



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## **DESARROLLO DE UNA CÁMARA DE REGULACIÓN TÉRMICA PARA ENSAYOS DE MATERIALES A ALTA Y BAJA TEMPERATURA.**

Autor: Carlos Cabrera Criado

Director: Yolanda Ballesteros Iglesias

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **DESARROLLO DE UNA CÁMARA DE REGULACIÓN TÉRMICA PARA ENSAYOS DE MATERIALES A ALTA Y BAJA TEMPERATURA** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2021-2022 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Carlos Javier Cabrera Criado

Fecha: 19/07/2022



Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Yolanda Ballesteros Iglesias

Fecha: 19/07/2022





# **DESARROLLO DE UNA CÁMARA DE REGULACIÓN TÉRMICA PARA ENSAYOS DE MATERIALES A ALTA Y BAJA TEMPERATURA**

**Autor: Cabrera Criado, Carlos.**

Director: Ballesteros Iglesias, Yolanda.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

En colaboración con el laboratorio de materiales de la Universidad Pontificia Comillas, se propone el diseño y construcción de una cámara de regulación térmica que permita al laboratorio de la universidad realizar ensayos en máquinas universales de ensayos a temperaturas tanto inferiores como superiores al ambiente.

**Palabras clave:** Ensayos, Cámara térmica, Regulación térmica.

### **1. Introducción**

El estudio de las propiedades, composición y estructura de los materiales es una disciplina fundamental en el desarrollo de las tecnologías que nos rodean actualmente. Esta disciplina se conoce como ciencia de los materiales y aunque lleve estudiándose desde los inicios de las civilizaciones, sigue siendo la punta de lanza de muchos de los nuevos descubrimiento y avances tecnológicos actuales.

En la Universidad Pontificia Comillas se es consciente de la importancia de esta disciplina de la ciencia y se le trata de dar un enfoque lo más práctico posible, dedicando un laboratorio exclusivamente para el estudio de los materiales.

Este laboratorio cuenta actualmente con dos máquinas universales de ensayos en las que se realizan la mayoría de las pruebas y análisis de los materiales, sin embargo, estas máquinas solo son capaces de realizar ensayos a temperatura ambiente.

La temperatura de ensayo puede llegar a ser una variable muy restrictiva a la hora de estudiar algunos materiales cuyas propiedades presentan alteraciones significativas en su estructura interna a diferentes temperaturas. Estos materiales quedan fuera del alcance del estudio de la mayoría de los instrumentos del laboratorio, limitando seriamente el estudio de materiales cuyo propósito sea actuar en entornos con temperaturas extremas.

Con este proyecto se pretende expandir las posibilidades del laboratorio de ciencia de materiales de la Universidad Pontificia Comillas para que las máquinas universales de ensayos sean capaces de realizar ensayos a temperaturas tanto inferiores como superiores a la temperatura ambiente.

## 2. Definición del proyecto

El objetivo de este proyecto es dotar a las máquinas universales de ensayos del laboratorio de ciencia de materiales la capacidad de realizar ensayos a temperaturas controlables en un rango de entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $200^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura debe permanecer estable y estar monitorizada en tiempo real para evitar cualquier posible perturbación externa.

Este proyecto comprende desde el diseño hasta la construcción e implementación final una cámara térmica que pueda operar con las máquinas existentes del laboratorio. El presupuesto del proyecto es de 5000€ y se ha planificado el trabajo para realizarse a lo largo de un año.

Desde un primer momento se planteó el diseño de tanto un sistema de calefacción como de refrigeración. Sin embargo, debido a restricciones en el tiempo de desarrollo se ha optado por limitar el proyecto a su dimensión exclusivamente de calefacción, no obstante, se cimentarán en este proyecto las bases para futuros desarrollos.

## 3. Diseño de la cámara

La cámara se ha desarrollado siguiendo el siguiente esquema funcional basado en cinco bloques principales:

- **Alimentación:** Se alimentará el sistema desde una toma de corriente domestica a 220V AC.
- **Fuente de alimentación:** Se utilizará una fuente para convertir la corriente alterna en continua para poder alimentar los sistemas electrónicos.
- **Electrónica:** Comprende todos los sistemas necesarios para medir la temperatura en tiempo real, procesar la información y actuar sobre el sistema para controlar la temperatura de la cámara.
- **Tubos Halógenos:** Elementos resistivos encargados de generar la potencia térmica necesaria para calentar el interior de la cámara.
- **Relés:** Hace de puente entre la alimentación y los tubos halógenos. Tiene por objetivo controlar el flujo de potencia transmitida a los tubos en función de las señales generadas por la electrónica del sistema.

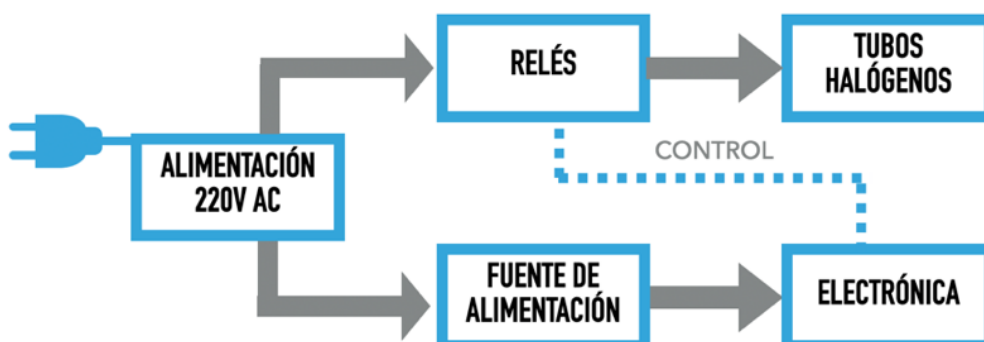
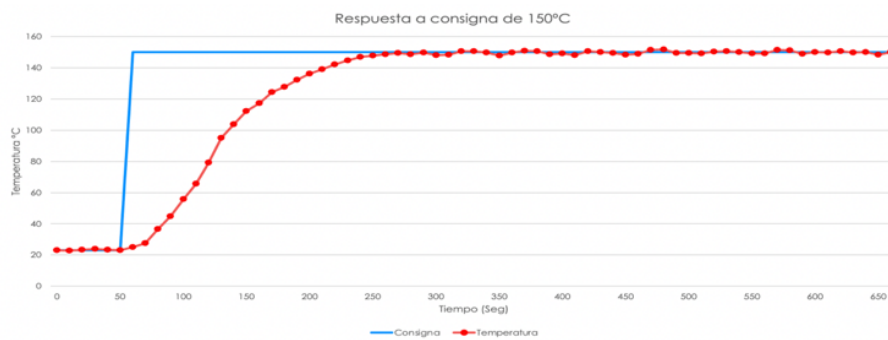


Ilustración 1: Esquema funcional del proyecto.

## 4. Resultados

Durante la ejecución del proyecto se ha seguido una aproximación iterativa de prueba y error entre el diseño realizado y la implementación final de los diferentes sistemas. Tras este proceso se ha conseguido finalizar la construcción de la cámara térmica y realizado pruebas de funcionamiento que verifican la consecución de los objetivos propuestos.

- **Prueba de movilidad y accesibilidad:** Se ha comprobado que se cumple con los requisitos mecánicos de integración en las máquinas del laboratorio.
- **Prueba de control de temperatura:** Se ha realizado un test de esfuerzo sometiendo a la cámara a su máxima potencia durante dos horas verificando que se mantiene la integridad de todos los sistemas.
- **Prueba de resiliencia térmica:** Se ha probado el sistema de control de la cámara con un test a 150°C, comprobando la estabilidad y control de la temperatura.



*Ilustración 2: Resultado del control de la cámara térmica.*

## 5. Conclusiones

El Proyecto ha concluido con el cumplimiento de aproximadamente el 80% de los objetivos propuestos, dando como resultado una cámara térmica funcional capaz de estabilizar temperaturas entre la temperatura ambiente y los 200°C con un error inferior a 1°C.

Como futuros desarrollos se propone la finalización de los sistemas responsables de la refrigeración de la cámara térmica, así como diferentes mejoras en los sistemas de control e implementación de funcionalidad adicional al proyecto.



*Ilustración 3: Cámara térmica finalizada.*

# DEVELOPMENT OF A THERMAL REGULATION CHAMBER FOR HIGH AND LOW TEMPERATURE TESTING OF MATERIALS

**Author: Cabrera Criado, Carlos.**

Director: Ballesteros Iglesias, Yolanda.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## PROJECT SUMMARY

In collaboration with the *Universidad Pontificia Comillas* materials laboratory, the design and construction of a thermal regulation chamber is proposed that allows the university laboratory to carry out tests in universal testing machines at temperatures both below and above ambient.

**Keywords:** Tests, Thermal chamber, Thermal regulation.

## 6. Introduction

The study of the properties, composition and structure of materials is a fundamental discipline in the development of the technologies that surround us today. This discipline is known as materials science and although it has been studied since the beginning of civilizations, it is still the spearhead of many of today's new discoveries and technological advances.

The university is aware of the importance of this discipline of science and tries to give it the most practical approach possible, dedicating a laboratory exclusively to the study of materials.

This laboratory currently has two universal testing machines in which most of the tests and analyzes of materials are carried out, however, these machines are only capable of carrying out tests at room temperature.

The test temperature can become a very restrictive variable when studying some materials whose properties present significant alterations in their internal structure at different temperatures. These materials fall outside the scope of study of most laboratory instruments, seriously limiting the study of materials intended to perform in extreme temperature environments.

This project aims to expand the possibilities of the *Universidad Pontificia Comillas* materials science laboratory so that universal testing machines can perform tests at temperatures both below and above room temperature.

## 7. Project definition

The objective of this project is to provide the laboratory's universal testing machines with the ability to perform tests at controllable temperatures in a range between  $-10^{\circ}\text{C}$  and  $200^{\circ}\text{C}$ . This temperature must remain stable and be monitored in real time to avoid any possible external disturbance.

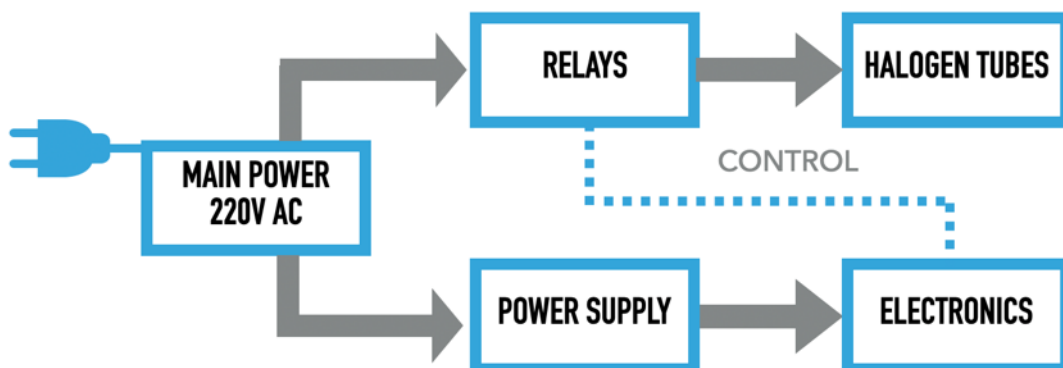
This project includes from the design to the construction and final implementation of a thermal camera that can operate with the existing machines of the laboratory. The project budget is €5,000 and the work has been planned to be carried out over a year.

From the outset, the design of both a heating and cooling system was considered. However, due to restrictions in the development time, it has been decided to limit the project to its exclusively heating dimension, however the foundations for future development are laid.

## 8. Chamber design

The camera has been developed following the following functional scheme based on five main blocks:

- **Main power:** The system will be powered from a 220V AC domestic power outlet.
- **Power supply:** A source will be used to convert alternating current into direct current to power the electronic systems.
- **Electronics:** Includes all the systems necessary to measure the temperature in real time, process the information and act on the system to control the temperature of the chamber.
- **Halogen tubes:** Resistive elements responsible for generating the necessary thermal power to heat the inside of the chamber.
- **Relays:** Acts as a bridge between the power supply and the halogen tubes. Its purpose is to control the flow of power transmitted to the tubes based on the signals generated by the electronics of the system.

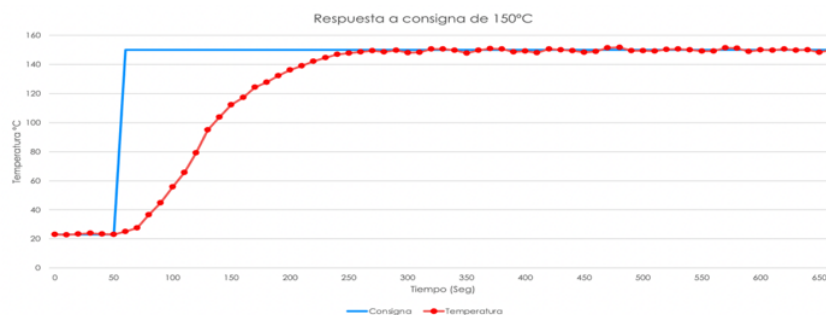


*Illustration 4: Functional scheme of the project.*

## 9. Results

During the execution of the project, an iterative trial and error approach has been followed between the design carried out and the final implementation of the different systems. After this process, the construction of the thermal chamber has been completed and performance tests have been carried out that verify the achievement of the proposed objectives.

- **Mobility and accessibility test:** It has been verified that the mechanical integration requirements of the laboratory machines are met.
- **Temperature control test:** A stress test has been carried out, subjecting the camera to its maximum power for two hours, verifying that the integrity of all the systems is maintained.
- **Thermal resilience test:** The chamber control system has been tested with a test at 150°C, checking the stability and temperature control.

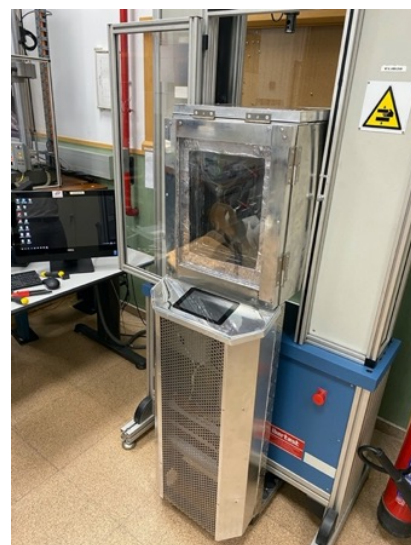


*Illustration 5: Result of thermal chamber control.*

## 10. Conclusions

The Project has concluded with the fulfillment of approximately 80% of the proposed objectives, resulting in a functional thermal camera capable of stabilizing temperatures between room temperature and 200°C with an error of less than 1°C.

As future developments, the completion of the systems responsible for the cooling of the thermal chamber is proposed, as well as different improvements in the control systems and implementation of additional functionality to the project.



*Illustration 6: Finished Thermal chamber.*

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1 Motivación del proyecto.....	8
<b>Capítulo 2. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>9</b>
2.1 máquina universal de ensayos.....	12
2.2 Cámaras térmicas.....	13
2.3 Circuito de calor.....	14
2.4 Circuito de refrigeración.....	15
<b>Capítulo 3. Definición del Trabajo .....</b>	<b>16</b>
3.1 Justificación.....	16
3.2 Objetivos.....	17
3.3 Metodología.....	18
3.4 Planificación.....	19
3.5 Estimación económica.....	21
3.5.1 Presupuesto electrónica: .....	22
3.5.2 Presupuesto eléctrico: .....	23
3.5.3 Presupuesto mecánico:.....	23
<b>Capítulo 4. Diseño preliminar y prototipo .....</b>	<b>24</b>
4.1 Diseño del prototipo.....	25
4.2 Construcción de prototipo.....	27
4.3 resultados del prototipo .....	31
<b>Capítulo 5. Construcción de la cámara.....</b>	<b>33</b>
5.1 Diseño de la estructura .....	33
5.2 Fabricación de la estructura.....	39
<b>Capítulo 6. Sistema eléctrico.....</b>	<b>46</b>
6.1 Diseño.....	46
6.2 Implementación .....	49
<b>Capítulo 7. Electrónica y sistema de control.....</b>	<b>52</b>
7.1 Diseño.....	53

---

7.1.1 Medición de temperatura.....	54
7.1.2 Accionamiento de los tubos halógenos.....	58
7.1.3 Modelo y sistema de control de la temperatura .....	60
7.1.4 Interfaz de usuario.....	61
7.2 Implementación .....	63
<b>Capítulo 8. Análisis de Resultados.....</b>	<b>68</b>
<b>Capítulo 9. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>71</b>
<b>Capítulo 10. Bibliografía.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO: Alineamiento con los ODS.....</b>	<b>75</b>

## *Índice de figuras*

Ilustración 1: Esquema funcional del proyecto. ....	6
Ilustración 2: Resultado del control de la cámara térmica.....	7
Ilustración 3: Cámara térmica finalizada.....	7
Illustration 1: Functional scheme of the project. ....	9
Illustration 2: Result of thermal chamber control.....	10
Illustration 3: Finished Thermal chamber. ....	10
Ilustración 6: Máquina universal de ensayos.....	12
Ilustración 7: Máquina universal de ensayos con cámara térmica. ....	13
Ilustración 8: Diseño conceptual del prototipo.....	25
Ilustración 9: Tubo de aislamiento cuadrado CLIMAVER.....	27
Ilustración 10: Placas de contrachapado y tapas de Climaver.....	28
Ilustración 11: Calefactor comercial desmontado. ....	29
Ilustración 12: Puerta de cristal del prototipo.....	29
Ilustración 13: Probeta en el interior del prototipo.....	30
Ilustración 14: Cajetín electrónico del prototipo. ....	30
Ilustración 15: Prototipo finalizado. ....	30
Ilustración 16: Prototipo en funcionamiento. ....	32
Ilustración 17: Medidas de temperatura del prototipo.....	32
Ilustración 18: Bocetos del diseño de la estructura. ....	34
Ilustración 19: Modelo de máquinas de ensayos del laboratorio.....	35
Ilustración 20: Modelo de la estructura y la máquina de ensayos. ....	36
Ilustración 21: Modelo del aislamiento de la cámara. ....	36
Ilustración 22: Modelo montaje de estructura con aislamiento.....	37
Ilustración 23: Modelo 3D final de la estructura. ....	38
Ilustración 24: Maqueta de la cámara térmica.....	39
Ilustración 25: Maqueta en la máquina de ensayos. ....	39

Ilustración 26: Acabado de la soldadura de los perfiles de acero.....	40
Ilustración 27: Placas de Climaver. ....	41
Ilustración 28: Frontal de la cámara. ....	41
Ilustración 29: Perfilería de aluminio para las puertas. ....	41
Ilustración 30: Estructura con Climaver y perfilería de aluminio. ....	41
Ilustración 31: Unión de la puerta frontal con bisagras.....	42
Ilustración 32: Cierre a presión de la puerta frontal. ....	42
Ilustración 33: Acabado de puerta superior.....	42
Ilustración 34: Integración de puerta frontal y superior .....	42
Ilustración 35: Placas de aluminio para tubos halógenos.....	43
Ilustración 36: Placa de aluminio plegada para la base de la cámara.....	43
Ilustración 37: Recubrimiento lateral de los tubos halógenos.....	43
Ilustración 38: Recorte de la base de la cámara para mordaza y vástagos.....	43
Ilustración 39: Parte posterior de la cámara con marcado para los ventiladores.....	44
Ilustración 40: Ventiladores.....	44
Ilustración 41: Interior de la cámara térmica.....	44
Ilustración 42: Rejillas de protección para los tubos halógenos.....	44
Ilustración 43: Parte trasera del frontal de la cámara. ....	45
Ilustración 44: Estructura completa sin electrónica.....	45
Ilustración 45: Esquema eléctrico de la cámara. ....	47
Ilustración 46: Fuente de alimentación ATX. ....	48
Ilustración 47: Relé de estado sólido.....	48
Ilustración 48: Canalización del cableado por el interior de la perfilería.....	49
Ilustración 49: Instalación de tubos halógenos.....	50
Ilustración 50: Ventiladores.....	50
Ilustración 51: Instalación de fuente de alimentación ATX.....	50
Ilustración 52: Instalación de cajetín de alimentación.....	50
Ilustración 53: Cajetín de relés. ....	51
Ilustración 54: Montaje del cajetín de relés.....	51
Ilustración 55: Diagrama funcional de la electrónica.....	53

---

Ilustración 56: Conversor analógico-digital. ....	55
Ilustración 57: Curva Resistencia-Temperatura del PT100.....	56
Ilustración 58: Circuito de acondicionamiento de señal.....	56
Ilustración 59: Salida del circuito de acondicionamiento.....	58
Ilustración 60: Relé SSR-40 AD .....	58
Ilustración 61: Circuito elevador de tensión para los relés.....	59
Ilustración 62: Determinación de la planta con PID Tunner. ....	60
Ilustración 63: Procesos principales de la interfaz gráfica. ....	61
Ilustración 64: Bloques de comunicación desde Simulink.....	62
Ilustración 65: Código de comunicación del servidor a Simulink.....	62
Ilustración 66: Montaje del panel frontal en maqueta con pantalla táctil y botones. ....	63
Ilustración 67: Parte posterior del panel con montaje de Raspberry Pi.....	63
Ilustración 68: Distribución de componentes en el cajetín UPS. ....	64
Ilustración 69: Instalación final del cajetín UPS. ....	64
Ilustración 70: Conectores de la placa madre de la cámara.....	65
Ilustración 71: Placa madre de la cámara. ....	65
Ilustración 72: Montaje provisional de pantalla táctil y electrónica.....	66
Ilustración 73: Cableado de la electrónica.....	66
Ilustración 74: Panel frontal montado en la estructura. ....	66
Ilustración 75: Montaje de la electrónica con chapa de aluminio. ....	66
Ilustración 76: Interfaz gráfica. ....	67
Ilustración 77: Test de control térmico.....	68
Ilustración 78: Cámara térmica a máxima potencia. ....	69
Ilustración 79: Cámara térmica finalizada y acoplada a una máquina de ensayos.....	70

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Cronograma I.....	20
Tabla 2: Cronograma II .....	20
Tabla 3: Cronograma III.....	20
Tabla 4: Presupuesto general.....	21
Tabla 5: Presupuesto componentes electrónicos. ....	22
Tabla 6: Presupuesto componentes eléctricos. ....	23
Tabla 7: Presupuesto componentes mecánicos.....	23
Tabla 8: Parámetros del circuito de acondicionamiento.....	57
Tabla 9: Valoración final de objetivos. ....	71

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Comprender y estudiar el mundo que nos rodea ha sido siempre uno de los objetivos fundamentales del hombre para su desarrollo y evolución. Desde la antigüedad, nuestra insaciable búsqueda de conocimiento y comprensión de nuestro entorno nos ha llevado a plantearnos preguntas muy importantes sobre cómo mejorar nuestra calidad de vida. Durante años la sociedad ha perseguido un deseo continuo de mejora y superación utilizando la observación como vehículo principal, dando lugar a lo que hoy en día llamamos progreso tecnológico.

La evolución tecnológica siempre ha sido una parte fundamental del desarrollo del ser humano y su relación con el medio. Un desarrollo solo posible gracias a la curiosidad y observación continua materializado en la ciencia. A lo largo de la historia son incontables las disciplinas y áreas de conocimiento que han contribuido al desarrollo tecnológico. No obstante, desde tiempos pretéritos siempre ha estado presente como base de todo desarrollo el estudio de los materiales. Desde la construcción de estructuras rudimentarias con adobe, hasta la confección de obleas de silicio para la creación de microchips, la ciencia de los materiales siempre ha jugado un papel fundamental en el avance tecnológico.

Aunque pueda resultar obvio, todo desarrollo tecnológico requiere de un medio material que lo componga. Es por esto por lo que el estudio de las propiedades y composición de dichos materiales juega un papel tan importante en el desarrollo tecnológico. El campo de la ciencia que estudia estos materiales, observando su estructura y analizando sus propiedades físicas y químicas se conoce como **ciencia de los materiales**.

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

Este proyecto surge del afán de colaborar con la investigación y estudio de nuevos materiales que permitan continuar mejorando nuestra calidad de vida. Con esta contribución se espera mejorar y facilitar el ensayo de materiales tanto nuevos como ya existentes para ampliar nuestros conocimientos sobre sus propiedades y posibles implementaciones en nuestro día a día.

La oportunidad ofrecida por la Universidad Pontificia Comillas, específicamente por el departamento de ingeniería mecánica, supone un gran incentivo para realizar un proyecto con impacto real en el aprendizaje de futuros alumnos de la escuela. Esto significa una oportunidad para sembrar en futuras generaciones el interés por una disciplina tan importante como es la ciencia de los materiales.

El desarrollo del proyecto supone un gran reto, donde se verán involucradas muchas disciplinas y tecnologías diferentes, siendo por tanto una oportunidad de oro para adquirir conocimientos desde un enfoque totalmente práctico. Este enfoque práctico del proyecto implica con romper con las aproximaciones teóricas realizadas a lo largo del estudio del máster y entrar de lleno en la realidad material, donde no siempre las cosas salen acorde a la teoría.

La consecución de un proyecto práctico, donde lo plasmado en el papel pueda tener una repercusión real y material en mi entorno cercano supone una motivación extra en la consecución de dicho proyecto. Además, la confianza depositada en mi persona por el departamento de ingeniería mecánica de la universidad supone un gran incentivo para ayudar y contribuir en todo lo posible con la causa educativa y de investigación del departamento.

## Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La ciencia de los materiales es una disciplina que lleva desde los anales de la historia desarrollándose y mejorando. En su origen el estudio de estos materiales consistía en la prueba y error de diferentes materiales para determinar las propiedades más idóneas para cada tarea. Se trataba de una metodología práctica y cualitativa que nos permitía determinar que materiales eran mejores para cada tarea. Este proceso de testeo de materiales, aunque en un principio podía ser muy rudimentaria, se ha ido sofisticando y mejorando con el paso de los años, llegando a lo que hoy conocemos por **ensayos**.

Los ensayos de materiales pueden tener una amplia variedad de propósitos y características en función de la propiedad sujeta de estudio. Actualmente existe infinitud de tipos de ensayos capaces de caracterizar las propiedades tanto físicas como químicas de los materiales. Sin embargo, dentro de la amplia variedad de ensayos podemos hacer una primera distinción en dos grupos, ensayos destructivos y ensayos no destructivos.

Estos dos tipos de ensayos se diferencian en la capacidad de reutilización del material tras producirse el ensayo. Así pues, en los ensayos destructivos el material estudiado queda inutilizable o dañado de alguna manera tras su testeo. Este tipo de ensayos son muy importantes para la caracterización de algunas propiedades físicas de los materiales, como puede ser la tensión máxima admisible, módulo de Young, límite elástico...

Alguno de los ensayos destructivos más relevantes en la industria actualmente es:

- **Ensayo de tracción:** Consiste en someter al material a un esfuerzo uniaxial de tracción hasta que deforme o rompa, determinando sus valores de deformación por tensión aplicada.
- **Ensayo de compresión:** Análogo al ensayo de tracción, pero bajo esfuerzos de compresión. Suele utilizarse para obtener valores de resistencia a pandeo.

- **Ensayo de fatiga:** Esta prueba consiste en someter a un material a un mismo tipo de esfuerzo de manera reiterada en el tiempo. Normalmente se usan esfuerzos cíclicos y se registran las variaciones del comportamiento del material a lo largo del tiempo. Con este tipo de prueba podemos determinar la vida útil del material en función de su uso y su correspondiente desgaste asociado.
- **Ensayo de resiliencia:** En este caso se somete al material a un impacto controlado para determinar la tenacidad y resiliencia del mismo.
- **Ensayo de dureza:** Para determinar la dureza de un material se realiza una presión controlada en el material con un punzón especial de dureza conocida. Al medir la hendidura producida por el punzón en el material podemos extrapolar la dureza del material estudiado.

Por otro lado, muchas veces es necesario revisar las propiedades de un material **sin dañarlo**. Imaginemos por ejemplo la confección del fuselaje de un avión. Una vez producida la pieza es importante asegurarnos de que no presente defectos y de que cumple con las propiedades de resistencia requeridas para que no falle durante su vida útil. Estos ensayos no solo son importantes para piezas o materiales recién confeccionados, sino que también tienen una importancia crítica en el mantenimiento de materiales durante su vida útil. El mismo ejemplo del fuselaje de un avión es aplicable en este sentido, cuando tenga que someterse a controles de **mantenimiento** periódicos para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos que lo componen.

Algunos de los ensayos no destructivos más relevantes en la actualidad son:

- **Inspección visual:** Se revisan las piezas en busca de defectos detectables a simple vista, como fracturas, deformaciones, oxidación... Esta inspección puede realizarse a simple vista o utilizando algún instrumento que ayude a su detección como cámaras para inspeccionar zonas inaccesibles por el hombre.

- **Ensayos de ultrasonidos:** Consiste en generar una onda sónica de alta frecuencia dentro del material y medir el eco resultante de rebotar en el interior de la pieza. Al calcular el tiempo que tarda en propagarse la onda por diferentes partes de la pieza, se puede determinar si existen defectos internos en el material. Este tipo de ensayo requiere de acceso a la pieza tan solo por una cara del material, convirtiéndolo en un ensayo muy versátil para determinar defectos internos sin dañar el material.
- **Ensayos de corrientes inducidas:** Este ensayo consiste en la generación de un campo electromagnético en la superficie del material y medir las corrientes que se generan en el mismo. Con esta medida es posible detectar defectos superficiales o de baja profundidad en el material. Como punto negativo de este ensayo tenemos que solo es aplicable a materiales metálicos con suficiente conductividad como para inducir una corriente suficiente en ellos.
- **Ensayo de líquidos penetrantes:** Consiste en verter un líquido especial en la superficie de un material que penetre en las hendiduras más pequeñas del material y revele visualmente defectos superficiales. Con este método podemos detectar discontinuidades únicamente en la superficie de los materiales.

Todos estos ensayos tienen como objetivo determinar diferentes propiedades de los materiales, mediante diferentes aproximaciones, siendo en cada situación más adecuada el empleo de un ensayo frente a otros.

Para realizar cada uno de estos ensayos se precisa de una maquinaria más o menos sofisticada y específica en cada uno de los casos. No obstante, como el objeto de este proyecto está enfocado en la realización de ensayos de carácter destructivo haremos hincapié en detallar el funcionamiento de las **máquinas universales de ensayos**.

## **2.1 MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS.**

Para la realización de gran parte de los ensayos destructivos en la industria actualmente se utilizan las **máquinas universales de ensayos** (Ilustración 7). Estas máquinas permiten realizar de forma precisa medidas sobre propiedades físicas de los materiales sometiéndolos a diferentes esfuerzos y midiendo los desplazamientos y deformaciones del material. Estas máquinas pueden tener diferentes formas y tamaño, sin embargo, todas comparten un mismo proceder en cuanto a su funcionamiento.

Generalmente, estas máquinas cuentan con un área de ensayo donde se encuentra un carro móvil responsable de generar los esfuerzos. Este carro incorpora una mordaza o cabezal intercambiable responsable de establecer contacto con el material a ensayar y transmitir los esfuerzos del carro a la pieza. Por otro lado, la pieza a ensayar se ancla a una base fija que sirve como punto de sujeción para una mordaza estática que mantiene al material en una posición de referencia.

Estos esfuerzos pueden ser tanto de tracción como de compresión o flexión y se realizan mediante motores controlados por ordenador. Estos motores son capaces de controlar y calcular el desplazamiento realizado en todo momento, a este tipo de control se conoce como control numérico.



*Ilustración 7: Máquina universal de ensayos.*

Estas máquinas de ensayos son ideales para la realización de gran variedad de ensayos gracias a la posibilidad de intercambiar sus cabezales y mordazas para atacar al material de diferentes formas. Además, se trata de máquinas de relativo fácil uso y accesibilidad, convirtiéndolas en una las herramientas de ensayo más útiles y versátiles en el estudio de los materiales.

Sin embargo, a pesar de todas las ventajas que presenta este tipo de máquinas, normalmente tienen la limitación de realizar los ensayos bajo temperatura y humedad ambiente.

## ***2.2 CÁMARAS TÉRMICAS***

Con el objetivo de ampliar la variedad de ensayos que se puede realizar en las máquinas universales de ensayos se utilizan cámaras térmicas que tienen como finalidad modificar las condiciones térmicas a las que se realiza el ensayo. Estas cámaras suelen hacerse específicamente para adaptarse a las proporciones de la máquina de ensayo, integrándose en el área de trabajo de la máquina (Ilustración 8).



*Ilustración 8: Máquina universal de ensayos con cámara térmica.*

Las cámaras térmicas son capaces de regular la temperatura de su interior, generando unas condiciones térmicas estables diferentes a las habituales del ambiente. Estas cámaras son especialmente útiles a la hora de ensayar materiales que deben operar en condiciones normalmente diferentes a las del ambiente. Por ejemplo, adhesivos de componentes electrónicos que deben comportarse acorde a sus especificaciones en un rango de temperatura superior debido al calor que generan los componentes electrónicos adyacentes.

Generalmente la función de las cámaras térmicas consiste en mantener una temperatura constante, sin embargo, también existen cámaras capaces de seguir curvas de temperatura específicas e incluso realizar ensayos de fatiga térmica mediante ciclos relativamente rápidos de temperatura.

Otras cámaras más sofisticadas son capaces también de regular las condiciones de humedad de su interior. Estas cámaras son útiles para materiales que se pretenden usar en ambientes con alta exposición a la humedad, por ejemplo, componentes navales.

### **2.3 CIRCUITO DE CALOR.**

Para conseguir generar unas condiciones térmicas superiores a la temperatura ambiente en el interior de la cámara térmica es necesario un circuito de calor que permita inyectar de forma controlada calor al sistema.

Aunque existe gran variedad de aproximaciones para la generación de calor en cámaras comerciales, la gran mayoría lo realizan mediante la disipación de energía eléctrica a través de resistencias. Este fenómeno de generación de calor se le conoce como **efecto Joule** y es especialmente eficaz por su sencilla implementación y por ser fácilmente controlable ya que el calor generado depende proporcionalmente con la intensidad de la corriente que pasa por el circuito de calefacción.

## **2.4 CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN.**

De la misma forma que resulta interesante realizar ensayos a alta temperatura, lo es para temperaturas inferiores al ambiente. En muchas ocasiones es necesario probar el comportamiento de algunos materiales en condiciones climáticas adversas como nevadas o en condiciones de trabajo especialmente frías como puede ser el fuselaje de un avión.

Para conseguir temperaturas inferiores al ambiente es necesario retirar calor del interior de la cámara. Este proceso es normalmente más complejo que los circuitos de calefacción y requieren de sistemas más sofisticados y costosos. Es por este motivo que no todas las cámaras térmicas comerciales cuentan con un sistema de estas características.

Los sistemas más extendidos en este campo para la refrigeración de cámaras térmicas comerciales son:

- **Circuitos de compresión:** Se trata del sistema más extendido de refrigeración por su alta eficiencia y capacidad para obtener temperaturas significativamente inferiores al ambiente. Estos sistemas utilizan las propiedades termodinámicas de algunos fluidos, generalmente gases, para absorber y liberar calor al cambiar de fase. Los componentes principales de este tipo de circuitos son un compresor, un evaporador y un condensador.
- **Efecto termoeléctrico:** Se utiliza la propiedad de los semiconductores para generar diferencias de temperatura en sus superficies al ser alimentados por una corriente eléctrica. Este efecto se conoce como efecto Peltier-Seebeck y es utilizado para la refrigeración de componentes que no requieren de temperaturas extremadamente bajas. Este sistema es mucho más sencillo de implementar que el circuito de compresión, sin embargo, es mucho más ineficiente en términos de energía consumida, además de presentar serias limitaciones en cuanto a la capacidad de refrigeración obtenible.

## **Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

### **3.1 JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad el laboratorio de ciencia de materiales de la Universidad Pontificia Comillas cuenta con una amplia variedad de recursos para estudiar y desarrollar nuevos materiales, entre los que se encuentran dos máquinas universales de ensayos. Estas dos máquinas son capaces de realizar gran variedad de ensayos, sin embargo, ninguna cuenta con capacidad para realizar estos ensayos a temperaturas diferentes a la temperatura ambiente.

El propósito de este proyecto es la elaboración de una cámara térmica que pueda incorporarse en las máquinas actuales del laboratorio y sea capaz de mantener condiciones de temperatura tanto superiores como inferiores al ambiente.

Con este desarrollo se pretende dotar al laboratorio de ciencia de materiales con una nueva herramienta que amplíe sus límites de estudio de los materiales, así como servir a futuros alumnos como fuente de conocimiento práctico de las dinámicas de algunos materiales a temperaturas extremas.

Se tratará de adaptar el diseño de la cámara a los requerimientos del laboratorio, realizándola, cumpliendo con los requisitos técnicos y de seguridad solicitados por el departamento, así como cumpliendo con el presupuesto asignado para el proyecto.

Esta incorporación al laboratorio además de las ventajas anteriormente descritas, supondrá un ahorro significativo para el departamento de materiales ya que el coste de fabricación planeado para este proyecto es muy inferior a las cámaras térmicas comerciales que hay en el mercado.

## **3.2 OBJETIVOS**

Para la correcta realización del proyecto se han especificado los siguientes objetivos a cumplir:

- Diseño físico completo de una cámara térmica capaz de integrarse en las dos máquinas universales de ensayos del laboratorio de ciencia de materiales.
- Diseño del sistema eléctrico y electrónico de la cámara térmica.
- Construcción de la estructura de la cámara térmica.
- Implementación de los circuitos eléctricos y electrónicos en la cámara térmica.
- Modelado térmico de la cámara y especificación de la planta a controlar.
- Implementación del sistema de control de temperatura de la cámara.
- Realización de un ensayo completo con regulación térmica entre los 100°C y 200°C.
- Realización de un ensayo completo con regulación térmica a temperatura inferior al ambiente.

Además de los objetivos descritos para el proyecto se incluyen los siguientes objetivos secundarios:

- Obtener un error en régimen permanente de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
- Conseguir un rango de temperatura controlable máximo de 200°C.
- Conseguir un rango de temperatura controlable mínimo de -10°C.
- Implementación de sistemas de seguridad adicionales.
- Permitir conectividad de la cámara térmica con el ordenador del laboratorio para la obtención y posterior procesamiento de datos.
- Implementación de una interfaz gráfica capaz de gestionar las diferentes funciones de la cámara térmica.

### **3.3 METODOLOGÍA**

Para la correcta ejecución del proyecto se plantea un desarrollo secuencial por fases del proyecto. El progreso de estas fases se irá documentando y servirá como base para reorientar el proyecto en función de los resultados obtenidos. Las fases de desarrollo se detallan a continuación:

1. Investigación sobre las tecnologías existentes y posibles implementaciones en el proyecto.
2. Desarrollo de un prototipo que confirme una viabilidad mínima del proyecto.
3. Diseño físico de la cámara térmica final.
4. Diseño eléctrico y electrónico de la cámara térmica.
5. Construcción de la cámara térmica.
6. Integración de los sistemas eléctricos y electrónicos.
7. Instalación del software de control.
8. Prueba de control de temperatura bajo ensayo.
9. Obtención de resultados y finalización del proyecto.

La consecución del proyecto se realizará en este orden y los resultados obtenidos en cada una de las fases afectarán a la realización de los pasos posteriores.

Al tratarse de un proyecto de carácter práctico es muy probable que surjan problemas o inviabilidades prácticas no contempladas en el diseño original. Por este motivo es necesario aplicar una metodología flexible teniendo en cuenta la naturaleza y complejidad del proyecto.

### **3.4 PLANIFICACIÓN**

Al tratarse de un proyecto práctico de elevada complejidad es necesario especificar una guía de hitos que nos permitan avanzar por las diferentes fases descritas en la metodología. Esta planificación es susceptible de cambios a lo largo del desarrollo del proyecto, pero servirá como guía general para el cumplimiento de los objetivos en el tiempo previsto de desarrollo.

Las tareas principales se encuentran destalladas en el siguiente listado:

1. Diseño CAD de la cámara térmica
2. Selección de materiales de fabricación
3. Estudio general de las propiedades térmicas
4. Diseño conceptual de los sistemas eléctricos
5. Diseño completo eléctrico y electrónico
6. Diseño físico y digital del sistema completo
7. Fabricación de la estructura
8. Colocación de aislamientos
9. Fabricación de chapas
10. Fabricación de puertas
11. Elaboración de placas electrónicas
12. Instalación de componentes eléctricos
13. Instalación de sensores y actuadores
14. Instalación de placas electrónicas
15. Configuración del sistema operativo
16. Desarrollo del software de control
17. Configuración y calibración de ADC
18. Integración de sistemas y pruebas
19. Ensayos de modelado de planta
20. Diseño del control
21. Desarrollo de interfaz gráfica
22. Realización de ensayos de prueba
23. Retoques y pulido de la cámara térmica
24. Verificación de las medidas de seguridad
25. Redacción de memoria

Estas tareas se estructuran cronológicamente mediante el siguiente cronograma:

*Tabla 1: Cronograma I*

Tarea	Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre			
	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4
Diseño CAD de la cámara térmica	■	■	■	■																
Selección de materiales de fabricación					■	■														
Estudio general de las propiedades térmicas							■	■												
Diseño conceptual de los sistemas eléctricos									■	■	■	■								
Diseño completo eléctrico y electrónico											■	■	■	■						
Diseño físico y digital del sistema completo													■	■	■					
Fabricación de la estructura																	■	■	■	
Colocación de aislamientos																				■
Fabricación e instalación de chapas																				■

*Tabla 2: Cronograma II*

Tarea	Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo			
	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4
Fabricación e instalación de chapas	■																			
Fabricación e instalación de puertas	■	■	■																	
Elaboración de las placas electrónicas					■	■	■	■												
Instalación de componentes eléctricos					■	■	■													
Instalación de sensores y actuadores									■	■										
Instalación de placas electrónicas									■	■	■									
Configuración del sistema operativo													■	■	■	■				
Desarrollo del software de control															■	■	■			
Configuración y calibración de ADC																	■	■		
Integración de sistemas y pruebas																			■	■
Desarrollo de interfaz gráfica																			■	■

*Tabla 3: Cronograma III*

Tarea	Abril				Mayo				Junio				Julio			
	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4
Ensayos de modelado de planta																
Diseño del control																
Desarrollo de interfaz gráfica																
Realización de ensayos de prueba																
Retoques y pulido de la cámara térmica																
Verificación de las medidas de seguridad																
Redacción de memoria																

### 3.5 ESTIMACIÓN ECONÓMICA.

Para el desarrollo del proyecto se contará con la colaboración y financiación del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Comillas. El total del proyecto se deberá realizar dentro de un presupuesto máximo de 5000€. Esta cuantía comprende tanto materiales de fabricación, herramientas necesarias para su elaboración, así como partidas de pago por horas de trabajo en caso de ser necesaria la contratación de terceros para colaborar en el proyecto.

Al mismo tiempo que se ha ido realizando el cronograma y los primeros diseños del proyecto se ha ido presupuestando parte de los materiales imprescindibles para la consecución del proyecto. Este presupuesto se ha dividido en tres grandes bloques en función de su ámbito, componentes mecánicos, eléctricos o electrónicos.

El gasto estimado del proyecto por área es el siguiente:

CATEGORÍA	COSTE
ELECTRÓNICA	516,55 €
MECÁNICA	908,95 €
ELÉCTRICA	380,02 €

*Tabla 4: Presupuesto general*

### 3.5.1 PRESUPUESTO ELECTRÓNICA:

El desglose de componentes presupuestados para la electrónica es el mostrado a continuación:

ARTÍCULO	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TRANSPORTE	TOTAL
Célula Peltier 92W	4	7,25 €	0,00 €	35,09 €
PT100	4	3,22 €	0,00 €	15,60 €
Pasta térmica	1	1,94 €	0,00 €	2,35 €
Cable térmico 1m	4	0,87 €	0,00 €	4,21 €
Raspberry PI 3 B+	2	33,70 €	0,00 €	67,40 €
Pantalla Táctil 7"	1	74,80 €	0,00 €	74,80 €
Fuente ATX 500W	1	15,95 €	0,00 €	15,95 €
Servomotor	4	7,00 €	0,00 €	28,00 €
PT100	15	3,90 €	0,00 €	58,50 €
Placa PCB Fibra de vidrio	5	3,35 €	0,00 €	16,75 €
Pulsador Plateado 1NA-1NC	6	6,70 €	0,00 €	40,20 €
Pi 2 Click SHIELD	1	8,46 €	0,00 €	8,46 €
Socket ATX	1	1,99 €	1,99 €	3,98 €
Kit Reguladores de tensión	1	12,99 €	0,00 €	12,99 €
Módulo ADC	2	33,03 €	0,00 €	66,06 €
Modulo Termopar K	1	30,03 €	0,00 €	30,03 €
Tarjeta de memoria 64GB	2	12,99 €	0,00 €	25,98 €
Encoder x5	1	10,20 €	0,00 €	10,20 €
<b>Total</b>				<b>516,55 €</b>

*Tabla 5: Presupuesto componentes electrónicos.*

### 3.5.2 PRESUPUESTO ELÉCTRICO:

El desglose de componentes electrónicos presupuestados es el mostrado a continuación:

ARTÍCULO	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TRANSPORTE	TOTAL
Cable Corriente Verde-Amarillo	1	14,25 €	0,00 €	14,25 €
Cable Corriente Azul	1	14,25 €	0,00 €	14,25 €
Cable Corriente Marran	1	14,25 €	0,00 €	14,25 €
Tubo Termorretráctil	2	2,10 €	0,00 €	4,20 €
Enchufe Empotrado	1	13,75 €	0,00 €	13,75 €
Seta de emergencia	1	3,65 €	0,00 €	3,65 €
Ventilador Horno	2	43,98 €	0,00 €	87,96 €
Tubo Halógeno x6	1	8,45 €	1,41 €	9,86 €
Tubo Halógeno	3	13,90 €	5,00 €	46,70 €
Relé Estado Solido	7	24,45 €	0,00 €	171,15 €
<b>Total</b>				<b>380,02 €</b>

Tabla 6: Presupuesto componentes eléctricos.

### 3.5.3 PRESUPUESTO MECÁNICO:

El desglose de componentes electrónicos presupuestados es el mostrado a continuación:

ARTÍCULO	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TRANSPORTE	TOTAL
Rueda industrial 60mm	4	5,45 €	0,00 €	21,80 €
Perfil Acero Frio 40x40x2000	6	7,75 €	0,00 €	46,50 €
Chapa Acero INOX 650x900	4	59,95 €	0,00 €	239,80 €
Evaporador HEJ 1D	1	161,19 €	0,00 €	161,19 €
Condensador HCA	1	26,61 €	0,00 €	26,61 €
Válvula de expansión	1	38,02 €	0,00 €	38,02 €
Compresor	1	261,63 €	0,00 €	261,63 €
Climaver plus R	3	12,96 €	0,00 €	38,88 €
Tornillería	1	30,00 €	0,00 €	30,00 €
Chapa Aluminio Perforado	2	12,70 €	0,00 €	25,40 €
Kit de Sellado de horno	1	19,12 €	0,00 €	19,12 €
<b>Total</b>				<b>908,95 €</b>

Tabla 7: Presupuesto componentes mecánicos.

## **Capítulo 4. DISEÑO PRELIMINAR Y PROTOTIPO**

El diseño y construcción de una cámara térmica con los requisitos impuestos en este proyecto es un reto muy complejo y delicado. Por este motivo, es muy importante que se seleccionen adecuadamente las tecnologías que van a ser utilizadas, así como garantizar la viabilidad del proyecto antes de comenzar con la construcción de esta.

En esta fase del desarrollo se tratará de diseñar un prototipo de bajo costo que nos ayudará a analizar la viabilidad del proyecto y las tecnologías que serán empleadas en el producto final. Este prototipo tiene por tanto dos objetivos principales, conocer las tecnologías a emplear y servir como precedente de viabilidad del objetivo final.

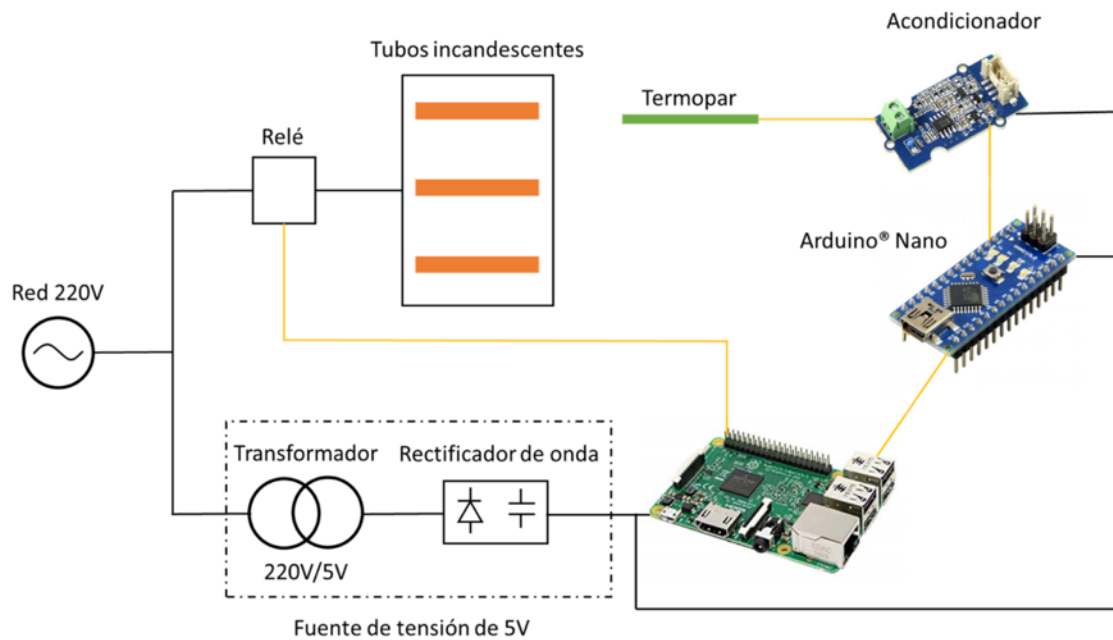
Para la realización de prototipo se plantean los siguientes objetivos a cumplir:

1. Construir un soporte físico de bajo coste capaz de albergar una probeta de ensayo.
2. Implementar un sistema de calefacción capaz de alcanzar los 150°C
3. Implementar sensores de temperatura y registrar las mediciones.
4. Probar un sistema de control básico de temperatura.

## 4.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO.

Para el diseño del prototipo se ha optado por un desarrollo basado en la práctica y en el desarrollo continuo, construyendo y modificando partes del diseño según el proyecto lo ha ido requiriendo.

En un primer lugar se ha realizado un diseño general del funcionamiento del prototipo, desgranando los componentes fundamentales mínimos para la consecución de los objetivos. Estos elementos fundamentales se muestran en la Ilustración 9:



*Ilustración 9: Diseño conceptual del prototipo.*

Para comprender la estructura del diagrama funcional dividiremos los componentes en dos secciones diferenciadas:

- **Sistema de potencia:** Compuesta por el relé y los tubos incandescentes
- **Sistema de control:** Compuesta por la fuente de tensión de 5V, la Raspberry Pi, el Arduino, el acondicionador y el termopar.

El **sistema de potencia** es el encargado de generar la potencia calorífica suficiente para alcanzar las temperaturas necesarias en la cámara térmica, mientras que el **sistema de control** se encargará de monitorizar la temperatura y modificar la potencia entregada por el sistema de potencia.

En primer lugar, se alimentará al sistema desde una toma de corriente doméstica de 220V a 50Hz. Esta tensión servirá para alimentar una resistencia que genere la potencia calorífica, en este caso unos tubos incandescentes, pasando por un relé que permita regular la alimentación abriendo o cerrando el circuito.

Por otro lado, la toma de corriente alimentará una fuente de alimentación que transformará la corriente alterna en corriente continua a 5V. Esta nueva tensión alimentará la electrónica del proyecto, consistente en una Raspberry Pi, un Arduino Nano y una placa de acondicionamiento de señal.

La Raspberry Pi actuará como centro de control del proyecto, registrando las medidas de temperatura y actuando sobre el relé para modular la potencia calorífica del sistema a conveniencia. Esta placa presenta algunas limitaciones para medir directamente la temperatura y es por ello por lo que se utilizará un Arduino Nano y una placa de acondicionamiento de señal entre la Raspberry y el sensor.

El sensor empleado se trata de un termopar tipo K. Estos sensores utilizan una unión de metales que generan una diferencia de potencial proporcional a la temperatura a la que se encuentran. Esta diferencia de potencial depende del tipo de termopar, y en este caso, para el tipo K, los valores de diferencia de potencial y temperatura se encuentran recogidos en las tablas del fabricante.

Los valores de tensión del termopar son muy pequeños para poder leerlos directamente desde un microcontrolador, es por ello por lo que utilizaremos un circuito de acondicionamiento de señal específico para este tipo de termopares.

Este circuito de acondicionamiento transformará la señal a un valor comprendido entre los 0V y los 5V para un rango de temperatura de entre 0°C y los 300°C. Esta tensión será leída por un conversor analógico digital para ser procesado por la Raspberry. Por desgracia, la Raspberry no cuenta directamente con un conversor analógico digital, sino que tendremos que hacer uso de un Arduino Nano que lea este valor previamente se lo envíe a la Raspberry mediante I2C.

Finalmente, una vez la Raspberry obtiene el valor de la temperatura de la cámara térmica esta puede actuar directamente sobre el relé mediante una salida digital de 3.3V, regulando el funcionamiento de los calefactores.

## **4.2 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO.**

En este diseño se ha optado por el uso de los mínimos recursos necesarios para lograr los objetivos propuestos. Por este motivo se han seleccionado materiales de fácil acceso, costo y manipulación.

La estructura general se ha realizado en base a un tubo cuadrado de aislamiento para aires acondicionados proporcionado por el laboratorio de ciencia de materiales. Este tubo de aislamiento es de la marca CLIMAVER y presenta unas dimensiones de 300x330x680mm.



*Ilustración 10: Tubo de aislamiento cuadrado CLIMAVER.*

La estructura se recubrirá de placas de contrachapado para aportar rigidez al sistema y servir como punto de anclaje para los componentes eléctricos y electrónicos del proyecto. Además, se completará el encapsulamiento con dos tapas realizadas también con Climaver.



*Ilustración 11: Placas de contrachapado y tapas de Climaver.*

Finalizando con el recubrimiento, se ha realizado una abertura en la parte frontal del tubo para la incorporación de una pequeña puerta de cristal a través de la cual se pueda manipular la probeta de ensayo.

Para los elementos térmicos se ha utilizado un radiador comercial, el cual se ha desmontado para extraer los tubos incandescentes. Estos tubos se conectarán en paralelo a la toma de corriente pasando primero por un relé.



*Ilustración 12: Calefactor comercial desmontado.*



*Ilustración 13: Puerta de cristal del prototipo.*

Para el alojamiento de la probeta se ha utilizado un retal metálico al que adherir la probeta en el interior de la cámara térmica. A esta probeta hemos conectado unos termopares conectados directamente a un medidor de termopares Yokogawa modelo MV1000, a fin de poder medir directamente la temperatura lograda en el interior de la probeta en distintas zonas de esta (parte superior e inferior) durante el funcionamiento de la cámara térmica. Estos termopares servirán como mecanismo de calibración del sistema, siendo nuestra temperatura de referencia.



*Ilustración 14: Probeta en el interior del prototipo.*

La electrónica se ha instalado en un pequeño compartimento de madera situado en la parte frontal de la cámara térmica. En esta caja se encuentra la Raspberry Pi, la placa de acondicionamiento de señal y el Arduino Nano. Finalmente se ha pintado el prototipo de negro y colocado algunos retoques estéticos, quedando como se muestra en la



*Ilustración 15: Cajetín electrónico del prototipo.*



*Ilustración 16: Prototipo finalizado.*

### **4.3 RESULTADOS DEL PROTOTIPO**

La construcción del prototipo acabó cumpliendo con los objetivos propuestos con éxito. Con este modelo probamos que la tecnología empleada para el desarrollo es viable para la elaboración de una cámara térmica con las prestaciones y requisitos propuestos para este proyecto.

Con el prototipo completo se consiguieron temperaturas estables de 160°C, temperatura 10°C superior al objetivo marcado. Además, se hicieron pequeñas pruebas de modelado del sistema de control, pudiendo comprobar que las lecturas de temperatura por parte de los sensores y el procesamiento de la electrónica, era aproximadamente el registrado por los instrumentos de calibración.

Como conclusiones de la realización del prototipo determinamos que la tecnología de calefacción mediante tubos incandescentes es viable y que para la elaboración de la cámara térmica bastaría con aumentar la potencia añadiendo calefactores adicionales.

Por otro lado, en lo que al control respecta, se ha determinado que la obtención de medidas mediante termopares puede llegar a ser en determinadas condiciones impreciso por la gran inercia térmica que presentan los cables y la imprecisión inherente de la tecnología.

Finalmente, se han detectado algunos problemas con las diferencias de temperatura que se generan en el interior de la cámara térmica. Estas diferencias térmicas pueden ser de hasta 50°C entre la parte inferior y la superior de la cámara y de hasta 10°C en el interior de la probeta. Para corregir este problema será necesario incorporar en el proyecto sistemas específicos para controlar diferentes calefactores a diferentes alturas, así como un sistema para mover el aire en el interior de la cámara.



*Ilustración 17: Prototipo en funcionamiento.*



*Ilustración 18: Medidas de temperatura del prototipo.*

## **Capítulo 5. CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA.**

En este capítulo se detallará el proceso de diseño y construcción de la estructura mecánica de la cámara térmica. Se realizará un seguimiento de los pasos seguidos en orden cronológico detallando las herramientas y componentes utilizados para la ejecución.

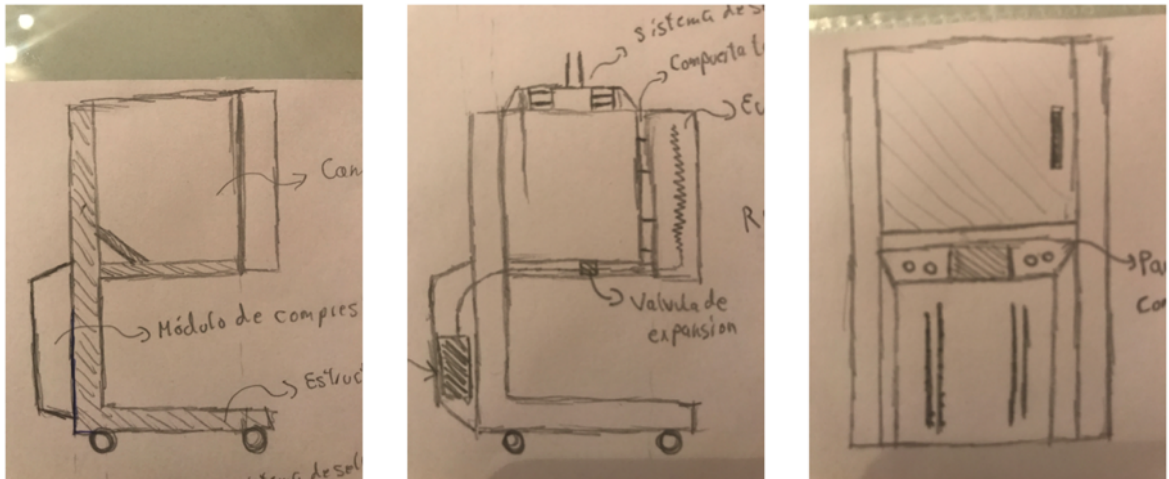
Para una mejor representación del trabajo realizado se aportará una amplia documentación fotográfica que tiene por objetivo retratar la evolución de la construcción de la cámara desde el inicio hasta la finalización de esta.

### **5.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA**

Una vez se han sacado las conclusiones del prototipo, se procede a realizar el diseño estructural de la cámara térmica. A la hora de realizar el diseño se han tomado una serie de condiciones y restricciones sobre las cuales se fundamenta la estructura. Algunas de las condiciones de diseño más importantes son:

- La cámara debe poder integrarse con las dos máquinas universales de ensayos del laboratorio de materiales.
- La estructura debe ser móvil, pudiendo retirarse de las máquinas de forma sencilla.
- Debe contener el espacio suficiente para manipular las probetas cómodamente dentro de la cámara.
- El diseño debe contar con espacio suficiente para albergar todos los componentes eléctricos y electrónicos necesarios.
- Se debe cumplir con ciertos requisitos de seguridad, minimizando el riesgo para los usuarios de sufrir quemaduras.

Teniendo en cuenta estos requisitos en primer lugar se comenzó con la realización de bocetos conceptuales a mano. Estos bocetos servirán para generar rápidamente una idea de lo que se quiere conseguir sin tener en cuenta las dimensiones de los componentes.



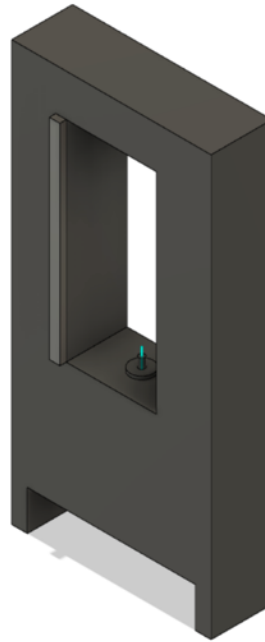
*Ilustración 19: Bocetos del diseño de la estructura.*

Con este concepto se consigue un diseño cómodo para la manipulación de los usuarios, móvil por el uso de ruedas y versátil por su forma capaz de integrarse en ambas máquinas del laboratorio.

Una vez se tiene el concepto hecho se procede a la realización de los modelos 3D. Para esto se ha utilizado el software de modelado Fusión 360 de Autodesk. El objetivo del modelado es representar los componentes que se van a utilizar con sus medidas reales y consecuentemente obtener los planos necesarios para su posterior fabricación.

Para comenzar con el modelado primero se analiza cuáles son las dimensiones que limitan en mayor medida el diseño. Como la cámara debe integrarse dentro de las máquinas presentes en el laboratorio, se ha optado por realizar modelos 3D con las dimensiones reales de las máquinas para diseñar entorno a ellas.

Para no modelar ambas máquinas se ha realizado un único modelo 3D que compone las medidas más restrictivas de cada una de las máquinas.



*Ilustración 20: Modelo de máquinas de ensayos del laboratorio.*

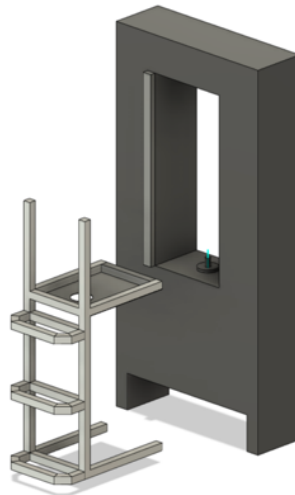
Las principales medidas que se han tomado como limitación del diseño son las siguientes:

- Ancho del área de ensayo: 430mm
- Altura desde el suelo la base del área de ensayo: 800mm
- Altura del hueco inferior de la máquina: 190mm

Teniendo estas consideraciones, se comienza con el modelado 3D de la estructura de la cámara térmica, teniendo en cuenta los diseños conceptuales realizados anteriormente.

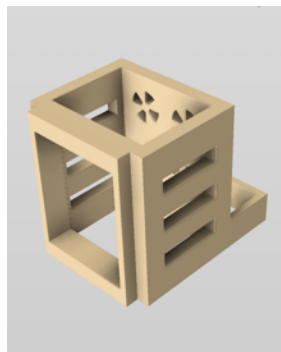
La estructura se diseñará con tubo cuadrado de acero de 40mm ya que se trata de un material fácilmente soldable que aporta una gran resistencia mecánica. Además, al tratarse de un perfil hueco podremos utilizarlo como canalización para el futuro cableado.

Como se muestra en la siguiente Ilustración 21, la estructura presenta las dimensiones necesarias para insertarse en el interior de ambas máquinas de ensayos. El diseño se ha realizado teniendo en cuenta una tolerancia del 10% en las medidas críticas para dejar margen suficiente de error o posibles correcciones de diseño.



*Ilustración 21: Modelo de la estructura y la máquina de ensayos.*

El recinto de la cámara térmica se realizó de forma similar a como se realizó el prototipo. Se han utilizado planchas de aislante térmico de la marca Climaver para separar térmicamente el interior de la cámara de la estructura. Este diseño se modeló en 3D como se muestra en la Ilustración 22.

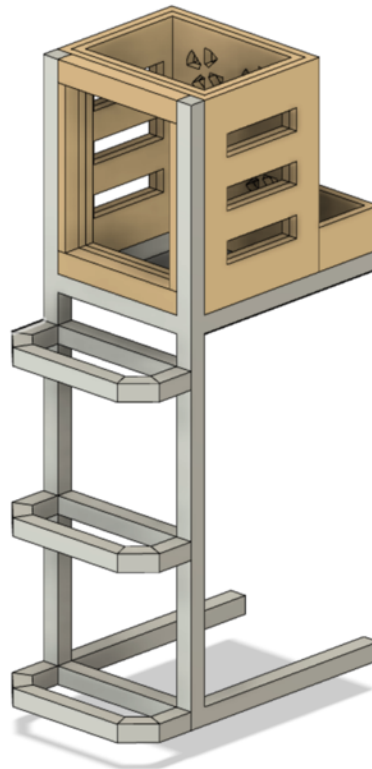


*Ilustración 22: Modelo del aislamiento de la cámara.*

La estructura y el aislamiento se integran de tal forma que se genera una separación de como mínimo 40mm de aislamiento en todos los puntos del interior de la cámara.

El diseño en este punto contempla las siguientes características:

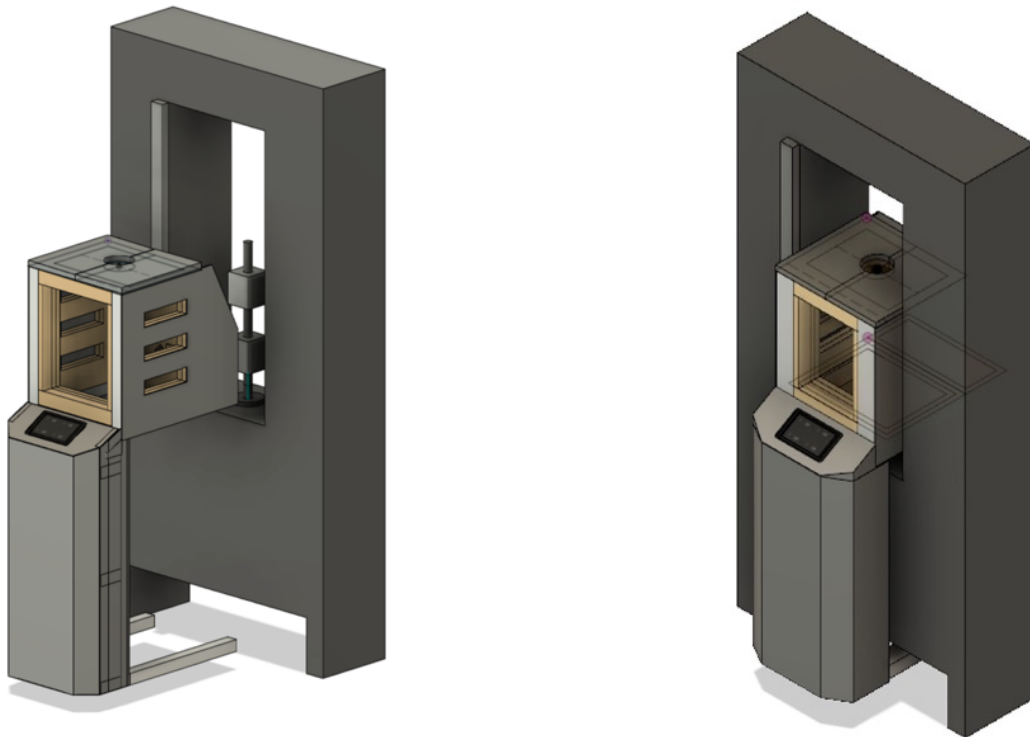
- Seis aperturas rectangulares en el aislamiento para el sistema de calefacción.
- Un recinto trasero para la instalación de elementos de refrigeración.
- Tres arcos frontales para la instalación del cajetín frontal donde se instalará la electrónica.
- Apertura frontal y superior para puertas.



*Ilustración 23: Modelo montaje de estructura con aislamiento.*

Finalmente se culmina el diseño estructural añadiendo los recubrimientos finales con planchas de acero y de aluminio. Estas placas tienen como finalidad proteger la estructura y los componentes electrónicos, así como proporcionar un acabado profesional al proyecto.

Estas placas se unirán a la estructura mediante remaches para aquellas zonas en las que no se requiera retirarlas en el futuro. Por otro lado, para aquellas zonas susceptibles de futuro mantenimiento, como es el cajetín frontal, se utilizarán uniones roscadas en los perfiles.



*Ilustración 24: Modelo 3D final de la estructura.*

## **5.2 FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA.**

Con los modelos 3D finalizados podemos obtener los planos con las dimensiones exactas de cada una de las piezas que compondrán la estructura. Sin embargo, antes de comenzar con la construcción de la estructura se ha optado por crear una pequeña maqueta de la cámara para tener una mejor visión de las dimensiones fuera del ordenador.

Para evitar errores de cálculo con las dimensiones obtenidas en el CAD, se ha realizado parte de la estructura metálica con tabloncillos de madera de las mismas dimensiones que los perfiles de acero.



*Ilustración 25: Maqueta de la cámara térmica.*



*Ilustración 26: Maqueta en la máquina de ensayos.*

Con la comprobación de que las dimensiones son correctas y que el área de la cámara presenta un volumen aceptable para la manipulación de las probetas, podemos proceder a la elaboración final de la estructura.

Los perfiles de acero empleados en la estructura se han cortado con una radial y posteriormente se han unido entre sí con soldadura de electrodo revestido. Finalmente, una vez realizada toda la estructura con los perfiles de acero, se han pulido los defectos de soldadura y pintado con pintura protectora para evitar la oxidación.

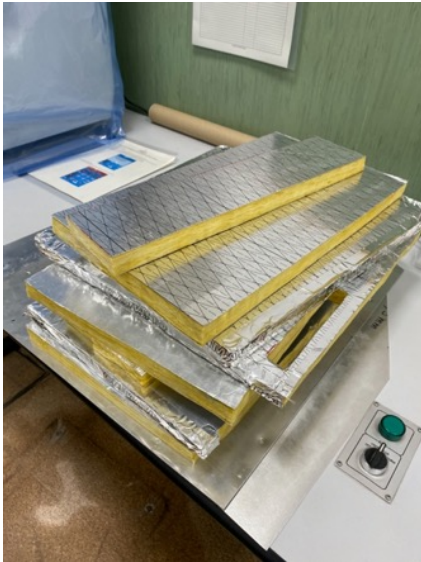


*Ilustración 27: Acabado de la soldadura de los perfiles de acero.*

De la misma forma que se ha hecho con los perfiles de acero, se ha continuado con la fabricación según lo indicado por el modelo 3D con las piezas de aislamiento y las chapas de recubrimiento.

Para el aislamiento se han recortado de una lámina grande de Climaver los fragmentos necesarios para recubrir el interior de la cámara, mientras que para las chapas se ha empleado aluminio por su buen acabado y alta resistencia a la oxidación.

Para la realización de las puertas se ha utilizado perfilera de aluminio, así como vidrio de alta resistencia térmica para la puerta frontal. Todos estos componentes se han integrado en la estructura como se muestra en las siguientes figuras:



*Ilustración 28: Placas de Climaver.*



*Ilustración 29: Frontal de la cámara.*



*Ilustración 30: Perfilera de aluminio para las puertas.*



*Ilustración 31: Estructura con Climaver y perfilera de aluminio.*



*Ilustración 32: Unión de la puerta frontal con bisagras.*



*Ilustración 33: Cierre a presión de la puerta frontal.*



*Ilustración 34: Acabado de puerta superior.*



*Ilustración 35: Integración de puerta frontal y superior.*



*Ilustración 36: Placas de aluminio para tubos halógenos.*



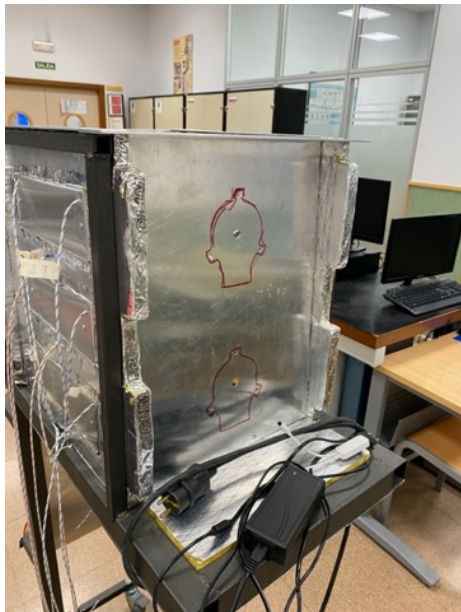
*Ilustración 38: Recubrimiento lateral de los tubos halógenos.*



*Ilustración 37: Placa de aluminio plegada para la base de la cámara.*



*Ilustración 39: Recorte de la base de la cámara para mordaza y vástagos.*



*Ilustración 40: Parte posterior de la cámara con marcado para los ventiladores.*



*Ilustración 41: Ventiladores.*



*Ilustración 42: Interior de la cámara térmica.*



*Ilustración 43: Rejillas de protección para los tubos halógenos.*



*Ilustración 44: Parte trasera del frontal de la cámara.*



*Ilustración 45: Estructura completa sin electrónica.*

Como se puede apreciar en las figuras mostradas, se han incluido elementos adicionales al diseño original producto de las necesidades del momento y el stock de piezas disponibles. Estos elementos no han alterado en ningún momento el diseño funcional de la máquina y simplemente se han añadido por motivos estéticos o por comodidad a la hora de su fabricación.

La estructura en este punto cuenta con los elementos fundamentales diseñados desde un primer momento en el modelo 3D. Todos los elementos que lo componen han sido realizados a medida y ensamblados según lo establecido. Es por esto por lo que teniendo la estructura lista se da paso a la instalación de los sistemas eléctricos y electrónicos necesarios para el funcionamiento del proyecto.

## **Capítulo 6. SISTEMA ELÉCTRICO**

Con la estructura finalizada en este capítulo procederemos a detallar el sistema eléctrico necesario para el correcto funcionamiento de la cámara térmica. Al igual que se realizó con el desarrollo de la estructura, primero se definirá el diseño para posteriormente integrar los componentes en la estructura.

Para este proyecto se ha requerido del uso directo de tensión doméstica a 220V. Esto se ha realizado siguiendo todas las medidas de seguridad pertinentes y comprobando que la instalación es segura para su manipulación y mantenimiento.

En esta sección analizaremos exclusivamente los sistemas cuyo funcionamiento trabajen con corriente alterna. El resto de los sistemas electrónicos se estudiarán más adelante en el capítulo dedicado (Parte I Capítulo 7).

### **6.1 DISEÑO**

El sistema eléctrico es el encargado de entregar la potencia necesaria a los diferentes actuadores para generar la consigna de temperatura deseada. Al tratarse de un volumen de trabajo relativamente grande, se requiere de una alta potencia calorífica para cumplir con los requisitos del proyecto.

Debido a las instalaciones del laboratorio, la máxima tensión a la que tendremos acceso es de 220V, 50Hz. Con esta tensión el sistema a diseñar deberá ser capaz de:

- Entregar potencia controlada a los calefactores.
- Entregar potencia controlada a los ventiladores.
- Alimentar la electrónica del proyecto.

Para cumplir con los objetivos se plantea el siguiente esquema eléctrico:

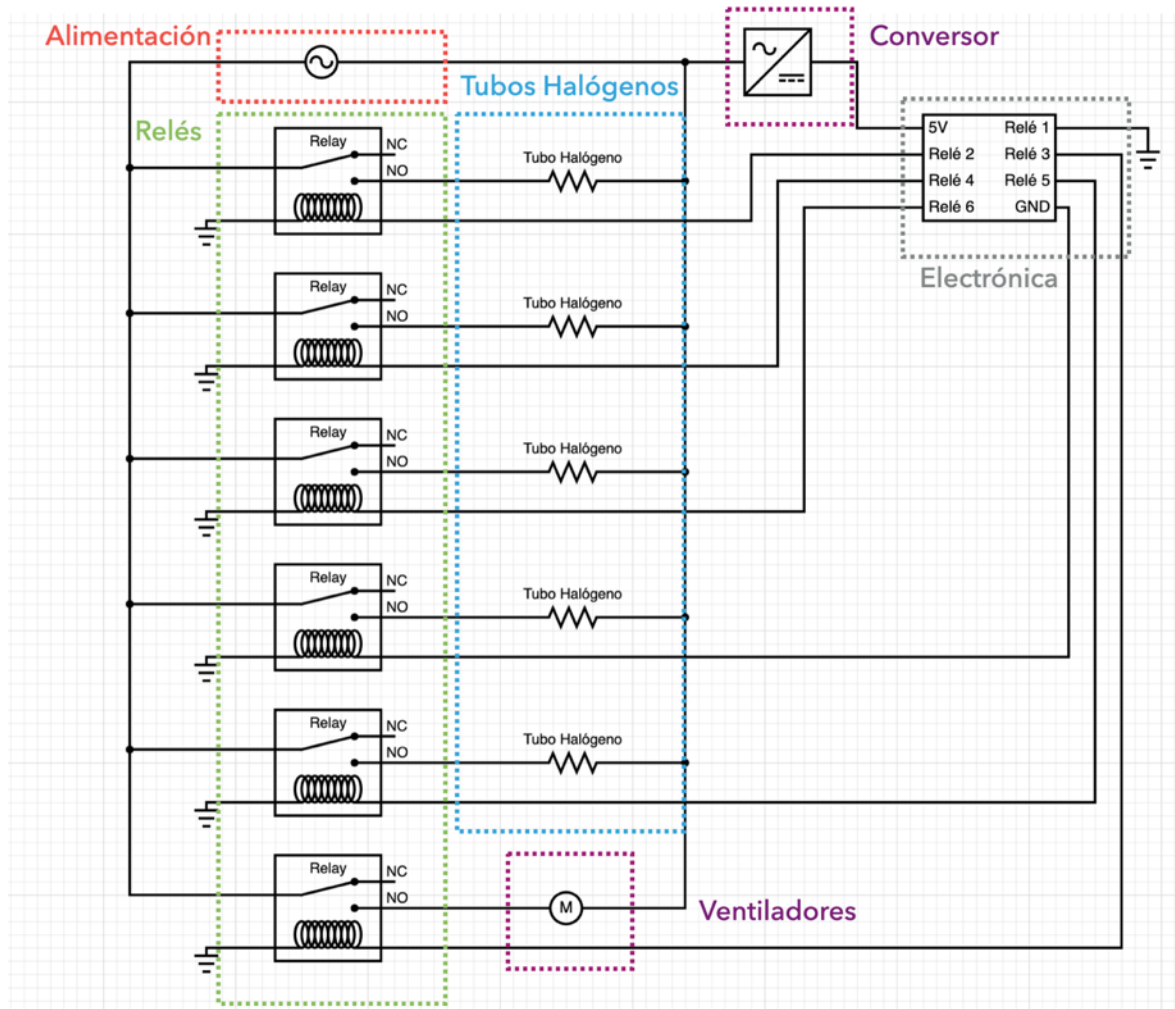


Ilustración 46: Esquema eléctrico de la cámara.

En la ilustración se distinguen los siguientes bloques divididos según funcionalidad y ubicación final en la estructura:

- **Alimentación:** La alimentación constará de una toma de corriente con un enchufe domestico a 220V capaz de soportar una potencia total máxima de 2kw.
- **Convertor:** Se utilizará una fuente de ordenador ATX para convertir la corriente alterna en diferentes valores de tensión. Funciona como fuente de alimentación para la electrónica del proyecto.

- **Relés:** Para la regulación de potencia a los actuadores se utilizarán relés de estado sólido para corriente alterna. Estos relés se activarán y desactivarán según una tensión continua de 5V entregada por la electrónica.
- **Tubos Halógenos:** Conjunto de 6 tubos halógenos distribuidos por el interior de la cámara térmica con una resistencia aproximada de 150Ω.
- **Ventiladores:** Dos ventiladores situados en el interior de la cámara para controlar el flujo de aire en el interior.
- **Electrónica:** Conjunto de sistemas electrónicos encargados del control de la cámara térmica.



*Ilustración 47: Fuente de alimentación ATX.*



*Ilustración 48: Relé de estado sólido.*

## **6.2 IMPLEMENTACIÓN**

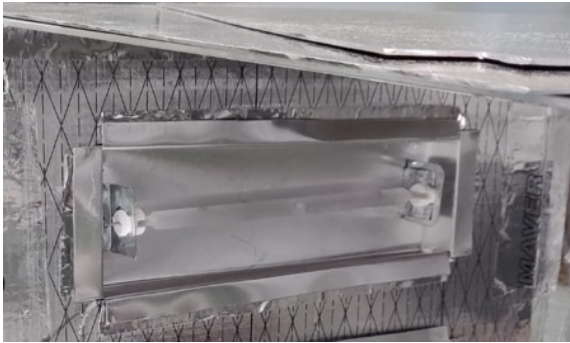
Para implementar todos los bloques que conforman el sistema electrónico se ha optado por un montaje modular siguiendo las divisiones realizadas en el diseño anteriormente mostrado (Ilustración 46: Esquema eléctrico de la cámara.).

Para el cableado se utilizará la propia perfilaría de la estructura para aportar una mayor protección y ocultar parte de las conexiones. Para esto se utilizará cable monofásico de 10 amperios de corriente máxima admisible.



*Ilustración 49: Canalización del cableado por el interior de la perfilaría.*

En primer lugar, se han instalado los componentes que se deben situar en el interior de la cámara como son los ventiladores y los tubos halógenos. Los seis tubos halógenos se han distribuido simétricamente por el interior de la cámara distribuidos en tres alturas diferentes. Estos tubos se han protegido con placas de aluminio y conectado con cables térmicos preparados para soportar las altas temperaturas.



*Ilustración 50: Instalación de tubos halógenos.*



*Ilustración 51: Ventiladores.*

Una vez instalados los tubos halógenos y los ventiladores se ha procedido a montar la toma de corriente y el conversor. Ambos componentes estarán situados en el cajetín frontal de la cámara y asegurados dentro de cajas de seguridad para evitar contactos directos con puntos de alta tensión.



*Ilustración 52: Instalación de fuente de alimentación ATX.*



*Ilustración 53: Instalación de cajetín de alimentación.*

Por último, se ha instalado un cajetín para la conexión de los relés como se muestra en las siguientes imágenes:



*Ilustración 54: Cajetín de relés.*



*Ilustración 55: Montaje del cajetín de relés.*

## Capítulo 7. ELECTRÓNICA Y SISTEMA DE CONTROL

En este punto solo queda por cubrir el desarrollo de los sistemas electrónicos del proyecto. La electrónica tiene como principal cometido la lectura de la temperatura interior de la cámara y el control del flujo térmico en la misma.

En este proyecto los sistemas electrónicos juegan un papel fundamental y su funcionamiento es crítico para su correcto funcionamiento. Algunos de los objetivos que debe cumplir la electrónica son:

- **Medición de la temperatura:** Para poder realizar un control de estable ante perturbaciones será necesario conocer la temperatura en el interior de la cámara en tiempo real. Este sistema comprende desde la selección de los sensores hasta la elaboración de sistemas de acondicionamiento de señal y la final lectura del procesador principal.
- **Accionamiento de los tubos halógenos:** Los tubos halógenos tienen que poder activarse según las consignas de temperatura enviadas por el procesador principal. Este sistema tiene como propósito transformar la señal de salida del procesador a un valor adecuado para el control de los relés.
- **Modelo y sistema de control de temperatura:** El procesador principal requiere de la implementación de un control matemático que modele las propiedades térmicas de la cámara para poder prever las respuestas del sistema y optimizar las dinámicas de calefacción.
- **Interfaz de usuario:** La interacción con los usuarios se realizará mediante una interfaz gráfica que permita controlar las consignas de temperatura, así como controlar diferentes parámetros del sistema.

En este capítulo realizaremos un diseño de los sistemas necesarios para cumplir con cada uno de los objetivos propuestos, así como documentar la implementación de estos sistemas en la cámara.

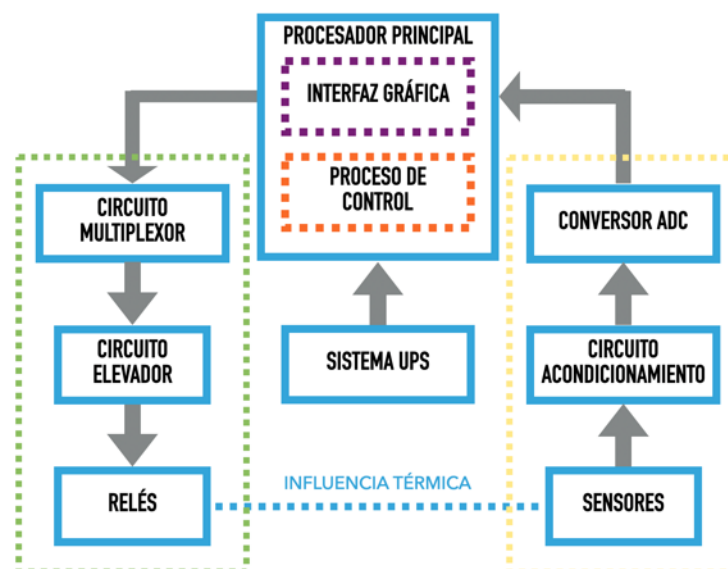
## 7.1 DISEÑO

Teniendo como referencia los objetivos previamente descritos, comenzaremos el diseño por el desarrollo conceptual de las interacciones de los diferentes módulos necesarios para cumplir cada uno de los objetivos.

En la siguiente figura (Ilustración 56), se muestran los diferentes componentes de hardware señalando con flechas las conexiones necesarias, así como la dirección del flujo de información.

Por otro lado, se ha marcado con líneas punteadas los objetivos que cumplen cada una de las secciones:

- **Amarillo:** Medición de la temperatura.
- **Verde:** Accionamiento de los tubos halógenos.
- **Naranja:** Modelo y sistema de control de la temperatura.
- **Morado:** Interfaz de usuario.



*Ilustración 56: Diagrama funcional de la electrónica.*

### 7.1.1 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Con este sistema electrónico se pretende medir la temperatura de la cámara con un error máximo admisible de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y convertir el dato en tiempo real a digital para enviarlo al procesador principal.

Este sistema constará de tres partes distinguidas:

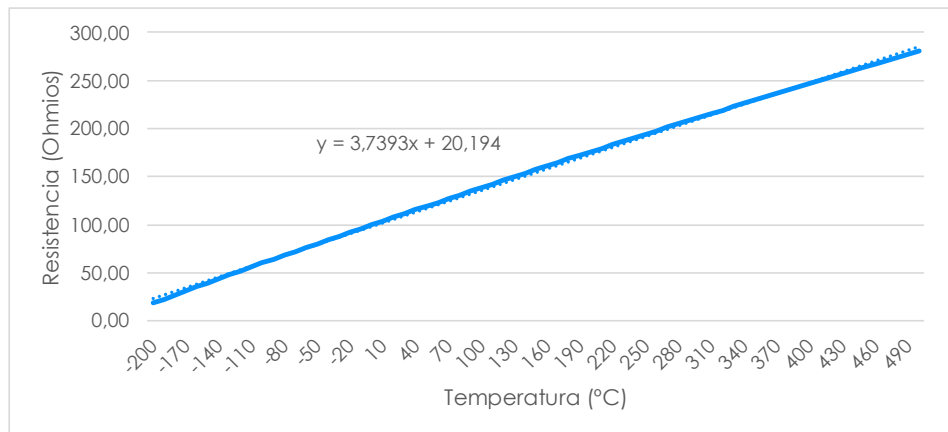
- **Sensores:** Utilizaremos sensores PRT, concretamente los PT100 de dos hilos.
- **Circuito de acondicionamiento:** Para poder leer adecuadamente los cambios de resistencia del sensor es necesario un circuito que nos amplifique la señal producida por el sensor a unos valores aceptables para ser leído por el resto de los sistemas.
- **Convertor ADC:** Este convertor transformará la señal analógica proporcionada por el circuito de acondicionamiento en una señal digital.

Empezando por el sensor, existen en el mercado gran variedad de sensores de temperatura, los tipos más comunes son:

- **Sensores de termopar:** Utilizan la unión de dos metales para generar una diferencia de potencial en función de la temperatura aplicada a la unión. Estos sensores tienen como ventaja el amplio rango de temperaturas a los que pueden operar y su alta resistencia mecánica. Sin embargo, la precisión de estos sensores es relativamente baja y por este motivo tenemos que rechazar su uso para este proyecto.
- **Sensores RTD:** Los sensores RTD o “Resistance-Temperature Detector” son materiales cuya resistencia varía en función de la temperatura aplicada. Existe gran variedad de sensores RTD, para este proyecto utilizaremos específicamente los sensores PRT, una subcategoría de sensores basados en platino. Este tipo de sensores presenta una curva de temperatura-resistencia prácticamente lineal con una alta precisión en el rango de temperaturas requeridas para este proyecto.

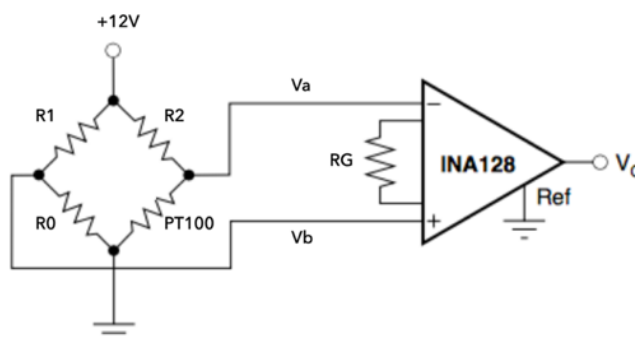


En primer lugar, calcularemos la curva de respuesta de los sensores de PT100 con ayuda de la documentación del fabricante y las tablas de temperatura proporcionadas. Comprobamos que la relación temperatura-resistencia es lineal como se muestra a continuación:



*Ilustración 58: Curva Resistencia-Temperatura del PT100.*

Sabiendo la dinámica del sensor de temperatura procederemos a diseñar el circuito de acondicionamiento. Para ello utilizaremos un circuito del tipo “Puente de Wheatstone”, este diseño nos permitirá transformar de forma precisa las diferencias de resistencia de nuestro sensor en una diferencia de potencial. Esta configuración es especialmente interesante por su fácil configuración, alta precisión y baja sensibilidad a las tolerancias de las resistencias empleadas.



*Ilustración 59: Circuito de acondicionamiento de señal.*

Para el cálculo de las resistencias se ha utilizado una hoja de Excel que nos permitirá visualizar la salida del acondicionador en función de los parámetros introducidos.

El voltaje de salida está proporcionado por un amplificador de instrumentación cuya ecuación de salida es:

$$V_o = \text{Ganancia} * (V_b - V_a)$$

La ganancia de este amplificador depende del valor de la resistencia  $R_g$  según:

$$\text{Ganancia} = 1 + \frac{49400}{R_g}$$

Conociendo las fórmulas del divisor de tensión del puente obtenemos los voltajes de las dos ramas del puente:

$$V_a = \frac{12V * R_{pt100}}{R_2 + R_{pt100}} \quad V_b = \frac{12V * R_0}{R_1 + R_0}$$

Con estas ecuaciones planteadas podemos obtener valores para las resistencias que cumplan:

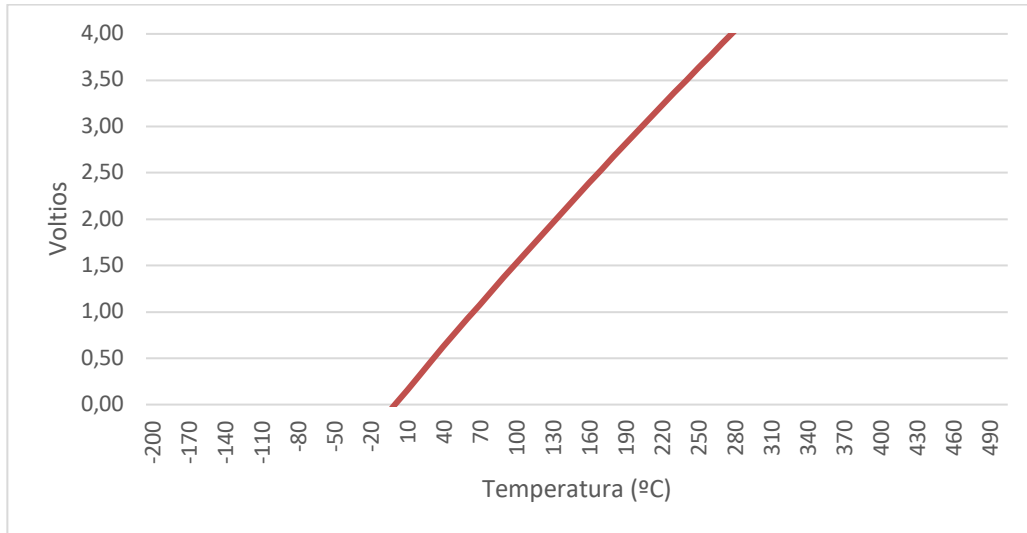
- Rango de temperatura 0°C a 200°C.
- Rango de la salida ( $V_o$ ) 0V a 3,3V.

Los valores obtenidos que cumplen con los requisitos son:

*Tabla 8: Parámetros del circuito de acondicionamiento.*

Parámetro	Valor
R1	2200
R2	2200
R0	100
RG	7000

Finalmente, la curva de salida del circuito de acondicionamiento queda:



*Ilustración 60: Salida del circuito de acondicionamiento.*

### 7.1.2 ACCIONAMIENTO DE LOS TUBOS HALÓGENOS

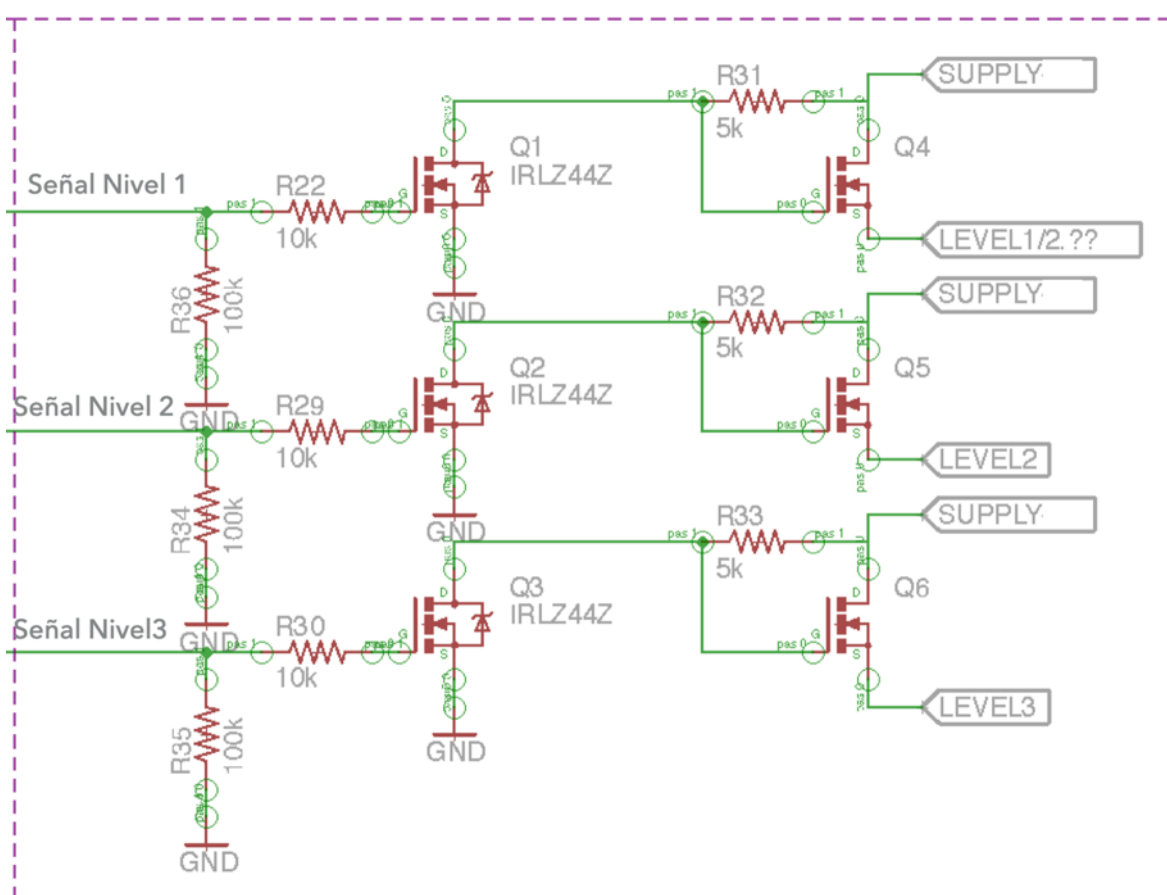
El accionamiento de los tubos halógenos se realizará mediante relés de estado sólido con accionamiento en corriente continua. Los relés seleccionados son los SSR-40 DA, que presentan una entrada de corriente alterna de entre 24V y 380V en corriente alterna de hasta 40 Amperios. Además, el accionamiento se realiza de 3V a 32V, perfecto para el accionamiento desde los sistemas electrónicos.



*Ilustración 61: Relé SSR-40 AD*

La salida del procesador principal de proyecto cuenta con una tensión de 3.3V, esta tensión es técnicamente suficiente para accionar directamente los relés, sin embargo, al encontrarse en un valor límite es posible que en ocasiones no dispare correctamente el relé. Para asegurar este disparo se realizará un circuito de elevación de tensión sencillo que asegure el disparo del relé en todo momento.

El circuito de elevación aumentará la señal de 3.3V del microprocesador a una tensión de 12V. Para esto utilizaremos la salida de 12V de la fuente de alimentación ATX para accionar los relés con el control de la señal del procesador gracias a un circuito basado en MOSFET.



*Ilustración 62: Circuito elevador de tensión para los relés.*

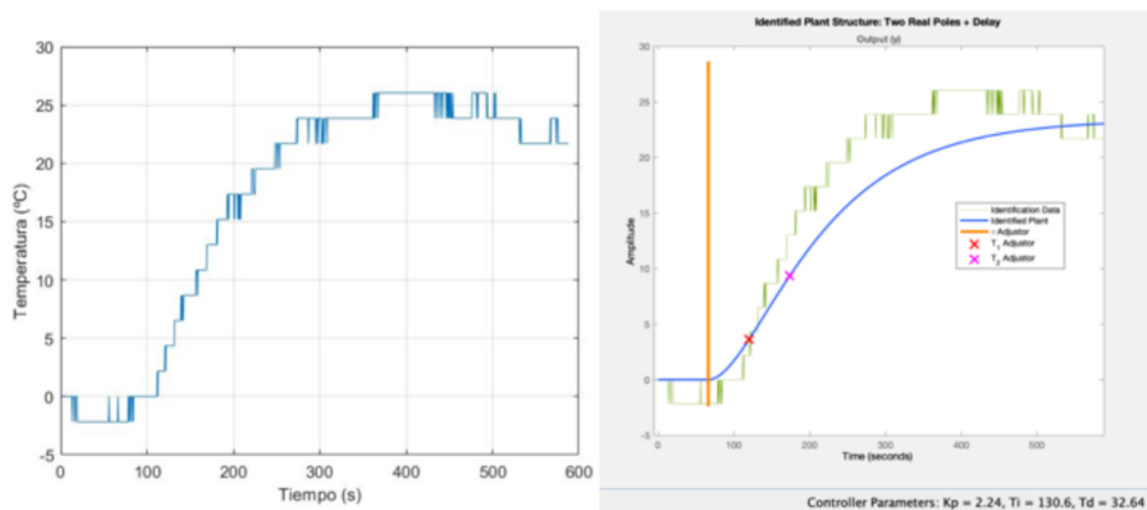
### 7.1.3 MODELO Y SISTEMA DE CONTROL DE LA TEMPERATURA

Para que la cámara sea capaz de determinar la potencia óptima que enviar a los tubos halógenos en función de la temperatura interior de la cámara y la consigna del usuario es necesario generar un modelo matemático de las dinámicas térmicas de la máquina. Este modelo será una representación matemática del modelo físico de la cámara y servirá para “simular” las variaciones de temperatura dentro de la cámara en función de la potencia aportada por los tubos halógenos.

Además del modelo de la cámara, necesitaremos un control que nos permita determinar qué actuación es necesaria en cada momento para cumplir de forma óptima con las consignas del usuario.

Para diseñar tanto el modelo como el sistema de control se utilizará el software Matlab y Simulink. Con estos programas podremos generar un modelo y sistema de control adecuado a partir de ensayos. Estos ensayos consisten en someter a la máquina a un estímulo de los tubos halógenos determinado y medir las respuestas térmicas a lo largo del tiempo.

Con estas medidas se usará la herramienta PID Tunner para generar un control PID adecuado para la cámara térmica.

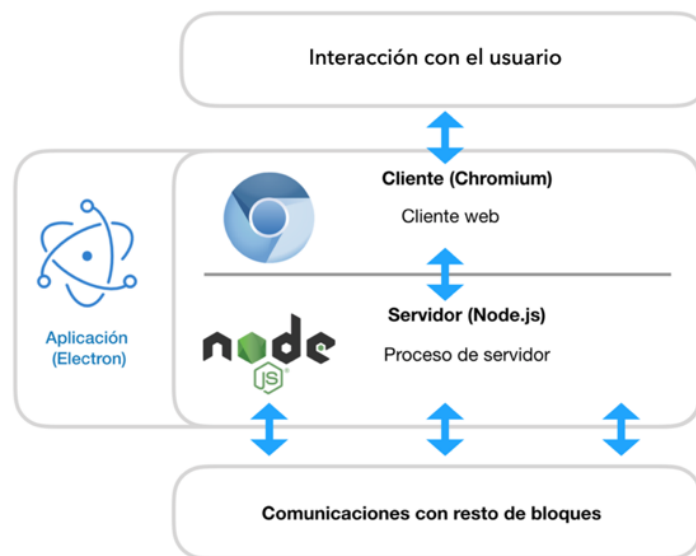


*Ilustración 63: Determinación de la planta con PID Tunner.*

### 7.1.4 INTERFAZ DE USUARIO

Para la interacción con el usuario utilizaremos una interfaz gráfica que se mostrará a través de una pantalla táctil. Esta interfaz estará montada con un stack de tecnologías web que se ejecutarán en el procesador principal.

El renderizado de la interfaz gráfica se realizará con la implementación local de una dupla servidor-cliente web, donde el servidor se implementará con un proceso desarrollado en Node.js, mientras que el cliente se gestionará con un motor web Chromium. Estos dos procesos se engloban dentro de una misma aplicación mediante Electron. En la siguiente figura se muestran los diferentes procesos y las conexiones de la interfaz gráfica:



*Ilustración 64: Procesos principales de la interfaz gráfica.*

Como el procesamiento de la interfaz estará basado en una aplicación web los lenguajes que se usarán para su desarrollo son TypeScript para el servidor y HTML, CSS y JavaScript para el cliente web.

Además de lo mencionado, se utilizará una pequeña base de datos donde podamos almacenar los resultados obtenidos en cada ensayo. Para ello usaremos MongoDB, una base de datos no relacional basada en el almacenamiento de objetos tipo JSON.

Todo este software tiene como principal cometido trasladar las ordenes de los usuarios al proceso de control dirigido por la subrutina de Matlab y Simulink. Estas comunicaciones se realizarán mediante peticiones con el protocolo TCP/IP dentro del mismo procesador.

La interfaz gráfica abrirá el puerto de comunicaciones 5005 por el que enviarán mensajes a Matlab y Simulink, mientras que este abrirá el 1340 para transmitir a la interfaz. Con este sistema conseguimos una comunicación bidireccional entre los dos procesos.

Desde el lado de Simulink implementaremos los siguientes bloques de comunicaciones:

### Comunicaciones desde Simulink



Ilustración 65: Bloques de comunicación desde Simulink.

Del lado del servidor se abrirán comunicaciones con el proceso de Simulink:

```
//-----Transmite-----
function transmitirSimulink(mensaje){
  console.log('Enviando a Simulink: '+mensaje);
  simulinkTCP.write(mensaje);
}

function transmitirSimulink2(mensaje){
  simulinkTCP.connect(8081,ipSimulink, function() {
    console.log('Enviando a Simulink: '+mensaje);
    simulinkTCP.write(mensaje);
  });

  simulinkTCP.on('data', function(data) {
    console.log('Received: ' + data);
    // kill client after server's response
    simulinkTCP.destroy();
  });

  simulinkTCP.on('close', function() {
    console.log('Connection closed');
  });
}
```

Ilustración 66: Código de comunicación del servidor a Simulink.

## **7.2 IMPLEMENTACIÓN**

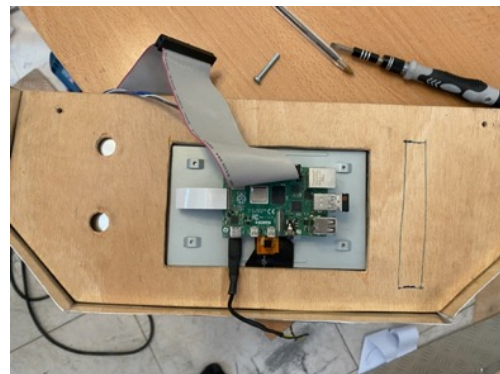
Una vez está definida la estructura tanto del software como del hardware a implementar procedemos a la fabricación y ensamblaje en la estructura de los diferentes circuitos electrónicos.

Según se mostró en el apartado 5.1 de diseño de la estructura, la electrónica se montará en el cajetín frontal de la cámara. En la parte superior del cajetín se montará la pantalla táctil de 7 pulgadas desde donde se interactuará con la interfaz gráfica. Además, junto a la pantalla táctil se añadirán dos botones para el encendido y apagado del sistema.

Antes de montar de forma definitiva la pantalla táctil se ha realizado una maqueta con madera para tener una referencia de cómo quedaría la instalación final y comprobar la accesibilidad de los usuarios a los periféricos.



*Ilustración 67: Montaje del panel frontal en maqueta con pantalla táctil y botones.*



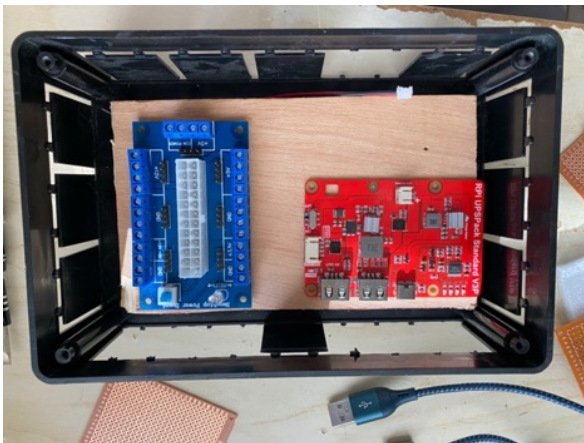
*Ilustración 68: Parte posterior del panel con montaje de Raspberry Pi.*

La Raspberry Pi que hará de procesador principal del sistema se instalará en la parte posterior de la pantalla táctil para reducir todo lo posible la longitud de los cables de señal con la pantalla.

Por otro lado, el resto de la electrónica se montará verticalmente dentro del cajetín frontal de la estructura. Toda la electrónica se encontrará dividida en dos cajas, la primera para la electrónica del sistema UPS y alimentación y la segunda con el resto de los circuitos electrónicos.

Para el sistema de alimentación y UPS (Uninterruptable Power Supply) se ha utilizado un módulo basado en baterías de polímero de litio “Rpi UPSPack Standard V3P” capaz de aportar una tensión de 3.7V con una capacidad de 10000mAh. Este módulo se alimentará directamente de la fuente de tensión ATX y servirá como backup para el procesador principal en caso corte de la alimentación central.

Este sistema impedirá que la Raspberry Pi se apague de forma repentina en medio de la ejecución de un proceso crítico. Estos cortes podrían dañar el hardware de forma permanente, por ejemplo, corrompiendo la tarjeta de memoria donde se encuentra instalado el sistema operativo.



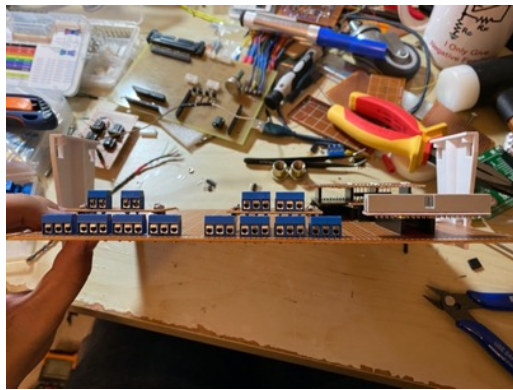
*Ilustración 69: Distribución de componentes en el cajetín UPS.*



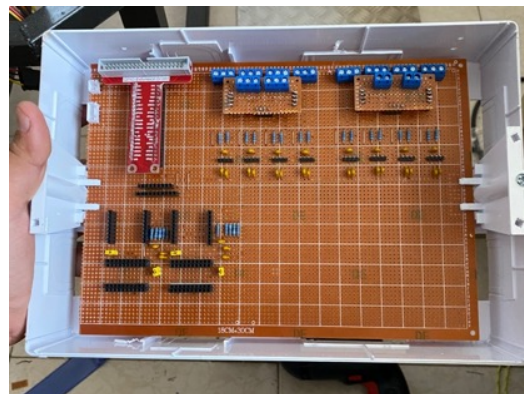
*Ilustración 70: Instalación final del cajetín UPS.*

Para el resto de la electrónica se ha creado una placa personalizada donde se han soldado todos los componentes descritos anteriormente en el apartado de diseño. Los módulos que se encuentran en esta placa son el conversor ADC, el circuito elevador y el circuito de acondicionamiento.

Además, se han incluido múltiples conectores para la conexión de los sensores y cables externos necesarios para actuar sobre el resto de la máquina. Estos conectores se han escogido para que sean fácilmente intercambiables y sea posible realizar mantenimiento del sistema sin necesidad de desoldar ningún elemento.



*Ilustración 71: Conectores de la placa madre de la cámara.*



*Ilustración 72: Placa madre de la cámara.*

Todos estos componentes se cablearán entre si ocultando la mayoría de los cables, para ello se ha creado un pequeño espacio en la parte trasera del cajetín frontal de la estructura como se muestra en la Ilustración 74.

Finalmente, una vez comprobado que el espacio es suficiente para instalar todos los componentes, se ha cambiado el panel de la pantalla táctil por chapa de aluminio quedando finalmente como se muestra en la Ilustración 76.



*Ilustración 73: Montaje provisional de pantalla táctil y electrónica.*



*Ilustración 75: Panel frontal montado en la estructura.*



*Ilustración 74: Cableado de la electrónica.*

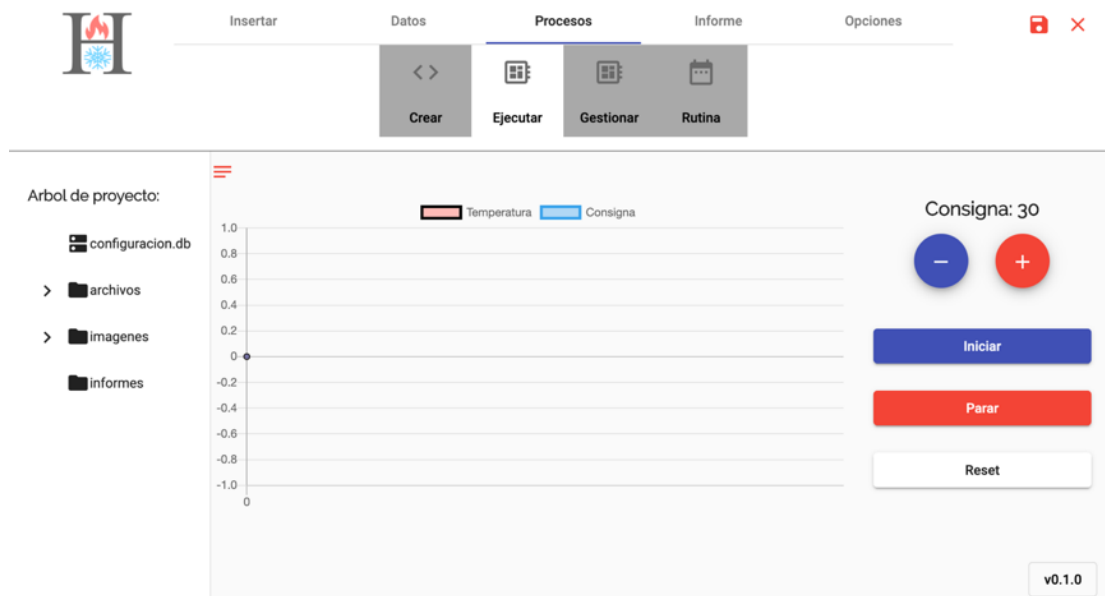


*Ilustración 76: Montaje de la electrónica con chapa de aluminio.*

Para implementar la interfaz gráfica se han utilizado tecnologías web según lo planeado en la fase de diseño. Esta interfaz se ha creado haciendo uso del framework de JavaScript Angular.

La interfaz finalmente presenta un panel desde donde se puede controlar manualmente la temperatura consigna y dar órdenes de inicio y parada del control. Todos los datos registrados se irán registrando en un gráfico temporal donde se compara la temperatura en tiempo real con la consigna aportada por el usuario.

Los datos generados en cada ensayo pueden guardarse en un árbol de proyecto para su posterior análisis en Excel.



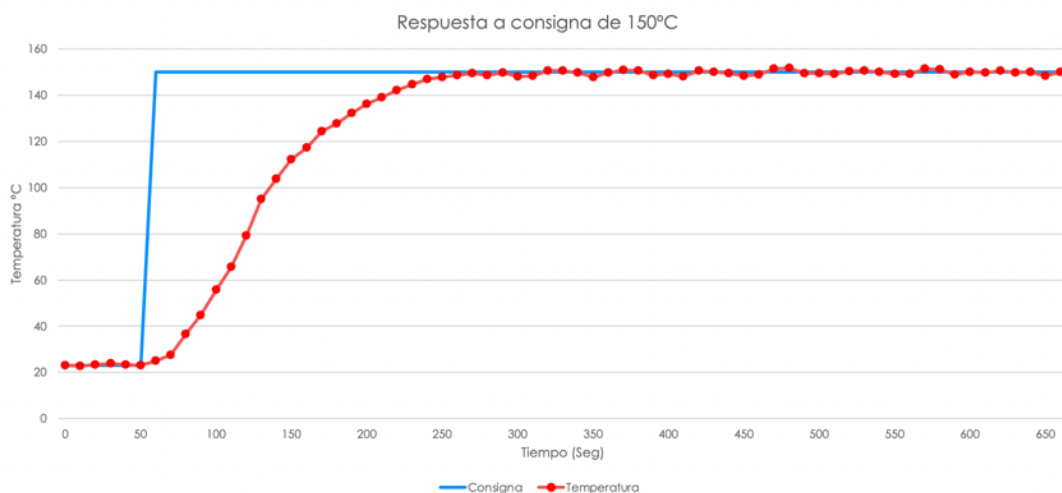
*Ilustración 77: Interfaz gráfica.*

## Capítulo 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la finalización de las tres fases de desarrollo de los sistemas mecánico, eléctrico y electrónicos y las múltiples pruebas de funcionamiento, podemos dar por concluida la construcción de la cámara térmica.

Tras el ensamblaje de todas las piezas diseñadas se han realizado las primeras pruebas de funcionamiento de la cámara. Estas pruebas han consistido en el testeo unitario de los diferentes sistemas que componen la cámara, comprobando el cumplimiento de los objetivos propuestos desde un inicio.

- **Prueba de control de temperatura:** El objetivo principal de la cámara térmica es poder generar y controlar una temperatura estable en su interior en un rango de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ . Para comprobar la capacidad de control de la cámara se ha realizado una prueba con una consigna de  $150^{\circ}\text{C}$  y se ha verificado la estabilidad del sistema y su dinámica subamortiguada.



*Ilustración 78: Test de control térmico.*

Con esta prueba comprobamos la capacidad de la cámara de estabilizar temperaturas por encima de la temperatura ambiente con una precisión superior a la marcada como objetivo de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo de desarrollo no se han integrado los sistemas de refrigeración necesarios para alcanzar temperaturas inferiores a la temperatura ambiente.

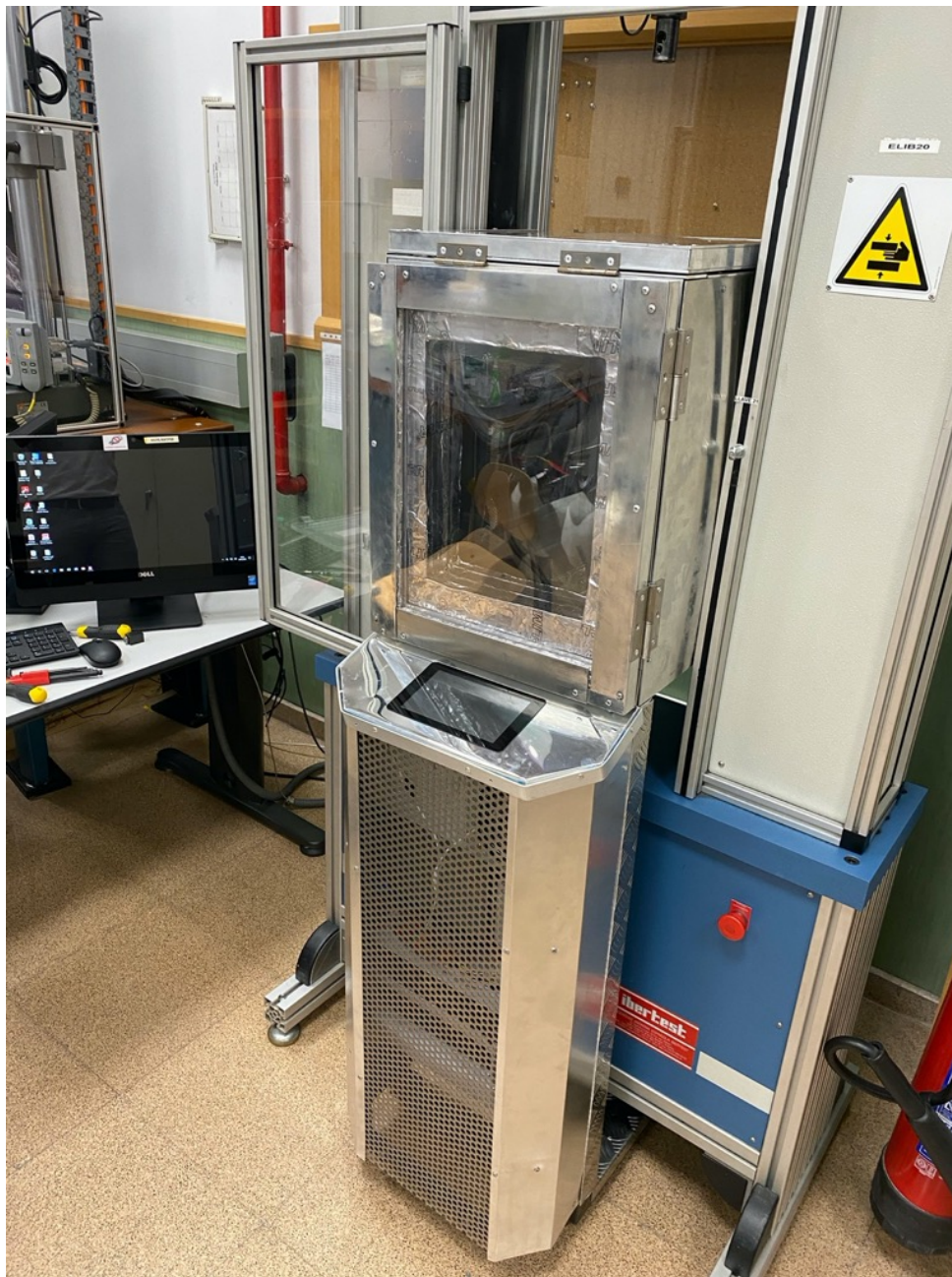
- **Pruebas de resiliencia térmica:** Un aspecto importante del proyecto es que debe ser duradero y poder soportar altas temperaturas durante tiempos prolongados. Con esta prueba se ha sometido a la cámara a su potencia máxima durante dos horas de forma ininterrumpida para valorar su resistencia en condiciones de trabajo intenso. Aunque el tiempo durante el que se ha realizado la prueba sea insuficiente para sacar conclusiones definitivas, la cámara no ha presentado daños durante la ejecución.

Con esta prueba se ha comprobado además que la cámara es capaz de superar sin dificultad el límite máximo de  $200^{\circ}\text{C}$  propuesto en los objetivos alcanzando temperaturas de hasta  $280^{\circ}\text{C}$ , por lo tanto, podemos garantizar que en todo momento estará trabajando con margen suficiente para estabilizar las temperaturas cerca de los  $200^{\circ}\text{C}$ .



*Ilustración 79: Cámara térmica a máxima potencia.*

- **Prueba de movilidad y accesibilidad:** Finalmente, en los requisitos iniciales se especificó la necesidad de que la cámara pudiera adaptarse a las dimensiones de las máquinas presentes en el laboratorio de ciencia de materiales. En esta prueba se ha introducido la cámara en ambas máquinas de ensayos y se ha comprobado que la cámara es operativa y fácilmente instalable en ambas máquinas.



*Ilustración 80: Cámara térmica finalizada y acoplada a una máquina de ensayos.*

## **Capítulo 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

El proceso de diseño y construcción de la cámara ha supuesto un gran reto tanto a nivel de diseño como a nivel de implementación práctica. La gran variedad de sistemas que integra la cámara térmica ha hecho de este proyecto un desafío multidisciplinar donde tanto la mecánica, la electrónica y los sistemas eléctricos convergen.

Uno de los mayores desafíos de este proyecto ha sido la complejidad que presenta el salto del papel al mundo real. El proceso de adquisición y fabricación de las piezas ha dotado al proyecto de una complejidad adicional, donde se ha tenido que analizar factores más allá del puro diseño, como puede ser, la disponibilidad en el mercado de las piezas, las limitaciones de herramientas disponibles o incluso la destreza a la hora de ensamblar las piezas en el producto final.

Tras un largo proceso finalmente se ha conseguido un producto final operativo que cumple con la mayoría de las especificaciones propuestas al inicio del proyecto. Para valorar el desarrollo de proyecto se ha esquematizado en la Tabla 9 el estado final de los objetivos.

Como se puede observar en la tabla, la mayoría de los objetivos se han conseguido satisfactoriamente, sin embargo, hay algunos puntos que no se han conseguido por limitaciones técnicas o falta de tiempo en el desarrollo.

Uno de los puntos incompletos más importantes es el desarrollo del sistema de refrigeración. Debido a la complejidad de este sistema se optó por asegurar el desarrollo del sistema de calefacción ante la imposibilidad de desarrollar ambos sistemas en tiempo.

El sistema de refrigeración se contempló en un primer momento a la hora de diseñar la estructura, sin embargo, la dificultad técnica que presenta su implementación hace de este desarrollo un objetivo pendiente para futuros trabajos.

*Tabla 9: Valoración final de objetivos.*

<b>Objetivo</b>	<b>Estado</b>
· Diseño físico capaz de integrarse en las dos máquinas universales de ensayos del laboratorio de ciencia de materiales.	COMPLETADO
· Diseño del sistema eléctrico y electrónico de la cámara térmica.	COMPLETADO
· Construcción de la estructura de la cámara térmica.	COMPLETADO
· Implementación de los circuitos eléctricos y electrónicos en la cámara térmica.	COMPLETADO
· Modelado térmico de la cámara y especificación de la planta a controlar.	COMPLETADO
· Implementación del sistema de control de temperatura de la cámara.	COMPLETADO
· Realización de un ensayo completo con regulación térmica entre los 100°C y 200°C.	COMPLETADO
· Realización de un ensayo completo con regulación térmica a temperatura inferior al ambiente.	NO COMPLETADO
· Obtener un error en régimen permanente de 1°C	COMPLETADO
· Conseguir un rango de temperatura controlable máximo de 200°C.	COMPLETADO
· Conseguir un rango de temperatura controlable mínimo de -10°C.	NO COMPLETADO
· Implementación de sistemas de seguridad adicionales.	PARCIALMENTE COMPLETADO
· Permitir conectividad de la cámara térmica con el ordenador del laboratorio para la obtención y posterior procesamiento de datos.	PARCIALMENTE COMPLETADO
· Implementación de una interfaz gráfica capaz de gestionar las diferentes funciones de la cámara térmica.	COMPLETADO

A la vista de los resultados obtenidos y los objetivos cumplidos se proponen los siguientes puntos de actuación para futuros proyectos:

- Diseño de sistema de refrigeración
- Implementación de sistema de refrigeración capaz de alcanzar los  $-10^{\circ}\text{C}$ .
- Mejora de sistemas de seguridad como la implementación de seta de emergencia o enclavamiento eléctrico en la puerta de la cámara.
- Mejoras en el modelo de control de la cámara para aumentar la precisión y velocidad a la que se alcanza el régimen permanente.
- Implementar un control individual de los diferentes tubos halógenos para mejorar la homogeneidad de la temperatura en el interior de la cámara.
- Expandir las posibilidades de configuración desde la interfaz gráfica. Añadiendo por ejemplo curvas de temperatura personalizadas, temporizadores...
- Aumentar la conectividad de la cámara para que se puedan exportar los datos de forma más sencilla.
- Reforzar el aislamiento térmico de la puerta superior para evitar pérdidas.
- Diseñar e implementar una protección para la célula de carga contra los vapores que emite la cámara.
- Pulido y mejoras en el acabado de las chapas exteriores de la cámara.

## Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Torres, J., & Redondo, J. (2009). Reparación y automatización de una máquina universal de ensayos. *Ciencia e Ingeniería*, 30(2), 171-179.
- [2] Upton, E., & Halfacree, G. (2014). *Raspberry Pi user guide*. John Wiley & Sons.
- [3] Herrador, R. E. (2009). Guía de usuario de Arduino.
- [4] Hernández, C., Peza, E., García, E., & Torres, J. B. Caracterización y prueba de operación de un sensor de temperatura RTD PT100.
- [5] Tabla de termopar tipo K: (SA, s.f.)
- [6] (Laurila, 2020)
- [7] (MICKROE, s.f.)
- [8] Kurniawan, A. (2013). *Getting Started with Matlab Simulink and Raspberry PI*. PE Press.
- [9] Satheesh, M., D'mello, B. J., & Krol, J. (2015). *Web development with MongoDB and NodeJs*. Packt Publishing Ltd.
- [10] Jensen, P. (2017). *Cross-platform desktop applications: Using node, electron, and Nw. js*. Simon and Schuster.
- [11] Wirz, D. (2008). *Refrigeración comercial para técnicos de aire acondicionado*. Editorial Paraninfo.
- [12] Herranz-Pindado, R. (2008). *Climatización mediante células Peltier*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Madrid.
- [13] López Campos, S. R. (2014). *Sistema de climatización basado en células Peltier* (Bachelor's thesis).

## ANEXO: ALINEAMIENTO CON LOS ODSs.

Los objetivos de desarrollo sostenible son un conjunto de objetivos globales adoptados por los líderes mundiales para la erradicación de la pobreza, garantizar la protección del planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una agenda de desarrollo sostenible. Estos objetivos se engloban en 17 grupos y deben cumplirse en los próximos 15 años.



*Ilustración 81: Resumen de los ODSs.*

Con este proyecto se tiene un potencial impacto indirecto en el cumplimiento de algunos de estos objetivos. Al tratarse de un proyecto destinado a la investigación y desarrollo de nuevos materiales se puede generar un impacto real con la producción de nuevos o mejorados materiales. Por ejemplo, con este proyecto se puede potenciar la investigación de nuevos envases que se descompongan fácilmente a alta temperatura. En este aspecto el proyecto se alinea principalmente con los objetivos 13, 14 y 15, dando la posibilidad de crear nuevos materiales que cuiden de nuestro planeta sin comprometer nuestro estado de bienestar.