con las tres primeras frecuencias naturales, ya que son las fundamentales para evaluar que el sistema no entre en resonancia.

Tabla 15. Primeras frecuencias naturales del sistema

FRECUENCIAS NATURALES MÉTODO ANALÍTICO (Hz)
183.96
217.46
267.97

En los resultados evidenciados en las tablas 14 y 15, las frecuencias naturales son mucho menores a las evidenciadas en el modelo referenciado en el inciso 6, este fenómeno se presenta debido a la alta correlación que existe entre la rigidez propia de cada sistema (especial énfasis en las distintas condiciones de frontera) y la distribución de masa de cada uno, afectando las frecuencias naturales y modos de vibración.

Esta relación se evidencia de forma clara en el inciso **4.2.5.2.2 Vibraciones**, específicamente ecuación (1) : *Ecuación general de movimiento*.

7.3 CONDICIONES DE LABORATORIO

Para validar el modelo analítico, se propone la ejecución de un ensayo modal con el fin de cuantificar propiedades del sistema, sometiéndose a vibraciones con un excitador.

Con el fin de garantizar que en el ensayo se generen los resultados más acertados posibles, se establecen las siguientes condiciones para su ejecución:

- La estructura mecánica de la carga útil debe encontrarse suspendida, como se muestra en la figura 45, no debe contar con apoyos externos.

Figura 44. Montaje de la estructura mecánica de la carga útil



Fuente: Elaboración por autores

- En la base de la estructura se debe realizar un “mallado” homogéneo por medio de puntos como lo indica la figura 45, con el propósito de evaluar el comportamiento del elemento en múltiples puntos concretos y obtener así resultados efectivos.

Figura 45. Mallado del elemento



Fuente: Elaboración por autores

- El sensor del excitador, debe estar asociado a uno de los puntos del mallado, en este caso el noveno punto tal como se señala en la figura 46, Esto con el fin de obtener mayor precisión en las frecuencias generadas por la excitación.

Figura 46. Estructura mecánica de la carga útil con el sensor posicionado



Fuente: Elaboración por autores

7.4 EJECUCIÓN ENSAYO MODAL

En el presente apartado, se estipulan las etapas de ejecución para llevar a cabo el ensayo modal de forma óptima.

7.4.1 Instrumentación Para desarrollar el ensayo modal, el equipamiento necesario consta de los siguientes instrumentos:

7.4.1.1 Sistema de adquisición de datos El multianalizador de ruido utilizado para el desarrollo del ensayo, es la referencia “*OROS, OR35*” con 8 + 2 canales. Este dispositivo evidenciado en la figura 47, cuenta con la capacidad de analizar en tiempo real las características de ruido estándar, frecuentemente utilizado en pruebas de vibración a nivel educativo y en el campo I+D+i.

Figura 47. OROS OR 35



Fuente: Elaboración por autores

En la tabla 16, se encuentran consignadas características fundamentales de las salidas dinámicas del OROS OR35

Tabla 16. Características de las salidas dinámicas analizador OROS OR35

PROPIEDADES DE LAS SALIDAS DINÁMICAS DEL OROS OR35	
PRECISIÓN ABSOLUTA	
Resolución	24 bits (144 dB)
Todos los rangos de salida a 1Khz	Todos los rangos de salida a 1 kHz ±0,05 dB
Variabilidad de la temperatura	< 0.1 dB / 10 °C
RESPUESTA DE FRECUENCIA	
Variación relativa a 0 dB @ 1kHz	
Todos los rangos a 10 KHz	< ±0.05 dB
Todos los rangos a 20 KHz	< ±0.15 dB
Todos los rangos a 40 KHz	< ±0.85 dB

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: OROS. *Instruments Specifications OR35-OR36-OR38*. [Ficha técnica]

El OROS OR-35 cuenta con una interfaz denominada “NVGate” capaz de configurar tanto el instrumento como el análisis de las señales en tiempo real y también en la etapa de post-procesamiento²⁵. El software cuenta con la capacidad de procesar las señales mediante un Análisis FFT (Transformada Rápida de Fourier), descomponiendo una señal en todas sus frecuencias y la interpreta mediante gráficos, tablas y simulaciones concretas, las características del análisis FFT se encuentran indicadas en la tabla 17.

Tabla 17. Propiedades del análisis FFT OROS OR35

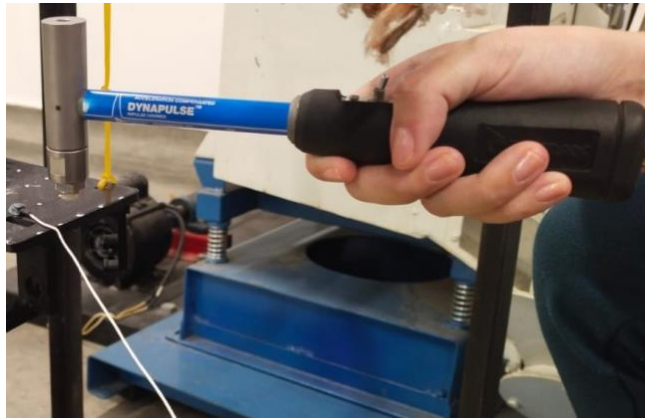
ANALISIS FFT	
Resolución	801 – 6401 líneas
Ancho de banda	20 KHz
Superposición	0%

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: OROS. *Instruments Specifications OR35-OR36-OR38*. [Ficha técnica]

7.4.1.2 Martillo Excitador La excitación del elemento a ensayar, se realizará mediante un martillo de impulso del fabricante “*Dytran Instruments Inc.*” Referencia *5850B*, tal como se observa en la figura 48, Cuenta con puntas intercambiables en: Aluminio, plástico duro y plástico suave, la seleccionada para este ensayo es la de plástico suave, debido al tamaño y material de la estructura.

Figura 48. Martillo de impulso Dytran 5850B

²⁵ OROS. Noise and vibration testing and analysis solutions. OROS [página web]. [Consultado el 23, septiembre, 2022]. Disponible en Internet: <https://www.oros.com/wp-content/uploads/2020/08/m002-103-10_oros_range_brochure.pdf>.



Fuente: Elaboración por autores

Es importante resaltar que el martillo excitador cuenta con 3 rangos de sensibilidad, los cuales se encuentran definidos en la tabla 18, el rango establecido fue de **10 mV/Lb**, debido nuevamente a las características geométricas y las propiedades del material.

Tabla 18. Características Martillo Dytran 5850B

CARACTERÍSTICAS MARTILLO DYSTRAN 5850B		
SENSIBILIDAD	RANGO (Para salidas +5V)	FUERZA MÁXIMA DE ENTRADA
1 mV/Lb	50 LbF	1000 LbF
10 mV/Lb	500 LbF	6000 LbF
100 mV/Lb	5000 LbF	8000 LbF
NO LINEALIDAD		
±1 %Fs		
FRECUENCIA DE RESONANCIA		
>75 KHz		
MASA		
275 g		

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: DYTRAN INSTRUMENTS INC. *Dytran Instruments 5850B Impact Hammer*. [Ficha técnica]

7.4.1.3 Acelerómetro El acelerómetro utilizado para el ensayo modal es la referencia “*Dytran 3224B*”, indicado en la figura 49, es un acelerómetro miniatura de alta sensibilidad, con conexión de cable sellada en Epoxi y aislado de tierra.

Figura 49. Acelerómetro Dytran 3224B



Fuente: Elaboración por autores

Las características del presente modelo de acelerómetro se encuentran consignadas en la tabla 19.

Tabla 19. Características acelerómetro Dytran 3224B

CARACTERÍSTICAS ACELERÓMETRO DYSTRAN 3224B	
SENSIBILIDAD	9 – 14 mV/g
RESPUESTA DE FRECUENCIA ±3DB	0.15 – 60000 Hz
AMPLITUD, NO LINEALIDAD.	± 2 %
PESO (SIN CABLE)	0.3 g

Fuente: Elaboración por autores, con información tomada de: DYTRAN INSTRUMENTS INC. *Dytran Instruments 3224B Miniature Accelerometer*. [Ficha técnica]

7.4.2 Tipo de montaje Al tratarse de una estructura en PLA y un acelerómetro de un tamaño miniatura, el tipo de montaje que se recomienda para el ensayo modal es un montaje adhesivo, tal como se muestra en la figura 50, este tipo de montaje es implementado frecuentemente en instalaciones de uso temporal, de igual forma no es recomendable realizar un montaje por incrustación, debido a las irregularidades que presenta el prototipo en PLA y la dificultad en el modelo para realizar la perforación.

El acelerómetro se adhiere a la estructura mecánica de la carga útil mediante cera para asegurar el correcto posicionamiento del dispositivo.

La ventaja principal de esta alternativa de montaje, es la facilidad en el procedimiento y la excelente precisión evidenciada en los resultados.

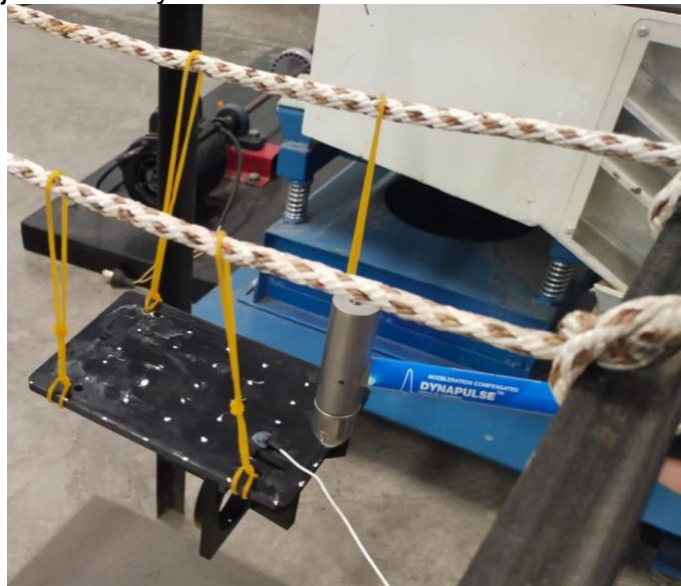
Figura 50. Montaje adhesivo del acelerómetro



Fuente: Elaboración por autores

7.4.3 Metodología Al realizar el mallado de la estructura en PLA, se posiciona suspendida mediante un montaje de cuerdas y elásticos en un banco, tal como se muestra en la figura 51, posteriormente se posiciona el sensor sobre la estructura adherido mediante cera.

Figura 51. Montaje del ensayo



Fuente: Elaboración por autores

Al estar posicionado correctamente, se realiza la conexión del sensor y del martillo excitador en el analizador OROS OR-35 indicada en la figura 52.

Figura 52. Conexión del sensor y del martillo en el analizador



Fuente: Elaboración por autores

Al estar conectado correctamente, se inicia el software NVGate asociado con el analizador OROS OR-35, y se realiza la configuración estipulada en las figuras 53, 54 y 55 para realizar los ensayos:

- Croquizado de la base del banco óptico, junto con los puntos referenciados para realizar impactos.
- Se digita la ubicación del sensor en el software, para considerarlo un punto altamente sensible al impacto.

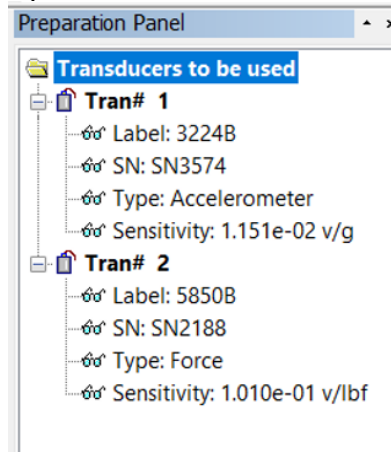
Figura 53. Configuración de ubicación del sensor

Ch# 1	<input checked="" type="checkbox"/>	ON	Tran# 1 (3224B)	Set 1	DOF 1 (9-Z)	0.175v 149.15(m/s ²)
Ch# 2	<input checked="" type="checkbox"/>	ON	Tran# 2 (5850B)	Set 1	DOF 2 (1-Z)	0.316v 13.91N
Ch# 3	<input type="checkbox"/>	ON	Tran# 3	Set 1	DOF 3	1v
Ch# 4	<input type="checkbox"/>	ON	Tran# 4	Set 1	DOF 4	1v

Fuente: Elaboración por autores

- Configuración del acelerómetro: Se ingresa la sensibilidad y referencia del dispositivo.
- Configuración del martillo excitador: Se ingresa la sensibilidad y referencia del dispositivo.

Figura 54. Determinación de parámetros del acelerómetro y el excitador



Fuente: Elaboración por autores

- Se determina el número de excitaciones que se ejecutarán por cada punto del mallado; para este caso 3 impactos por punto.
- Se establece un rango de frecuencias de 0-1600 Hz.

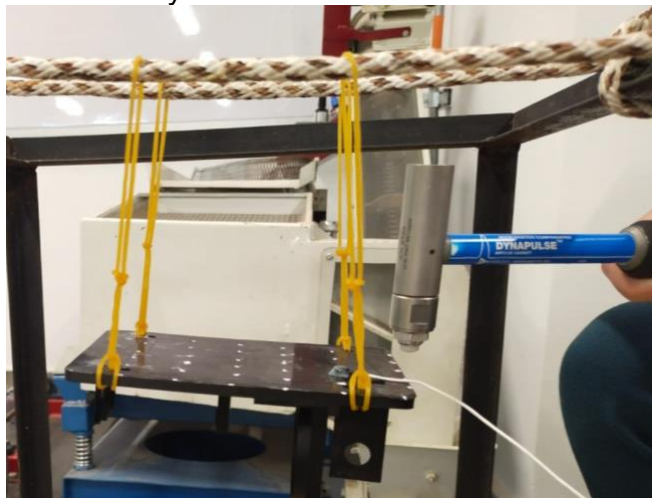
Figura 55. Configuración de la frecuencia y número de impactos por punto

Freq Start	Freq Range	Spectral Lines	Sampling Time	Overlap	Average Type	Average No	Window Type
0 Hz	1600 Hz	401	250.00 ms	0 %	Linear	3	Uniform

Fuente: Elaboración por autores

Posterior a la configuración del software NvGate, se inicia a ejecutar tres excitaciones por punto en el rango de frecuencias establecido, NvGate detecta la frecuencia del impacto, con la capacidad de aprobar o rechazar la excitación, con el propósito de adquirir resultados con la mayor calidad posible.

Figura 56. Ejecución del ensayo modal



Fuente: Elaboración por autores.

Se realizaron dos ensayos modales bajo las mismas condiciones y configuración, tal como se muestra en la figura 56, con el fin de corroborar los resultados obtenidos y brindar así un análisis de resultados acertado.

7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al realizar los impactos por toda la malla de puntos, NvGate, procesa los datos obtenidos y se obtiene una tabla con las frecuencias naturales de la estructura obtenidas de forma experimental. A partir de lo anterior, se muestran en las tabla 20 y 21 las frecuencias obtenidas en los dos ensayos realizados.

Tabla 20. Primeras frecuencias naturales obtenidas, ensayo 1

FRECUENCIAS NATURALES ENSAYO MODAL 1 (Hz)
230.44
268.44
283.61

Tabla 21. Primeras frecuencias naturales obtenidas, ensayo 2

FRECUENCIAS NATURALES ENSAYO MODAL 2 (Hz)
220.87
270.34
280.41

Las variaciones entre los dos ensayos realizados son mínimas, por lo tanto se garantiza que la práctica fue ejecutada de forma correcta.

Teniendo en cuenta esto, se promedian las frecuencias obtenidas con el fin de asociarlas con los dos ensayos realizados, y determinar con mayor certeza la naturaleza real de la estructura mecánica del banco óptico.

Al realizar el procesamiento del promedio se obtienen los resultados determinados en la tabla 22.

Tabla 22. Resultado asociación entre ensayos 1 y 2 mediante promedio

FRECUENCIAS NATURALES PROMEDIO ENSAYO MODAL (Hz)
225.65
269.39
282.01

Fuente: Elaboración por autores

Con los resultados obtenidos, se realiza un cálculo de los porcentajes de error entre las frecuencias obtenidas por el método analítico, mediante el software Ansys y las resultantes del formato experimental, el cálculo de error se realiza mediante la ecuación (3):

$$\% \text{ error} = \frac{|valor \text{ te\u00f3rico} - valor \text{ experimental}|}{valor \text{ experimental}} \times 100 \quad (3)$$

Tabla 23. C\u00e1lculo de error de las primeras frecuencias naturales del sistema

PORCENTAJE DE ERROR PRIMERAS FRECUENCIAS NATURALES DE LA ESTRUCTURA MEC\u00c1NICA DE LA CARGA \u00daTIL		
VALOR ANAL\u00cdTICO (Hz)	VALOR EXPERIMENTAL (Hz)	% DE ERROR
183,96	225.65	18.47
217,46	269.39	19.27
267,97	282.01	4.97

En la tabla 23, se muestran los resultados del c\u00e1lculo de porcentajes de error y se evidencia un error considerable, los cuales se pueden presentar debido a los siguientes factores:

- Error humano: El ensayo modal es realizado por medio de excitaciones ejecutadas por un ser humano, lo cual implica la presencia permanente de un porcentaje considerable de error, en la fuerza con la que se aplica el golpe y la precisi\u00f3n en el punto excitado.
- Precisi\u00f3n en las propiedades del material: A pesar que el fabricante espec\u00edfica en la ficha t\u00e9cnica las propiedades del PLA, en los procesos de fabricaci\u00f3n y embalaje, algunas caracter\u00edsticas propias del material se pueden ver afectadas, lo cual tendr\u00e1 repercusiones en los resultados obtenidos en la simulaci\u00f3n y el ensayo.

Al ser presentadas las fuentes del error en la ejecuci\u00f3n del ensayo, se observa que el porcentaje obtenido es justificado, por lo tanto el ensayo es considerado v\u00e1lido.

Teniendo en cuenta la comparativa entre la validaci\u00f3n en Ansys y la experimental, es correcto afirmar que la simulaci\u00f3n desarrollada en Ansys, proporciona resultados

coherentes con la realidad; por lo tanto, se cumple a cabalidad que el requerimiento de la frecuencia del sistema sea mayor a 100 Hz, ya que la estructura será manufacturada en Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn y de acuerdo a la simulación realizada, la primera frecuencia natural de la estructura mecánica de la carga útil es de 1130.4 Hz, lo que significa que el sistema no entrará en resonancia y se encuentra en condiciones óptimas para cumplir su función.

8. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La estructura mecánica de la carga útil posee restricciones muy concretas en cuanto a masa, en este caso en particular la estructura debe contar con una masa máxima de 600 *g*, por lo cual es fundamental utilizar una herramienta que permita optimizar esta característica del elemento, conservando su funcionalidad y características, tales como la rigidez y la resistencia²⁶; para cumplir con este propósito la mejor alternativa es implementar la técnica de optimización topológica.

8.1 CONDICIONES DE EJECUCIÓN

Para llevar a cabo de manera adecuada la optimización de la estructura mecánica de la carga útil, se definen los siguientes parámetros:

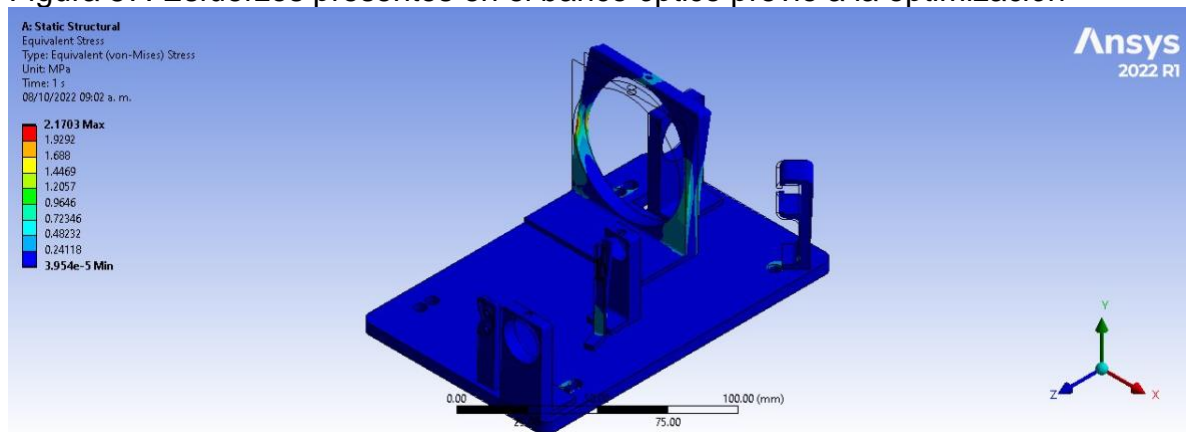
- Se realizará el análisis estructural del banco óptico junto con los soportes, esto con la finalidad de realizar el proceso de reducción de material, serán exceptuadas las zonas de sujeción y que tengan contacto con los elementos ópticos, ya que son fundamentales para garantizar la estabilidad.
- Al realizar la simulación sin los elementos de sujeción, se consideran todas las uniones de los elementos soldadas entre sí.
- Toda la estructura mecánica de la carga útil se considerará manufacturada en Aleación Aluminio-Magnesio-Manganeso AlMg4,5Mn.
- Se considerarán para la optimización 4 puntos de anclaje correspondientes al banco óptico y la tornillería.
- Se implementa una malla de propiedades similares a la empleada en el inciso 7.4 dado a su geometría similar, respetando la cantidad de elementos mínimos.

²⁶ MEZA, Carlos A.; TAMAYO, Fernando y FRANCO, Ediguer E. Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. *En*: El hombre y la máquina [en línea]. 2015. no. 46 [consultado el 24, septiembre, 2022], p. 72-79. Disponible en Internet: <<https://www.redalyc.org/pdf/478/47843368009.pdf>>. ISSN 0121-0777.

8.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Partiendo de un análisis estructural, bajo las mismas condiciones de aceleración del inciso 6.4.4 y 4 puntos de sujeción donde se encontraba la tornillería, con la finalidad de optimizar las zonas menos críticas, las cuales se evidencian en azul visibles en la figura 57.

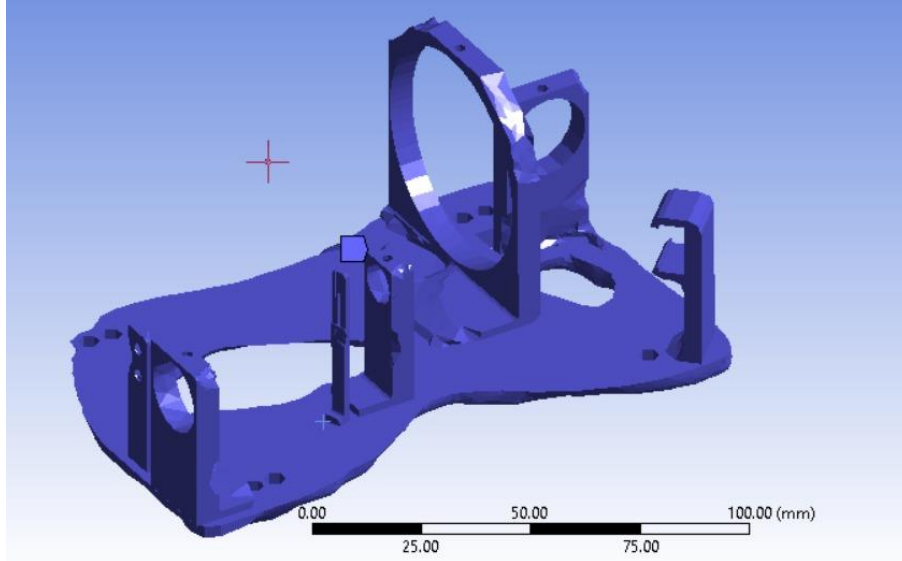
Figura 57. Esfuerzos presentes en el banco óptico previo a la optimización



Fuente: Elaboración por autores

Una vez establecidos los parámetros de simulación, se procede a reducir material respetando los puntos críticos de esfuerzos, permitiendo una reducción de hasta el 20% del peso, dando como resultado el banco optimizado, apreciado en la figura 58, reduciendo su masa de 228.35 g a 182.721 g.

Figura 58. Banco óptico optimizado en Ansys

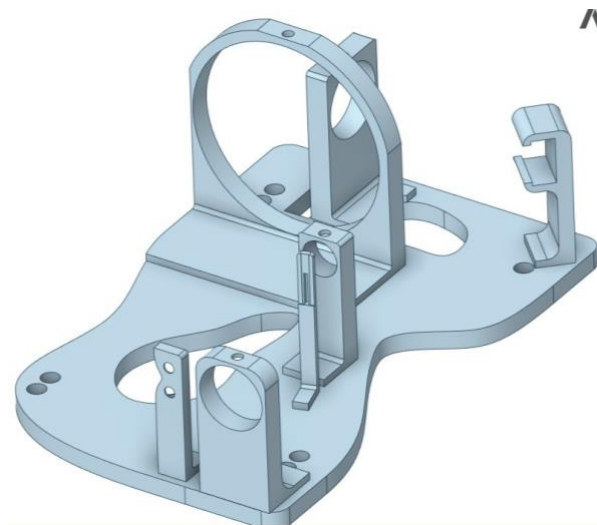


Fuente: Elaboración por autores

8.3 VALIDACIÓN EN SIMULACIÓN

Se realizó un proceso de modelado 3D en Solidworks a partir de los resultados de la optimización topológica en Ansys, como se observa en la figura 59, esto con el fin de establecer una geometría apta para manufacturar y facilitar el proceso de mallado en la fase de validación estructural.

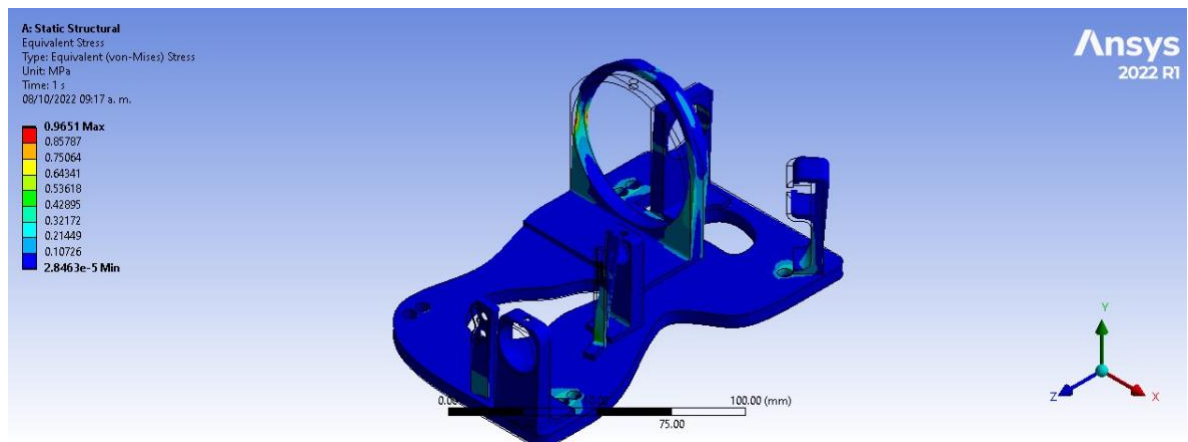
Figura 59. Modelo de banco óptico optimizado en Solidworks



Fuente: Elaboración por autores

En la figura 60 se puede observar el comportamiento del sistema frente a las aceleraciones anteriormente expuestas, previo a ser optimizado, experimentando esfuerzos máximos de 0.9651Mpa, siendo estos considerablemente inferiores a los críticos del material. A partir de lo anterior es válido afirmar que la optimización realizada fue un procedimiento exitoso

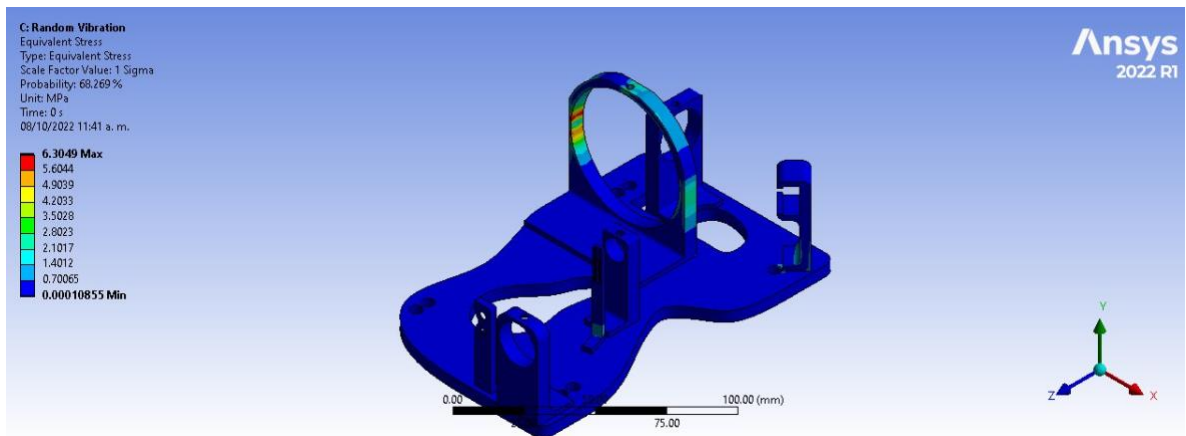
Figura 60. Esfuerzos equivalentes de banco optimizado manualmente en aceleraciones cuasiestáticas



Fuente: Elaboración por autores

Adjunto a este también se desarrolla la validación de esfuerzos mediante vibraciones aleatorias como se puede observar en la figura 61, bajo las mismas condiciones expuestas en la tabla 10, teniendo resultados favorables y menores al esfuerzo máximo desarrollado en el inciso 6.4.3.

Figura 61. Esfuerzos equivalentes de banco optimizado en vibraciones aleatorias



Fuente: Elaboración por autores

9. CONCLUSIONES

- Se diseñó la estructura mecánica de una cámara multiespectral de dimensiones 159.2 mm x 97.21 mm x 93.28 mm, la cual corresponde a la carga útil del satélite MISC-3, que cumple en su totalidad con los requerimientos de masa al ser menor de 600 g [511,56 g tras la optimización], y de obtener frecuencias mayores a 100 Hz.[Primera frecuencia natural de 1130,4 Hz], al ser sometida a los estándares establecidos por la normativa General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects.
- La implementación del modelo numérico en elementos finitos de la estructura mecánica de la cámara multiespectral, planteada a través del software CAE Ansys, es válida, debido a la adquisición de datos experimentales obtenidos a través de un ensayo modal en el prototipo en PLA.
-
- Se redujo la masa en la estructura del banco óptico y los soportes de la cámara multiespectral en 45.62 g, mediante el proceso de optimización topológica junto con su respectiva validación estructural.
- La estructura mecánica de la carga útil del satélite es suficientemente resistente a los esfuerzos, ya que el máximo esfuerzo al cual es sometida es de 8.735 Mpa, como se observa en la figura 39, que es un valor notablemente inferior al límite de elasticidad de la aleación de 217 Mpa.

10. RECOMENDACIONES

- Tomar como referencia el modelo propuesto para realizar validaciones del mismo a futuro en otros aspectos, como lo es el estudio térmico.
- Realizar modificaciones del sistema de soporte de los espejos al presentarse avances a nivel óptico, en especial, al estudiar y determinar el grado de libertad que puede presentar cada espejo, se propone establecer soportes ajustables con el fin de facilitar el montaje y calibración del mismo.
- Diseñar estructuras de soporte y sujeción especializadas en el área de electrónica. En la fase actual de la misión LEOPAR no se encuentran definidos los modelos y dimensiones específicas de algunos componentes de la electrónica, por lo que en el futuro se necesitará una actualización del modelo en dicho aspecto.
- Optimizar el proceso de mallado con el fin de reducir costos computacionales, conservando la calidad de los datos extraídos.
- Contemplar la ejecución de un proceso de optimización topológica del chasis, teniendo en cuenta las repercusiones ópticas en cuanto a luces intrusivas y mecánicas, tanto en aspectos térmicos como estructurales.

BIBLIOGRAFÍA

ARMENTERAS, Dolors, et al. Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. En: Ecological Indicators [en línea]. Abril, 2006. vol. 6, no. 2 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 353-368. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.014>>. ISSN 1470-160X.

BOHORQUEZ, Yefferson. Diseño conceptual y preliminar de un cubesat de bajo costo [en línea]. Trabajo de grado. Bogotá, D.C: Fundación Universitaria Los Libertadores, 2018 [consultado el 31, agosto, 2022]. 98 p. Disponible en Internet: <https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/1770/Bohorquez_Yefferson_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CAD-PLM SOFTWARE. ANSYS. [En línea] [Consultado el: 5 de agosto de 2022.] disponible en: <https://www.nysplm.com/ansys/>.

DYTRAN INSTRUMENTS INC. Outline installation drawing Ground-isolated accelerometer model 32248, 10 mV/g. [En línea] [Consultado el: 29 de septiembre de 2022.] disponible en: <https://shop.elkome.com/en/mwdownloads/download/link/id/325/>

DYTRAN INSTRUMENTS INC. Outline installation drawing Impulse Hammer model 5850B. [En línea] [Consultado el: 29 de septiembre de 2022.] disponible en: <https://shop.elkome.com/en/mwdownloads/download/link/id/508/>

FRÍAS VALERO, Edurardo. Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos [en línea]. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2004 [consultado el 5, agosto, 2022]. 352 p. Disponible en Internet: <<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6294/06Efv06de23.pdf>>.

GÓMEZ ROA, Antonio, et al. Análisis dinámico estructural de satélite educativo cansat. En: Computación y Sistemas [en línea]. 1, julio, 2018. vol. 22, no. 2 [consultado el 4, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.13053/cys-22-2-2942>>. ISSN 2007-9737.2018. vol. 2018 [consultado el 4, agosto, 2022], p. 1-17. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1155/2018/2079219>>. ISSN 1687-5974.

GONZALES HUISA, Anthony Ricardo. Diseño de una cámara multiespectral de 4 bandas para agricultura de precisión [en línea]. Trabajo de grado. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015 [consultado el 22, agosto, 2022]. 51 p. Disponible en Internet: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5964/GONZALES_ANTHONY_DISEÑO_CAMARA_MULTIESPECTRAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

GUÍA BÁSICA DE NANOSATÉLITES | Alén Space [Anónimo]. Alén Space [página web]. [Consultado el 1, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <<https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>>.

HERRERA ARROYAVE, Jorge Enrique. Diseño estructural de un sistema CubeSat con recubrimiento de barrera térmica [en línea]. Trabajo de grado. San Nicolás de los Garza, Nuevo León: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2015 [consultado el 28, julio, 2022]. 139 p. Disponible en Internet: <<https://core.ac.uk/download/pdf/76599666.pdf>>.

HERRERO MARDOMINGO, Adrián. Análisis de los parámetros modales de una unión soldada [en línea]. Trabajo de grado. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009 [consultado el 26, septiembre, 2022]. 136 p. Disponible en Internet: <<https://e->

archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7571/PFC_Adrian_Herrero_Mardomingo.pdf;jsessionid=39E4D0D380F5F86D98074CF09E7F2C31?sequence=1>.

LACCEI LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN CONFERENCE - INTERNATIONAL COMPETITION OF STUDENT POSTERS AND PAPERS (LACCEI 2012) (10: 2012, julio, 23-27, julio: Ciudad de Panamá, Panamá). Montaje e implementación de una estación terrena satelital para el seguimiento de satélites de órbita baja. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2012, 10p.

LEBRON CASAS, Luis. Desarrollo de cámara multiespectral: captura y análisis de sus imágenes [en línea]. Trabajo final de grado. Barcelona: Universitat Àutoma de Barcelona, 2016 [consultado el 28, octubre, 2022]. 12 p. Disponible en Internet: <https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/tfg_49267/Desarrollo_de_camara_multiespectral_captura_y_analisis_de_sus_imagenes-Luis_Lebron_Casas.pdf>.

MEZA, Carlos A.; TAMAYO, Fernando y FRANCO, Ediguer E. Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. En: El hombre y la máquina [en línea]. 2015. no. 46 [consultado el 24, septiembre, 2022], p. 72-79. Disponible en Internet: <<https://www.redalyc.org/pdf/478/47843368009.pdf>>. ISSN 0121-0777.

MORGAN, Kelly. Shock & Vibration using ANSYS Mechanical. En: ANSYS INC [en línea] [consultado el 4, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2021/02/Shock_and_Vibration_using_ANSYS_Mechanic.pdf>.

NASA'S CUBESAT launch initiative [Anónimo]. NASA [página web]. [Consultado el 28, agosto, 2022]. Disponible en Internet: <https://www.nasa.gov/directorates/heo/home/CubeSats_initiative>.

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. GENERAL ENVIRONMENTAL VERIFICATION STANDARD (GEVS) For GSFC Flight Programs and Projects [en línea]. GSFC-STD-7000A. Greenbelt, Maryland: [s.n.], 2013 [consultado el 17, junio, 2022]. 203 p. Disponible en Internet: <https://explorers.larc.nasa.gov/2019APSMEX/MO/pdf_files/gsfcd-std-7000a_final_3-28-18.pdf>.

OROS. Noise and vibration testing and analysis solutions. OROS [página web]. [Consultado el 23, septiembre, 2022]. Disponible en Internet: <https://www.oros.com/wp-content/uploads/2020/08/m002-103-10_oros_range_brochure.pdf>.

OROS. NvGate Software platform for OROS 3-Series. Grupo Alava [página web]. [Consultado el 23, septiembre, 2022]. Disponible en Internet: <<http://www.grupoalava.com/repositorio/df67/pdf/5164/2/software-nvgate-oros.pdf>>.

PUMPKIN SPACE SYSTEMS. CubeSat-class Payload Carrier Nanosatellite Assembly User Manual-Rev B. Manual. San Francisco, CA, 2013 [consultado el 15 de septiembre, 2022]. 72 p.

QIAN, Shen-En. Hyperspectral Satellites and System Design. [s.l.]: Taylor & Francis Group, 2020. 632 p. ISBN 9780429565649.

SEBASTIÁN LÓPEZ, María, *et al.* Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multiespectrales. ensayos en la cueva del tío garroso (alacón, teruel). En: La Ciencia y el Arte [en línea]. 2013. vol. IV [consultado el 2, agosto, 2022], p. 16. Disponible en Internet: <https://www.researchgate.net/publication/259338560_Metodos_de_documentacion_analisis_y_conservacion_no_invasivos_para_el_arte_rupestre_postpaleolitico_radiometria_de_campo_e_imagenes_multiespectralesEnsayos_en_la_cueva_del_tio_Garroso_Alacon_Teruel/link/00b7d52b169bc7b51a000000/download>.

SERRANO, M.; ANDRÉS, E. M. y GONZÁLEZ, I. Topology optimization and additive manufacturing applied to a camera bracket for a 3U CubeSat. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [en línea]. 1, octubre, 2021. vol. 1193, no. 1 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 012092. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1193/1/012092>>. ISSN 1757-899X.

SILVA-LORA, Alberto y TORRES, Rafael. Superconical aplanatic ovoid singlet lenses. En: Journal of the Optical Society of America A [en línea]. 25 de junio de 2020. vol. 37, no. 7 [consultado el 10 de septiembre, 2022], p. 1155. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1364/josaa.392795>>. ISSN 1520-8532.

SILVESTER, Sandra. *Óptica Física*. [Material de clase]. Departamento de Materias Básicas, Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina. [En línea] [Consultado el: 3 de agosto de 2022.] disponible en: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/\(4\)%20POLARIZACION.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/(4)%20POLARIZACION.pdf)

SOLIDBI. SOLIDWORKS. [En línea] [Consultado el: 5 de agosto de 2022.] disponible en: <https://solid-bi.es/solidworks/>.

SONG, Sua; KIM, Hongrae y CHANG, Young-Keun. Design and Implementation of 3U CubeSat Platform Architecture. En: International Journal of Aerospace Engineering [en línea]. 24 de diciembre de 2018. vol. 2018 [consultado el 23, agosto, 2022], p. 1-17. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1155/2018/2079219>>. ISSN 1687-5974.

ANEXOS

Anexo A. Diseño mecánico de una cámara multiespectral para un satélite tipo Cubesat 3U

Para el diseño conceptual de las estructuras mecánicas de la carga útil del satélite, se siguió una metodología basada en la selección de alternativas a partir de modelos propuestos por los autores, fueron diseñados a partir de los requerimientos establecidos por otros subsistemas o por las dimensiones y geometría del Cubesat.

Requerimientos.

En el presente apartado se exponen mediante un listado, los requerimientos básicos determinados por el dimensionamiento del Cubesat y por otros subsistemas de la carga útil.

- Diseño práctico
- Integridad de los componentes
- Tamaño Reducido
- Precio moderado
- Masa menor a 1.4kg
- Calidad de los materiales
- Vida útil prolongada
- Disponibilidad de espacio para dispositivos de almacenamiento
- Resistencia a cambios abruptos de temperatura
- Soportes para la instrumentación óptica

Teniendo en cuenta los requerimientos solicitados, es oportuno definir las especificaciones técnicas fundamentales para el diseño de un modelo válido a nivel estructural, a su vez, para facilitar la comprensión de las especificaciones se clasifican de acuerdo al ámbito al cual aportan: Diseño, operatividad y vida útil, tal como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24. Clasificación de las especificaciones técnicas

DISEÑO	<ul style="list-style-type: none"> ● Estructura compacta y liviana ● Disponibilidad de espacio para dispositivos electrónicos y de almacenamiento ● Soportes para la instrumentación de la cámara
OPERATIVIDAD	<ul style="list-style-type: none"> ● Poco mantenimiento, por integridad de componentes. ● Calidad de materiales que mejora la operabilidad de la estructura.
VIDA ÚTIL	<ul style="list-style-type: none"> ● Resistencia a las altas temperaturas ● Resistencia a cambios abruptos de temperatura

Matriz calidad.

A partir de las especificaciones técnicas y los requerimientos establecidos en el inciso anterior, se elabora una matriz de calidad, evidenciada en la tabla 25, con el objetivo de identificar la prioridad de las especificaciones y requerimientos al momento de proponer un modelo para la cámara multiespectral.

Tabla 25. Matriz calidad de requerimientos

		Prioridad	Disipación de calor	Materiales livianos	Proceso de manufactura adecuado	Alta precisión en el diseño de soportes	Ensamble práctico	Materiales resistentes a los cambios de temperatura	Costos	Alta confiabilidad	Reducción de vibraciones al mínimo	Totales
D	Diseño práctico	6	18	18	54	54	54	6	18	6	18	246
O	Integridad de los componentes	7	63	7	21	63	63	63	0	63	63	406
O	Tamaño reducido	5	5	0	5	15	45	0	15	5	5	95
D	Precio moderado	1	3	9	3	1	1	9	9	3	1	39
D	Masa menor a 1.4 kg	9	9	81	9	9	27	9	27	0	0	171
O	Calidad en materiales	3	27	27	9	3	3	27	27	27	3	153
V	Vida útil	4	36	4	36	12	36	36	0	36	36	232
O	Disponibilidad de dispositivos de almacenamiento	2	0	0	0	0	6	6	6	2	0	20
V	Resistencia a cambios abruptos de temperatura	8	72	8	8	72	0	72	0	72	0	304
D	Soportes para la instrumentación	10	10	30	90	90	90	90	30	90	90	610
Totales			243	184	235	319	325	318	132	304	216	2276
Orden			5	8	6	2	1	3	9	4	7	

Ensamble práctico	325	33,78	34%
Alta precisión en el diseño de soportes	319	33,16	33%
Materiales resistentes a los cambios de temperatura	318	33,06	33%

D	Diseño
O	Operatividad
V	Vida Util

A partir de los resultados cuantitativos obtenidos, se puede afirmar que los requerimientos fundamentales para el diseño del modelo son: Ensamble práctico, alta precisión en el diseño de los soportes y materiales resistentes a los cambios de temperatura.

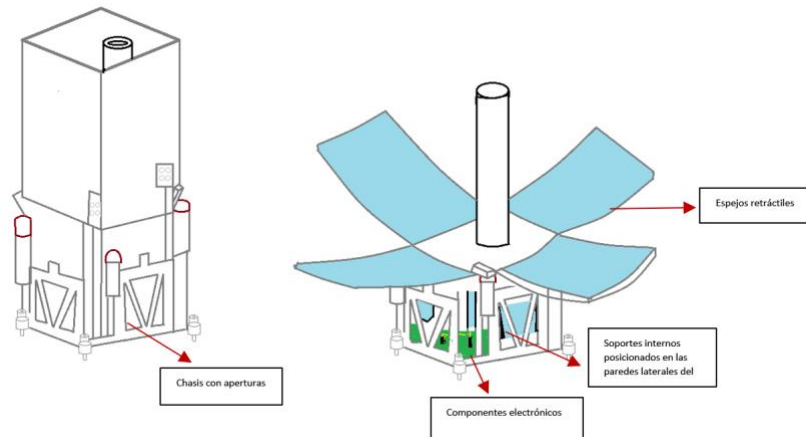
Planteamiento de alternativas.

Gracias a los resultados que se evidencian en la matriz de calidad (QFD), en especial a la ponderación de las prioridades que se toman en consideración en cuanto al diseño y funcionamiento de la estructura mecánica, se proponen tres alternativas distintas, las cuales cuentan con componentes fundamentales para el funcionamiento de la cámara como son: Los espejos, soportes y electrónica del sistema.

Alternativa 1

Tal como se muestra en la figura 62, la primera alternativa consta de un modelo de chasis manufacturado con múltiples aperturas en sus caras, para facilitar la circulación del calor y tener así una mejor disipación, de igual forma, cuenta con un sistema de espejos retráctiles para que sean utilizados en momentos determinados, y las aperturas son útiles para sistemas ópticos que requieran de un ingreso de luz menos controlado; este sistema de espejos permite que dentro del chasis se ocupe un menor espacio y por tanto se incrementa la disponibilidad para instrumentación electrónica y sensores en la parte inferior del chasis.

Figura 62. Alternativa 1

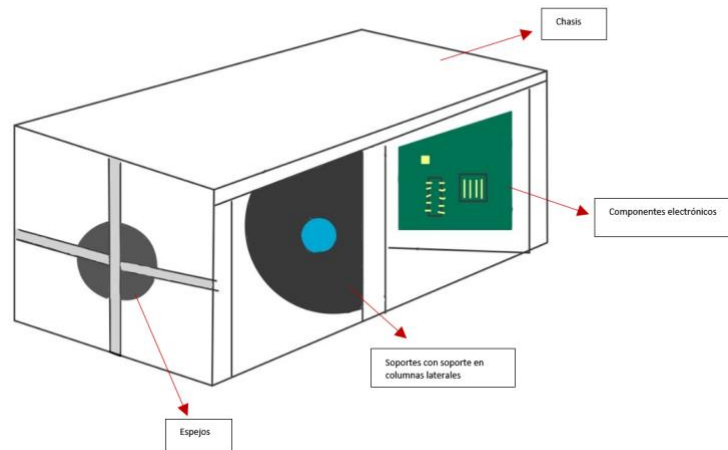


Fuente: Elaboración por autores

Alternativa 2

Chasis de la carga útil del satélite de diseño sencillo en estilo de bloque, es ideal para sistemas ópticos reducidos y con disposición lineal entre ellos; los soportes de dichos espejos deben ser columnas laterales que no obstruyan el paso de la luz, tiene una capacidad para dos espejos debido al espacio reducido, teniendo en cuenta que se debe garantizar el posicionamiento de los componentes electrónicos, en la cara posterior del chasis. El boceto de la segunda alternativa se expone en la figura 63.

Figura 63. Alternativa 2

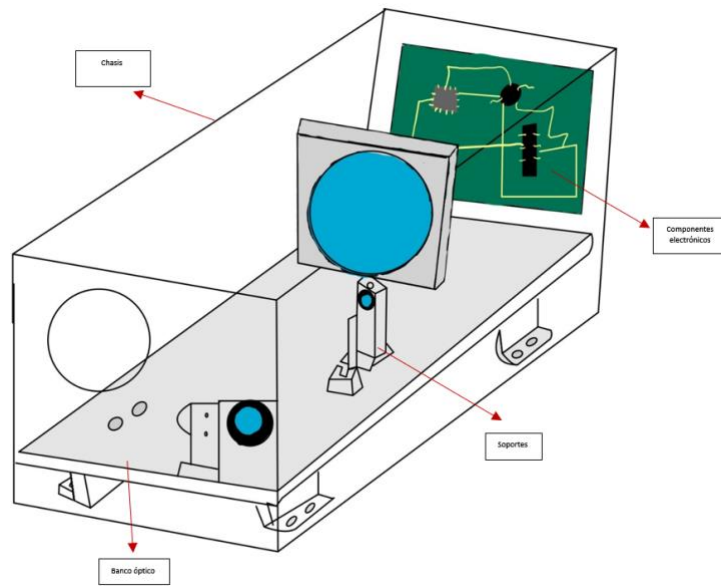


Fuente: Elaboración por autores

Alternativa 3

El chasis de la carga útil en estilo bloque, es uno de los estilos de chasis más sencillos de manufacturar, gracias al diseño de los soportes es posible ubicar más de 3 espejos sin obstruir al lente ni a los componentes electrónicos; cabe resaltar que en este modelo, como se muestra en la figura 64, se designa un espacio en el chasis para que el lente de la cámara multiespectral se mantenga fijo y así evitar cualquier tipo de desgaste, al igual que la cara posterior del chasis está totalmente dedicada a los componentes electrónicos. Es importante resaltar que a diferencia de las alternativas anteriores, se propone posicionar los espejos y sus respectivos soportes en una estructura denominada banco óptico para facilitar el montaje y obtener mayor aprovechamiento del espacio.

Figura 64. Alternativa 3



Fuente: Elaboración por autores

Evaluación de alternativas.

Posterior a proponer las alternativas y teniendo en cuenta los parámetros de la matriz de calidad (QFD), se procede a seleccionar la alternativa más adecuada, mediante la siguiente matriz consignada en la tabla 26.

Tabla 26. Matriz QFD de alternativas

Parámetros	Pi	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Ensamble práctico	0.15	3	0.45	3	0.45	4	0.6
Proceso de manufactura adecuado	0.05	2	0.1	5	0.25	5	0.25
Materiales livianos	0.1	4	0.4	4	0.4	4	0.4
Alta precisión en los soportes	0.25	2	0.5	4	1	5	1.25
Alta confiabilidad	0.05	3	0.15	4	0.2	4	0.2
Reducción de vibraciones al mínimo	0.12	2	0.24	3	0.36	5	0.6
Adecuada disipación del calor	0.25	4	1	3	0.75	3	0.75
Total			2.84		3.41		4.05

Especificación de la alternativa seleccionada.

- **Alternativa 3**

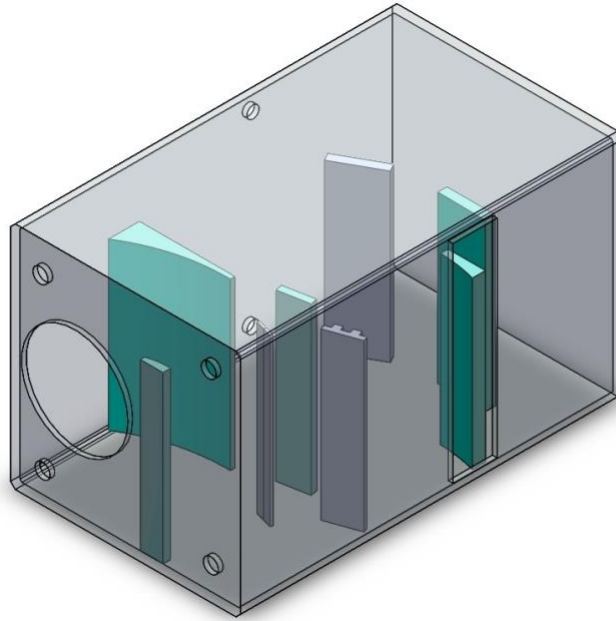
La alternativa 3 cuenta con la ponderación más alta, por lo tanto se tomará como referencia principal para realizar el modelo de la cámara multiespectral, seleccionando de manera adecuada y precisa el diseño de cada uno de los componentes mecánicos que se muestran en esta, como lo son los soportes, chasis y banco óptico.

Proceso de diseño.

A partir de los parámetros establecidos para el diseño, se realizó el proceso ajustándose a los avances en conjunto de los demás subsistemas de trabajo de la carga útil.

En la primera etapa, tal como se observa en la figura 65, se establecieron las medidas del chasis y se propuso por parte del equipo de óptica la posición y dimensiones de espejos con área rectangular.

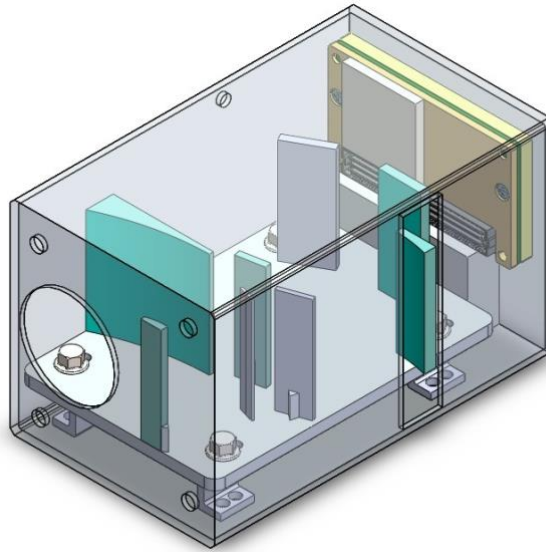
Figura 65. Primera etapa de diseño de la carga útil



Fuente: Elaboración por autores

En la segunda etapa, se utilizan elementos de electrónica para realizar un dimensionamiento tentativo del espacio y la distribución que ocupan, se establece el diseño del banco óptico siendo la estructura fundamental para el soporte de los espejos; de igual forma se establecen puntos de referencia para el diseño de los soportes de los espejos en el banco óptico. El modelo implementado en esta fase se observa en la figura 66.

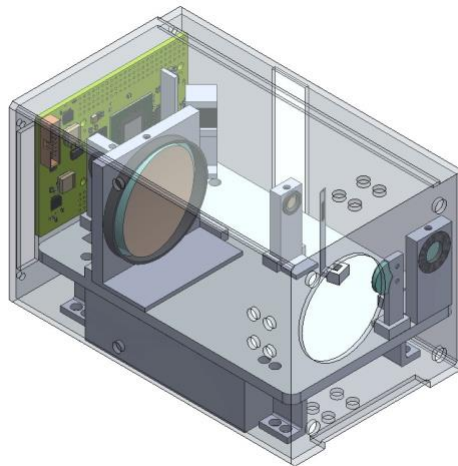
Figura 66. Segunda etapa de diseño de la carga útil



Fuente: Elaboración por autores

En la tercera y última etapa el subsistema óptico optó por espejos de forma circular, modelados bajo un modelo matemático específico, por lo tanto se realizaron los soportes sujetos a dichos requerimientos, de igual forma se diseñaron los elementos de sujeción tal como se muestra en la figura 67.

Figura 67. Modelo final de la carga útil

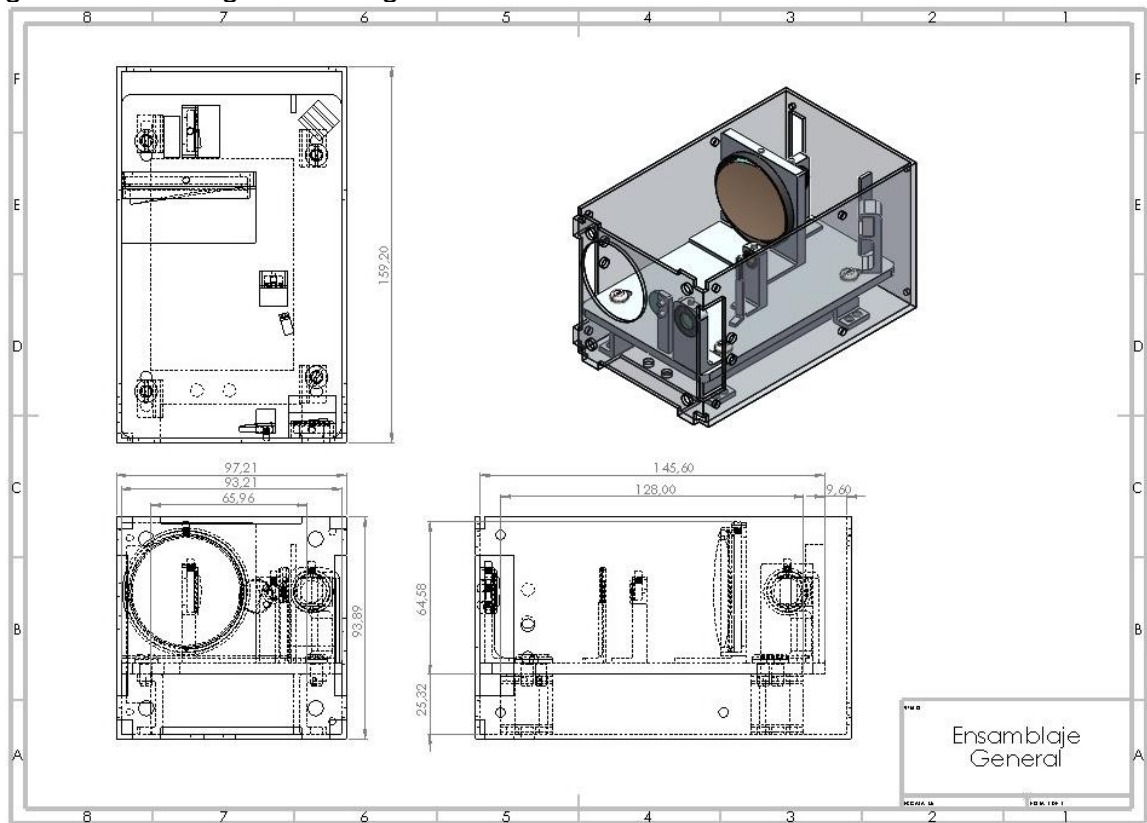


Fuente: Elaboración por autores

Cabe resaltar, que cada etapa de diseño estuvo sujeta a múltiples cambios y modificaciones, ya que todo el proceso se llevó a cabo en conjunto con los equipos de óptica y electrónica, por lo tanto la modificación de parámetros en algún subsistema, repercutió directamente en el diseño mecánico.

A continuación, en la figura 68, se visualiza el plano general, con las dimensiones esenciales en el diseño de la carga útil

Figura 68. Plano general carga útil



Fuente elaboración por autores

Anexo B. Simulación y evaluación de las estructuras mecánicas de una cámara multispectral

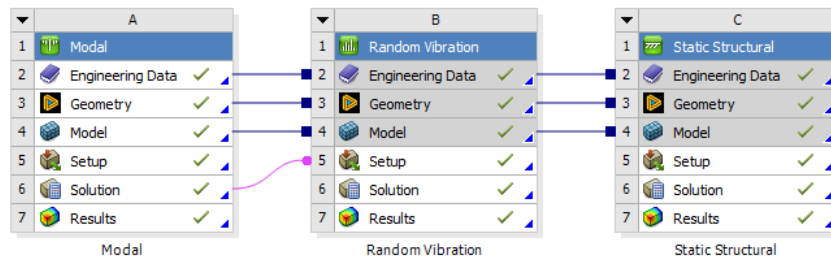
A continuación, se plantea el proceso llevado a cabo para el desarrollo de análisis modal, implementado en el sistema conformado por el banco óptico, soporte y chasis mencionado en el inciso 6.

ETAPA DE PREPROCESAMIENTO

Estructura base de simulación

En un primer momento se planteó la estructura base empleada en la interfaz de Ansys, conformada por los tres elementos correspondientes a cada uno de los análisis, tal como se observa en la figura 68.

Figura 68. Esquema de la estructura de simulación en ANSYS



Fuente: Elaboración por autores

En la fase **A** se estableció la geometría del modelo extraído desde Solidworks, importado desde una extensión .step, a partir de esto se definieron características importantes como el mallado y condiciones de frontera. Posteriormente, en la **fase B**, se estableció el ensayo de vibraciones aleatorias junto a sus características, tales como la aceleración y frecuencia de las vibraciones implementadas, tomando como base la fase A. Finalmente, en la **fase C**, se concretó el ensayo de vibraciones cuasiestáticas, donde se especificó la aceleración de la simulación.

Preparación de la geometría.

Se establecieron las propiedades características del aluminio EN-AW 5093, tal como su densidad y propiedades isotrópicas las cuales se observa en la figura 69.

Figura 69. Propiedades características del Aluminio EN-AW 5093

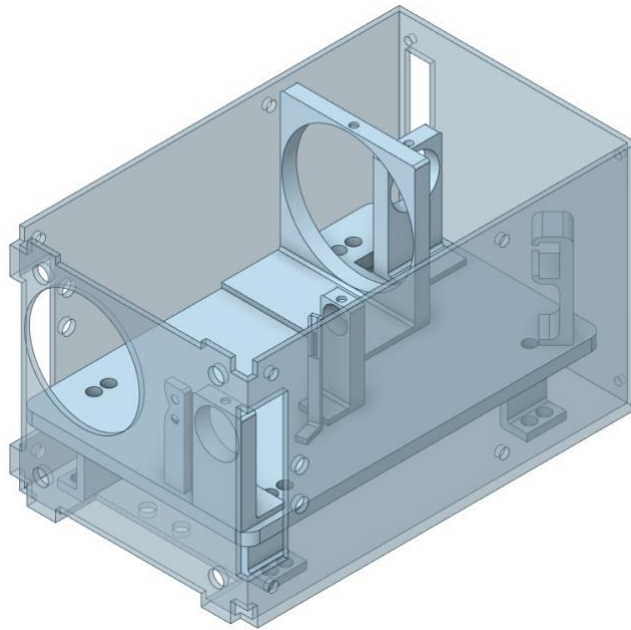
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2660	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's ...			
6	Young's Modulus	70000	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,3897			
8	Bulk Modulus	1,0577E+11	Pa		
9	Shear Modulus	2,5185E+10	Pa		

Fuente: Elaboración por autores

Preparación de la geometría.

Se extrajo la geometría de SolidWorks como formato .STEP, una vez exportada al SpaceClaim del apartado de geometría de Ansys se eliminan todos los componentes no estructurales, conservando únicamente el banco óptico, soportes y chasis, como se puede observar en la figura 70.

Figura 70. Geometría del modelo



Fuente: Elaboración por autores

Definición de malla.

Una vez definido las condiciones de frontera, véase la figura 35, se establecieron las características de mallado tomando como referencia el comportamiento de la figura 37, optando por un mallado de las siguientes características.

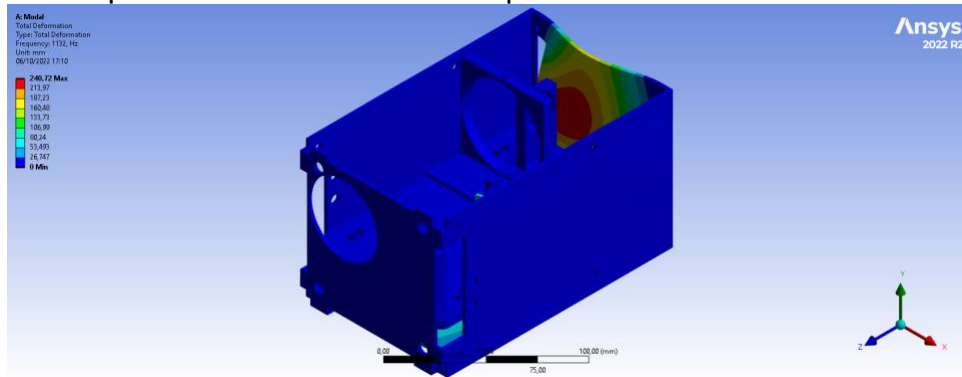
Figura 71. Parámetros de mallado

[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	1,2 mm
+ Sizing	
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
[-] Statistics	
Nodes	577296
Elements	235353

Resultados del primer armónico

Se desarrolló la simulación correspondiente al primer armónico, dando como resultado el modo de vibración y los correspondientes desplazamientos del sistema como se evidencia en la figura 72.

Figura 72. Desplazamiento resultantes del primer armónico.



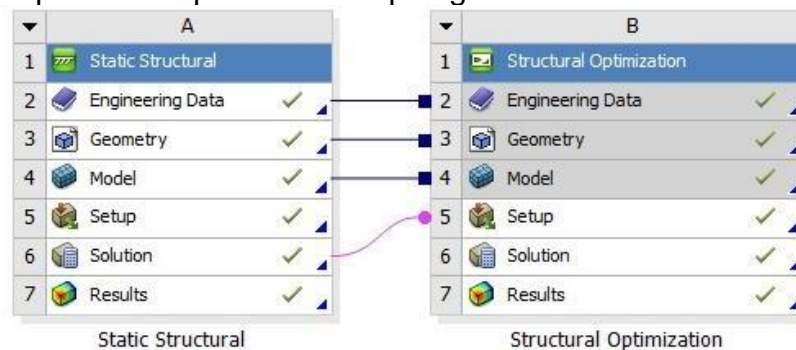
Anexo C. Optimización topológica del banco óptico y soportes de una cámara multispectral

Se describe el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo de la optimización topológica en Ansys y modificaciones en SolidWorks.

Estructura base de optimización

Se desarrolló la estructura base en Ansys para la optimización topológica, se planteó una **fase A** con el correspondiente análisis estructural, siendo el referente de la optimización, en la cual se adjuntan las propiedades del material, la geometría y características de la malla; seguido a esto en la **fase B**, se estableció la optimización estructural, teniendo de base la fase anterior como se puede apreciar en la figura 73.

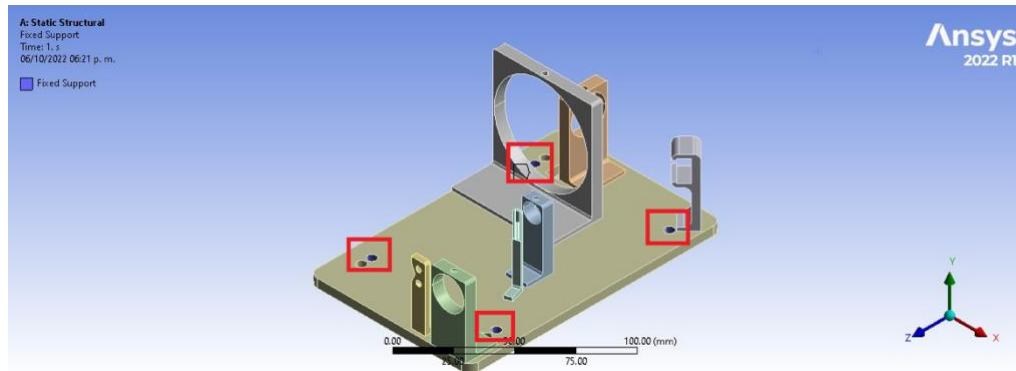
Figura 73. Esquema de optimización topológica.



Puntos de anclaje

Para el desarrollo del ensayo se emplearon soportes fijos en los puntos correspondientes a la tornillería como se evidencia en la figura 74.

Figura 74. Puntos de anclaje para la optimización

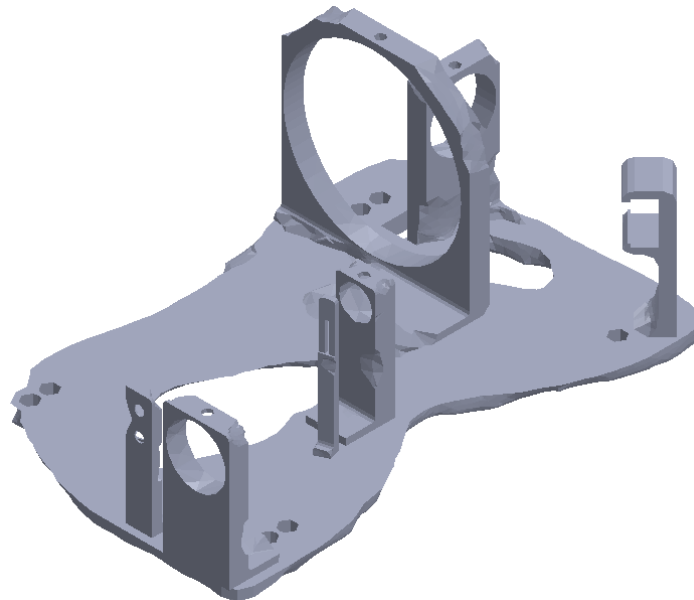


Fuente: Elaboración por autores

Resultados optimización

Una vez planteado el procedimiento y desarrollado el proceso de optimización se obtuvo como resultado el banco óptico, presente en la figura 75, el cual por fines de procesos prácticos de manufactura y mallado se tomó como guía para el prototipado final, el cual es observable en la figura 59 y su correspondiente validación.

Figura 75. Optimización topológica obtenida en Ansys



Fuente: Elaboración por autores