



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de un sistema termográfico en una máquina híbrida
(DE-LB/M+CNC)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Monsalvez Fresneda, Alberto

Tutor/a: Pérez Sánchez, Modesto

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen

En el presente trabajo de fin de grado, se requiere realizar el diseño de un sistema de seguimiento y monitorización de temperaturas superficiales mediante el uso de cámaras termográficas a una máquina híbrida. Dicha máquina se compone de una parte de fabricación sustractiva mediante un banco de mecanizado, y una parte de fabricación aditiva, con el uso de deposición de energía directa basada en láser. Para la integración del sistema se tendrá en cuenta el posicionamiento más óptimo de visión, así como también soportes o estructuras necesarias para el anclaje de los sistemas termográficos. En cuanto a la calibración de las cámaras se utilizarán sensores de medidas reales como sondas de contacto (pt100) o pirómetros, para poder adaptar el visor a la reflectividad del material y obtener el valor real de la temperatura en la superficie.

Se hará uso de las tecnologías de fabricación aditiva para la obtención de piezas que ayuden a la sujeción de cámaras o sensores, con el consiguiente incremento del ahorro de materiales y de costes. Por otro lado, se optimizará el diseño de los soportes para mejorar su eficiencia y rentabilidad.

Este trabajo de fin de grado incluirá una memoria, donde teniendo en cuenta la dimensiones internas de la máquina, se recopila el estudio del posicionamiento de los sensores, la incorporación de sistemas de limpieza mediante aire comprimido de las lentes de la cámara, el diseño y la fabricación de soportes y estructuras, y la calibración del sistema termográfico. Además de un presupuesto de inversión para la realización del estudio.

COMPETENCIAS: 64, 65, 66, 67, 68, 01, 02, 03, 05, 21, 22, 29, 30, 41, 43, 46, 48.

PALABRAS CLAVE: Sistema termográfico, Cámara termográfica, Fabricación aditiva, Máquina híbrida, DE-LB/M+CNC.

Resum

En el present treball de fi de grau, es requereix realitzar el disseny d'un sistema de seguiment i monitoratge de temperatures superficials mitjançant l'ús de càmera termogràfiques a una màquina híbrida. Aquesta màquina es compon d'una part de fabricació sustractiva mitjançant un banc de mecanitzat, i una part de fabricació additiva, amb l'ús de deposició d'energia directa basada en làser. Per a la integració del sistema es tindrà en compte el posicionament més òptim de visió, així com també suports o estructures necessàries per a l'ancoratge dels sistemes termogràfics. Quant al calibratge de les càmeres s'utilitzaran sensors de mesures reals com a sondes de contacte (*pt100) o piròmetres, per a poder adaptar el visor a la reflectivitat del material i obtenir el valor real de la temperatura en la superfície.

Es farà ús de les tecnologies de fabricació additiva per a l'obtenció de peces que ajuden a la subjecció de càmeres o sensors, amb el consegüent increment de l'estalvi de materials i de costos. D'altra banda, s'optimitzarà el disseny dels suports per a millorar la seua eficiència i rendibilitat.

Aquest treball de fi de grau inclourà una memòria, on tenint en compte la dimensions internes de la màquina, es recopila l'estudi del posicionament dels sensors, la incorporació de sistemes de neteja mitjançant aire comprimit de les lents de la càmera, el disseny i la fabricació de suports i estructures, i el calibratge del sistema termogràfic. A més d'un pressupost d'inversió per a la realització de l'estudi.

Paraules clau: Sistema Termogràfic, Càmera termogràfica, Fabricació additiva, Màquina híbrida, DE-LB/M+CNC.

Abstract

In this final degree project, the design of a system for tracking and monitoring surface temperatures through the use of thermographic cameras on a hybrid machine is required. This machine is composed of a subtractive manufacturing part by means of a machining bench, and an additive manufacturing part, with the use of laser-based direct energy deposition. For the integration of the system, the most optimal vision positioning will be taken into account, as well as the necessary supports or structures for anchoring the thermographic systems. As for the calibration of the cameras, real measurement sensors such as contact probes (pt100) or pyrometers will be used, in order to adapt the viewer to the reflectivity of the material and obtain the real value of the temperature on the surface.

Additive manufacturing technologies will be used to obtain parts that help to hold cameras or sensors, with the consequent increase in material and cost savings. On the other hand, the design of the supports will be optimised to improve their efficiency and profitability.

This final degree project will include a report, where, taking into account the internal dimensions of the machine, the study of the positioning of the sensors, the incorporation of compressed air cleaning systems for the camera lenses, the design and manufacture of supports and structures, and the calibration of the thermographic system will be compiled. In addition to an investment budget for carrying out the study.

Keywords: Thermographic system, thermographic cameras, additive manufacturing, hybrid machine, DE-LB/M+CNC.



GRADO	Ingeniería Mecánica
TÍTULO	Diseño de un sistema termográfico en una máquina híbrida (DE-LB/M+CNC)
TUTOR	Modesto Pérez Sánchez
AUTOR	Alberto Monsalvez Fresneda
FECHA	JUNIO 2023
VOLUMEN	DOCUMENTO N°1 → ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO N°2 → MEMORIA

1	Introducción.....	6
1.1	Origen del proyecto.....	6
1.2	Maquinaria.....	6
2	Objetivos.....	15
3	Alcance.....	15
4	Estudio teórico del soporte de la cámara termográfica a fabricar.....	16
4.1	Cámara termográfica.....	16
5	Requisitos de diseño y consideraciones iniciales.....	21
6	Diagrama de flujo del trabajo	30
7	Posicionamiento de la cámara termográfica.....	31
8	Solución técnica adaptada.....	35
8.1	Diseño y desarrollo del soporte.....	35
8.1.1	Anclaje.....	37
8.1.2	Cuerpo.....	39
8.1.3	Envoltura.....	41
8.1.4	Conjunto de diseño.....	43
8.2	Estudios FEM y optimización del diseño.....	45
8.2.1	Método de los elementos finitos inicial.....	46
8.2.2	Optimización topológica del soporte.....	51
8.2.3	Método de los elementos finitos del soporte optimizado.....	53
8.3	Resultados finales de diseño.....	58
8.3.1	Pieza Anclaje.....	58
8.3.2	Pieza Cuerpo.....	59
8.3.3	Pieza Envoltura.....	59
8.3.4	Conjunto Soporte.....	60
8.3.5	Soporte con la cámara termográfica.....	61
8.3.6	Soporte con la cámara termográfica en Meltio-Hass.....	62
9	Sistema de refrigeración.....	63
9.1	Water Chillers (enfriador de agua)	64
9.2	Elementos del sistema de refrigeración	66
10	Sistema de Purga de aire.....	67
10.1	Elementos del sistema de purga.....	68
11	Reajustes de la cámara termográfica.....	69
12	Conclusiones.....	71
13	Referencias bibliográficas.....	72

DOCUMENTO N°3 → ANEXOS

ANEXO 1 → CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Anexo I. Cálculos Justificativos.....	5
1 Cálculos de fluidos para el sistema de refrigeración.....	5
2 Cálculos térmicos para el sistema de refrigeración y selección del chiller	16
3 Cálculos de fluidos para el sistema de purga.....	27
4 Cálculos de resistencia a cortadura de los tornillos de anclaje.....	32

DOCUMENTO N°3 → ANEXOS

ANEXO 2 → PRESUPUESTO

1. COSTES DE DISEÑO.....	3
2. COSTES DE MATERIA PRIMA.....	3
3. COSTES DE FABRICACIÓN.....	4
4. COSTES DE POSTPROCESADO.....	4
5. ELEMENTOS NORMALIZADOS.....	5
6. COSTE DE MONTAJE Y PRUEBAS.....	6
7. RESUMEN COSTES DEL PROYECTO.....	7
8. RESUMEN COSTES DEL PROYECTO.....	8
9. COMPARATIVA CON LA COMPETENCIA.....	9

DOCUMENTO N°3→ ANEXOS

ANEXO 3→ PLIEGO DE CONDICIONES

1 Objeto del pliego de condiciones.....	3
2 Condiciones generales.....	3
2.1 Normas aplicadas al proyecto.....	3
2.2 Normativa de las piezas normalizadas	3
3 Condiciones técnicas.....	4
3.1 Material.....	4
3.2 Fabricación.....	4

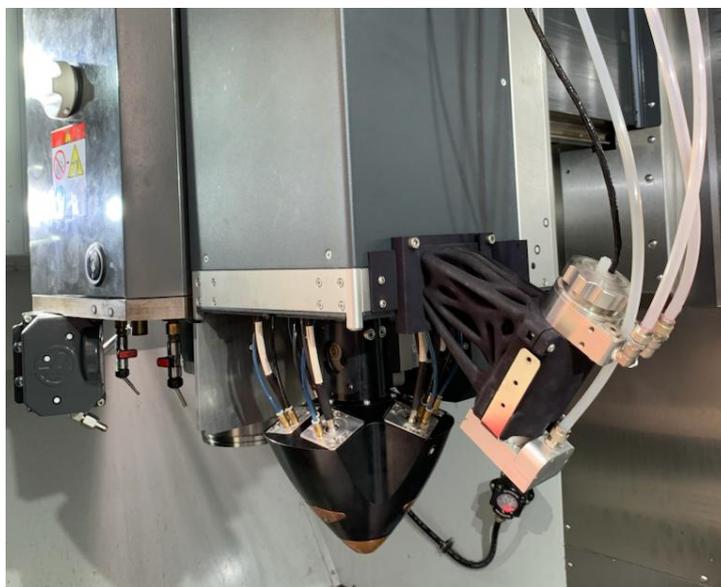
DOCUMENTO N°3→ ANEXOS

ANEXO 4→ COMPONENTES NORMALIZADOS

DOCUMENTO N°3 → ANEXOS

ANEXO 5 → PLANOS

➤ Plano 1: Anclaje.....	2
➤ Plano 1: Vista Explosionada 1 Anclaje.....	3
➤ Plano 2: Cuerpo.....	4
➤ Plano 2: Vista Explosionada 2 Cuerpo.....	5
➤ Plano 3: Envoltura.....	6
➤ Plano 3: Vista Explosionada 3 Envoltura.....	7
➤ Plano 4: Anclaje optimizado.....	8
➤ Plano 4: Vista Explosionada 4 Anclaje optimizada.....	9
➤ Plano 5: Cuerpo optimizado.....	10
➤ Plano 5: Vista Explosionada 5 Cuerpo optimizado.....	11
➤ Plano 6: Conjunto soporte.....	12
➤ Plano 6: Vista Explosionada 6 Conjunto soporte.....	13



GRADO	Ingeniería Mecánica
TÍTULO	Diseño de un sistema termográfico en una máquina híbrida (DE-LB/M+CNC)
TUTOR	Modesto Pérez Sánchez
AUTOR	Alberto Monsalvez Fresneda
FECHA	JUNIO 2023
VOLUMEN	DOCUMENTO N°2 → MEMORIA

Tabla de contenidos

1	Introducción.....	6
1.1	Origen del proyecto.....	6
1.2	Maquinaria.....	6
2	Objetivos.....	15
3	Alcance.....	15
4	Estudio teórico del soporte de la cámara termográfica a fabricar.....	16
4.1	Cámara termográfica.....	16
5	Requisitos de diseño y consideraciones iniciales.....	21
6	Diagrama de flujo del trabajo	30
7	Posicionamiento de la cámara termográfica.....	31
8	Solución técnica adaptada.....	35
8.1	Diseño y desarrollo del soporte.....	35
8.1.1	Anclaje.....	37
8.1.2	Cuerpo.....	39
8.1.3	Envoltura.....	41
8.1.4	Conjunto de diseño.....	43
8.2	Estudios FEM y optimización del diseño.....	45
8.2.1	Método de los elementos finitos inicial.....	46
8.2.2	Optimización topológica del soporte.....	51
8.2.3	Método de los elementos finitos del soporte optimizado.....	53
8.3	Resultados finales de diseño.....	58
8.3.1	Pieza Anclaje.....	58
8.3.2	Pieza Cuerpo.....	59
8.3.3	Pieza Envoltura.....	59
8.3.4	Conjunto Soporte.....	60
8.3.5	Soporte con la cámara termográfica.....	61
8.3.6	Soporte con la cámara termográfica en Meltio-Hass.....	62
9	Sistema de refrigeración.....	63
9.1	Water Chillers (enfriador de agua)	64
9.2	Elementos del sistema de refrigeración	66
10	Sistema de Purga de aire.....	67
10.1	Elementos del sistema de purga.....	68
11	Reajustes de la cámara termográfica.....	69
12	Conclusiones.....	71
13	Referencias bibliográficas.....	72

Índice de figura.

Figura 1. Máquina Meltio-Hass.....	7
Figura 2. Cabezal de herramientas + boquilla para la fabricación aditiva.....	7
Figura 3. deposición de material (Parte aditiva).....	8
Figura 4. Mecanizado de las caras de la pieza. (Parte sustractiva).....	8
Figura 5. Corte por sierra.....	9
Figura 6. Espectro electromagnético y área de medida visible. Fuente: Optris.....	10
Figura 7. Sistema de infrarrojos en una cámara termográfica. Fuente: Optris.....	11
Figura 8. Sonda de contacto PT100.....	12
Figura 9. El sensor intercepta tanto la radiación emitida como la reflejada y transmitida. Fuente: Optris.....	14
Figura 10. Cámara Optris, dimensiones (mm).....	17
Figura 11. water cooling acoplado a la Cámara Optris, dimensiones (mm).....	17
Figura 12. dirección del flujo de aire.....	18
Figura 13. Purga de aire laminar, dimensiones (mm).....	18
Figura 14. Purga de aire laminar acoplado a la cámara Optris, dimensiones (mm).....	19
Figura 15. Purga de aire laminar y water cooling acoplados a la cámara Optris, dimensiones (mm).....	20
Figura 16. Proceso de fabricación de HP Multi Jet Fusion. Fuente: HP.....	27
Figura 17. HP Multi Jet Fusion 5200.....	29
Figura 18. Diagrama de flujo de trabajo.....	31
Figura 19. Escáner Handy Scan Black.....	32
Figura 20. Escaneo Meltio-Hass.....	33
Figura 21. Sólido Meltio-Hass.....	33
Figura 22. Lateral derecho del sólido Meltio-Hass (posicionamiento de agujeros).....	34
Figura 23. Conjunto del soporte.....	36
Figura 24. Vista explosionada del anclaje, cuerpo y envoltura.....	37
Figura 25. Subconjunto del anclaje.....	38
Figura 26. Vista explosionada del subconjunto del anclaje.....	38
Figura 27. Conjunto del cuerpo.....	40
Figura 28. Vista explosionada del subconjunto del cuerpo.....	40
Figura 29. Conjunto de la Envoltura.....	42
Figura 30. Vista explosionada del subconjunto de la Envoltura.....	42
Figura 31. Unión de los subconjuntos Cuerpo y Envoltura con la cámara Optis.....	43
Figura 32. Conjunto final.....	44
Figura 33. vista explosionada del conjunto final.....	45

Figura 34. Ciclo de una buena optimización del diseño.....	46
Figura 35. Puntos de anclaje y uniones entre piezas.....	47
Figura 36. Superficie de carga de la cámara termográfica.....	47
Figura 37. Esfuerzo de Von Mises.....	48
Figura 38. Esfuerzo de tensión/compresión.....	49
Figura 39. Esfuerzo de tensión/compresión.....	50
Figura 40. Desplazamiento del soporte.....	50
Figura 41. Ejecución de la optimización topológica.....	52
Figura 42. Optimización topológica del cuerpo.....	52
Figura 43. Cuerpo optimizado.....	53
Figura 44. Anclaje remodelado.....	54
Figura 45. Esfuerzo de Von Mises del conjunto optimizado.....	55
Figura 46. Esfuerzo de Von Mises del conjunto optimizado.....	55
Figura 47. Esfuerzo de tensión/compresión del conjunto optimizado.....	56
Figura 48. Esfuerzo de tensión/compresión del conjunto optimizado.....	56
Figura 49. Desplazamiento del soporte optimizado.....	57
Figura 50. Pieza anclaje.....	58
Figura 51. Pieza cuerpo.....	59
Figura 52. Pieza envoltura.....	60
Figura 53. Soporte.....	60
Figura 54. Soporte.....	61
Figura 55. Soporte con la cámara y con sistemas de refrigeración y purga	61
Figura 56. Soporte con la cámara y con sistemas de refrigeración y purga	62
Figura 57. Incorporación del sistema termográfico	62
Figura 58. Incorporación del sistema termográfico	62
Figura 59. water cooling acoplado a la cámara Optris, dimensiones (mm).....	64
Figura 60. Water chiller Labtech H150/2100 smart series	65
Figura 61. Sistema de purga de aire	67
Figura 62. Regulador con sistema de filtro Parker	68
Figura 63. Bobina de titanio 64 de Meltio	69

Índice de tablas.

Tabla 1. Tabla de la emisividad de algunos materiales.....	14
Tabla 2. Tabla de tolerancias para dimensiones lineales, excepto aristas matadas.....	22
Tabla 3. Tabla de tolerancias para dimensiones lineales de aristas matadas.....	23
Tabla 4. Tabla de tolerancias para dimensiones angulares.....	23
Tabla 5 . Tabla de propiedades mecánicas de la PA12.....	24
Tabla 6 . Tabla de propiedades mecánicas del TPU.....	25
Tabla 7 . Tabla de propiedades mecánicas del PP.....	25
Tabla 8 . Tabla comparativa de propiedades mecánicas.....	26
Tabla 9 . Componentes del conjunto.....	38
Tabla 10. Componentes del subconjunto Anclaje.....	39
Tabla 11. Componentes del subconjunto Cuerpo.....	41
Tabla 12. Componentes del subconjunto Envoltura.....	43
Tabla 13. Componentes del conjunto.....	46
Tabla 14. Componentes del subconjunto Anclaje optimizado.....	55

1 Introducción

1.1 Origen del proyecto

En el tiempo transcurrido de prácticas en la empresa AIDIMME (Instituto tecnológico metalmecánico, mueble, madera, embalaje y afines) se dio la necesidad de realizar un estudio termográfico a una máquina híbrida, con el objetivo posterior de poseer un gran control de los parámetros de fabricación.

Esta empresa valenciana, se fundó en 1984 con sede en Paterna, Valencia. Posee un amplio abanico de departamentos y de sectores, pero están especializados en I+D, I+D+i, certificación, ensayos y mejora de procesos. Dentro de la mejora de los procesos de fabricación entra el departamento de nuevos procesos de fabricación, el cual se centran en la fabricación aditiva y la fabricación híbrida. Además de disfrutar de tecnologías como SLS, SLA, SLM, MJF... entrando en el marco de empresas 4.0.

No obstante, la fabricación con máquinas híbridas es un tanto joven por lo que se desconoce cómo afectan la variación de parámetros para esta tecnología al acabado final de las piezas, por dicha razón es necesario realizar un estudio minucioso de las temperaturas superficiales de deposición de metal fundido a cada capa de la pieza.

1.2 Maquinaria

La máquina en cuestión es híbrida esto quiere decir que posee una parte de fabricación sustractiva, mediante el uso de un centro de mecanizado 3 ejes en el cabezal de la herramienta de arranque de material (x,y,z) y 2 ejes en el banco de fabricación, donde una es la inclinación y el otro es el giro de banco. Y por otro lado tiene un cabezal de extrusión de metal que compone la parte de fabricación aditiva.

Dicho estudio del diseño de un sistema termográfico se debe incorporar en la tecnología DE-LB/M+CNC (Deposición de energía basada en láser /control numérico computarizado), en concreto es una Meltio engine CNC integration



Figura 1. Máquina Meltio-Haas

Meltio es un empresa desarrolladora de tecnologías para la fabricación aditiva en el ámbito de impresión 3D en metales, utilizando la idea de la tecnología FDM o FFF (fabricación por filamento fundido) como base, ya que utiliza filamento de metal en vez de polímero. Éste modelo se crea gracias a la incorporación de deposición de energía basada en láser de Meltio al cabezal del centro de mecanizado Haas 1000ss.

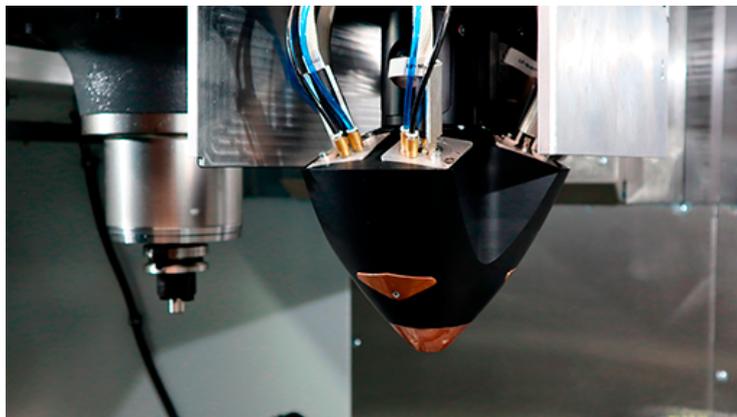


Figura 2. Cabezal de herramientas + boquilla para la fabricación aditiva.

Con está tecnología se adquieren ventajas que con la fabricación convencional no se podría lograr. Con la posibilidad de generar geometrías complicadas o recovecos internos, así como un menor desperdicio de material, ya que previamente del fresado o cualquier herramienta sustractiva se intenta apurar las medidas reales mediante la deposición de metal, dejando el arreglo de las tolerancias de medidas y superficiales al mecanizado.

Otra posibilidad de uso es en la reparación de componentes ya que gracias a su parte aditiva se puede reparar añadiendo material a las partes dañadas y posteriormente refinarse mediante el mecanizado.

A la hora de fundir el material se deposita en una placa del mismo material, donde se tomará como 0 la cota del eje z (la altura), una vez fabricada la pieza capa por capa ,como se puede observar en la figura 3, entra en pie el proceso de mecanizado. Una vez finalizado los dos procesos se lleva la pieza unida a la placa a ser separada por una sierra o corte por hilo, de esta forma tendremos por un lado la pieza final y por otro la placa, la cual puede volverse a reutilizar retirando unos milímetros de la capa superficial.

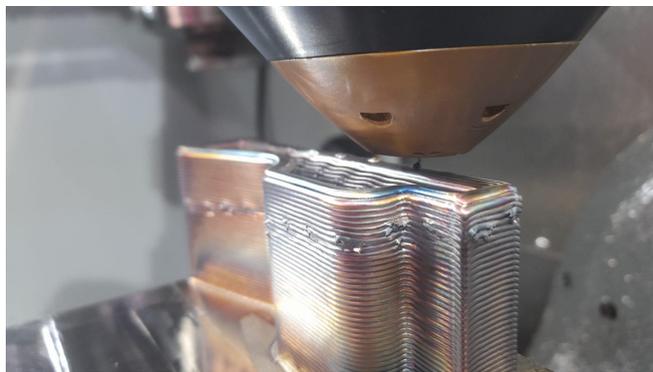


Figura 3. deposición de material (Parte aditiva)

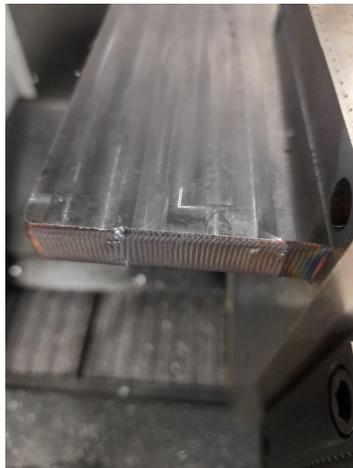


Figura 4. Mecanizado de las caras de la pieza. (Parte sustractiva)



Figura 5. Corte por sierra.

La máquina dispone de dos módulos de control, uno que maneja el movimiento del cabezal del mecanizado, y así mismo la boquilla de fabricación aditiva, y la mesa de mecanizado y otro maneja los parámetros de fabricación aditiva como tiempo de espera entre capa y capa, flujo de gas, velocidad de salida del material en estado sólido, temperatura de fusión... donde este último va enlazado con la potencia de los 6 laser. Estos láseres son los encargados de fundir el filamento metálico para su disposición en las capas, además de calentar la superficie de adherencia del material, de esa forma se logra que la unión sea más isotrópica puesto la capa inferior y superior quedan totalmente cohesionadas. Por otro lado, el uso de un gas inerte y protector garantiza proteger la soldadura del aire y evitar que se oxide, puesto que la adherencia del material es similar a la adherencia del metal en la soldadura teniendo que utilizar un gas inerte.

Sin embargo, esta máquina presenta problemas si no se tiene un gran control de los parámetros. Una de las incertezas que se presentan es esta máquina es cuanto tiempo es necesario esperar entre capas, puesto si es un tiempo muy reducido crearas un sobrecalentamiento en las capas inferiores provocando una expansión del material en los ejes x y. Además este sobrecalentamiento puede variar según qué pieza sea, puesto si es una pieza hueca no será necesario tanto tiempo de espera como si la capa es totalmente maciza. Asimismo el software de fabricación presenta una gran variedad de patrones de relleno de la pieza que dependiendo del que se elija puede variar el sobrecalentamiento de algunos puntos.

Por otro lado, si los láser se configuran con poca potencia para la fusión del material esto provocaría una menor expansión en los ejes x y y una deformación ascendente en el eje z de la pieza, además de no lograr una correcta isotropía entre capas siendo la pieza más vulnerable en esfuerzo mecánicos.

Por dichas razones es necesario realizar una monitorización y un control de la temperatura entre capas, ajustando de ese modo los parámetros para que la fabricación se acerque a un más a un proceso estable. Dando lugar a realizar un estudio termográfico.

1.3 Estudio Termográfico

Un estudio termográfico es una técnica de medición y análisis no invasiva que se suele utilizar para monitorizar y controlar la distribución de la temperatura en una superficie o estructura determinada. Esta metodología se basa en que cada objeto emite una energía en forma de radiación infrarroja, la cual puede ser detectada y analizada creando imágenes o video térmicos de la superficie en cuestión, de esa forma poder estudiar lo que ocurre en cada momento. Un cambio de temperatura implicaría un cambio de la intensidad de la radiación pudiendo plasmar en el estudio.

La historia de la termografía se remonta a principios del siglo XIX, cuando el físico británico Sir William Herschel descubrió la radiación infrarroja pudiendo observar que el espectro que desprendía la luz solar tenía un aumento de temperatura más allá del espectro visible, dicho descubrimiento fue por casualidad ya que realmente buscaba un nuevo material para el mundo óptico. Mediante el uso de un prisma de cristal que proyectaba la luz del sol a una mesa y un termómetro de mercurio probó el comportamiento de calentamiento de diferentes colores del espectro, donde notó un aumento de la temperatura del color violeta al rojo, subiendo aún más traspasando el color rojo, encontrando así la temperatura máxima, en otras palabras el área de longitud de onda infrarroja.

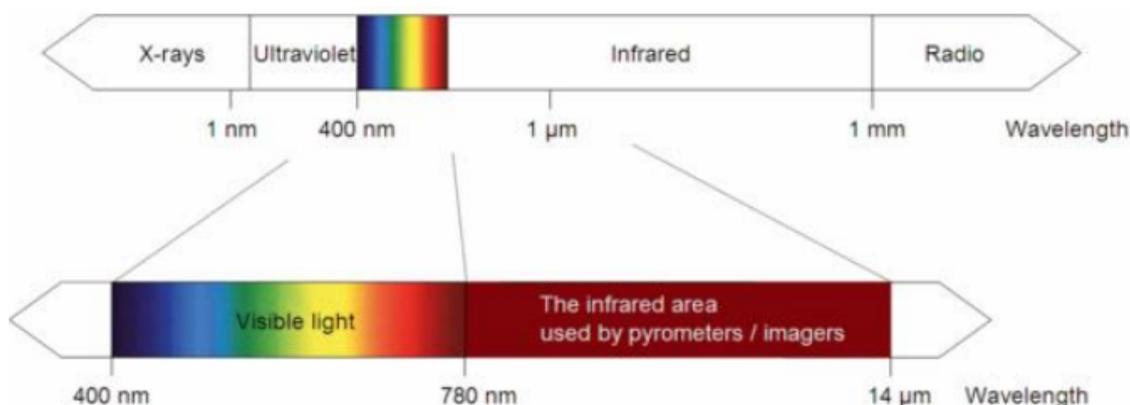


Figura 6. Espectro electromagnético y área de medida visible. Fuente: Optris

Más tarde en el siglo XX, se plantearon los primeros termómetros infrarrojos, los cuales permitían medir la temperatura de los objetos a distancia sin contacto, utilizando esta tecnología en la Segunda Guerra Mundial para la detección de submarinos o fugas de calor de los edificios

Posteriormente, en la década de 1960, se desarrollaron las primeras cámaras termográficas, las cuales permitían obtener imágenes a alta resolución y mediciones en tiempo real de las temperaturas superficiales, convirtiéndose en ese momento en una gran herramienta para detectar anomalías o fallos, como puede ocurrir en muchos componentes eléctricos donde la apariencia de calor es un indicador de pérdidas de energía.

Hoy en día las cámaras termográficas son de los dispositivos más utilizados como herramienta de medición de temperaturas sin contacto, están disponibles en una amplia variedad de modelos y capacidades.

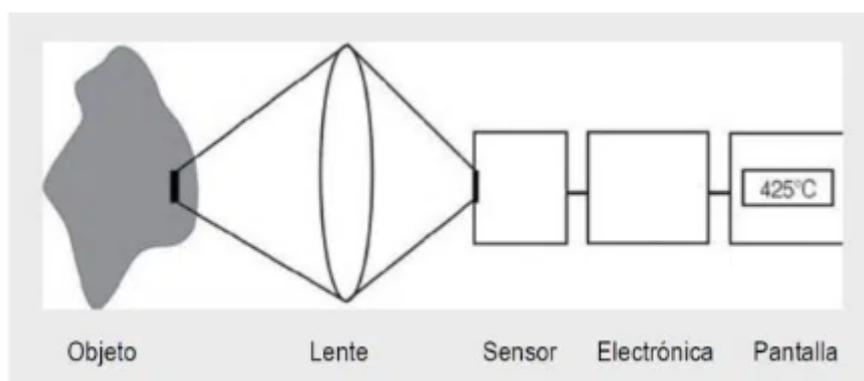


Figura 7. Sistema de infrarrojos en una cámara termográfica. Fuente: Optris

Mediante la termografía y las cámaras termográficas se abre un gran abanico de posibilidades de uso, se puede hablar de usos médicos, en la construcción, en la industria, en componentes mecánicos, eléctricos, entre otras más. En este trabajo de fin de grado se centrará más en el proceso de fabricación aditiva de la máquina anteriormente mencionada.

El objetivo principal del uso del estudio termográfico es el control de temperaturas entre capas del proceso de deposición de material, donde se podrá valorar los puntos térmicos más críticos, para posteriormente corregir esas diferencias de temperaturas y lograr un proceso más estable.

En cuanto a la medición de la radiación, el estudio de termografía infrarroja utiliza la medida de longitud de onda que va desde $1\mu\text{m}$ a los $20\mu\text{m}$, esta emisividad de onda va relacionada al material al cual se le va a realizar una medición.

1.4 Emisividad

La emisividad es un factor muy importante en la medición de temperatura mediante termografía, puesto puede determinar la cantidad de radiación infrarroja que emite un objeto en relación con la radiación emitida por un cuerpo negro. Un cuerpo negro es ideal, ya que absorbe toda la radiación que recibe, además de emitir la máxima cantidad posible de radiación para su temperatura. La emisividad se representa en números entre el 0 y el 1, donde 1 representa una emisividad máxima y 0 representa una emisividad nula. Si el objeto tiene un valor de emisividad menos a 1 se trata de un cuerpo gris, sin embargo si el valor es 1 es un cuerpo negro.

No obstante, la emisividad afecta directamente a la precisión de las técnicas de medida termográfica, porque la cantidad de radiación infrarroja emitida por un objeto depende de su emisividad, así pues es necesario conocer y tener en cuenta la emisividad del objeto en cuestión para obtener mediciones precisas y confiables de su temperatura. Por esa razón se debe utilizar instrumentos de medida de contacto para conocer la temperatura real del objeto y compararla con la captura de las cámaras termográficas, de ese modo se podrá conocer la emisividad del material y poder adaptar el visor.

La forma de medida de temperatura real sería mediante sondas de contacto, la cual como anteriormente se ha mencionado deben estar en comunicación directa por la superficie del objeto.



Figura 8. Sonda de contacto PT100.

Una de las causas que provoca que la emisividad sea diferente en cada objeto son las propiedades del mismo, así como su composición, textura, acabado de la superficie, temperatura y longitud de onda de la radiación infrarroja utilizada para medir la temperatura.

Por lo tanto, es importante determinar experimentalmente la emisividad del objeto en cuestión en las condiciones específicas en las que se realizará la medición de temperatura.

A continuación se va a proporcionar una tabla con valores de emisividad de algunos materiales para realizar una comparación, aunque esto puede variar por el acabado superficial del material o en las condiciones en las que está.

MATERIAL	EMISIVIDAD
Aluminio	0.09
Policarbonato	0.8
PVC	0.93
Hormigón	0.97
Cromo	0.08
Madera	0.94
Plomo	0.43

Tabla 1. Tabla de la emisividad de algunos materiales.

La suma de emisiones que compone un cuerpo son la absorción (A), reflexión (R) y transmisión (T) del objeto, igualados a 1 que es valor máximo de emisividad, en otras palabras igualado a un cuerpo ideal o negro.

$$A + R + T = 1$$

$$\text{Absorción} + \text{Reflexión} + \text{Transmisión} = 1$$

Sin embargo, todo cuerpo sólido no posee en el rango de infrarrojos transmisión, por lo que T es igual a 0, de acuerdo a la Ley de Kirchoff, ya que su valor es tan bajo que se toma como 0. Por lo tanto nos queda que el resultado de la emisión y absorción es:

$$A + E + R = 1$$

Por otro lado, dentro de los límites de estos tres parámetros encontramos los siguientes tipos de cuerpos:

- Cuerpo negro: toda la radiación incidente es absorbida, por lo que $R=0$
- Cuerpo blanco: toda la radiación incidente es reflejada, por lo que $A=0$
- Cuerpo transparente o diatérmano: toda la radiación incidente se transmite $T=1$

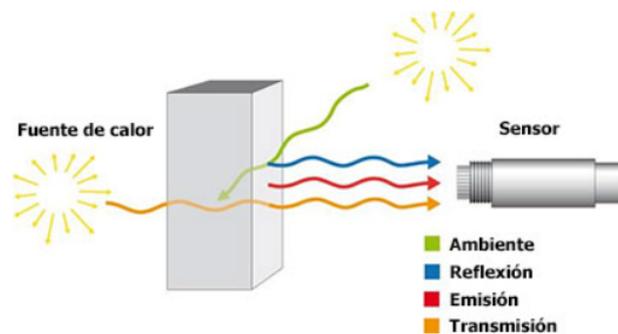


Figura 9. El sensor intercepta tanto la radiación emitida como la reflejada y transmitida. Fuente: Optris

En resumen, como se comentó anteriormente, la emisividad del objeto es un factor muy relevante para la medición y el estudio termográfico, por el que hay que dar hincapié. Es tan importante que si la cámara no está parametrizada con la emisividad adecuada del objeto, los resultados que proporciona la termografía serían erróneos.

2 Objetivos

En el presente trabajo de fin de grado, se requiere realizar el diseño y desarrollo de un sistema de seguimiento y monitorización de temperaturas superficiales mediante el uso de cámaras termográficas a una máquina híbrida.

Para este seguimiento de temperaturas se deberá tener en cuenta la visión más óptima para los sensores y una vez lograda se deberá realizar el diseño y la fabricación de soportes o estructuras para anclar su posición utilizando la fabricación aditiva para apaciguar los costes y el ahorro de material. Además de abastecer las demandas del sensor termográfico si las requiere

3 Alcance

Este proyecto pretende incorporar un sistema de termografía a un equipo Meltio engine CNC integration, donde para ello se deberá escanear las partes de la máquina en cuestión y mediante una reconstrucción de mallas obtener un CAD. Una vez logrado el diseño de la máquina se valorará la posición más óptima para colocar este sistema. Por otra parte, tras realizar la ingeniería inversa se procederá a realizar una serie de diseños de soporte para la cámara, valorando entre las mejores opciones, además de utilizar la optimización topológica para perfeccionar y mejorar el diseño, teniendo en cuenta un estudio de tensiones para su elección. También se procederá a determinar cual es mejor proceso de fabricación dentro de la fabricación aditiva. Por otra parte si la cámara en cuestión requiere abastecer de un sistema de refrigeración y de purga proporcionar y desarrollar un circuito para cada campo.

4 Estudio teórico del soporte de la cámara termográfica a fabricar.

4.1 Cámara termográfica

Una cámara termográfica es un dispositivo que permite detectar y medir la radiación infrarroja que emiten los objetos, y con ello poder transformarla en imágenes o vídeos a tiempo real. Este sensor detecta el calor radiado por los objetos mostrando las diferentes temperaturas de objetos en imágenes.

Este equipo se utiliza en el caso de este trabajo de fin de grado como forma de inspeccionar procesos mecánicos para poder detectar fallos, problemas de rendimiento o mala calibración de la maquinaria.

Para este trabajo se ha utilizado una cámara Optris de su gama de cámaras infrarrojas, con la que gracias a ella se podrá realizar un seguimiento de los parámetros térmicos de la fabricación. Con ella se puede localizar los puntos de temperatura más críticos, además de poseer un enfoque motorizado, el cual permite controlar la nitidez de las imágenes a tiempo real.

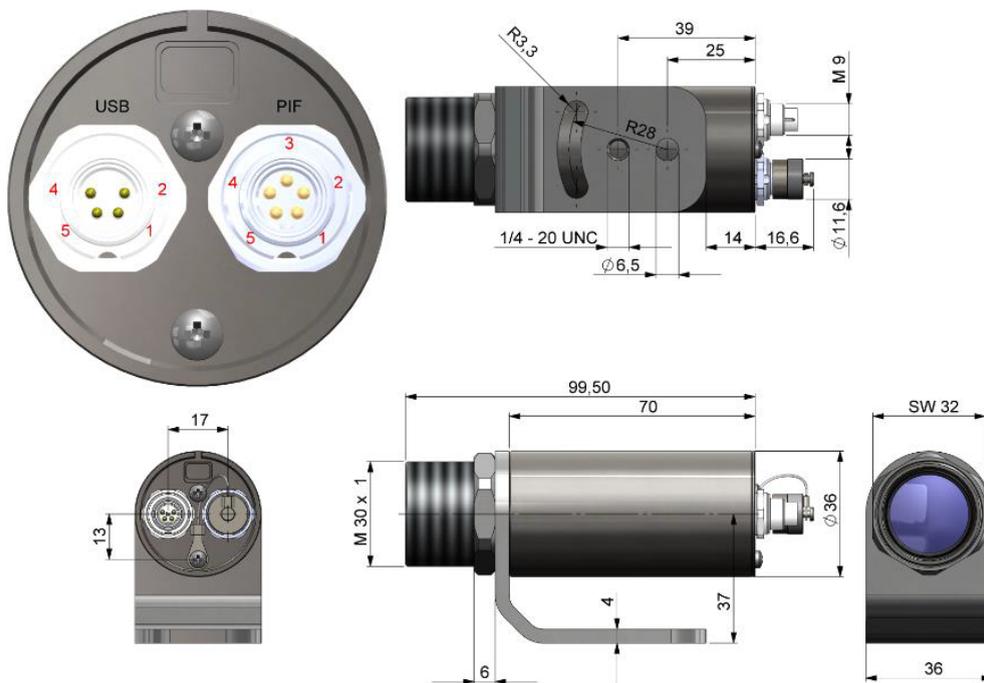


Figura 10. Cámara Optris, dimensiones (mm).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la localización de este sensor es dentro de espacio de fabricación cerrado de la Meltio, por lo que por un lado debe poseer una clase de protección ante las temperaturas que se puedan ejercer en el espacio de trabajo ya que la cámara soporta hasta 50°C y para ello se integra a la cámara un sistema de refrigeración líquida, de forma que una camisa proteja de las posibles subidas de temperatura. Dicho sistema de refrigeración o bien conocido como water cooling es un extra de serie por lo que facilita el montaje, con un peso total de 1710 gramos. Mediante este accesorio se previene de posibles incidentes de subida de temperatura protegiendo el rendimiento del periodo de grabación. Además dicho accesorio protege la cámara de posibles salpicaduras por taladrina o virutas.

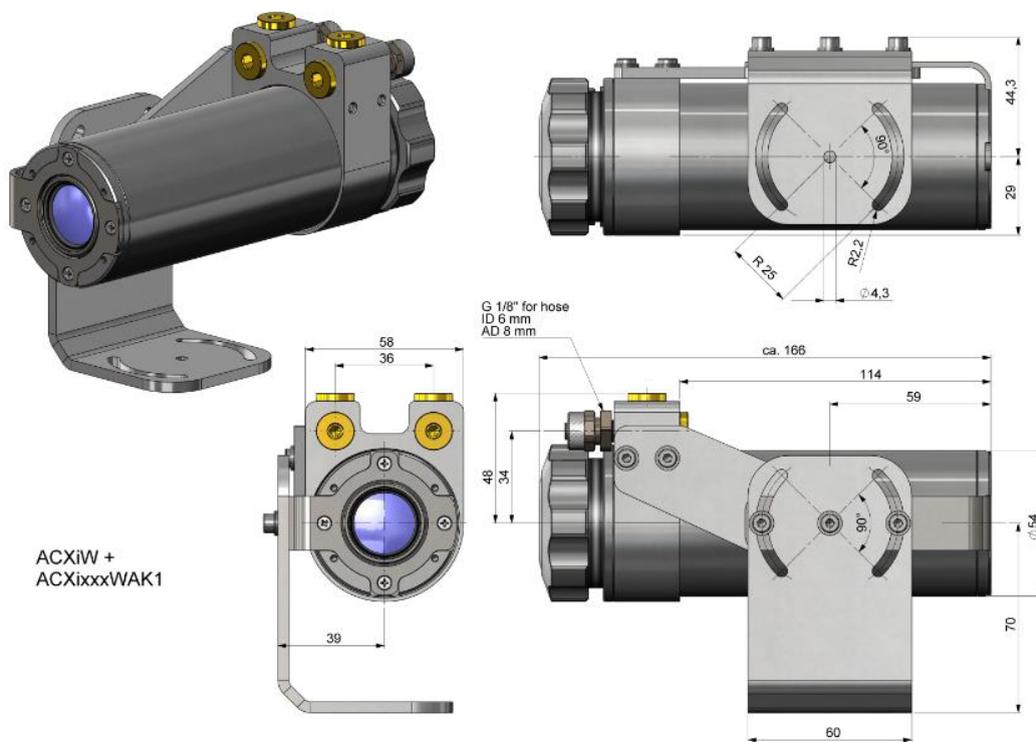


Figura 11. water cooling acoplado a la Cámara Optris, dimensiones (mm).

Existen unos parámetros a tener en cuenta para esta incorporación en relación al refrigerante. El flujo de agua debe de estar aproximado entre 1-5 l/min, y el fluido que circula en la carcasa no podrá exceder la temperatura de 30°C.

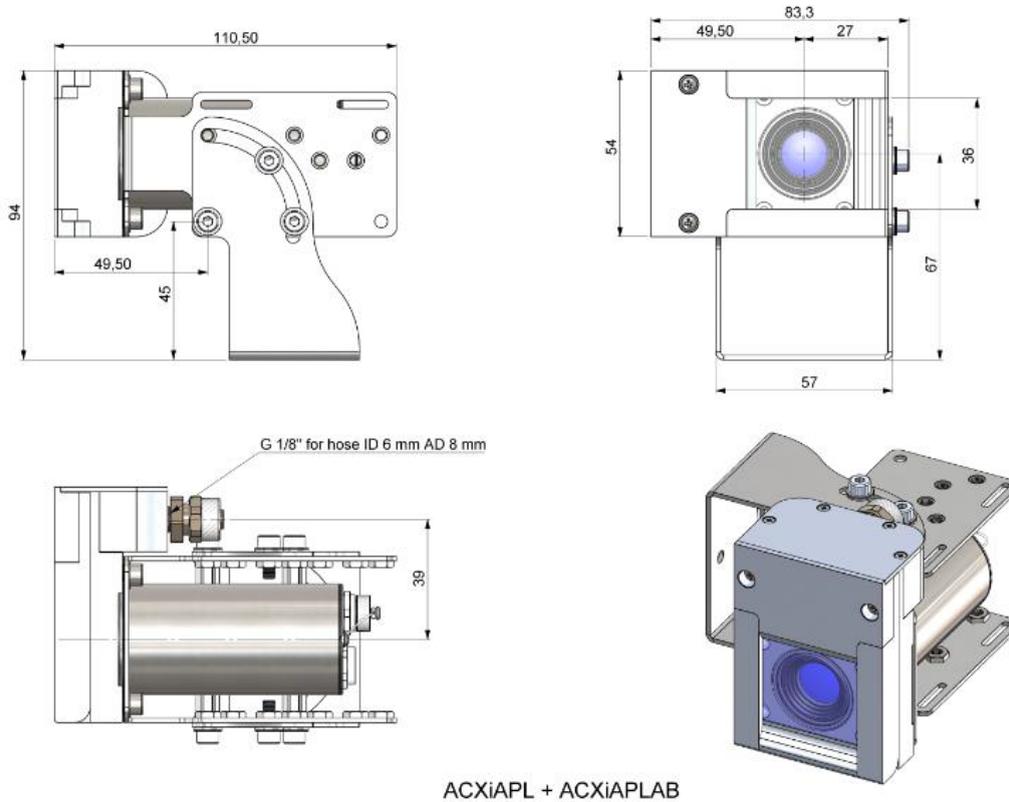


Figura 14. Purga de aire laminar acoplado a la cámara Optris, dimensiones (mm).

Hay que tener en cuenta una serie de parámetros sobre este accesorios como el caudal de aire ya que este no debe exceder de los 10 l/min ni disminuir de los 2 l/min. Por otro lado soporta una temperatura ambiente de máximo 50°C, sin embargo gracias al complemento water cooling la temperatura soportada es de hasta 250°C.

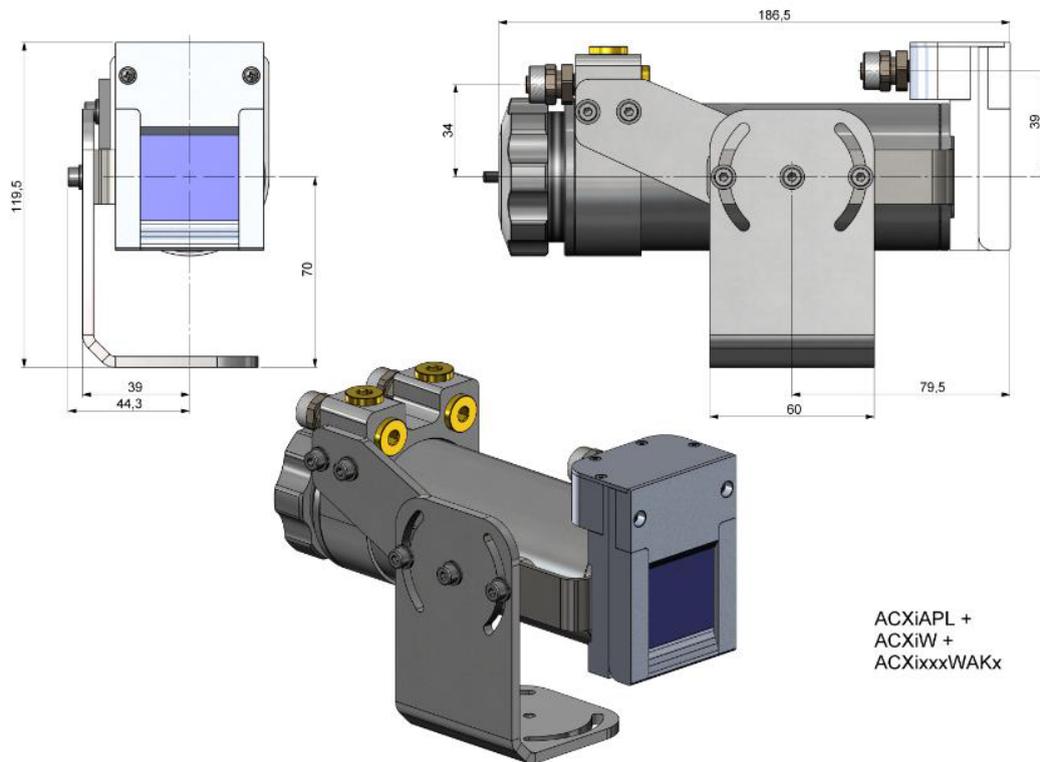


Figura 15. Purga de aire laminar y water cooling acoplados a la cámara Optris, dimensiones (mm).

En la figura 14 se puede observar el montaje completo de la cámara termográfica que se va a utilizar en este trabajo de fin de grado. Teniendo en cuenta la dimensiones de este sensor se procede a evaluar el mejor posicionamiento dentro de la máquina.

4.2 Descripción del soporte

El soporte debe de estar adaptado a las dimensiones y necesidades de la cámara termográfica, por lo que debe de tener en cuenta la entrada y salida de refrigerante y la entrada de aire comprimido. La cámara tiene que colocarse lo más perpendicular al plano y por otro lado debe de quedar bien fijado al soporte por posibles sacudidas de la máquina.

4.3 Funcionalidad

La función de este soporte no es más que fijar el sensor termográfico a la máquina, en una posición donde pueda visualizar todo el proceso de fabricación y se pueda monitorizar todo el proceso. Además debe de soportar el peso de la cámara.

5 Requisitos de diseño y consideraciones iniciales

En cuanto este apartado, la empresa AIDIMME impone unos requisitos básicos para su diseño y fabricación, teniendo en cuenta que tan solo se va a instalar un soporte para una cámara en la Meltio-Hass, por lo que esto va a repercutir a los procesos de fabricación que se van a emplear y los costes de la misma.

5.1 Tolerancias de fabricación

No obstante, las tolerancias para su fabricación deben de ser rígidas por la norma europea UNE 22768-1, ya que AIDIMME exige el seguimiento de esa norma, puesto que las piezas diseñadas en este trabajo de fin de grado se van a fabricar en las instalaciones de AIDIMME, las cuales disponen de maquinaria de fabricación aditiva. Este tipo de fabricación mencionado logra conseguir tolerancias hasta la clase media (m) siendo un grado de tolerancias muy aceptables para la aplicación de soportes y sistemas de amarre.

Teniendo en cuenta las tablas siguientes y que no se desea usar maquinaria de fabricación con exactitudes finas se registrarán por los valores límites de la clase media de las tolerancias, al igual que se observa a continuación:

Medidas en milímetros

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles respecto al valor nominal							
		0,5 ¹⁾ hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1 000	más de 1 000 hasta 2 000	más de 2 000 hasta 4 000
Designación	Descripción								
f	fina	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5	–
m	media	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
c	grosera	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
v	muy grosera	–	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 4	± 6	± 8

1) Para valores nominales inferiores a 0,5 mm, las tolerancias han de indicarse siempre junto a la cota nominal correspondiente.

Tabla 2. Tabla de tolerancias para dimensiones lineales, excepto aristas matadas.

Medidas en milímetros

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles respecto al valor nominal		
Designación	Descripción	0,5 ¹⁾ hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6
f	fina	± 0,2	± 0,5	± 1
m	media			
c	grosera	± 0,4	± 1	± 2
v	muy grosera			

1) Para valores nominales inferiores a 0,5 mm, las tolerancias han de indicarse siempre junto a la cota nominal correspondiente.

Tabla 3. Tabla de tolerancias para dimensiones lineales de aristas matadas.

Teniendo en cuenta la gran importancia de la inclinación del sensor las tolerancias de fabricación para ángulos deben de estar en la clase media.

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles en función de la longitud del lado menor del ángulo considerado, en milímetros				
Designación	Descripción	hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
f	fina	± 1°	± 0°30'	± 0°20'	± 0°10'	± 0°5'
m	media					
c	grosera	± 1°30'	± 1°	± 0°30'	± 0°15'	± 0°10'
v	muy grosera	± 3°	± 2°	± 1°	± 0°30'	± 0°20'

Tabla 4. Tabla de tolerancias para dimensiones angulares.

5.2 Acabados superficiales

En cuanto al acabado superficial que se busca el material debe de tener una rugosidad considerable, ya que de esta forma se logrará un mejor anclaje mecánico entre las partes del conjunto del soporte mejor. Dicho esto se busca una rugosidad superficial por encima de Ra 8 µm, donde Ra es la desviación del plano de la superficie de la pieza, la cual cuanto mayor sea este valor mayor será la rugosidad superficial del material.

5.3 Material de la pieza de estudio

Para este apartado se ha de tener en cuenta que el soporte debe de ser fabricado dentro de las instalaciones, teniendo en cuenta las limitaciones de materiales y proceso de fabricación. Otra limitación es que se pide que sea un polímero, por lo que se ha de elegir entre PA12, TPU y PP.

5.3.1 PA12 (POLIAMIDA 12)

En una primera opción se encuentra la PA12 o poliamida 12 en polvo, es un termoplástico robusto, pudiendo crear estructuras fuertes y de alta densidad. Además es resistente a aceites, grasas, alifáticos hidrocarburos y álcalis. Este polvo logra obtener un rendimiento de reutilización de un 80% con una alta precisión dimensional. Posee un temperatura de deflexión térmica de 95°C a una presión de 1.82 MPa. A continuación se observa una tabla con propiedades de este material:

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tracción	48 MPa
Módulo de tracción	1800 MPa
Alargamiento a la ruptura	20%
Resistencia a la flexión	70 MPa
Módulo de flexión	1800 MPa

Tabla 5 . Tabla de propiedades mecánicas de la PA12.

5.3.2 TPU (POLIURETANO TERMOPLÁSTICO)

Por otro lado el TPU o poliuretano termoplástico es un elastómero, destinado para piezas con buena flexibilidad y absorción de impactos con un buen acabado superficial gracias a su alta precisión dimensional. Además de todo esto es un material resistente a la abrasión, pudiendo soportar temperaturas de hasta 80°C en el ambiente. A continuación se observa una tabla con propiedades del TPU:

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tracción	9-7 MPa
Módulo de tracción	85 MPa
Alargamiento a la ruptura	150-280%
Resistencia a la flexión	9 MPa
Módulo de flexión	75 MPa

Tabla 6 . Tabla de propiedades mecánicas del TPU.

5.3.3 PP (POLIPROPILENO)

Y como última opción se encuentra el PP o Polipropileno, es un termoplástico muy similar a la poliamida, con la diferencia de proporcionar una excelente plasticidad y alta durabilidad a ejercicios de fricción pero con una menor resistencia a la tracción y un menor módulo de flexión que la poliamida. A continuación se observa una tabla con propiedades del polipropileno:

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tracción	28 MPa
Módulo de tracción	1400 MPa
Alargamiento a la ruptura	30-10%
Resistencia a la flexión	70 MPa
Módulo de flexión	1250-1500 MPa

Tabla 7 . Tabla de propiedades mecánicas del PP.

5.3.4 MATERIAL EMPLEADO

Una vez se ha analizado las tres posibilidades se ha realizado una tabla de valores comparativas entre los tres materiales de forma de lograr escoger el material con las mejores características mecánicas como una mayor resistencia a la tracción o a la flexión, además de no poder elasticidad ya que pandearía mucho el soporte y no se logra ver una monitorización clara y precisa.

MATERIAL	Propiedad mecánica				
	Resistencia a la tracción	Módulo de tracción	Alargamiento a la ruptura	Resistencia a la flexión	Módulo de flexión
PA12	48 MPa	1800 MPa	20%	70 MPa	1800 MPa
TPU	9-7 MPa	85 MPa	150-280%	9 MPa	75 MPa
PP	28 MPa	1400 MPa	30-10%	65 MPa	1250-1500 MPa

Tabla 8 . Tabla comparativa de propiedades mecánicas.

Se ha llegado a la conclusión tras observar las tabla comparativa que por sus características y aplicación a lo que se le va a dar uso la poliamida es la mejor opción, es que posee una mayor resistencia a la tracción, un mayor resistencia a la flexión que los anteriores dos una menor, por lo que no se va a deformar con facilidad y un menor alargamiento a la ruptura, por lo que no se va a deformar lo que cree un desplazamiento que interfiera en la correcta monitorización del proceso de fabricación.

Otros puntos importantes es que es resistente a aceites y grasas y el soporte se va a poder mojar de taladrina. Permite soportar temperaturas altas de hasta 95°C y permite reutilizar un 80% del material lo cual abarata el coste del material y es menos perjudicial para el medio ambiente, por lo que es un punto a tener en cuenta. Teniendo todo lo mencionado en cuenta se observa que la mejor opción dentro de los materiales proporcionados por la empresa es la PA2 (Poliamida 12).

No obstante el PP no deja de ser una excelente alternativa para los requisitos que se han dado pero por los anteriores motivos seleccionados se ha seleccionado la poliamida 12 en su lugar.

Se pueden consultar las fichas técnicas de estos materiales dentro del **ANEXO 4: ELEMENTOS COMERCIALES**, donde se observan todas las propiedades mecánicas que se han mencionado en cada material.

5.4 Proceso empleado

Conociendo tanto las tolerancias necesarias de fabricación como el material utilizado por sus propiedades entra como objetivo en este apartado seleccionar el proceso de fabricación más óptimo para la obtención de las piezas finales.

Tal y como se ha mencionado con anterioridad las piezas diseñadas serán fabricadas por fabricación aditiva logrando un abaratamiento de las piezas finales ,puesto que por una parte no es necesario ningún molde para su desarrollo y por otra parte tan solo se va a fabricar números muy limitados de piezas no superiores a 2, por estas razones es más interesante el uso de máquinas aditivas.

Prestando alta atención a las condiciones iniciales AIDIMME dispone de dos tecnologías de fabricación altamente cualificadas para lograr los objetivos buscados, ambas tecnologías se centran en la fabricación de piezas poliméricas pero con unas series de diferencias significativas a tener en cuenta. Estas dos tecnologías disponibles son SLS (Sinterizado selectivo por láser) y MJF (Multi Jet Fusion).

5.4.1 SLS (Sinterizado selectivo por láser)

El sinterizado selectivo por láser o bien conocido por su abreviatura SLS es una tecnología de cama de polvo polimérico al igual que la MJF. Mediante el uso de un láser es capaz de fundir las partículas en este caso de poliamida de forma selectiva como su nombre indica dentro del espacio de trabajo. Este espacio de trabajo opera a temperaturas altas dejando el polvo del material en un estado que con un pequeño aporte de energía que lo proporciona el láser pueda fundir las partículas del polímero. El proceso de sinterizado lo ejecuta capa a capa del material pudiendo lograr piezas con una buena isotropía, lo cual nos facilita la cohesión del material consiguiendo piezas de muy buena calidad y resistencia, sin embargo no consigue mejor isotropía que la MJF ya que el láser no profundiza tanto la capa como lo hacen los agentes de su competidora.

Este proceso continuo de sinterización capa a capa es posible gracias al uso de un carro que proporciona una capa de material encima de la cama de fabricación, esta cama baja 0.1 mm pudiendo dejar paso a esta depositación de material y así la creación de la pieza capa a capa.

Mediante esta tecnología no es necesario ningún soporte para la elaboración de las piezas, posee buenas tolerancias de fabricación cumpliendo los requisitos del Apartado 5.1. Por otro lado, el coste y el tiempo de fabricación es reducido, sin embargo esta tecnología posee el

inconveniente que una vez terminado el proceso de fabricación continua con el proceso de enfriamiento natural, este proceso es extenso puesto necesita que el interior de la máquina y del pastel de fabricación queden a temperatura ambiente, dejando la máquina inutilizada hasta su finalización. Este proceso suele pasar alrededor del triple que el proceso de fabricación, pero gracias a este proceso se logra que las piezas no se deformen por el contraste de temperatura, evitando el “warping” el pandeo, y que el material no se cristalice tan rápido.

Sin embargo al haber una temperatura alta y constante en la cámara de fabricación esta provoca una degradación del material causando una menor reutilización del material.

Este proceso de fabricación logra unos acabados superficiales con poliamida 12 (PA12) de alrededor de Ra 8µm, lo cual entra dentro de las exigencias de rugosidad superficial que se dieron anteriormente.

5.4.2 MULTI JET FUSION

Por otro lado, la multi jet fusion o bien conocida como MJF es una tecnología de polvo polimérico al igual que la SLS con la diferencia principal que no utiliza láser para la fusión del material, sino que se pulveriza agentes especiales. Estos agentes se utilizan como aditivos para disminuir el punto de fusión del material, en el caso del agente de fusión, y para aumentar la temperatura de fusión, agente de detalle, este segundo se utiliza para perfilar el perímetro de la pieza y separar del polvo que se utiliza para la pieza y el polvo restante.



Figura 16. Proceso de fabricación de HP Multi Jet Fusion. Fuente: HP

Una vez agregados los agentes en una capa mediante un mismo carro pasa el momento de calentar el material, donde las zonas donde existe el aditivo en el caso del de fusión como su nombre indica fusiona el material, lo funde mediante el uso de calor aportado por lámparas, y en el caso del de detalle delimita la pieza. Mediante el uso de los agentes aditivos se evita degradar tanto el material por el constante uso de las altas temperaturas, esto causa que tenga un alto nivel de reciclaje y se pueda abaratar más los costes de producción, además de ser más favorable para el medio ambiente ya que no se desperdicia tanto material.

Por otro lado gracias al uso de estos agentes también se logra mayor isotropía que la SLA ya que profundizan aún más entre capas y medias el uso de ambos se consigue delimitar bien los perfiles de las piezas, ganando propiedades mecánicas similares a la inyección.

Al igual que en la SLS esta tecnología necesita un tiempo de enfriamiento del material, sin embargo la desarrolladora y la posesora de la patente de esta tecnología, la cual es HP, dispone de procesos para no dejar inutilizada la máquina, de forma que puedas extraer la bandeja de fabricación y puedas incorporar otra. No obstante la bandeja a enfriar deberá esperar el triple del proceso de fabricación para la obtención de piezas.

Esta tecnología no necesita ningún tipo de soporte por lo que también abarata más las piezas, y al igual que la anterior tecnología cumple con las condiciones de tolerancias de fabricación pudiendo crear paredes de espesor de 0.5 mm y grosores de alturas de capas de 0.08 logrando las condiciones óptimas de rugosidad que aparece en el [Apartado 5.2](#).

No obstante el acabado superficial de la poliamida 12 (PA12) en esta tecnología oscila entre los valores de 10 y 12 μm , siendo más que aceptables para la rugosidad mínima exigida.

5.4.3 TIPO DE FABRICACIÓN ELEGIDA

Una vez comentadas las dos tecnologías y teniendo en cuenta las condiciones iniciales que se le han dado, los costes de producción, tiempos y reutilización del material se puede determinar cuál es el tipo de fabricación más óptimo, en este caso corresponde a la tecnología de HP, Multi jet fusion. Por una parte en el aspecto de tolerancias en ambos tipos son equiparables, sin embargo sí que existen una serie de diferencias que hace que la MTF sea la más idónea, como en la reutilización del material que por culpa de la degradación por las altas temperaturas constantes hace que no sea un proceso tan rentable y reciclable que suceda con su competidora, haciendo desperdiciar parte del material no utilizado.

Sin embargo, existe también una pequeña diferencia con el acabado superficial, ya que la poliamida en la Multi Jet Fusion logra una mayor rugosidad por lo que se logra una mayor anclaje mecánico entre las piezas que se fabrique, logrando así una ventaja que se busca.

Otro de los aspectos interesantes es el tiempo de fabricación, que mediante la tecnología MJF se puede aprovechar más los tiempos, puesto puedes sacar la bandeja de fabricación de la máquina e introducir otra para que produzca mientras se realiza el proceso de enfriamiento.

Queda destacar que gracias a los agentes aditivos que utiliza la Multi Jet Fusion se logra una isotropía total de la pieza cosa que la SLS no puede conseguir, ya que esta provoca poros en la pieza que consiguen que no posea las mismas propiedades mecánicas.

En conclusión la tecnología MJF logra adaptarse mejor a las consideraciones iniciales por lo que se va a seleccionar esta gran tecnología de la multinacional HP.

Sin embargo, la tecnología SLS podría entrar perfectamente como una segunda opción por sus atributos y cualidades, siendo una buena alternativa.



Figura 17. HP Multi Jet Fusion 5200.

La máquina en cuestión que dispone AIDIMME en sus instalaciones es la HP Multi jet fusion series 5200 la cual proporciona una bandeja de fabricación de 380 x 284 x 380 mm.

6 Diagrama de flujo del trabajo .

Para entender este trabajo y la forma en la que se realiza se ha añadido este apartado, aquí se verá el modo en el que ha sido capaz la realización del trabajo de fin de Grado, ya que éste gran parte se ha apoyado en una base experimental puestos que se ha llevado a cabo.

En un primer lugar se ha centrado la atención en la máquina a la que hay que integrar este sistema termográfico, por posibilidades de diseño se opta a realizar un escaneo de todas aquellas partes de la máquina que se vean interesantes para la integración de una cámara termográfica.

Una vez obtenido un CAD del mismo se puede estudiar las posibilidades de posicionamiento del sensor a utilizar, valorando a su vez el diseño de soporte.

No obstante una vez determinada la posición y el diseño del soporte inicial se requiere realizar un estudio de elementos finitos para prevenir de posibles rupturas del soporte y al mismo modo prevenir la seguridad del sensor. Si este FEM fuera inválido, en otras palabras que sí que hubiera peligro de ruptura, de la pieza, se volvería atrás el proceso y se volvería a realizar otro diseño inicial del soporte, valorando aspectos como reducir esquinas vivas para prevenir de puntos críticos de fractura, o también valorar el aumento de la masa del soporte.

Una vez obtenido un diseño del soporte que haya sido aceptable tras realizar el estudio FEM se realizará un proceso de optimización topológica para intentar reducir el máximo de masa posible del soporte, de ese modo reducir el material usado, reducir el peso del soporte, y de una forma reducir gastos, teniendo en cuenta que debe aprobar otro estudio de elementos finitos para asegurarse así de un correcto funcionamiento y vida de uso.

Cuando se disponga de todo el material necesario para el anclaje de la cámara termográfica es cuando hay que pasar a las necesidades de este sensor. Una de las necesidades que requiere es un circuito de refrigeración para poder alimentar el sistema de carcasa refrigerante que posee. Otra necesidad es el sistema de purga que lleva incorporado, puesto que se debe alimentar con aire comprimido, de ese modo necesita un circuito que lo alimente.

Teniendo todo lo necesario para el uso del sensor termográfico se realizará una prueba para comprobar su excelente funcionamiento, y así pues comprobar el trabajo de fin de grado.

A continuación se podrá observar un diagrama de flujo el cual se ha llevado a cabo para realizar este proyecto:

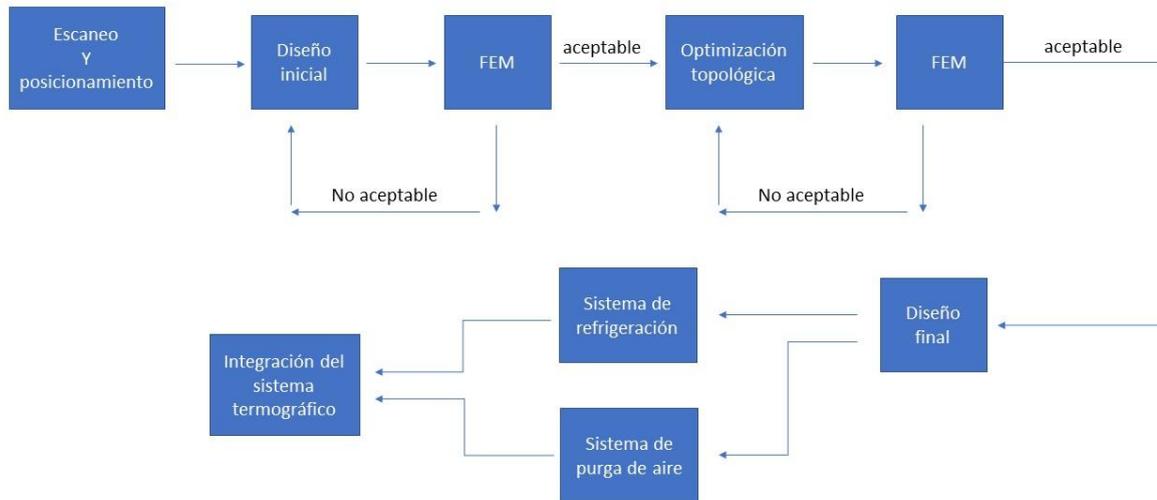


Figura 18. Diagrama de flujo de trabajo.

7 Posicionamiento de la cámara termográfica.

Antes de comenzar con el apartado del diseño del soporte se ha de valorar la posición del mismo, para poder elaborar el diseño en función a las necesidades y condiciones que nos da la máquina.

Para la posición más óptima de este sensor termográfico se ha de tener en cuenta las dimensiones de la máquina, el movimiento de fabricación y el punto donde se va a tener que tener en cuenta la monitorización de temperaturas.

Además se ha de intentar colocar la cámara lo más perpendicular al proceso de fabricación, ya que sino es así podría distorsionar la imagen por el ángulo de inclinación, y tener en cuenta el circuito de tubos que necesita para el sistema de refrigeración y de purga de la lente, por lo que necesitará 3 vías de tubos, dos de entrada y retorno del fluido refrigerado y uno de aire para la purga de aire.

Una vez tenido en cuenta las condiciones de posición se procede al uso de las tecnologías de scanners 3D para poder producir un CAD de las partes importantes de la Meltio y poder concretar la posición más adecuada de la cámara termográfica. Para ello se va a utilizar el escáner Handy Scan Black, el cual dispone la empresa AIDIMME.



Figura 19. Escáner Handy Scan Black.

Este dispositivo con una exactitud de ± 0.025 mm permite crear una nube de puntos encima del objeto utilizando puntos de referencias que se le coloca a la pieza y a los alrededores, estos puntos se conocen como dianas, donde gracias a tan solo tres genera superficies malladas generadas por triángulos. Si se desea mayor resolución la malla del diseño generado posee mayor números de triángulos, con lo que lleva mejor captación de la realidad, pero con la desventaja de pesar más el archivo final de la malla que conlleva un peor manejo del escaneo.

Sin embargo a menor resolución se logra una triangulación menor por lo que será menos fiel a la realidad, pero será más sencillo de operar al encontrar más caras grandes y visibles en la malla.

Teniendo en cuenta que debe estar la cámara lo más perpendicular posible al plano de fabricación se valora escanear la zona de la cabeza de la parte de mecanizado y de fabricación aditiva, ya que las paredes de la máquina quedan alejadas y el cabezal está en constante movimiento. Por está razón se procede a escanear la zona de los cabezales para valorar donde integrar una estructura de anclaje para la cámara.

Mediante el uso del software VXelements se puede visualizar el escaneo realizado por la Handy scan black como se puede observar en la [figura 20](#).

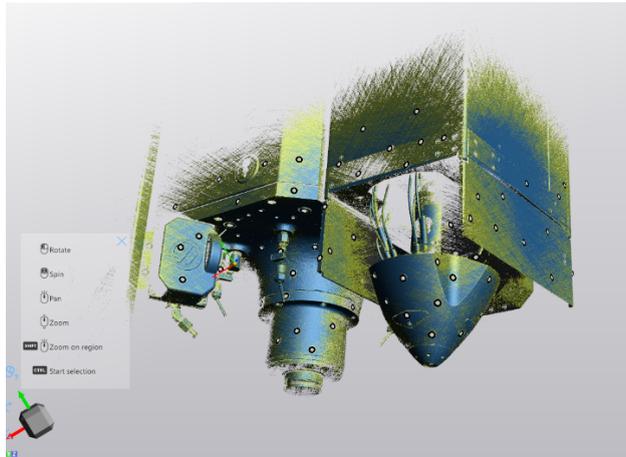


Figura 20. Escaneo Meltio-Hass.

Una vez proporcionado el mallado del escaneado se puede continuar realizando una reconstrucción del mismo, para esta parte se va a utilizar el software SolidWorks, el cual utilizando las superficies de las caras de las mallas se pueden utilizar de base para crear planos y a su vez poder extruir la forma de la Meltio-Hass, pudiendo obtener ya un sólido funcional para partir de ahí el diseño del soporte.

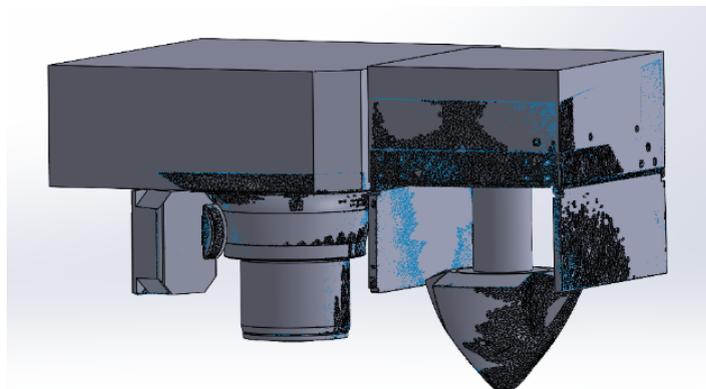


Figura 21. Sólido Meltio-Hass.

Gracias a la reconstrucción de la malla se puede conocer la posición exacta de los agujeros roscados para la tornillería y de esa manera utilizarlos para forma de anclaje del soporte, utilizando la misma métrica del tornillo pero siendo más largo.

Observando que el cabezal izquierdo en la [figura 21](#), el cual corresponde al cabezal de mecanizado, posee varias mangueras de fuente de taladrina se valora la opción de anclar en el cabezal de fabricación aditiva, descartando de esa forma al de mecanizado.

Por otro lado, dado que hay que tener en cuenta el movimiento del cabezal se debe de descartar la cara posterior del cabezal, el cual que no visible en la [figura 21](#), ya que en el momento que la máquina realiza “home” en la posición de guardado o de calibración de los ejes de coordenadas esta cara que casi en contacto con la pared equidistante de atrás.

Dado que se valora un buen anclaje del soporte se debe buscar la superficie, donde se pueda encontrar más puntos de sujeción que pueden ser agujeros roscados, de esa manera se entiende que la mejor opción es el lateral derecho del cabezal de fabricación aditiva.

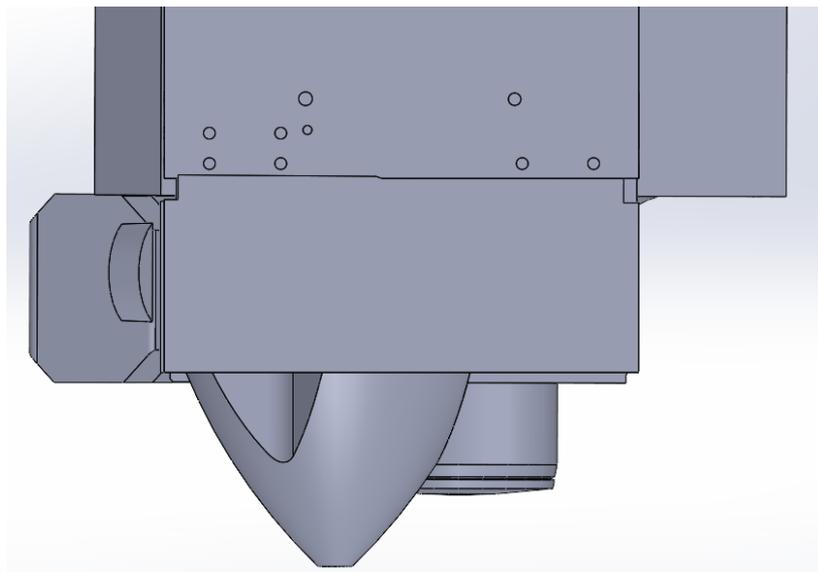


Figura 22. Lateral derecho del sólido Meltio-Hass (posicionamiento de agujeros).

Tal y como se puede observar en la [figura 22](#) se observa una alta disposición de oportunidades de anclaje, parte del soporte no se realizará simétrico puesto por una parte el cabezal está expuesto enfrente y la tornillería tampoco es simétrica, por lo que son unas condiciones a tener en cuenta.

No obstante gracias al escaneo de los cabezales de la Meltio-Hass se ha podido obtener una referencia exacta de puntos de anclajes, los cuales serán utilizados en el soporte. Además de proporcionar una perspectiva de 360° del centro de mecanizado de la máquina,

8 Solución técnica adaptada

Aquí se va a realizar el diseño del sistema de amarre de la cámara Optris teniendo en cuenta sus dimensiones y los puntos de anclaje de la Metilo-Hass para su posterior colocación. Más tarde se hará uso de la optimización topológica para poder lograr una pieza igual de resistente pero con la ventaja de usar menos material, lo cual beneficiará tanto económicamente como su ligereza, además del uso de cálculos de esfuerzos de cargas como el FEM (Método de los elementos finitos). Por otro lado se dará nombre a los componentes normalizados que se van a usar para el soporte y por último se mostrará el resultado final.

8.1 Diseño y desarrollo del soporte.

En este apartado se comenta cada uno de los elementos diseñados, los cuales unidos crean el conjunto del soporte de la cámara, de forma de conocer las geometrías de cada uno de ellos. Hay que tener en cuenta que las partes que componen el soporte se fabricarán por la Multi jet fusión y estarán hechas de PA12 (poliamida 12), lo cual hará más sencillo la obtención de las piezas al tratarse de fabricación aditiva.

Al fabricarse mediante fabricación aditiva existe una gran libertad de diseño de las piezas por lo que aparecerán grandes cantidades de redondeos y de geometrías complejas que por otro tipo de fabricación que no sea este serían muy complicadas de fabricarlas o incluso imposible.

Esto repercutirá también a la hora de los planos ya que no es necesario el uso de planos de fabricación con todas sus cotas, ya que con un archivo SLT sacado de un CAD se puede fabricar cualquier pieza por fabricación aditiva.

En cuanto a las dimensiones de las piezas se adjuntan en el **ANEXO 5: PLANOS** así como las especificaciones técnicas de cada una y del conjunto. Y en cuanto a los elementos comerciales utilizados se indica las especificaciones en el **ANEXO 4: ELEMENTOS COMERCIALES**.

No obstante en este apartado aparece una explicación de cada parte del conjunto como su función y detalles a tener en cuenta.

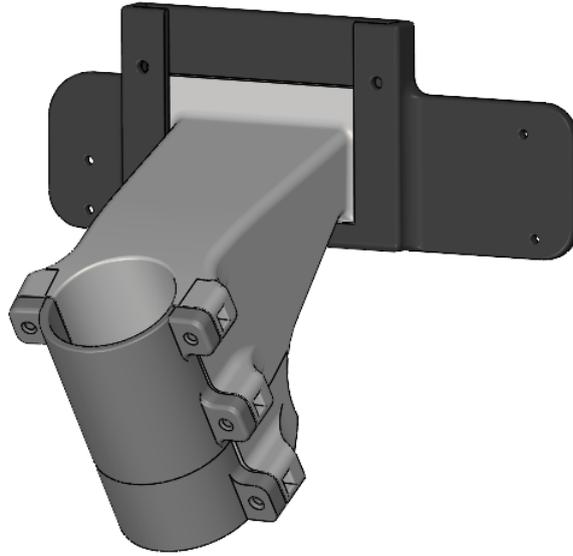


Figura 23. Conjunto del soporte.

Tal y como se puede mostrar en la [Figura 23](#), el conjunto del soporte se divide en tres piezas, anclaje, cuerpo y envoltura.

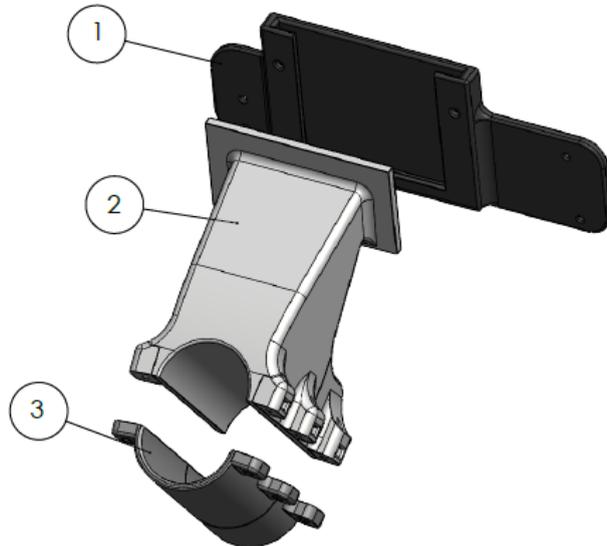


Figura 24. Vista explosionada del anclaje, cuerpo y envoltura.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1-1	Anclaje	1
2	2-1	Cuerpo	1
3	3-1	Envoltura	1

Tabla 9 . Componentes del conjunto.

8.1.1 Anclaje.

Esta parte del conjunto tiene la función de amarrar el soporte al cabezal de fabricación aditiva. Su otra función es poder desequipar la cámara termográfica con el cuerpo y la envoltura de una forma más sencilla, y cuando sea requerido volverla a montar, siendo el anclaje la única parte fija permanente del cabezal. Sin embargo debe de ser capaz de amarrar bien el cuerpo del soporte para prevenir de posibles problemas.

Para esta pieza se ha utilizado el escaneo de la máquina conociendo así la posición más precisa de los agujeros roscados, de forma que quede bien sujeta el anclaje.

Además posee un sistema guiado para el montaje y la fijación de la pieza del cuerpo, dejándola totalmente restringida en la envoltura del carril.

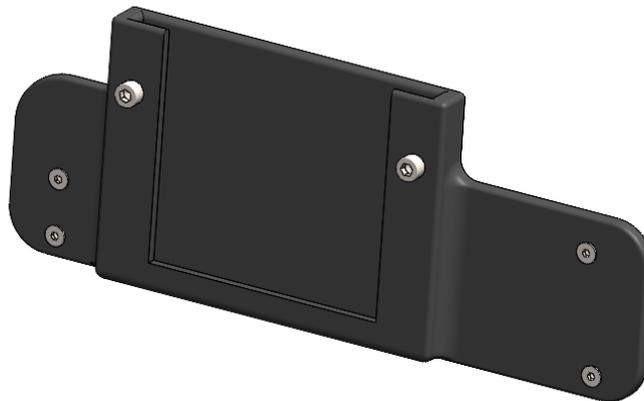


Figura 25. Subconjunto del anclaje.

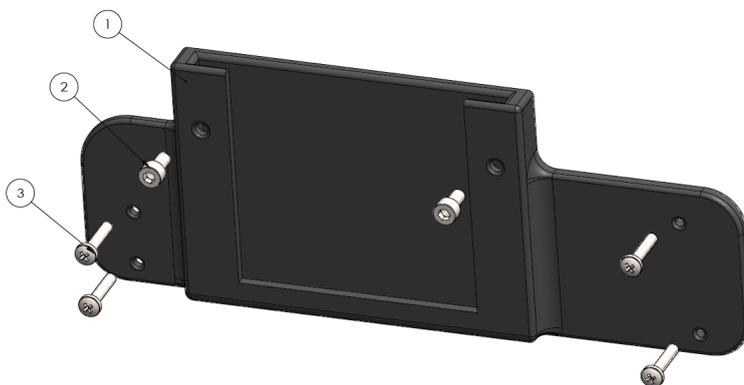


Figura 26. Vista explosionada del subconjunto del anclaje.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1-1	Anclaje	1
2	1-2	Tornillo M5 x 10 ranura exagonal	2
3	1-3	Tornillo M4 x 20 ranura en cruz	4

Tabla 10. Componentes del subconjunto Anclaje.

Para conocer las medidas dimensionales del diseño del anclaje, se encuentra en el **ANEXO 5: PLANOS**.

Tal y como se comentó y valoró en el apartado de requisitos de diseño y condiciones iniciales toda pieza diseñada se fabrica con la tecnología Multi Jet Fusión con poliamida 12 obteniendo una rugosidad de 12 μm .

Al tratarse de fabricación aditiva su fabricación no parte de bloque en bruto para sustraer material hasta obtener la pieza, sino que no es necesaria el uso de material innecesario para su fabricación, puesto que una vez fabricado ya posee sus dimensiones finales.

No obstante las tolerancias de fabricación son seguidas por las destacadas en el apartado 5.1 Tolerancias de fabricación, sin embargo dependiendo de la posición y la colocación de la pieza en la bandeja de fabricación puede variar pero nunca salirse de los rangos requeridos.

En cuanto a la sujeción al cabezal de la máquina se ha anclado de 4 puntos, 2 en cada extremo de la pieza para lograr una mejor fijación, dando hueco a cavidades para tornillos de métrica 4, este hueco son pasantes para poder llegar a la rosca que aparece en el cabezal la cual evidentemente es de métrica 4.

Y Por otro lado aparecen 2 pasadores roscas de métrica 5 para tornillos de su respectiva métrica, con la función de fijar en los raíles a la pieza Cuerpo, estos dos pasadores roscados se introducen en dos huecos cilíndricos los cuales mediante un postprocesado se realizará la rosca pertinente con un macho de rosca.

8.1.2 Cuerpo.

El cuerpo del soporte tiene la función de posicionar la cámara hacia la visión más perpendicular al plano de fabricación y conseguir máyor campo de monitorización de la superficie y del proceso de fabricación. Además de poder acoplar la cámara de una forma segura y sujeta para evitar cualquier inconveniente de caída. Esta pieza debe de quedar fijada y guiada por los carriles de la pieza Anclaje y a su vez da lugar a la unión de la pieza Envoltura para la sujeción total del sensor termográfico.

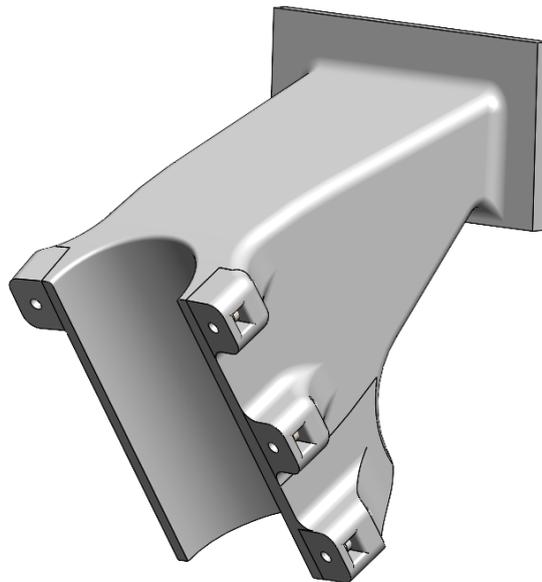


Figura 27. Conjunto del cuerpo.

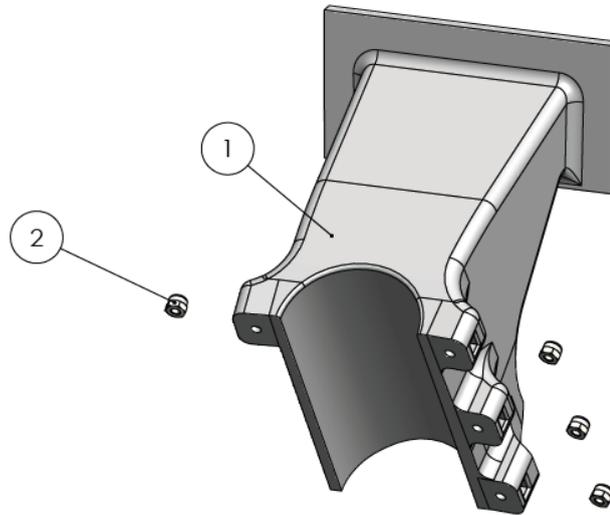


Figura 28. Vista explosionada del subconjunto del cuerpo.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	2-1	Cuerpo	1
2	2-2	tuerca con freno M4	4

Tabla 11. Componentes del subconjunto Cuerpo.

Para conocer las medidas dimensionales del diseño del anclaje, se encuentra en el **ANEXO 5: PLANOS**.

Así como la pieza Anclaje, esta pieza dispone de las mismas características de fabricación, material y tolerancias, consiguiendo un acabado superficial de 12 μm .

El cuerpo dispone de un semicírculo dando lugar a parte del cerramiento de la cámara termográfica, dando la otra mitad a la pieza Envoltura. Por otro lado, se observa en la [figura 28](#) unas ranuras adaptadas para incorporar insertos de tuercas, obteniendo así la unión de la pieza del cuerpo con la Envoltura, dejándolas ancladas con tornillos de métrica 4. Dichas tuercas son al igual que los tornillos de métrica 4, además de poseer un sistema de freno para disminuir la posibilidad de afloje y desenroscado del tornillo, así pues lograr una excelente fijación de ambas piezas.

8.1.3 Envoltura.

Esta pieza tiene la función de recoger y envolver parte de la cámara termográfica dando lugar a una fijación en 360° con la pieza Cuerpo anteriormente comentada. Otra utilidad junto a la anterior pieza es guiar la visualización de sensor, ya pues este puede rotar sobre sí y desconfigurar la monitorización del proceso de fabricación, por lo que debe de llevar unas guías adaptadas a la forma de la cámara para evitar este problema.

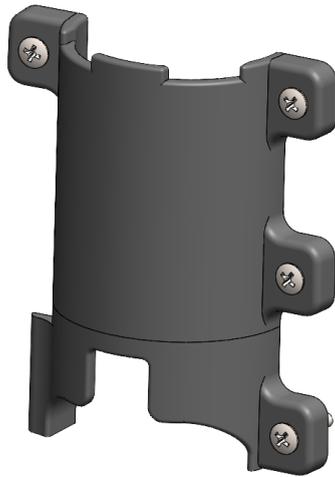


Figura 29. Conjunto de la Envoltura.

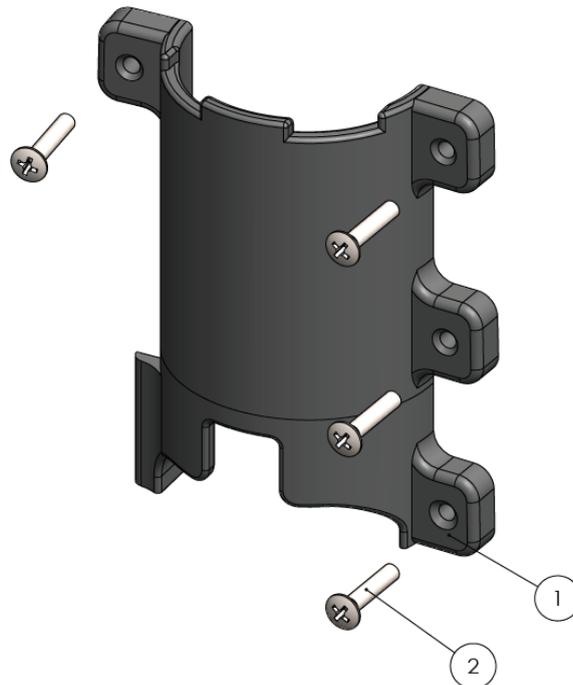


Figura 30. Vista explosionada del subconjunto de la Envoltura.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	3-1	Envoltura	1
2	3-2	Tornillo M4 x 20 ranura en cruz	4

Tabla 12. Componentes del subconjunto Envoltura.

Para conocer las medidas dimensionales del diseño del anclaje, se encuentra en el **ANEXO 5: PLANOS**.

Al igual que las dos piezas anteriores, esta sigue las condiciones iniciales que se remarcaron en el apartado 5, donde se expone temas como el método de fabricación, tolerancias de fabricación, materiales y rugosidades.

Esta pieza dispone de otro semicírculo creando con la anterior pieza un cilindro para poder envolver el contorno circular de la cámara termográfica Optris, de forma que quede bien envuelta y sujeta a la vez. Por otra parte, tal y como se puede observar en la [figura 30](#) aparecen 4 guías como huecos pasantes para tornillos de métrica 4, de esta forma guiar esta pieza con los insertos de tuercas que aparecen en la pieza cuerpo, como aparece en la [figura 28](#). Gracias al sistema de guiado mencionado y al roscado de los tornillos con las roscas queda sellado los dos semicilindros, logrando un gran ajuste y agarre con el sensor termográfico.

Además mediante la unión de ambas piezas quedan dos lengüetas paralelas logrando evitar la rotación del sensor sobre sí mismo, ya que este posee una paletilla de aluminio que sobresale de ella. La equidistancia entre las lengüetas es tal que la anchura de la paletilla de aluminio de la cámara, tal y como se observa en la [figura 31](#).

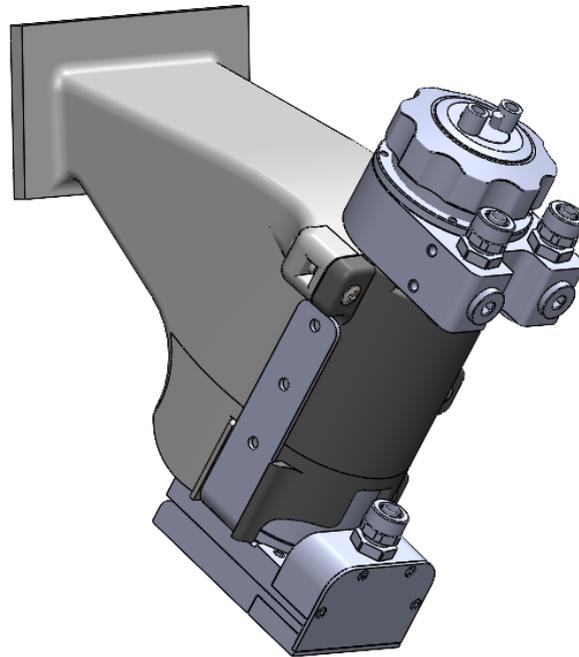


Figura 31. Unión de los subconjuntos Cuerpo y Envoltura con la cámara Optis.

8.1.4 Conjunto de diseño

No obstante en este subapartado se observa gráficamente la unión de las piezas con sus subconjuntos, además de la unión con su entorno como los cabezales de la máquina y la cámara termográfica.

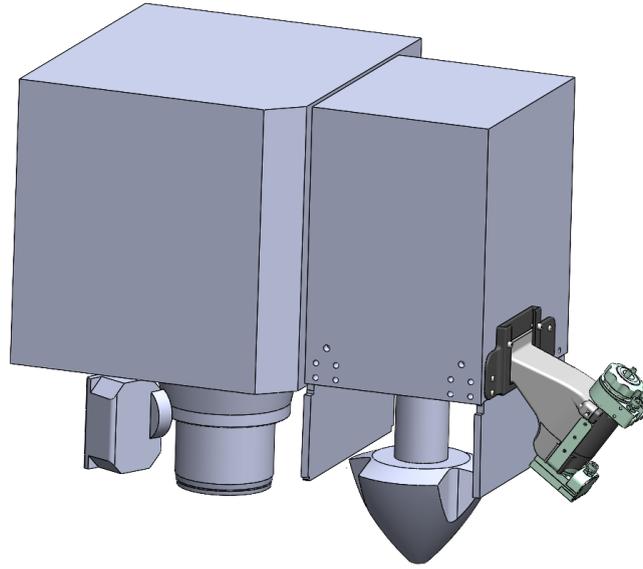


Figura 32. Conjunto final.

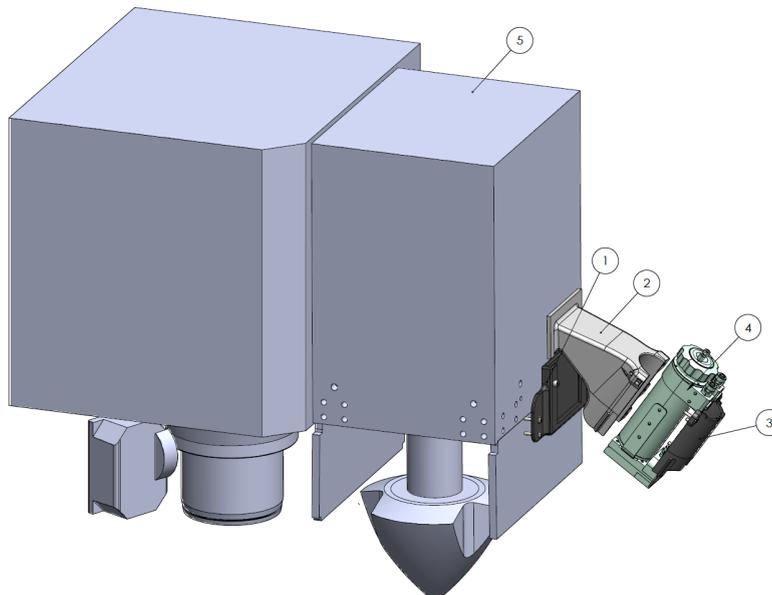


Figura 33. vista explosionada del conjunto final.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1-1,2,3	Subconjunto anclaje	1
2	2-1,2	Subconjunto cuerpo	1
3	3-1,2	Subconjunto envoltura	1
4	4	optris XI 400	1
5	5	Meltio-Hass	1

Tabla 13. Componentes del conjunto.

8.2 Estudios FEM y optimización del diseño

A continuación se realiza una comprobación de esfuerzos y de cargas en la pieza mediante el uso de un estudio del método de los elementos finitos o bien conocido como FEM. Dicho estudio utiliza un procedimiento numérico para resolver problemas complejos, siendo los ámbitos más utilizados para el estudio de cálculo de resistencia de materiales y el de estructuras. Así pues se puede sacar en detalle un análisis estructural como la tensión de Von Mises, de desplazamiento, tensión y compresión y tensión principal.

Teniendo en cuenta que el sistema de refrigeración y la cámara tienen un peso de 1710 gramos más el sistema de purga de aire que pesa 218 gramos el soporte debe de aguantar un peso mínimo de 1928 gramos. Sin embargo, por prevención a posibles accidentes repentinos se requiere un factor de seguridad superior, evitando de esta forma algún imprevisto, por lo que se considera que el total es de 6 kilogramos o bien dicho 60N.

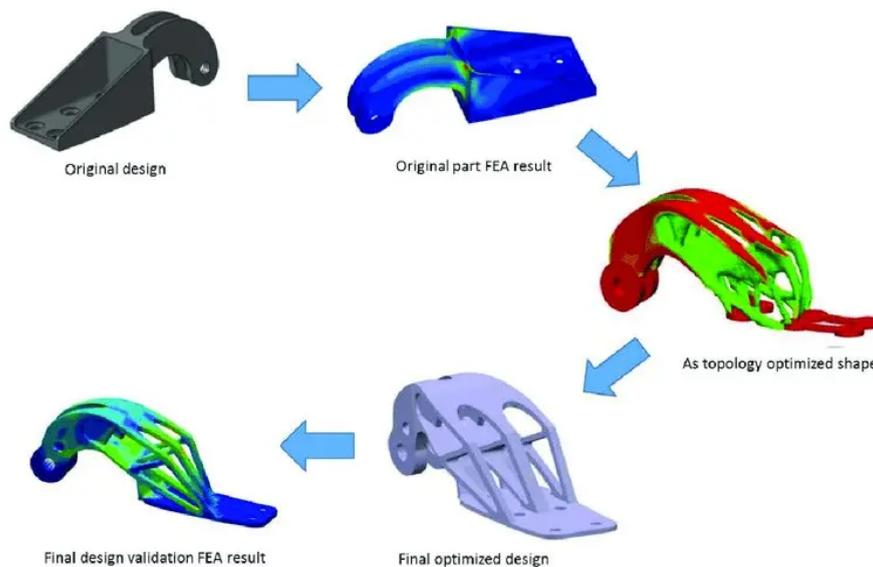


Figura 34. Ciclo de una buena optimización del diseño.

Como bien aparece en la [figura 34](#), se observa que partiendo de un diseño original se puede hacer un primer estudio FEM conociendo si se parte de un diseño con un buen coeficiente de seguridad en cuanto a cargas y esfuerzos, más tarde tras aprobar ese estudio FEM se procede a realizar una optimización topológica del diseño. Una vez obtenido un diseño optimizado a partir de uno original se vuelve a realizar un estudio de método de los elementos finitos para comprobar si sigue poseyendo la misma eficacia pero con menos material que el diseño inicial.

8.2.1 Método de los elementos finitos inicial

Así pues se comienza realizando un estudio FEM del diseño original, conociendo los puntos de anclaje del soporte y la fuerza que debe resistir, la cual es de una fuerza de 60 N.

Se va a utilizar el software Altair Inspire el cual posee tanto cálculo de estudios FEM como la misma optimización topológica, donde en primer lugar habrá que seleccionar de qué material está compuesto la pieza, en este caso el soporte se va a fabricar en poliamida 12, la cual es un Nylon, por lo que se selecciona como tal, con las especificaciones del material.

En segundo lugar, se ha de colocar los puntos donde va anclada el soporte a la pared del cabezal y sujetadores donde se unen las piezas simulando la tornillería.

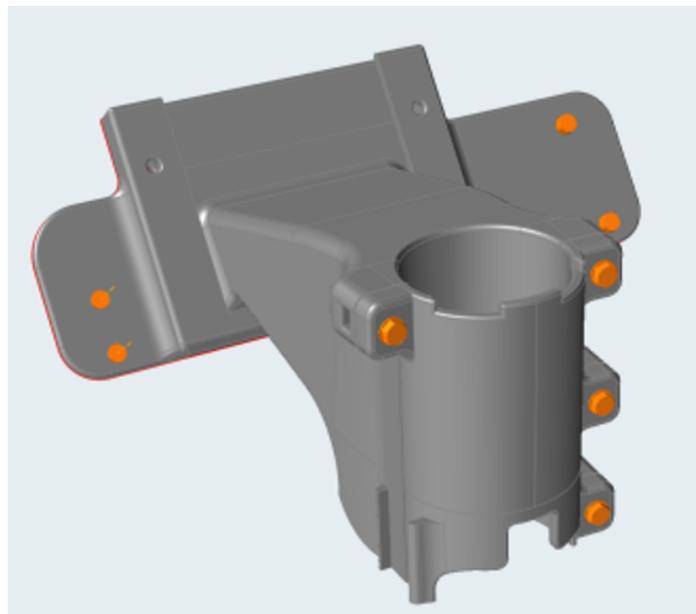


Figura 35. Puntos de anclaje y uniones entre piezas.

A continuación se aplica la carga en las secciones y superficies de la pieza donde se va a colocar la cámara termográfica, con lo cual la fuerza que ejercerá. Esta fuerza como se ha comentado será de 60N que es lo que equivale a 6 kilogramos.

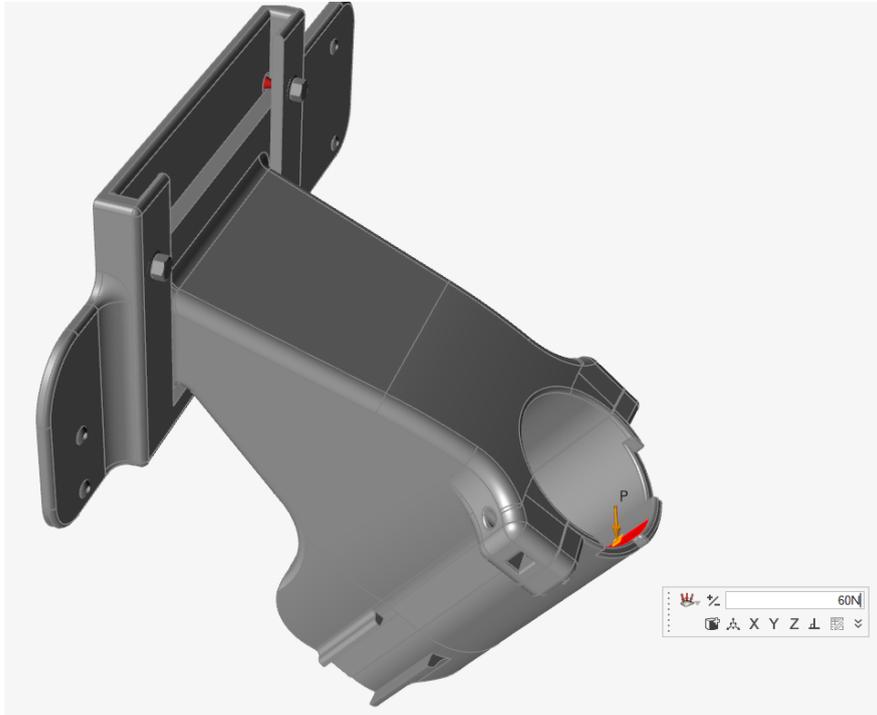


Figura 36. Superficie de carga de la cámara termográfica.

Una vez determinadas las condiciones iniciales se pueden analizar datos gráficos tales como el desplazamiento, la tensión/compresión y la tensión de Von mises.

En primer lugar, observamos en la figura 37, la tensión de Von Mises de forma de conocer la energía de distorsión , usado como teoría de fallos para materiales dúctiles. Conociendo que el material posee una resistencia a la tensión de 48 MPa se puede terminar si es apto el diseño.

Para conocer más datos y especificaciones técnicas de la PA 12 que se va a utilizar aparece todo en el **ANEXO 4; ELEMENTOS COMERCIALES**.

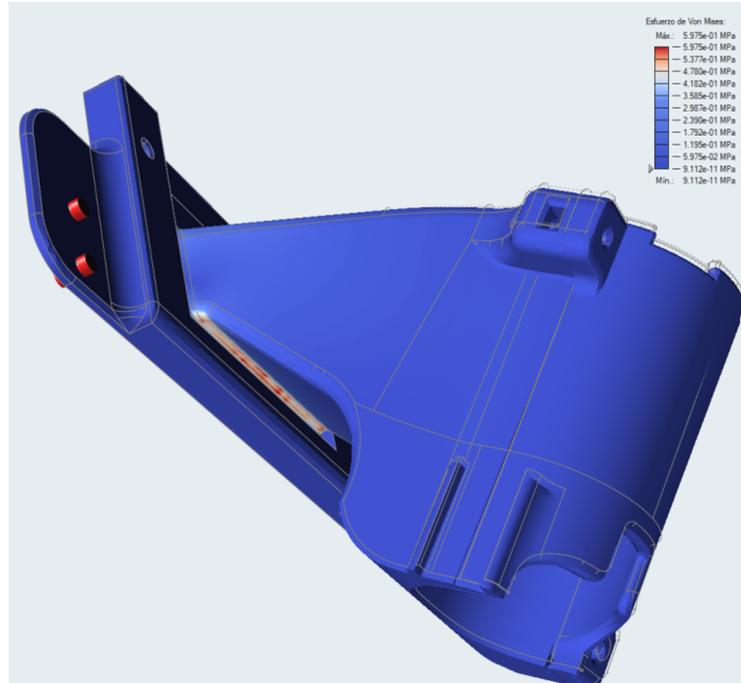


Figura 37. Esfuerzo de Von Mises

Tal y como muestra la [figura 37](#), el punto más crítico que aparece en el diseño es de 0.5975 MPa lo cual es más que apto para la resistencia del material.

De igual forma ocurre en los esfuerzos de tensión y compresión del material tal y como se muestran en la [figura 38](#), y la [figura 39](#), donde el punto máximo es de tan solo 0.2767 MPa, por lo que también es apto.

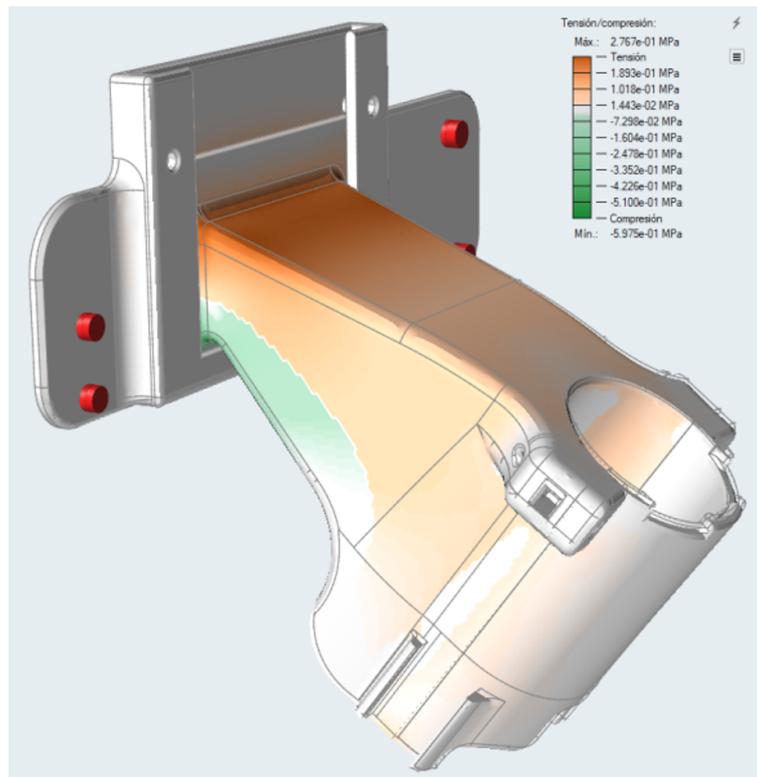


Figura 38. Esfuerzo de tensión/compresión

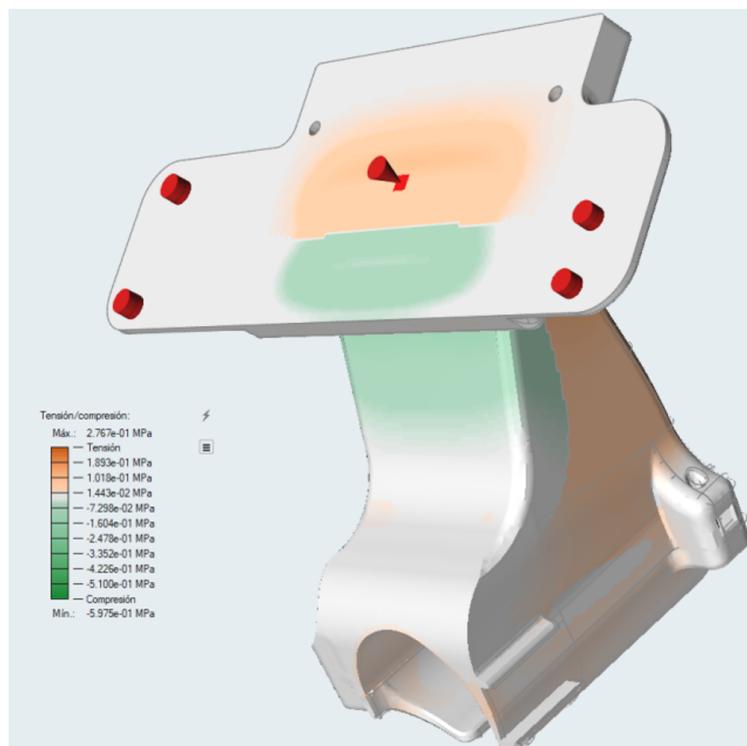


Figura 39. Esfuerzo de tensión/compresión

Por último, debido a que la cámara termográfica debe de apuntar a una superficie en concreto para su uso el desplazamiento que va a recorrer el soporte debe de ser pequeño. Tal como se muestra en la [figura 40](#), se observa que el desplazamiento máximo de las piezas es de 0.03290mm no causando ningún problema en la monitorización del proceso de fabricación.

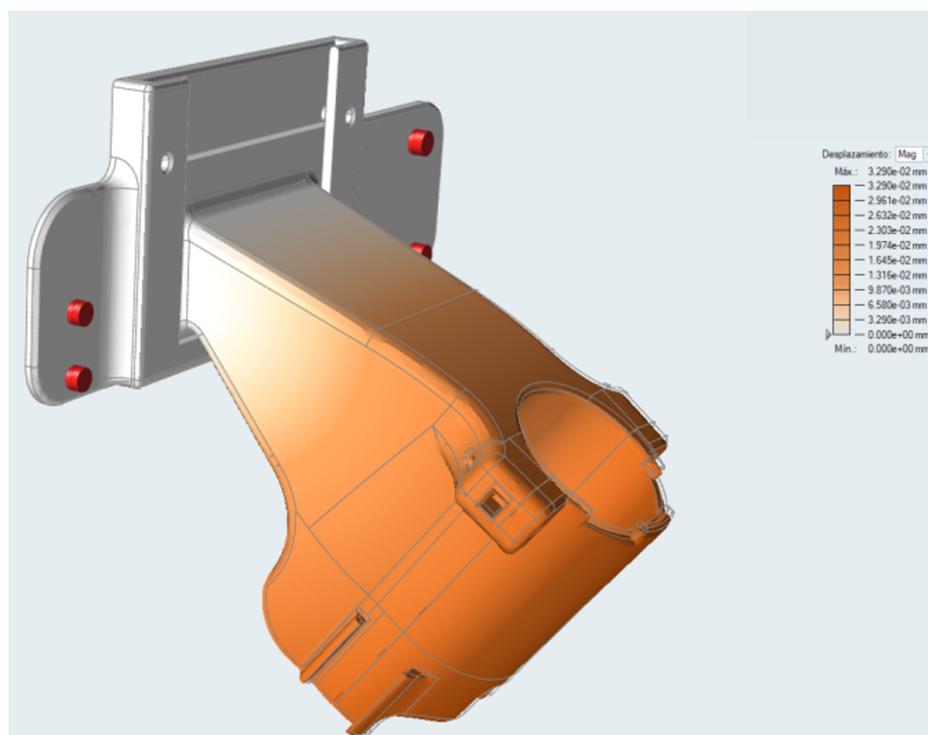


Figura 40. Desplazamiento del soporte.

Tras haber realizado el estudio FEM se da la conclusión que el diseño realizado como soporte es apto para las funciones y consideraciones mencionadas, así como el coeficiente de seguridad, desplazamiento, esfuerzo de Von Mises y esfuerzo de tensión y compresión del material.

8.2.2 Optimización topológica del soporte.

Para este apartado se utiliza el software Altair Inspire al igual que en el anterior apartado para el uso de la optimización topológica. Este método de optimización utiliza modelos de algoritmos para un conjunto de cargas, espacios definidos, limitaciones y condiciones iniciales para una pieza con un determinado material, pudiendo resolver problemas con la reducción de material o la reducción de peso.

La optimización produce formas muy complejas y orgánicas con formas libres, un gran desafío para las fabricaciones sustractivas pero un gran acierto para el uso de la fabricación aditiva, ya que las reglas de diseño son menos restrictivas y pueden realizar cualquier forma sin ningún coste añadido. Con lo consiguiente consigues tanto un mayor ahorro en material y energía empleada para la elaboración, se necesitan menos máquinas y la reducción de peso de la pieza.

Además de una reducción del impacto ecológico, ya que no es necesario tanto material para su fabricación dejando así pocos desperdicios.

Teniendo en cuenta que la parte más másica del soporte es el cuerpo y es donde más material se puede reducir, se procede a optimizar tan solo esa pieza.

En primer lugar para poder realizar la optimización es seleccionar de qué material está fabricada la pieza en este caso al igual que en el anterior las piezas están fabricadas en PA12, la cual es un Nylon. Más tarde tal y como aparece en la [figura 41](#). Hay que recalcar cuál es objetivo de la optimización, siendo en este caso maximizar la rigidez y además se quiere buscar reducir un volumen total de espacio de diseño de un 30%.

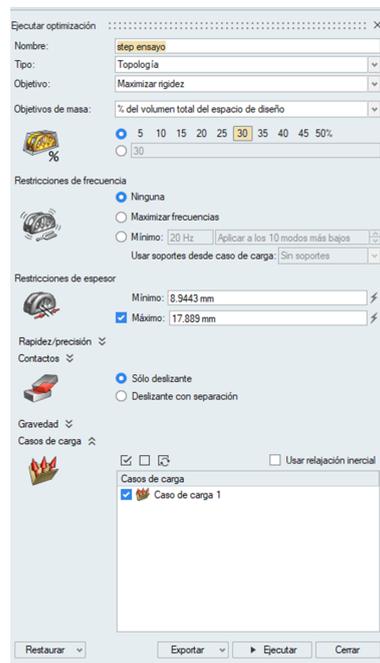


Figura 41. Ejecución de la optimización topológica.

No obstante teniendo ya definidas las consideraciones que se buscan en la optimización se ejecuta teniendo en cuenta los esfuerzos que aparecen en el estudio FEM. El proceso da como resultado una especie de forma guía para darte una idea de como debe de ser la pieza , tal y como se observa en la [figura 42](#). formando el material mínimo que debe de tener el cuerpo.

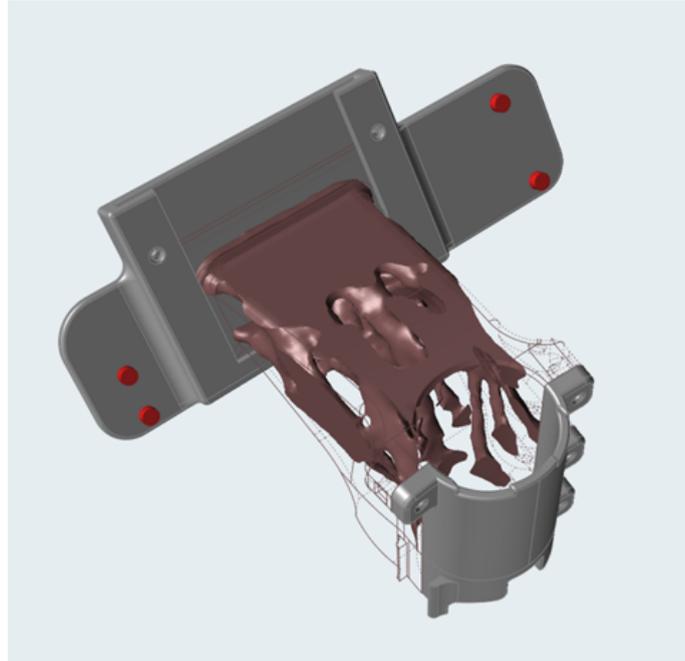


Figura 42. Optimización topológica del cuerpo.

Tras una reconstrucción y formación de estructuras por la herramienta de altair PolyNURBS se logra obtener una pieza optimizada supuestamente cumpliendo las restricciones y condiciones de cargas existentes, esto se corrobora a continuación por un segundo estudio del método de elementos finitos.

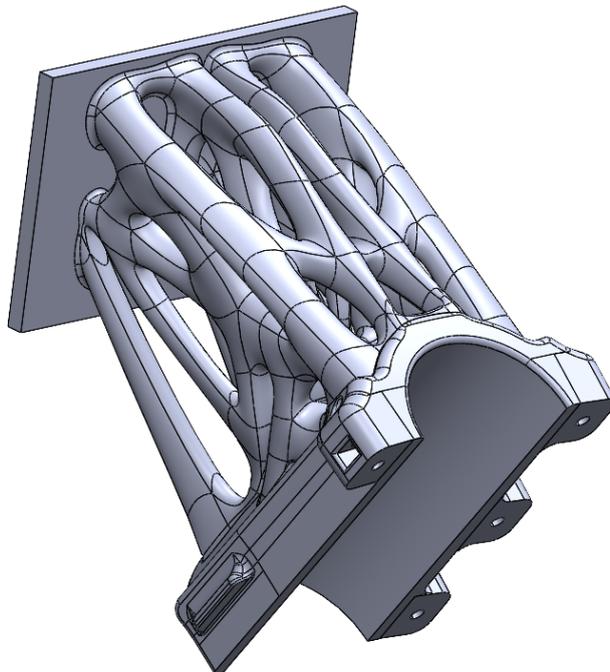


Figura 43. Cuerpo optimizado.

8.2.3 Método de los elementos finitos del soporte optimizado

Tras haber realizado una optimización topológica de la pieza Cuerpo se ha de comprobar que sigue soportando las condiciones de esfuerzos a las que el conjunto se va tener que someter, para ello se va a realizar otro estudio FEM al igual que el primero en el apartado 7.2.1 Método de los elementos finitos inicial. Mediante el uso de estos estudios se logra conocer la tensión de Von Mises, de desplazamiento, tensión y compresión y tensión principal, de esta manera determina si es viable la optimización con disminución de material.

Sin embargo antes de realizar el FEM se ha de rediseñar la pieza anclaje, ya que la forma de unión entre esta pieza y el Cuerpo ha variado por la optimización, esta remodelación se puede observar en la [Figura 44](#). De igual forma se analiza todo el conjunto en un mismo estudio del método de elementos finitos.



Figura 44. Anclaje remodelado.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1-1	Anclaje	1
2	1-2	Tornillo M5 x 10 ranura exagonal	2
3	1-3	Tornillo M4 x 20 ranura en cruz	4

Tabla 14. Componentes del subconjunto Anclaje optimizado.

Una vez modificada la pieza Anclaje es cuando ya es posible la unión de piezas y realización del método de elementos finitos y comprobar si con la reducción de masa es igual de eficaz el soporte.

En el anclaje utiliza 4 tornillos de métrica 4 los cuales serán de Acero 304 los cuales resisten a cortadura para el empotramiento de la pieza en el cabezal de Meltio, esto se logra mediante una serie de calculo de esfuerzos en **ANEXO 1: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS**

En primer lugar se encuentra la Tensión de Von Mises, la cual este análisis se puede observar en la Figura 45, donde se puede observar que a diferencia del anterior caso de estudio FEM las tensiones se encuentran más disipadas y homogéneas en las piezas, sin observar ningún punto o franja que destaque en las piezas. También aparece que el punto máximo de tensión es de 1.428 MPa, siendo más que aceptable, ya que el material posee una resistencia a la tensión de 48 MPa, Este punto máximo se puede ver en la Figura 46, donde con un mayor redondeo de la pieza se podría disipar.

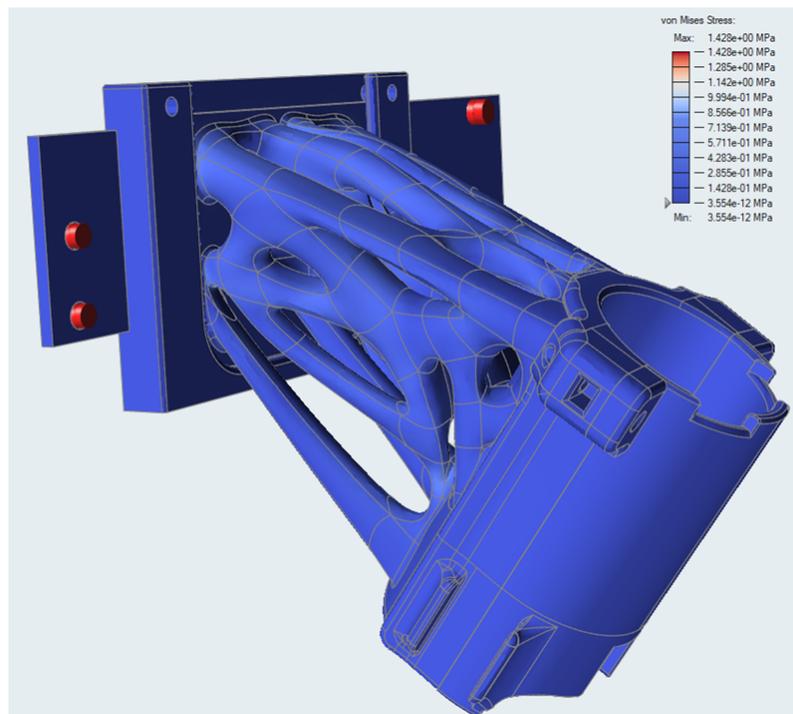


Figura 45. Esfuerzo de Von Mises del conjunto optimizado.

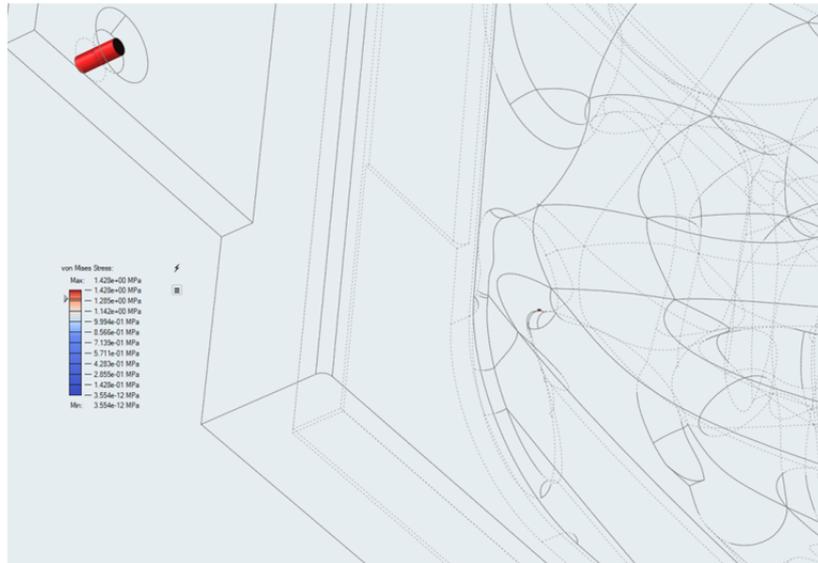


Figura 46. Esfuerzo de Von Mises del conjunto optimizado.

No obstante en cuanto los esfuerzos de Tensión y compresión se puede observar en la [Figura 47](#). y en la [Figura 48](#). donde no parece haber variado muchos los valores, si se puede observar el punto de tensión y compresión a aumentado un poco pero es a causa de la disminución de material, sin embargo el valor máximo que es de 0.7982 MPa sigue siendo minúsculo a lo que puede soportar la PA 12. Conociendo el valor máximo de la zona o punto más crítico se puede dar más que apto para su aplicación, por lo que la reducción de masa no ha sido ningún inconveniente.

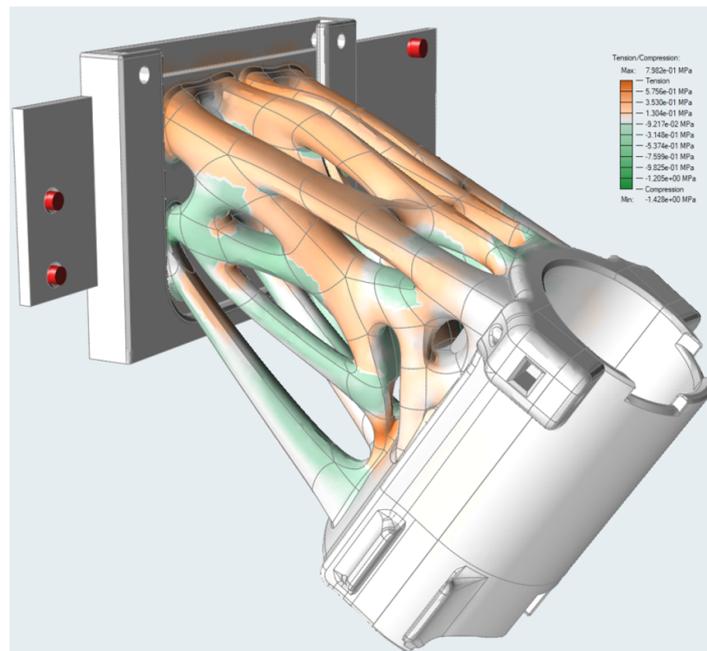


Figura 47. Esfuerzo de tensión/compresión del conjunto optimizado.

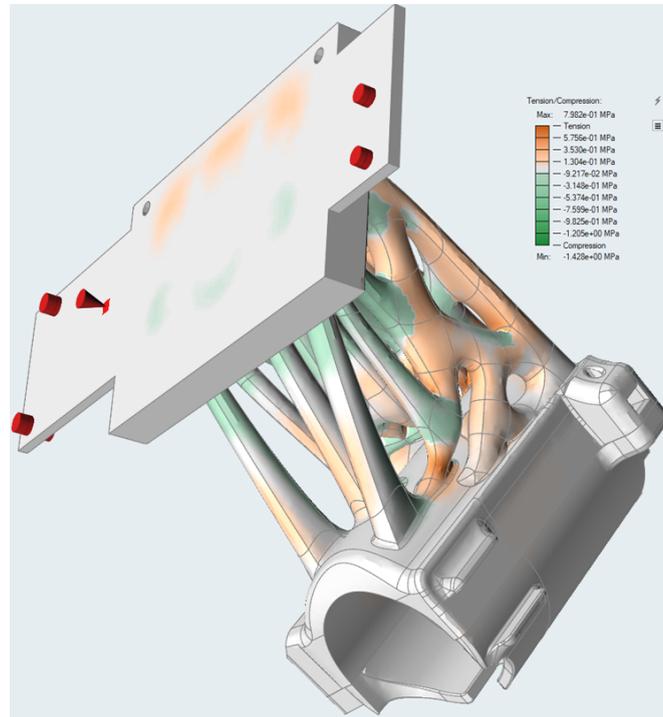


Figura 48. Esfuerzo de tensión/compresión del conjunto optimizado.

Por último, como ya se mencionó en el anterior método de los elementos finitos debido a que la cámara termográfica debe apuntar a una superficie en concreto para su uso, el desplazamiento que va a recorrer el soporte debe de ser pequeño. Por ello, tal y como se muestra en la [Figura 49](#), se observa que el desplazamiento máximo de las piezas es de 0.0583 mm, por lo que no causa ningún problema en la monitorización del proceso de fabricación, y observando que la optimización de diseño no ha resultado ningún inconveniente relacionado al desplazamiento del conjunto.

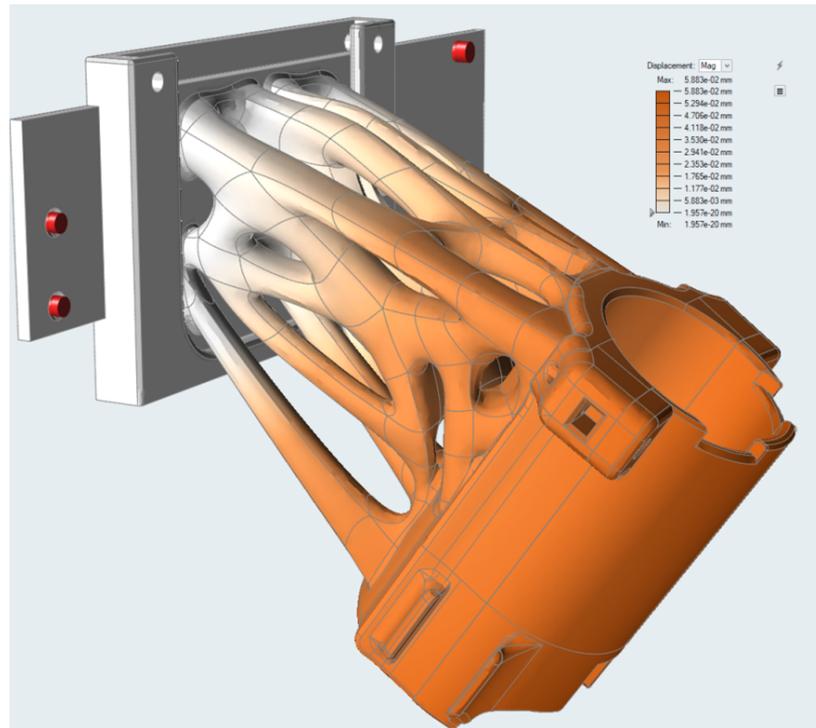


Figura 49. Desplazamiento del soporte optimizado.

Recopilando todo lo analizado en este apartado se puede afirmar que el uso de la optimización ha sido favorable, puesto la reducción de masa de la pieza Cuerpo no ha resultado casi ningún cambio a la resistencia de esfuerzos y de desplazamiento del soporte. Gracias al uso de la optimización topológica se ha podido utilizar menos material, cercano a una reducción de un 30%, siendo un gran ahorro de material.

Debido a la geometría de la pieza Cuerpo si esta se fabricará por un proceso de sustracción de material habría una cantidad alta de desperdicios de material además de ser casi imposible de realizar por su forma. El mismo caso ocurriría si se quisiera realizar por algún proceso de inyección que debido a su geometría sería imposible fabricar esta pieza, por lo que este tiempo de optimización topológica está más pensado para fabricación aditiva debido a las formas y geometrías que produce.

8.3 Resultados finales de diseño

Gracias a la disposición de máquinas de fabricación aditiva en AIDIMME se ha podido llevar a cabo este proyecto, así como también los diseños realizados en él, por lo consiguiente en este apartado se va a observar imágenes reales una vez fabricada las piezas. No obstante si no se hubiera tenido en disposición este tipo de fabricación no hubiera sido imposible la elaboración de estas piezas ya que como anteriormente se ha mencionado la geometría

obtenida por la optimización topológica es muy complicada de lograr en un tipo de fabricación sustractiva o por otras formas convencionales.

Por otra parte, estas piezas al haberse fabricado por la tecnología Multi jet fusion no ha sido necesario el uso de soportes para su elaboración, ya que este tipo de fabricación está basada en un lecho de polvo, el cual las capas pueden estar sostenidas por el polvo que hay abajo a la hora de ser fabricadas una a una estas capas. Por lo consiguiente tan sólo será necesario un post procesado de arenado para eliminar la poliamida aglutinada en la pieza fabricada y un postprocesado de roscado mediante un macho como anteriormente se ha mencionado.

8.3.1 Pieza Anclaje



Figura 50. Pieza anclaje.

8.3.2 Pieza Cuerpo

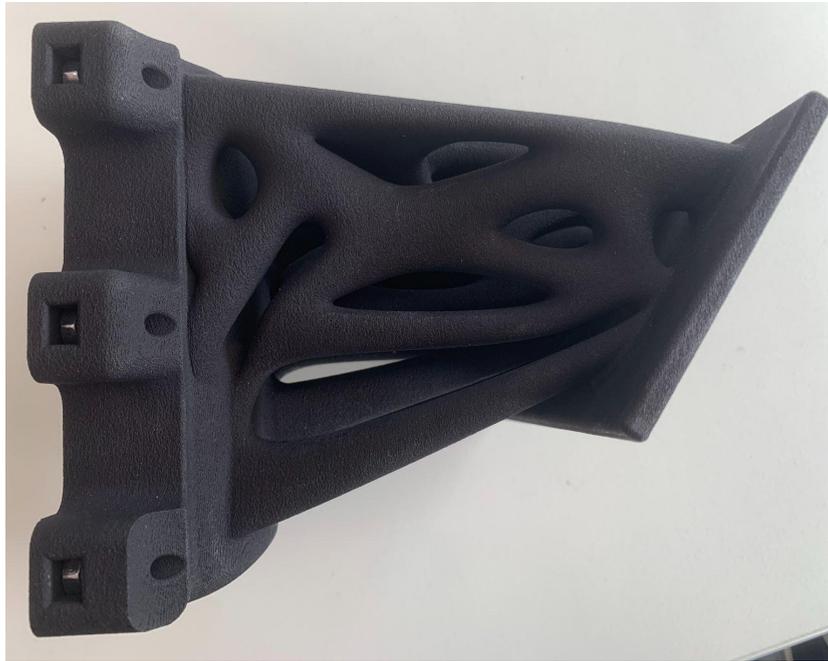


Figura 51. Pieza cuerpo.

8.3.3 Pieza Envoltura



Figura 52. Pieza envoltura.

8.3.4 Conjunto Soporte



Figura 53. Soporte.

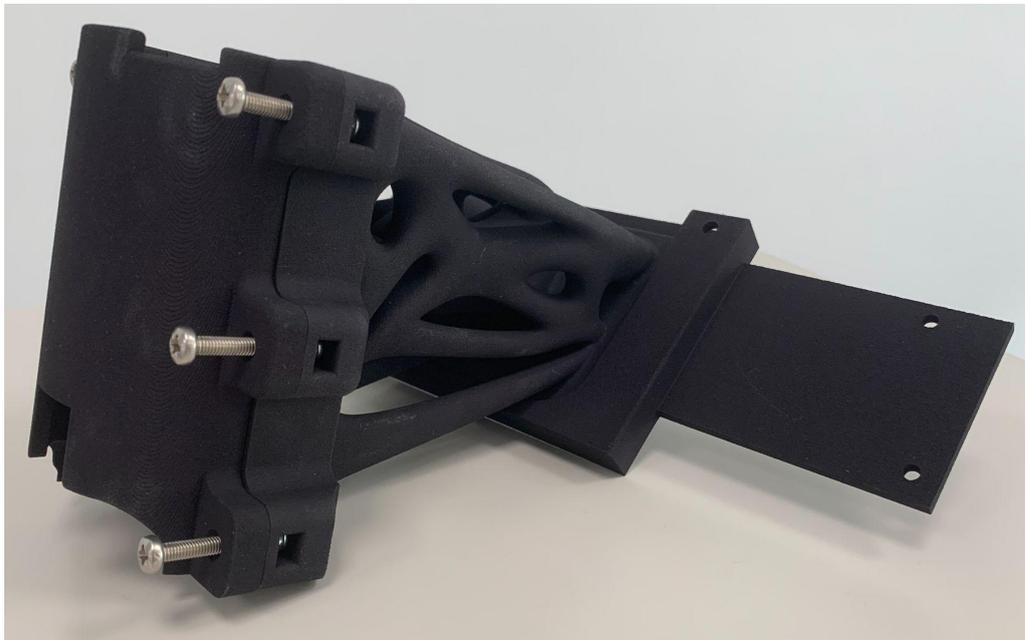


Figura 54. Soporte.

8.3.5 Soporte con la cámara termográfica.

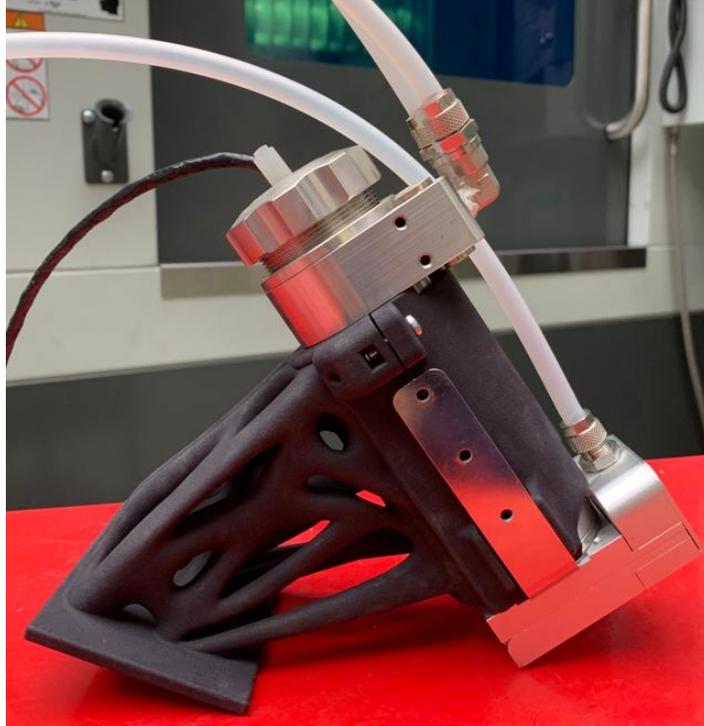


Figura 55. Soporte con la cámara y con sistemas de refrigeración y purga .

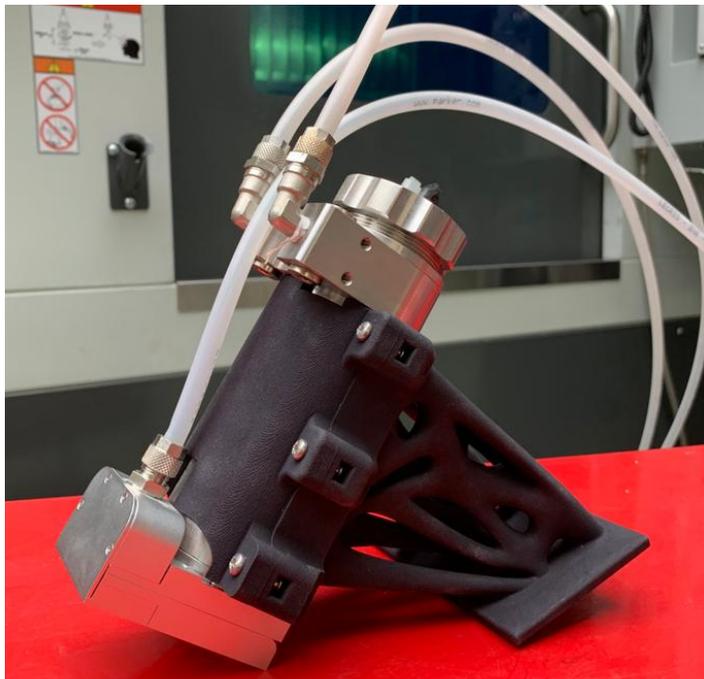


Figura 56. Soporte con la cámara y con sistemas de refrigeración y purga .

8.3.6 Soporte con la cámara termográfica en Meltio-Hass.

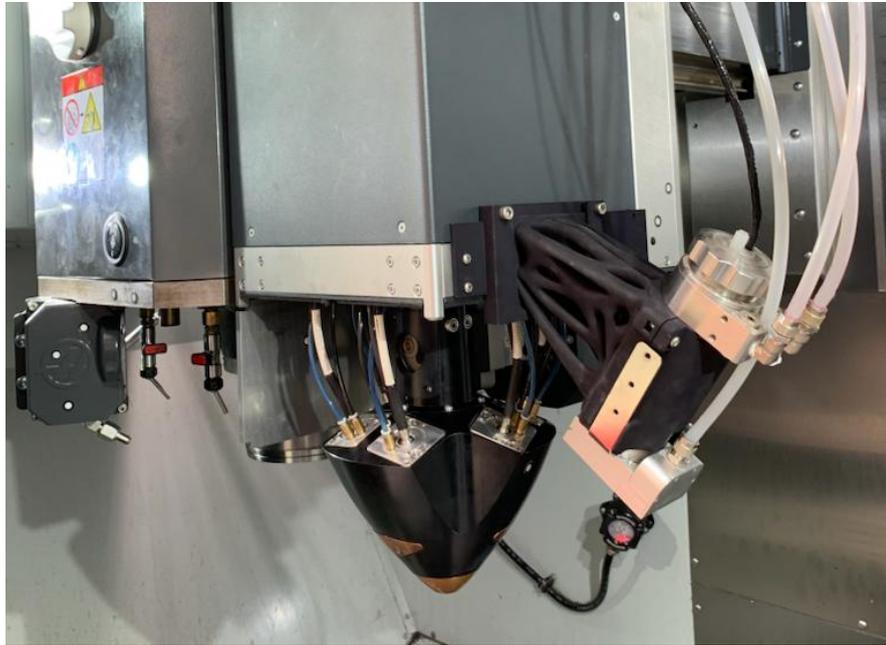


Figura 57. Incorporación del sistema termográfico .



Figura 58. Incorporación del sistema termográfico .

9 Sistema de refrigeración

Una vez determinado el diseño del soporte y la posición del mismo hay que centrarse en las necesidades de la cámara termográfica, ya que dispone de dos sistemas adicionales, un sistema de refrigeración, el cual se comentará en este apartado, y un sistema de purga de aire, el cual se mencionara en el siguiente apartado.

Según la ficha técnica del fabricante de la cámara termográfica, Optris, el sensor debe de estar por debajo de hasta temperaturas de 50°C, y teniendo en cuenta que el sensor va permanecer un medio hostil, donde existen muchas fugas de calor y de energía, se le incorpora un accesorio del mismo fabricante que hace la función de una camisa refrigerante. Esta camisa o envoltura es más que una cavidad donde circula un refrigerante, sino que también se utiliza como cáscara protectora a las salpicaduras.

Con esta carcasa refrigerante la cámara puede permanecer en ambientes de hasta 250°C. Ya que la cámara está cercana al proceso de fabricación donde llegan temperaturas de más de 1500°C por transferencia de energía mediante radiación le pueden llegar picos de temperatura por encima de 50°C, esto no se puede calcular teóricamente porque estos cambios de temperatura dependen de muchos factores a la hora de fabricar. Existen factores como el área de producción, ya que si la pieza a fabricar posee un área muy extensa produce mayor energía emitida según la leyes de radiación de la ley de Stefan-Boltzmann.

$$q_{rad} = \sigma \cdot A \cdot T^4 [W]$$

q_{rad} = flujo de energía emitido por radiación

σ = constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K$)

A = área de superficie radiante [m^2]

T = temperatura de la superficie [K]

Sin embargo si se hacen piezas con áreas más pequeñas no será necesario el uso de refrigeración ya que no causaría ningún cambio, pero mediante el uso de esta carcasa protege de posibles salpicaduras de taladrina o bien de posibles golpes de viruta caliente que se desprenden de los procesos de fabricación.

Por otro lado el fabricante comenta que el caudal del refrigerante debe de estar entre 1-5l/min a una temperatura máxima de 30°C, para evitar que la cámara consiga llegar a 50°C.

Posee una salida y una entrada para mangueras de un diámetro exterior de 8 mm y un diámetro interior de 6 mm, por lo que es un punto a tener en cuenta para conectar todo el circuito de refrigeración.

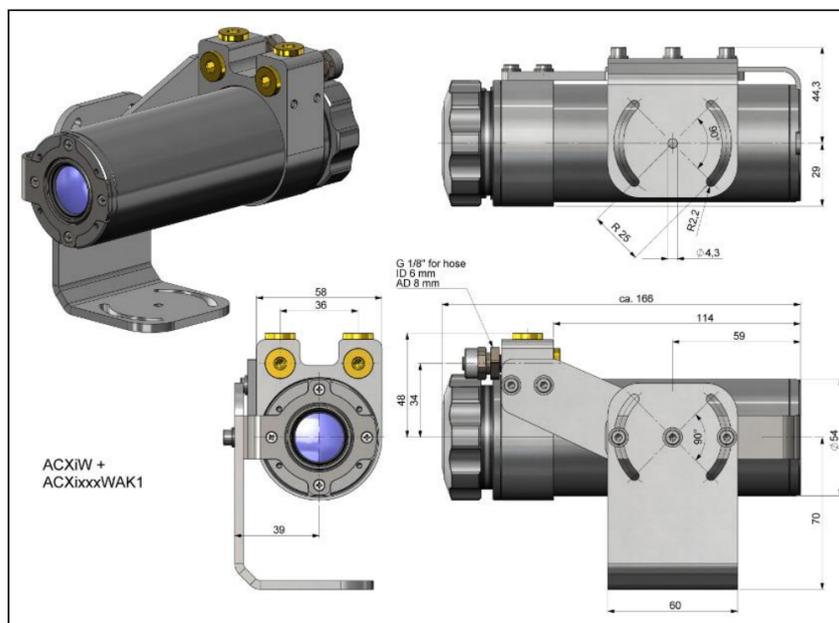


Figura 59. water cooling acoplado a la cámara Optris, dimensiones (mm).

9.1 Water Chillers (enfriador de agua).

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales de la cámara termográfica Optris y su sistema de refrigeración habrá que utilizar un sistema que abastezca las necesidades requeridas de este apartado, para ello se va a utilizar un water chillers capaz de proporcionar una demanda continua de líquido a una temperatura y a un caudal constante.

No obstante en el **ANEXO 1: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS** se da la conclusión que el circuito de refrigeración no posee un alto nivel de presión ya que con menos de 1 bar de presión abastece el sistema con un caudal de 2.5l/min.

Además tras calcular la potencia frigorífica necesaria para la refrigeración de la cámara se deja ver que es inferior a 1W de potencia por lo que el enfriador de agua no debe de ser necesariamente potente

Teniendo ambas conclusiones en cuenta y los chillers que proporcionaba la empresa AIDIMME se llega a la conclusión de escoger el enfriador con menos requerimientos, donde

igualmente mediante este se excedería cualquiera de las dos necesidades del sistema refrigerante.

La máquina a usar para este circuito refrigerante es de la marca LabTech el modelo H150/2100 smart series, que mediante el uso de un sistema de refrigeración enfriado por aire, a modo de placas como intercambiadores de calor, logra controlar una temperatura establecida. El fluido en este caso agua es impulsado al circuito por una bomba de recirculación que posee el mismo chiller, conectado a un depósito y un controlador de temperatura.

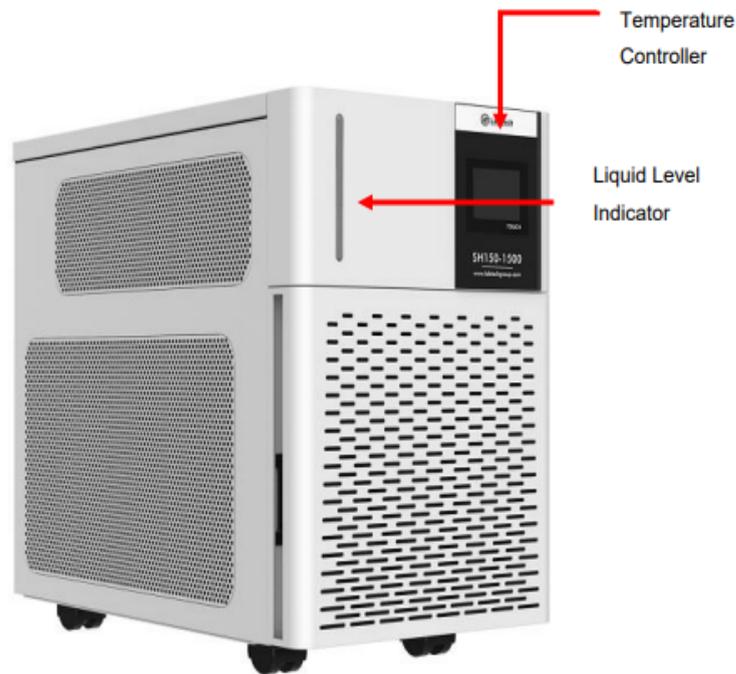


Figura 60. Water chiller Labtech H150/2100 smart series .

Este enfriador es el seleccionado dentro de las instalaciones de AIDIMME por su tamaño compacto y buen rendimiento es el que se va a usar para este trabajo de fin de grado. Posee una capacidad de caudal máximo de 13 L/min más que suficiente para los valores que necesita la cámara termográfica que solicitaba entre 1 y 5 L/min. Por otro lado logra mantener la temperatura del fluido a intervalos de temperaturas de -20 a 35°C con una estabilidad de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, el chiller posee dos tramos de manguera uno de entrada y otro de salida de 14mm de diámetro exterior y un diámetro exterior de 9.8mm, por lo que habrá que tenerlo en cuenta a la hora del montaje, ya que el circuito poseerá mangueras de los mismos diámetros que la entrada y salida de la cámara termográfica.

Proporciona una presión máxima de 14 bar, los cuales se pueden regular, y además posee una potencia frigorífica de 2500W, ambos valores exceden a los necesarios pero son regulables por lo que el chiller es válido.

9.2 Elementos del sistema de refrigeración .

No obstante teniendo en cuenta la forma de recircular y a donde hay que recircular el fluido hay que utilizar conectores y partes para formar un conjunto cerrado, en otras palabras un circuito para refrigeración cerrado. Para ello se utilizarán tubos de diámetro exterior 8 milímetros y diámetro interior de 6 milímetros, al igual que los acoples de salida y entrada de la carcasa refrigerada del sensor termográfico, con una longitud de 5 metros .

Además hay que tener en cuenta que que los tubos al igual que parte del circuito puede tener subidas de temperatura debidas a las altas temperaturas de fabricación.

El tubo seleccionado para el circuito de refrigeración soporta presiones de hasta 50 bar y temperaturas de -40°C hasta 100°C, siendo un tubo de poliamida semi-rígida, superando las normas DIN 74324-1, DIN 73378 y la ISO 7628 de prestaciones y resistencias químicas.

Dado que se necesita una tirada de tubo de 8 metros del chiller a la carcasa de la cámara termográfica existen pérdidas de rozamiento del fluido, al igual que también existen pérdidas de temperatura. Estas pérdidas caloríficas son debidas a que la máquina Meltio-Hass está situada en la nave pesada de AIDIMME la cual en el hipotético caso más desfavorable podría llegar a alcanzar en verano 35°C la temperatura ambiente lo cual sumado al calor desprendido por la fabricación, más la longitud de tubo produce que el agua refrigerado salido del chiller no llegue con la misma temperatura al sensor termográfico, por lo que refrigera con la misma intensidad. Este problema se verá resuelto mediante la potencia frigorífica del chiller, de forma de que el fluido permanezca lo más constante a 20°C . La potencia frigorífica necesaria se calcula en **ANEXO 1: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS**

Por otro lado es necesario dos reductores, uno para la entrada y otro para salida del chiller, ya que la salidas de tubo son de un diámetro interior de 9.8 milímetros y un diámetro exterior de 14 milímetros. Esta diferencia de diámetro interior causará una diferencia de velocidades en el circuito restante.

Una ventaja de utilizar un water chiller es que no es necesario el uso de controladores de presión ni de caudalímetros para mantener constante un flujo regulado ya que todos los parámetros son elegidos por el usuario y controlados en el chiller, lo cual facilita mucho la formación de este tipo de circuitos.

10 Sistema de Purga de aire

Otra de las necesidades que requiere este sensor termográfico es el sistema de purga que incorpora, el cual su principal objetivo es que la lente de la cámara esté limpia para su monitorización correcta de forma que crea una especie de cortina de aire que expulsa solando cualquier partícula, polvo, humo, vapores o viruta que llegue a la lente.

Este accesorio requiere de ser alimentado con aire libre de aceites, siendo lo más limpio posible. Debe de llegarle un flujo constante de entre 2 a 10 l/min, esto puede depender de su uso para el caso donde se va a utilizar se pondrán 8 l/min ya que la posibilidad de contaminación de la lente es muy alta, bien por humos y vapores que puede producir la fabricación o bien la misma taladrina que utiliza la máquina o virutas.

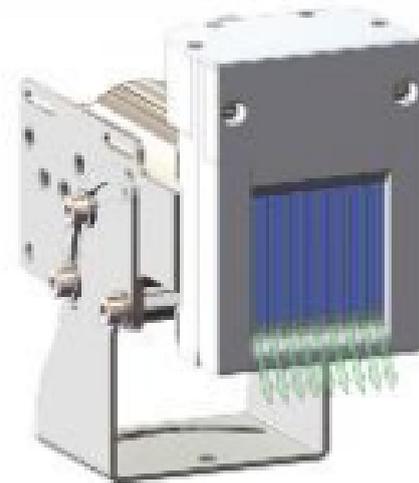


Figura 61. Sistema de purga de aire .

En este caso no existe ninguna relevancia de a qué temperatura le debe de llegar el aire así pues se considera que el aire proporcionado será a temperatura ambiente. Por otro lado este circuito debe de ser alimentado por aire a presión por lo que se acoplará a la línea de aire comprimido que dispone AIDIMME, esta línea que abastece a toda la empresa proporciona aproximadamente una presión constante de 10 bar. No obstante el tubo que proporciona la salida es de un diámetro exterior de 20 milímetros y un diámetro interior de 10 milímetros.

La entrada de alimentación de accesorio de purga al igual que el sistema de refrigeración es para tubos de diámetro exterior de 8 milímetros y de diámetro interior de 6 milímetros, por lo que es necesario utilizar un reductor de tubos para esa diferencia de diámetros.

10.1 Elementos del sistema de purga.

Teniendo en cuenta la forma de recircular y a donde hay que recircular el aire hay que utilizar conectores y partes para formar un conjunto cerrado hasta la salida de purga. Para ello se utilizarán tubos de diámetro exterior 8 milímetros y diámetro interior de 6 milímetros. Estos deben de resistir considerablemente a temperaturas por encima de 50°C, ya que se va a introducir dentro de la zona de fabricación de la Meltio-Hass.

No obstante es también necesario utilizar un regulador de presión para disminuir de 10 bares que posee la línea de aire a presión de la casa a lo deseado para lograr un flujo de aire en la salida de la cámara de 8 litros por minuto. Dando como resultado una reducción de presión en el circuito neumático de 0.5 bar, lo cual es corroborado y demostrado en el apartado en el **ANEXO 1: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS**.

El regulador a utilizar dispondrá de filtro para que pueda eliminar cualquier punto de contaminación como podría ser partículas de agua en forma de humedad, el utilizado en este proyecto es un regulador de presión más filtro de la marca Parker, el cual su entrada y salida posee una rosca whitworth 1 / 4" por lo que va a necesitar dos racores rectos. Estos dos racores poseerán una entrada para tubos de 6 milímetros de diámetro interior y una rosca de G 1 / 4".



Figura 62. Regulador con sistema de filtro Parker .

11 Reajustes de la cámara termográfica.

Una vez instalada la cámara termográfica con todo lo que supone, el sistema de refrigeración y el sistema de purga, se puede poner en marcha dicho dispositivo. Mediante el software del sensor se puede observar y monitorizar la fabricación capa a capa, pudiendo ver valores como los puntos máximos de temperaturas, las diferencias de temperaturas y las secciones más calientes, así mismo aparecen discordancias con los valores de temperatura que aparecen en el software con el real.

Este problema es causado por la emisividad, en otras palabras la intensidad de radiación infrarroja que produce la fabricación, que dependiendo de las características y la temperatura del material emite una u otra. Si la emisividad no está adaptada para el material y la temperatura en el software del sensor no podrá leer bien la temperatura real del proceso, para esto lo mejor que se podría utilizar son sondas de contacto el problema es que como su nombre bien indica son de contacto por lo que se fundirán con el material a fabricar.

El material a utilizar es Ti6Al4V, Titanio 6 Aluminio 4 Vanadio, el cual funde a 1650°, lo cual para las sondas de contacto queda más que descartadas, por lo que se le otra alternativa que es el uso de pirometro laser donde existe el mismo inconveniente que la cámara termográfica ya que ambas requieren el valor de la emisividad.



Figura 63. Bobina de titanio 64 de Meltio .

El verdadero problema es cuando comienzas los ajustes la cámara aparece valores de temperaturas máximas de 300°C con una emisividad de 0.9 ϵ , por lo que las lecturas no son correctas, por lo que se puede hacer un ajuste aproximado visualizando el que ocurre con el cambio de emisividad del programa hasta que proporcione 1600°C de fusión del titanio, realizando esa prueba experimental da como resultado que la emisividad que se debe de colocar en el software es de 0.18

12 Conclusiones

Una vez elaborado y llevado a la realidad el proyecto se han podido lograr los objetivos marcados del trabajo de fin de carrera, donde se ha podido incorporar un sistema termográfico a una máquina híbrida DE-LB/M+CNC como es el caso de la Meltio-Hass.

No obstante unos de los motivos por lo que se inició este proyecto era poder monitorizar el proceso de fabricación para la elaboración de parámetros para cada material y se ha podido conseguir por un lado mediante el diseño y desarrollo de soporte teniendo en cuenta aspecto como la reducción de material, el tipo de fabricación y material para que sea más amigable con el medio ambiente o aspecto como la resistencia del soporte. Y por otro lado, gracias al abastecimiento de un sistema de refrigeración y de purga de aire a la cámara termográfica se ha podido implementar en el medio de fabricación de la máquina Meltio-Hass.

13 Referencias bibliográficas

- [1] Álvarez, R. A. (2001). *Estructuras de acero: uniones y sistemas estructurales. (II)*.
- [2] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9a ed.). McGraw Hill Higher Education.
- [3] Carnicer Royo, E. (1991). *Aire comprimido - neumática convencional*. Editorial Gustavo Gili.
- [4] José, M. P. M., Marta, M. D., & DE ANTONIO Antonio José, R. (2014). *INGENIERÍA TÉRMICA*. Editorial UNED.
- [5] *CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. DOCUMENTO BÁSICO SE-A SEGURIDAD ESTRUCTURAL: ACERO*. (s/f). Madrid.org. Recuperado el 2 de mayo de 2023, de <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1310559772567&ssbinary=true>
- [6] Domingo, A. M. (s/f). *Agustin Martin Do mi n g o Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Upm.es. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://oa.upm.es/6934/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- [7] Villora, A. G. (s/f). *Diseño y cálculo de uniones con tornillos no pretensados*. Upv.es. Recuperado el 13 de mayo de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16477/uniones%20atornilladas.pdf>
- [8] P c, T. (s/f). *Tablas 4.4: Propiedades de gases a presión atmosférica Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica*. Ula.ve. Recuperado el 2 de mayo de 2023, de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/franz/index.html/TC/Propiedades.pdf>
- [9] De la mecánica, C. U. de las R. M. C. (s/f). *Dinámica de fluidos*. Ugr.es. Recuperado el 18 de mayo de 2023, de <https://www.ugr.es/~esteban/earth/apuntesbasesfisicas/tr4>
- [10] (S/f-a). Siconova3d.com. Recuperado el 19 de abril de 2023, de <https://tienda.siconova3d.com/meltio/10752-meltio-titanium-64-spool-75kg.com>
- [11] (S/f-b). Optris.es. Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.optris.es/accesorios-serie-compacta.com>

[12] (S/f-c). Formlabs.com. Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/.com>

[13] Europe, X. (2023, abril 5). *Rugosidad superficial en impresión 3D*. Xometry Europe. <https://xometry.eu/es/rugosidad-superficial-en-impresion-3d>

[14] *Tecnología impresión 3D SLS*. (2022, marzo 11). Addimen. https://www.addimen.com/tecnologia/sls/?gclid=Cj0KCCQjwxYOiBhC9ARIsANiEIfYgzf2GDbRZ1bsQ-2YyxOLsogWyqhGBfgdpSspB8_n4w27j56Emn0YaAvMOEALw_wcB

[15] (S/f-d). Visiotechsecurity.com. Recuperado el 6 de abril de 2023, de <https://support.visiotechsecurity.com/hc/es/articles/360012930300-Emisividad-en-c%C3%A1maras-termogr%C3%A1ficas-port%C3%A1tiles>