Escuela Politécnica Superior de Jaén

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

REDISEÑO DE UN CALORÍMETRO ADIABÁTICO

Alumno/a: **Garrido Martínez, Manuel**

Tutor/a: Prof. D. Rubén Dorado Vicente

Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Julio, 2021

UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Rubén Dorado Vicente, tutor del Trabajo Fin de Máster titulado: Rediseño de un calorímetro adiabático, que presenta Manuel Garrido Martínez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Julio de 2021

El alumno:

GARRIDO MARTÍNEZ, MANUEL (AUTENTICACIÓN)

Firmado digitalmente por GARRIDO MARTÍNEZ, MANUEL (AUTENTICACIÓN)
Fecha: 2021.07.04 18:00:27 +02'00'

MANUEL GARRIDO MARTÍNEZ

El tutor:

Ruben Dorado Vicente

Firmado digitalmente por Ruben Dorado Vicente
Fecha: 2021.07.04 18:59:31 +02'00'

RUBÉN DORADO VICENTE

Índice

1. RESUMEN ... 7
2. INTRODUCCIÓN ... 8
2.1. Antecedentes ... 8
2.2. Propiedades térmicas ... 9
2.3. Calorimetría ... 9
2.3.1. Calorimetría adiabática ... 10
2.3.2. Calorímetro ... 11
2.3.3. Métodos de operación en calorimetría adiabática ... 11
2.4. Diseño para la Fabricación y el Ensamblaje ... 12
2.5. Incertidumbre ... 14
3. OBJETIVOS ... 16
3.1. Objetivos principales ... 16
3.2. Objetivos secundarios ... 16
4. REVISIÓN DE OPCIONES DE DISEÑO EXISTENTES ... 17
5. REQUISITOS DE DISEÑO ... 19
6. DISEÑO CONCEPTUAL ... 20
6.1. Materiales ... 20
6.2. Tamaños ... 24
6.3. Contornos ... 24
6.4. Procesos de fabricación en serie posibles ... 26
7. ELECCIÓN DE SOLUCIÓN EN BASE AL DFMA ... 28
7.1. Análisis de coste ... 28
7.2. Análisis de tiempos ... 28
7.3. Análisis de impacto ambiental ... 31
7.4. Fuentes de incertidumbre del sistema de medida ... 34
8. PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DE DETALLE E INGENIERÍA ... 38
8.1. Prototipos ... 38
8.2. Resistencia térmica ... 39
8.3. Análisis térmico ... 42
8.4. Impresión 3D ... 48
9. DEFINICIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ... 51
9.1. Ensayo ... 51

9.2. Curva de calibración 57
10. RECOMENDACIONES 59
11. CONCLUSIONES 60
12. PLANOS 62
13. ANEXOS 63
13.1. Anexo I. Análisis LCA con SolidWorks 63
13.2. Anexo II. Análisis térmico con SolidWorks 66
13.3. Anexo III. Diagrama de conexión y código Arduino para sensor de temperatura DS18B20 72
13.4. Anexo IV. Ficha técnica PETG 74
Bibliografía 75

Índice de figuras

Figura 2.1. Calorímetro de hielo [1] 8
Figura 2.2. Partes principales del calorímetro adiabático 11
Figura 4.1. Diseños de calorímetros adiabáticos del mercado [4] [5] [6] 17
Figura 6.1. Propiedades térmicas PETG 21
Figura 6.2. Calorímetro cilíndrico 25
Figura 6.3. Calorímetro esférico 25
Figura 6.4. Calorímetro cónico 26
Figura 7.1. Medidor eléctrico de consumo 34
Figura 7.2. Báscula de precisión 35
Figura 8.1. Tapa del calorímetro 39
Figura 8.2. Diagrama de resistencias térmicas - Calorímetro cilíndrico sin vacío 40
Figura 8.3. Diagrama de resistencias térmicas - Calorímetro cilíndrico con vacío 41
Figura 8.4. Ultimaker S5 con prototipo 49
Figura 8.5. Información y ajustes de impresión del PETG 49
Figura 8.6. Recipiente y tapa impresos en PETG 50
Figura 8.7. Calorímetro ensamblado 50
Figura 9.1. Pantalla principal del software Pronterface 52
Figura 9.2. Cartucho metálico con resistencia calefactora y termopar 53
Figura 9.3. Agitador 53
Figura 9.4. Calorímetro preparado para el ensayo 54
Figura 9.5. Cilindro de aluminio 56
Figura 9.6. Energía aportada frente a masa por diferencia de temperaturas 57
Figura 9.7. Curva de calibración del sistema 58
Figura 13.1. Selección del material 63
Figura 13.2. Fabricación 64
Figura 13.3. Utilización 64
Figura 13.4. Transporte 65
Figura 13.5. Fin de vida útil 65
Figura 13.6. Importación del sólido a SolidWorks 66
Figura 13.7. Propiedades del estudio térmico 67
Figura 13.8. Definición del material 68
Figura 13.9. Carga/restricción de temperatura 69

Figura 13.10. Carga/restricción de convección 70
Figura 13.11. Malla fina 71
Figura 13.12. Diagrama de conexión [11] 72
Figura 13.13. Diagrama real 72

Índice de tablas

Tabla 6.1. Propiedades de diferentes polímeros 21
Tabla 6.2. Matriz de Decisión 22
Tabla 6.3. Matriz de Decisión normalizada..... 23
Tabla 6.4. Resultados obtenidos 23
Tabla 7.1. Resumen de costes 28
Tabla 7.2. Tiempos de manipulación [7] 29
Tabla 7.3. Tiempos de inserción para componentes no aseguradas [7] 30
Tabla 7.4. Tiempos de inserción para componentes aseguradas [7] 30
Tabla 7.5. Tiempos de manipulación, inserción y DFA..... 31
Tabla 7.6. Resoluciones del sensor de temperatura DS18B20 35
Tabla 7.7. Resolución y varianza estimada de los equipos de medida 36
Tabla 8.1. Prototipos 38
Tabla 8.2. Resistencias térmicas..... 41
Tabla 8.3. Resultados térmicos - Cilíndrico sin vacío 43
Tabla 8.4. Resultados térmicos - Cilindro con vacío..... 44
Tabla 8.5. Resultados térmicos - Esférico sin vacío 45
Tabla 8.6. Resultados térmicos - Esférico con vacío..... 46
Tabla 8.7. Resultados térmicos – Cónica 48
Tabla 9.1. Ficha de valores experimentales 55
Tabla 9.2. Valores experimentales obtenidos para el agua..... 55
Tabla 9.3. Valores experimentales obtenidos para el cilindro de aluminio 56
Tabla 9.4. Comparación de incertidumbre del sistema..... 58
Tabla 13.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección [9] 70

1. RESUMEN

La Escuela Politécnica Superior de Jaén cuenta con laboratorios asociados a áreas como la de Ingeniería de los Procesos de Fabricación y la de Máquinas y Motores Térmicos donde se realizan diferentes ensayos, a nivel docente e investigador, con la intención de determinar propiedades de los materiales. Dentro de las tareas docentes, se realizan prácticas guiadas en las enseñanzas de grado, máster, así como la realización de trabajos finales de grado/máster.

Por este motivo, en este Trabajo Fin de Máster se pretende diseñar un prototipo que pudiera ser fabricado y empleado en los laboratorios de la Escuela Superior de Jaén, utilizándose para medir el calor específico de diferentes sustancias. Para el diseño de los prototipos se realizó una investigación de diversos calorímetros existentes e incluso puestos a la venta, con el objetivo de observar sus características principales y realizar una estimación del tamaño, contornos y materiales empleados. En función de estas características fundamentales, se comenzó el diseño de los modelos aplicando el DFMA (Design for Manufacturing and Assembly), teniendo en cuenta diferencias geométricas sustanciales en cuanto a la forma interna del calorímetro (cilíndrico, esférico, cónico…), así como la implementación de la impresión 3D para la obtención del prototipo. El material seleccionado se escogió comparando, dentro de la familia de polímeros apta para la impresión 3D, varias propiedades normalizadas para poder decidir cuál de las alternativas era la óptima.

Finalmente, se realizó el prototipo mediante impresión 3D, de forma rápida y económica para poder ejecutar los ensayos pertinentes. Con estos ensayos se pudo obtener la incertidumbre en la medida del calorímetro, así como su curva de calibración.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Antecedentes

La palabra calorimetría deriva de la palabra latina *calor* y la palabra griega *μέτρον* (metrón), que significa medida. Los trabajos experimentales en esta tema fueron impulsados a finales del siglo XVIII siendo el científico escocés Joseph Black (1728 – 1799) el primero en establecer la distinción entre calor (cantidad de energía) y temperatura (nivel térmico), e introdujo además conceptos como el calor específico y el calor latente de un cambio de estado. Es por esto que se le considera el fundador de la ciencia de la calorimetría [1].

Los experimentos realizados por Joseph Black eran a presión constante cuando se trataba de líquidos y a volumen constante cuando se trataba de gases. Debido a esto el trabajo intercambiado por el sistema con el exterior era siempre despreciable y se originó el pensamiento erróneo de que el calor se conservaba en procesos térmicos, a lo cual se denominó teoría del calórico [1].

El primer calorímetro para medir el calor, fue desarrollado en 1783 por Lavoisier, quien rechazó la teoría del calórico, y Laplace. Utilizándolo midieron el cambio en el calor de un cuerpo caliente, para fundir una cantidad de hielo; se esperaba hasta que el cuerpo caliente estuviera a la temperatura del hielo, y después se determinaba la masa del hielo derretido [1].

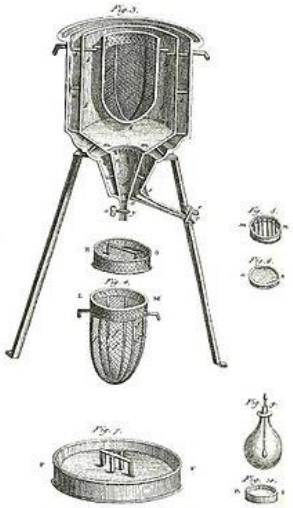


Figura 2.1. Calorímetro de hielo [1]

Sus cálculos fueron basados en el descubrimiento previo de calor latente de Joseph Black, siendo estos experimentos los que marcaron los cimientos de la termoquímica [1].

2.2. Propiedades térmicas

Es fundamental conocer, al menos de forma general, las principales propiedades térmicas que tienen relación con el trabajo propuesto de manera que se entienda su procedencia y sus características principales. A continuación, se expondrán las más importantes, realizando una explicación de cada una de ellas:

- **Capacidad calorífica,** *C*, definida como la energía necesaria para hacer variar en 1 K la temperatura de un mol de material.
- **Calor específico,** *c*, siendo utilizado más comúnmente en la ingeniería de materiales y definido como la energía necesaria para hacer variar en 1 K la temperatura de un gramo de material. La relación entre el calor específico y la capacidad calorífica viene dada por la siguiente expresión:

$$c = \frac{C}{m} \tag{1}$$

- **Conductividad térmica,** *k*, siendo la propiedad de los materiales que determina la velocidad a la que el calor se transmite en el material.
- **Resistencia térmica,** *R*, definida como la capacidad del material a oponerse al flujo de temperatura.
- **Entalpía,** *h*, siendo la cantidad de calor que un sistema termodinámico libera o absorbe del entorno que lo rodea cuando está a una presión constante.

Estas propiedades se observarán a lo largo de la memoria, siendo muy importante tener en cuenta su definición para comprender su propósito y función en el rediseño del calorímetro adiabático.

2.3. Calorimetría

La calorimetría es una rama de la ciencia que estudia el intercambio de calor, en diferentes procesos, mediante un instrumento denominado calorímetro, que mide el

cambio de energía en un sistema al operar un proceso, ya sea físico, químico o biológico [1].

La construcción de estos aparatos de medida permite entender la ciencia de la energía y sus transformaciones a través de un experimento muy simple pero que requiere del conocimiento de ciertos conceptos como; capacidad calorífica, entalpía, poder calorífico, potencia térmica, etc [1].

Existen diferentes tipos de calorímetros, de flujo, isoperbólico, adiabático y otros, que se utilizan de forma indirecta como el método láser flash o el calorímetro fotoacústico. Cada uno de estos tipos será adecuado para determinar una propiedad específica y están orientados a un medio determinado [1].

En cuanto a las diferentes técnicas calorimétricas utilizadas (a excepción de la adiabática) se pueden mencionar algunas de ellas como son; de combustión, de alta temperatura, de solución, láser flash, isotérmica, diferencial de barrido, de inmersión, fotoacústica, de flujo, isoperbólica, etc. Sin embargo, este Trabajo Fin de Máster se centra en la calorimetría adiabática [1].

2.3.1. Calorimetría adiabática

En un calorímetro adiabático se parte de la premisa de evitar la transferencia de calor entre las paredes del mismo y el exterior, para establecer condiciones adiabáticas. Obviamente, esto es una aproximación de la situación ideal, pues en la realidad es imposible que el calorímetro sea completamente adiabático debido a la falta de control de los alrededores, aislamiento del dispositivo, etc [1].

Un calorímetro adiabático se aproximará al modelo ideal cuanto más reducido sea el intercambio de calor entre las paredes y sus alrededores. Esto se puede conseguir aplicando diferentes soluciones:

1. Minimizar la diferencia de temperatura entre el calorímetro y sus alrededores.
2. Minimizar el coeficiente de transferencia de calor (mejorar el aislamiento).
3. Minimizar el tiempo en el que se intercambia calor.

Las pérdidas de calor son las que ocasionan errores de exactitud en la medición y, por tanto, debe elegirse entre tener fugas de calor importantes pero calculables e

introducirlas en el modelo o, por otra parte, intentar eliminarlas de manera que sean tan reducidas que puedan despreciarse.

2.3.2. Calorímetro

Las partes principales que conforman un calorímetro adiabático, de forma genérica, son:

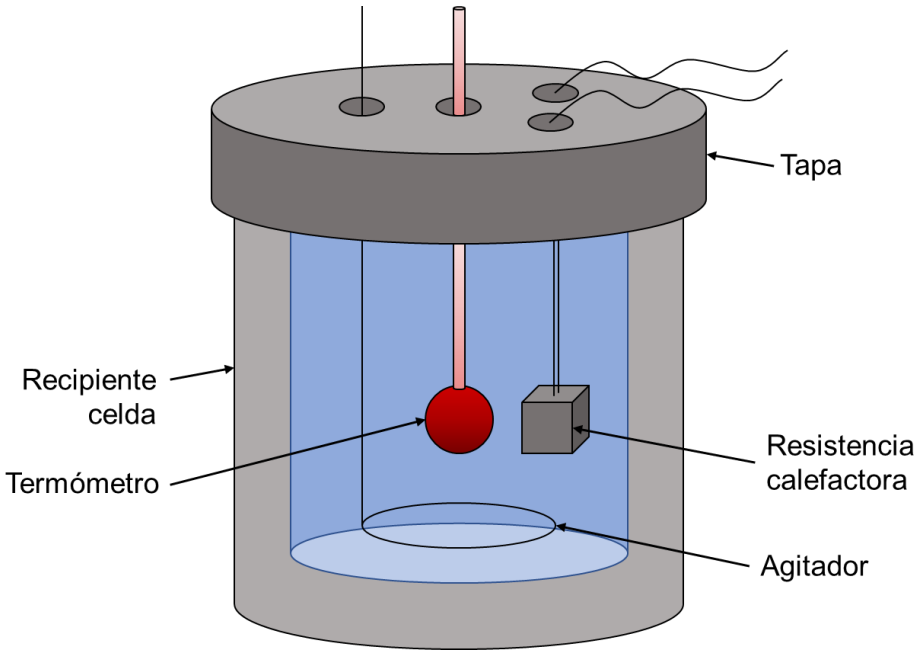


Figura 2.2. Partes principales del calorímetro adiabático

1. Un recipiente (celda), la cual puede tener diferentes formas de aislamiento.
2. Una tapa con orificios donde se introducirá la instrumentación.
3. Un termómetro para medir los cambios de temperatura.
4. Un calefactor (resistencia eléctrica conectada a una fuente controlable de tensión).
5. Un agitador para mejorar la homogeneización de la temperatura en el caso de experimentar con un líquido.

2.3.3. Métodos de operación en calorimetría adiabática

En calorimetría adiabática se utilizan fundamentalmente dos métodos de calentamiento, el continuo y el intermitente [1].

El método a utilizar en este trabajo es el de calentamiento continuo, y consiste en que la sustancia se calienta aplicando una energía constante hasta alcanzar una

temperatura deseada, registrando los valores. El calor específico de la sustancia se puede determinar, entonces, a partir de:

$$c_{\mathrm{p}} = \frac{Q}{m\Delta T} \tag{2}$$

Donde:

Q = calor suministrado al calorímetro mediante fuente de tensión regulada.

m = masa de sustancia en el interior del calorímetro.

ΔT = diferencia de temperatura (antes y después del calentamiento).

El calor aportado puede calcularse como sigue:

$$Q = IV\tau \tag{3}$$

Donde:

I = corriente eléctrica que circula por la resistencia.

V = tensión aplicada mediante la fuente regulada.

τ = tiempo de duración del calentamiento.

El método de calentamiento intermitente, por otro lado, consiste en mantener las paredes del calorímetro a la misma temperatura bajo condiciones adiabáticas (de forma ideal). Entonces, se procede a calentar la sustancia con una cantidad de energía constante en un intervalo de tiempo dado. Se apaga el calefactor y se realiza la medición cuando los efectos transitorios del calentamiento hayan desaparecido.

2.4. Diseño para la Fabricación y el Ensamblaje

Para realizar el rediseño de calorímetro adiabático objeto de este trabajo se va a aplicar la filosofía del Diseño para la Fabricación y el ensamblaje (del inglés Design for Manufacturing and Assembly, DFMA). Se trata de un proceso proactivo de diseño basado en la utilización de diferentes metodologías y técnicas que permiten mejorar

el diseño de un producto o el rediseño del mismo. El objetivo principal es generar un ambiente en el cual los equipos multidisciplinares trabajen juntos para optimizar el diseño del proceso de fabricación del producto.

Los principios fundamentales del DFMA son [2]:

1. Minimizar el número de piezas.
2. Minimizar el número de tornillos o piezas de fijación.
3. Estandarización.
4. Evitar el uso de componentes complejos.
5. Minimizar la reorientación.
6. Usar características de auto localización.
7. Evitar el uso de herramientas especiales o equipo especial de testeo.
8. Permitir accesibilidad.
9. Minimizar el número de operaciones y pasos del proceso.
10. Usar submontajes modulares.
11. Usar partes multifuncionales.

Los beneficios obtenidos de aplicar el DFMA son [2]:

- Periodos de desarrollo menores.
- Costes de desarrollo reducidos.
- Mejora la transición a fabricación del producto.
- Disminuye el número de partes que se deben contar.
- Promueve el trabajo en equipo.
- Simplifica los procesos de montaje.
- Mejora la calidad de fabricación.
- Reduce los costes de fabricación.

El DFMA puede implementarse en diferentes fases o etapas, como son la de concepción, desarrollo y revisión del diseño preliminar.

En la fase de **concepción** ayuda a visualizar el producto de forma amplia. Además, no se debe tratar de afinar el diseño, si no tener una idea más generalizada del mismo, sin detalles. Debido a esto, permite considerar los efectos de fabricación de diferentes tecnologías [2].

En la fase de **desarrollo** es donde más importante es aplicar el DFMA y durante la misma se producen cambios considerables que permiten obtener ahorros importantes [2].

En la **revisión del diseño preliminar** el diseño está fijado, pero aún puede verse sometido a ahorros, sin embargo, no se deben implementar cambios mayores si no afinar las características ya implementadas [2].

2.5. Incertidumbre

Además de rediseñar el calorímetro se va a realizar su puesta a punto y se va a realizar un estudio preliminar de la calidad de la medida a través de la estimación de incertidumbre de la curva de calibración. Cuando se presenta el resultado de una medición de una cantidad física, es obligatorio dar una indicación de la calidad del resultado obtenido para que aquellos que la usen conozca su fiabilidad. Sin esta indicación, los resultados de las mediciones no pueden ser comparados, ya sea entre ellos o respecto a valores otorgados por un patrón [3].

Por ello, se introduce el concepto de incertidumbre como un atributo cuantificable. La palabra “incertidumbre” significa duda y en su sentido amplio “incertidumbre de la medida” significa duda sobre la validez del resultado de una medición [3].

En la mayoría de casos, el mesurando Y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras N magnitudes X_1, X_2, …, X_N, mediante una relación funcional f.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \tag{4}$$

Donde:

Y = magnitud de salida del mesurando o medida a determinar.

X_i = magnitudes de entrada que permiten obtener el valor del mesurando.

f = función de transferencia o función modelo.

En general, el resultado de la medición sólo será una estimación del valor del mesurando, estando completo cuando se acompañe de la incertidumbre de dicha estimación.

A la hora de modelar la incertidumbre estándar, se ha de tener en cuenta los tipos que existen:

- **Tipo A:** cuando bajo las mismas condiciones de medida, se han realizado N observaciones independientes.
- **Tipo B:** cuando su valor se establece o se calcula en base a la información disponible, como pueden ser los datos del fabricante.

Determinando los tipos de incertidumbre de cada magnitud de las que depende el mesurando, se puede calcular la incertidumbre estándar combinada del sistema medida. Esto se realizará posteriormente, en el apartado 7.4.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos principales

- Rediseñar un calorímetro adiabático mediante reglas de diseño para la fabricación.
- Estimar el coste, tiempo de ensamblaje, impacto ambiental y fuentes de incertidumbre de los modelos candidatos.
- Definir la calibración del sistema escogido.

3.2. Objetivos secundarios

- Definición de requisitos de diseño en función de diferentes condiciones de contorno.
- Estudio térmico mediante simulación por ordenador de los prototipos.

4. REVISIÓN DE OPCIONES DE DISEÑO EXISTENTES

Antes de comenzar a diseñar conceptualmente el calorímetro adiabático, es interesante hacer una investigación de los diseños ya existentes en el mercado. De esta manera, se pueden observar las características más importantes que comparten entre sí, así como los elementos que los componen. A continuación, se exponen algunos ejemplos de calorímetros encontrados a la venta:

Figura 4.1. Diseños de calorímetros adiabáticos del mercado [4] [5] [6]

De los calorímetros expuestos se pueden observar las siguientes características:

- Todos tienen forma cilíndrica, tanto interior como exterior y las paredes son gruesas, de material aislante para evitar las pérdidas de flujo de calor y acercar lo máximo posible las condiciones adiabáticas ideales.
- La altura es variable, oscilando entre los 10 y 25 cm, mientras que el diámetro exterior permanece aproximadamente constante, de unos 10 cm. La variación de la altura provoca que el volumen interno del calorímetro también sea distinto.
- Todos tienen los mismos elementos en común, que se corresponden con los expuestos en el subapartado 2.3.2. siendo éstos el recipiente, la tapa con

orificios para introducir la instrumentación, termómetro, calefactor y el agitador.

A partir de las características expuestas, se puede comenzar a pensar en los requisitos de diseño que deberá cumplir el calorímetro adiabático.

5. REQUISITOS DE DISEÑO

En este capítulo se van a abordar los requisitos de diseño que debe cumplir el calorímetro adiabático, no sólo para que sea funcional, sino para que también cumpla con los principios del DFMA. Los requisitos principales se enumeran a continuación:

1. El o los prototipos han de poder reproducirse mediante impresión 3D, de esta manera se podrán fabricar rápidamente, con un coste reducido y servirán para realizar la experimentación correspondiente.
2. Debido al punto 1, el material escogido para la realización del calorímetro ha de ser compatible con la impresión 3D. Además, ha de ser lo suficientemente aislante como para poder despreciar las pérdidas de flujo de calor a través de las paredes.
3. El tamaño del calorímetro será comedido, no superando los 15 cm de altura ni diámetro exterior, fijando un volumen interno de aproximadamente 250 ml independientemente de la forma interna. De esta manera se evita que el tiempo de impresión sea excesivamente elevado, además de ahorrar material.
4. El calorímetro estará provisto del recipiente, así como la tapa perforada con los orificios necesarios para la instrumentación. Ésta última constará de los siguientes elementos:
    a. **Sensor de temperatura:** se sustituirá el termómetro por un sensor de temperatura con mejor precisión.
    b. **Calefactor:** se utilizará un cartucho con resistencia eléctrica y termopar para controlar la temperatura.
    c. **Agitador:** para homogeneizar la temperatura del interior del calorímetro cuando la sustancia sea un líquido.
5. El sistema de captación de datos estará constituido por una placa tipo Arduino o similar, que permita obtener los datos de temperatura interior, así como el tiempo transcurrido.

Con los requisitos de diseño definidos, se puede proceder con el diseño conceptual del calorímetro.

6. DISEÑO CONCEPTUAL

Como se ha comentado en el apartado 2.3 donde se han definido los principios del DFMA y en que etapas se aplica, ésta se corresponde con la de concepción, donde no se detalla de forma precisa el diseño del calorímetro. Sin embargo, sí se debe tener una visión general del mismo en la que se puedan discernir diferentes parámetros como son: materiales a utilizar, tamaños del calorímetro, contornos y formas y, por último, procesos de fabricación posibles, de manera que se ajuste a los requisitos de diseño expuestos en el capítulo anterior.

Es importante tener en cuenta que desde esta fase ya se contempla la realización de cuatro prototipos diferenciados.

6.1. Materiales

La selección del material adecuado con el que fabricar el calorímetro es de suma importancia ya que de éste van a depender en gran parte las pérdidas de flujo de calor producidas durante el calentamiento. Para seleccionar el material óptimo a utilizar se tuvieron en cuenta cuatro parámetros que se consideraron fundamentales, siendo éstos:

- **Conductividad térmica:** cuanto menor sea, más se opondrá el material al paso de calor, aproximando el calorímetro el modelo ideal adiabático.
- **Absorción de agua:** puesto que se va a experimentar con líquidos, es de suma importancia que la absorción de agua por parte del material sea lo más reducida posible.
- **Huella de carbono:** es importante que el dióxido de carbono producido durante la fabricación del material sea lo más reducido posible para disminuir el impacto ambiental.
- **Precio:** cuanto más reducido sea el precio del material, mayor ahorro económico se obtiene en el desarrollo del diseño.

Utilizando un software (CES Edupack 2019) que contiene una base de datos con materiales de todo tipo, se recopiló la información necesaria de diferentes polímeros aptos para la impresión 3D, atendiendo a los parámetros anteriormente mencionados. A continuación, se puede observar un ejemplo:

General information

Designation

PETG (Unfilled)

Tradenames

Eastar, Eastman Provista, Skygreen, Stat-Rite

Typical uses

Pharmaceutical, medical device, food-contact and personal care packaging, machine guards, electrical device packing.

Thermal properties

Glass temperature		81	-	91	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa		68	-	72	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa		62	-	64	°C
Maximum service temperature		* 51	-	64	°C
Minimum service temperature		* -55	-	-35	°C
Thermal conductivity		* 0,257	-	0,267	W/m.°C
Specific heat capacity		* 1,47e3	-	1,53e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient		* 120	-	123	µstrain/°C
Thermal shock resistance		* 190	-	213	°C
Thermal distortion resistance		* 0,00211	-	0,0022	MW/m

Figura 6.1. Propiedades térmicas PETG

Una vez obtenida toda la información necesaria de los polímeros seleccionados, se resumen en una tabla y se procede a realizar el estudio para tomar una decisión.

Parámetros	**Precio** (€/kg)	**k** (W/m·ºC)	**% absorción**	**CO2 F** (kg/kg)
ABS (extrusión)	2,77	0,235	0,45	3,61
PC (10% - 15%)	4,88	0,278	0,143	5,53
Nylon 6	3,16	0,25	0,8	8,1
PETG	1,31	0,151	0,18	2,86

Tabla 6.1. Propiedades de diferentes polímeros

Sin embargo, seleccionar un material atendiendo a cuatro parámetros diferenciados se hace imposible de manera inmediata. Para poder comparar los distintos materiales entre sí y todas sus propiedades al mismo tiempo, se ha de realizar una normalización de los parámetros ajustándolos todos a la misma escala y con los resultados, tomar la decisión final.

A este proceso se le denomina *Dimensionless Ranking* (ranking adimensional). Se elabora una Matriz de Decisión planteando las distintas alternativas y se otorga un peso a cada uno de los parámetros expuestos, que se denominarán a partir de ahora criterios. Se valora cuales de ellos han de minimizarse o maximizarse y, para finalizar, se realiza la normalización en escala 0 a 1, para poder realizar la comparación en igualdad de condiciones. A continuación, se presenta la Matriz de Decisión con los pesos otorgados a cada criterio y sus valoraciones (minimizar o maximizar).

Criterio	**Precio** (€/kg)	**k** (W/m·ºC)	**% absorción**	**CO2 F** (kg/kg)
Peso	1	1,5	1	1,5
Alternativas	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar
ABS (extrusión)	2,77	0,235	0,45	3,61
Nylon 6	3,16	0,25	0,8	8,1
PC (10% - 15%)	4,88	0,278	0,143	5,53
PETG	2,32	0,267	0,143	4,59

Tabla 6.2. Matriz de Decisión

En este caso, tal y como se observa en la Matriz de Decisión. Todos los criterios han de minimizarse, por tanto, lo habitual es dividir cada uno de los valores por el mejor de ellos (en este caso, el mínimo), obteniendo así que el mejor valor vale 1 y los demás se sitúan en valores proporcionales en la escala 0 a 1.

También es habitual normalizar los pesos asignados a cada criterio para que la suma de ellos sea la unidad. De esta forma, se divide cada uno de los pesos por la suma de todos, sin embargo, esto no tiene ningún efecto en la ordenación final, pero permite expresar todos los valores de la Matriz de Decisión en escala 0 a 1.

Criterio	Precio (€/kg)	k (W/m·ºC)	% absorción	CO2 F (kg/kg)
Peso	0,200	0,300	0,200	0,300
Alternativas	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar
ABS (extrusión)	0,84	1,00	0,32	1,00
Nylon 6	0,73	0,94	0,18	0,45
PC (10% - 15%)	0,48	0,85	1,00	0,65
PETG	1,00	0,88	1,00	0,79

Tabla 6.3. Matriz de Decisión normalizada

Por último, y para poder tomar la decisión, se realizan las técnicas de decisión multicriterio siguientes:

- **Suma ponderada:** es el método más intuitivo y sencillo de aplicar.
- **Producto ponderado:** el uso de este método penaliza a las alternativas cuyas valoraciones de los distintos criterios sean muy dispares. No se mantiene la escala 0 a 1, por lo que dificulta la observación de los resultados.
- **Producto exponencial ponderado:** es análogo al anterior, pero los resultados se observan con mayor facilidad, pues se mantienen entre 0 y 1.

Material	Suma Pond.	Prod. Pond.	Prod. Exp. Pond.
ABS (extrusión)	0,8311	0,0010	0,7674
PC (10% - 15%)	0,5983	0,0002	0,5132
Nylon 6	0,7445	0,0009	0,7210
PETG	0,9000	0,0025	0,8955

Tabla 6.4. Resultados obtenidos

Tal y como se puede observar en la Tabla 6.4, el material con mejores resultados es el PETG. Algunas de las ventajas de este polímero se enumeran a continuación:

- Es más sencillo trabajar con el PETG (polietilenotereftalato) que con el PET gracias al glicol, que evita que el material se cristalice y rompa.
- Es altamente resistente a la temperatura. Ideal para envases.
- Excelente característica al bloqueo de la humedad.
- Excelente adhesión entre capas, evitando deformaciones y encogimientos.
- Mejores propiedades que el PLA y el ABS, más resistente a la temperatura y más fácil de trabajar.
- Es 100 % reciclable. Las impresiones erróneas pueden ser reprocesadas.
- Puede ser transparente.

6.2. Tamaños

El tamaño del calorímetro dependió fundamentalmente de tres parámetros principales.

- Volumen interior del calorímetro.
- Espesor de pared.
- Altura máxima de impresión.

Como se ha comentado con anterioridad, el volumen interior se fijó en 250 ml aproximadamente. Por tanto, la geometría interna del mismo queda definida. El espesor de pared es un parámetro fundamental pues afectará directamente a la resistencia térmica y aislamiento del calorímetro. Por otro lado, la altura máxima de impresión es una condición de contorno limitante, pues no se pueden imprimir piezas de cualquiera tamaño en cualquier impresora.

6.3. Contornos

En un calorímetro adiabático el aislamiento, como ya se ha comentado, es una de las posibles soluciones para intentar eliminar la mayor parte de las pérdidas de calor que provocan errores en la medición. Por tanto, se puede mejorar el aislamiento mediante la modificación de la geometría interna del propio calorímetro. De ésta depende la resistencia térmica de las paredes del calorímetro y, por tanto, el flujo de temperatura desde el interior del calorímetro hacia el exterior se verá modificado.

En las primeras fases del diseño, de forma general, se plantearon tres posibles geometrías:

- **Cilíndrica:** el calorímetro, tanto externa como internamente, tiene geometría cilíndrica.

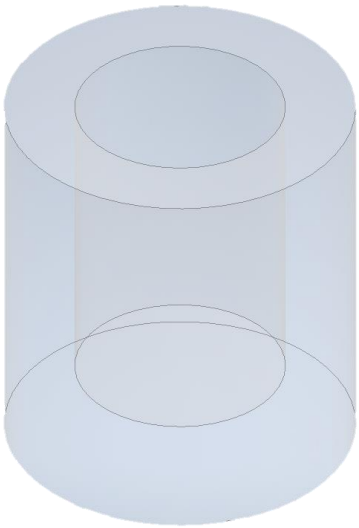


Figura 6.2. Calorímetro cilíndrico

Esta es la geometría más simple (y fácil de fabricar) de un calorímetro. Tal y como se ha comentado en el capítulo 5, la mayoría de los calorímetros adiabáticos existentes poseen esta geometría.

- **Esférica:** análogamente al anterior, el calorímetro tiene forma esférica.

Figura 6.3. Calorímetro esférico

En un principio, tal y como se observa en la Figura 6.3, la geometría esférica estaba presente tanto en el exterior como en el interior del calorímetro. Sin embargo, esto dificultaba en gran medida su posible fabricación, además de necesitar componentes externos (soporte). Esto va en contra de algunos de los principios fundamentales del DFMA y, por tanto, se decidió modificar la geometría externa del mismo. De esta manera, siendo esférico únicamente el interior, se produce un ahorro de material importante, ya que un soporte no es necesario y, además, se puede reutilizar la misma tapa para el calorímetro cilíndrico y esférico.

- **Cónica:** de la misma manera, el calorímetro tiene forma cónica.

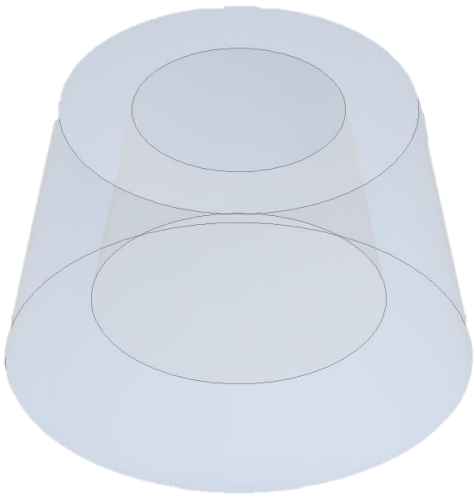


Figura 6.4. Calorímetro cónico

La geometría cónica es una derivación de la cilíndrica, ya que se parte de ésta última, añadiendo un pequeño ángulo de inclinación a las caras exteriores e interiores del calorímetro. Finalmente, esta posibilidad se descartó, ya que no permitía utilizar la misma tapa que para el resto de prototipos y su aislamiento era menor, como se observará en apartados posteriores.

6.4. Procesos de fabricación en serie posibles

De los procesos de fabricación aplicables al PETG, excluyendo la impresión 3D que es la utilizada para obtener el prototipo, destacan dos fundamentalmente.

- **Inyección soplado:** siendo un proceso utilizado para la fabricación de piezas de plástico huecas a gran escala. El polímero es inyectado en una preforma

inicial y luego, esta preforma se ubica en la estación de moldeo por soplado, donde se infla y enfría. El proceso se divide en tres pasos principales: inyección, soplado y expulsión. El problema de este método de fabricación es que las paredes de la forma final son demasiado finas, pues se utiliza principalmente para fabricar envases. Por tanto, no es viable para la fabricación del calorímetro.

- **Moldeo por inyección:** este proceso consiste en inyectar el polímero en estado fundido en un molde cerrado a presión a través de un orificio. El polímero se solidifica y la pieza final se obtiene al abrir el molde y extraerla de la cavidad. Este proceso si es compatible con la fabricación del calorímetro, pues se puede realizar un molde adecuado que permita su extracción.

7. ELECCIÓN DE SOLUCIÓN EN BASE AL DFMA

7.1. Análisis de coste

Este análisis estará compuesto por una estimación del coste de fabricación del prototipo, incluidos los materiales, proceso de impresión, electrónica, etc. En la siguiente tabla vienen resumidos estos costes:

Material	**Precio**
PETG	25,40 €
Componente	**Precio**
2 x Sensor DS18B20	5,79 €
Electricidad	**Precio**
19 h 39 min / máx. 500 W 0,5 kW · 19,65 h = 9,825 kWh	0,24 €/kWh · 9,825 kWh = 2,358 €
TOTAL	**33,548 €**

Tabla 7.1. Resumen de costes

El precio total es comedido. Si se compara con los de calorímetros puestos a la venta, su precio varía desde los 32 € hasta los 140 € en calorímetros de mayor calidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la bobina de PETG no se agotó por completo, es decir, se pueden obtener hasta tres calorímetros más para el mismo gasto económico de material.

7.2. Análisis de tiempos

En este análisis se realiza una estimación de los tiempos de manipulación e inserción de los componentes que conforman el calorímetro. Los elementos manipulados y ensamblados se corresponden con la tapa, componentes electrónicos, sensores, etc.

Para su realización se aplicó la metodología Boothroyd [7] para estimación de tiempos, técnica concebida como método de diseño para ensamblaje. Para poder indicar cuan sencillo es ensamblar un componente se utiliza el Design for Assembly Index (*DFA-Index*), que se expresa como:

$$DFA = \frac{3 \cdot N}{t_{\mathrm{ma}}} \tag{5}$$

Donde:

N = número de componentes esenciales.

T_{ma} = tiempo real de ensamblaje.

Este índice compara el tiempo ideal (considerado como 3 s por componente) para ensamblar un producto con un número esencial de componentes N, con una estimación del tiempo real de ensamblaje t_{ma} que, como se ha comentado, incluye los tiempos de manipulación e inserción. Cuanto mayor sea este índice, más fácil será la operación de ensamblado.

Utilizando las siguientes tablas codificadas, se estimaron los tiempos de manipulación e inserción de cada uno de los componentes.

Key: One hand

Parts can be grasped and manipulated by one hand without the aid of grasping tools		Parts are easy to grasp and manipulate					Parts present handling difficulties (1)				
		Thickness >2 mm			Thickness ≤2 mm		Thickness >2 mm			Thickness ≤2 mm	
		Size >15 mm	6 mm ≤ size >15 mm	Size <6 mm	Size >6 mm	Size ≤6 mm	Size >15 mm	6 mm ≤ size ≤15 mm	Size <6 mm	Size >6 mm	Size ≤6 mm
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	(α+β) < 360°	0	1.13	1.43	1.88	1.69	2.18	1.84	2.17	2.65	2.45	2.98
	360° ≤ (α+β) < 540°	1	1.5	1.8	2.25	2.06	2.55	2.25	2.57	3.06	3	3.38
	540° ≤ (α+β) < 720°	2	1.8	2.1	2.55	2.36	2.85	2.57	2.9	3.38	3.18	3.7
	(α+β) = 720°	3	1.95	2.25	2.7	2.51	3	2.73	3.06	3.55	3.34	4

Tabla 7.2. Tiempos de manipulación [7]

Key: Part added but not secured

Addition of any part (1) where neither the part itself nor any other part is finally secured immediately

- Part and associated tool (including hands) can easily reach the desired location
- Part and associated tool (including hands) cannot easily reach the desired location
  - Due to obstructed access or restricted vision (2)
  - Due to obstructed access and restricted vision (2)

	Alter assembly no holding down required to maintain orientation and location (3)				Holding down required during subsequent processes to maintain orientation at location (3)			
	Easy to align and position during assembly (4)		Not easy to align or position during assembly		Easy to align and position during assembly (4)		Not easy to align or position during assembly	
	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)
	0	1	2	3	6	7	8	9
0	1.5	2.5	2.5	3.5	5.5	6.5	6.5	7.5
1	4	5	5	6	8	9	9	10
2	5.5	6.5	6.5	7.5	9.5	10.5	10.5	11.5

Tabla 7.3. Tiempos de inserción para componentes no aseguradas [7]

Part secured immediately

Addition of any part (1) where the part itself and/or other parts are being finally secured immediately

- Part and associated tool (including hands) can easily reach the desired location and the tool can be operated easily
- Part and associated tool (including hands) cannot easily reach desired location or tool cannot be operated easily
  - Due to obstructed accessor restricted vision (2)
  - Due to obstructed access and restricted vision (2)

	No screwing operation or plastic deformation immediately after insertion (snap/press fits,circlips,spire nuts,etc.)		Plastic deformation immediately after insertion						Screw tightening immediately after insertion	
			Plastic bending or torsion			Riveting or similar operation				
				Not easy to align or position during assembly			Not easy to align or position during assembly			
	Easy to align and position with no resistance to insertion (4)	Not easy to align or position during assembly and/or resistance to insertion (5)	Easy to align and position during assembly (4)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	Easy to align and position during assembly (4)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	Easy to align and position with no torsional resistance (4)	Not easy to align or position and/or torsional resistance (5)
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	2	5	4	5	6	7	8	9	6	8
4	4.5	7.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	8.5	10.5
5	6	9	8	9	10	11	12	13	10	12

Tabla 7.4. Tiempos de inserción para componentes aseguradas [7]

A continuación, se rellena la tabla adjunta con los parámetros mencionados y atendiendo a las tablas anteriores.

1	2	3	4	5	6			Componente
Referencia	**Cantidad**	**Código de manipulación**	**Tiempo de manipulación**	**Código de inserción**	**Tiempo de inserción**	**(2) · ((4) + (6))**	**N**	
1	1	00	1,13 s	00	1,5 s	2,63 s	1	Recipiente
2	1	01	1,43 s	00	1,5 s	2,93 s	1	Cartucho
3	1	00	1,13 s	06	5,5 s	6,63 s	1	Resistencia
4	1	02	1,88 s	06	5,5 s	7,38 s	1	Termopar
5	2	02	1,88 s	08	6 s	15,76 s	0*	Espárragos
6	1	00	1,13 s	00	1,5 s	2,63 s	1	Sensor DS18B20
7	1	00	1,13 s	00	1,5 s	2,63 s	1	Agitador
8	1	00	1,13 s	00	1,5 s	2,63 s	1	Tapa
						43,22 s	**7**	**0,486**
						t_{ma}	**n**	**DFA**

Tabla 7.5. Tiempos de manipulación, inserción y DFA

*La tornillería no se considera como componente esencial.

El resultado final del *DFA-Index* indica un ensamblaje no excesivamente complejo, pero sí con ciertas dificultades, probablemente debidas al reducido tamaño de ciertos componentes y la necesidad de ensamblarlos en una dirección específica.

7.3. Análisis de impacto ambiental

El análisis de impacto ambiental puede realizarse mediante una simulación LCA (del inglés Life Cycle Assesssment) o Evaluación del ciclo de vida. Este proceso específico posee un conjunto estandarizado de pasos, proporcionando un resultado en forma de impacto medioambiental. La evaluación del ciclo de vida, además, parte de las normas ISO 14000 (gestión medioambiental) y que se detalla en las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006 [8].

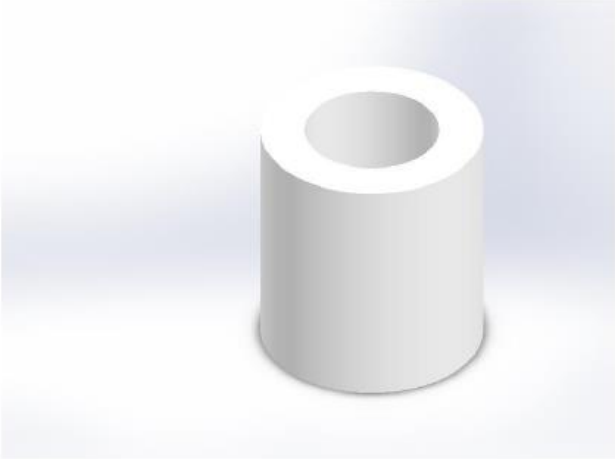
La realización de la simulación, así como los parámetros seleccionados, será explicada en el Anexo I. En este apartado se analizarán los resultados obtenidos de dicha simulación.

[logotipo de la empresa]

SOLIDWORKS
Informe de Sustainability

[nombre de la empresa] [ciudad, provincia/estado] [sitio Web de la empresa]

[nombre] · [cargo] · [correo electronico] · (###) ###-####



Nombre del modelo:	Cilindro
Material:	PET
Contenido reciclado:	0.00 %
Peso:	865.45 g
Proceso de fabricación:	Moldeo por inyección
Área de superficie:	67230.08 mm²
Construido para durar:	10 year
Utilización durante:	10 year

Región de fabricación
La elección de la región de fabricación determina los recursos energéticos y las tecnologías utilizadas en la creación de materiales y las etapas de fabricación del ciclo de vida del producto.

Región de utilización
Se utiliza para determinar los recursos energéticos consumidos durante la fase de utilización del producto, si procede, y el destino del producto al alcanzar el final de su vida útil. Junto con la región de fabricación, la región de utilización también se utiliza para calcular los impactos medioambientales asociados con el transporte del producto desde su lugar de fabricación al de utilización.

Informe de Sustainability

Nombre del modelo:	Cilindro	Material:	PET	Peso:	865.45 g	Proceso de fabricación:	Moldeo por inyección
		Contenido reciclado:	0.00 %	Área de superficie:	67230.08 mm²		
				Construido para durar:	10 year		
				Utilización durante:	10 year		

Material	PET	0.00 %
Coste de la unidad de material	2.20 USD/kg	

Material	PET	0.00 %
Coste de la unidad de material	2.20 USD/kg	

Fabricación

Región:	Europe
Proceso:	Moldeo por inyección
Consumo de electricidad:	1.8E-3 kWh/lbs
Consumo de gas natural:	0.00 BTU/lbs
Tasa de desecho:	2.0 %
Construido para durar:	10 year
Pieza pintada:	No Paint

Utilización

Región:	Europe
Utilización durante:	10 year

Transporte

Distancia en camión:	0.00 km
Distancia en tren:	0.00 km
Distancia en barco:	0.00 km
Distancia en avión:	0.00 km

Fin de la vida útil

Reciclado:	100 %
Incinerado:	0.00 %
Vertedero:	0.00 %

Impacto medioambiental (calculado mediante la metodología de evaluación de impacto CML)

Huella de carbono

3.5 kg CO_2e

Material:	2.6 kg CO_2e
Fabricación:	0.922 kg CO_2e
Transporte:	0.00 kg CO_2e
Fin de la vida útil:	0.00 kg CO_2e

Energía total consumida

88 MJ

Material:	71 MJ
Fabricación:	18 MJ
Transporte:	0.00 MJ
Fin de la vida útil:	0.00 MJ

Acidificación atmosférica

0.011 kg SO_2e

Material:	4.6E-3 kg SO_2e
Fabricación:	6.2E-3 kg SO_2e
Transporte:	0.00 kg SO_2e
Fin de la vida útil:	0.00 kg SO_2e

Eutrofización del agua

6.6E-4 kg PO_4e

Material:	4.3E-4 kg PO_4e
Fabricación:	2.2E-4 kg PO_4e
Transporte:	0.00 kg PO_4e
Fin de la vida útil:	0.00 kg PO_4e

Impacto financiero de los materiales 1.90 USD

El informe que proporciona SolidWorks detalla pormenorizadamente todos los aspectos que afectan al impacto ambiental. Tal y como se puede observar, para una

vida útil de 10 años y teniendo en cuenta un proceso de fabricación de moldeo por inyección los resultados son bastante reducidos. La huella de carbono tiene un valor de 3,5 kg de CO_2 equivalente, siendo gran parte de esta cantidad la del proceso de obtención del propio material.

7.4. Fuentes de incertidumbre del sistema de medida

Durante la experimentación se utilizan distintos aparatos de medida que actúan como fuente de incertidumbre estándar para el sistema. A continuación, se detallarán cuáles son y su implicación:

- **Medidor eléctrico de consumo:** este dispositivo se utiliza para medir la potencia media aportada (P) por de la red para calentar la resistencia calefactora.

Figura 7.1. Medidor eléctrico de consumo

En la Figura 7.1 se puede observar la potencia de vacío, momento en el que aún no se está calentando la resistencia.

- **Báscula de precisión:** es utilizada para medir la masa de sustancia (m) en el interior del calorímetro. Tiene una resolución de 0,01 g.

Figura 7.2. Báscula de precisión

- **Sensor de temperatura DS18B20:** este sensor se utiliza para obtener la temperatura (T) de la sustancia en el interior calorímetro mientras se produce el calentamiento. Éste admite distintas resoluciones, escogiendo la mejor de ellas, con un valor de 0,0625 ºC.

	Resolución	Temperatura
	9-bit	0,5 ºC
	10-bit	0,25 ºC
	11-bit	0,125 ºC
	12-bit	0,0625 ºC

Tabla 7.6. Resoluciones del sensor de temperatura DS18B20

No se ha considerado incertidumbre en la medida del tiempo que transcurre durante el calentamiento desde la temperatura inicial hasta la final.

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.5 de esta memoria, estos equipos de medida tienen una incertidumbre estándar tipo B. Ésta se puede calcular considerando una distribución cuadrada [3]:

$$u = \frac{R}{\sqrt{12}} \tag{6}$$

Donde:

R = resolución del equipo de medida utilizado.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las resoluciones de todos los equipos, así como su varianza estimada, siendo ésta el cuadrado de la expresión anterior:

Equipo	**Resolución (*R*)**	**Varianza estimada (u^2)**
Medidor de consumo	1 W	0,08333 W
Báscula	0,01 kg	$8{,}33 \cdot 10^{-6}$ kg
Sensor de temperatura	0,0625 ºC	$3{,}26 \cdot 10^{-4}$ ºC

Tabla 7.7. Resolución y varianza estimada de los equipos de medida

Una vez obtenidas las varianzas estimadas de los apartados, se puede calcular la combinación de todos ellos, de manera que se obtenga la incertidumbre estándar del sistema de medida. Para ello, se utiliza la siguiente expresión [3]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\delta f}{\delta x_i}\right)^2 u^2(x_i) \tag{7}$$

Donde:

y = estimador de *Y*.

x_i = estimador de *X*.

En este caso, el mesurando es el calor específico, y la función modelo que lo define es:

$$c_p = \frac{P \cdot \Delta \mathrm{t}}{m \cdot \Delta T} - K \tag{8}$$

Por tanto, utilizando la ecuación (7), teniendo en cuenta las magnitudes de la función (8) que permiten determinar el mesurando, se obtiene la combinación de la varianza de todos los equipos de medida.

$$u_c^2(c_p) = \left(\frac{\overline{\Delta t}}{\overline{m\Delta \mathrm{T}}}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{\overline{P\Delta t}}{\overline{\Delta \mathrm{T}}} \cdot \left(\frac{-1}{\overline{m}^2}\right)\right)^2 u^2(m) + \left(\frac{\overline{P\Delta t}}{m} \cdot \left(\frac{-1}{\Delta T^2}\right)\right)^2 u^2(\Delta T) \qquad (9)$$

Si además se quiere añadir la incertidumbre de las propias medidas experimentales respecto al patrón se puede sumar directamente a la ecuación (9) la incertidumbre estándar de las mismas, siendo esta de tipo A y definida como:

$$u^2(K) = \frac{s^2(c_p^0 - c_{p_i})}{n} \qquad (10)$$

Finalmente, la incertidumbre estándar combinada se expresará como la raíz cuadrada de la variación estimada combinada.

$$u_c(c_p) = \sqrt{u_c^2(c_p)} \qquad (11)$$

El resultado final se observará en el apartado 9.2, donde se podrá comparar con la incertidumbre de la curva de calibración.

8. PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DE DETALLE E INGENIERÍA

En este capítulo se detallarán las decisiones tomadas en el diseño elaborado de los prototipos de calorímetro. Se explicarán las decisiones tomadas respecto a las diferencias de los diseños y se justificará mediante los cálculos y simulaciones correspondientes.

8.1. Prototipos

En la siguiente tabla se disponen cuatro prototipos diferenciados por su geometría interna y por la solución aplicada para intentar mejorar el aislamiento.

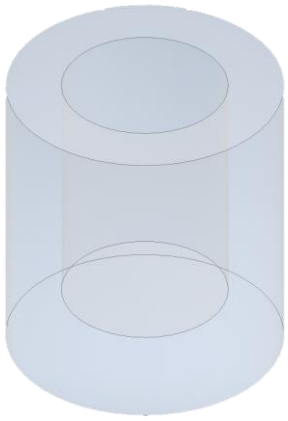
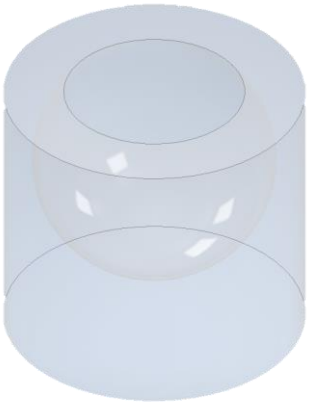
Geometría/Vacío	Sin vacío	Con vacío
Cilíndrica		
Esférica		

Tabla 8.1. Prototipos

Tal y como se puede observar en la tabla 8.1, los cuatro prototipos se muestran de forma semitransparente para poder apreciar tanto su geometría interna, como la existencia de un vacío perimetral como solución para la mejora del aislamiento.

El tamaño general de los calorímetros (altura x diámetro exterior) es 11x10 cm para los cilíndricos y 9x10 cm para lo esféricos. Las medidas detalladas de todas sus características geométricas se pueden observar en los planos de los mismos, en el capítulo 12.

La tapa será universal para los calorímetros, de ahí que su diámetro tanto externo como interno coincidan.

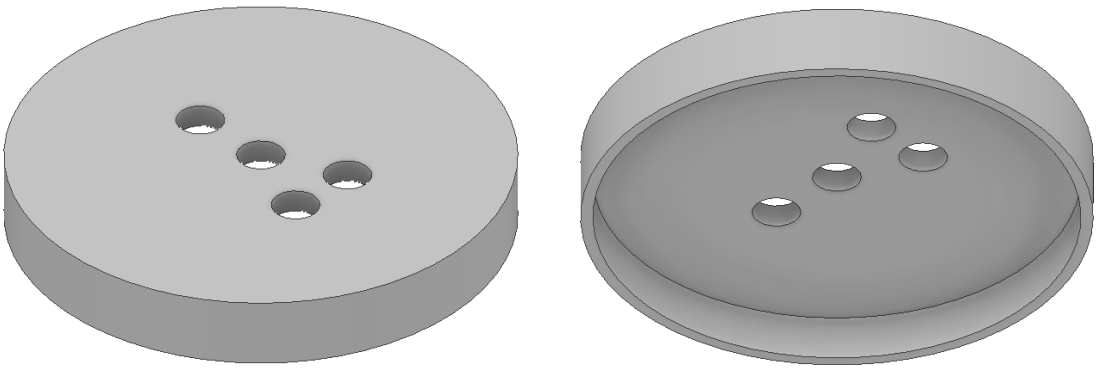


Figura 8.1. Tapa del calorímetro

La decisión de realizar un vacío perimetral de material viene de la importancia del aislamiento de las paredes del calorímetro. Se sabe que el aire es un mal conductor térmico, por tanto, dejando un vacío de aire entre la cavidad donde se aloja la sustancia y las paredes exteriores, de forma teórica, debería aumentar la resistencia térmica y en consecuencia disminuir la transferencia de calor. En definitiva, aumentar el aislamiento del calorímetro. Además esto supone una reducción en el tiempo de fabricación del calorímetro.

8.2. Resistencia térmica

Para demostrar que la resistencia térmica se incrementa ejecutando un vacío perimetral, se pueden realizar cálculos térmicos sencillos utilizando una analogía eléctrica. En este caso y por simplicidad, se utilizará el prototipo cilíndrico.

Si una resistencia eléctrica está relacionada con la conducción de la electricidad, la resistencia térmica está relacionada con la conducción de calor. Para una resistencia térmica elevada, el material será menos conductor del calor, es decir, aislante térmico.

Dependiendo de si la transferencia de calor se produce por conducción o por convección, la resistencia térmica se calculará:

$$R_{cond} = \frac{ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2\pi k_i L} \tag{12}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi L h_i r_i} \tag{13}$$

Donde:

L = longitud del cilindro (altura).

h_i = coeficiente de transmisión de calor por convención en i (siendo i los diferentes materiales o sustancias por donde circula calor).

k_i = conductividad térmica en i (siendo i los diferentes materiales, en este caso siempre será la misma).

r_i = radio en i.

Con las medidas del calorímetro y el siguiente esquema en planta, se puede determinar la resistencia térmica del calorímetro cilíndrico sin vacío como sigue:

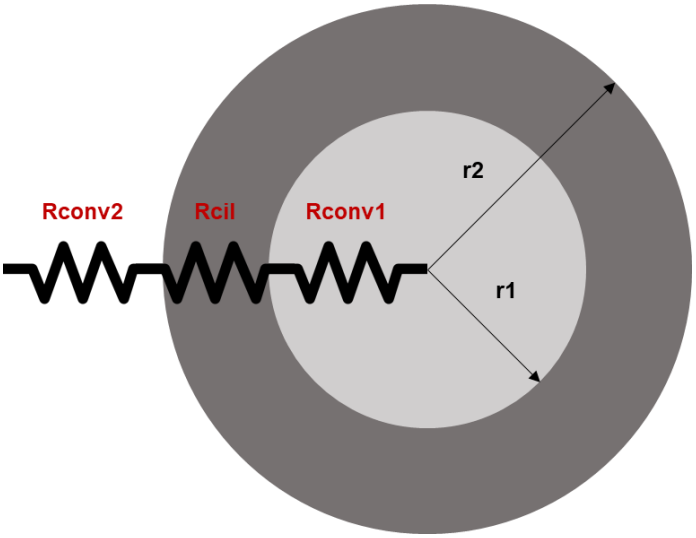


Figura 8.2. Diagrama de resistencias térmicas - Calorímetro cilíndrico sin vacío

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cil} + R_{conv,2} \tag{14}$$

$$R_{total} = \underbrace{\frac{1}{2\pi L h_1 r_1}}_{R_{conv,1}} + \underbrace{\frac{ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}}_{R_{cil}} + \underbrace{\frac{1}{2\pi L h_2 r_2}}_{R_{conv,2}} \tag{15}$$

Por otro lado, la resistencia térmica del calorímetro cilíndrico con vacío se calcula de forma análoga, modificando el diagrama de resistencias térmicas, que queda de la siguiente forma:

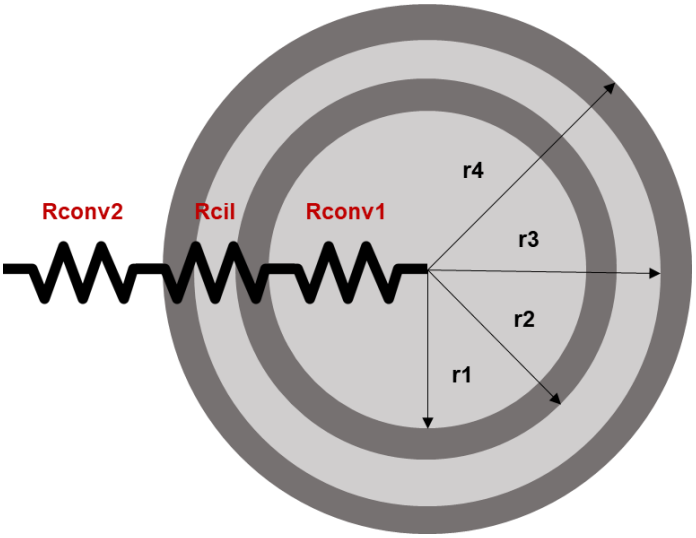


Figura 8.3. Diagrama de resistencias térmicas - Calorímetro cilíndrico con vacío

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cil,1} + R_{cil,2} + R_{cil,3} + R_{conv,2} \tag{16}$$

$$R_{total} = \underbrace{\frac{1}{2\pi L h_1 r_1}}_{R_{conv,1}} + \underbrace{\frac{ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}}_{R_{cil,1}} + \underbrace{\frac{ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_2 L}}_{R_{cil,2}} + \underbrace{\frac{ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k_3 L}}_{R_{cil,3}} + \underbrace{\frac{1}{2\pi L h_4 r_4}}_{R_{conv,4}} \tag{17}$$

Sustituyendo los datos correspondientes, se obtienen los siguientes resultados:

	Resistencia térmica (K/W)
Calorímetro cilíndrico sin vacío	8,399
Calorímetro cilíndrico con vacío	23,792

Tabla 8.2. Resistencias térmicas

A la vista de los resultados expuestos en la tabla 8.2, la inclusión de un vacío perimetral mejora la resistencia térmica del calorímetro en casi un 300%, y consecuentemente, su aislamiento.

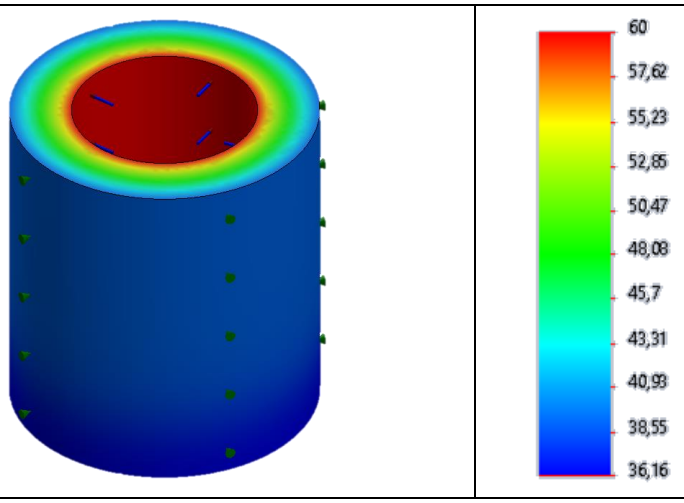
8.3. Análisis térmico

Realizando un estudio térmico [9] para los diferentes prototipos se puede tener una idea de su aislamiento y de si el vacío perimetral realizado realmente mejora el mismo. En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos, encontrándose la explicación de los pasos ejecutados para realizar la simulación en el Anexo II.

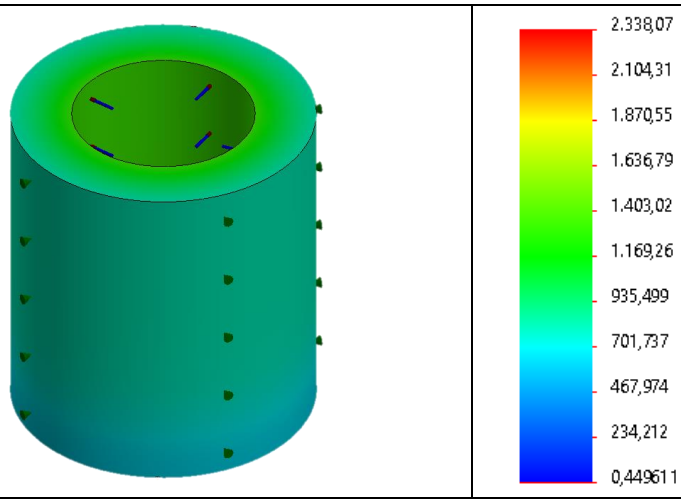
Se tendrá en cuenta una temperatura interior de 60 ºC y una exterior de 25 ºC.

Cilíndrica sin vacío

Temperatura (ºC)



Gradiente de temperatura (K/m)



Flujo de calor (W/m^2)

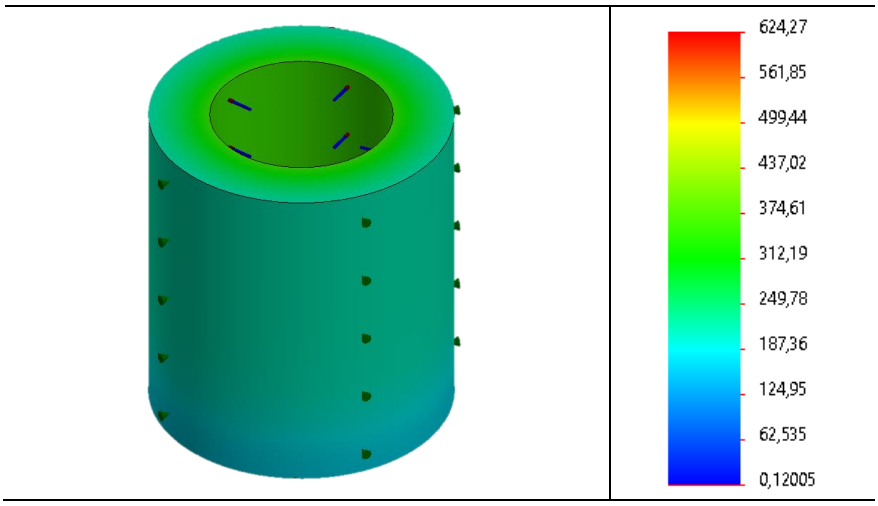
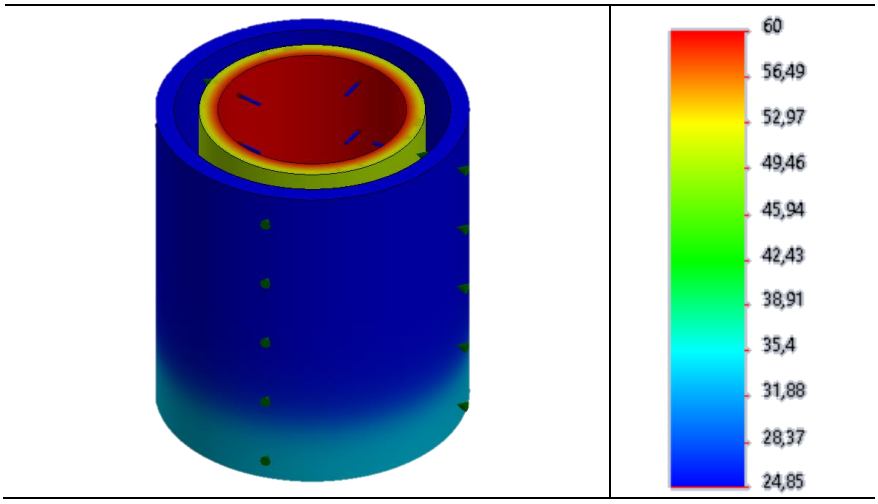


Tabla 8.3. Resultados térmicos - Cilíndrico sin vacío

Como se puede observar, en régimen permanente, la temperatura de la pared exterior del calorímetro se ve incrementada sustancialmente, pasando de 25 ºC (temperatura ambiente) a 36 ºC. El aislamiento no es del todo adecuado.

Además, el gradiente de temperatura, así como el flujo de calor de las paredes es elevado.

Cilíndrica con vacío
Temperatura (ºC)



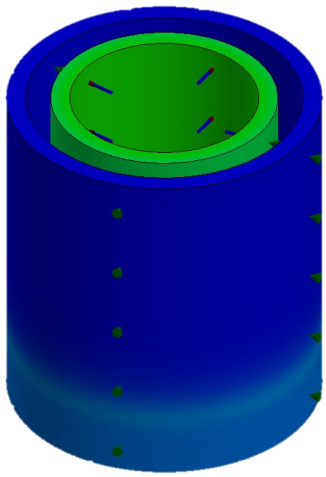
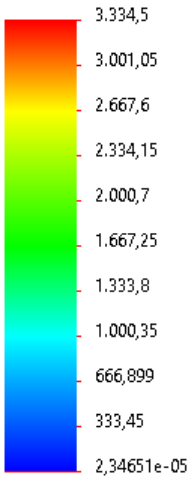
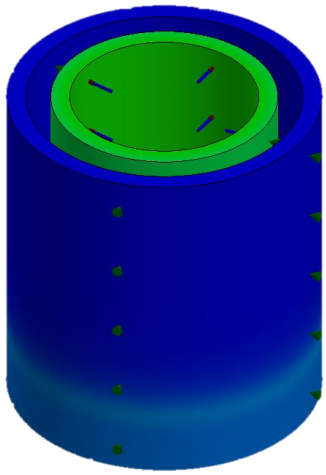
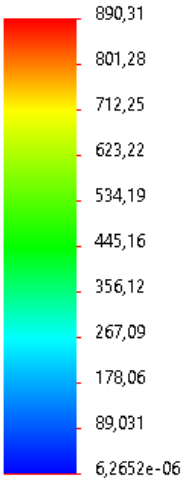
Gradiente de temperatura (K/m)	
	
Flujo de calor (W/m^2)	
	

Tabla 8.4. Resultados térmicos - Cilindro con vacío

A la vista de los resultados, la aplicación de un vaciado perimetral sí mejora el aislamiento del dispositivo, concentrando la temperatura en la zona interior del calorímetro, minimizando las pérdidas. La temperatura de la pared exterior se mantiene a unos 25 ºC, coincidiendo con la temperatura ambiente. Además, el gradiente de temperatura y el flujo de calor ven reducidos sus valores drásticamente.

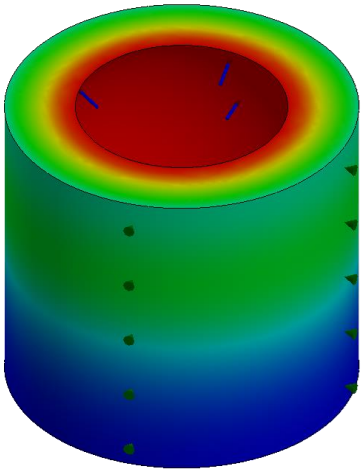
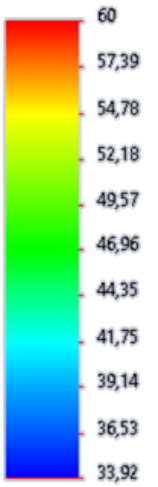
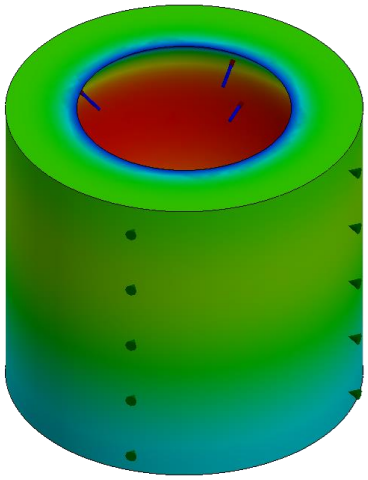
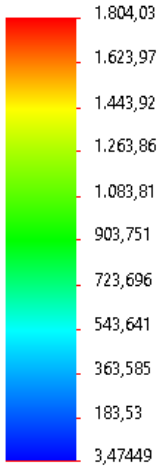
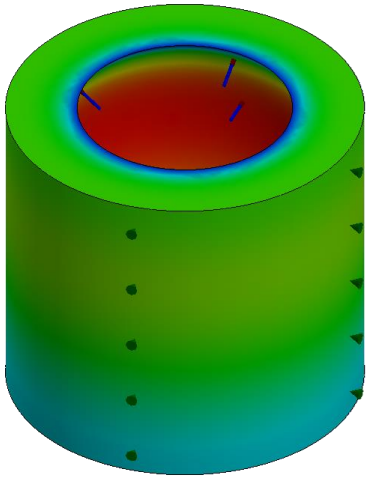
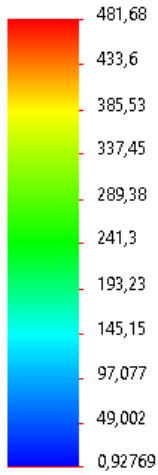
Esférica sin vacío	
Temperatura (ºC)	
	
Gradiente de temperatura (K/m)	
	
Flujo de calor (W/m²)	
	

Tabla 8.5. Resultados térmicos - Esférico sin vacío

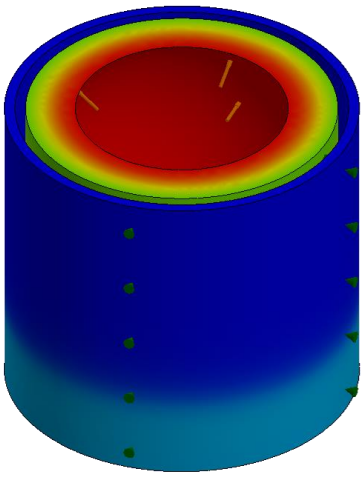
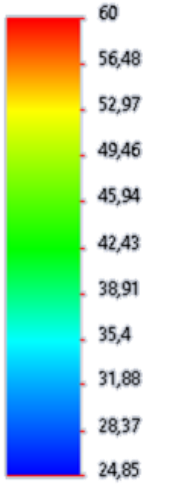
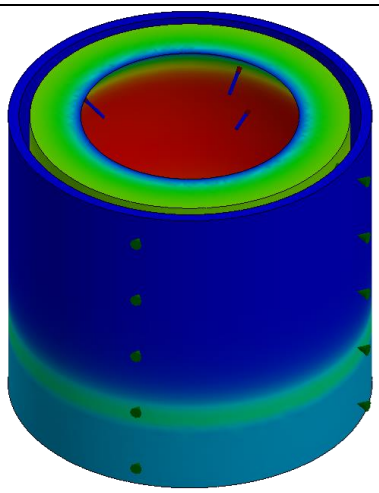
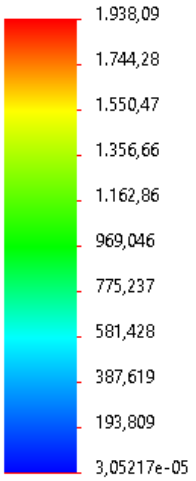
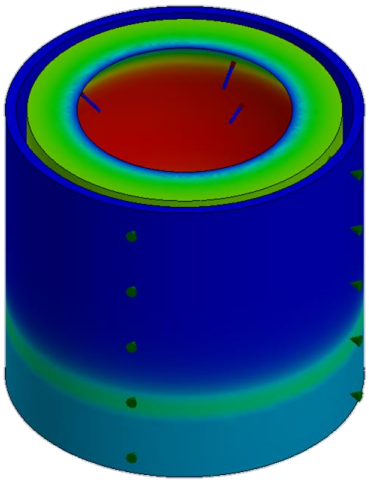
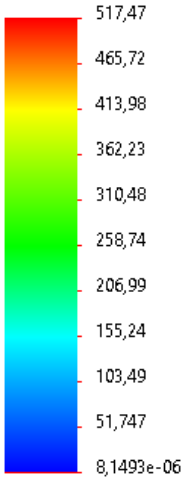
Esférica con vacío	
Temperatura (ºC)	
	
Gradiente de temperatura (K/m)	
	
Flujo de calor (W/m²)	
	

Tabla 8.6. Resultados térmicos - Esférico con vacío

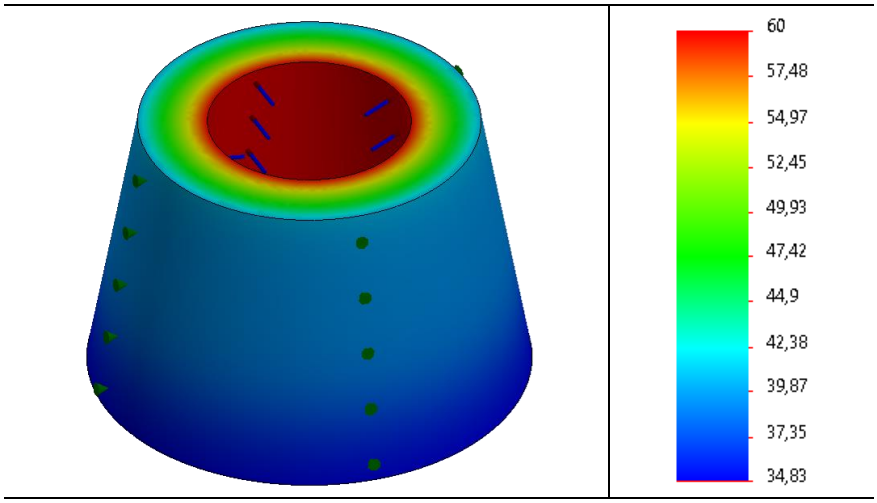
Si comparamos los resultados de la geometría esférica, sin vaciado los resultados son similares. Sin embargo, en la zona donde se concentra la sustancia, al tener unos espesores de pared reducidos la geometría de la esfera, provocan que la temperatura externa aumente respecto al caso de geometría cilíndrica.

En cuanto a los resultados con el vaciado perimetral presente, los resultados son muy similares, concentrándose la temperatura en la zona interna, aislando de manera más eficiente el calorímetro.

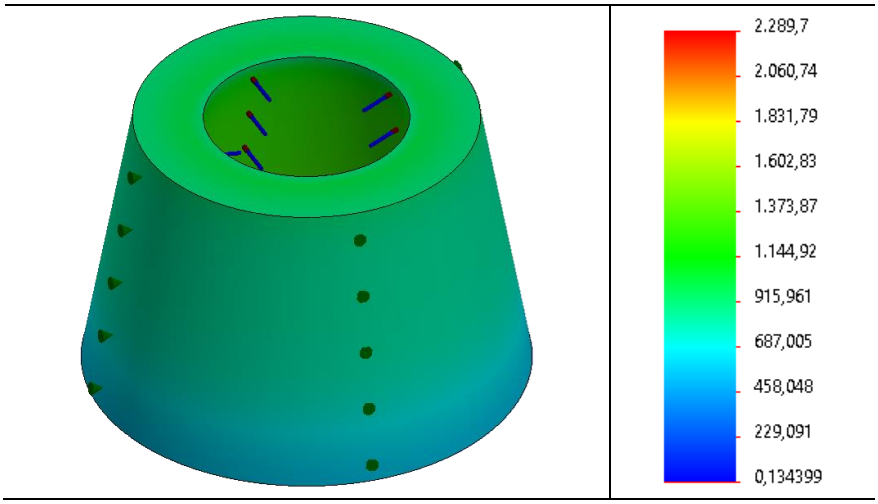
Para finalizar y aunque el modelo ya fue descartado con anterioridad por no poder reutilizar la tapa, se realizó el análisis térmico a la geometría cónica, para comprobar su aislamiento.

Cónica

Temperatura (ºC)



Gradiente de temperatura (K/m)



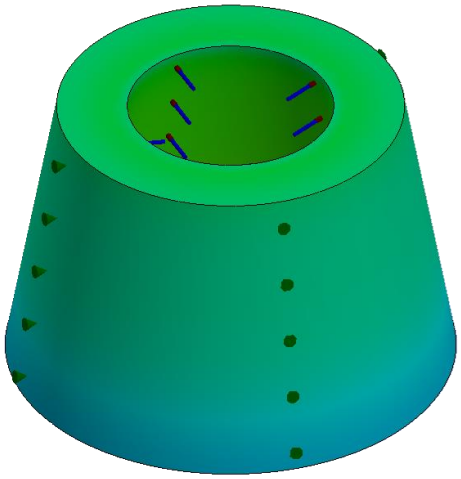
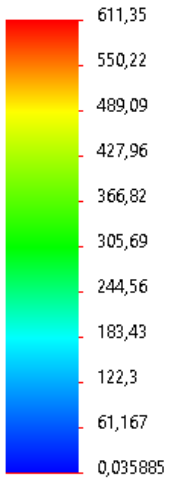
Flujo de calor (W/m²)	
	

Tabla 8.7. Resultados térmicos – Cónica

Los resultados obtenidos son relativamente parecidos a la geometría cilíndrica ya que es una derivación de la misma, simplemente aplicando un ángulo de desviación. Aun así, el aislamiento es algo inferior y además no se puede aplicar un vaciado lo suficientemente profundo. Además, si las paredes exteriores se mantuvieran cilíndricas, el ángulo de inclinación interior tendría que ser muy reducido, o el espesor de las paredes aumentaría demasiado, imposibilitando utilizar la misma tapa.

8.4. Impresión 3D

Para poder realizar la impresión 3D del prototipo es necesario utilizar un software que traduzca a código G la geometría del mismo. Para ello se utilizó Ultimaker Cura, que toma una malla discreta en formato STL del modelo CAD y lo divide en láminas para convertirlas en código máquina. Además, permite seleccionar la impresora a utilizar, así como diferentes parámetros de impresión y materiales.

En primer lugar, se seleccionó la impresora Ultimaker S5, siendo ésta la que se utilizó en el laboratorio. Posteriormente, se importó el prototipo en formato STL, ubicándolo lo más centrado posible en el habitáculo de impresión.

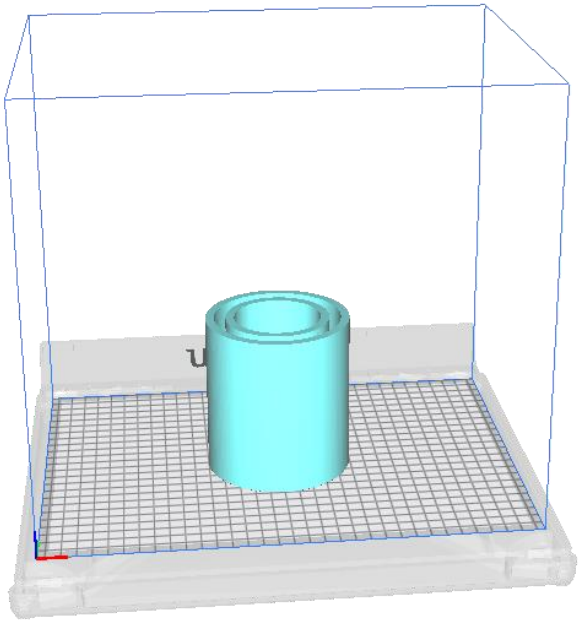


Figura 8.4. Ultimaker S5 con prototipo

La selección del material de impresión no fue directa, ya que de la biblioteca de materiales que posee Ultimaker Cura para esta impresora, el PETG no está incluido. Sin embargo, el software permite crear un material personalizado, asignando las características principales de información y ajuste para impresión.

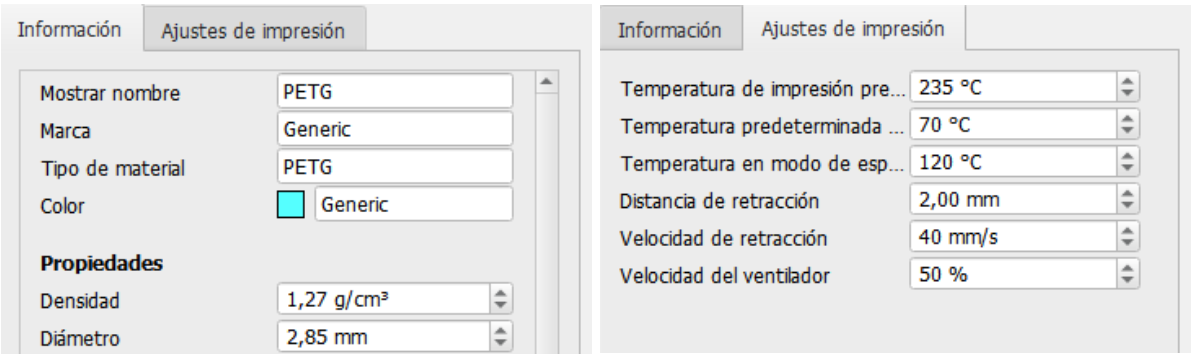


Figura 8.5. Información y ajustes de impresión del PETG

Tanto la información como los ajustes de impresión fueron tomados de la página del fabricante [10].

Por otro lado, los ajustes de impresión generales se mantuvieron por defecto. En un principio se modificó la densidad de relleno del 20 % al 100 %, pero el tiempo de impresión y cantidad de material eran demasiado elevados, por tanto, se mantuvo en un 20 % con un patrón de relleno concéntrico. Esto fue una medida para ahorrar tiempo y material, en definitiva, costes.

Finalmente, tras aproximadamente 4 horas de impresión para la tapa y unas 16 horas para el prototipo, se obtuvo el conjunto mostrado en la Figura 8.6.

Figura 8.6. Recipiente y tapa impresos en PETG

El conjunto ensamblado del calorímetro junto a la tapa se puede observar en la siguiente Figura 8.7.

Figura 8.7. Calorímetro ensamblado

9. DEFINICIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

La calibración del sistema de medida del calorímetro se realizó representando la curva de calibración del mismo. Esta curva está representada mediante una función lineal y, por tanto, también se pudo obtener la incertidumbre de la regresión lineal aplicada a los datos experimentales obtenidos. A continuación, se explica la obtención de la curva de calibración y su función lineal.

La expresión (2) proporciona el valor del calor específico a partir de otras magnitudes como son el calor aportado, la masa y la diferencia de temperatura. Reordenando la expresión, se obtiene:

$$VI\tau = c_p \cdot m\Delta T \tag{18}$$

Observando de esta manera dicha expresión, se puede discernir claramente que se trata de la ecuación de una recta cuya pendiente es el calor específico. Representando entonces la energía o calor aportado a la sustancia frente al producto de la masa y diferencia de temperaturas, se obtiene la curva de calibración del sistema.

Para ello, fue necesario realizar una serie de experimentos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

1. La masa de sustancia (agua) se mantuvo aproximadamente constante en los diferentes ensayos.
2. Se modificó la temperatura objetivo, empezando desde 45 ºC, para así variar la energía aportada.

9.1. Ensayo

Para la realización del ensayo, se utilizaron diferentes equipos de medida ya comentados en el apartado 7.4, además de cronometrar el tiempo transcurrido durante el calentamiento de la sustancia, siendo en este caso, agua. Se enumeran a continuación:

1. Medidor de energía eléctrica consumida.

2. Báscula de precisión.
3. Sensor de temperatura DS18B20.
4. Cronómetro.

Para calentar el agua se reutilizó la resistencia calefactora, junto al termopar de control, del extrusor de una impresora 3D en desuso ubicada en el laboratorio. Esto provoca un ahorro en costes.

Para definir la temperatura objetivo se utilizó el propio software de control de la impresora 3D: Marlin, manipulado a través del interface denominado Pronterface (Figura 9.1).

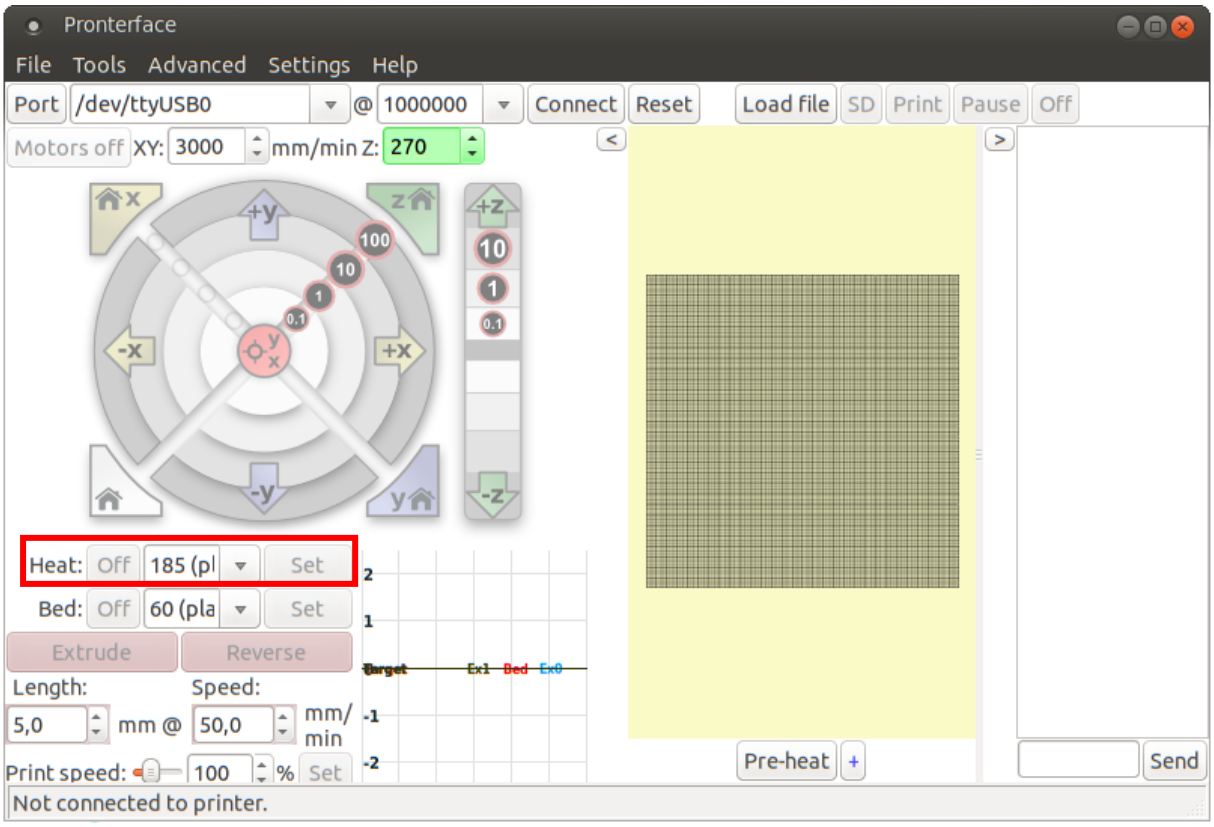


Figura 9.1. Pantalla principal del software Pronterface

De esta forma, se pudo definir la temperatura de la resistencia calefactora (marcada en rojo), gracias al termopar incorporado junto a ésta. Ambos elementos están insertados en un cartucho metálico para asegurar su proximidad y mejorar la transferencia de calor.

Figura 9.2. Cartucho metálico con resistencia calefactora y termopar

Tal y como se puede observar, la resistencia y termopar pueden desacoplarse del cartucho mediante dos roscas independientes, permitiendo insertar ambos elementos a través de los orificios de la tapa y completar el ensamblaje del sistema de medida.

Para homogenizar la temperatura del interior del calorímetro se utilizó un agitador consistente en una varilla metálica.

Figura 9.3. Agitador

El sistema de control de temperatura está formado por el sensor DS18B20, ya comentado con anterioridad y una placa Arduino UNO. El diagrama de conexión y el código utilizado para medir dicha temperatura se puede observar en el Anexo III.

Para comenzar el ensayo se realizaron los siguientes pasos:

1. Se introdujo en la cavidad del calorímetro la sustancia a calentar, en este caso, agua.
2. Se pesó la cantidad de agua introducida en el calorímetro mediante la báscula de precisión.
3. Se insertaron, a través de los orificios de la tapa, el sensor de temperatura, cartucho con resistencia calefactora y termopar y agitador.
4. Se cerró el calorímetro con la tapa, asegurando que tanto el cartucho como el sensor se encuentren dentro del agua.
5. Se fijó la temperatura objetivo en Pronterface y se ejecutó el comando.
6. Se anotaron los datos suministrados por los equipos de medida, siendo éstos la potencia, la temperatura inicial y la final.

El sistema está montado sobre una base acrílica encima de la cama caliente de la propia impresora, aumentando así el aislamiento por la parte inferior del calorímetro.

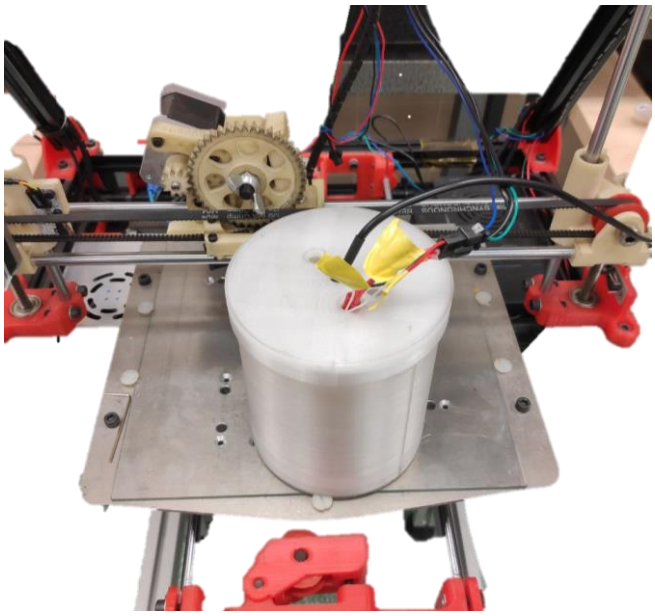


Figura 9.4. Calorímetro preparado para el ensayo

Para la toma de valores experimentales se utilizó la siguiente ficha:

m (kg)	**t_i** (ºC)	**t_f** (ºC)	**t** (s)	**P** (W) **media cada 2 min**					**P** (W)	**P_0** (W)
0,1347	27,12	45	595	44	28	24	16	12	25	7
0,1298	25,44	50	621	48	36	29	22	16	30	7
0,1323	27,06	55	665	49	43	30	20	16	32	7
0,1293	26,62	60	771	49	45	30	22	16	32	7
0,655	26,31	50	343	49	22	12			28	7

Tabla 9.1. Ficha de valores experimentales

Donde:

m = masa de la sustancia en el interior del calorímetro.

t_i, t_f = temperaturas inicial y final de la sustancia.

t = tiempo transcurrido desde la temperatura inicial a la final.

P = potencia.

P_0 = potencia en vacío.

Para obtener la curva de calibración del sistema se utilizaron exclusivamente los datos experimentales de las cuatro primeras filas, correspondientes al agua. En la siguiente tabla se pueden observar los valores obtenidos en los cuatro experimentos.

m (kg)	**P** (W)	**t** (s)	**ti** (ºC)	**tf** (ºC)	**ΔT** (K)	**cp** (J/kg·K)
0,1347	18	595	27,12	45	17,88	4446,8693
0,1298	23	621	25,44	50	24,56	4480,3958
0,1323	25	665	27,06	55	27,94	4497,5439
0,1293	25	771	26,62	60	33,38	4465,9055

Tabla 9.2. Valores experimentales obtenidos para el agua

Los resultados difieren en un máximo de 6 % respecto al calor específico medio del agua, con un valor de 4184 J/kgK. Este error viene posiblemente derivado de los equipos de medida, así como las posibles pérdidas de calor del calorímetro y de la propia capacidad calorífica del mismo y su instrumentación.

Aunque no es el objetivo del trabajo, aprovechando que la cavidad del calorímetro lo permitía se probó sin éxito a intentar medir el calor específico en un sólido. En este caso, se realizó un ensayo con un cilindro de aluminio taladrado, para poder introducir el sensor de temperatura. Las medidas del mismo son las de la cavidad interior del propio calorímetro.

Figura 9.5. Cilindro de aluminio

m (kg)	**P** (W)	**t** (s)	**ti** (ºC)	**tf** (ºC)	∆**T** (K)	**cp** (J/kg·K)
0,655	21	343	26,31	50	23,69	417,98

Tabla 9.3. Valores experimentales obtenidos para el cilindro de aluminio

El calor específico del aluminio es aproximadamente 908 J/kgK, sin embargo, el valor obtenido no se acerca a este dato. Esto es debido a que para medir el calor específico de un sólido, no se puede medir directamente sobre el mismo. Para observar las diferencias entre los experimentos, los pasos serían los siguientes:

1. Se pesa la masa del sólido con *c* desconocido y se deposita en agua casi hirviendo, tomando su temperatura *T*.
2. Se introducen una masa *M* de agua al calorímetro, se agita y se mide su temperatura T_0.

3. Se deposita la pieza dentro del calorímetro. Se agita y al pasar un cierto tiempo se mide la temperatura de equilibrio T_e.

9.2. Curva de calibración

Con los valores de la Tabla 9.2 se muestran en la Figura 9.1. Para ello, tal y como se indicó previamente, se representa gráficamente la energía o calor aportados (producto de la potencia por el tiempo transcurrido) frente al producto de la masa y diferencia de temperaturas.

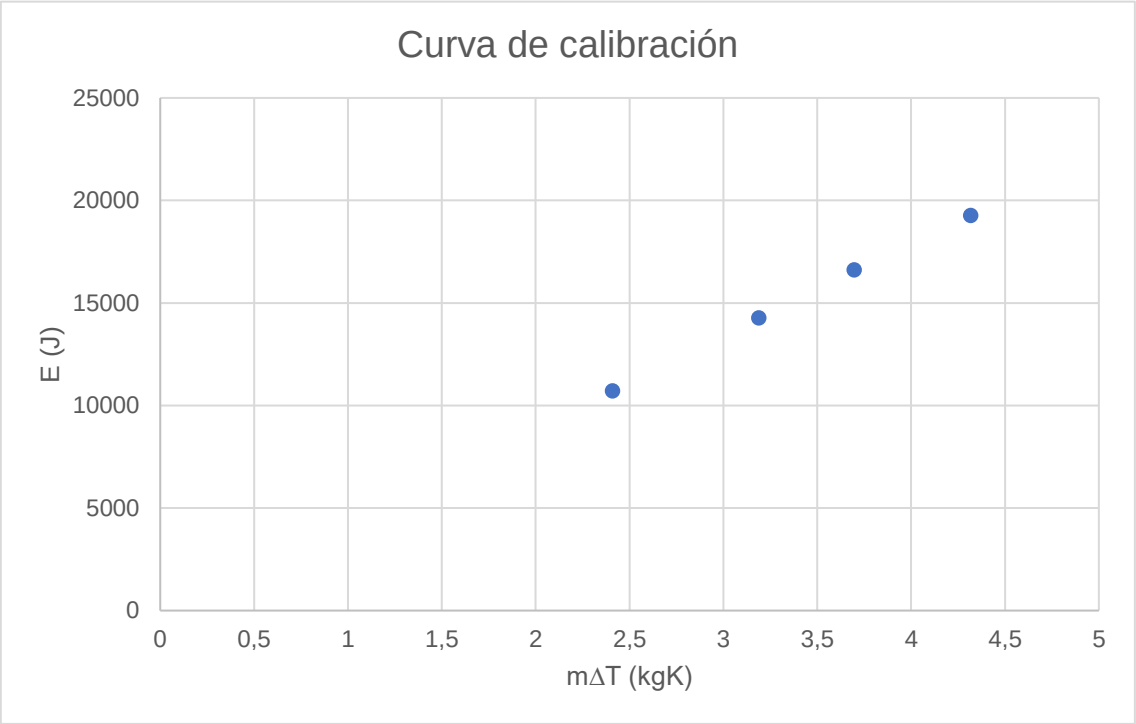


Figura 9.6. Energía aportada frente a masa por diferencia de temperaturas

Una vez representados los datos, utilizando la regresión lineal se representó la curva de calibración. Sobre esta se puede observar la ecuación de la recta que la define, así como el parámetro R^2.

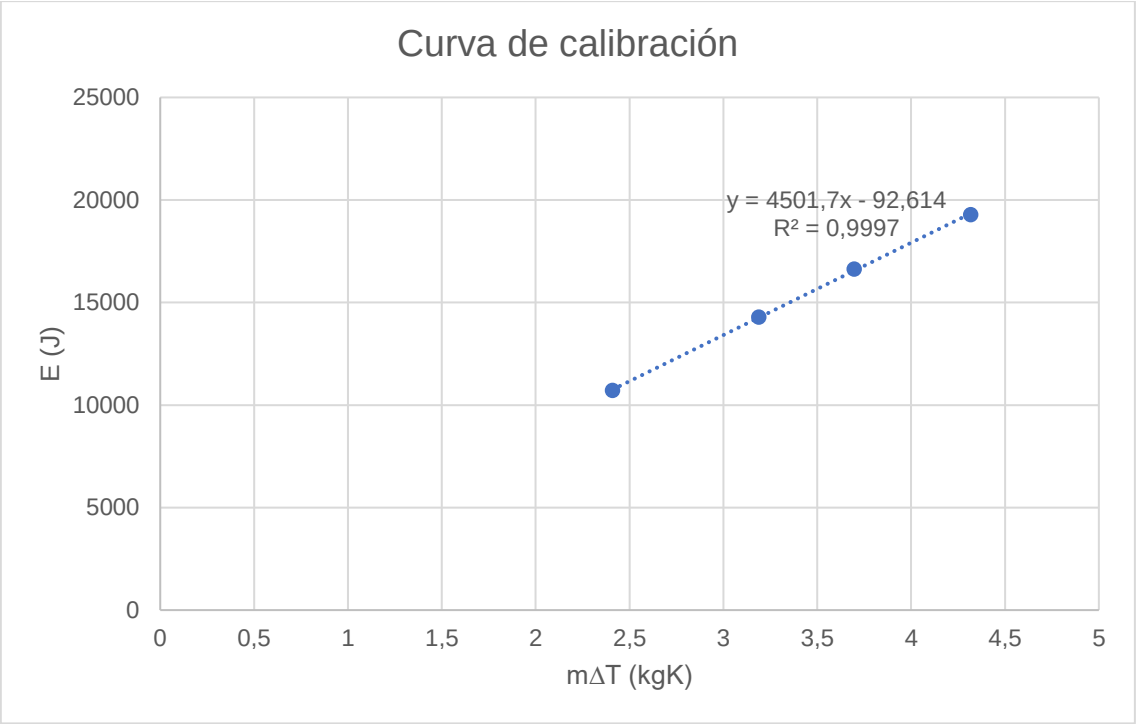


Figura 9.7. Curva de calibración del sistema

Tal y como se observa en la Figura 9.7, los resultados se ajustan de forma precisa a una recta. A partir de la regresión lineal de los datos experimentales, se puede estimar también la incertidumbre del cp. En la Tabla 9.4, se compara el resultado de esta estimación de incertidumbre con la obtenida en el apartado 7.4.

	Incertidumbre (J/kg·K)
Aparatos de medida	57,2034
Regresión lineal	55,3087

Tabla 9.4. Comparación de incertidumbre del sistema

Los resultados son muy similares, la pequeña discrepancia de valores puede ser debida a que la incertidumbre con los aparatos de medida también tiene en cuenta la diferencia entre las medidas experimentales y el patrón.

10. RECOMENDACIONES

A continuación, se proponen una serie de propuestas futuras, con el objetivo de continuar la experimentación.

- Imprimir el resto de prototipos para compararlos entre ellos. Los archivos de impresión están preparados y dispuestos en el laboratorio.
- Estudiar o analizar otros materiales poliméricos con diferentes características térmicas.
- Modificar los ajustes de impresión, variando el patrón de relleno o incluso aumentando la densidad del mismo hasta el 100 %, para comprobar su efecto en los valores experimentales.
- Utilizar otros equipos de medida con mayor resolución, como por ejemplo voltímetros o amperímetros para medir la tensión e intensidad presentes en la resistencia calefactora.
- Implementar un código de captación de datos más sofisticado, que permita extraer los datos directamente a una tabla Excel, o similar.
- Realizar experimentos con algún sólido.

11. CONCLUSIONES

A partir de la planificación y aplicación del DFMA, se han conseguido reproducir cuatro prototipos de calorímetros que cumplen con los requisitos de diseño correspondientes para su adecuado funcionamiento. Durante el desarrollo del trabajo se han realizado rediseños de los mismos para solucionar problemas de diseño, tales como un montaje o fabricación físicamente complicados, que van en contra de los principios fundamentales del DFMA.

En la determinación del material a utilizar se realizó una investigación exhaustiva de los materiales con mejores propiedades térmicas en relación a otras no menos importantes como son la absorción de agua, peso del material, capacidad de impresión en 3D o el precio. De esta forma, se optó por un material, el PTEG, con propiedades térmicas adecuadas, de fácil impresión y obtención y, además, con cierta transparencia, siendo ideal para la observación del experimento en el laboratorio. Si bien, existen otros muchos materiales interesantes que podrían estudiarse y experimentar con ellos para ver su posible aplicación en el rediseño del calorímetro.

El prototipo, finalmente, cumple tanto con los requisitos de diseño anteriormente expuestos, así como los principios fundamentales del DFMA, consiguiendo así un diseño lo más sencillo posible, a la vez que funcional y de coste reducido.

Considero la inclusión de simulaciones por ordenador, tanto térmicas como de LCA de gran ayuda para la consecución de los ya mencionados requisitos, además de otorgar una visión general de cómo se quiere que sea el diseño, de manera que se minimicen al máximo los errores que puedan aparecer en fases posteriores, donde éstos sean críticos y, por tanto, se ahorre tiempo y coste.

Por otro lado, se ha conseguido realizar la curva de calibración del calorímetro, así como determinar su incertidumbre. Los resultados experimentales obtenidos durante los ensayos se corresponden con lo que se espera de un calorímetro así diseñado.

Se puede concluir que, en el diseño de este tipo de dispositivos, el modelo DFMA es de suma importancia, pero es una parte del todo. El trabajo de investigación anterior, la planificación, estudio de diseños ya existentes, verificación, etc., son partes esenciales que conforman un diseño final que si bien, puede estar sujeto a mejoras,

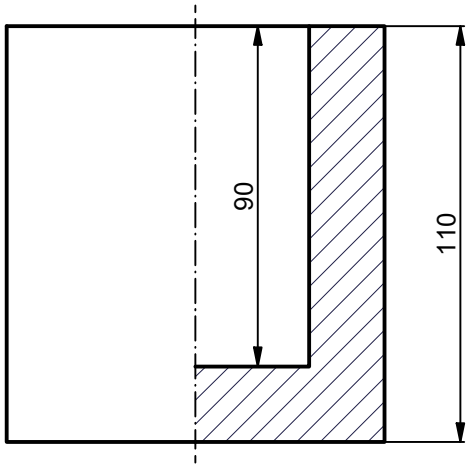
es lo más adecuado y funcional posible, cumpliendo con todos los requisitos correspondientes.

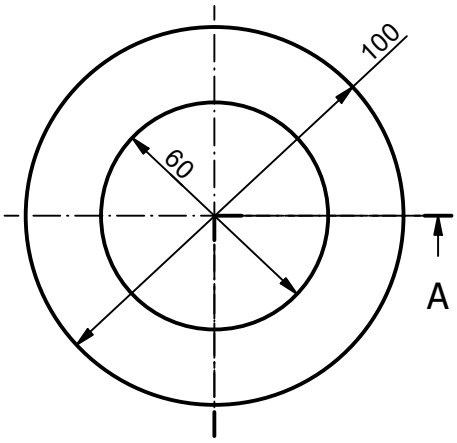
El DFMA, siendo un proceso iterativo, que se puede aplicar en las diferentes fases de desarrollo del diseño, es sin duda una gran ayuda para mejorar la capacidad de diseño, imaginación y resolución de problemas en futuros proyectos y, obviamente, en la carrera profesional posterior.

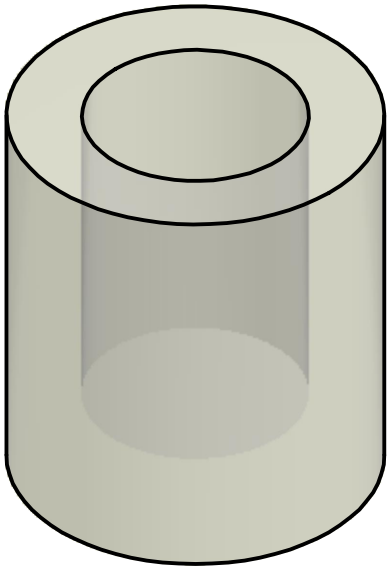
Para finalizar, este Trabajo de Fin de Máster ha supuesto un esfuerzo considerable, ya que, en mi caso, estoy especializado en la rama de Ingeniería Mecánica. Sin embargo, considero que un Ingeniero debe ser polivalente y aunque no sea experto en la gran cantidad de ramificaciones que tiene la ingeniería, ha de conocer conceptos básicos de la mayoría de ellas. Es por esto que este Trabajo abarca conocimientos de Ingeniería de procesos de fabricación, Ingeniería Mecánica, Térmica, Eléctrica, Electrónica, Materiales, análisis de ciclo de vida, etc.

12. PLANOS

A-A

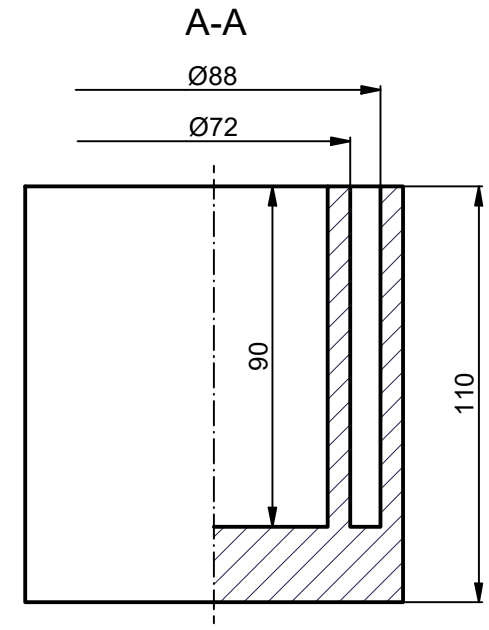


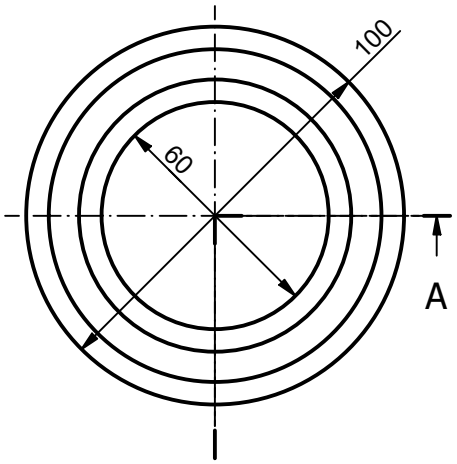


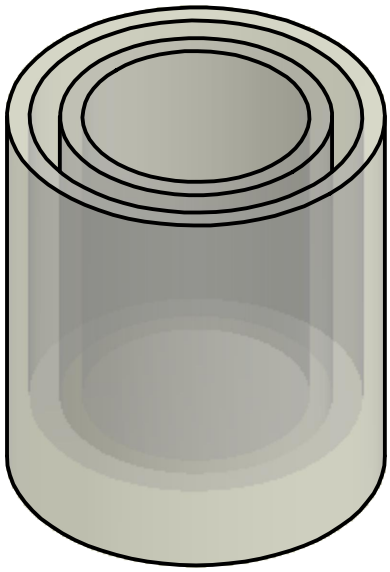


	FECHA	NOMBRE	FIRMAS	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
DIBUJADO		Manuel		
COMPROBADO		Garrido		
		Martínez		

ESCALA: 1/2	REDISEÑO DE UN CALORÍMETRO ADIABÁTICO Cilindro	Nº DE PLANO 1 / 5
		SUSTITUYE A:
		SUSTITUIDO POR:

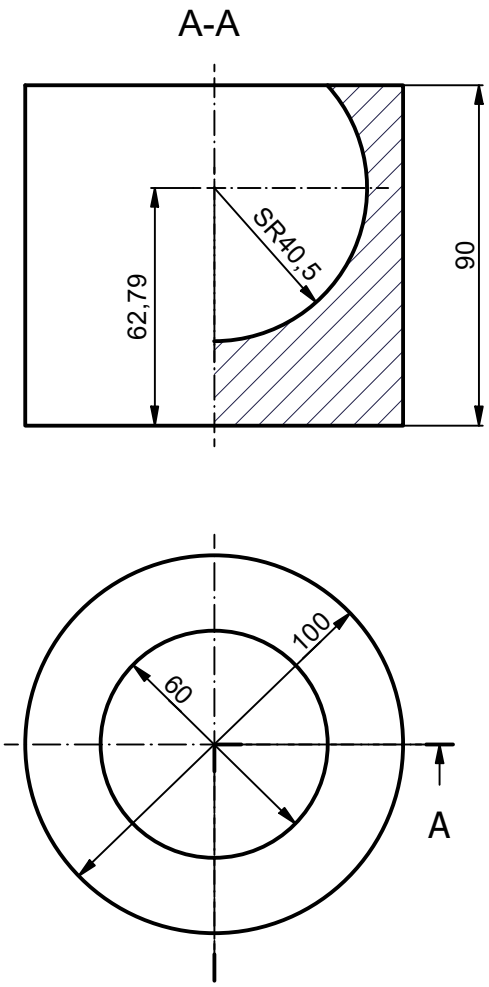


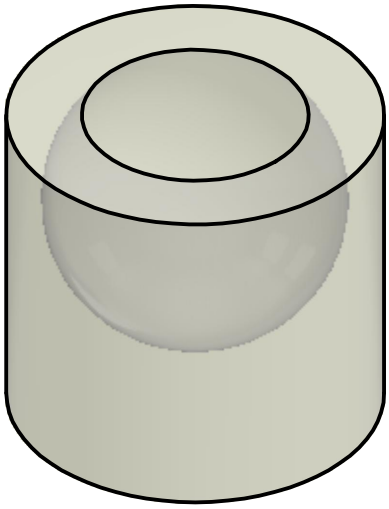




	FECHA	NOMBRE	FIRMAS	
DIBUJADO		Manuel		ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
COMPROBADO		Garrido		
		Martínez		

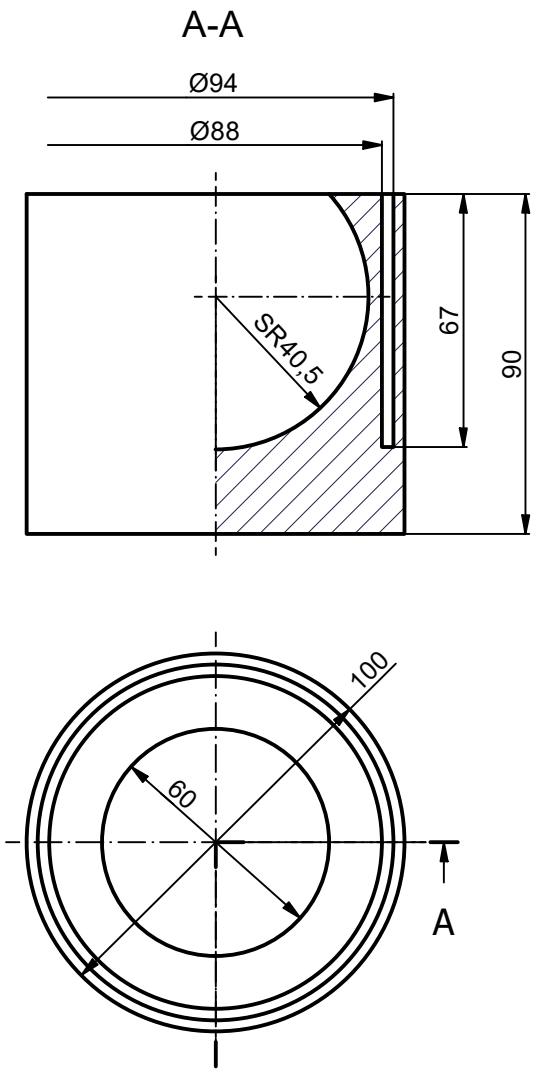
ESCALA: 1/2	REDISEÑO DE UN CALORÍMETRO ADIABÁTICO Cilindro_vacío	Nº DE PLANO 2 / 5
		SUSTITUYE A:
		SUSTITUIDO POR:

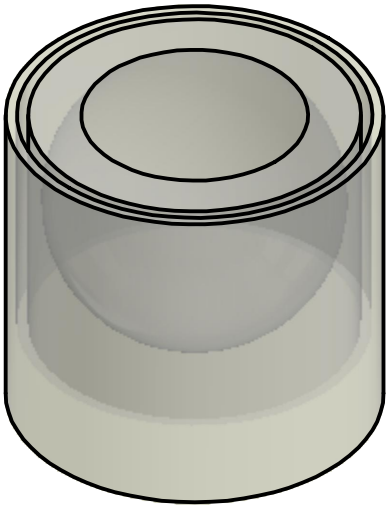




	FECHA	NOMBRE	FIRMAS	
DIBUJADO		Manuel		ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
COMPROBADO		Garrido		
		Martínez		

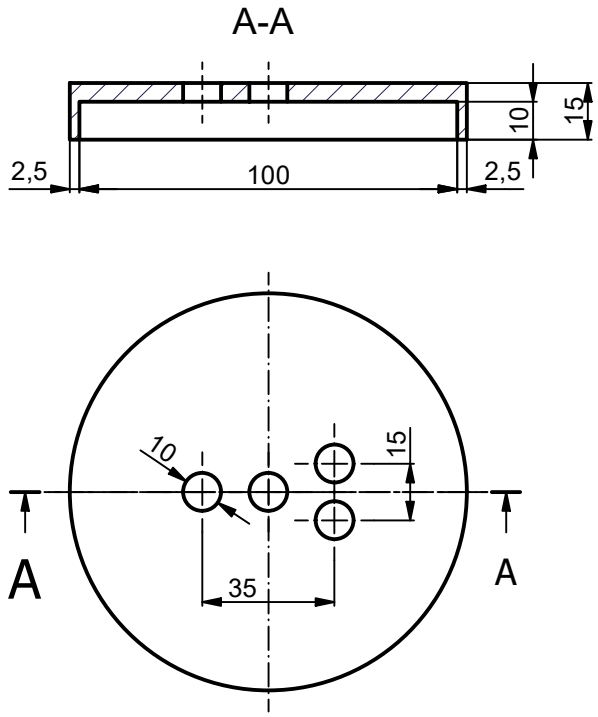
ESCALA: 1/2	REDISEÑO DE UN CALORÍMETRO ADIABÁTICO Esfera	Nº DE PLANO 3 / 5
		SUSTITUYE A:
		SUSTITUIDO POR:

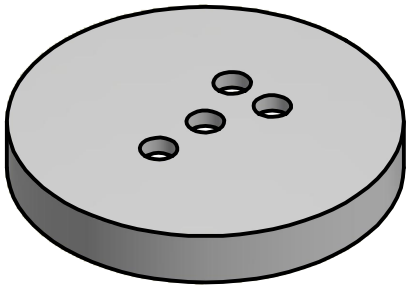




	FECHA	NOMBRE	FIRMAS	
DIBUJADO		Manuel		ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
COMPROBADO		Garrido		
		Martínez		

ESCALA: 1/2	REDISEÑO DE UN CALORÍMETRO ADIABÁTICO Esfera_vacío	Nº DE PLANO 4 / 5
		SUSTITUYE A:
		SUSTITUIDO POR:





	FECHA	NOMBRE	FIRMAS	
DIBUJADO		Manuel		ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
COMPROBADO		Garrido		
		Martínez		

ESCALA: 1/2	REDISEÑO DE UN CALORÍMETRO ADIABÁTICO Tapa	Nº DE PLANO 5 / 5
		SUSTITUYE A:
		SUSTITUIDO POR:

13. ANEXOS

13.1. Anexo I. Análisis LCA con SolidWorks

En este anexo se explica la realización de un análisis LCA con SolidWorks Sustaniability [8]. Para ilustrar la explicación se escoge el modelo de calorímetro cilíndrico sin vacío. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se importa el modelo tridimensional del sólido a analizar.
2. Se aplica el material.

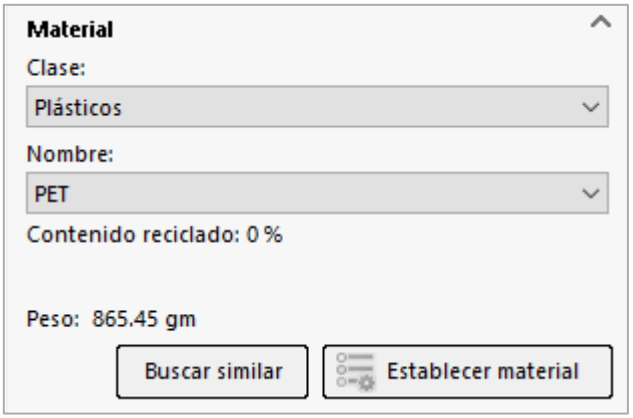


Figura 13.1. Selección del material

En este caso tuvo que utilizarse como material el PET cuyas características y huella de carbono son similares, ya que el PETG no estaba disponible en la biblioteca de materiales y no se permite la creación personalizada de un material.

3. Se selecciona la región de fabricación, la duración estimada del sólido y su proceso de fabricación.

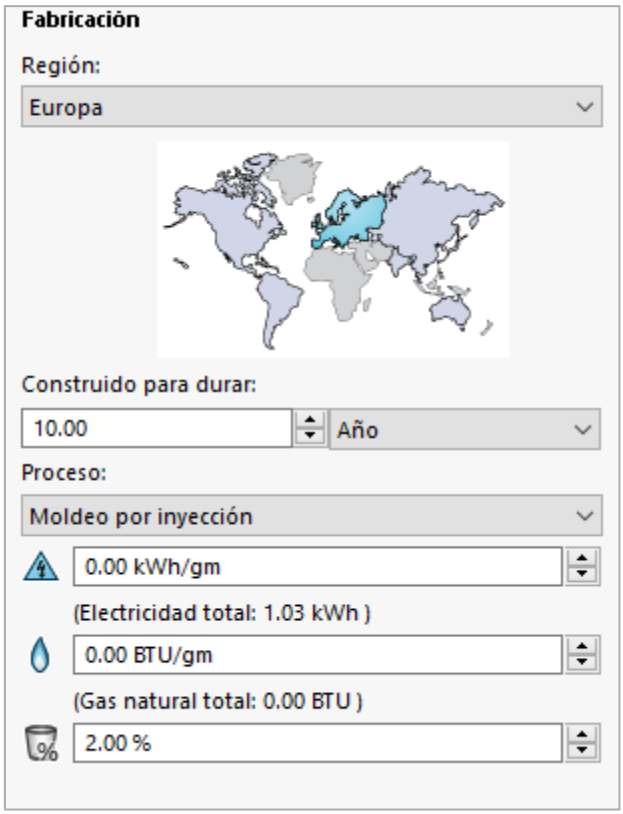


Figura 13.2. Fabricación

La región de fabricación es Europa estimando una vida útil de 10 años con un proceso de fabricación de moldeo por inyección.

4. Se selecciona la región donde se utilizará.

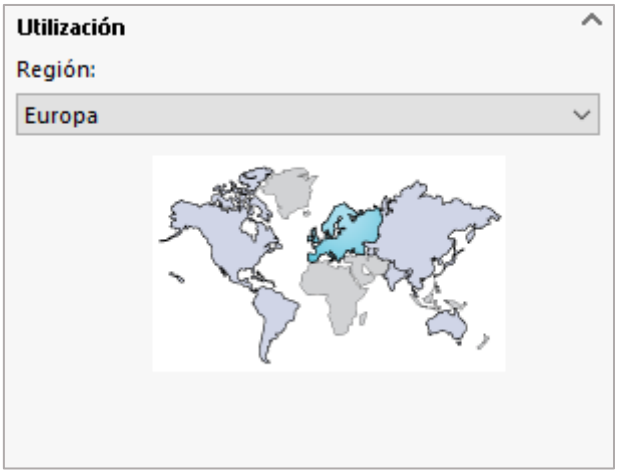


Figura 13.3. Utilización

La región donde se utilizará el calorímetro será la misma que en la que se fabrique, en este caso, Europa.

5. Se selecciona método de transporte (si existiera).

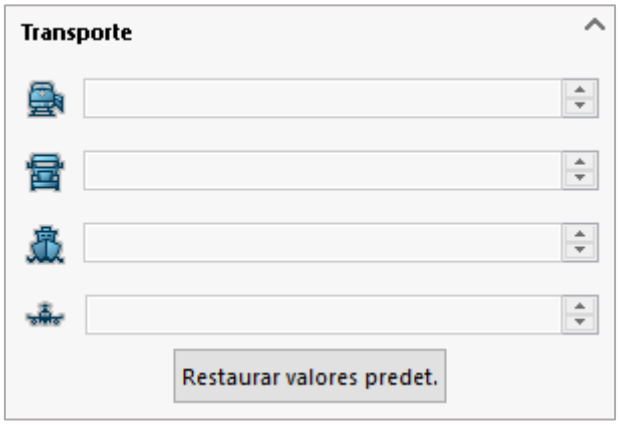


Figura 13.4. Transporte

No se ha considerado transporte, pues no se barajado la posibilidad de envío, si no de utilización por parte de la Universidad.

6. Se selecciona el final de la vida útil.

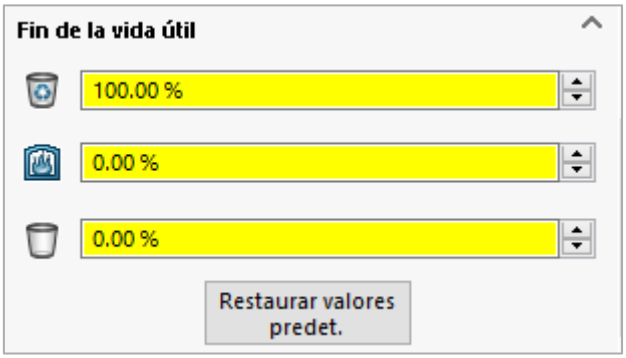


Figura 13.5. Fin de vida útil

Tal y como se comentó, el PETG es totalmente reciclable.

7. Se visualizan los resultados.

Estos resultados pueden observarse en el apartado 7.3 de esta memoria.

13.2. Anexo II. Análisis térmico con SolidWorks

En este anexo se explica la realización de un análisis térmico con SolidWorks [9]. Para ilustrar la explicación se escoge el modelo de calorímetro cilíndrico sin vacío. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se importa el modelo tridimensional del sólido a analizar.

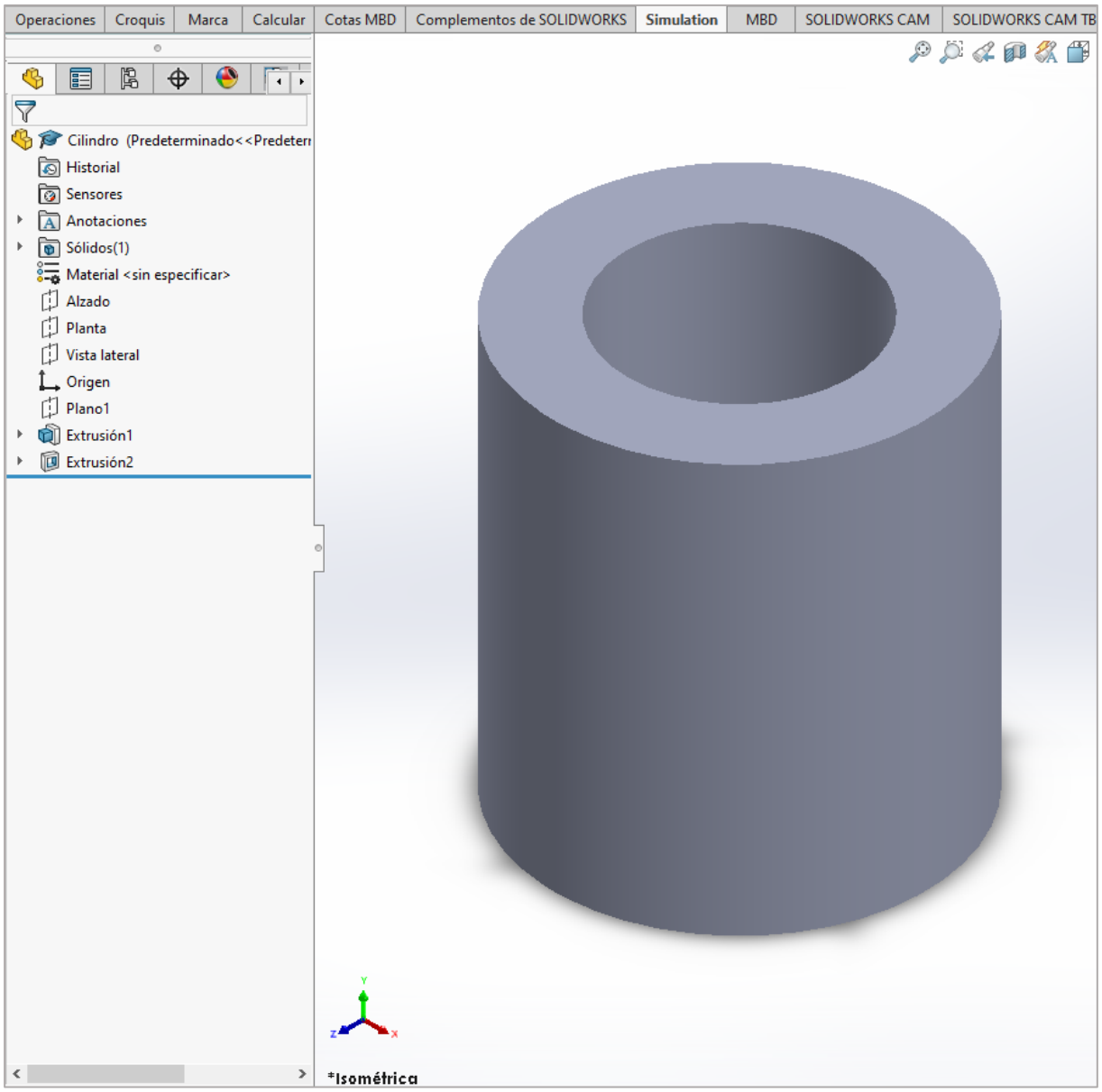


Figura 13.6. Importación del sólido a SolidWorks

2. Se crea el estudio térmico definiendo las propiedades del estudio para establecer si es de tipo transitorio o permanente.

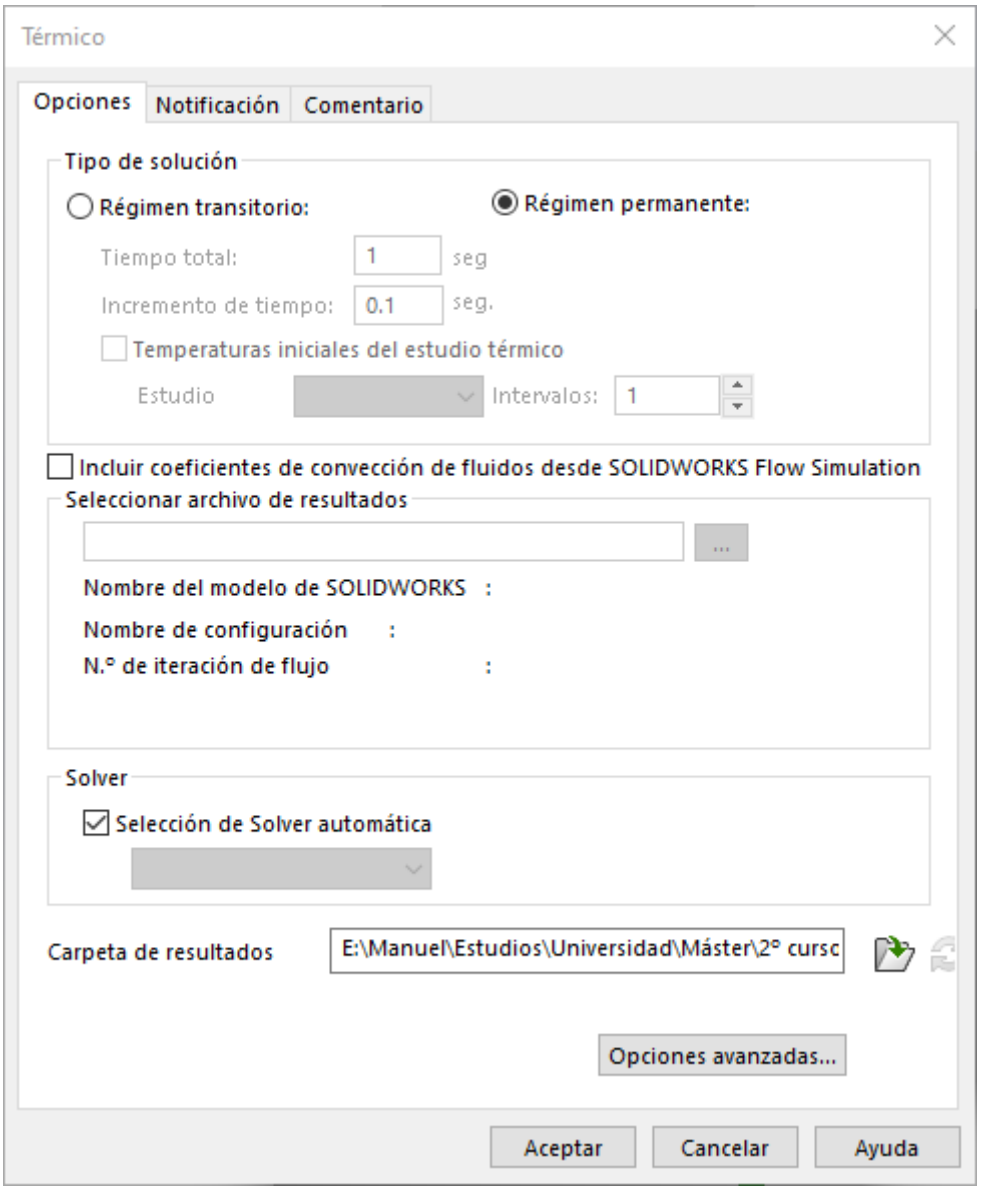


Figura 13.7. Propiedades del estudio térmico

3. Se define el material para el sólido estudiado.

En este caso, el material fue creado de forma personalizada ya que el PETG no se encuentra en los disponibles para aplicar al sólido.

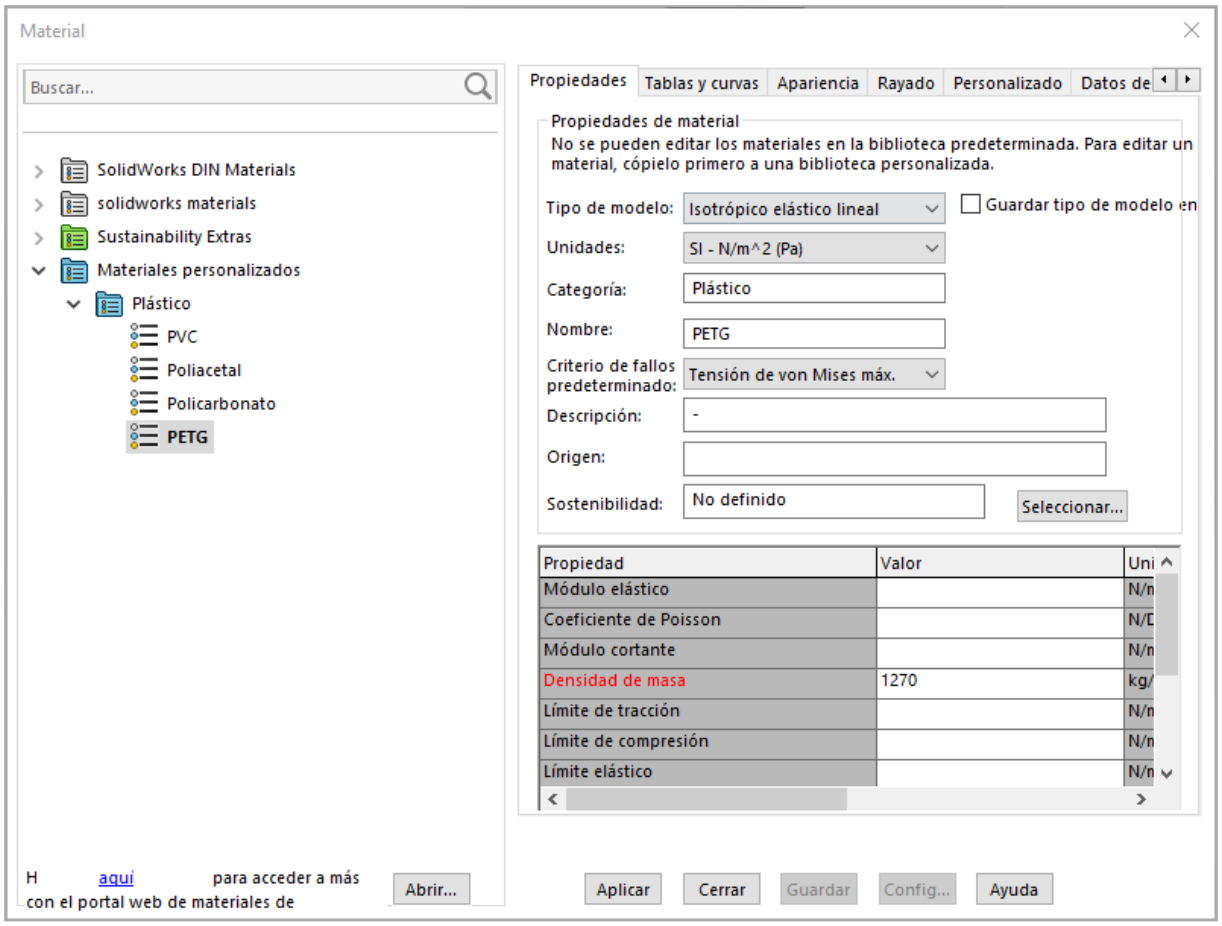


Figura 13.8. Definición del material

4. Se definen las cargas/restricciones térmicas.

Las cargas o restricciones térmicas pueden ser de diferentes tipos, como son: temperatura, convección, flujo de calor, potencia calorífica o radiación. En este caso, se utilizaron dos fundamentalmente.

- **Temperatura:** definiendo así la temperatura máxima en el interior del calorímetro durante el ensayo, siendo 60 ºC.

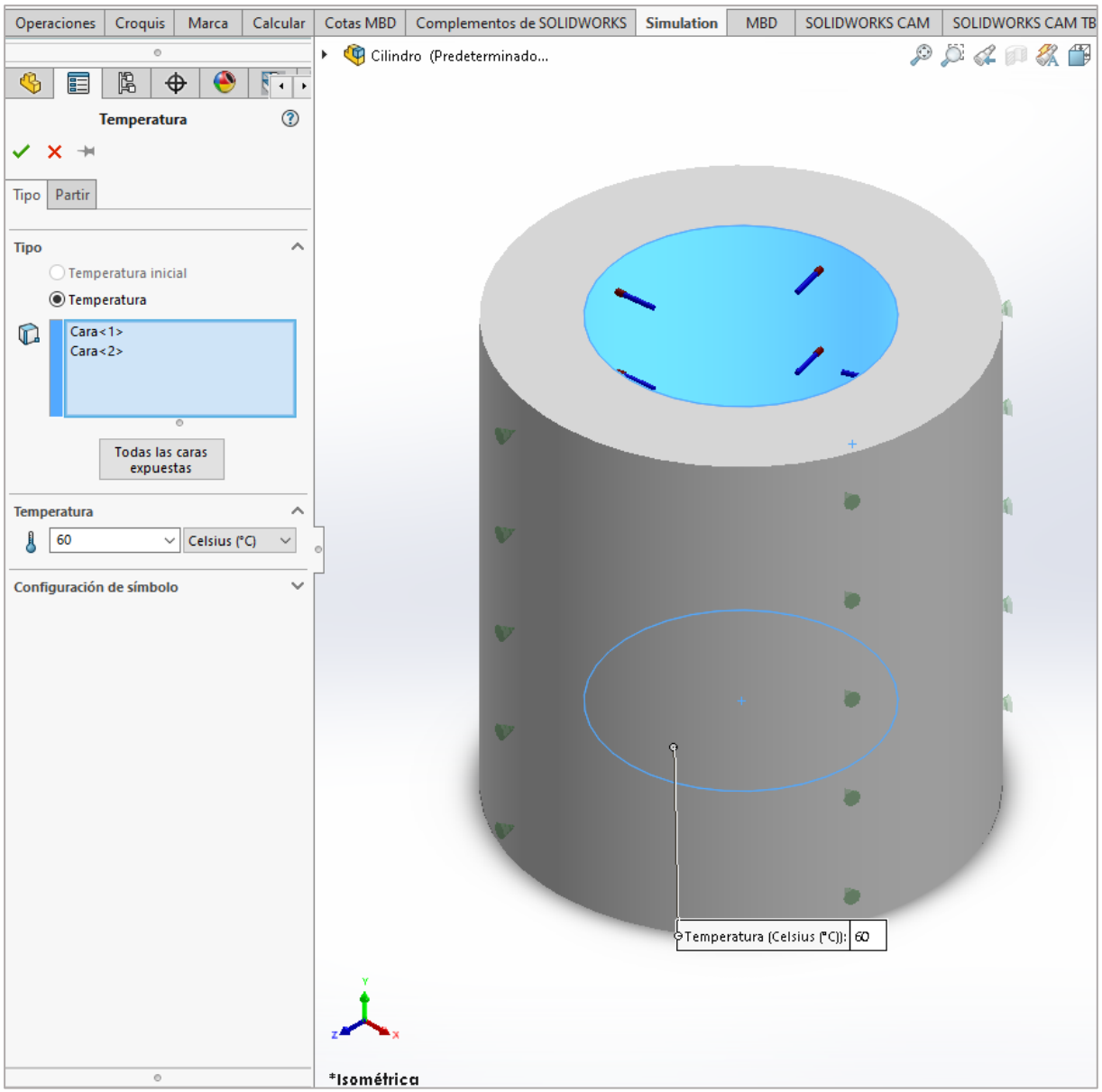


Figura 13.9. Carga/restricción de temperatura

- **Convección:** definiendo la temperatura ambiental y el coeficiente de transmisión de calor por convección del aire en el exterior.

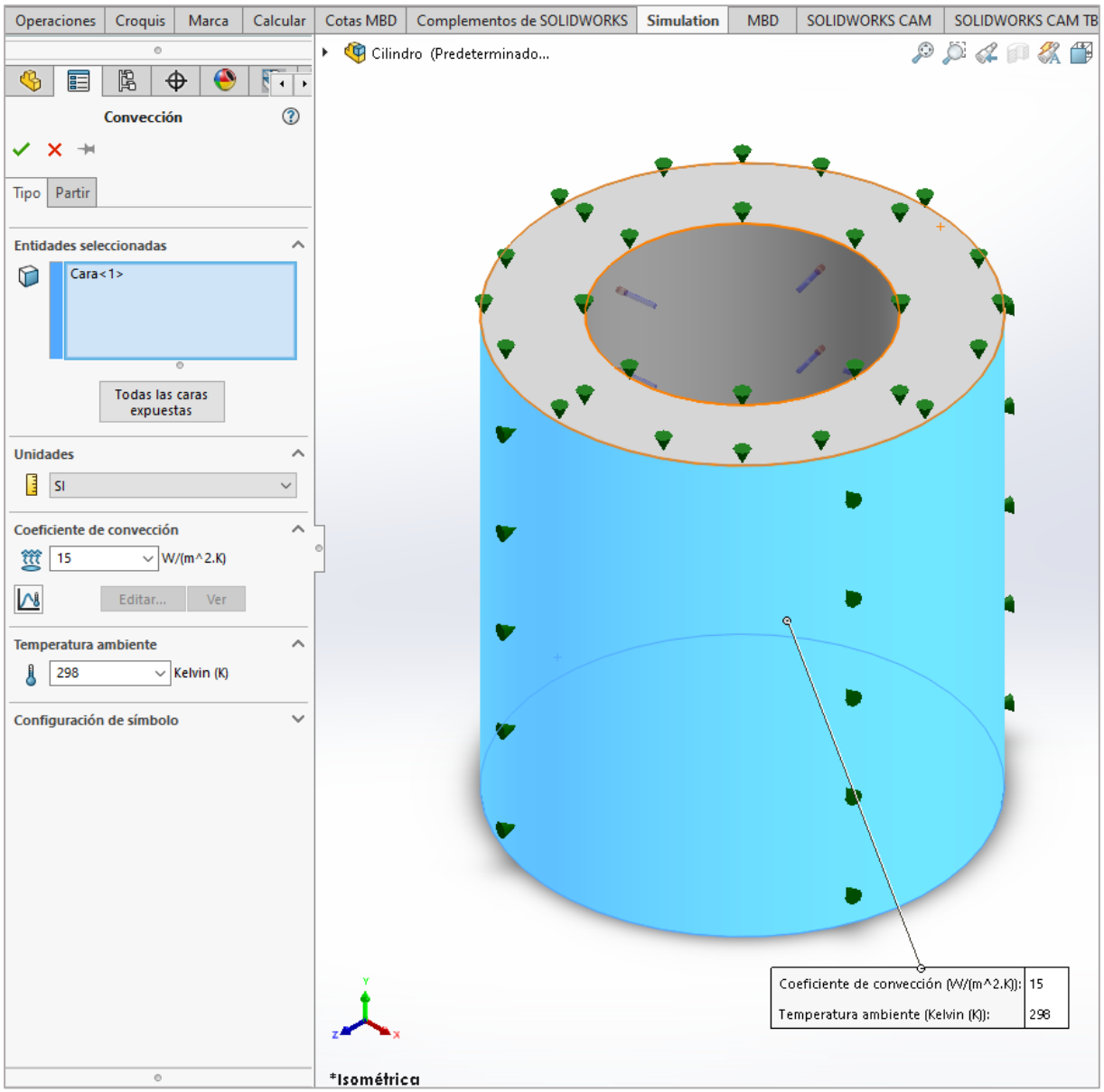


Figura 13.10. Carga/restricción de convección

Para conocer el coeficiente de convección del aire se utilizó una tabla que la propia herramienta de ayuda de SolidWorks ofrece.

Medio	Coeficiente de transferencia de calor h ($W/m^2 . K$)
Aire (convección natural)	5-25

Tabla 13.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección [9]

5. Se genera la malla y se ejecuta el estudio.

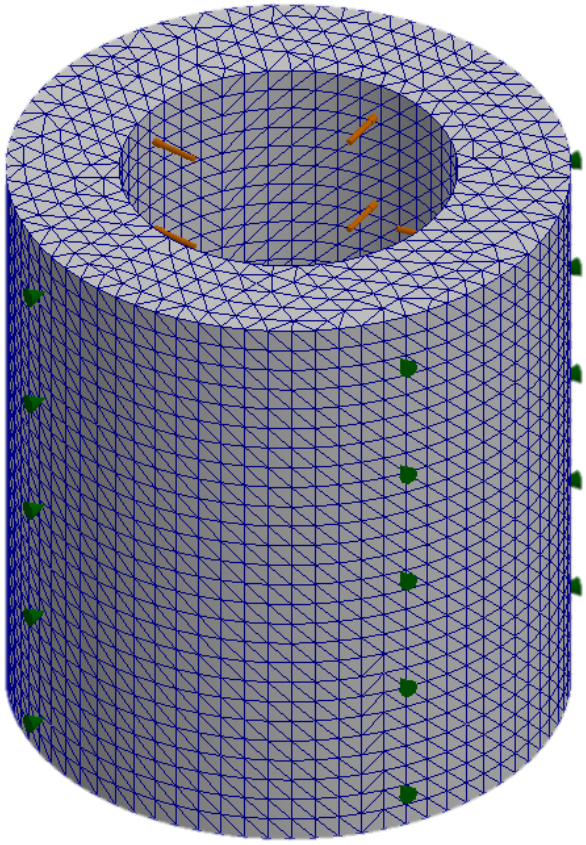


Figura 13.11. Malla fina

6. Finalmente, se visualizan los resultados.

Estos resultados son los presentes en el apartado 8.3 de esta memoria.

13.3. Anexo III. Diagrama de conexión y código Arduino para sensor de temperatura DS18B20.

El diagrama de conexión otorgado por el fabricante es el siguiente:

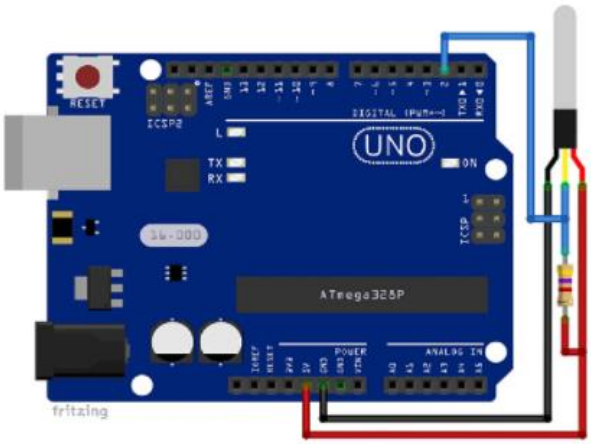


Figura 13.12. Diagrama de conexión [11]

Se ha tener especial cuidado con la resistencia dispuesta de 4,7 kΩ, pues si no es conectada, las temperaturas no se muestran adecuadamente. A continuación, se muestra el diagrama real utilizado durante los ensayos.

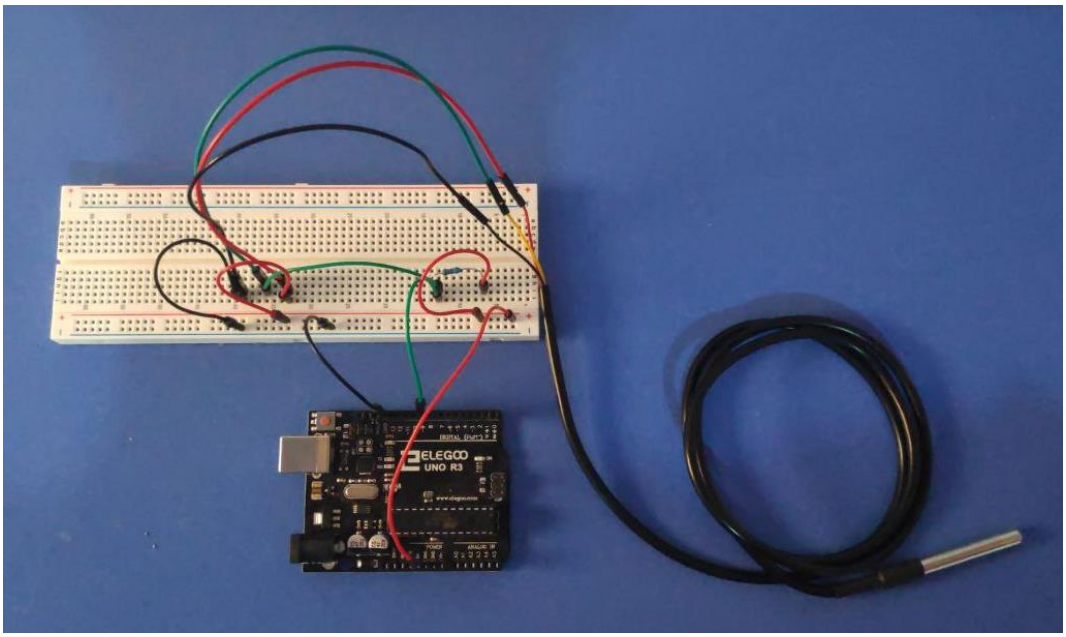


Figura 13.13. Diagrama real

Finalmente, se muestra el código utilizado para la obtención de las temperaturas.

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

// Pin donde está conectado DQ
const byte pinDatosDQ = 9;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

void setup() {
  // Iniciamos la comunicación serie
  Serial.begin(9600);
  // Iniciamos el bus 1-Wire
  sensorDS18B20.begin();
  sensorDS18B20.setResolution(12);
}

void loop() {
  // Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores
  sensorDS18B20.requestTemperatures();

  // Leemos y mostramos la temperatura del sensor DS18B20
  Serial.print("Temperatura sensor: ");
  Serial.println(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
}
```

13.4. Anexo IV. Ficha técnica PETG

En este anexo se muestra la ficha técnica del material seleccionado, PETG, otorgada por el fabricante [10].

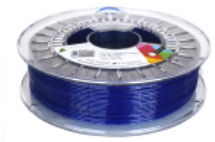
PETG

TECHNICAL DATA SHEET VERSION 1.1

SMARTFIL smart materials 3D

PETG

Copolyester with 91% transparency in its natural state, it is very glass like, with high chemical resistance. Accepted for use with food products (FDA). It is very easy to print, as it has very low shrinkage and requires no warm bed.



Reciclable Recyclable Recyclable

Apto para contacto con alimentos Food Approved Aliments approuvés

	TIPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD
PHYSICAL PROPERTIES			
Chemical Name	Polyethylene Terephthalate		
Material Density	1.27	g/cm^3	ASTM D792
MECHANICAL PROPERTIES			
Tensile Yield Strength	50	MPa	ASTM D638
Specific Gravity	1.27	g/cm^3	ASTM D1505
Rockwell Hardness (R Scale)	108	R	ASTM D785
Notched Izod Impact	105	J/m	ASTM D256
Flexural Strength	69	MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2100	MPa	ASTM D790
THERMAL PROPERTIES			
Heat Distorsion Temperature (0.45 MPa)	70	°C	ASTM D648
Vicat Softening Temperature	85	°C	ASTM D1525
PRINTING PROPERTIES			
Print Temperature	225-245	°C	
Hot Pad	60-90	°C	
Fan Layer	ON (100)	%	

SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag

Bibliografía

[1] González D., J. E., Lira Cortés, L., & Sánchez Rodríguez, Á. (s.f.).

Calorimetría Adiabática y sus aplicaciones. Querétaro, México.

[2] DFMA. (18 de noviembre de 2017). Obtenido de DFMA (Design for Manufacturing and Assembly):

http://evaluador.doe.upv.es/wiki/index.php/DFMA_(Design_for_Manufacturing_and_Assembly)

[3] JCGM 100:2008. (Septiembre de 2008).

Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncerteanty in measurement.

[4] Amazon. (2021). Obtenido de Amazon:

https://www.amazon.es/3B-Scientific-U8441020-Calor%C3%ADmetro-Calefactora/dp/B007V5ZVOM/ref=sr_1_2?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=calor%C3%ADmetro&qid=1625125983&sr=8-2

[5] Amazon. (2021). Obtenido de Amazon:

https://www.amazon.es/3B-Scientific-U8557740-Calor%C3%ADmetro-calefactor/dp/B07D3KLH5N/ref=sr_1_5?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=calor%C3%ADmetro&qid=1625126041&sr=8-5

[6] Amazon. (2021). Obtenido de Amazon:

https://www.amazon.es/dp/B08XWMT2N2/ref=sspa_dk_detail_personalized_0?psc=1&pd_rd_i=B08XWMT2N2&pd_rd_w=c4YJL&pf_rd_p=7bd14987-0066-4565-9867-f275e657c281&pd_rd_wg=NXXaj&pf_rd_r=2F1CMNHCX5MX53QYMR0C&pd_rd_r=4e34b791-fff4-4ebf-9682-aaffa82bc175&spLa=ZW5jcnl

[7] Boothroyd, G. (1996). Design for Manufacture and Assembly: The Boothroyd-Dewhurst Experience. En B. G., *Huang G.Q. (eds) Design for X. Springer.* Dordrecht. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-011-3985-4_2

[8] *DASSAULT SYSTEMES*. (2021). Obtenido de DASSAULT SYSTEMES SOLIDWORKS Sustainability:

http://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/sldworks/c_evaluate_part.htm

[9] *DFMA*. (18 de Noviembre de 2017). Obtenido de DFMA (Design for Manufacturing and Assembly):

http://evaluador.doe.upv.es/wiki/index.php/DFMA_(Design_for_Manufacturing_and_Assembly)

[10] *Smart Materials 3D*. (2021). Obtenido de Smart Materials 3D PETG:

https://www.smartmaterials3d.com/petg-filamento#/2-tamano-m_750g/25-color-natural/27-diametro-285_mm

[11] *Programarfacil*. (2021). Obtenido de Programarfacil DS18B20:

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