



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'ALCOI

Diseño y fabricación de un prototipo de equipo para la medición de conductividades térmicas de materiales

Trabajo Final de Master

Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de Materiales

Autor: Jose Luis Alonso Ramos

Tutor: Octavio Ángel Fenollar Gimeno

Convocatoria de defensa: Septiembre 2019

Índice

Resumen.....	6
Abstract	6
Objetivo.....	6
Introducción	7
Antecedentes	7
Método de hilo caliente	7
Método difusividad láser flash	8
Método de hilo caliente modificado	9
Método de la fuente plana transitoria	10
Método de medición de flujo de calor	10
Conclusión	11
Método de medición de flujo de calor	11
Prediseño del equipo	13
Materiales	14
Termopares	14
Pieza de referencia 1 (frio)	15
Pieza de referencia 2 (caliente)	16
Simulación	16
Aislante.....	24
Construcción.....	26
Molde para referencias	26
Aislante.....	29
Fuente de calor.....	30
Fuente fría	32
Montaje arduino	32
Programación	33
Arduino obtener direcciones de termopares.....	33
Arduino programa	35
Visual Studio	37
Prototipo	40
Prototipo 2	41
Prototipo 3	44

Prototipo 3.1	46
Prototipo 3.2	47
Calibración del equipo.....	47
Programación	50
Prueba del equipo	51
Prueba con acero	51
Prueba con contrachapado	52
Carcasa parte electrónica.....	53
Presupuesto	56
Precio del equipo.....	56
Precio por ensayo.....	57
Precio de los prototipos no usados.....	58
Conclusiones	58
Futuras mejoras.....	59
Bibliografía	61
Normativa.....	62
Marco legal de referencia	62
Normativa método de medición del flujo de calor	62
Planos	63

Índice Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 MÉTODO HILO CALIENTE	8
ILUSTRACIÓN 2 MÉTODO DIFUSIVIDAD LÁSER FLASH	9
ILUSTRACIÓN 3 MÉTODO DE HILO CALIENTE MODIFICADO.....	9
ILUSTRACIÓN 4 MÉTODO DE LA FUENTE PLANA TRANSITORIA	10
ILUSTRACIÓN 5 MÉTODO DE MEDICIÓN DE FLUJO DE CALOR	12
ILUSTRACIÓN 6 BOCETO DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	13
ILUSTRACIÓN 7 TERMOPAR DS18B20	14
ILUSTRACIÓN 8 PIEZA DE REFERENCIA FRÍA / PLANO TRANSVERSAL FUENTE FRÍA.....	15
ILUSTRACIÓN 9 PIEZA DE REFERENCIA CALIENTE / PLANO TRANSVERSAL FUENTE CALIENTE.....	16
ILUSTRACIÓN 10 AISLANTE.....	17
ILUSTRACIÓN 11 TERMOPAR	17
ILUSTRACIÓN 12 MUESTRA	18
ILUSTRACIÓN 13 MODELADO DEL EQUIPO COMPLETO.....	19
ILUSTRACIÓN 14 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA	20
ILUSTRACIÓN 15 MEDIDA DE LA POSICIÓN DEL TERMOPAR RESPECTO A LOS DEMAS TERMOPARES.....	22
ILUSTRACIÓN 16 DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTENCIA TÉRMICA USANDO 1, 2 O 3 RESISTENCIAS	23
ILUSTRACIÓN 17 MITAD DEL AISLANTE CON CORTE VERTICAL Y CON CORTE HORIZONTAL	24
ILUSTRACIÓN 18 MOLDE PARA PIEZAS DE REFERENCIAS	26
ILUSTRACIÓN 19 REFERENCIA CURÁNDOSE DENTRO DEL MOLDE.....	27
ILUSTRACIÓN 20 REFERENCIAS YA CURADAS.....	28
ILUSTRACIÓN 21 REFERENCIAS CON AGUJEROS PARE LOS TERMOPARES	28

ILUSTRACIÓN 22 PREDISEÑO DE LAS CARCASAS.....	29
ILUSTRACIÓN 23 GANCHO PARA CABLES.....	29
ILUSTRACIÓN 24 CARCASAS DEL AISLANTE CONSTRUIDAS.....	30
ILUSTRACIÓN 25 TERMOSTATO	31
ILUSTRACIÓN 26 TERMOSTATO CON LA RESISTENCIA TÉRMICA Y EL TERMOPAR QUE LO CONTROLA.....	31
ILUSTRACIÓN 27 MONTAJE DEL ARDUINO Y LOS TERMOPARES	33
ILUSTRACIÓN 28 INTERFAZ VISUAL STUDIO.....	37
ILUSTRACIÓN 29 INTERIOR DEL EQUIPO SIN AISLANTE.....	40
ILUSTRACIÓN 30 EQUIPO COMPLETO.....	41
ILUSTRACIÓN 31 PILARES DE POLIESTIRENO EXPANDIDO CENTRANDO LA REFERENCIA FRÍA.....	42
ILUSTRACIÓN 32 VIGAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO CENTRANDO LA REFERENCIA CALIENTE.....	43
ILUSTRACIÓN 33 RESULTADO DEL ENSAYO CON ALUMINIO	44
ILUSTRACIÓN 34 ESQUEMA DE LAS REFERENCIAS DE ALUMINIO.....	45
ILUSTRACIÓN 35 REFERENCIAS DE ALUMINIO	45
ILUSTRACIÓN 36 RESULTADOS CON PROTOTIPO 3	46
ILUSTRACIÓN 37 RESULTADOS CON PROTOTIPO 3 CON GRASA DE SILICONA.....	46
ILUSTRACIÓN 38 RESULTADOS CON PROTOTIPO 3 CON PASTA TÉRMICA.....	47
ILUSTRACIÓN 39 ENSAYO CON CONTRACHAPADO	53
ILUSTRACIÓN 40 ORGANIZACIÓN DE LA PARTE ELECTRÓNICA	53
ILUSTRACIÓN 41 CARCASA ELECTRÓNICA.....	54
ILUSTRACIÓN 42 ORGANIZACIÓN DE LA PARTE ELECTRÓNICA EN LA CARCASA PEQUEÑA	55
ILUSTRACIÓN 43 CARCASA ELECTRÓNICA PEQUEÑA	55
ILUSTRACIÓN 44 COMPARACIÓN DE LA PERDIDA DE ADHERENCIA DE LA PASTA TÉRMICA TRAS EL PRIMER ENSAYO	59
ILUSTRACIÓN 45 PORTA MUESTRAS	60

Índice Gráficas

GRÁFICA 1 ERROR EN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA RESPECTO AL ESPESOR DE LA MUESTRA.....	24
GRÁFICA 2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO USANDO ALUMINIO CON UN ESPESOR DE 28,3MM	48
GRÁFICA 3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO USANDO ALUMINIO CON UN ESPESOR DE 51,5MM	48
GRÁFICA 4 COMPARACIÓN DE LAS 2 CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	49
GRÁFICA 5 PENDIENTE DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN RESPECTO AL ESPESOR.....	49
GRÁFICA 6 RESTO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN RESPECTO AL ESPESOR	50
GRÁFICA 7 CURVAS CALIBRACIÓN F1140 TEÓRICAS	51
GRÁFICA 8 CURVAS CALIBRACIÓN F1140.....	52

Índice Tablas

TABLA 1 CURVA DE ERROR TERMOPAR DS18B20.....	15
TABLA 2 EVOLUCIÓN DEL ERROR CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE LA FUENTE DE CALOR	23

Resumen

El objetivo de este TFM es el diseño y posterior fabricación de un prototipo de un equipo de laboratorio para medir conductividad térmica de materiales. En primer lugar, se llevará cabo un profundo análisis bibliográfico de las tecnologías actuales y posibilidades para el cálculo de esta propiedad. Posteriormente, se diseñará el equipo conforme al método de cálculo elegido. Se realizará un diseño del equipo con un modelizado para la realización de simulaciones informáticas que validen el diseño y la calidad de los resultados de la medición (sensores de temperatura, materiales aislantes, etc). Se optimizará el diseño con las herramientas de simulación. Asimismo, se realizará la programación en arduino necesaria para la captación de datos y obtención de resultados. Con el diseño del equipo optimizado, y con la programación en arduino realizada, se llevará a cabo la fabricación física del prototipo y se realizan mediciones de materiales con conductividad conocida para determinar la validez de los resultados obtenidos y comparación con las simulaciones realizadas.

Abstract

The objective of this TFM is the design and subsequent manufacture of a prototype of a laboratory equipment to measure thermal conductivity of materials. First, a thorough bibliographic analysis of current technologies and possibilities for the calculation of this property will be carried out. Subsequently, the equipment will be designed according to the calculation method chosen. A design of the equipment will be realized with a modeling for the realization of computer simulations that validate the design and quality of the measurement results (temperature sensors, insulating materials, etc). The design will be optimized with simulation tools. Likewise, programming will be carried out in arduino necessary for the collection of data and obtaining results. With the design of the optimized equipment, and with the programming in arduino performed, the physical manufacturing of the prototype will be carried out and measurements of materials with known conductivity will be made to determine the validity of the results obtained and comparison with the simulations performed.

Objetivo

El objetivo de este trabajo de fin de master es el diseño, construcción y puesta a punto de un equipo capaz de medir la conductividad térmica de materiales con el menor precio posible.

El segundo objetivo es que el error del equipo sea inferior al 10%.

El tercer objetivo es que el equipo sea capaz de medir conductividades térmicas bajas.

Introducción

Ya sea debido al I+D o al control de calidad de un producto se necesita de una técnica para poder calcular la conductividad térmica de los materiales. Para calcular la conductividad térmica es necesario entender antes el flujo de calor y como se transmite, el flujo de calor aparece cuando se produce un gradiente de temperatura, continuando hasta que se alcanza el equilibrio térmico. Existen tres modos distintos de transferencia:

- Conducción, transmisión de calor por contacto sin transferencia de materia.
- Convección, transmisión por medio de la materia, portadora del calor.
- Radiación, transmisión del calor por medio de la emisión de ondas electromagnéticas o fotones.

El principal modo de transmisión de calor en materiales sólidos es la conducción, ya que la radiación requiere altas temperaturas y la convección de la transferencia de materia.

La conductividad térmica es una propiedad que mide la capacidad de los materiales de transmitir calor a través de la conducción. La conductividad térmica se determina a partir de la ecuación de Fourier del flujo de calor.

$$k = \frac{Q * Z}{\Delta T * S}$$

Donde:

- k es la conductividad térmica expresada en W/m*k.
- Q es el flujo de calor en W
- T es temperatura en k
- Z es el espesor en m
- S es la superficie en m²

Antecedentes

Existen distintas técnicas para medir la conductividad térmica algunos de los métodos más utilizados son el método del hilo caliente, método difusividad láser flash, método del hilo caliente modificado, fuente plana transitoria y el método medidor del flujo de calor.

Método de hilo caliente

El método del hilo caliente (ASTM C1113) es una técnica que consiste en insertar un hilo calentado eléctricamente en un material. Este método intrusivo se usa principalmente en espumas y líquidos, aunque también puede usarse en otro tipo de materiales si se perfora la muestra previamente para la inserción del hilo.

El calor fluye radialmente desde el hilo y se mide la temperatura de este, el gráfico de temperatura del hilo frente al logaritmo del tiempo se usa para calcular la conductividad térmica.

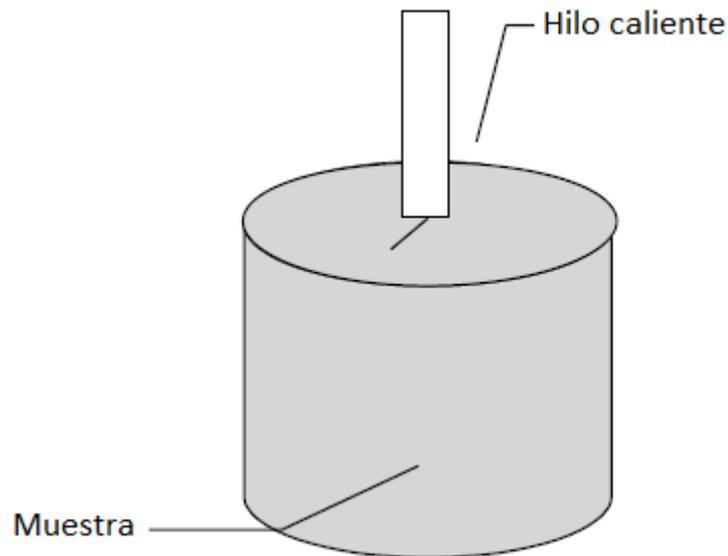


Ilustración 1 Método hilo caliente

Ventajas: Sus muestras no tienen tamaño máximo, mínima preparación de la muestra, tiempo de ensayo corto, válido para conductividades altas y bajas, da la conductividad térmica directamente, puede usarse en líquidos, no requiere calibración y bajo costo de equipo.

Desventajas: No puede usarse en muestras de pequeño tamaño, no puede usarse en productos terminados y requiere contacto con la pieza.

Método difusividad láser flash

El método difusividad láser flash (ASTM E1461-92) es una técnica en la que se aplica un pulso de calor sobre la cara frontal de la muestra usando un láser flash y se mide el cambio de temperatura de la cara posterior con un detector de infrarrojos. El gráfico resultante del aumento de temperatura frente al tiempo se usa para calcular la difusividad térmica y a partir de ella la conductividad térmica.

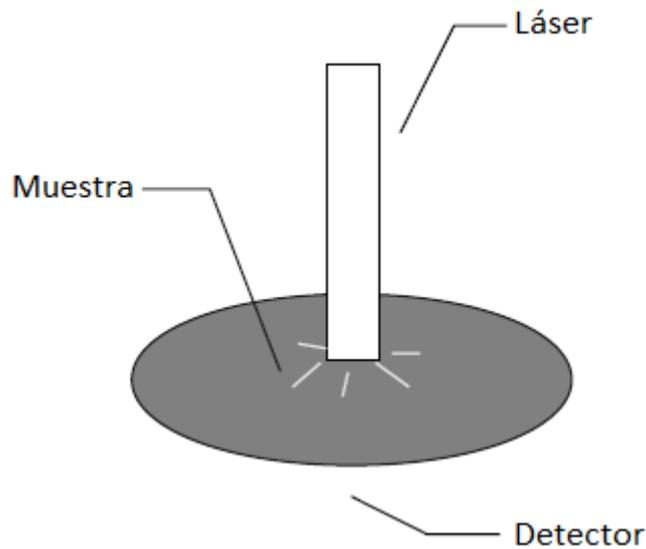


Ilustración 2 Método difusividad láser flash

Ventajas: Pequeño tamaño de muestra, tiempo de ensayo corto, altas conductividades térmicas, puede usarse en líquidos, no necesita calibración y no necesita contacto directo con la pieza.

Desventajas: Tiene tamaño máximo para las muestras, requiere preparar previamente la muestra, no puede usarse en productos terminados, no da la conductividad térmica directamente, no puede usarse en conductividades térmicas bajas y alto coste de equipo.

Método de hilo caliente modificado

El método del hilo caliente modificado es una técnica similar al método del hilo caliente, el cambio reside en que el elemento calefactor se apoya sobre una superficie plana produciendo un flujo de calor unidireccional. El calentamiento es constante y se monitorea la temperatura de la muestra para medir el aumento de temperatura respecto al tiempo.

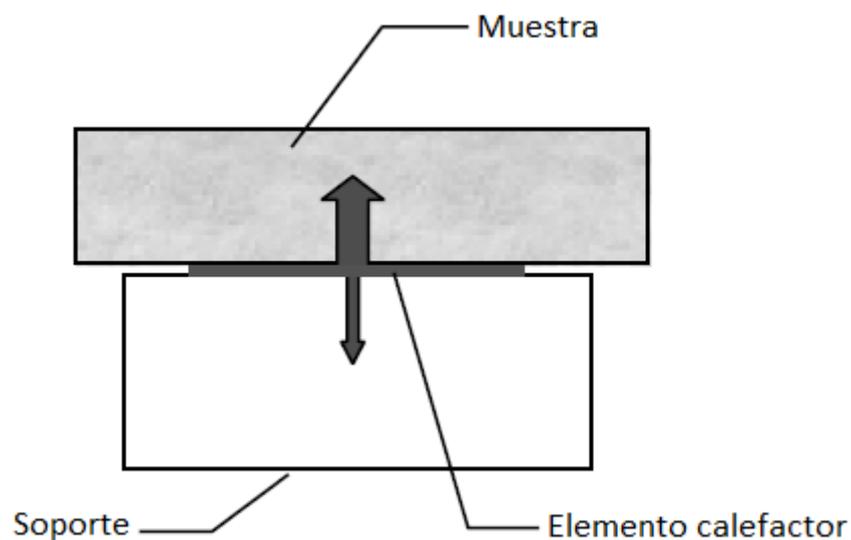


Ilustración 3 Método de hilo caliente modificado

Ventajas: Sus muestras no tienen tamaño máximo ni mínimo, mínima preparación de la muestra, tiempo de ensayo corto, válido para conductividades bajas, puede usarse en líquidos, puede usarse en productos terminados y bajo costo de equipo.

Desventajas: No da la conductividad térmica directamente, no puede usarse en altas conductividades, requiere calibración previa y requiere contacto con la pieza.

Método de la fuente plana transitoria

El método de la fuente plana transitoria es una técnica similar al método del hilo caliente, en este caso la fuente calefactora se encuentra entre dos muestras planas con las mismas dimensiones, un flujo de calor tridimensional emana del calefactor que debe tener forma circular, este funciona a temperatura constante y se mide la variación de la temperatura respecto al tiempo.

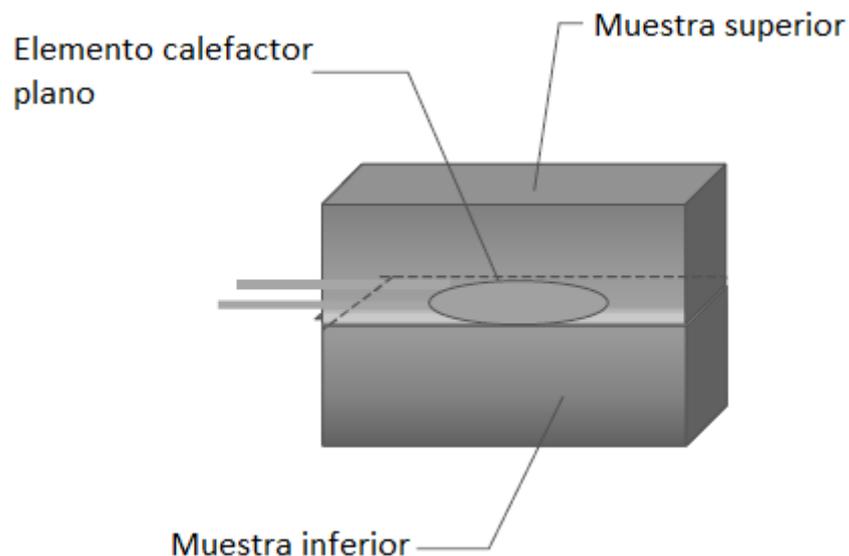


Ilustración 4 Método de la fuente plana transitoria

Ventajas: Sus muestras no tienen tamaño máximo ni mínimo, mínima preparación de la muestra, tiempo de ensayo corto, válido para conductividades altas y bajas, da la conductividad térmica directamente, puede usarse en líquidos, puede usarse en productos terminados y no requiere calibración previa.

Desventajas: Alto costo de equipo y requiere contacto con la pieza.

Método de medición de flujo de calor

La muestra de la que se quiere conocer la conductividad térmica se coloca entre dos piezas que se encuentran a diferentes temperaturas para producir un flujo de calor en el sistema. Hay que asegurar que todo el sistema se encuentra en contacto, esto puede hacerse por el propio peso

del sistema o mediante una presa neumática. El aislante debe rodear las referencias minimizando el flujo de calor lateral. Tras provocar el flujo de calor se mide la temperatura de los extremos de las referencias y se calcula la conductividad térmica.

Ventajas: Pequeño tamaño muestra, valido para conductividades altas y bajas, da la conductividad térmica directamente, bajo coste de equipo, la muestra no requiere preparación y no requiere calibración previa.

Desventajas: Tiempo de ensayo largo, no puede usarse en líquidos, no puede usarse en productos terminados y requiere contacto con la pieza.

Conclusión

Se decidió usar el método de medición del flujo de calor debido a que:

- Puede usarse en tamaños de muestra pequeños, de esta forma no es necesario crear probetas de gran tamaño solo para este ensayo.
- Puede usarse tanto en conductividades altas como en conductividades bajas, esto depende de la conductividad térmica de las referencias, para reducir el error de medición del método es necesario que las conductividades de la referencia y la muestra sea parecidas.
- El precio del equipo es bajo, la universidad disponía de la materia prima necesaria para fabricar las referencias y el resto del equipo estaba dentro del presupuesto de la universidad.

Método de medición de flujo de calor

El método consiste en provocar un flujo de calor constante entre dos piezas de las que ya conocemos su conductividad térmica, a las que llamaremos referencias, y la muestra que se ubica entre las dos anteriores. El flujo debe ser constante de esta manera es igual en todo el sistema y puede igualarse con cada referencia o muestra, tal que:

$$Q = cte$$

$$Q_{ref1} = Q_{ref2} = Q_{muestra}$$

$$\frac{S_{ref1} * \lambda_{ref1} * \Delta T_{ref1}}{\Delta Z_{ref1}} = \frac{S_{ref2} * \lambda_{ref2} * \Delta T_{ref2}}{\Delta Z_{ref2}} = \frac{S_{muestra} * \lambda_{muestra} * \Delta T_{muestra}}{\Delta Z_{muestra}}$$

Teniendo en cuenta que las áreas de las referencias y las muestras son iguales:

$$S_{ref1} = S_{ref2} = S_{muestra}$$

$$\frac{\lambda_{ref1} * \Delta T_{ref1}}{\Delta Z_{ref1}} = \frac{\lambda_{ref2} * \Delta T_{ref2}}{\Delta Z_{ref2}} = \frac{\lambda_{muestra} * \Delta T_{muestra}}{\Delta Z_{muestra}}$$

$$\frac{\lambda_{ref1} * \Delta T_{ref1}}{\Delta Z_{ref1}} + \frac{\lambda_{ref2} * \Delta T_{ref2}}{\Delta Z_{ref2}} = 2 * \frac{\lambda_{muestra} * \Delta T_{muestra}}{\Delta Z_{muestra}}$$

$$\lambda_{muestra} = \frac{\Delta Z_{muestra}}{\Delta T_{muestra}} * \left(\frac{\lambda_{ref1} * \Delta T_{ref1}}{2 * \Delta Z_{ref1}} + \frac{\lambda_{ref2} * \Delta T_{ref2}}{2 * \Delta Z_{ref2}} \right)$$

De esta manera podemos calcular la conductividad térmica de la muestra, solo conociendo la conductividad térmica de las referencias y la temperatura del interior de varios puntos del sistema.

Para que funcione es necesario que los referencias y las muestras estén en contacto directo para que la transmisión de calor sea solamente por conducción.

Dentro de cada referencia se colocarán dos termopares uno pegado a la muestra y el segundo a una distancia de la fuente fría o de calor en la que el flujo sea ya uniforme por toda la superficie, los termopares de la muestra son opcionales.

El uso de un aislante que rodee todo el sistema es necesario para que el flujo de calor unidireccional, de referencia a referencia pasando por la muestra, evitando perdidas con flujos laterales de calor.

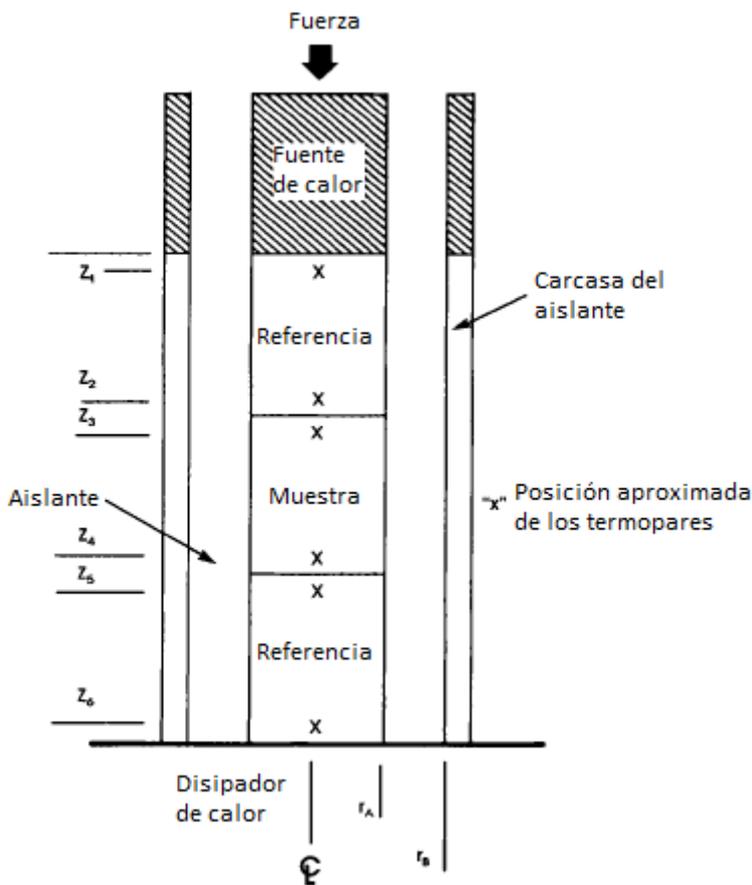


Ilustración 5 Método de medición de flujo de calor

Se encienden las dos fuentes, fría y caliente, a una temperatura constante, y se espera hasta que se alcance el equilibrio térmico, de forma que los termopares se estabilicen. Teniendo así un flujo constante por todo el sistema.

Se mide la temperatura de los termopares y se aplica la ecuación de Fourier para el cálculo de flujo de calor, teniendo en cuenta la distancia entre los termopares y la conductividad de las referencias.

Prediseño del equipo

Para el diseño de este equipo se siguieron dos normativas, la ASTM E1530-11 y la ASTM E1225-04. De estas normativas se sacaron las dimensiones de la referencia, de la muestra, disposición del equipo, características térmicas de los materiales de referencia...

Se hizo un primer boceto de cómo iba a diseñarse el equipo, este constaría de (1) un aislante para que el flujo de calor vaya por el equipo, (2 y 4) dos piezas de referencia con las mismas dimensiones, (3) la muestra de la que queremos conocer la conductividad térmica debe tener la misma área que las referencias, (5) la fuente fría se pensó en usar un peltier, (10) la fuente caliente se pensó en usar resistencias térmicas y (6-9) los termopares para medir la temperatura a la que se encuentran los extremos de la muestra y las referencias.

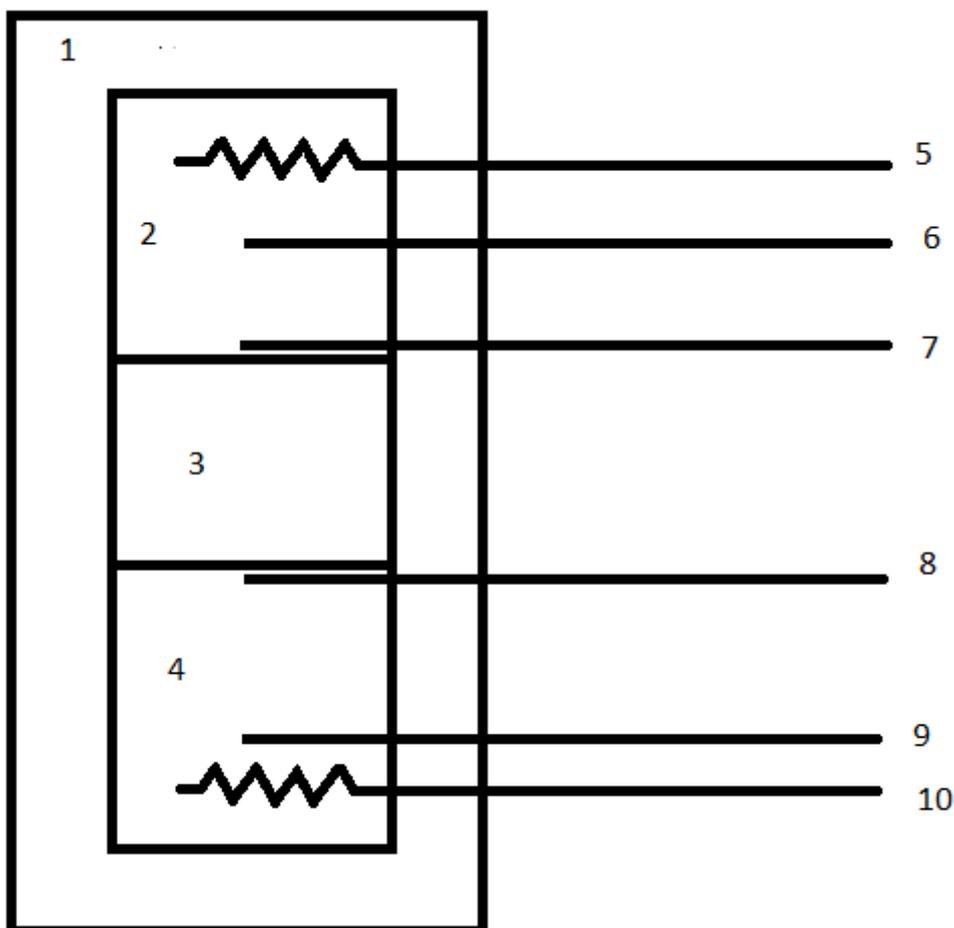


Ilustración 6 Boceto del equipo de medición de la conductividad térmica

Materiales

Lo primero era definir de que material se harían tanto el aislante como las referencias, se decidió usar los materiales que la universidad tenía al alcance.

En el caso de las referencias se decidió usar en un primer momento epoxi con fibra de vidrio debido a que su conductividad era parecida a la de los materiales con los que va a usarse el equipo, sin embargo, al final se usó epoxi con alúmina debido a que sus propiedades térmicas eran mejores.

Para el aislante se pensó en el uso de cemento con arcilla de baja conductividad, sin embargo, el uso de cemento sería irreversible, por tanto, antes de la construcción con cemento se decidió usar lana de roca con fibra de vidrio.

Termopares

Se decidieron usar termopares DS18B20 debido a que su rango de temperaturas está entre -55 y 125°C , su bajo espesor de 6mm y su bajo precio.

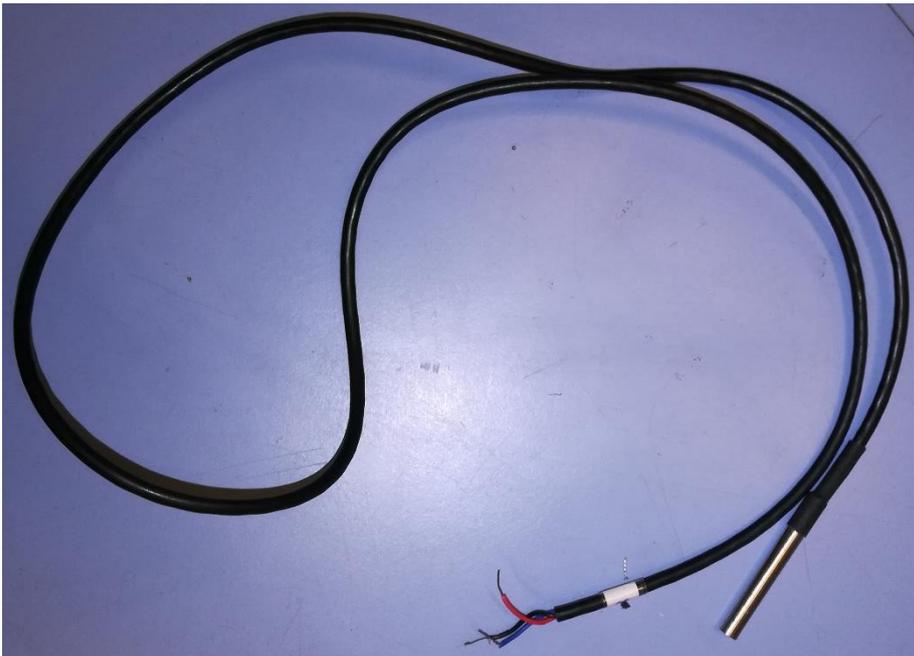
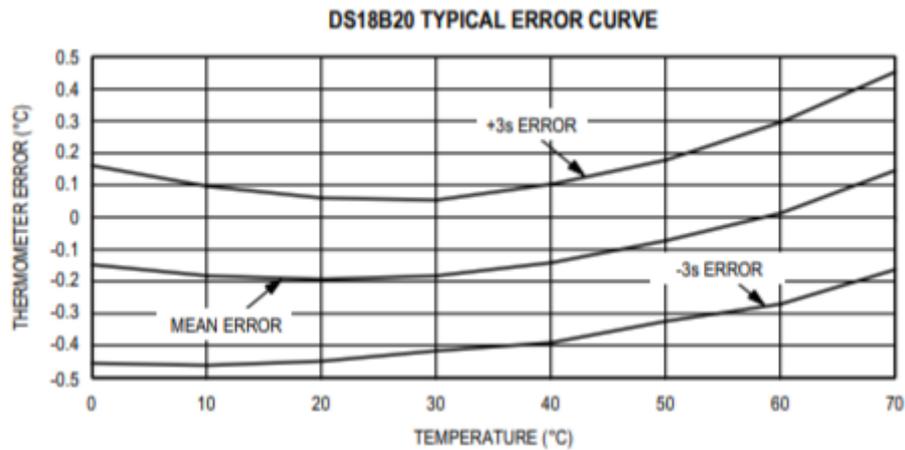


Ilustración 7 Termopar DS18B20

El error de medida del termopar también es bastante bajo haciéndolo una buena opción para el equipo.

Tabla 1 Curva de error termopar DS18B20



Pieza de referencia 1 (frio)

Lo primero fue decidir el tamaño y la forma de las referencias según la normativa estás podían ser en forma de cubo o de cilindro y su tamaño debía ser como máximo de 50 cm de diámetro o 50 cm de lado.

Se eligió la forma cuadrada debido a que de esta forma podría insertarse en su interior la fuente fría que iba a usarse un peltier.

Tras esto se decidió dónde colocar los termopares, el termopar que da a la muestra debía estar lo más cercano posible a este, el segundo debía estar a una distancia máxima de 25 cm del primero y a una distancia de la fuente fría en la que el flujo de calor fuera de constante en toda el área. Debido a que iba a usarse una fuente fría con un área prácticamente del mismo tamaño que la pieza de referencia decidió colocarse justo debajo.

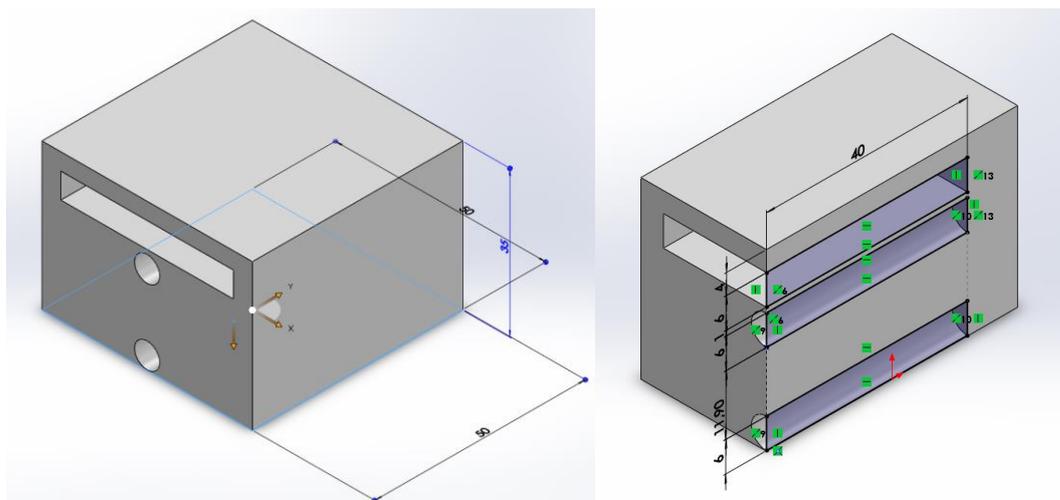


Ilustración 8 Pieza de referencia fría / Plano transversal fuente fría

Pieza de referencia 2 (caliente)

La forma de la segunda referencia debía tener la misma área y tener los termopares a la misma distancia que la primera, la única diferencia se encontraba en que el elemento calentador (resistencia térmica) tenía un área muy inferior a la de la referencia, 8mm respecto a 50mm, por tanto, el primer termopar no podía encontrarse justo debajo de la fuente de calor, este se colocó a 4,5mm de está.

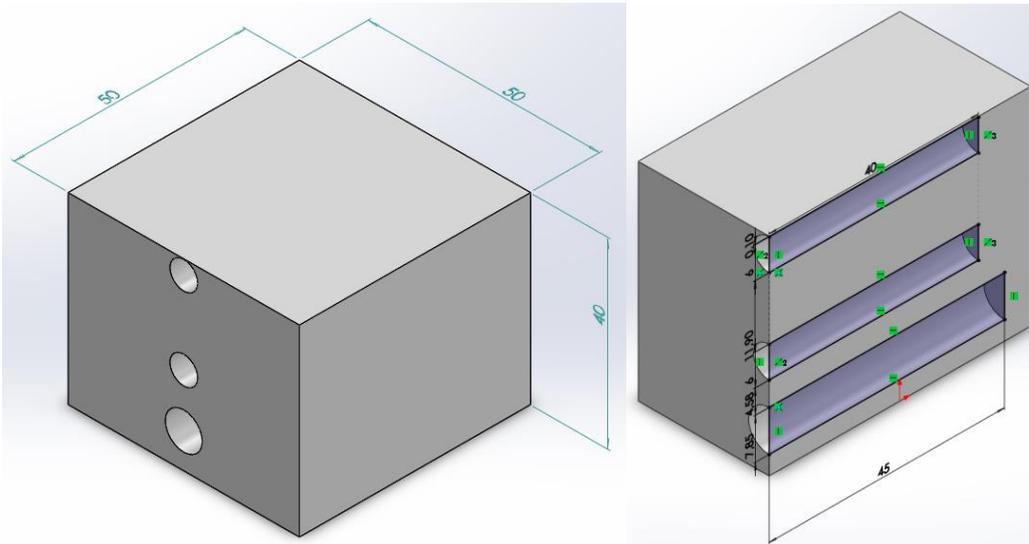


Ilustración 9 Pieza de referencia caliente / Plano transversal fuente caliente

Simulación

Antes de construir el equipo se simuló en Solidworks para comprobar si el equipo funcionaría, cómo distribuir las resistencias y a qué temperatura, además de observar el comportamiento del equipo con diferentes espesores de muestra.

Primero se modelaron las dos piezas de referencia con las mismas dimensiones que el prediseño, además de la pieza que serviría como muestra, esta debía tener la misma área que la referencia y se diseñó con una altura de 25mm, ya que era el máximo espesor que permitía la normativa.

Se modelaron dos carcasas de cemento de arcilla expandida que servirían como aislante para el equipo, sus dimensiones eran del doble respecto a la pieza referencia.

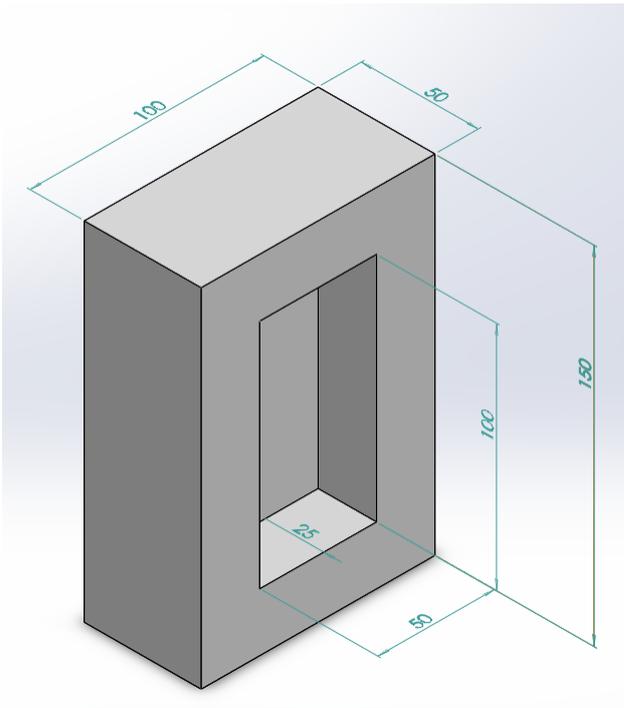


Ilustración 10 Aislante

Se modelaron los 4 termopares de constantán con 6 mm de diámetro y 40 mm de largo que iban a usarse en el equipo para la simulación se modeló solo el termopar obviando su cable de alimentación/salida de datos.

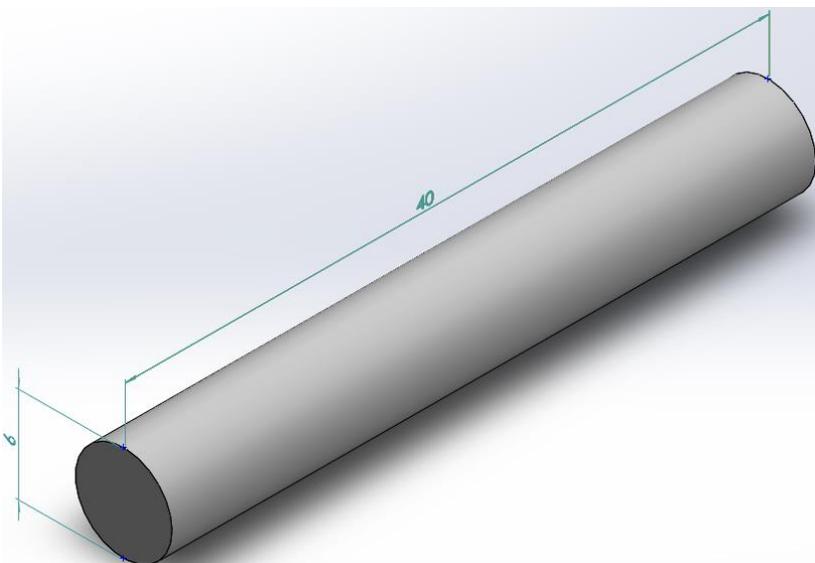


Ilustración 11 Termopar

Y por último se modeló la pieza que serviría como muestra, se hizo usando como material ABS y con la misma área que las referencias 50x50mm y su altura era de 25mm que era la altura máxima que permitía la normativa.

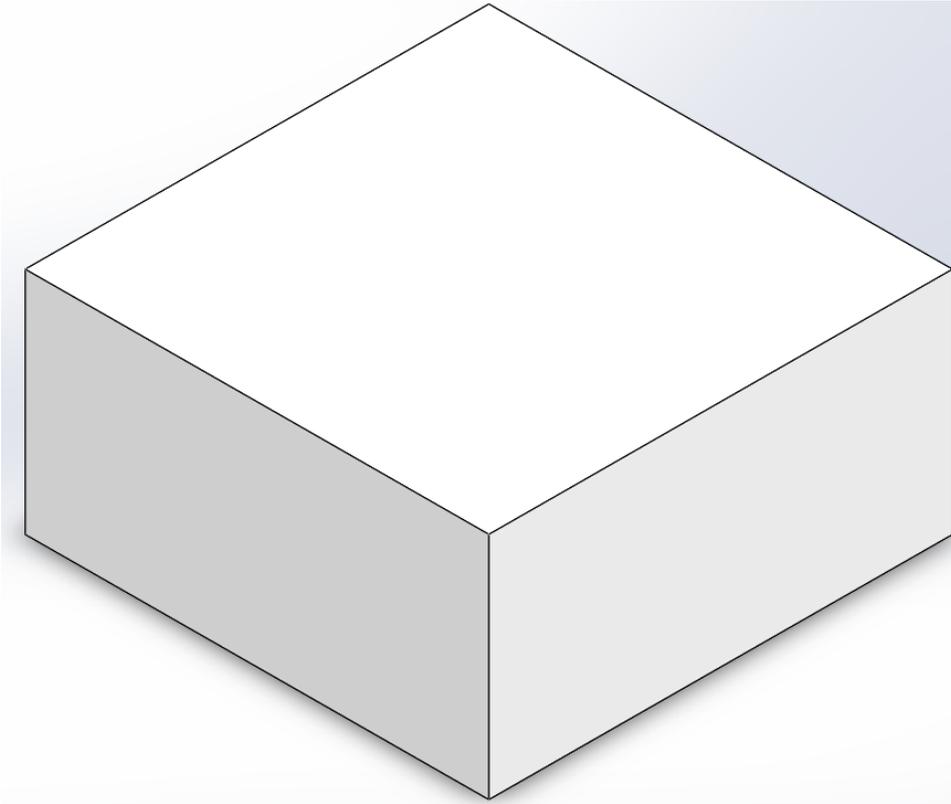


Ilustración 12 Muestra

Una vez se modelaron todas las piezas, (1 y 2) el aislante, (3) la referencia fría con (6) el acople para peltier, (4) la muestra, (5) la referencia caliente con (11) el acople para resistencia térmica y (7-10) los termopares, se realizó una simulación para comprobar si el equipo funcionaría antes de construirlo. Para esto se hizo un análisis térmico con Solidworks.

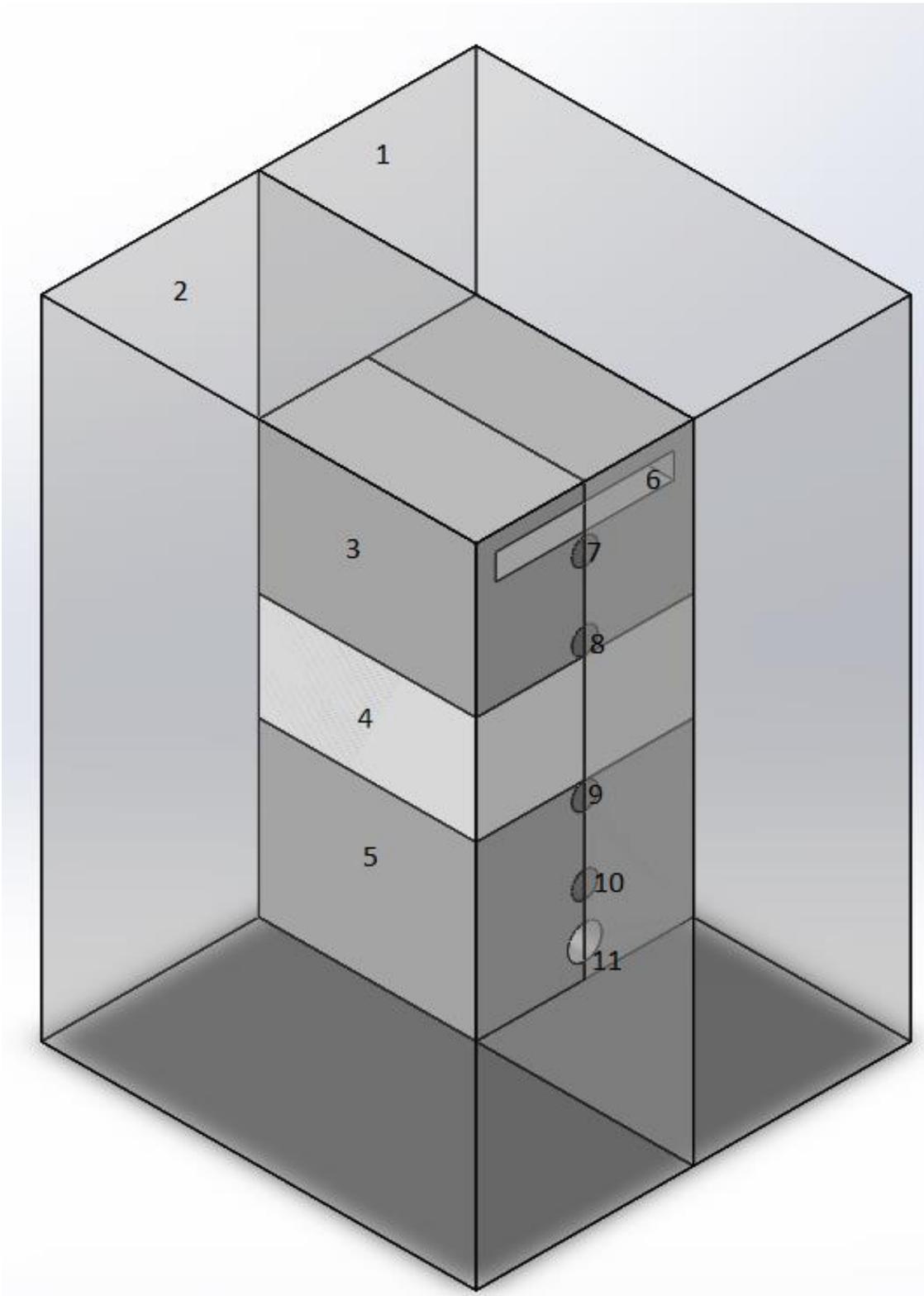


Ilustración 13 Modelado del equipo completo

Para la simulación se decidió que el peltier (6) se encontraría a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatura mínima que puede alcanzar y que la resistencia (11) se encontraría a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lo cual creo en la simulación un flujo de calor que iba de la resistencia al peltier.

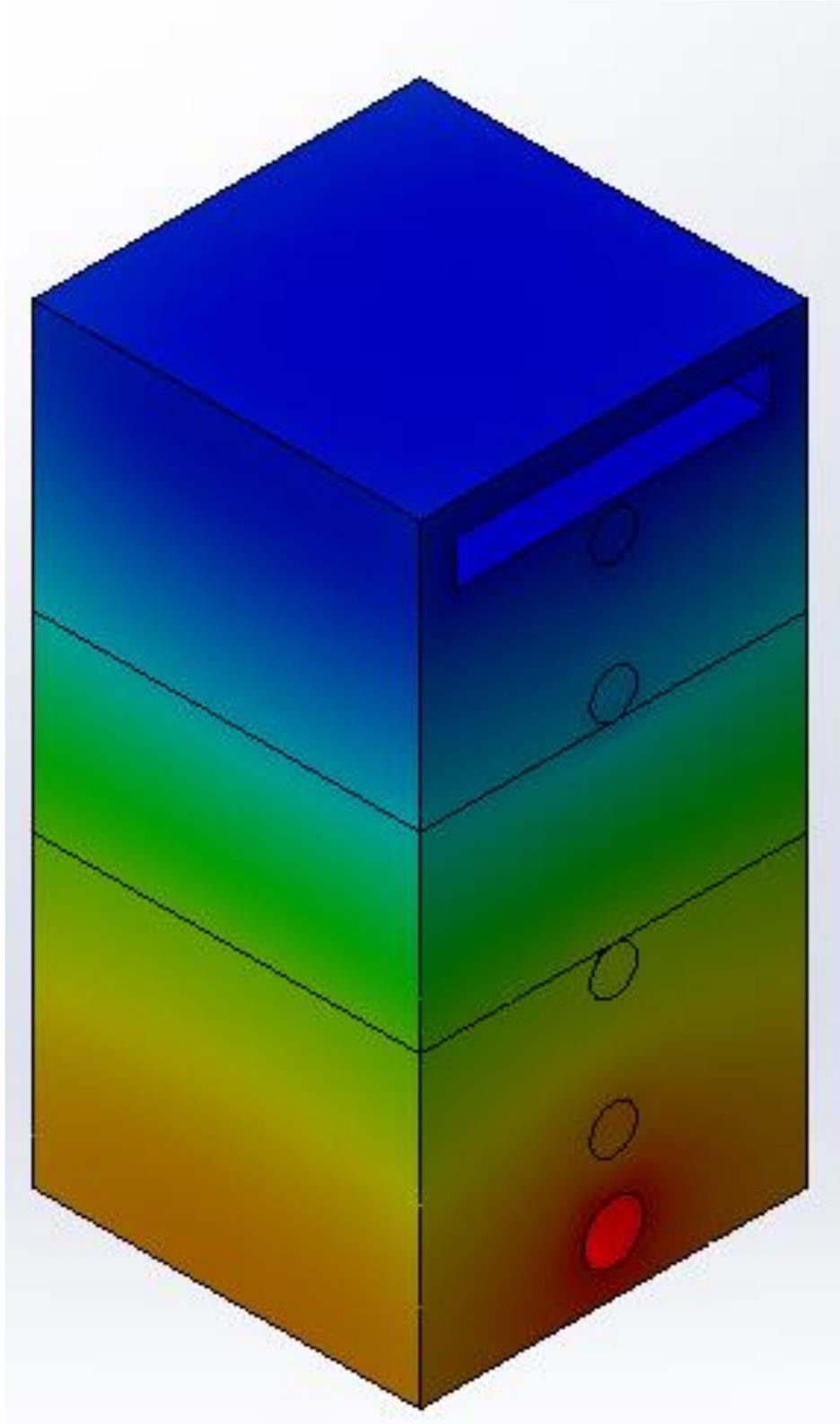


Ilustración 14 Resultado de la simulación térmica

Como puede observarse en la imagen el flujo de calor avanza de forma en planos horizontales de forma casi uniforme por todo el equipo a excepción de la zona de la resistencia térmica, sin embargo, está estabilizada para cuando llega al primer termopar. Para calcular la conductividad térmica de la muestra se usaron las temperaturas a las que se encontraban los termopares de la simulación y la ecuación de Fourier para la conductividad térmica:

$$\lambda_m = \frac{Z_3 - Z_2}{T_3 - T_2} * \left(\frac{\lambda_{r1}(T_2 - T_1)}{2(Z_2 - Z_1)} + \frac{\lambda_{r2}(T_4 - T_3)}{2(Z_4 - Z_3)} \right)$$

Donde:

- λ_m es la conductividad de la muestra en W/m*k
- λ_{r1} es la conductividad de la primera referencia en W/m*k
- λ_{r2} es la conductividad de la segunda referencia en W/m*k
- Z_1 es la posición del termopar de la primera referencia más cercano a la fuente de temperatura en m
- Z_2 es la posición del termopar de la primera referencia más cercano a la muestra en m
- Z_3 es la posición del termopar de la segunda referencia más cercano a la muestra en m
- Z_4 es la posición del termopar de la segunda referencia más cercano a la fuente de temperatura en m
- T_1 es la temperatura del termopar que se encuentra en la posición Z_1 en k
- T_2 es la temperatura del termopar que se encuentra en la posición Z_2 en k
- T_3 es la temperatura del termopar que se encuentra en la posición Z_3 en k
- T_4 es la temperatura del termopar que se encuentra en la posición Z_4 en k

La posición del termopar (Z^*) resulto un problema, ya que el termopar tiene un diámetro de 6 mm y el error en esta medida puede cambiar totalmente medida de la conductividad. Se eligieron dos posiciones posibles desde centro de termopar a centro de termopar y de centro de termopar hasta zona más cercana de la muestra.

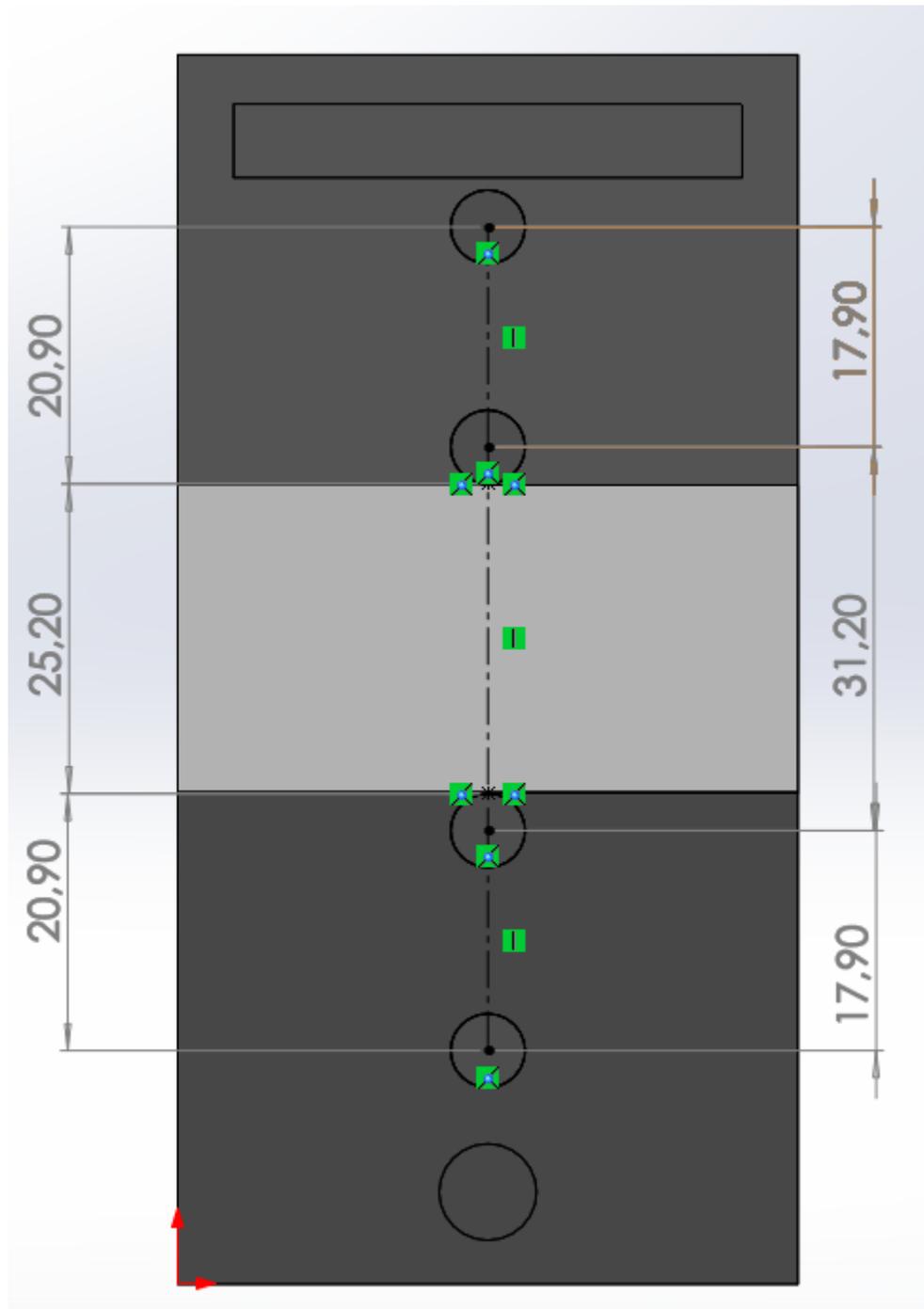


Ilustración 15 Medida de la posición del termopar respecto a los demas termopares

Una vez se tenían todos los datos se calculó la conductividad térmica de la muestra y se comparó con la que se había puesto en el Solidworks. El error que había era del 2,7% cuando la posición era de centro de termopar hasta zona más cercana de la muestra y de 29% de centro de termopar a centro de termopar.

Dado que el error era de 2,7% significaba que el equipo en simulación funcionaba. Tras esto se diseñaron nuevas simulaciones que consistían en cambios en la posición de la fuente de calor y la temperatura a la que se encontraba.

Para esto se decidió cambiar la temperatura a 100 °C, 150 °C y 200 °C y el uso de 1, 2 o 3 resistencias caloríficas.

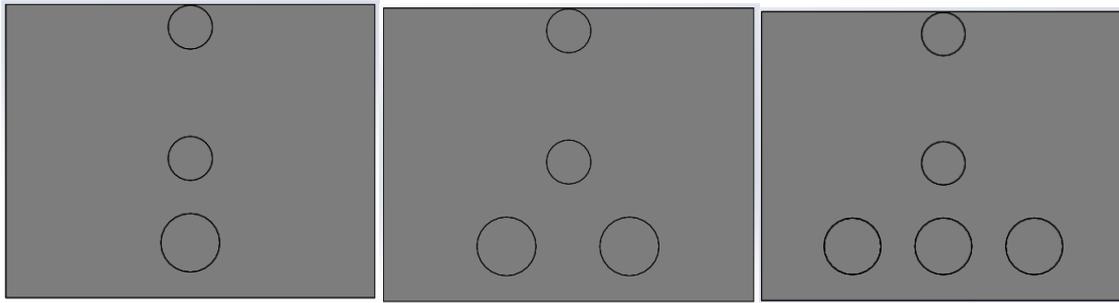


Ilustración 16 Distribución de la resistencia térmica usando 1, 2 o 3 resistencias

Tras simularlo se calculó el error que tenía la conductividad de la muestra respecto a la calculada dando un error de:

Tabla 2 Evolución del error con diferentes configuraciones de la fuente de calor

	1 Resistencia	2 Resistencias	3 Resistencias
100 °C	2,691%	-8,174%	-9,249%
150 °C	-2,700%	-8,304%	-9,424%
200 °C	-2,684%	-8,091%	-9,187%

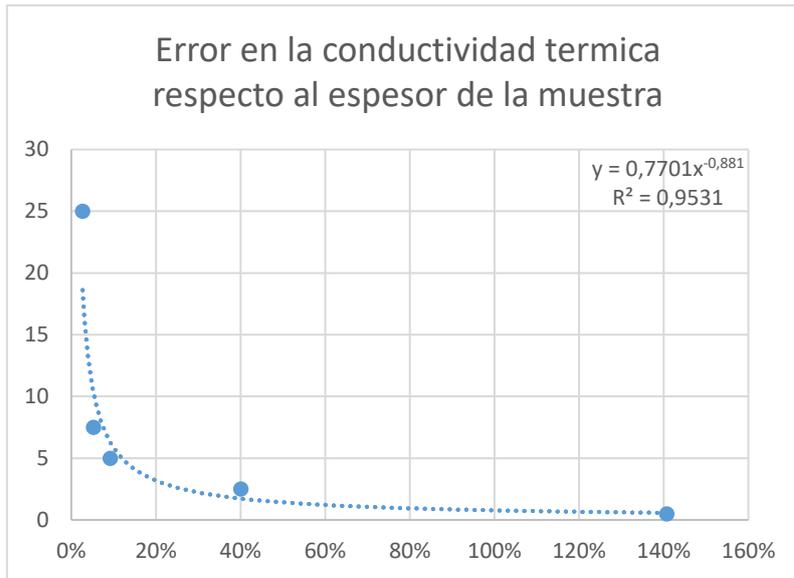
De aquí se pudo concluir dos cosas, el cambio de la temperatura de la fuente caliente apenas afectaba en el error de medida de la conductividad térmica y que el uso de más resistencias térmicas aumentaba el error por lo que se decidió que se usaría una sola resistencia térmica a 100 °C.

Tras esto se presentó otro problema la universidad trabajaba con piezas de muy poco espesor (+0,5mm) por lo que era necesario simular también si el equipo funcionaría con bajos espesores como decía la normativa.

Se izó una primera prueba con 0,5 mm espesor de muestra y el resultado fue un fracaso el error de la conductividad térmica de la muestra había subido de 2,691% a 140%, por lo que se hicieron pruebas con diferentes espesores de muestra para descubrir el origen del aumento del error de la conductividad térmica.

Además de la muestra con espesor de 25 mm y de 0,5 mm, se simulaban muestras de 2,5 mm, 5 mm y 7,5 mm. Con una resistencia térmica a 100 grados.

Gráfica 1 Error en la conductividad térmica respecto al espesor de la muestra



Tras obtener los resultados se puede observar como error aumentaba de forma exponencial al disminuir el espesor de la muestra. Por lo que era necesario de exigir a la muestra un espesor mínimo para que la medida de la conductividad térmica tenga el menor error posible se estimó como aceptable en simulación un error del 5% lo que dejaba un espesor de muestra mínimo de 10mm.

Aislante

Como aislante se decidió usar cemento con arcilla aislante, de esta forma se podía asegurar la posición de las piezas del equipo.

La posibilidad de usar espesores variables provocó un cambio en la forma de ver el aislante, la cavidad de este había pasado de ser fija a variable. Debido a esto la cavidad del aislante paso a ser de horizontal a vertical.

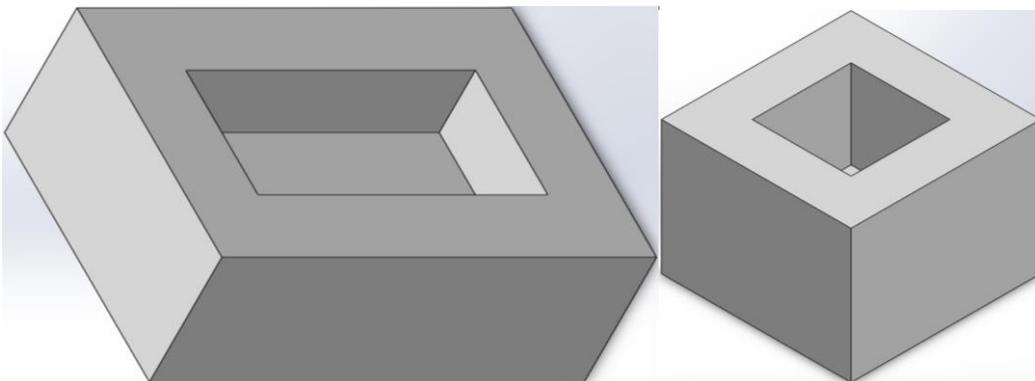


Ilustración 17 Mitad del aislante con corte vertical y con corte horizontal

Se decidió que la parte inferior del aislante contendría la referencia donde está la fuente de calor y en la parte superior la muestra y la referencia donde está la fuente fría.

Hasta ese momento se había usado como espesor el recomendado por la normativa, el doble del espesor de la muestra, se decidió calcular el espesor para que las pérdidas fueran de menos del 5%.

Los cálculos del espesor se basan en la conductividad térmica del sistema de aislamiento y la densidad de flujo deseada, para calcular la densidad de flujo deseada para nuestro equipo se calcula la densidad de flujo que tendrá el equipo en funcionamiento.

$$\varphi = \frac{k}{e} \Delta T$$

Donde:

- ϕ es la densidad de flujo en W/m^2
- k es la conductividad térmica en $W/m \cdot k$
- e es el espesor en m
- ΔT es la diferencia de temperatura entre las dos caras del aislante en k

Para este caso, se ha calculado la densidad del flujo de calor tendría el equipo en funcionamiento sin muestra:

- La conductividad térmica de la referencia es de $0.7 W/m \cdot k$
- El espesor es el doble del de una pieza de referencia $0.07m$
- La temperatura en la zona caliente es de $100^\circ C$
- La temperatura en la zona fría es de $25^\circ C$

$$\varphi_t = \frac{0.7W}{\frac{m \cdot k}{0.07m}} * ((100 + 273)k - (25 + 273)k) = 750W/m^2$$

Se espera que las pérdidas del aislante sean inferiores o iguales al 5%.

$$\varphi_p = \frac{750W}{m^2} * 5\% = 37.5W/m^2$$

Se calcula el espesor del aislante usando:

- La conductividad térmica del aislante es de $0.014 W/m \cdot k$
- La densidad del flujo de calor máxima en pérdidas es de $37.5W/m^2$
- La temperatura máxima en la zona interna es de $100^\circ C$
- La temperatura en la zona exterior es de $25^\circ C$

$$e = \frac{0.014W}{\frac{m \cdot k}{37.5W/m^2}} * ((100 + 273)k - (25 + 273)k) = 0.028m$$

Por tanto, el espesor mínimo de la pared del aislante debe de ser de $28mm$, para mantener las pérdidas del aislante al mínimo.

Además, al aislante requiere de orificios por el que salen los cables de los termopares y las fuentes de calor y fría, en la parte superior del aislante al tener la muestra (con espesor variable) se usó una ranura debido a que los termopares se encontrarían en diferente posición dependiendo del espesor de la muestra.

Construcción

Lo primero que había que construir eran las referencias al tratarse de una pieza solida de gran espesor y de material compuesto se decidió que la mejor forma de fabricarla era por moldeo, por tanto, lo primero que hay que hacer es el molde.

Molde para referencias

Para crear el molde se usó un kilogramo de silicona de condensación ZC 20-120 y 50 gramos de catalizador, que fueron batidos hasta que el catalizador se mezcló completamente con la silicona tras esto se vertió sobre un recipiente con el doble de dimensiones respecto a la pieza que se va a usar como referencia en el que previamente se ha colocado en la parte central una copia de las mismas dimensiones que la pieza referencia, área base 50x50mm altura de 50mm.



Ilustración 18 Molde para piezas de referencias

Pieza de referencia

Una vez tenemos el molde procedemos a hacer las piezas que servirán como referencia para el equipo, en un primer momento se pensó en usar epoxi con fibra de vidrio, pero se cambió por epoxi con alúmina debido a que este compuesto tiene mejores propiedades térmicas, en concreto se usó resina epoxi (resoltech 1050) y una carga mineral (alúmina micronizada T2).

El volumen total de las piezas es de 200 mm^3 , sin embargo, se decidió utilizar 220 mm^3 por si era necesario rectificar la altura. Se requerían 160 gramos de resina y 60 gramos de carga mineral y por cada 100 gramos de resina se necesitan 35 de catalizador.

Por tanto, se usaron 119 gramos de resina y 41 de catalizador, que fueron batidos hasta que la mezcla fue uniforme y en ese momento se puso la carga mineral sin parar de batir hasta que la carga se disolvió en la resina y se vertió dentro del molde.



Ilustración 19 Referencia curándose dentro del molde

Una vez dentro del molde se esperó hasta que la resina curara (alrededor de 1 hora). Esta misma operación se repitió una segunda vez para conseguir la segunda referencia.



Ilustración 20 Referencias ya curadas

Estas piezas requerían de un mecanizado para usarse, requería que todas las caras fueran planas y dos agujeros para poder insertar los termopares.



Ilustración 21 Referencias con agujeros para los termopares

Aislante

Aunque en un primer momento iba a usarse cemento como aislante se decidió cambiar por lana de fibra de vidrio debido a que también tiene buenas propiedades como aislante y se podía remplazar con mayor facilidad en caso de que el prototipo falle y se cambien las dimensiones de las referencias. Primero era necesario construir una carcasa, debido a que la lana de fibra de vidrio no tiene rigidez estructural esta necesita de un recipiente. Por tanto, se diseñó una carcasa para el aislante esta necesitaba de agujeros para los termopares y para la resistencia térmica, el interior de la carcasa debía de tener el tamaño calculado del aislante anteriormente.

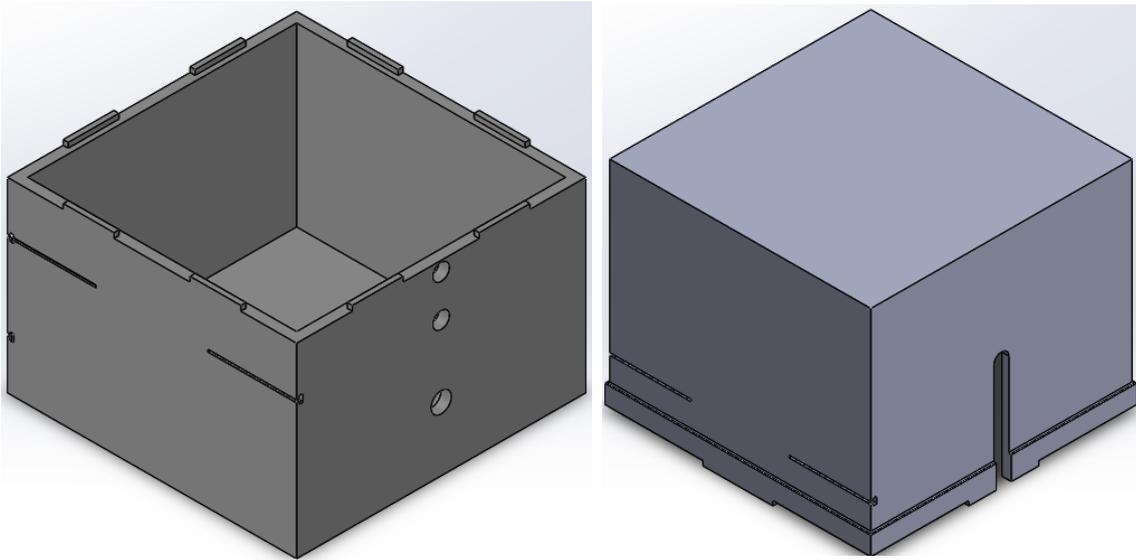


Ilustración 22 Prediseño de las carcasas

Además, se hicieron ranuras en los laterales de las carcasas para la posterior colocación de unos ganchos para amarrar los cables y que no estuvieran sueltos.

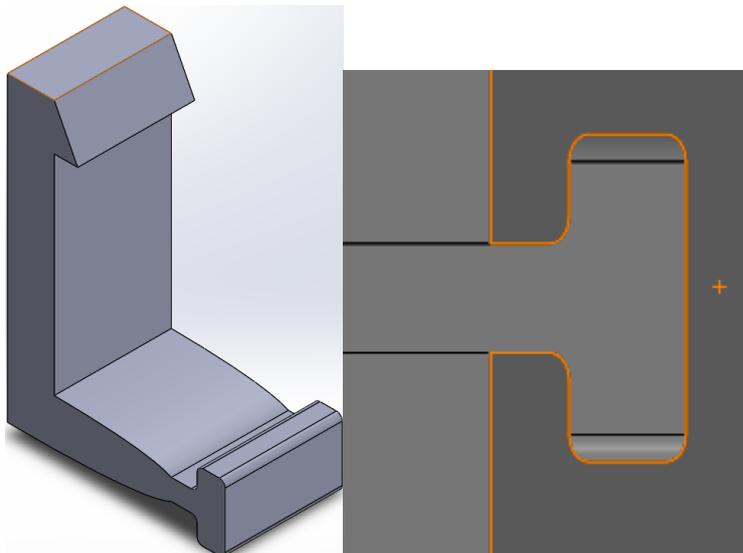


Ilustración 23 Gancho para cables

Una vez diseñada esta se construyó mediante el uso de una impresora 3d usando como material ABS.

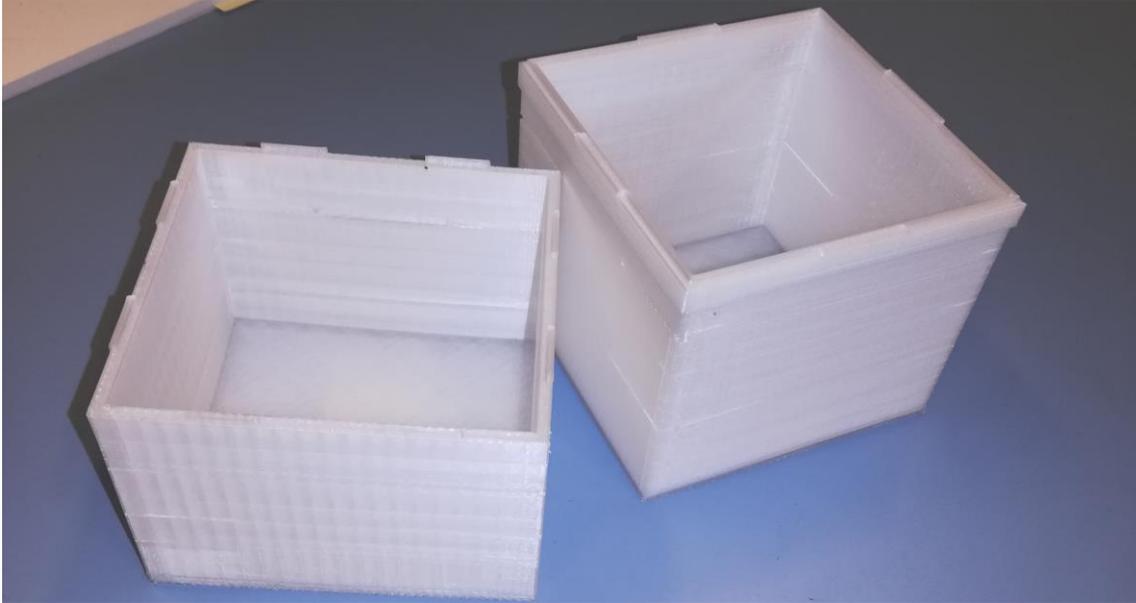


Ilustración 24 Carcasas del aislante construidas

Fuente de calor

Para producir los cien grados de calor necesarios para el flujo de calor se usó una resistencia térmica de cincuenta vatios que funciona doscientos veinte voltios, sin embargo, esta resistencia produce más temperatura de la que necesitamos para el flujo de calor, por tanto, es necesario de un regulador para controlar la temperatura y mantener un flujo constante.

Como regulador y también como fuente de alimentación para la resistencia se usó un termostato ID961I, este cuenta con un cable de alimentación, un termopar para controlar la temperatura de la resistencia térmica, la resistencia térmica y el termostato.



Ilustración 25 Termostato

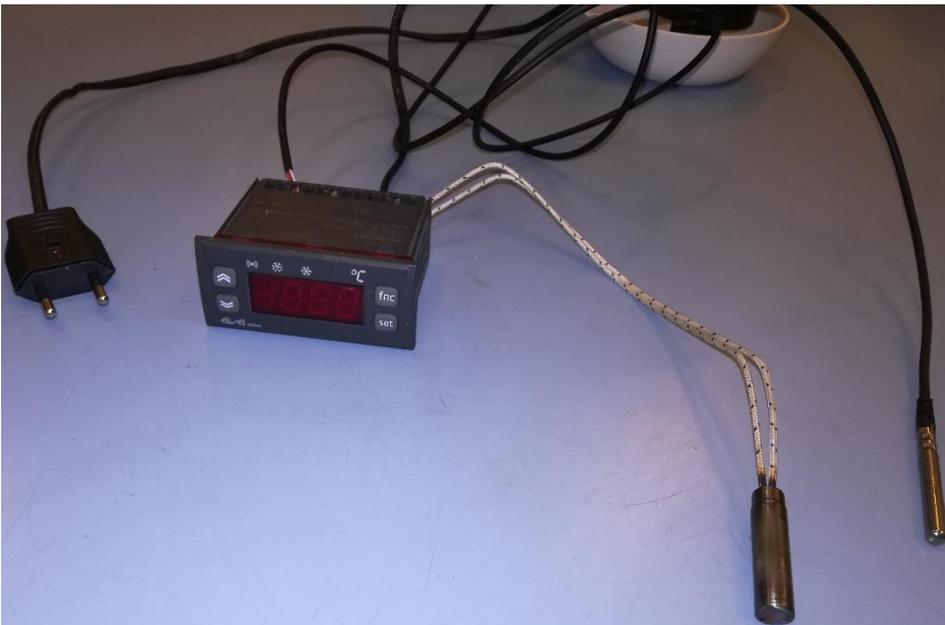


Ilustración 26 Termostato con la resistencia térmica y el termopar que lo controla

El termostato dispone de cuatro botones, arriba y abajo para seleccionar las temperaturas, fnc para observar la temperatura del termopar y set para seleccionar la temperatura que queremos que tenga la resistencia.

Fuente fría

Como fuente fría se decidió usar un peltier con un área ligeramente inferior a la de referencia para que pudiera ser insertado en su interior y que abarcara la mayor área posible para una mejor distribución del calor, sin embargo, en el momento de ponerlo en funcionamiento fue imposible conseguir que alcanzara una temperatura baja por cualquiera de los dos lados, necesitaba de una fuente de alimentación regulable de un alto precio y durante las pruebas dejaban de funcionar sin razón aparente.

Por tanto, se decidió sustituir el peltier por un bloque de aluminio, que haría como peso para mantener todo el equipo en contacto y podía usarse para disipar el calor.

Montaje arduino

Para monitorizar y utilizar todos los datos obtenidos por los termopares se usó un arduino uno, debido a su bajo precio y a que este cuenta con conexión USB facilitando el envío de datos a un ordenador.

Para el montaje, además del arduino uno se usó una placa de pruebas, una resistencia de $4,7 \Omega$ y cables puente.

Primero conectamos el pin de 5V del arduino a la placa de pruebas de aquí se conectará a todos los cables de alimentación de los termopares (cable rojo) y a la resistencia de $4,7 \Omega$ en paralelo, al otro extremo de la resistencia se conectará a uno de los pines digitales del arduino y en paralelo a los cables de datos de los termopares (cable azul) y por último se conectarán los cables de salida del termopar (cable negro) en paralelo al GND del arduino.

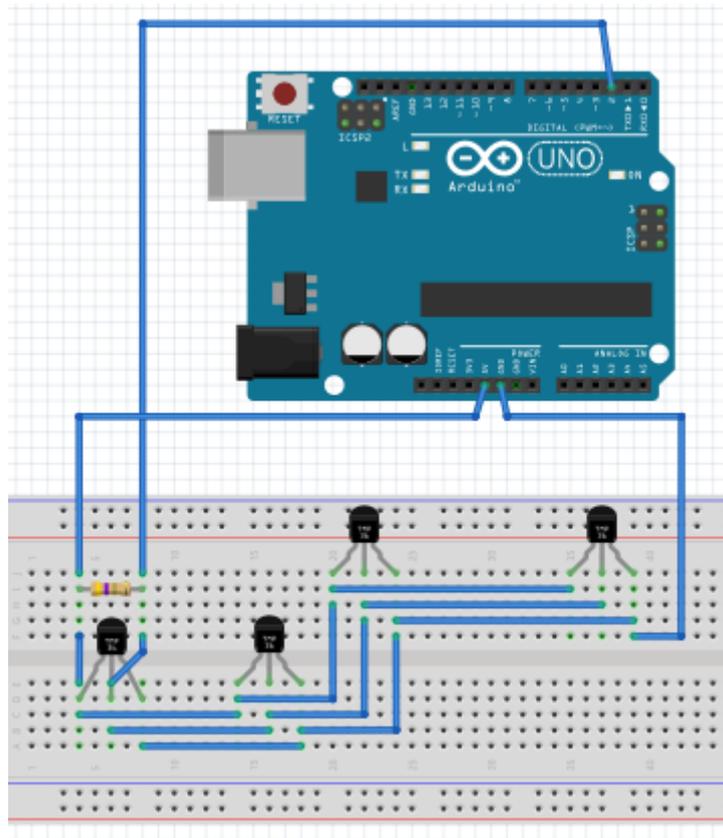


Ilustración 27 Montaje del arduino y los termopares

Programación

Para interactuar con los datos obtenidos por los termopares lo primero era programar el arduino. Debido al uso de cuatro termopares se necesitó primero programar un programa de arduino para obtener la dirección del dispositivo, un programa de arduino para leer los datos y enviarlos al ordenador y un programa de ordenador que sirviera como interfaz gráfica para simplificar su uso a futuros usuarios.

Arduino obtener direcciones de termopares

Empezamos añadiendo las librerías que van a usarse en este programa;

- OneWire.h, esta librería permite leer varios sensores de un mismo pin del arduino.
- DallasTemperature.h, esta librería sirve para interactuar con los sensores de temperatura DS18B20.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Una vez añadidas las librerías se define el pin que se va a utilizar.

```
#define ONE_WIRE_BUS 2
```

Antes de programar los void;

- Comunicamos los dispositivos conectados `OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);`
- Indicamos el pin asignado al sensor a DallasTemperature `DallasTemperature sensores(&oneWire);`
- Creamos una array donde almacenaremos las direcciones de los sensores `DeviceAddress Sensor;`

```
void setup(void)
```

Indicamos la velocidad serial, iniciamos los sensores y creamos una comprobación para asegurarnos de que los sensores están conectados.

```
{  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.println("Comprobación Direccion Sensores DS18B20:");  
  sensores.begin();  
  
  if (!sensores.getAddress(Sensor, 0))  
    Serial.println("Imposible encontrar direccion del sensor.");  
}
```

Tras esto creamos una función para que muestre la dirección del sensor en hexadecimal.

```
void Mostrar_Direccion(DeviceAddress direccion)  
{  
  for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)  
  {  
    if (direccion[i] < 16) Serial.print("0");  
    Serial.print(direccion[i], HEX);  
  }  
}
```

```
void loop(void)
```

Por último, mostramos la dirección de los sensores y le añadimos un retardo entre mediciones para no sobrecargar el arduino.

```
{  
  Serial.print("Direccion del sensor: ");  
  Mostrar_Direccion(Sensor);  
  Serial.println();  
  delay(1000);  
}
```

Tras eso se subió el programa al arduino y se ejecutó para cada termopar obteniendo las direcciones de cada sensor.

```
Comprobación Direccion Sensores DS18B20:  
Direccion del sensor: 28FF9520631704FF
```

Arduino programa

Una vez conocidas las direcciones de los termopares podemos empezar con el verdadero programa, este empieza añadiendo las bibliotecas OneWire.h y DallasTemperature.h, definiendo el pin que se va a utilizar, el pin dos, comunicando los dispositivos conectados e indicamos el pin asignado al sensor a DallasTemperature. Por último, necesitaremos definir las variables que usaremos en el programa:

- Las direcciones de los sensores:

```
DeviceAddress S1 = {0x28, 0xFF, 0x95, 0x20, 0x63, 0x17, 0x04, 0xFF}; //Sensor 1  
DeviceAddress S2 = {0x28, 0xFF, 0xEB, 0x2C, 0x62, 0x17, 0x04, 0x89}; //Sensor 2  
DeviceAddress S3 = {0x28, 0xFF, 0x9D, 0x4B, 0x62, 0x17, 0x04, 0x6E}; //Sensor 3  
DeviceAddress S4 = {0x28, 0xFF, 0xD3, 0x17, 0x62, 0x17, 0x04, 0xEF}; //Sensor 4
```

- Las temperaturas `double a1, a2, a3, a4;`
- Un texto que se usara para enviar las temperaturas a otro programa
`String TextForSms ;`
- Dos arrays que almacenaran los datos de temperatura `float Puente;`
`float miArray[4];`
- Definir "i" como cero para resetear un bucle for `int i = 0;`

```
void setup(void)
```

Indicamos la velocidad serial e iniciamos los sensores.

```
{  
  Serial.begin(9600);  
  sensores.begin();  
}
```

Creamos un bucle con las direcciones para transformar los datos del sensor en una array y transformamos los datos de la temperatura en grados centígrados obteniendo una array de temperaturas.

```
void Mostrar_Direccion(DeviceAddress direccion)
{
  for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
  {
    if (direccion[i] < 16)

      direccion[i], HEX;
  }
}

void Mostrar_Temperatura(DeviceAddress direccion)
{
  float tempC = sensores.getTempC(direccion);
  Puente = tempC;
  miArray [i] = Puente;
  i++;
}
```

La última parte del void setup es obtener las direcciones y la temperatura.

```
void Mostrar_Datos(DeviceAddress direccion)
{
  Mostrar_Direccion(direccion);
  Mostrar_Temperatura(direccion);
}

void loop(void)
```

Establecemos la resolución para cada sensor, indicamos que queremos la temperatura en decimal y sacamos las temperaturas.

```
sensores.setResolution(S1, 11); //Resolucion a 9 bits 0.50 °C
sensores.setResolution(S2, 11); //Resolucion a 9 bits 0.50 °C
sensores.setResolution(S3, 11); //Resolucion a 10 bits 0.25 °C
sensores.setResolution(S4, 11); //Resolucion a 11 bits 0.125 °C

sensores.getResolution(S1), DEC;
sensores.getResolution(S2), DEC;
sensores.getResolution(S3), DEC;
sensores.getResolution(S4), DEC;

sensores.requestTemperatures();
```

Asignamos a cada valor de la array una variable

```
a1 = miArray [0];  
a2 = miArray [1];  
a3 = miArray [2];  
a4 = miArray [3];
```

Creamos un texto que tenga todas las temperaturas separadas por comas, pedimos que lo imprima en la pantalla y que lo borre.

```
TextForSms = TextForSms + a1 + "," + a2 + "," + a3 + "," + a4 + ",";  
Serial.println(TextForSms);  
TextForSms = "";
```

Por último, le ponemos un retardo de dos segundos.

```
delay(2000);
```

Dando como resultado:

```
24.13,24.50,24.25,24.38,
```

Visual Studio

Debido a que era difícil hacer un seguimiento de los datos e interactuar con ellos en arduino se decidió crear una aplicación de ordenador para facilitar su lectura de datos.

Esta cuenta con un serialport y un timer que no se verán en la aplicación, dos botones para conectar y desconectar la lectura de datos, varias casillas donde podemos introducir el espesor de la muestra y las conductividades térmicas de las referencias, y leer todas las temperaturas leídas y la conductividad térmica de la muestra.

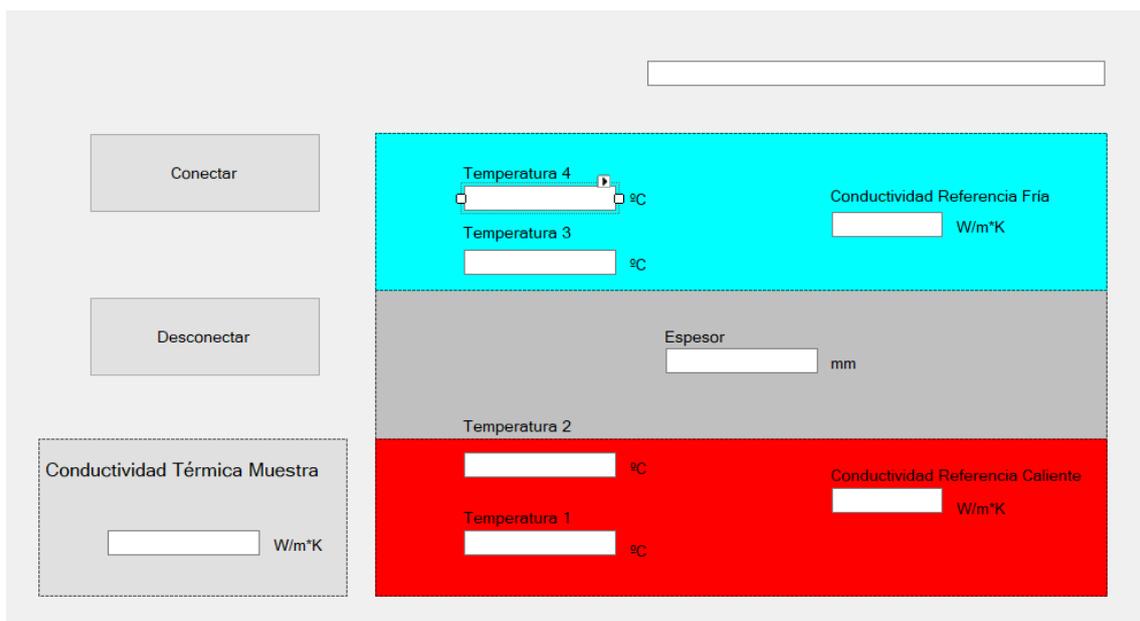


Ilustración 28 Interfaz Visual Studio

Una vez tenemos la interfaz del programa procedemos a realizar la programación del programa, empezamos añadiendo librerías, System.IO y System.IO.Ports sirven para interactuar con los datos leídos por el arduino.

```
Imports System.IO
Imports System.IO.Ports
```

Se definen todas las variables que van a utilizarse como decimal.

```
Dim value1 As Decimal
Dim value2 As Decimal
Dim value3 As Decimal
Dim value4 As Decimal
Dim value5 As Decimal
Dim value6 As Decimal
Dim value7 As Decimal
Dim value8 As Decimal
```

Una vez tenemos las variables configuramos los botones de conexión y desconexión;

- Conexión, en el boton de conexión se configura el puerto; donde se encuentra el arduino, la velocidad de lectura de datos, la cantidad de datos leídos, establecemos el protocolo de comprobación de la paridad, el numero de bits de parada por byte, establecemos el protocolo de enlace para la transmisión de datos a través del puerto serie desde Handshake y establecemos la codificación de bytes para la conversión de texto previa y posterior a la transmisión.
- Una vez configurado el puerto se inicia la conexión al puerto y se inicia el timer.

```
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1.Click

    SerialPort1.PortName = "com3"
    SerialPort1.BaudRate = "9600"
    SerialPort1.DataBits = 8
    SerialPort1.Parity = Parity.None
    SerialPort1.StopBits = StopBits.One
    SerialPort1.Handshake = Handshake.None
    SerialPort1.Encoding = System.Text.Encoding.Default

    If SerialPort1.IsOpen Then
    Else
        Try
            SerialPort1.Open()
        Catch ex As Exception

        End Try
        Timer1.Start()

        Button1.Enabled = False
        Button2.Enabled = True

    End If

End Sub
```

- Desconexión, se detienen la conexión al puerto y el timer.

```

0 references
Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button2.Click

    Button1.Enabled = True
    Button2.Enabled = False

    Timer1.Stop()
    SerialPort1.Close()

End Sub
    
```

Programación del timer, dentro del timer se usarán los datos obtenidos por el arduino estos se leen como una frase, no como números, por lo que estos datos se transforman en una array, cada valor del array está separado por las comas introducidas en el programa del arduino.

Tras crear la array se introduce cada valor de temperatura en su casilla correspondiente de la interfaz, se transforma el valor en decimal y se le asigna una variable a cada una de las temperaturas.

```

Private Sub Timer1_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Timer1.Tick
    Dim s As String

    s = TextBox1.Text + "," + "," + "," + "," + ","

    Dim somestring() As String

    somestring = s.Split(New Char() {"","c"})

    TextBox2.Text = somestring(0)
    Try
        value1 = Convert.ToDecimal(TextBox2.Text)
    Catch ex As Exception
        TextBox1.Text = ""
    End Try
    
```

Para cada una de las casillas de introducción de datos se transforman decimales y se les asigna una variable.

```

Try
    value5 = Convert.ToDouble(TextBox6.Text)
Catch ex As Exception
    TextBox1.Text = ""
End Try
    
```

Por último, en el timer, se introduce la ecuación de Fourier con los datos obtenidos y se le asigna su casilla.

```

TextBox7.Text = (((value5 / 1000) + 0.0002) / (value3 - value2)) * (((value7 * (value2 - value1)) / (2 * (0.0185))) + (value8 * (value4 - value3)) / 2 * (0.0195)))
Try
    value6 = Convert.ToDecimal(TextBox7.Text)
Catch ex As Exception
    TextBox1.Text = ""
End Try
    
```

Por último, se leen los datos del arduino y se les asigna la casilla que previamente sea usado en el timer.

```
Private Sub DataReceived(ByVal sender As Object, ByVal e As SerialDataReceivedEventArgs) Handles SerialPort1.DataReceived
    Try
        Dim mydata As String = ""
        mydata = SerialPort1.ReadExisting()

        If TextBox1.InvokeRequired Then
            TextBox1.Invoke(DirectCast(Sub() TextBox1.Text &= mydata, MethodInvoker))
        Else
            TextBox1.Text &= mydata
        End If
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show(ex.Message)
    End Try
End Sub
```

Prototipo

Una vez se construyeron y llegaron todas las piezas se empezó con el montaje. Debido a que la pieza de referencia había perdido espesor durante su construcción, la fuente caliente ya no podía acoplarse conforme al diseño inicial, se decidió que ambas referencias dejarían de albergar las fuentes de calor en su interior, y que ahora se encontrarían en una pieza metálica aparte con la misma disposición que la del diseño inicial. Al mismo tiempo por un fallo en los peltier se decidió prescindir de la fuente fría debido a que la fuente caliente por si sola ya generaba un flujo de calor ascendente y de esta manera se abarataban los costes.



Ilustración 29 Interior del equipo sin aislante

Se perforaron las carcasas del aislante para que pudieran entrar los cables dentro del sistema, se colocó la pieza de aluminio que albergaría la resistencia térmica y el termopar del termostato, se colocó la referencia, se colocaron los termopares y la resistencia, y se rellenó todo con lana con fibra de vidrio.



Ilustración 30 Equipo completo

Se realizaron varias pruebas con este prototipo, dando como resultado unas conductividades térmicas muy diferentes de las esperadas, por ejemplo, se usó una muestra de contrachapado con conductividad térmica de $0,32 \text{ W/m}^{\circ}\text{k}$ y daba como resultado $0,15 \text{ W/m}^{\circ}\text{k}$ alcanzando más de un cien por cien de error.

Prototipo 2

Debido al elevado error del primer prototipo era necesario buscar porque se producía el error y corregirlo. Se pensaron varias causas que podían estar provocando este error:

- Diferencia de temperatura entre la fuente fría y la caliente insuficiente; en alguna de las pruebas el flujo de calor no llegaba hasta el último termopar de la referencia fría provocando que no todo el sistema funcionara con el mismo flujo.
 - Esto se solucionó disminuyendo el espesor de la muestra.
- Posibilidad de que las piezas no estuvieran en contacto; debido a que no había forma de asegurar la posición de la muestra respecto a las dos referencias.
 - Se podría colocar una pieza de aluminio que sobresaliera por la zona superior y hacer circular agua fría por el interior para que actuara como fuente fría. No se llevó a cabo porque este cambio significaba agujerear la carcasa y habría supuesto un cambio irreversible
- Posibilidad que las piezas no estuvieran centradas; misma razón anterior.
 - Aumentar la rigidez del aislante esto podría conseguirse usando otro material como aislante con la misma conductividad térmica que aportara mayor rigidez a la estructura.

Se decidió mantener como aislante la lana con fibra de vidrio, pero, se le añadieron unas columnas de poliestireno expandido con un espesor de 9 mm por 30 mm, el espesor de las

columnas era ligeramente superior al de la pared del aislante, de 28 mm a 30 mm, porque de esta manera actuaba como una abrazadera manteniendo centrado el sistema.

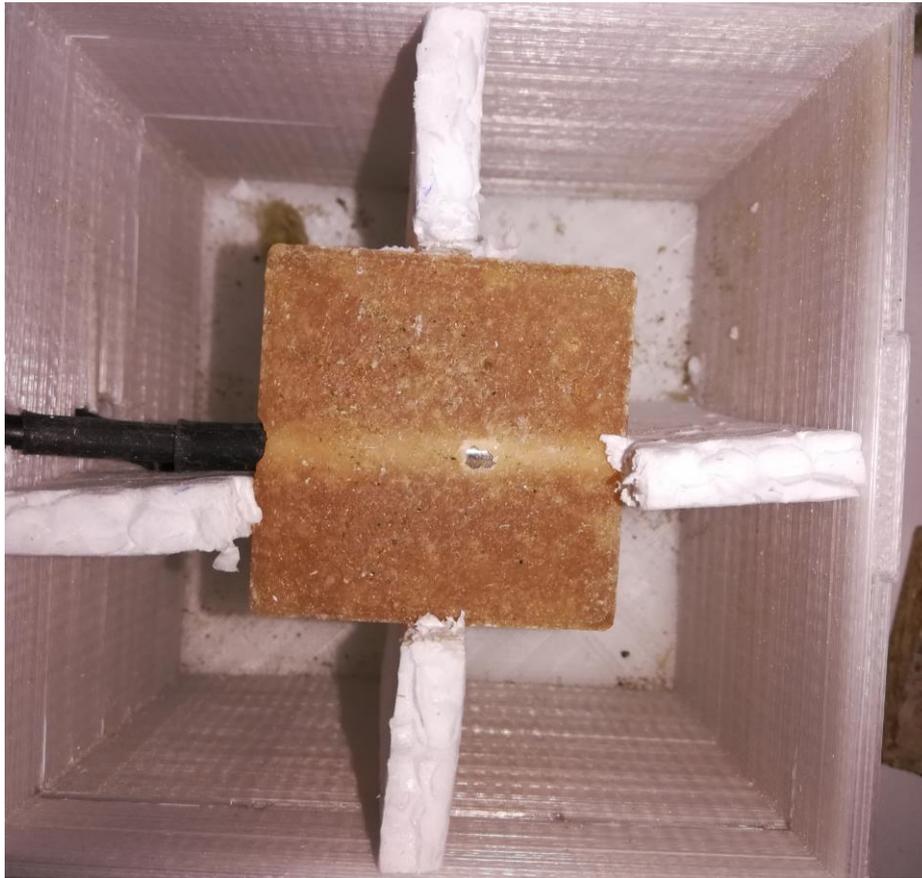


Ilustración 31 Pilares de poliestireno expandido centrando la referencia fría

Una vez colocadas las columnas y la referenciase volvió a rellenar con lana con fibra de vidrio.

En la zona caliente no se podían poner columnas de poliestireno expandido debido a que en la mayor parte de la zona las temperaturas son superiores al punto de transición vítrea de este del aislante con lana con fibra de vidrio y para centrar la referencia se usaron vigas de poliestireno expandido en la parte superior de la zona caliente que en los ensayos anteriores tendía a estar a unos 60°C.



Ilustración 32 Vigas de poliestireno expandido centrando la referencia caliente

De esta manera las referencias y la muestra estaban perfectamente alineadas y podía asegurarse el contacto con la referencia fría, se volvieron a realizar ensayos y esta vez el error había disminuido de él 100% de error del primer prototipo, a un 20% en el segundo.

Se decidió probar el equipo con una muestra con conductividad alta, aluminio, para probar si el equipo estaba dando bien el resultado de la conductividad térmica, debido a que los materiales usados como muestras no tenían un valor de conductividad concreto sino un intervalo existía la posibilidad de que el valor que daba el ensayo no fuera el correcto. Sin embargo, al ejecutar el experimento se descubrió que algo iba mal.



Ilustración 33 resultado del ensayo con aluminio

La conductividad térmica que daba como resultado era de 0,5 W/m*K respecto a los 238 W/m*K. Para comprobar si la causa del error era causada por la falta de contacto muestra-referencias se abrió el equipo y se comprobó que todo estaba en contacto, sin embargo, se descubrió que el termopar y la superficie de referencia cálida estaban a diferentes temperaturas por lo que no medía la temperatura de la superficie superior de la referencia, sino que medía la temperatura del primer contacto don el termopar 6 mm más abajo, se dedujo que ese era el verdadero problema del equipo.

Prototipo 3

Para solucionar el problema de los termopares y la temperatura del punto que deberían estar midiendo se encontraron dos soluciones:

- Cambiar los termopares por otros de menor diámetro; esta solución no se llevó a cabo debido a que el cambio de los termopares también significaba un cambio en el diámetro de las perforaciones de las referencias, obligando a reconstruirlas y a buscar otros termopares de un tamaño de 1 mm o inferior que tuvieran el mismo rango de temperaturas, incrementando el coste del equipo.
- Cambiar el material de las referencias por uno con una conductividad igual o superior al termopar; al aumentar la conductividad térmica de la referencia facilitamos el flujo de calor por el sistema, disminuimos el error por flujo de calor lateral y el flujo de calor por el termopar es más similar al de la referencia provocando que el error de medida del termopar sea inferior, sin embargo para esta solución también era necesario reconstruir las referencias y el material dejaba de ser óptimo para medir bajas conductividades, según normativa.

Se decidió usar como nuevo material para las referencias aluminio debido a su alta conductividad térmica y a su disponibilidad en la universidad.

Al mismo tiempo se cambió el diseño de las referencias, al eliminar la fuente fría y usar de fuente caliente una resistencia térmica dentro de una placa de aluminio que ya teníamos construidas ya no era necesario de un área entre la fuente caliente y el primer termopar, debido a que el flujo de calor ya es uniforme a la llegada de la referencia, por lo que esta vez ambas perforaciones para los termopares estarán pegadas a ambas superficies de las referencias. Además, las referencias pasaron a ser cilindros debido a disponibilidad de cilindros de estas dimensiones en la universidad.

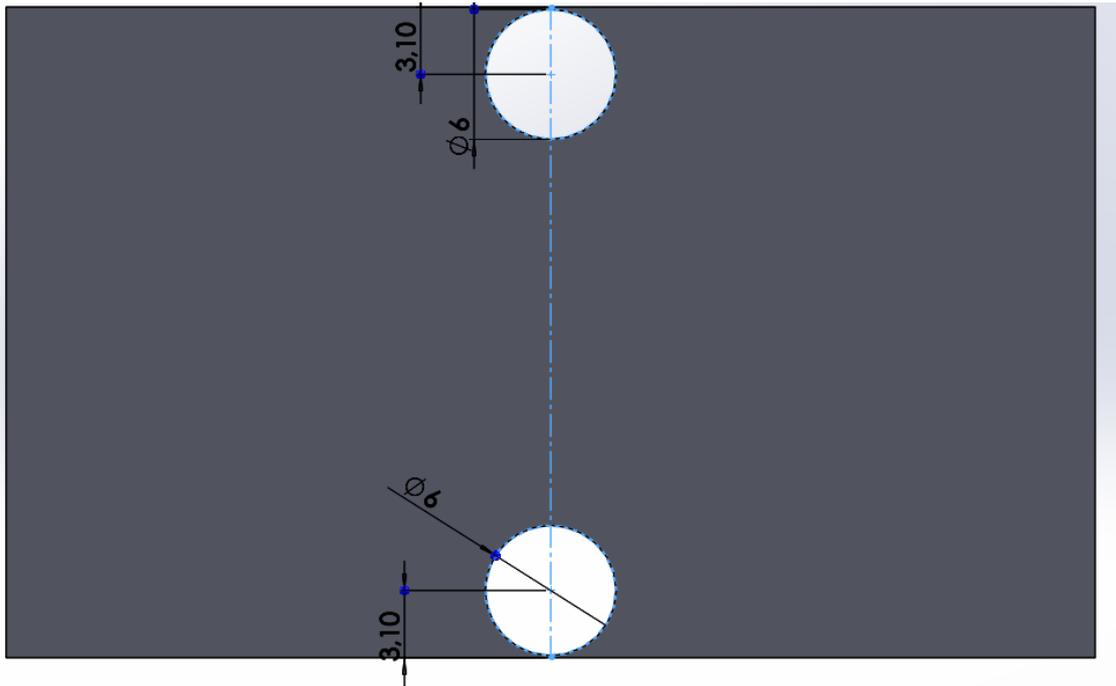


Ilustración 34 Esquema de las referencias de aluminio

Las nuevas referencias eran de $\varnothing 50 \times 34$ mm con dos perforaciones pasantes de un diámetro de 6 mm colocadas pegadas a la superficie. La altura había disminuido 5 mm debido a que ya no era necesaria la distancia entre la fuente de calor y el primer termopar y el espacio entre termopares había aumentado para que la referencia caliente siguiera estando a la misma altura y que existiera mayor espacio entre las lecturas de datos para que no fueran demasiado similares.

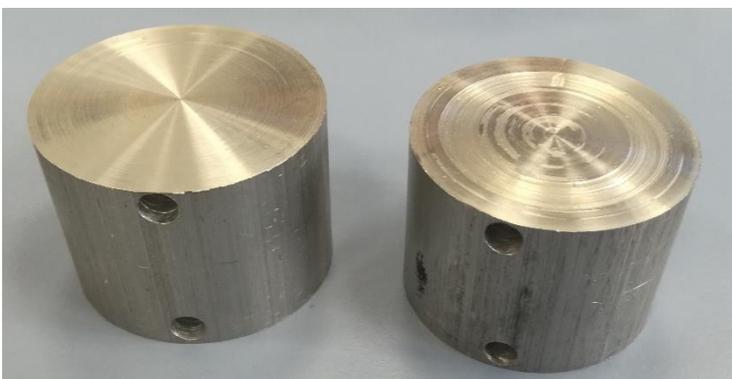


Ilustración 35 Referencias de aluminio

Al lanzar el ensayo usando como muestra aluminio se comprobó que aún seguía habiendo un error en el prototipo, la diferencia de temperaturas entre el punto 2 y 3 debería ser de inferior del obtenido, este error era debido seguramente al contacto entre superficies referencia-muestra.



Ilustración 36 Resultados con prototipo 3

Prototipo 3.1

Al contacto entre superficies referencia-muestra se le añadió grasa de silicona para evitar que se pudiera encontrar aire en el contacto. La diferencia de temperaturas paso de $\Delta 25^{\circ}\text{C}$ a $\Delta 9^{\circ}\text{C}$, por lo que esta grasa provocó una mejora en la conductividad de los contactos.



Ilustración 37 Resultados con prototipo 3 con grasa de silicona

Sin embargo, el uso de esta grasa también podía estar provocando pérdidas de calor por lo que se decidió cambiar la grasa de silicona a pasta térmica.

Prototipo 3.2

Con el uso de la pasta térmica se pudo apreciar otra mejora la diferencia de temperaturas paso de $\Delta 9^{\circ}\text{C}$ a $\Delta 3^{\circ}\text{C}$, el valor de la conductividad térmica de la muestra aún no era el correcto, sin embargo, este error se consideró como parte del equipo y se procedió a realizar una curva de calibración.

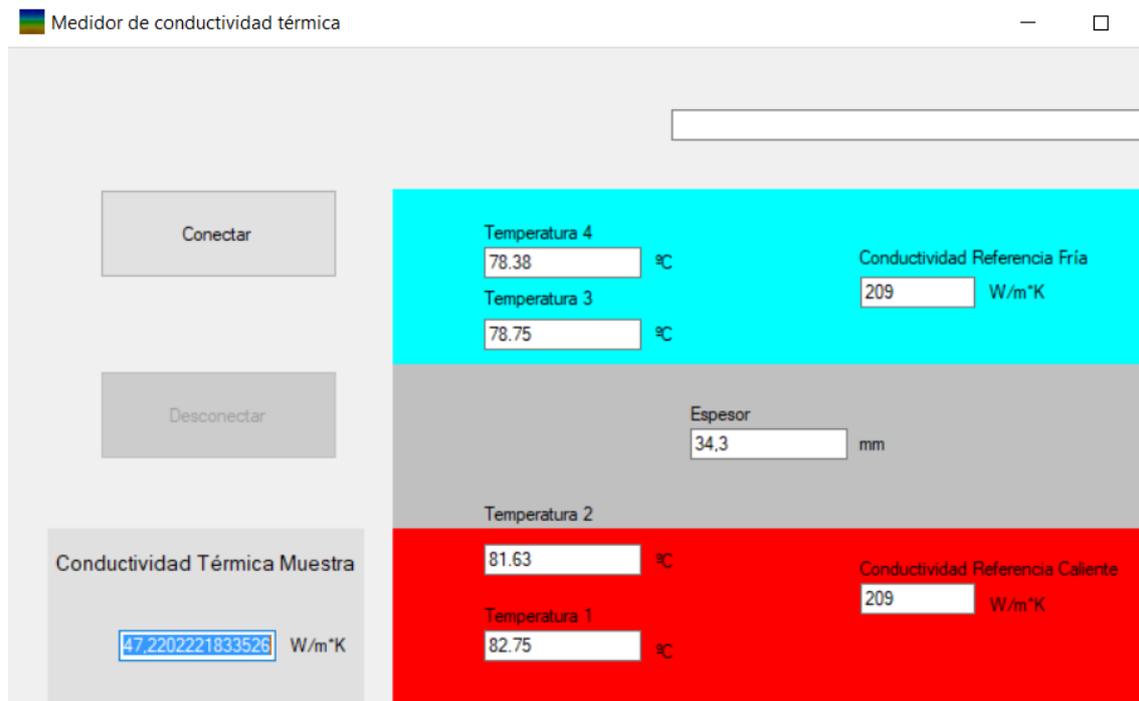
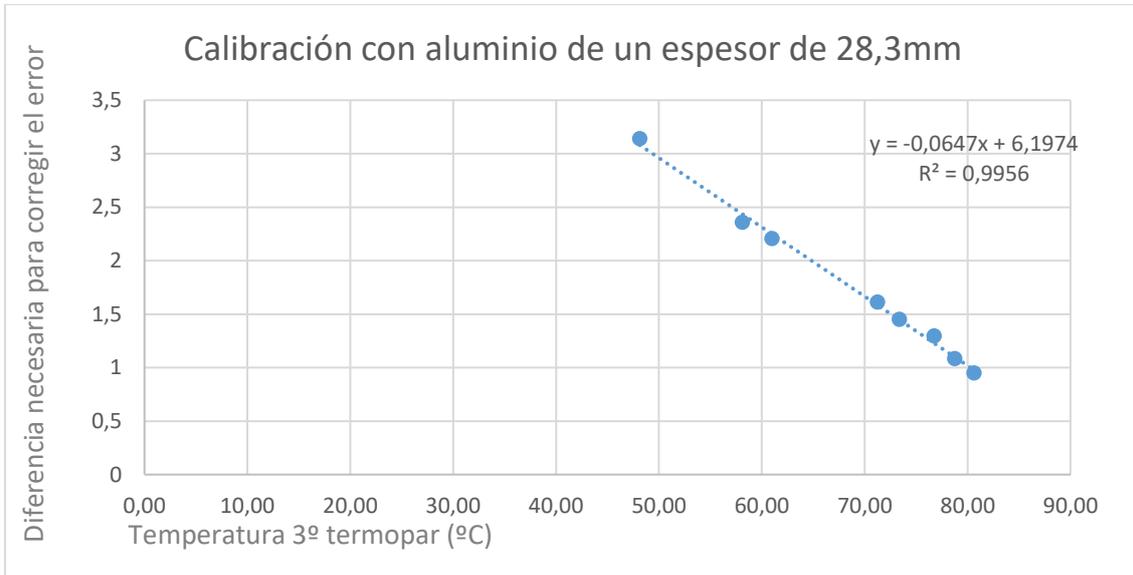


Ilustración 38 Resultados con prototipo 3 con pasta térmica

Calibración del equipo

Al realizarse el ensayo con la pasta térmica se registraron los datos varias veces y con esos datos se calculó cual era la diferencia de temperatura que necesitaba el equipo para dar con la conductividad térmica correcta y de esta manera calibrar el equipo.

Gráfica 2 Calibración del equipo usando aluminio con un espesor de 28,3mm

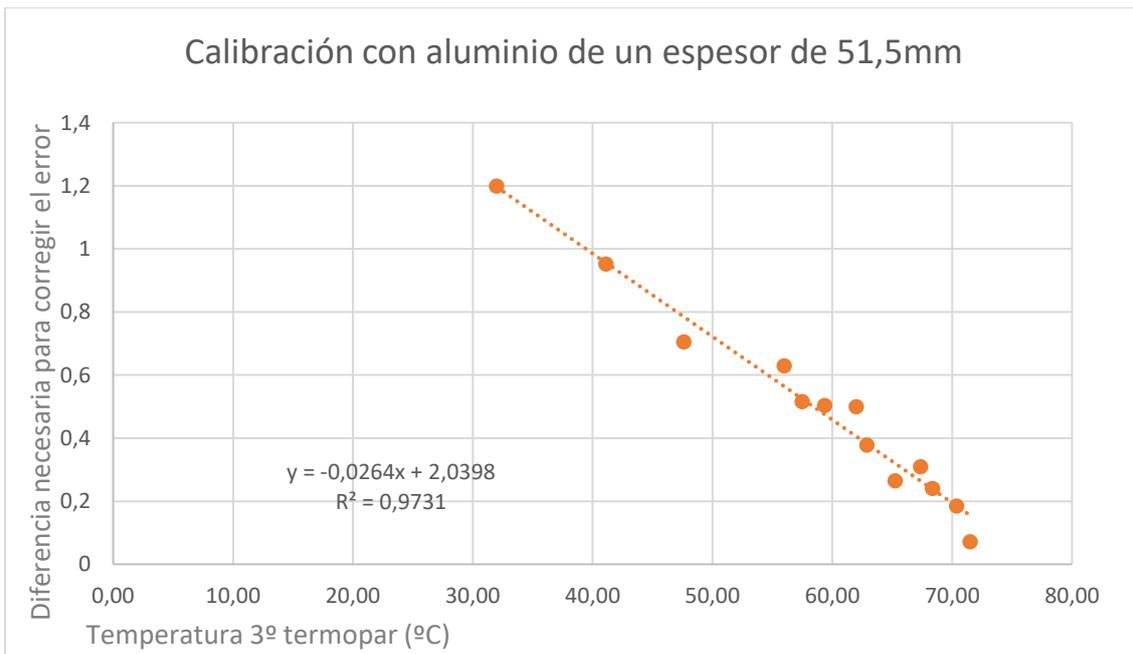


Se puede observar que cuando más tiempo transcurre en el ensayo menor es la temperatura necesaria para corregir el error. Por tanto, era necesario elegir un valor que fuera común para cualquier material que se utilizara, el tiempo se descartó debido a que los materiales tienen diferentes velocidades de propagación del calor, las temperaturas del primer y segundo termopar no eran influenciadas por la muestra, por tanto, solo quedaban las temperaturas del tercer y cuarto termopar.

Se eligió como punto de comparación para saber qué valor requería el equipo la temperatura del tercer termopar.

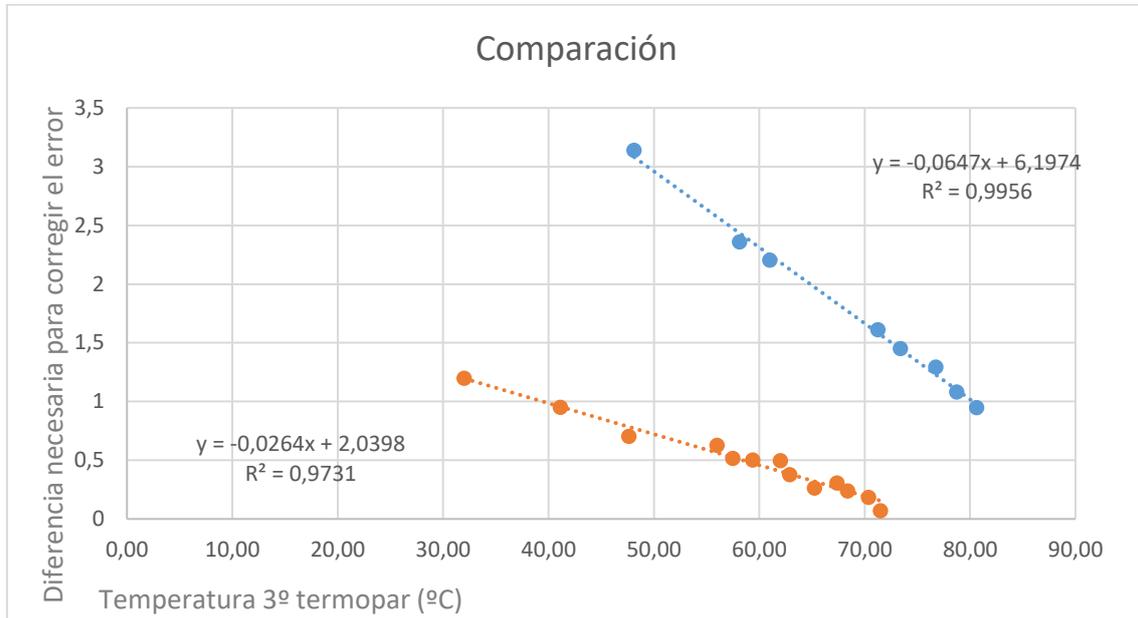
Para comprobar la curva de calibración se realizó un segundo ensayo con una muestra de aluminio esta vez con un espesor de 51,5 mm.

Gráfica 3 Calibración del equipo usando aluminio con un espesor de 51,5mm



El segundo ensayo se realizó en las mismas condiciones que el primero usando pasta térmica entre las referencias y la muestra y la fuente de calor a 100 grados.

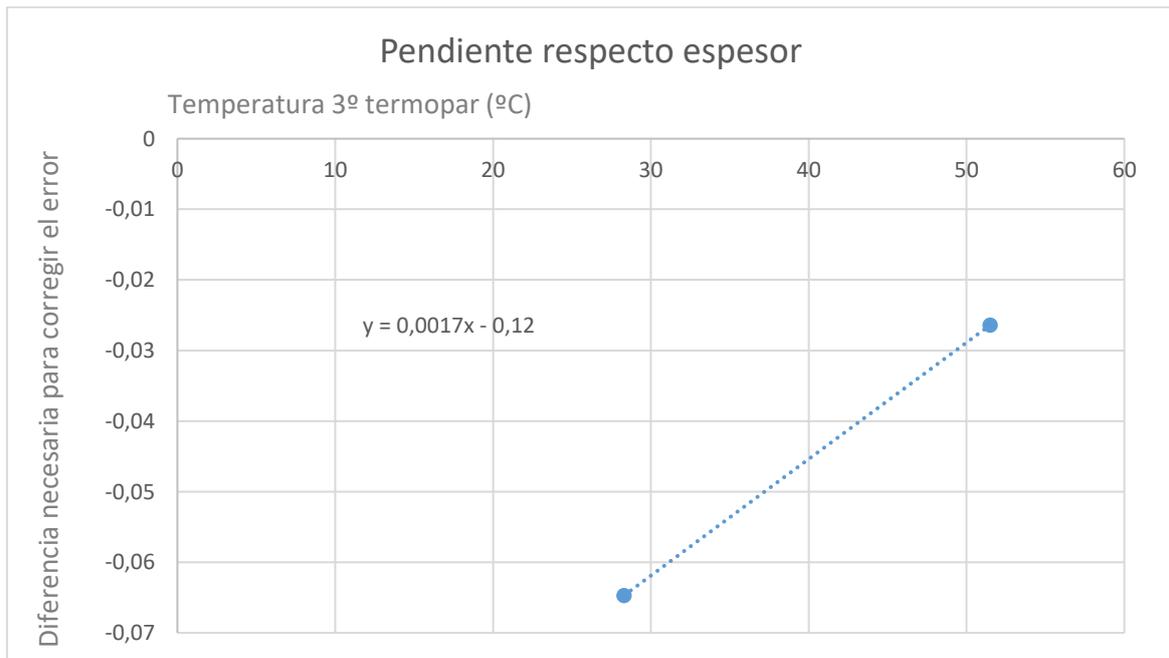
Gráfica 4 Comparación de las 2 curvas de calibración



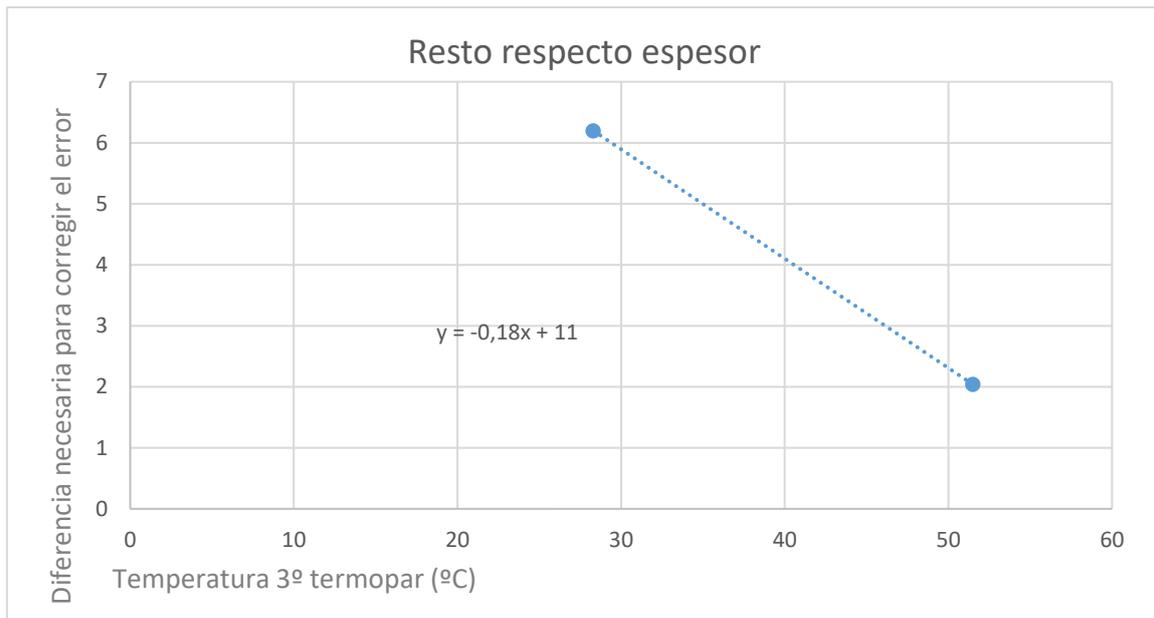
En la gráfica anterior se puede observar que, la curva de calibración es diferente para diferentes espesores y que, a mayor espesor de muestra, menor es la cantidad necesaria para corregir el error, pero la dispersión en el valor es mayor. Por tanto, es aconsejable usar pequeños espesores ya que con la calibración el valor medido de conductividad térmica es más exacto.

Al mismo tiempo era necesario realizar una función que relacionara la calibración con el espesor, para eso se relacionaron las dos curvas de calibración y el espesor utilizado.

Gráfica 5 Pendiente de la curva de calibración respecto al espesor



Gráfica 6 Resto de la curva de calibración respecto al espesor



Por lo que la curva de calibración quedaría de esta forma:

$$x = (0,0017e - 0,12) * t_3 - 0,18e + 11$$

Donde:

- x es el valor necesario para calibrar
- e es el espesor de la muestra en milímetros
- t_3 es la temperatura del tercer termopar en grados centígrados

Programación

Tras esto solo quedaba añadir la curva de calibración en la programación de Visual Studio simplemente dentro de las variables; se definió una nueva y dentro de la programación del timer; se añadió con un try la fórmula de la curva de calibración y se modificó la fórmula de Fourier de la conductividad térmica para añadir la calibración.

```
Try
    value6 = (0.17 * value5 - 0.12) * value3 - 0.18 * value5 + 11
Catch ex As Exception
    TextBox1.Text = ""
End Try
```

```
TextBox7.Text = ((value5 / 1000) / ((value3 - value6) - (value2 + value6))) *
* (((value7 * (value2 - value1)) / (2 * (0.0297))) + (value8 * (value4 - value3)) / 2 * (0.029))
```

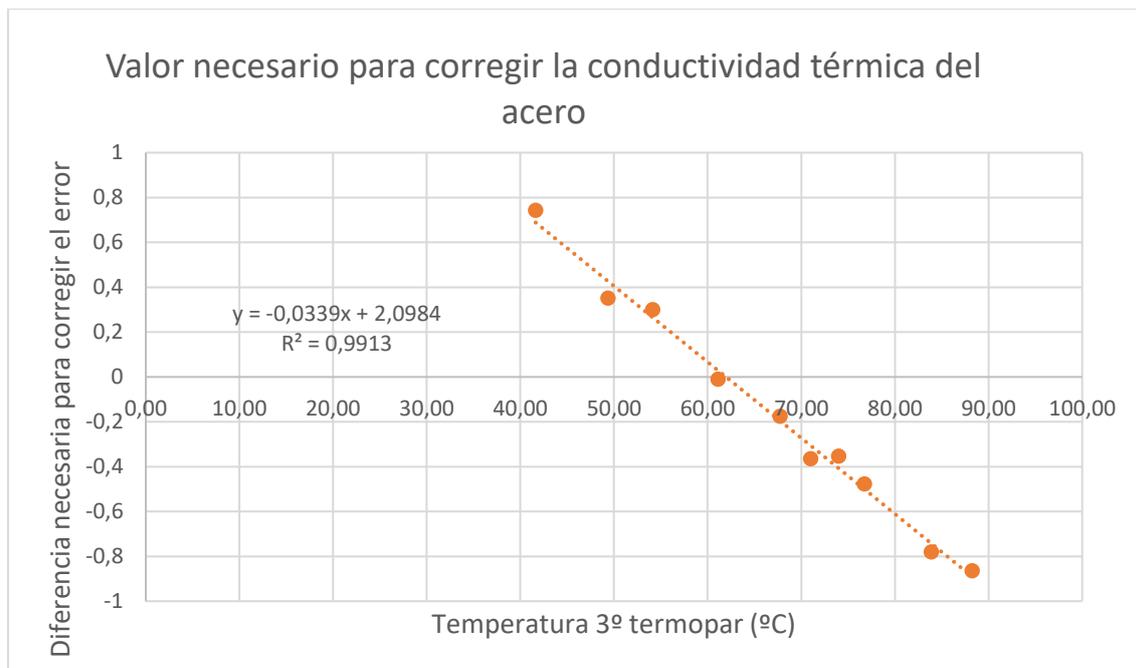
Prueba del equipo

Para comprobar si la curva de calibración había mejorado realmente la medición obtenida por el equipo se hicieron pruebas con acero y con contrachapado y así ver el rango de conductividades térmicas que el equipo puede medir.

Prueba con acero

Primero se realizó la prueba con una muestra de 38mm de acero f1140, se sabía que su conductividad térmica es aproximadamente de 58 W/m*k, la razón de esta prueba era comprobar que tan fiable era la curva de calibración por lo que se calculó cual sería la curva de calibración perfecta para 58 W/m*k.

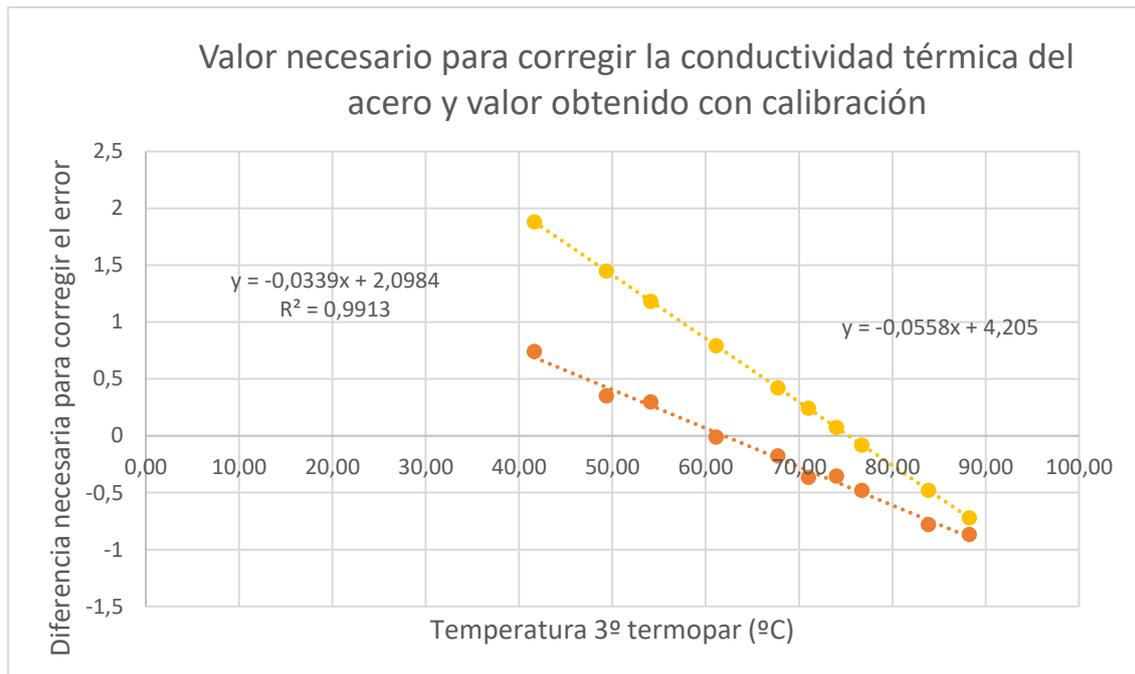
Gráfica 7 Curvas calibración F1140 teóricas



Una vez obtenidas las curvas de calibración se calculó la curva de calibración que tendría que tener el equipo:

$$x = -0.056 * t_3 + 4.2$$

Gráfica 8 Curvas calibración F1140



Esto da una curva totalmente diferente a la obtenida directamente, sin embargo, el valor del ensayo cuando está estabilizado es bastante similar al valor deseado, dando un error de un 8%.

Prueba con contrachapado

El contrachapado tiene una conductividad térmica que se encuentra entre 0,09 y 0.26 W/m*k se disponía de una muestra con un espesor de 16.1mm, como en este ensayo no se conocía la conductividad térmica de la muestra. Se decidió calcular directamente la conductividad térmica de la muestra usando la curva de calibración teórica.

Durante el ensayo (a partir de que el flujo de calor supero la muestra) la medida la conductividad térmica fue de entre 0.16 y 0.18 W/m*k hasta que se estabilizó en una conductividad térmica de 0.17 W/m*k.

El que durante todo el ensayo diera conductividades similares a la conductividad final significa que la curva de calibración teórica era similar o igual a la real y que este equipo también era capaz de medir conductividades térmicas bajas.



Ilustración 39 Ensayo con contrachapado

Carcasa parte electrónica

Una vez completados los tres objetivos del proyecto había que mejorar la apariencia del equipo, actualmente la parte electrónica del equipo estaba dispersa alrededor del equipo, era necesario construir un recipiente para mejorar la apariencia del equipo y organizar la parte electrónica.

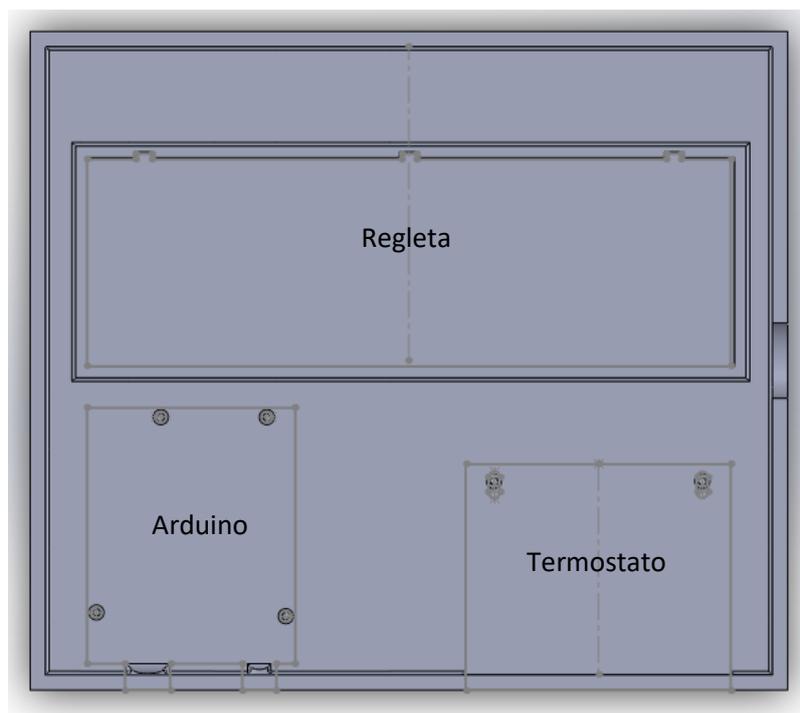


Ilustración 40 Organización de la parte electrónica

Se decidió colocar la regleta detrás del arduino que se encontraría al lado del ordenador que registra todos los datos y el termostato al lado del equipo los cables de los cinco termopares saldrían por la parte superior y los cables de la resistencia térmica por un orificio colocado en el lateral del equipo.

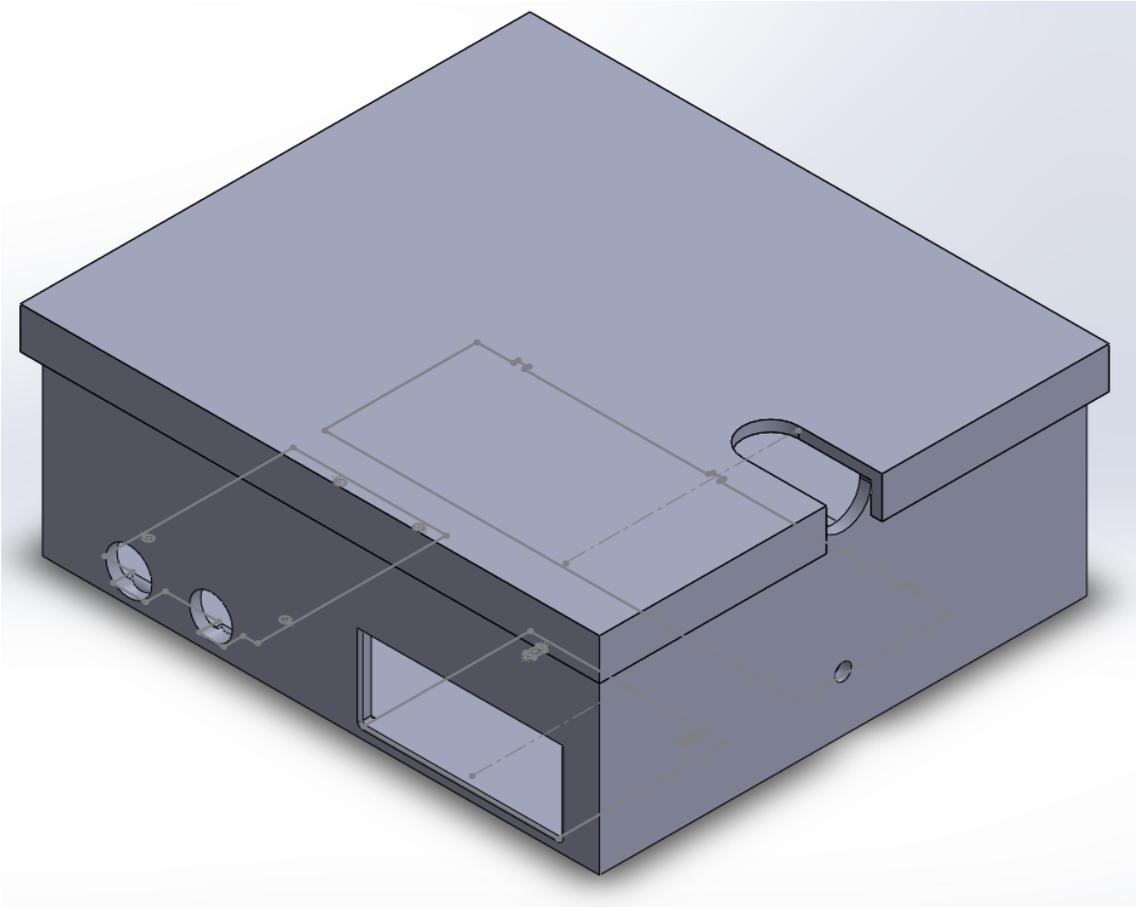


Ilustración 41 Carcasa electrónica

Este diseño era demasiado grande para la impresora 3d de la universidad por lo que se cambió la regleta por una más pequeña y se cambió la distribución disminuyendo el espacio entre piezas.

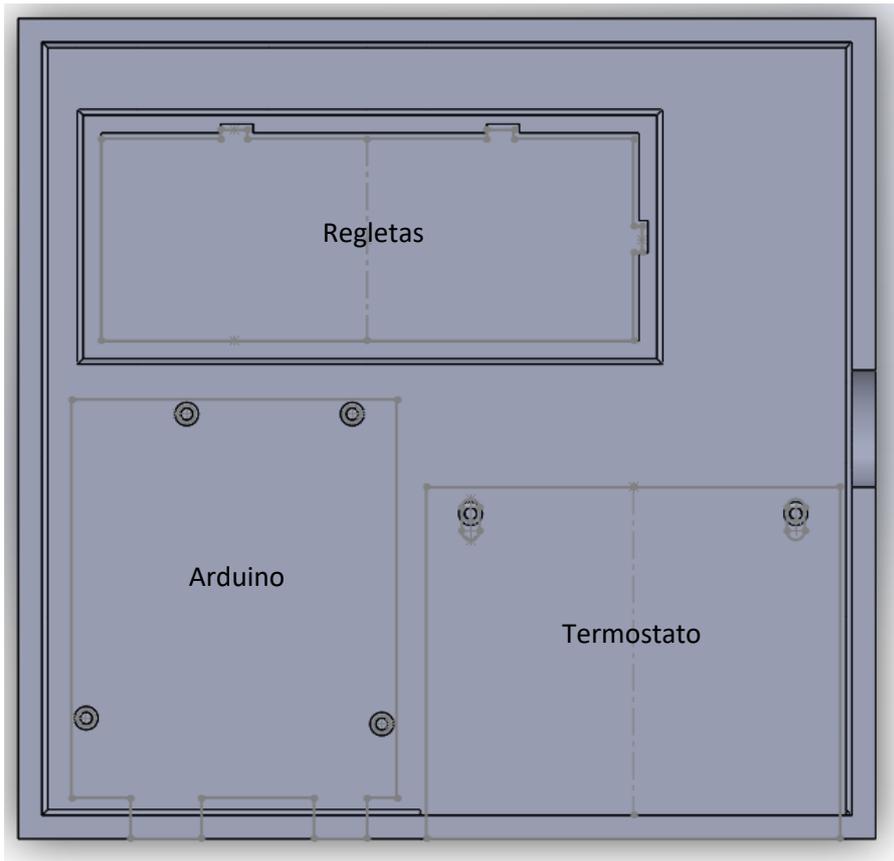


Ilustración 42 Organización de la parte electrónica en la carcasa pequeña

Se instalaron dos regletas pequeñas porque, aunque en una cabía toda la electrónica del equipo de esta forma era más fácil realizar el montaje. El resto del equipo era igual al anterior.

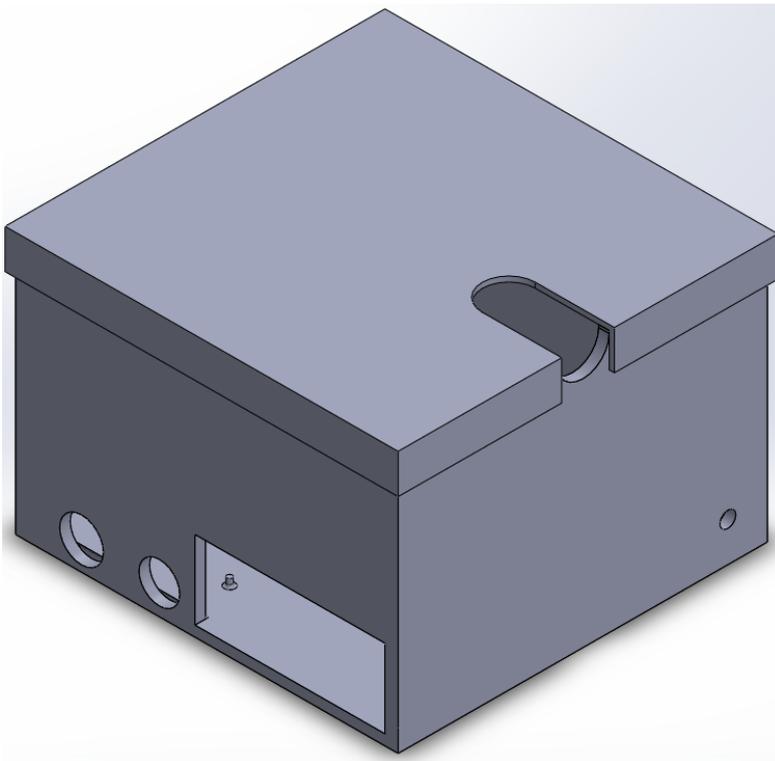


Ilustración 43 Carcasa electrónica pequeña

Presupuesto

Uno de los objetivos del proyecto era que el precio del equipo fuera el mínimo posible por esto se usaron piezas y materiales de bajo coste o fácil acceso para la universidad.

El presupuesto se dividió en tres partes:

- Precio del equipo
- Precio por ensayo
- Precio de los prototipos no usados

Precio del equipo

- Referencias

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Cilindro de aluminio	3.75	0.234	Kg	0.879
Coste total (€)				0.879

- Mecanizado referencias

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Sierra	0.155	0.235	kW*h	0.037
Taladro	0.155	0.32	kW*h	0.031
Amortización sierra y taladro	20	2	uds	40
Coste total (€)				40.068

- Aislante

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Lana de fibra de vidrio	4.95	0.014	m ²	0.33
Coste total (€)				0.33

- Carcasa aislante

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
ABS	15	0.3	kg	4.5
Tiempo impresión	0.5	60	h	30
Coste total (€)				34.5

- **Componentes electrónicos**

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Arduino Uno	18.7	1	uds	18.7
Regleta	4	1	uds	4
Regleta pequeña	1	4	uds	4
Cable	0.16	26	uds	3.99
Termopar	2.2	5	uds	10.99
Amarracables	1	2	uds	2
Termostato	33.69	1	uds	33.69
Resistencia	0.5	1	uds	0.5
Resistencia térmica	6	1	uds	6
Coste total (€)				83,87

- **Ingeniería**

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Honorarios ingeniero	10	300	h	3000
Amortización licencia Solidworks	100	1	uds	100
Coste total (€)				3100

- **Precio del equipo**

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	COSTE (€)
Precio de coste	159,65	1	159,65
Ingeniería	3100	1	3100
Beneficios	3259.65	0.16	521.54
IVA	3781,19	0.21	794.05
Coste total del equipo (€)			4575.24

Precio por ensayo

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Amortización del equipo	5	1	uds	5
Pasta térmica	4	1	uds	4
Tiempo de ensayo	0.155	6	kW*h	0.93
Mecanización muestra	20.03	1	uds	20.03
Coste total (€)				29.96

Precio de los prototipos no usados

- **Referencia epoxi con alúmina**

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Epoxi	36	1	uds	36
Alúmina	4.24	1	uds	4.24
Molde	26.62	1	uds	26.62
Coste total (€)				66.86

- **Piezas poliestireno expandido**

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Plancha poliestireno expandido	1	1	uds	1
Coste total (€)				1

- **Precio prototipos fallidos**

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	UNIDADES	COSTE (€)
Prototipos fallidos	66.86	1	uds	66.86
Plancha poliestireno expandido	1	1	uds	1
Coste total (€)				67.86

Conclusiones

Tras los últimos ensayos se pudo concluir que el método de medición de flujo de calor puede usarse para medir conductividades térmicas tanto altas como bajas con un bajo presupuesto solo que, con un error relativamente alto, si se compara con otros métodos de mayor coste.

También pudo comprobarse que a pesar de que las normativas del método de medición de flujo de calor recomiendan el uso de referencias con conductividades parecidas a la de las muestras el uso de referencias de aluminio tubo mejor resultado incluso en la medida de bajas conductividades, aunque quizás si se hubieran usado termopares de menor diámetro y pasta térmica entre los contactos, las referencias de epoxi con alúmina quizá hubieran dado un mejor resultado que las de aluminio con bajas conductividades.

Además, se comprobó que es completamente necesario el uso pasta térmica, si la muestra no tiene termopares en su interior, para asegurarse de que no hay perdidas por el contacto entre la muestra y las referencias. En este proyecto también se usaron otros materiales para solucionar este problema como grasa de silicona, de litio o el propio peso del equipo, pero, todas estas dieron peores resultados que la pasta térmica, sin embargo, la pasta térmica pierde todas sus propiedades adhesivas tras su primer ensayo provocando la necesidad de usar cada vez pasta térmica nueva.



Ilustración 44 Comparación de la pérdida de adherencia de la pasta térmica tras el primer ensayo

Con las simulaciones y las pruebas se pudo estudiar el comportamiento del error del equipo con diferentes espesores de muestra, en simulaciones se pudo observar que conforme se baja el espesor el error aumenta de forma exponencial superando teóricamente el 10% de error a partir de un espesor de 5mm.

En los ensayos del equipo se usaron espesores de 16 a 55mm y en este caso se pudo observar que cuando se usaban espesores superiores a 35mm, el valor de conductividad térmica obtenido por el equipo tiene mucha dispersión conforme avanza el ensayo, en espesores medios de 15 a 35mm los ensayos son más precisos siendo el resultado más estable.

Por tanto, se recomienda el uso de espesores que se encuentren entre 15 y 35mm. Para realizar los ensayos la capacidad máxima del equipo es de muestras de 55mm y la mínima de 5mm, aunque puede usarse para menores espesores teóricamente el error será mayor y la mayoría de estos ensayos darán valores muy alejados del original.

Se realizaron pruebas con áreas diferentes a la de la referencia un cilindro con mayor espesor con un agujero central este ensayo resultó en un error mucho mayor al esperado incluso corrigiendo la fórmula con la diferencia del área no sirvió para disminuir el error de un 50%, por tanto, para el uso de este equipo no es recomendable usar superficies de forma diferente a las referencias del equipo.

Futuras mejoras

Hay varias cosas que podrían mejorar el equipo:

- Construir una pieza que sirva para centrar las piezas y para que no haya trozos de aislante entre los contactos muestra referencia.
- Instalar una fuente fría, esto reduciría el tiempo de ensayo, ya que el equipo se estabilizaría con mayor rapidez.

- Cambiar el termopar usado en el termostato por otro con mayor rango de temperatura y cambiar la fuente de calor por otra de mayor potencia, de esta forma podría medirse la conductividad térmica en diferentes rangos de temperatura.

De estas mejoras la primera se diseñó, pero no pudo usarse por falta de tiempo para su construcción y realización ensayos.

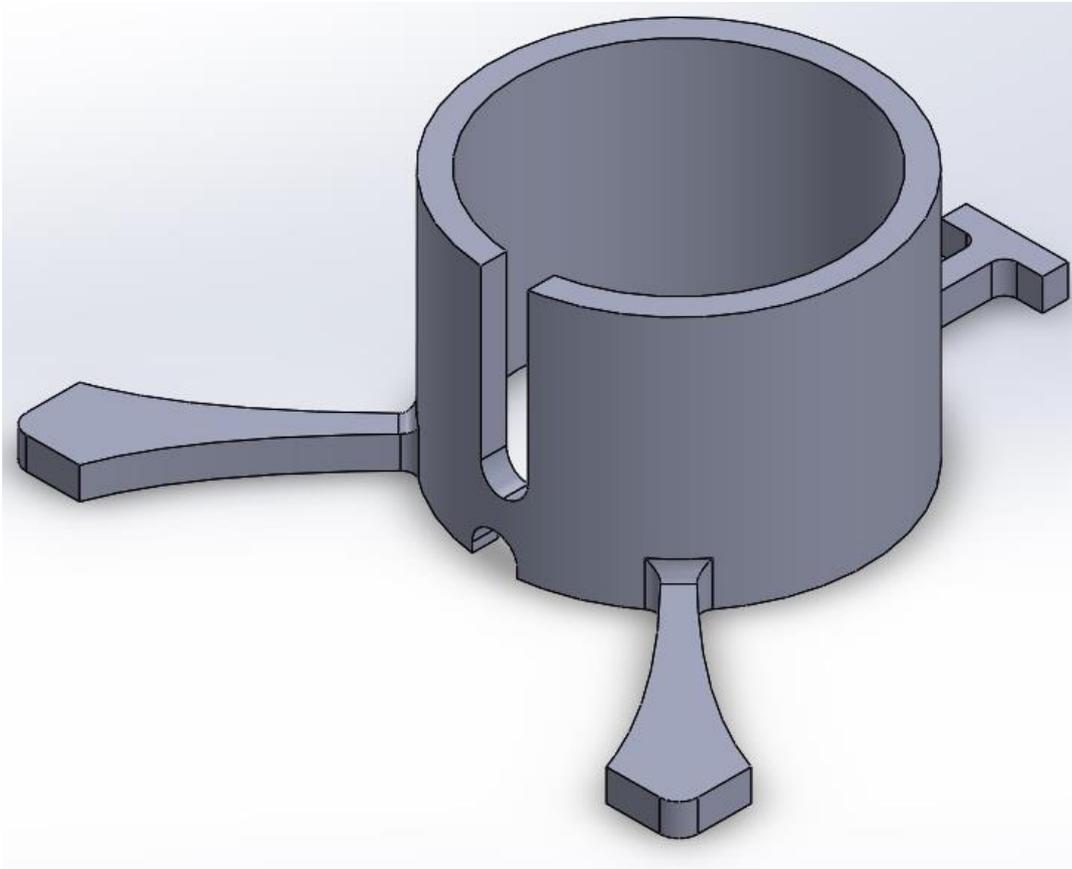


Ilustración 45 Porta muestras

Bibliografía

Transient thermal conductivity measurements: comparison of destructive and nondestructive techniques. Nancy Mathis. High Temperatures - High Pressures, 2000, volume 32, pages 321 – 327.

Determinación de la conductividad térmica en la industria cerámica por el método modificado de la fuente plana transitoria. Maria Pilar Gómez Tena Técnicas de Laboratorio. 397. 728 - 734.

Determinación Experimental de la Conductividad Térmica Efectiva en Bloques Extinguidos de Arcilla Roja. G. Peña Rodríguez Revista Ciencia en Desarrollo, Vol. 5 No. 1 ISSN 0121-7488 – Enero-Junio de 2014, pp. 15-20.

Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energética en edificaciones. Leonel Lira Cortes.

DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer.

Anexo b. Metodología de cálculo de espesores óptimos de aislamiento térmico.

<https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>

<https://www.youtube.com/watch?v=NSvNZzhCpaQ&list=PLJghxNDCChGCvGIYgXvJqs9y7c2wH5hP6&index=2&t=265s>

<https://www.youtube.com/watch?v=9OFetZ7SD5w&list=PLJghxNDCChGCvGIYgXvJqs9y7c2wH5hP6&index=8>

https://www.youtube.com/watch?v=PP_JUGxWgeA&list=PLJghxNDCChGCvGIYgXvJqs9y7c2wH5hP6&index=4

Normativa

Marco legal de referencia

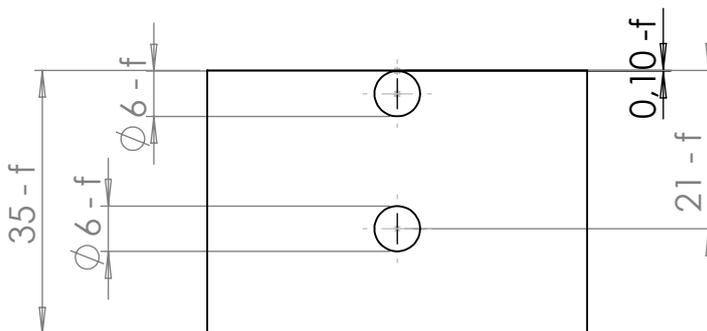
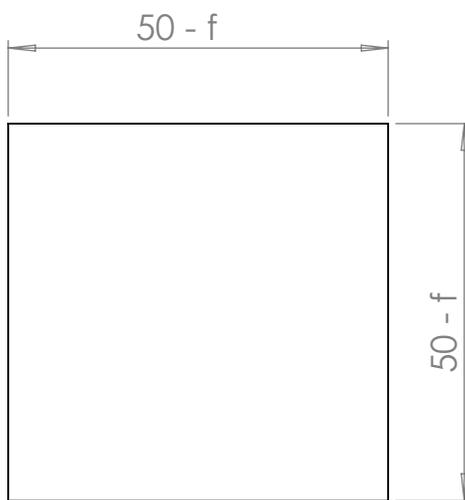
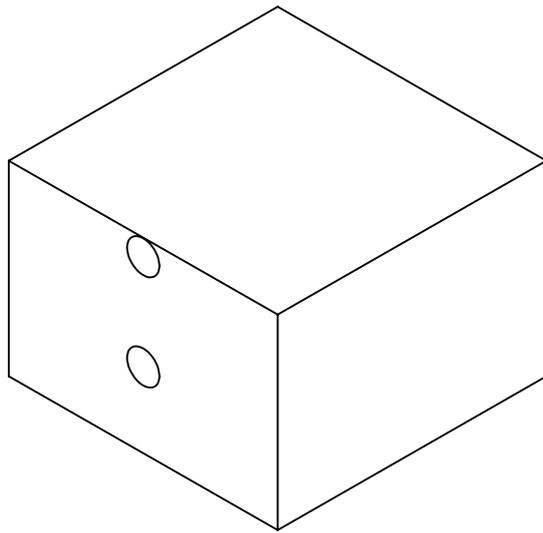
Real Decreto 1591/2009, de 16 de octubre de 2009. Disposiciones generales por las que se regulan los productos sanitarios.

Normativa método de medición del flujo de calor

ASTM E 1530 – 11 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique

ASTM E 1225 – 04 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique

Planos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO FINAL DE MASTER
IPROMAT

Proyecto:

Diseño y fabricación de un prototipo de
equipo para la medición de
conductividades térmicas de materiales

Plano:

Referencia epoxi con alumina

Fecha:

Septiembre 2019

Nº Plano:

1

Autor:

Alonso Ramos, Jose Luis

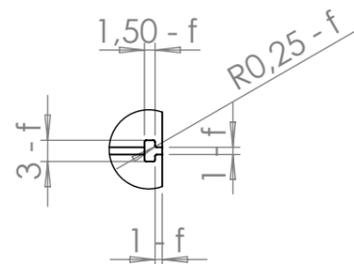
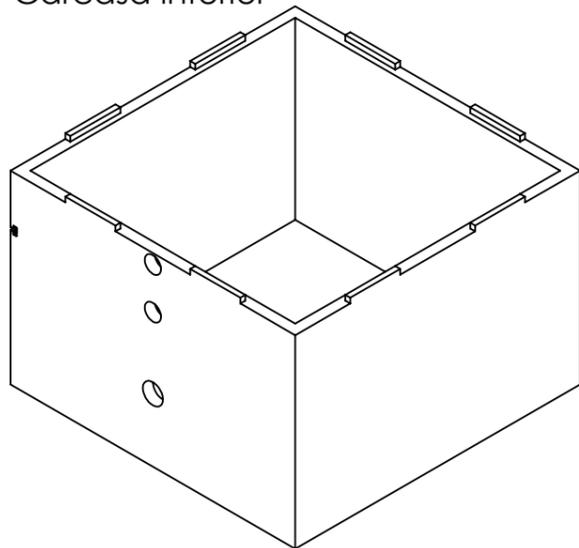
Tolerancia no especificada:

UNE-EN 22768-2

Escala:

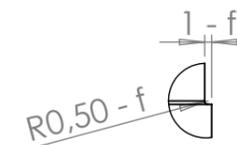
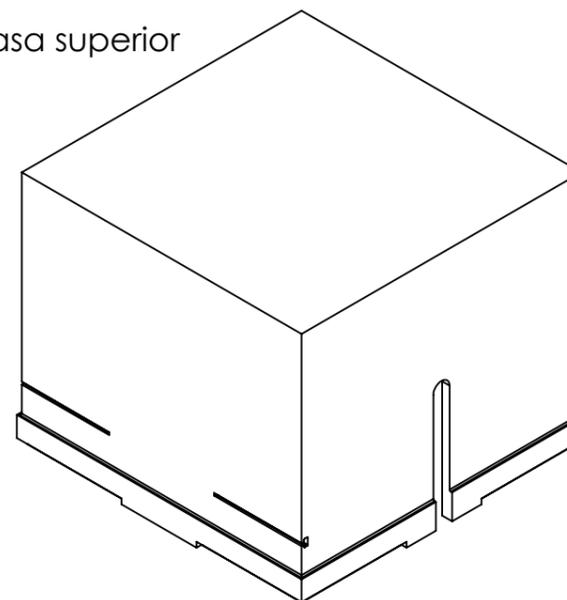
1:1

Carcasa inferior

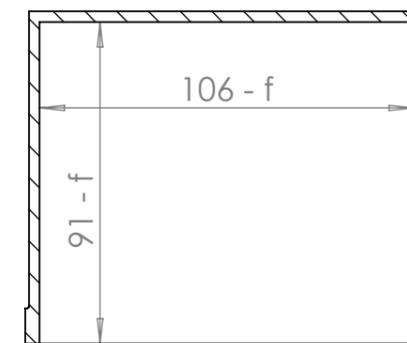
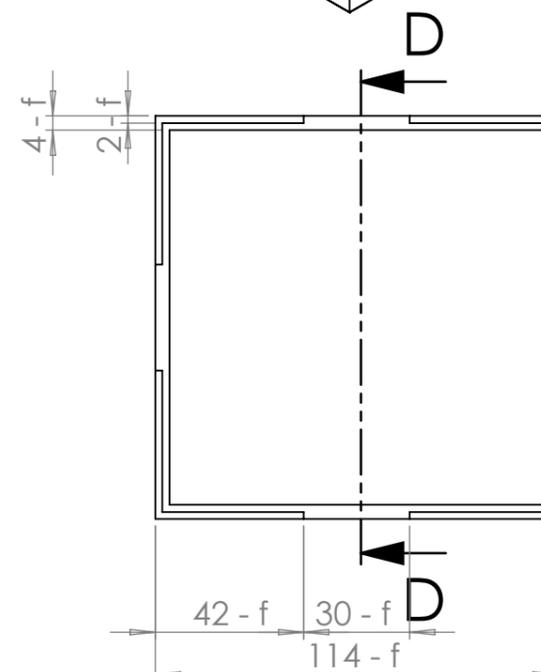
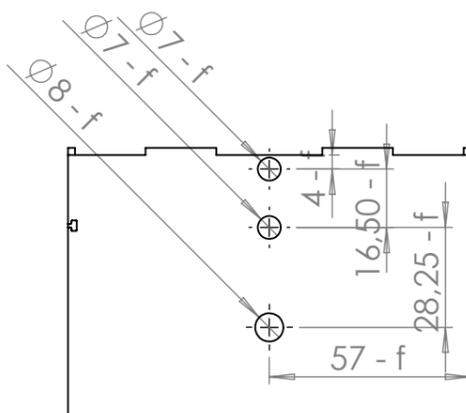
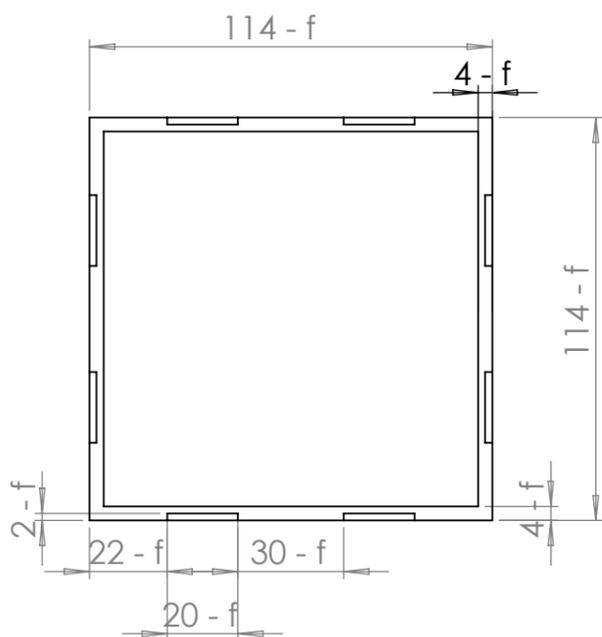


DETALLE A
ESCALA 1:1

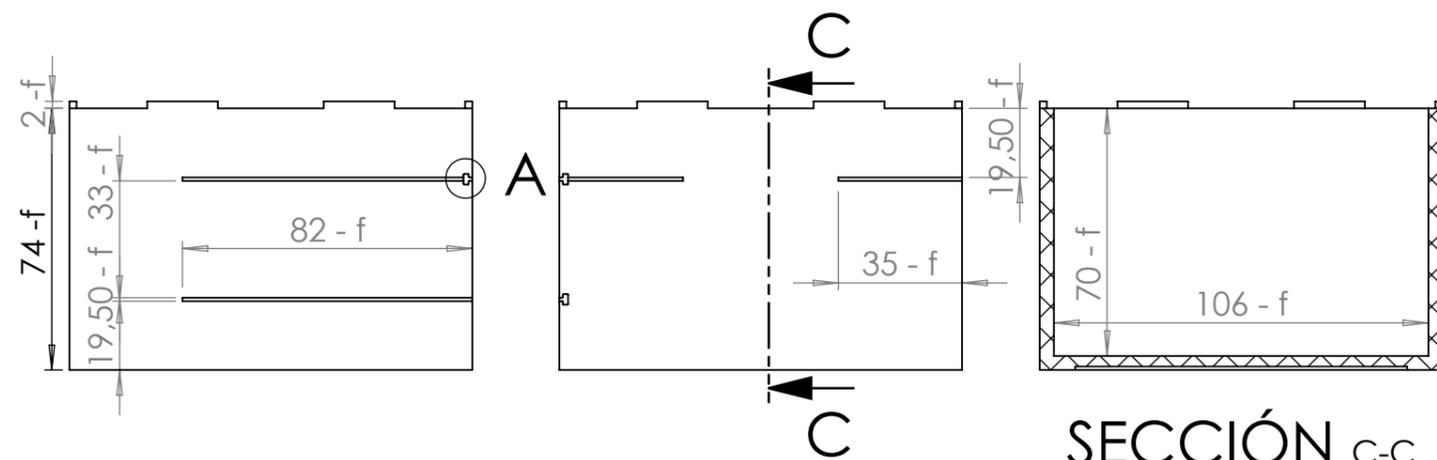
Carcasa superior



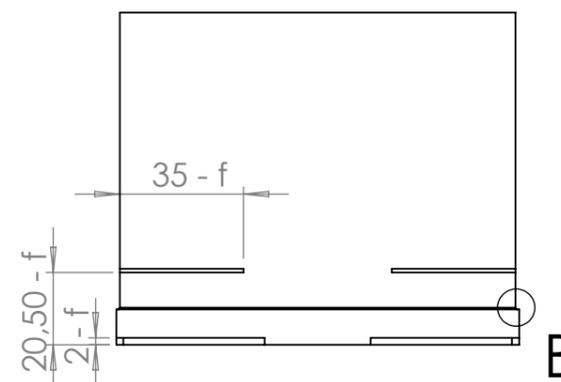
DETALLE B
ESCALA 1:1



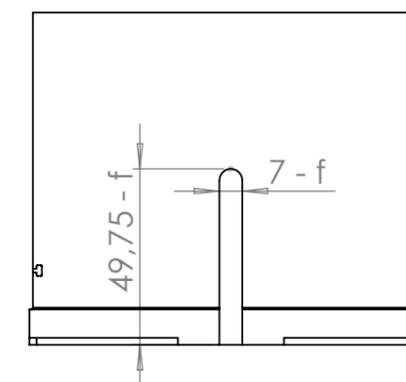
SECCIÓN D-D



SECCIÓN C-C



B



TRABAJO FINAL DE MASTER
IPROMAT

Proyecto: Diseño y fabricación de un prototipo de equipo para la medición de conductividades térmicas de materiales

Plano: Carcasas del aislante

Autor: Alonso Ramos, Jose Luis

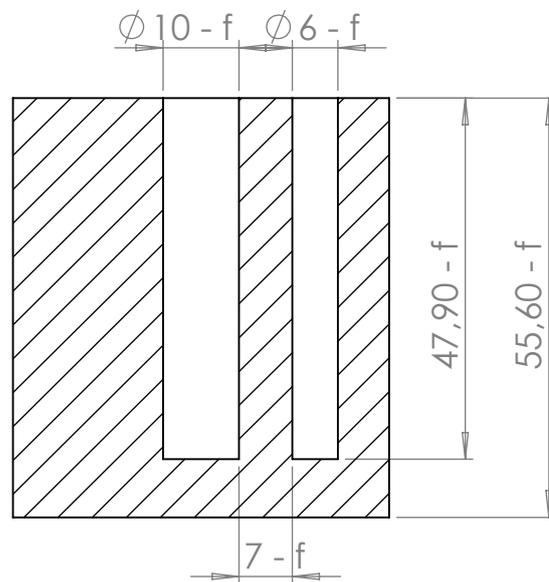
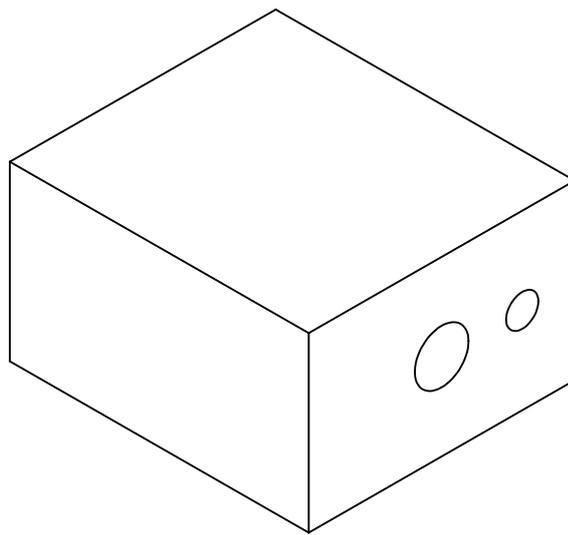
Fecha: Septiembre 2019

Tolerancia no especificada: UNE-EN 22768-2

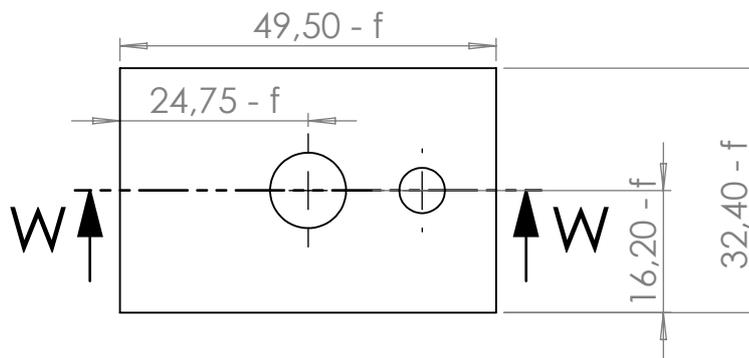
Escala: 1:2

Nº Plano:

2



SECCIÓN W-W



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO FINAL DE MASTER
IPROMAT

Proyecto:

Diseño y fabricación de un prototipo de
equipo para la medición de
conductividades térmicas de materiales

Plano:

Placa calefactora

Fecha:

Septiembre 2019

Nº Plano:

3

Autor:

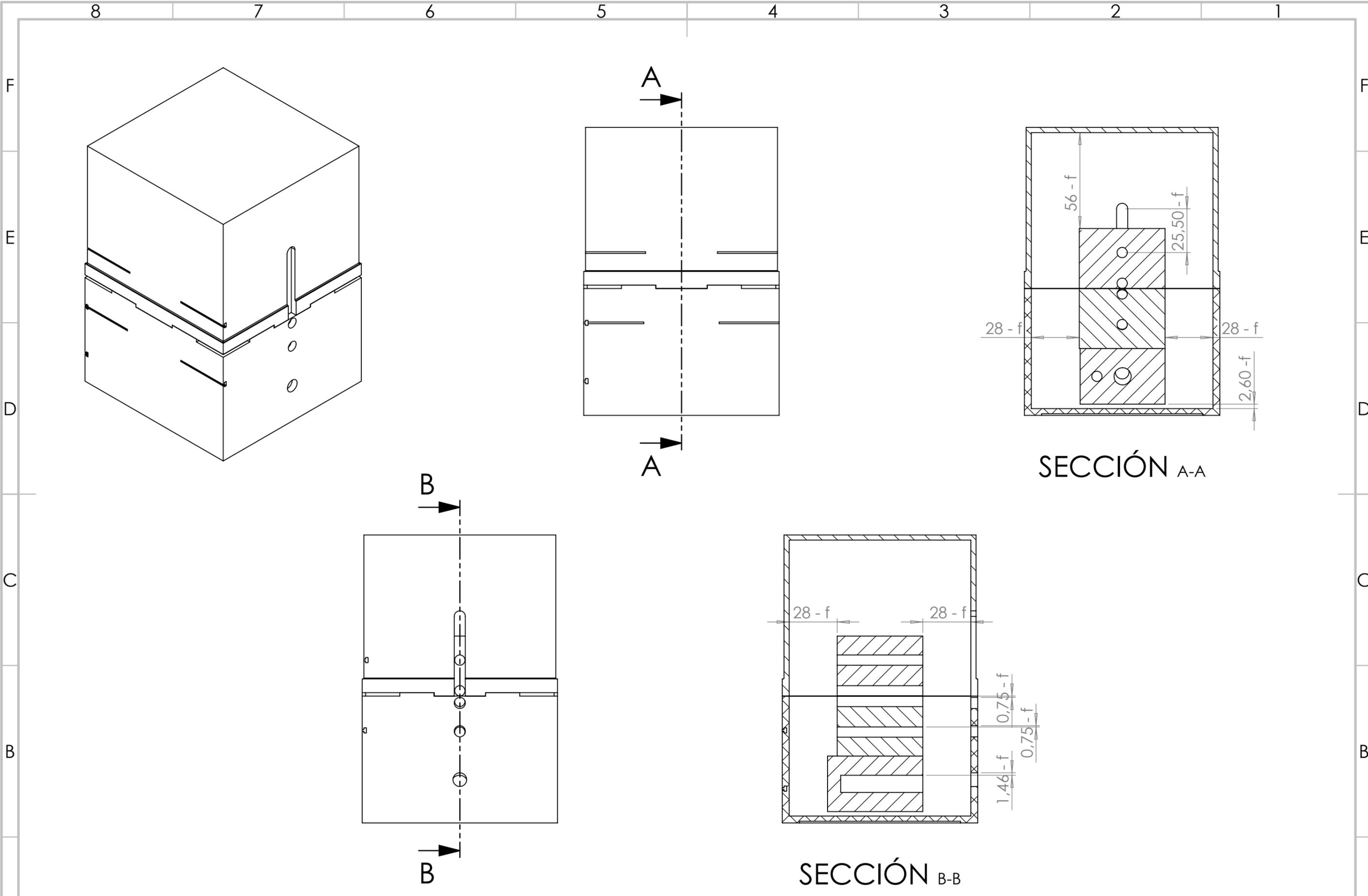
Alonso Ramos, Jose Luis

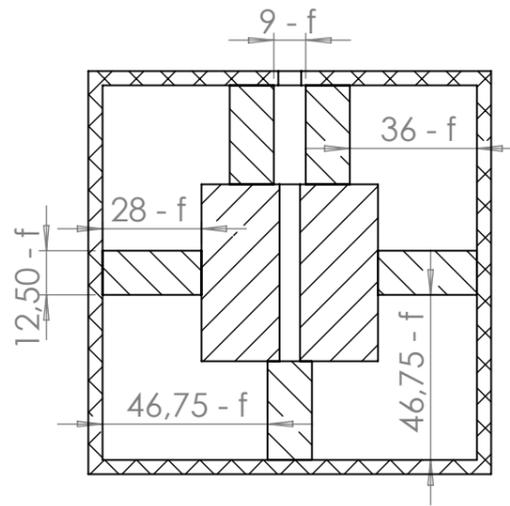
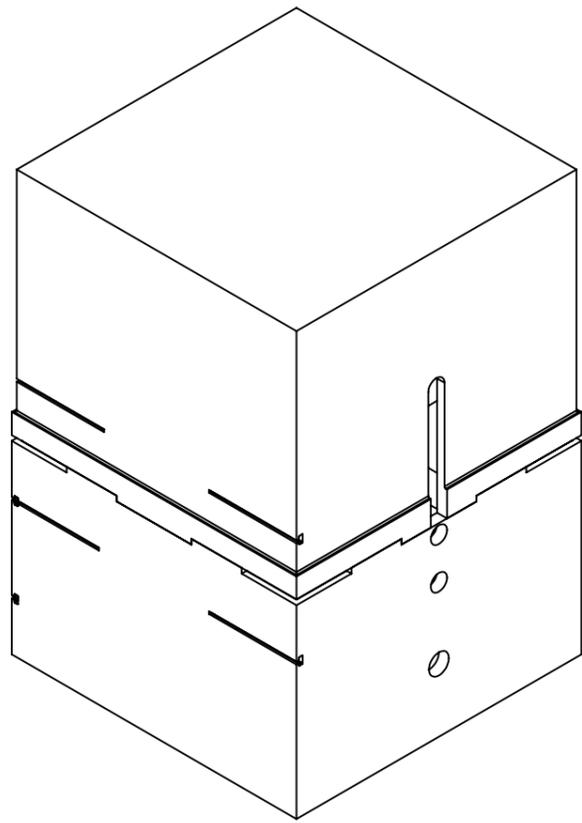
Tolerancia no especificada:

UNE-EN 22768-2

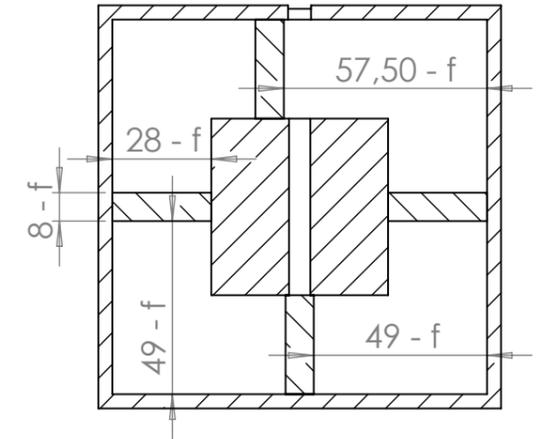
Escala:

1:1

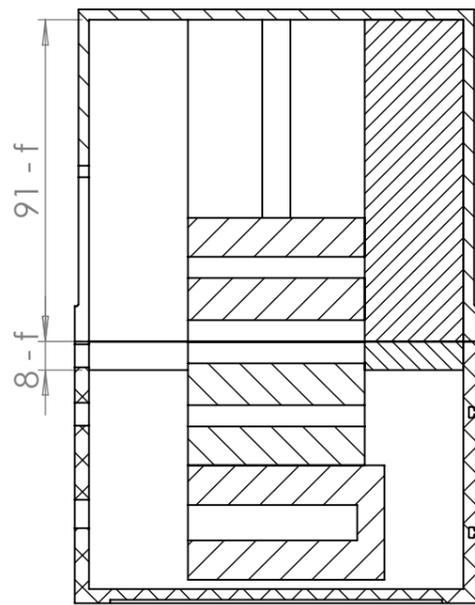




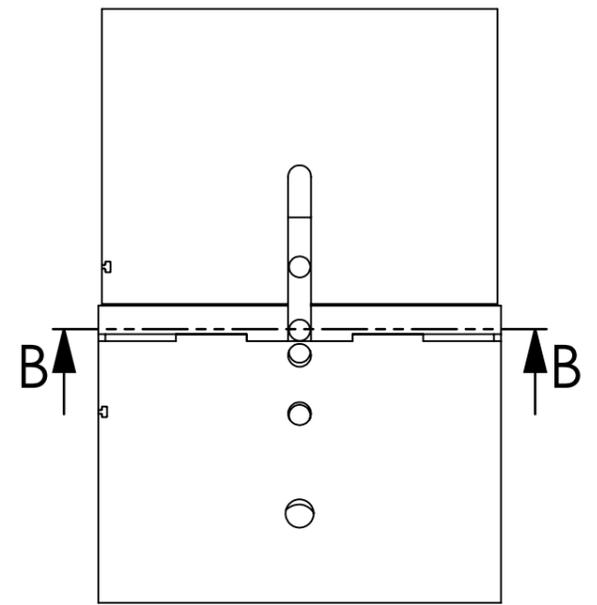
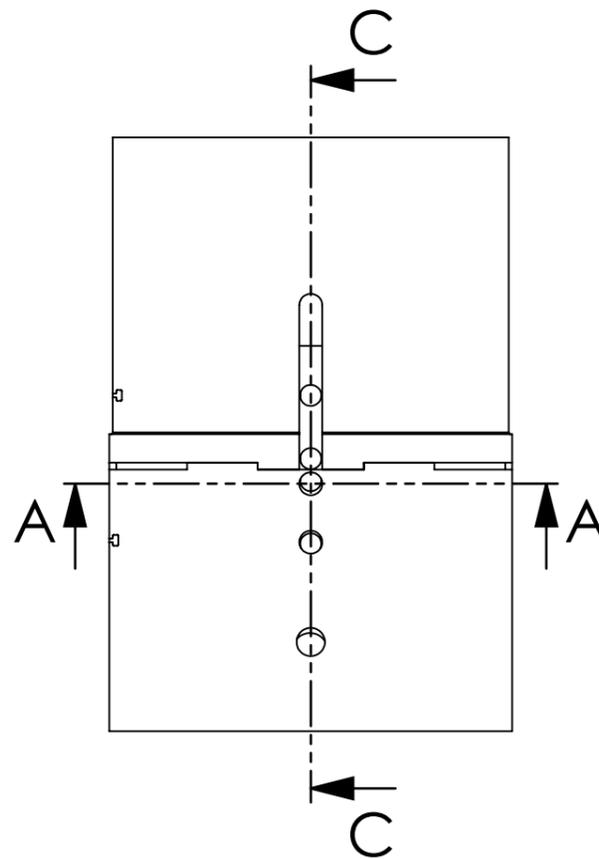
SECCIÓN A-A

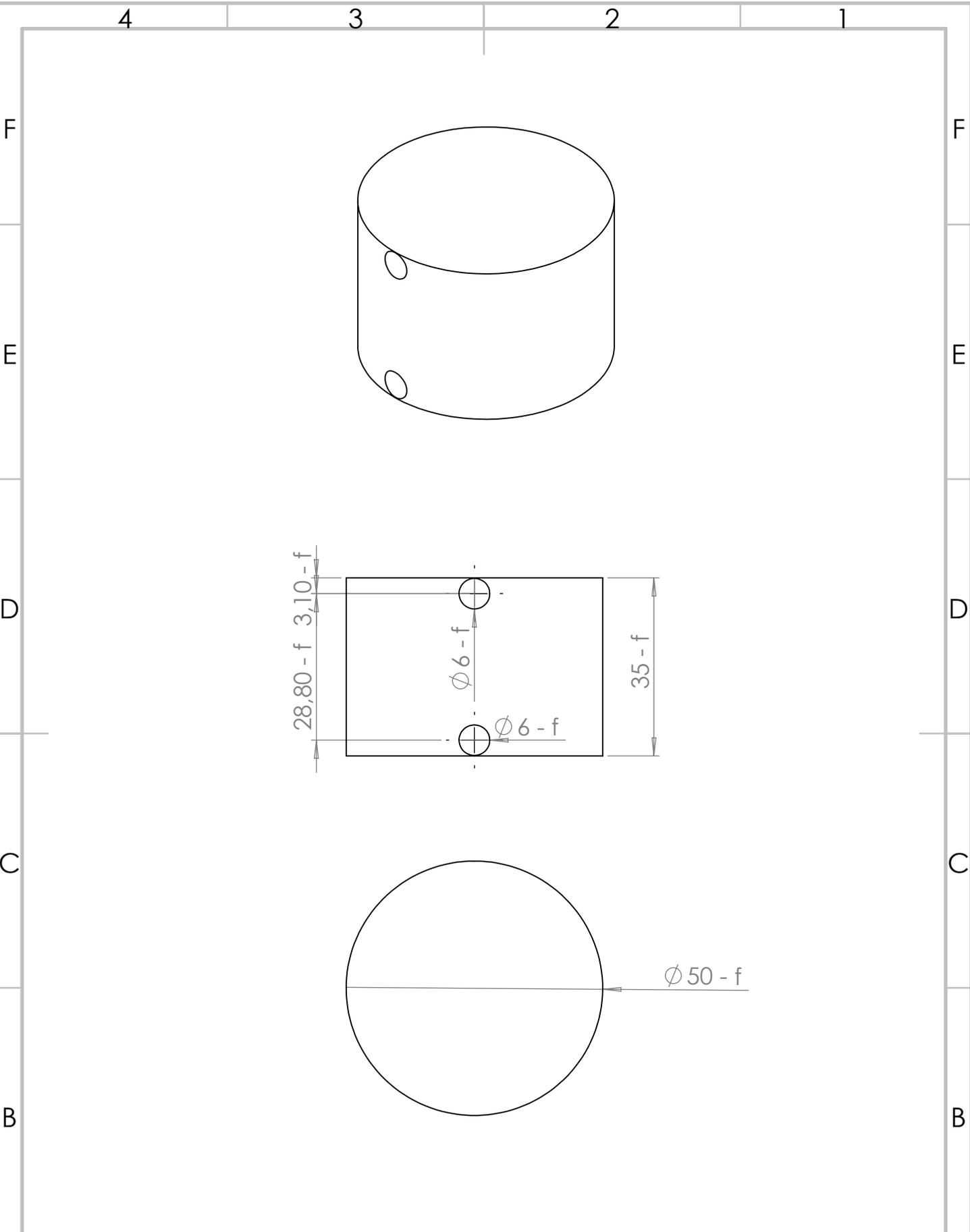


SECCIÓN B-B



SECCIÓN C-C





UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO FINAL DE MASTER
IPROMAT

Proyecto:
Diseño y fabricación de un prototipo de
equipo para la medición de
conductividades térmicas de materiales

Plano:
Referencia aluminio

Fecha:
Septiembre 2019

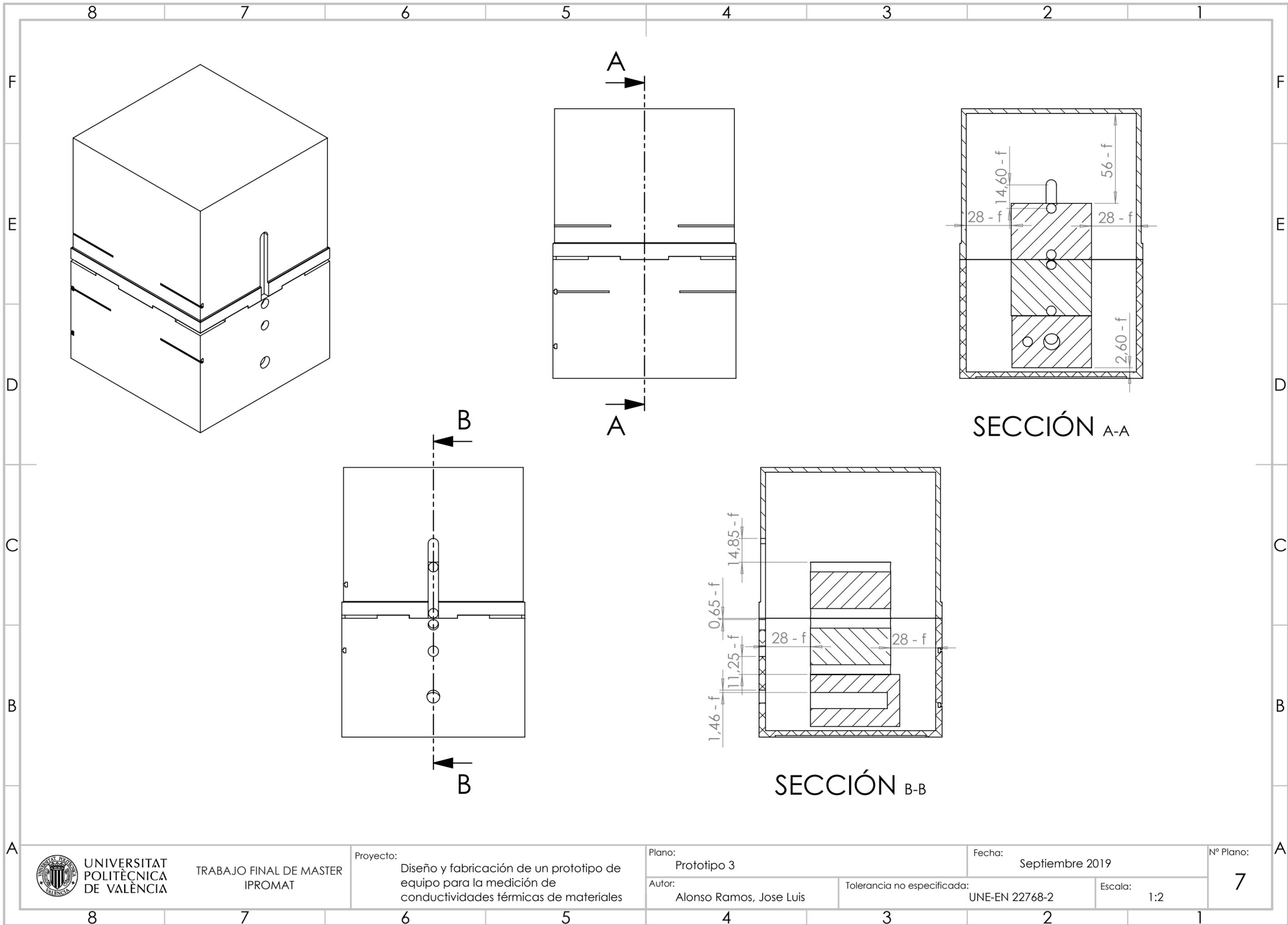
Nº Plano:

Autor:
Alonso Ramos, Jose Luis

Tolerancia no especificada:
UNE-EN 22768-2

Escala:
1:1

6



SECCIÓN A-A

SECCIÓN B-B



TRABAJO FINAL DE MASTER
IPROMAT

Proyecto: Diseño y fabricación de un prototipo de equipo para la medición de conductividades térmicas de materiales

Plano: Prototipo 3

Autor: Alonso Ramos, Jose Luis

Fecha: Septiembre 2019

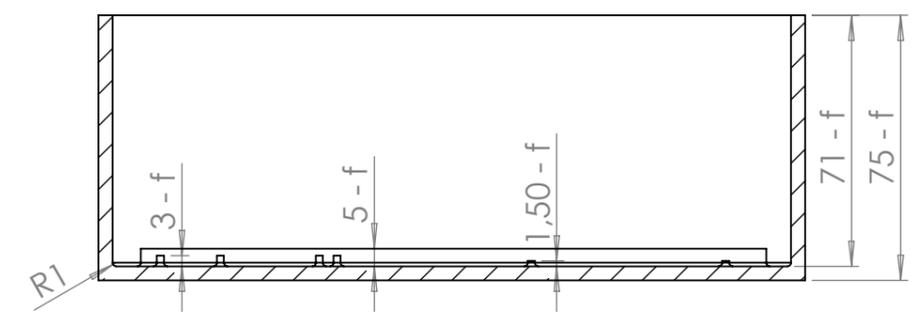
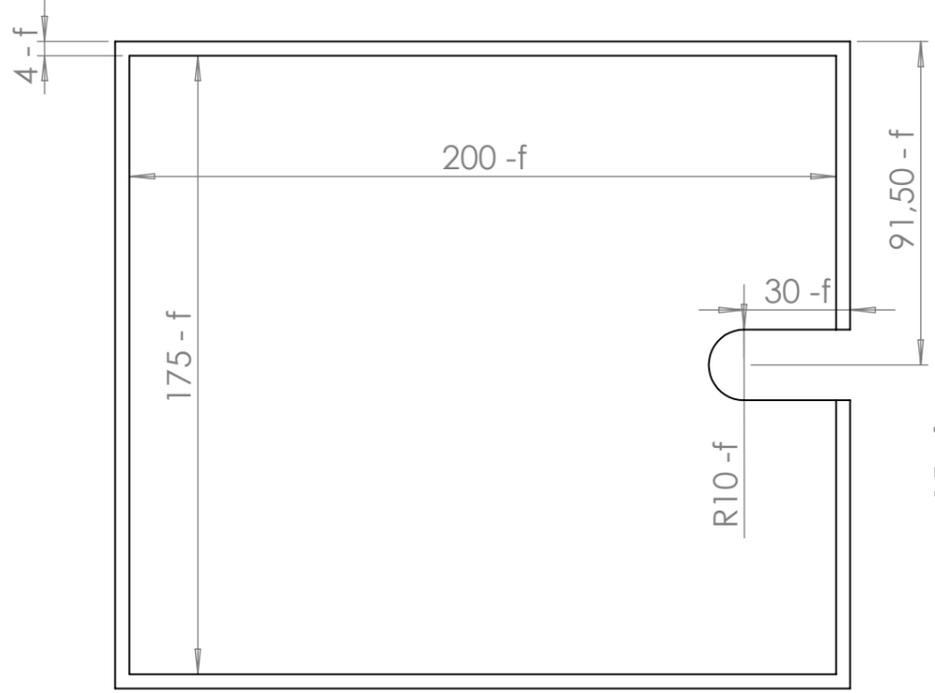
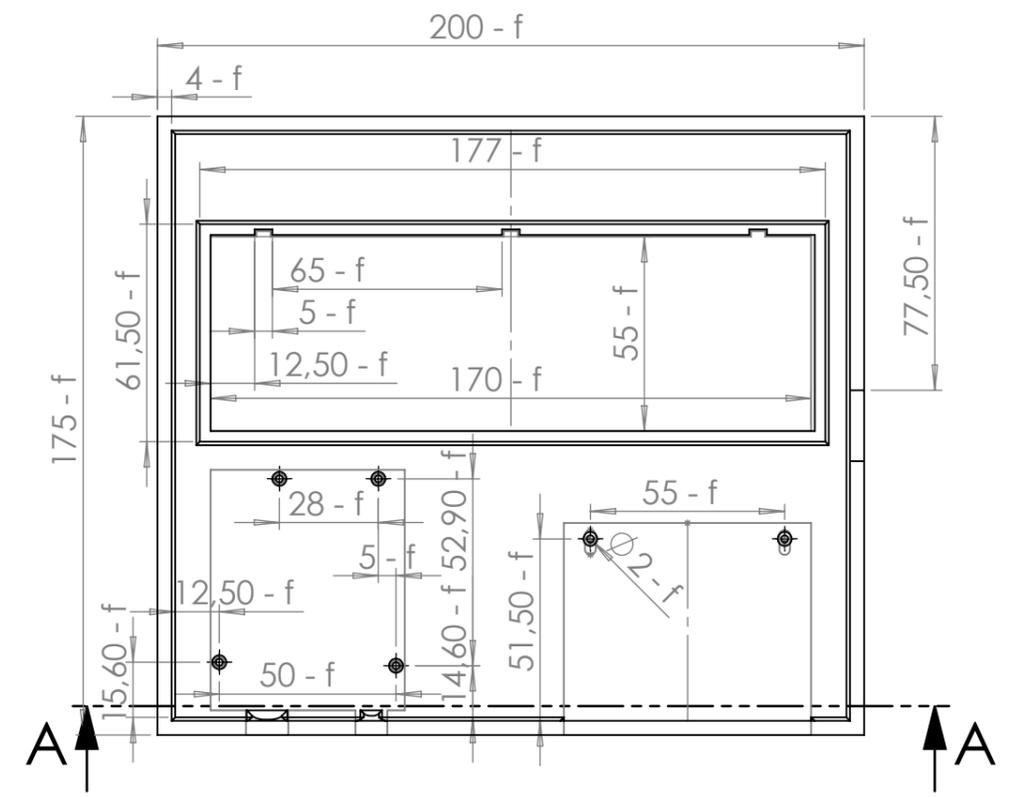
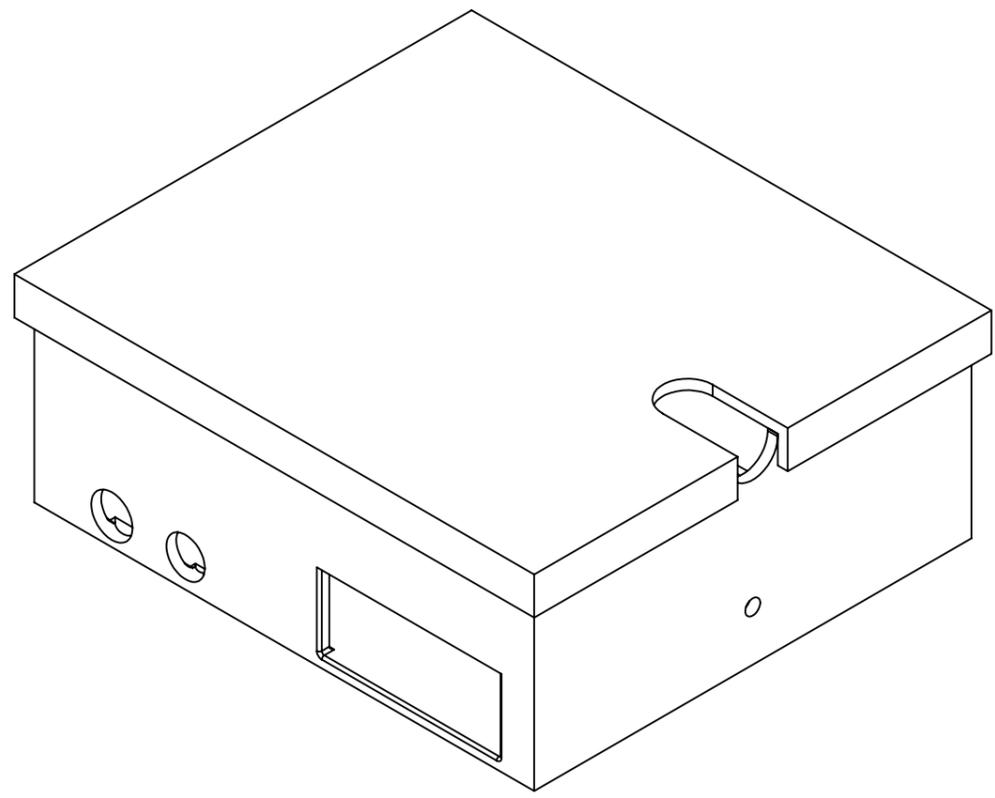
Tolerancia no especificada: UNE-EN 22768-2

Escala: 1:2

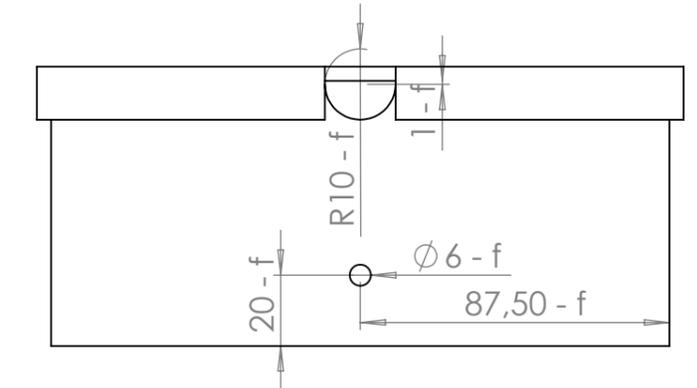
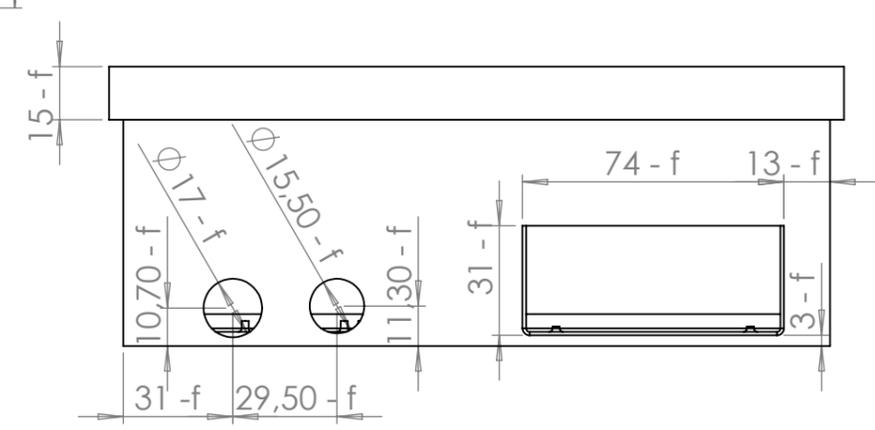
Nº Plano: 7

8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A



SECCIÓN A-A



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
TRABAJO FINAL DE MASTER
IPROMAT

Proyecto: *Diseño y fabricación de un prototipo de equipo para la medición de conductividades térmicas de materiales*

Plano: Carcasa componentes electrónicos
Autor: Alonso Ramos, Jose Luis
Tolerancia no especificada: UNE-EN 22768-2

Fecha: Septiembre 2019
Escala: 1:2

Nº Plano: 8

8 7 6 5 4 3 2 1

