



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## Caracterización de un sistema de almacenamiento latente pasivo mejorado

TRABAJO FIN DE GRADO  
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Autor:** Jose Alberto Cros Pérez

**Directores:** Ruth Herrero Martin

Alberto Egea Villareal

Cartagena, Mayo de 2021



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



# Índice

Índice.....	I
Índice de figuras .....	III
Resumen.....	V
Abstract.....	V
1. Introducción .....	7
1.1. Puesta en situación.....	7
1.2. Funcionamiento de un acumulador de PCM. ....	9
1.3. ¿Por qué utilizar PCM como medio de almacenamiento de calor? .....	10
1.4. Criterio de selección de un PCM.....	11
1.5. Objetivos de este proyecto.....	12
1.6. Descripción de la instalación.....	13
2. Consecución del Proyecto. ....	14
2.1. Diseño del Acumulador de PCM. ....	14
2.1.1 Consecuencias de mantener constante el volumen de la carcasa. ..	14
2.1.2 Consecuencias de mantener constante el volumen de PCM.....	14
2.1.3 Medidas acumulador PCM con espumas metálicas. ....	15
2.1.4 Cálculo del largo del acumulador de PCM sin espumas.....	16
2.2. Diseño de la instrumentación del Acumulador. ....	17
2.2.1 Criterios de selección para el material de impresión.....	25
2.2.2 Materiales compatibles. ....	26
2.3. Impresión de la instrumentación en 3D. ....	27
2.3.1 Warping y cómo evitarlo. ....	29
2.3.2 Ensayo de las piezas muestra. ....	32
2.4. Calibración de la instrumentación. ....	35
2.5. Alcance de la instrumentación. ....	37

2.6.	Instalación Instrumentación.....	40
2.7.	Ensamblaje final del acumulador. ....	44
2.8.	Instalación del acumulador en banco de pruebas.....	48
3.	Ensayos en banco de pruebas. ....	51
3.1.	Análisis de temperaturas en una sección del acumulador. ....	51
3.2.	Evaluación de la Energía almacenada en distintos ensayos.....	52
3.3.	Estudio de la evolución de la fracción líquida en el acumulador. ....	53
3.4.	Análisis de temperaturas alrededor de tubo en aureola tipo R.....	55
4.	Conclusiones .....	56
5.	Bibliografía.....	57

# Índice de figuras

Figura 1. Colectores comerciales por tubo de vacío. ....	8
Figura 2. Esquema instalación acumulador .....	9
Figura 3. Ficha técnica Rubitherm RT70HC.[1].....	10
Figura 4.Valores típicos de PCM comerciales.[2].....	11
Figura 5. Ejemplar de espumas metálicas presentes en el acumulador aleteado.[3].....	12
Figura 6. Tubos de vacío y piranómetro de la instalación. ....	13
Figura 7. Render acumulador de espumas metálicas. ....	15
Figura 8. Render acumulador sin espumas.....	16
Figura 9. Secciones de instrumentación y sus cotas.....	17
Figura 10.Termopares en secciones A y B.....	18
Figura 11. Termopares en sección C. ....	19
Figura 12. Instrumentación completa del acumulador.....	20
Figura 13. Sección C instrumentada. ....	21
Figura 16. Vista frontal Aureola S.....	22
Figura 14. Vista isométrica aureola S.....	22
Figura 15. Aureola S en tubo central.....	22
Figura 17. Vista frontal aureola R.....	23
Figura 18. Aureola R en tubo. ....	23
Figura 19. Aureolas S y R divididas para impresión 3D. ....	24
Figura 20. Especificaciones Geeetech A10. [4].....	25
Figura 21. Aureolas impresas en ABS (izq) y PETG (dcha).....	27
Figura 22. Aureola impresa en NYLON.....	28
Figura 23. Warping durante el proceso de impresión.....	29
Figura 24. Efectos del warping en la pieza impresa. ....	29
Figura 25. Warping en impresión FDM. [4].....	29
Figura 26. Pruebas con bases y balsas de impresión.....	30
Figura 27. Prueba con base de adhesión.....	30

Figura 28. Impresora instalada en el nuevo cerramiento. ....	31
Figura 29. Aureolas de ABS y PETG tras el ensayo. ....	32
Figura 30. Aureola deformada tras ensayo (ABS).....	33
Figura 31. Aureola sin deformar (PETG).....	33
Figura 32. Aureola sin deformar (ABS). ....	33
Figura 33. Aureola deformada tras ensayo (PETG). ....	33
Figura 34. Pentágono de características NylonStrong. ....	34
Figura 35. Fusor desgastado tras +200 horas de trabajo.....	34
Figura 36. Tarjetas 1 y 2 con termopares etiquetados y conectados. ....	36
Figura 37. Baño termostático durante calibración. ....	36
Figura 38. Mapa de alcance de termopares en secciones A y B.....	37
Figura 39. Área correspondiente en mm <sup>2</sup> al termopar C8 en la sección C.....	38
Figura 40. Entramado de instrumentación completamente impreso en 3D.....	40
Figura 41. Interior de la carcasa con las posiciones finales acotadas y marcadas. .....	41
Figura 42. Acumulador completamente instrumentado. ....	42
Figura 43. Detalle aureolas instaladas y fijadas. ....	42
Figura 44. caudalímetro de la instalación.....	43
Figura 45. Acumulador ensamblado a la espera de fijación definitiva.....	44
Figura 46. Detalle constructivo acumulador.....	45
Figura 47. Acumulador totalmente sellado. ....	46
Figura 48. Acumulador aislado con lana de roca. ....	47
Figura 49. Acumulador completo instalado en bancada de pruebas.....	49
Figura 50. Temperaturas Sección A. Ensayo a 80°C. ....	51
Figura 51. Energía almacenada a diferentes temperaturas de entrada. ....	52
Figura 52. Fracción líquida secciones A,B y C. ....	53
Figura 53. Fracción líquida sección C. ....	54
Figura 54. Temperaturas registradas por la aureola tipo R. ....	55

## Resumen

En este trabajo se procederá al diseño e instalación de un acumulador de materiales de cambio de fase que nos sirva de base sobre la que poder medir la eficacia de acumuladores más complejos y eficientes con el fin de cuantificar el margen de mejora de éstos últimos.

## Abstract

This work is based on designing and installing a Phase Change Material accumulator in order to study and compare it with more complex and efficient accumulators that are already built, to see how efficient they really are or how efficient can they get.





# 1. Introducción

## 1.1. Puesta en situación.

En los últimos años se ha hecho cada vez más evidente en nuestras vidas la necesidad optar por modelos de desarrollo más sostenible, esto provoca la búsqueda de la eficiencia en toda actividad para aprovechar al máximo nuestros recursos.

Para lograr este objetivo, uno de los caminos a seguir es la obtención de energía usando fuentes de energía renovables, como pueden ser la energía eólica, hidráulica o solar.

El mayor inconveniente al que nos enfrentamos cuando nos decantamos por el uso de estas fuentes de energía es su intermitencia y su disponibilidad. Buscar soluciones a este problema es vital para un aprovechamiento constante, uniforme y eficiente de las energías renovables.

En nuestro caso, el campo de aplicación de este prototipo es el de la energía solar.

Hay varios tipos de energía solar, según el modo en que se aprovechen los rayos solares. Los distintos tipos de energía solar son:

**Fotovoltaica:** Resultante de la transformación de radiación solar en electricidad usando paneles solares.

**Termoeléctrica:** Se obtiene a partir de convertir radiación solar en energía térmica y después transformar esta energía térmica en eléctrica.

**Fototérmica:** La obtenemos aprovechando la radiación solar y el calor que provoca para la obtención de energía térmica.

Uno de los problemas que afrontamos es la disponibilidad de la energía solar debido a las estaciones o al clima.

Podemos tratar de atenuar estos efectos con diversas soluciones que nos proporcionan una mayor disponibilidad de esta energía, como por ejemplo usar baterías para almacenar electricidad y usarla cuando se desee.

El inconveniente de esta solución en concreto es que solamente sirve si estamos transformando la energía solar en electricidad, dejando fuera de juego al calor producido con energía fototérmica.

Aquí es donde entran en juego los sistemas de almacenamiento latente, a los que nos referiremos de ahora en adelante como *acumuladores de material de cambio de fase* (Phase Change Materials, PCM.), que vendrían a ser a la energía térmica, lo que una batería de iones de litio a la energía eléctrica.

Estos acumuladores de PCM nos facilitan la tarea de obtener energía térmica a través de la energía solar y tenerla disponible para usar en calefacciones o agua caliente sanitaria dónde es más eficiente utilizar el calor producido por la radiación solar debido a las menores pérdidas que se producen.

Por este motivo se complementan tan bien energía fototérmica y fotovoltaica, hasta el punto de ser de gran importancia la energía termoeléctrica, que se trata de una combinación de las anteriores.



Figura 1a. Planta solar fotovoltaica PV10 Sevilla.



Figura 1b. Planta termoeléctrica PS10.



Figura 1c. Colectores comerciales por tubo de vacío.

## 1.2. Funcionamiento de un acumulador de PCM.

Un acumulador de PCM suele ser básicamente un intercambiador de calor de carcasa y tubos donde en la carcasa encontramos el PCM y por los tubos hacemos pasar agua caliente proveniente de una fuente de calor, en nuestro caso se trata de un colector que transforma la radiación solar en calor.

El PCM tiene la función de recibir tanto calor como pueda de las tuberías por las que pasa el agua caliente hasta recibir el calor suficiente para cambiar de fase y pasar de sólido a líquido.

La ventaja de tener el PCM líquido en el acumulador es que ahora su energía es mayor y la única manera de volver a su fase sólida es devolver toda esa energía que se le ha aportado.

De este modo hemos conseguido que el calor que no hemos usado durante las horas de sol se haya almacenado en nuestro acumulador en lugar de disiparse, de forma que está disponible para que, revirtiendo el proceso de antes, el PCM ceda calor a las tuberías dándonos la posibilidad de tener agua caliente de procedencia solar, fuera de las horas de luz.

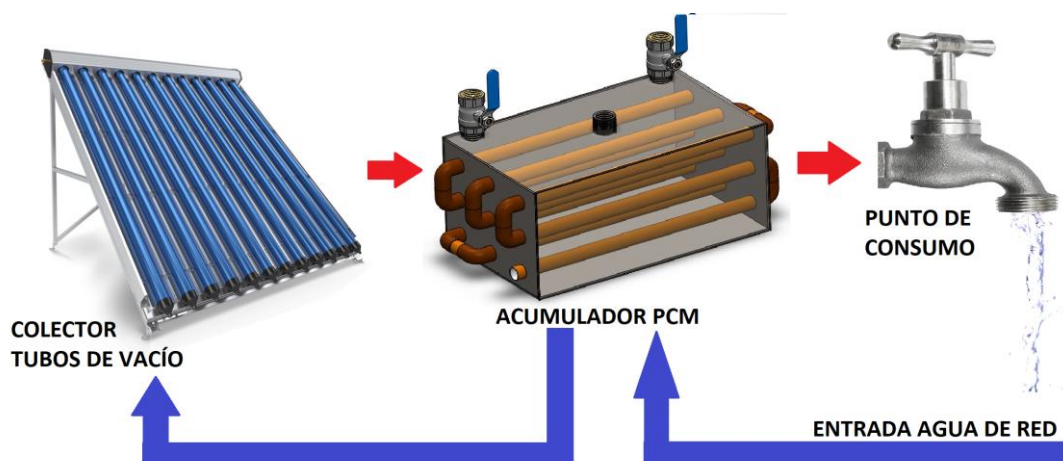


Figura 2. Esquema instalación acumulador

### 1.3. ¿Por qué utilizar PCM como medio de almacenamiento de calor?

El principal motivo por el que usar PCM para acumular calor es por su baja transferencia de calor, propiedad que nos permite que la energía no se escape fácilmente y se disipe, disponiendo así de la mayor cantidad de calor posible y permitiéndonos gestionar el flujo de energía y brindándonos una muy necesaria disponibilidad.

Sabemos que los PCM son materiales que en sus fases tienen una gran densidad energética, lo que nos beneficia a la hora de ocupar el menor volumen posible y favoreciendo un mejor aprovechamiento del espacio.

Para mostrar este aprovechamiento del espacio tomamos como ejemplo el PCM elegido para este proyecto, se trata de una parafina de nombre comercial "RUBITHERM RT70HC", la cual posee las siguientes propiedades:

- Densidad en fase líquida: 0.77 [kg/l]
- Capacidad de almacenaje de calor: 260 [kJ/kg] ó 72 [Wh/kg]

Es fácil ver que su densidad energética sería de unos 200 [kJ/l] cuando ha absorbido el calor necesario para cambiar de fase, por lo que, en un metro cúbico, el volumen que ocupa aproximadamente una lavadora doméstica podríamos albergar hasta 200 MJ.

En el caso de nuestro prototipo, con un volumen de unos 17 litros (el volumen aproximado de una bombona de butano) podríamos almacenar hasta 3400 kJ o 942.5 Wh, solo en el cambio de fase.

Nuestro interés reside en poder almacenar la mayor cantidad de energía en el menor espacio posible para poder remplazar poco a poco a los combustibles fósiles que cuentan con la ventaja de una altísima potencia calorífica.

<b>The most important data:</b>	Typical Values	
<b>Melting area</b>	<b>69-71</b>	[°C]
	main peak: 70	
<b>Congeeing area</b>	<b>71-69</b>	[°C]
	main peak: 70	
<b>Heat storage capacity ± 7,5%</b>	<b>260</b>	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 62°C to 77°C.	<b>72</b>	[Wh/kg]*
<b>Specific heat capacity</b>	<b>2</b>	[kJ/kg·K]
<b>Density solid</b> at 15°C	<b>0,88</b>	[kg/l]
<b>Density liquid</b> at 80°C	<b>0,77</b>	[kg/l]
<b>Heat conductivity (both phases)</b>	<b>0,2</b>	[W/(m·K)]
<b>Volume expansion</b>	<b>12,5</b>	[%]
<b>Flash point</b>	<b>227</b>	[°C]
<b>Max. operation temperature</b>	<b>100</b>	[°C]

Figura 3. Ficha técnica Rubitherm RT70HC.[1]

#### 1.4. Criterio de selección de un PCM.

Actualmente disponemos de un amplio catálogo de materiales de cambio de fase, que son muy útiles en sus diferentes campos de aplicación, por lo que debemos conocer muy bien nuestro campo para elegir el PCM que más se adecue a nuestra necesidad.

Necesitamos que las densidades en su fase líquida y sólida sean parecidas para poder tener la mayor cantidad de PCM posible sin riesgo de derrames si se produce expansión.

Nuestro PCM debe ser lo más estable posible en el entorno de trabajo, de modo que no reaccione con ninguno de los elementos con los que está en contacto y que no se degrade con las condiciones de operación.

Debe de ser fácil y seguro de manipular, con vistas a un uso doméstico, por lo que debe ser ignífugo y no corrosivo en la piel.

El cambio de fase debe realizarse a una temperatura fácilmente alcanzable y la temperatura a la que se empieza a degradar el PCM debe ser imposible de alcanzar en condiciones normales de operación.

La capacidad de almacenamiento de calor sensible en estado sólido y líquido, acompañada de una gran entalpia de cambio de fase.

Si el PCM va enfocado a una aplicación doméstica, es conveniente que tenga una buena distribución y sea económico.

PCM	Tipo de producto	Temp. fusión (°C)	Q fusión (kJ/kg)	Fuente
Astorstat HA17	P	21,7–22,8	—	Astor wax by Honey
RT 20	P	22	172	Rubitherm GmbH
—	2 S.H.	22–25	—	ZAE Bayern
Climsel C23	S.H.	23	148	Climator
E23	*	23	155	(EPS)
ClimselC24	S.H.	24	216	Climator
RT 25	P	25	131	Rubitherm GmbH
RT 26	P	26	232	Rubitherm GmbH
STL 27	S.H.	27	213	Mitsubishi chemical
S27	S.H.	27	207	Cristopia
S27	S.H.	27	207	Cristopia
Astorstat HA18	C	27,2–28,3	—	Astor wax by Honey
RT 30	P	28	206	Rubitherm GmbH
RT 27	P	28	179	Rubitherm GmbH
RT27	P	28	206	Rubitherm GmbH
TH 29	S.H.	29	188	TEAP
TH29	S.H.	29	188	TEAP
Climsel C32	S.H.	32	212	Climator
RT32	P	31	130	Rubitherm GmbH

P: parafina; S.H. Sal Hidratada; C Cera; \*Mezcla de dos soluciones eutécticas no tóxicas y hielo.

Figura 4. Valores típicos de PCM comerciales.[2]

### 1.5. Objetivos de este proyecto.

Actualmente hay una instalación con acumuladores de PCM, su funcionamiento es el ya mencionado anteriormente, pero con la diferencia de que cuentan con unas aletas en forma de espuma y fabricadas en aluminio que aumentan la eficiencia con que se transmite el calor al PCM.

Aquí es donde entra en juego este trabajo fin de grado, cuyo objetivo es seguir la línea de investigación ya iniciada y arrojar información valiosa y de utilidad al proyecto en marcha.

Buscamos construir y diseñar un acumulador PCM sin espumas y semejante al acumulador de espumas ya instalado. El diseño será de vital importancia para conseguir que los resultados obtenidos en ambos sean comparables entre sí.

Para ello es necesario instrumentar de forma completa y cubriendo la mayor parte del tanque posible, pero de forma que sea semejante a la instrumentación en el acumulador de espumas y podamos ver diferencias apreciables en el comportamiento del PCM en uno y en otro.

La razón de querer realizar esta comparación reside en poder saber si es rentable aletear el tanque para ganar esa eficiencia que aportan las espumas o no, ya que la geometría de éstas cuenta con ciertas complicaciones técnicas que pueden encarecer su producción.



*Figura 5. Ejemplar de espumas metálicas presentes en el acumulador aleteado.[3]*

Asimismo, se ha ampliado la instrumentación para realizar un estudio de los mecanismos de transferencia de calor en los procesos de fusión-solidificación.

## 1.6. Descripción de la instalación.

La instalación en la que se encuentra el acumulador de espumas y que será también el emplazamiento final del nuestro, se ubica en la azotea del edificio ELDI, justo encima del departamento en que se ha desarrollado este TFG, el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad politécnica de Cartagena.

Se trata de un emplazamiento idóneo, contando con un buen número de horas de sol debido a su cercanía al mar y sin edificaciones cerca que puedan arrojar sombra sobre nuestros colectores.

Los colectores encargados de recoger la radiación solar son colectores de tubos de vacío. Contamos con 4 colectores que se componen a su vez de 24 tubos cada uno, otorgando un total de 96 tubos de vacío.

Los tubos de vacío calientan con la radiación solar, en nuestro caso, el agua que una vez caliente será redirigida a los acumuladores.



*Figura 6. Tubos de vacío y piranómetro de la instalación.*

## 2. Consecución del Proyecto.

### 2.1. Diseño del Acumulador de PCM.

Ya que el objetivo es estudiar el comportamiento de nuestro acumulador con respecto al acumulador de espumas de la instalación, procederemos con un diseño semejante y que nos permita un estudio muy completo y preciso de nuestro acumulador.

Partiremos pues del diseño del acumulador de espumas, pero cómo es obvio, para un mismo volumen de parafina nuestro acumulador debe ser más pequeño al no contener las espumas.

De modo que debemos elegir si mantener las medidas del acumulador de espumas, lo que sería conservar el volumen de la carcasa, o mantener el volumen de parafina que alberga el acumulador de espumas.

#### 2.1.1 Consecuencias de mantener constante el volumen de la carcasa.

- Nos aportaría la ventaja de una mayor sencillez constructiva al poder usar los planos ya existentes para la fabricación de nuestro acumulador vacío.
- Se podría estudiar fácilmente la eficacia asociada al tamaño y observar como de eficaz es el uno sobre el otro para un tamaño idéntico.
- Al mantener el mismo volumen de carcasa nuestro acumulador contendría más PCM que el de espumas haciendo más difícil es estudio por la elevada demanda de energía de ese exceso de PCM, aumentando significativamente los tiempos de estudio y ensayo.

#### 2.1.2 Consecuencias de mantener constante el volumen de PCM.

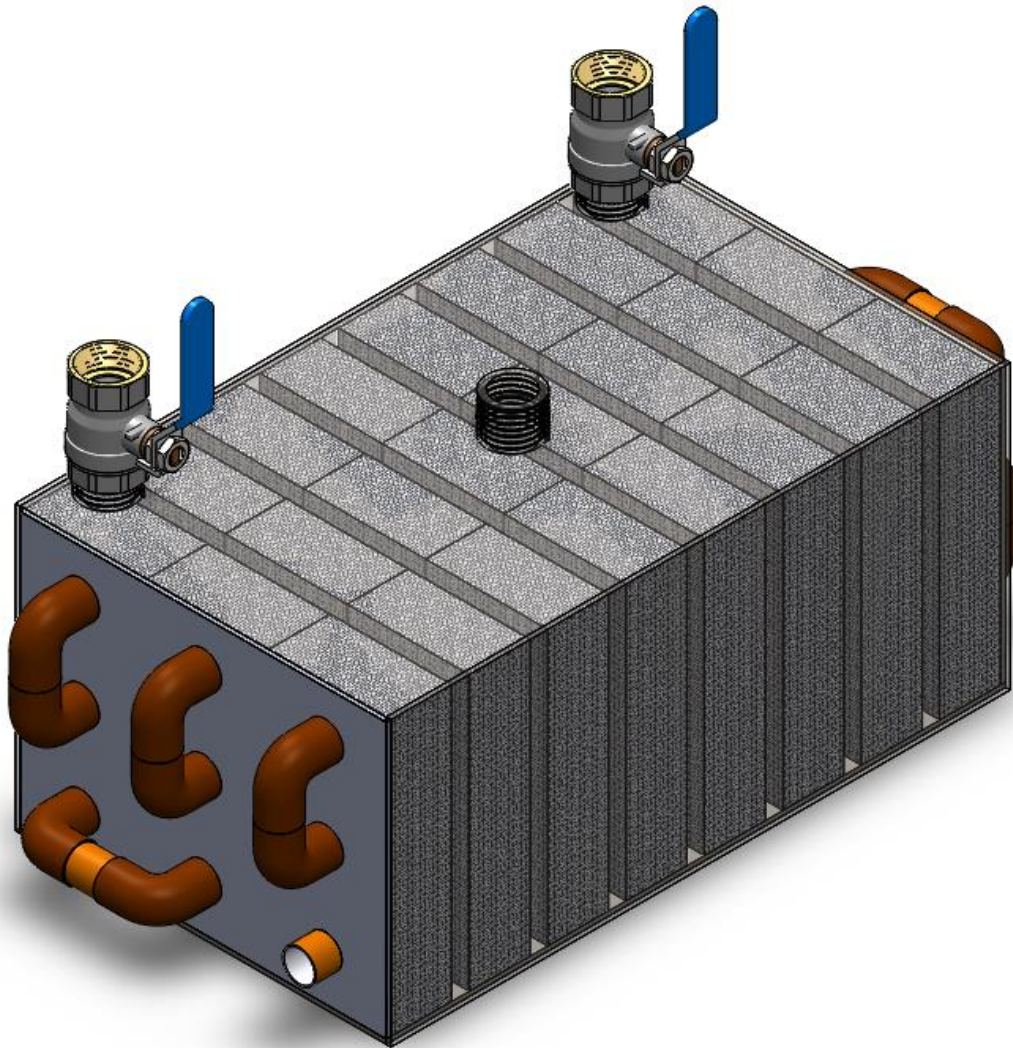
- Si en ambos mantenemos la misma cantidad de PCM tendremos que rehacer los planos de nuestro acumulador para poder albergar la misma cantidad de PCM que cupo en el de espumas (16.5L) dificultando su fabricación.
- Al mantener el volumen de PCM también mantenemos la energía que son capaces de albergar ambos acumuladores.
- Nos facilitará el estudio de la eficiencia a la hora de transmitir una misma energía, pudiendo comparar directamente los tiempos requeridos por uno y por otro para el cambio de fase completo de nuestro PCM.



En este caso y tras contemplar las alternativas, se optó por mantener el volumen de PCM y las medidas de la sección transversal del acumulador de espumas, de manera que preservaríamos el ratio de medida en todas las secciones y variando únicamente el fondo del acumulador.

Para calcular el largo que ha de tener el nuevo acumulador debemos conocer las medidas del acumulador de espumas.

### 2.1.3 Medidas acumulador PCM con espumas metálicas.



*Figura 7. Render acumulador de espumas metálicas.*

**Ancho: 260mm / Alto: 200mm / Largo: 400mm / Espesor chapa: 3mm**  
**Volumen Carcasa:  $260 \times 200 \times 400 = 20.8$  litros / Volumen PCM: 16.5 litros**

## 2.1.4 Cálculo del largo del acumulador de PCM sin espumas.

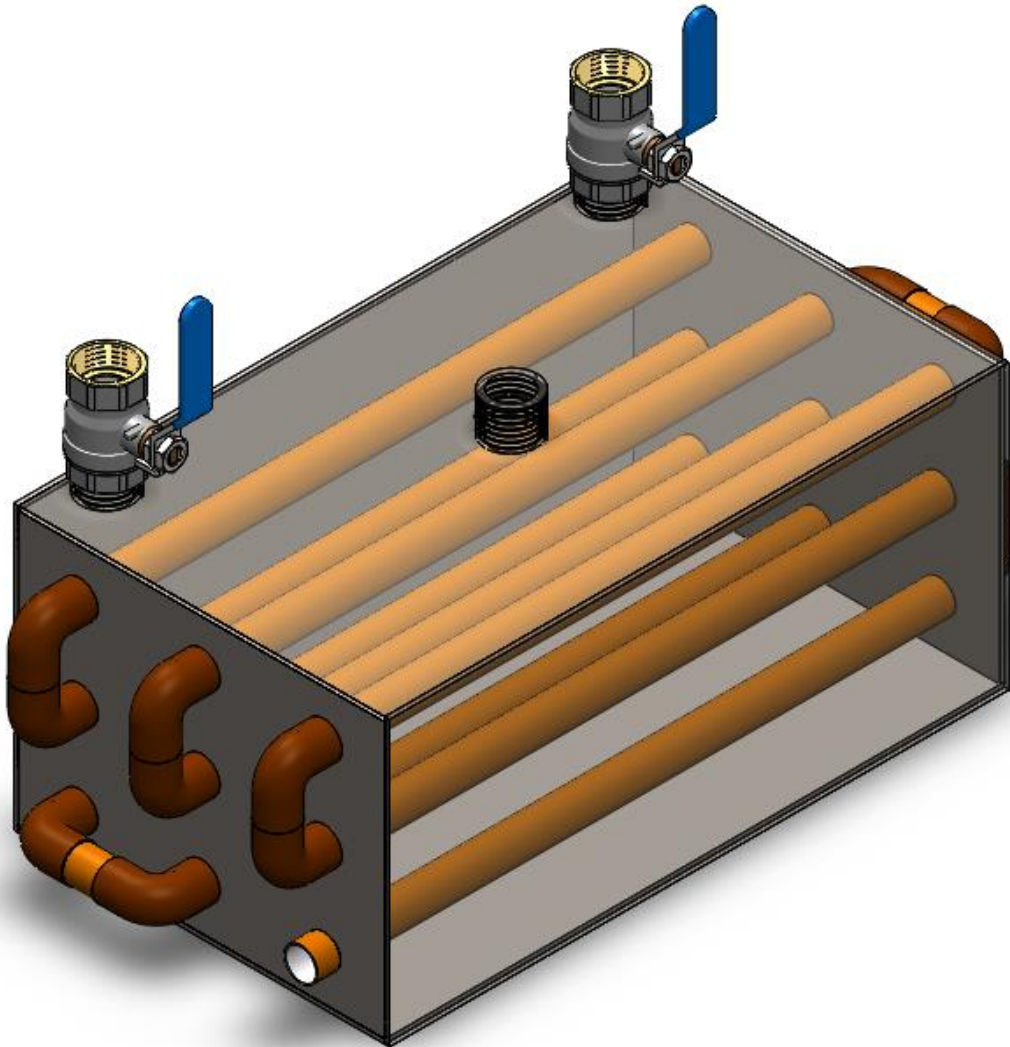


Figura 8. Render acumulador sin espumas.

**Ancho: 260mm / Alto: 200mm / Largo:  $X = 340\text{mm}$  / Espesor chapa: 3mm**

**Volumen Carcasa:  $260 \cdot 200 \cdot X =$  / Volumen PCM = 16.5 litros**

$$A_{\text{tubo}} = \pi r^2 = 380.133\text{mm}^2 \quad [\varnothing_{\text{tubo}} = 22\text{mm}]$$

$$A_{\text{sección}} = 260 \cdot 200 = 5.2 \cdot 10^4 \text{mm}^2$$

$$V_{\text{PCM}} = A_{\text{sección}} \cdot X - 9A_{\text{tubo}} \cdot X = 16.5 \cdot 10^6 \text{mm}^3$$

$$X = \frac{16.5 \cdot 10^6}{(A_{\text{sección}} - 9A_{\text{tubo}})} \approx 340\text{mm}$$

## 2.2. Diseño de la instrumentación del Acumulador.

Es necesario una instrumentación completa y adecuada para poder medir con precisión y tener el mayor conocimiento posible de lo que en el interior del acumulador está ocurriendo.

Usaremos termopares para la toma de temperaturas por su sencillez, precisión y precio, además de ocupar poco espacio dentro del acumulador, de modo que la presencia de éstos influya lo menos posible en el comportamiento del PCM.

La instrumentación será semejante a la presente en el acumulador de espumas y más completa. De modo que el emplazamiento de los termopares quedará contenido en 3 secciones A, B y C donde A y B son iguales, y C es la central.

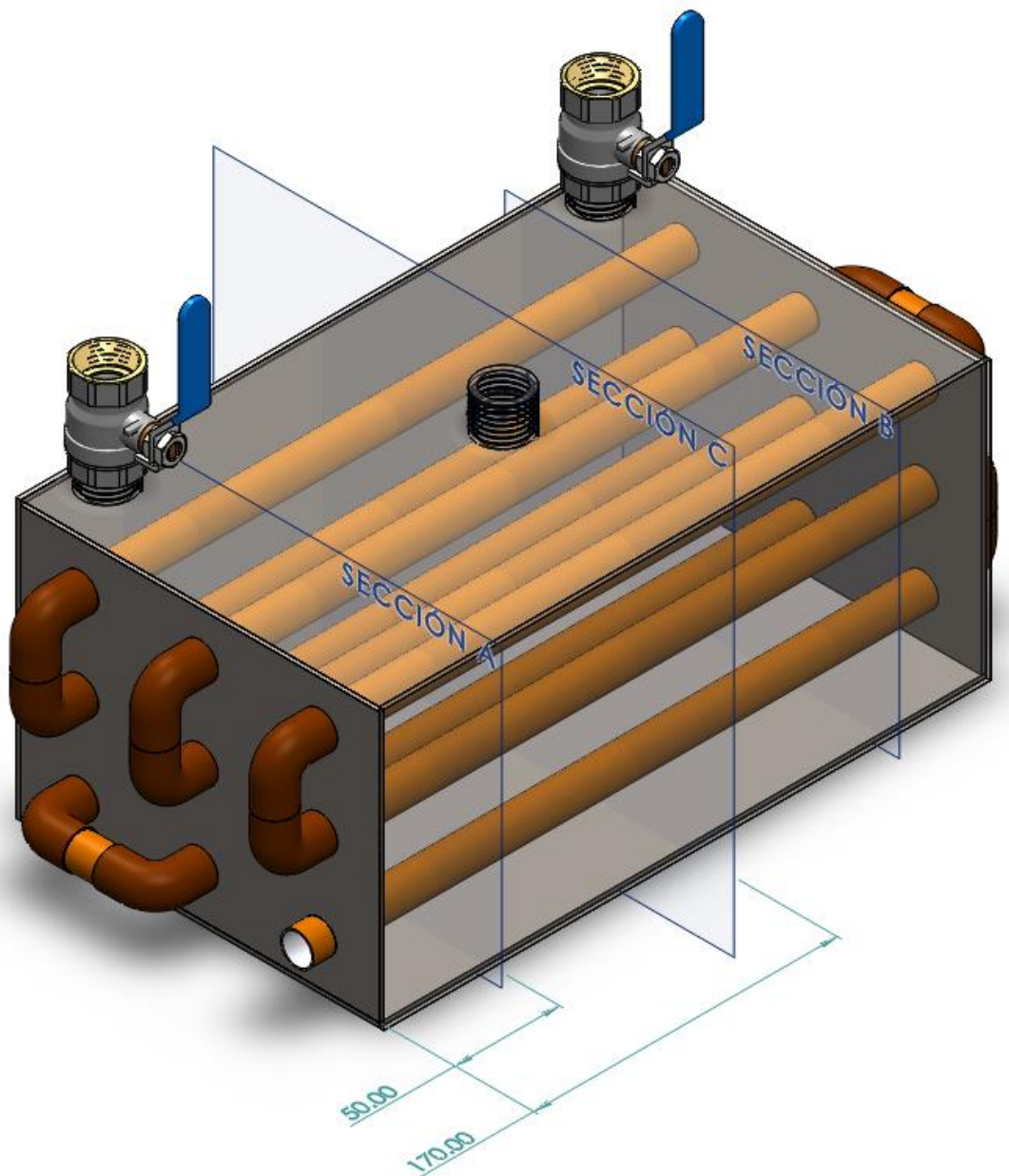


Figura 9. Secciones de instrumentación y sus cotas.

Para conocer lo que está pasando en la periferia de los tubos cuando transportan el agua caliente, colocaremos los termopares de modo que sepamos de forma precisa su posición con respecto al tubo.

El modo de restringir el movimiento de los termopares dentro del acumulador y de ubicarlos de forma precisa, será fijarlos con guías que los coloquen donde deseemos.

Nos serviremos de aureolas impresas en 3D en las que irán alojados los termopares ocupando cada una de las posiciones en las que queramos medir la temperatura.

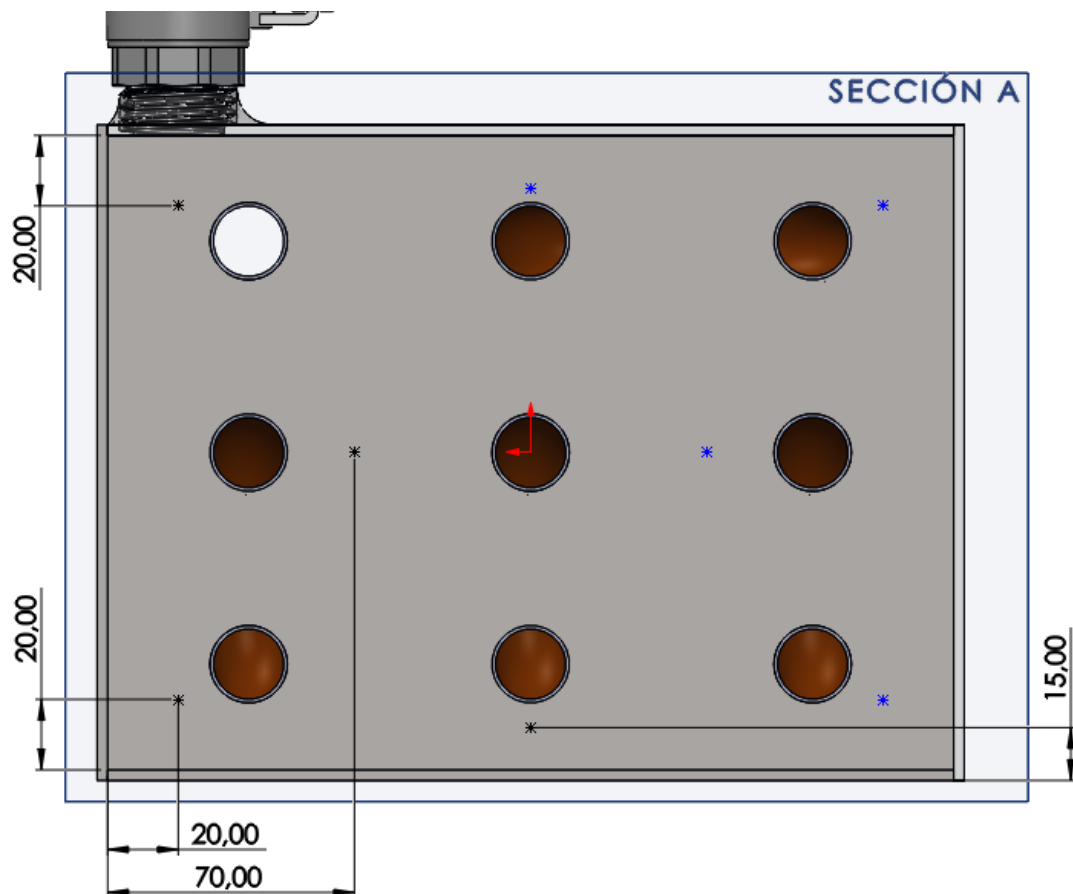


Figura 10. Termopares en secciones A y B.

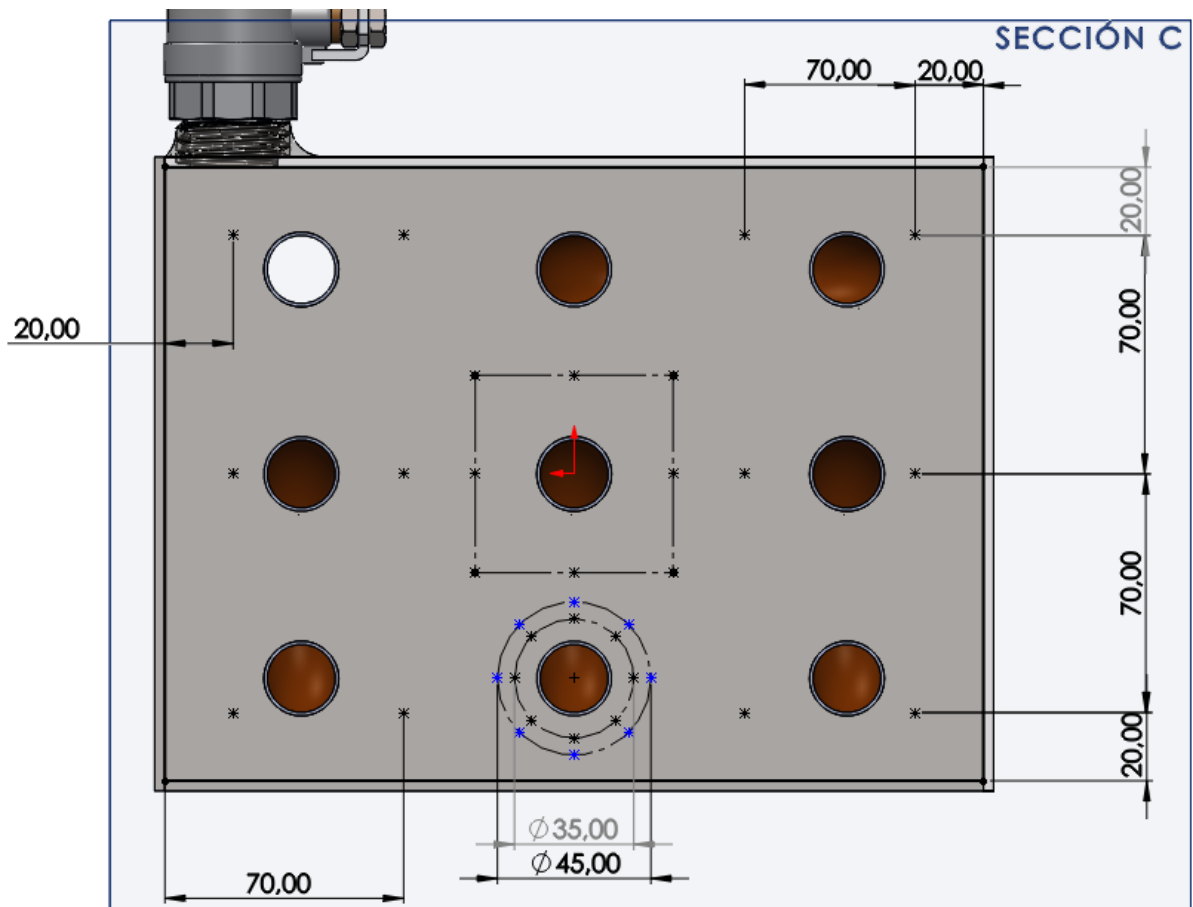


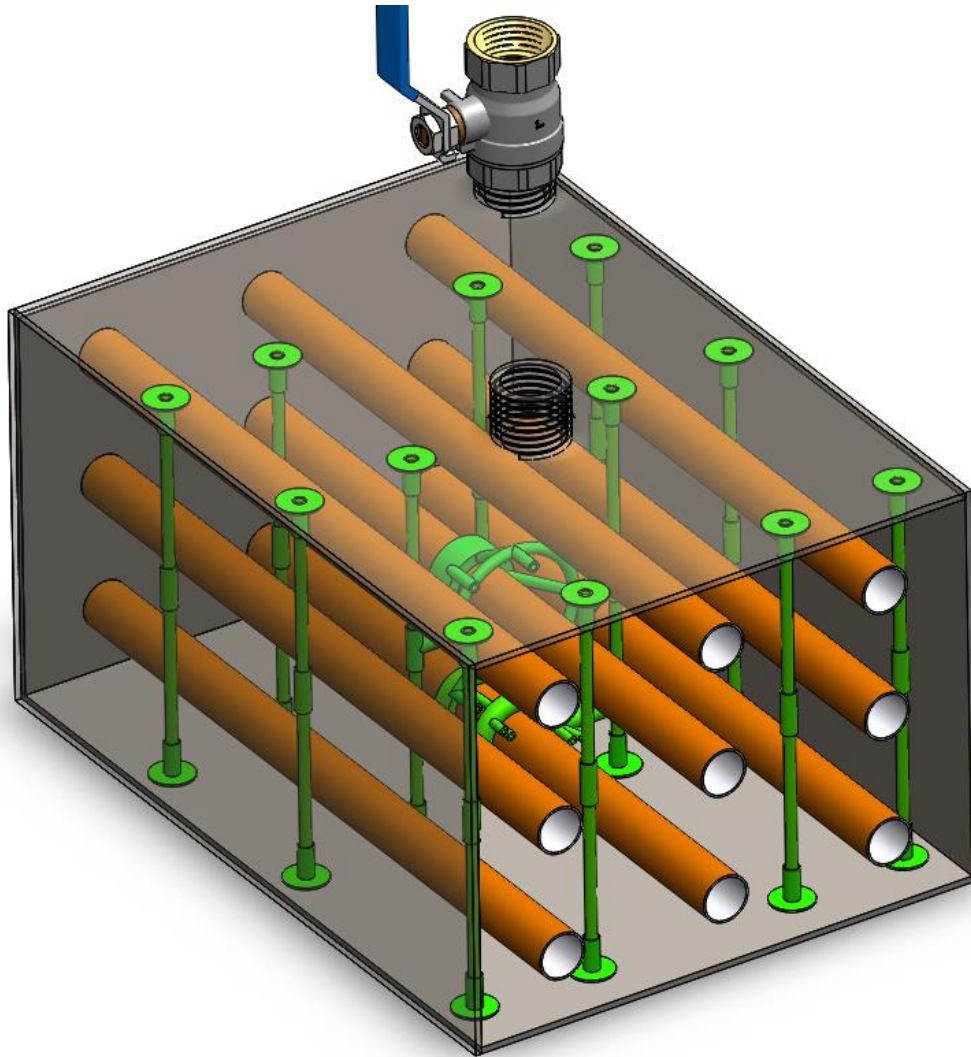
Figura 11. Termopares en sección C.

La impresión 3D nos dará la precisión que necesitamos y la posibilidad de conseguir formas complejas de forma asequible, fabricando nosotros mismos de principio a fin la malla en la que estarán contenidos los termopares.

Dicha malla constituirá una estructura de soporte y contención de los termopares que estará compuesta de varias partes con el fin de lograr las características que necesita la instrumentación.

Usaremos el programa de diseño SolidWorks para diseñar todo lo necesario.

Dónde podemos encontrar una mayor dificultad constructiva es en el acomodo de los sensores alrededor de los tubos de la sección central "C", resolveremos este problema tratando de usar la menor cantidad de plástico posible.



*Figura 12. Instrumentación completa del acumulador.*

En esta figura es apreciable la instrumentación existente en cada una de las secciones en las que hemos dividido el tanque, las secciones A y B son idénticas y menos complejas que la sección central C, con mayor densidad de termopares y con unas aureolas que mostraremos en detalle más adelante.

Pese a ser un prototipo, el diseño se mantuvo hasta el momento de la instalación de la instrumentación en el laboratorio, dónde se redujo el plástico necesario en las secciones A y B.

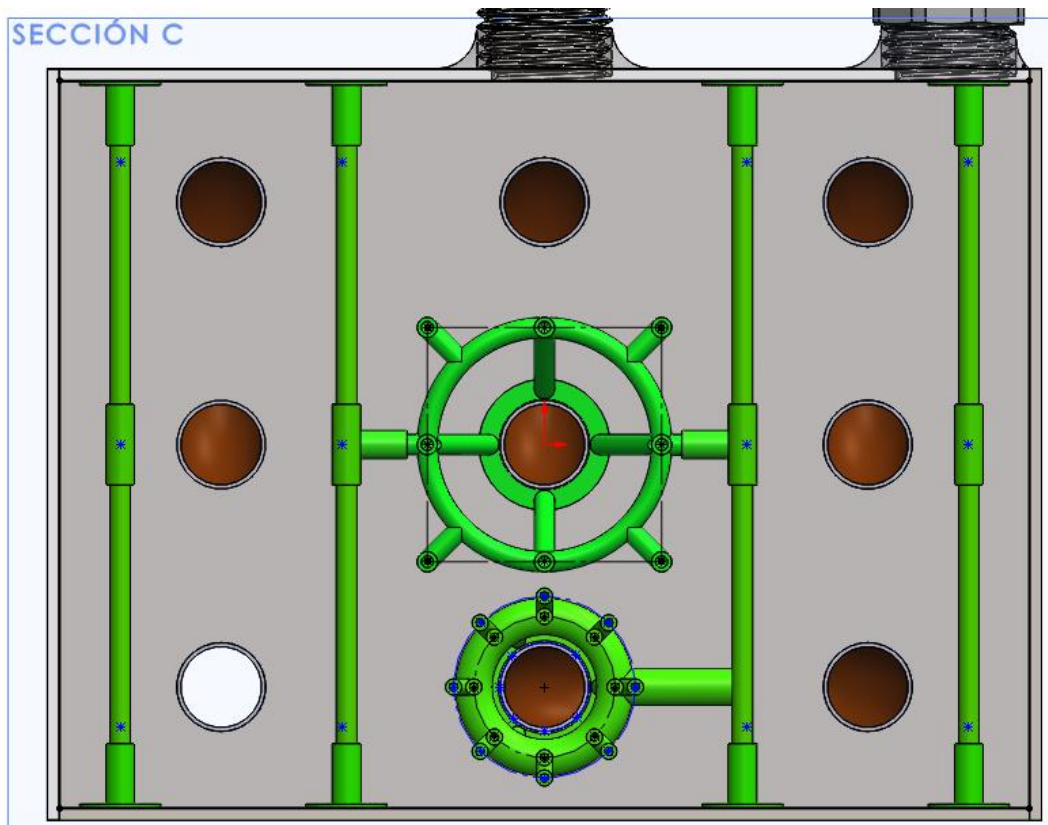


Figura 13. Sección C instrumentada.

Nos centraremos en la sección C por su complejidad y a la vez similitud con las secciones A y B, con las que se asemeja en las varillas verticales que alojan los termopares representados con asteriscos azules y negros.

Podemos observar que cada varilla está compuesta de 5 piezas, dos tubos huecos, una unión y dos zapatas que la fijan al techo y fondo del acumulador. Aunque más tarde se decidió imprimir un único tubo macizo para prescindir de la pieza de unión y solventar las dificultades técnicas de imprimir un tubo hueco de esas dimensiones.

En este diseño contamos con dos aureolas, la superior se trata de la aureola “S” y la aureola “R”, que deben su nombre al patrón que siguen sus termopares “squared” y “rounded”. Ambas aparecen unidas a la malla de instrumentación, pero después serán separadas para dirigir mejor los terminales de los termopares al exterior del acumulador.

La aureola tipo S hace referencia a cómo fueron colocados los termopares alrededor del tubo en el acumulador de espumas, de modo que los resultados puedan ser comparables al compartir instrumentación.

Sin embargo, es la aureola tipo R la que nos arroja mayor información debido a su densidad de termopares incorporando 16 y 6 más adheridos a la pared del tubo en la que se encuentran.

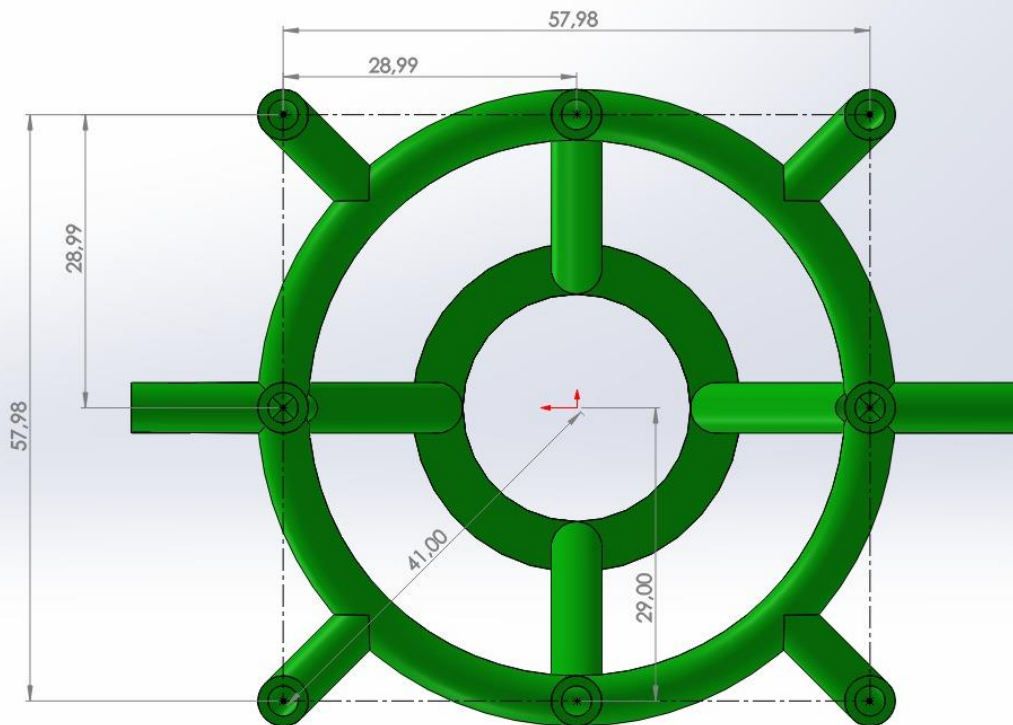


Figura 16. Vista frontal Aureola S.

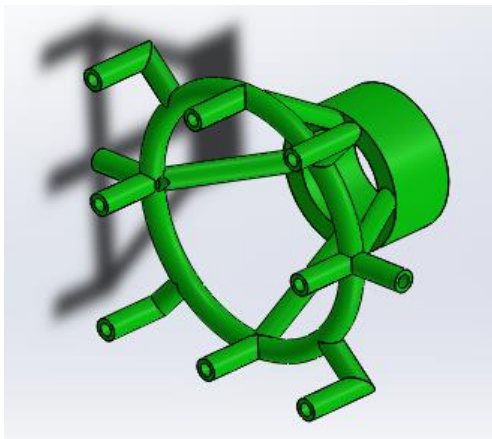


Figura 14. Vista isométrica aureola S

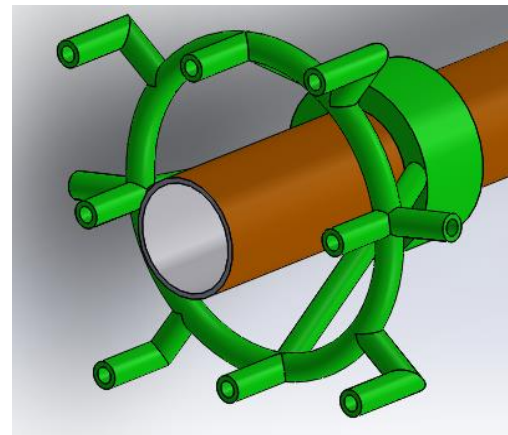


Figura 15. Aureola S en tubo central.

En estas figuras podemos apreciar la vista en detalle de la aureola tipo S, para visualizar mejor su geometría y la forma de adherirse al tubo central del acumulador.

Por su geometría nos enfrentamos al inconveniente de cómo imprimir más cómodamente estas piezas, pero la solución reside en dividir la aureola en dos piezas impresas por separado, que además faciliten la instalación de los termopares.



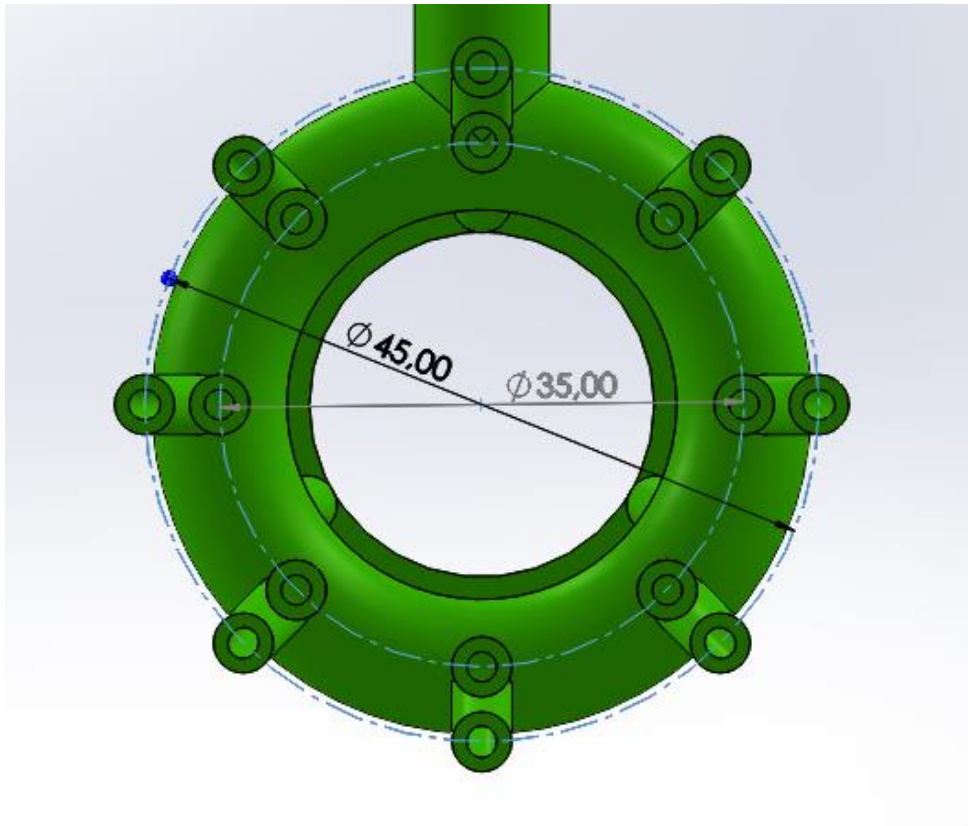


Figura 17. Vista frontal aureola R.

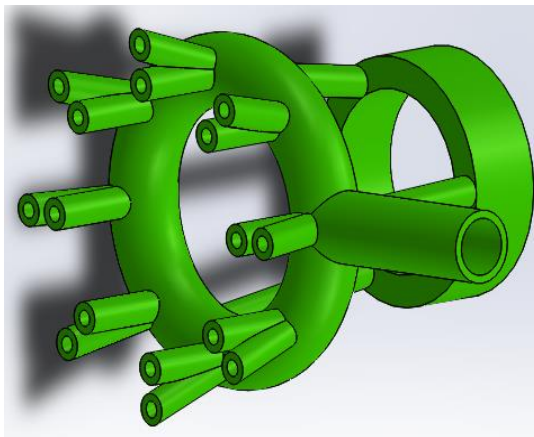


Figura 20. Vista isométrica aureola R.

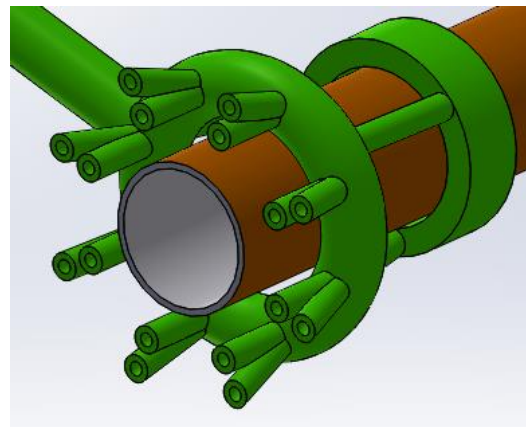
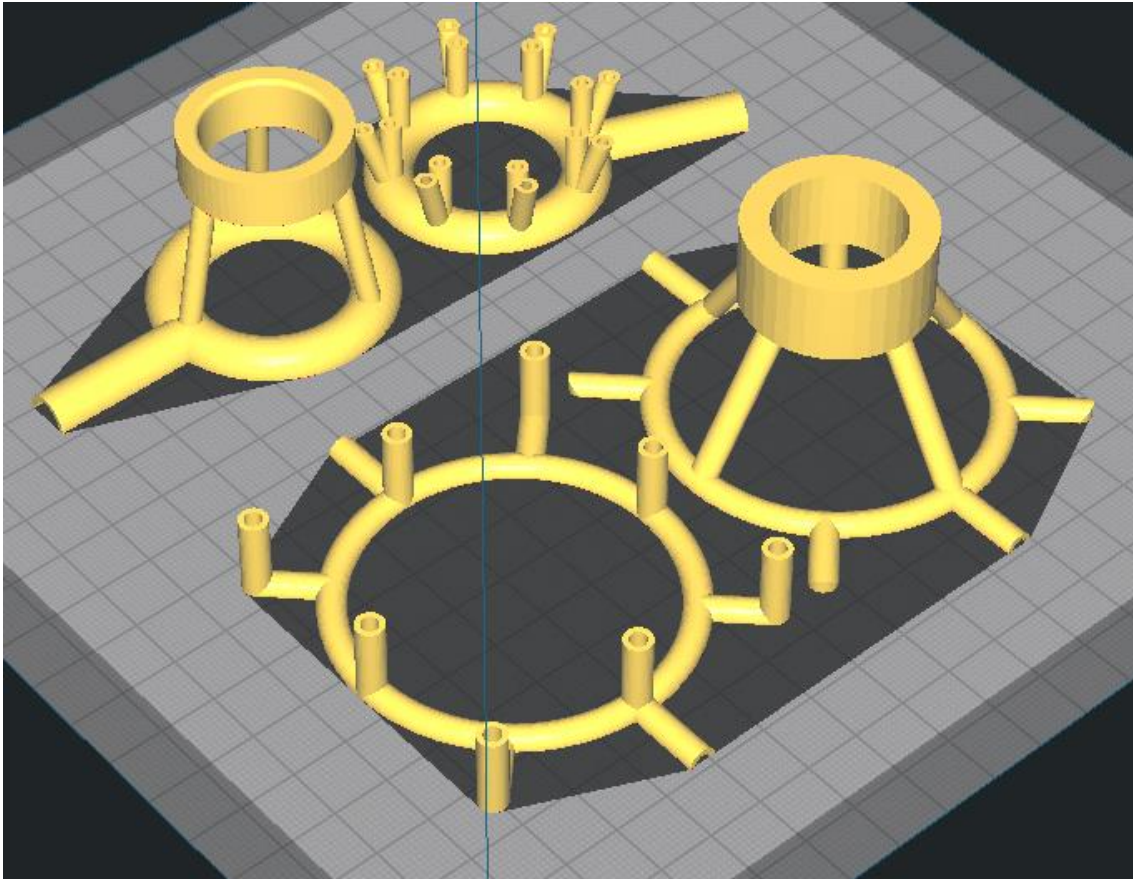


Figura 18. Aureola R en tubo.

En estas vistas en detalle de la aureola R podemos apreciar la geometría que la caracteriza, al igual que la aureola S, ésta también es hueca para albergar los termopares que introduzcamos en ella y también será preciso dividirla en dos mitades que una vez instrumentadas serán unidas.

La alta densidad de termopares presentes promete ayudar a modelizar con precisión qué ocurre exactamente alrededor del tubo durante los mecanismos de intercambio del calor entre el tubo y la parafina.



*Figura 19. Aureolas S y R divididas para impresión 3D.*

Este mallado de instrumentación estará sumergido y, por tanto, rodeado en todo momento por el PCM para poder medir temperaturas en ciertos puntos de su interior.

Aparece entonces el dilema de qué material elegir para nuestra aplicación, por lo que debemos saber las condiciones en la que va a operar nuestro acumulador y las limitaciones de la impresora 3D que vamos a utilizar, para poder reducir el número de alternativas.

Sabiendo por la experiencia de ensayos previos que el agua caliente que entra al acumulador no llega a cambiar su fase y por tanto comenzar a ebullición, es de suponer una temperatura máxima de operación menor de 100°C.

Pero para estar del lado de la seguridad supondremos que podría ser plausible alcanzar dichas temperaturas en el interior del PCM.

Es importante conocer también las características de la máquina que vamos a usar para la impresión 3D de los elementos necesarios para el montaje de la instrumentación, en nuestro caso una Geeetech A10 de uso doméstico.

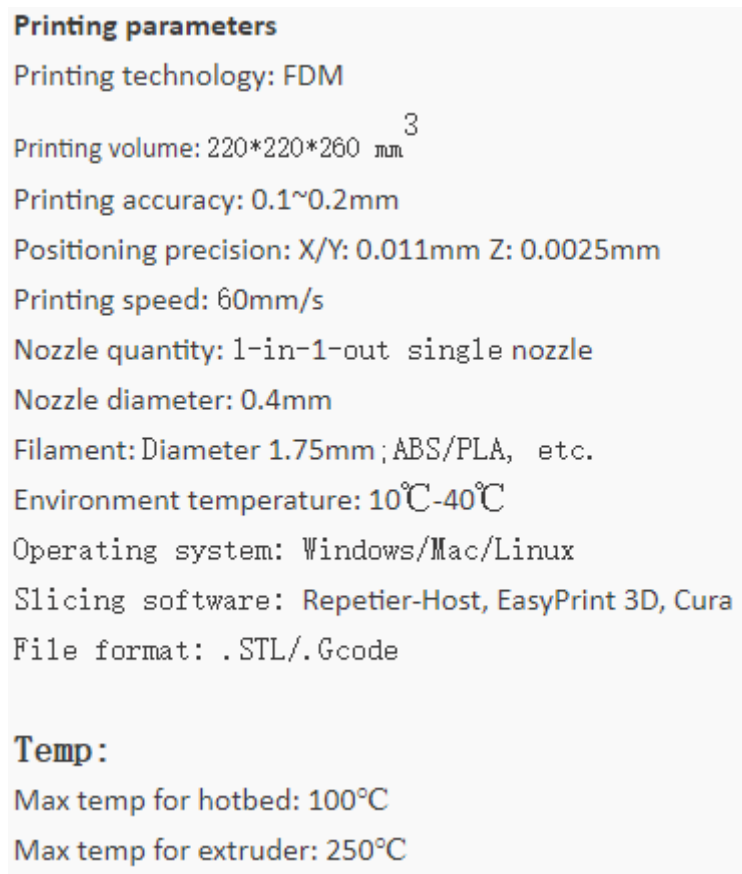


Figura 20. Especificaciones Geeetech A10. [4]

### 2.2.1 Criterios de selección para el material de impresión.

- Temperatura de reblandecimiento mayor a 100°C.
- Rigidez y resistencia suficientes para mantener su forma a pesar del comportamiento del PCM que lo rodea.
- Ha de ser un termoplástico imprimible en máquinas FDM (Fused deposition modeling) de 1.75mm.
- Resistencia química al PCM.

2.2.2 Materiales compatibles.

**PC+ABS de la marca Proto-Pasta:**

- Temp de extrusión: 270-290°C
- Temperatura heated bed: 120°C
- Temp reblandecimiento: 190°C
- Conductividad térmica: No disponible.
- Resistencia mecánica: No disponible.
- Precio: 102€/kg IVA incl.

**·PC de la marca PolyMax:**

- Temp de extrusión: 250-270°C
- Temp heated bed: 105°C
- Temp reblandecimiento: 110°C
- Conductividad térmica: 0.23W/mK
- Resistencia mecánica: 2050 MPa
- Precio: 55€/kg IVA incl.

**·(NYLON+FiberGlass) de smartfill:**

- Temp de extrusión: 250-260°C
- Temp heated bed: 90-105°C
- Temp reblandecimiento: 210°C
- Conductividad térmica:  $\approx 0.2W/mK$
- Resistencia mecánica: 2100 MPa
- Precio: 40€/kg IVA incl.

**PETG/ ABS/ NYLON básicos:**

- Temp de extrusión: 245-260°C
- Temperatura heated bed: 100°C
- Temp reblandecimiento: 90°C
- Conductividad térmica: 0.3W/mK aprox.
- Resistencia mecánica: 1700 MPa aprox.
- Precio: 20€/kg IVA incl.

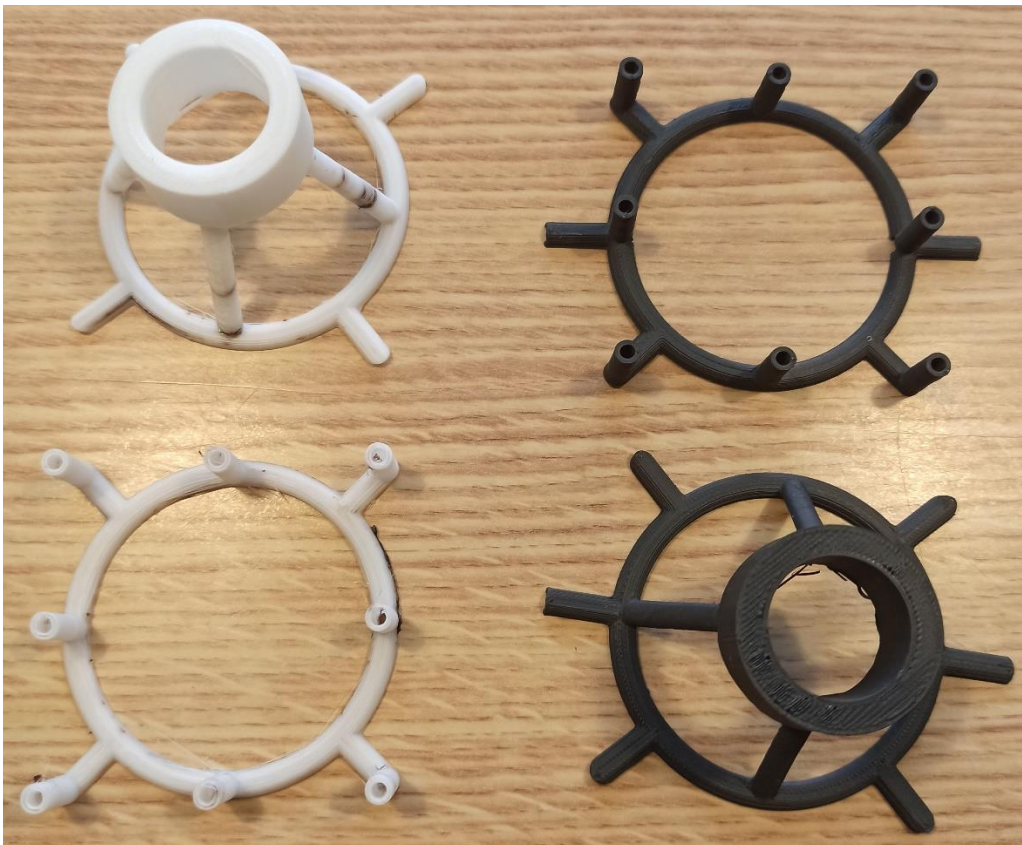
### 2.3. Impresión de la instrumentación en 3D.

De los materiales aquí mostrados, sin duda los más extendidos son ABS, PETG y NYLON (PA6), dependiendo del suministrador y el formato en algunas ocasiones se habla de temperaturas de reblandecimiento alrededor de los 100°C.

Al estar tan extendidos es fácil hacerse con muestras de estos tres materiales para probarlos, imprimirlos y comprobar su durabilidad a 100°C.

De modo que se procedió a imprimir algunas muestras en los distintos materiales, ABS blanco, PETG gris oscuro y NYLON azul.

Sólo con imprimir las piezas y antes de ensayarlas ya nos vemos inmersos en los primeros problemas de impresión, y es que tenemos que afrontar problemas derivados del material de trabajo.



*Figura 21. Aureolas impresas en ABS (izq.) y PETG (dcha.).*

De los tres materiales empleados el que más facilidad de impresión mostró es el PETG, aunque precisó de un adhesivo para minimizar los efectos del *warping* y mantenerse pegado a la cama de impresión.

La impresión en ABS presentó un *warping* más pronunciado a consecuencia de necesitar una mayor temperatura.

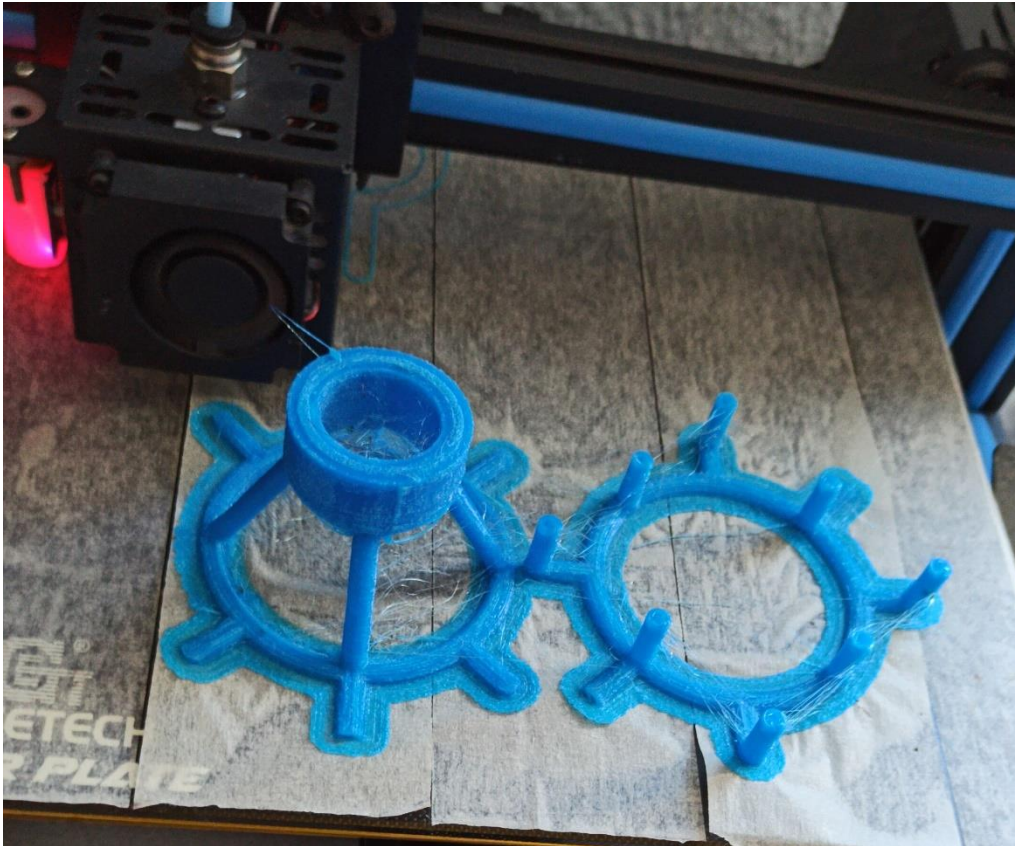


Figura 22. Aureola impresa en NYLON.

En el caso del NYLON el efecto era muy pronunciado y difícil de contrarrestar, podemos observar cómo incluso despegó la cinta de carroceros de la cama.

Esta cinta es muy usada debido a su rugosidad y a la mejora en adhesión que presentan.

La cama caliente hace que la cinta pegue con más fuerza, pero no la suficiente para soportar las contracciones de la pieza, por lo que acaba desprendiéndose.

### 2.3.1 Warping y cómo evitarlo.

El warping es un efecto que presentan algunas piezas cuando las contracciones por enfriamiento del plástico provocan que, durante la impresión, la pieza comience a despegarse de la cama caliente en la que apoya.

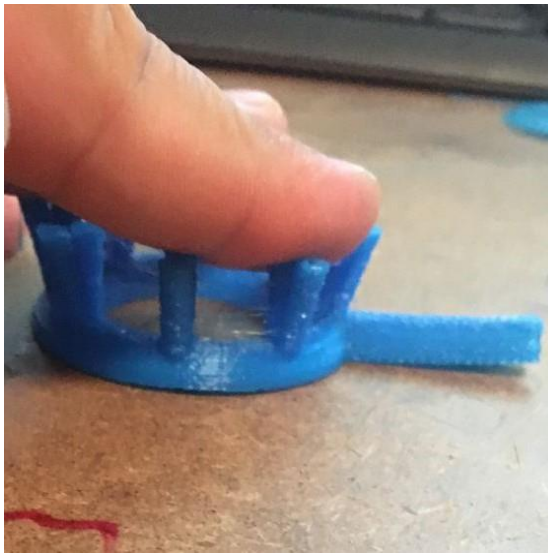


Figura 24. Efectos del warping en la pieza impresa.

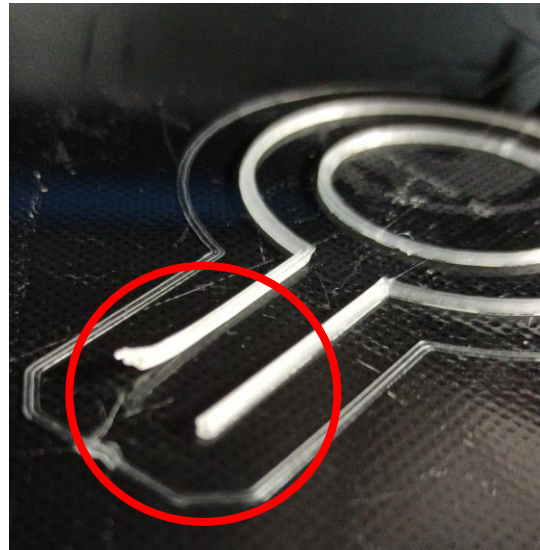


Figura 23. Warping durante el proceso de impresión.

El enfriamiento de la pieza se ve fuertemente afectado por las corrientes de aire que haya alrededor de ella durante el proceso.

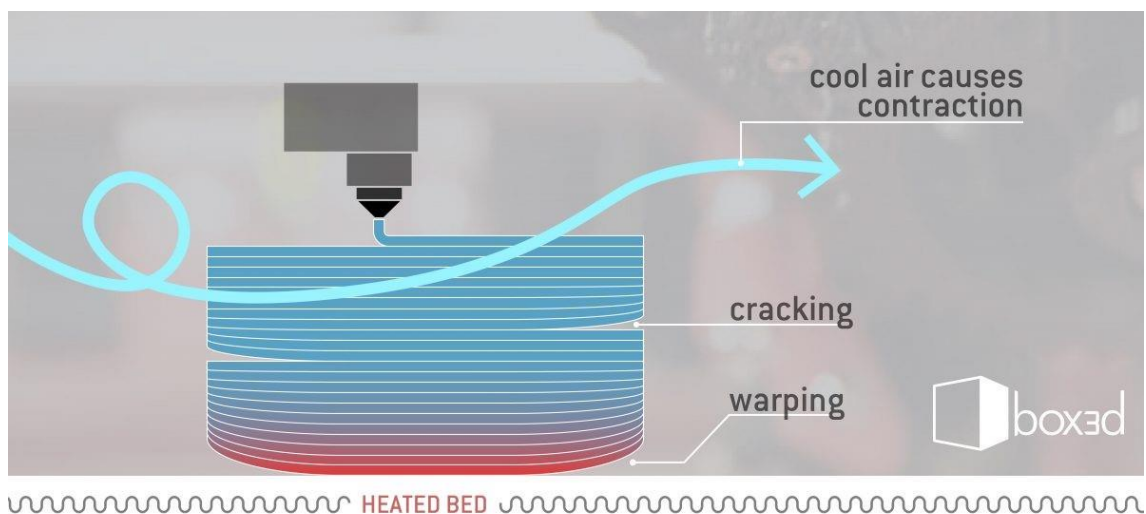


Figura 25. Warping en impresión FDM. [4]

Para atacar el *warping* podemos recurrir a diversas soluciones, como:

- Usar adhesivos en la cama de impresión.
- Aumentar la superficie de la pieza en contacto con la cama.
- Mejorar la superficie de adherencia de la cama caliente.
- Imprimir en un volumen cerrado sin perturbaciones exteriores.
- Evitar secciones macizas que concentren las contracciones de la pieza.
- Desactivar el ventilador de enfriamiento de capa.
- Enfriar la cama caliente gradualmente una vez finalizada la impresión.

En nuestro caso el aumentar la superficie de la pieza nos hacía perder mucho tiempo en retirar el exceso de material y a menudo se dañaban las piezas, por lo que, a pesar de funcionar, prescindimos de ello.



Figura 26. Pruebas con bases y balsas de impresión.



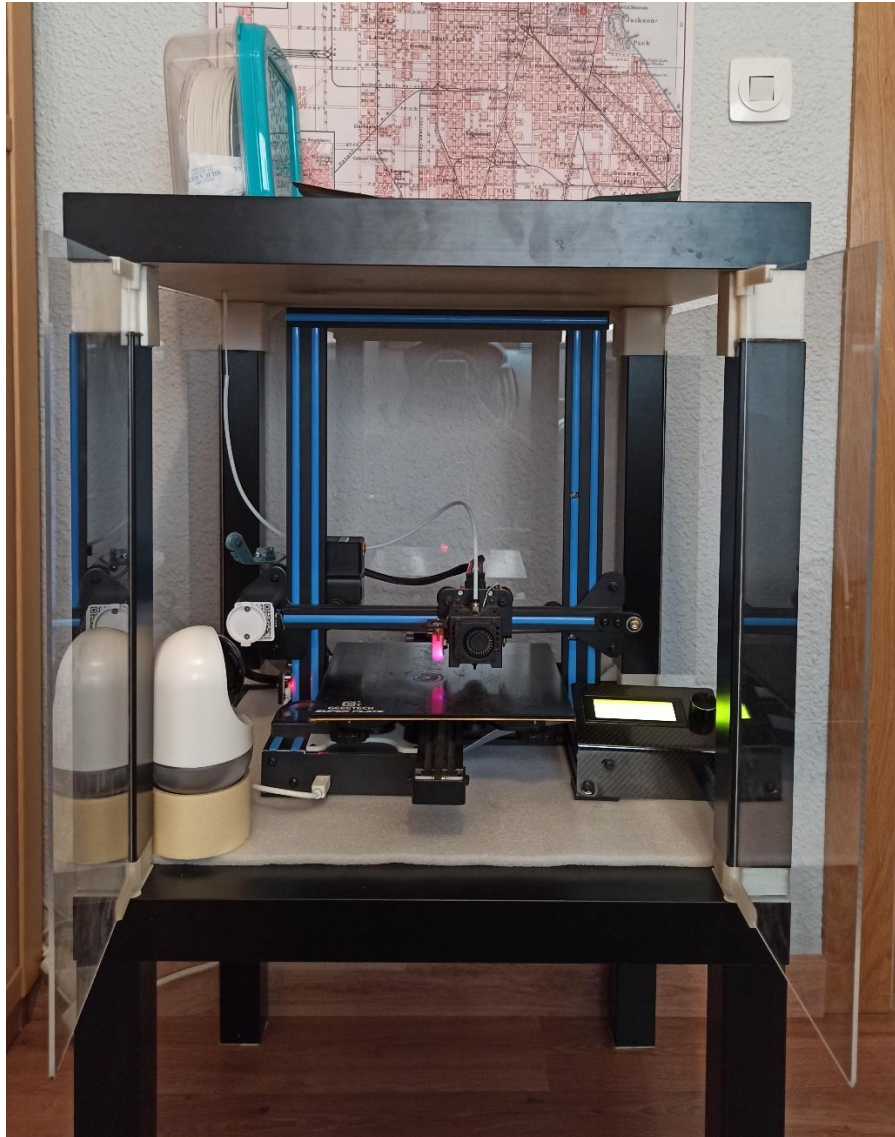
Figura 27. Prueba con base de adhesión.

Preferimos mejorar la adhesión de la pieza usando adhesivos, utilizando cinta de carroceros y por último cerrando la impresora para controlar el volumen de impresión.

Recurrimos a la solución del usuario [@plochinger](#) subida a Thingiverse con los planos para imprimir y construir un cerramiento para nuestra impresora de forma ingeniosa y eficaz.



Los materiales necesarios para el cerramiento; tres planchas de metacrilato de 3x48x44cm, otras dos de 3x48x22cm, dos mesas "LACK" de Ikea y unas piezas impresas en ABS.



*Figura 28. Impresora instalada en el nuevo cerramiento.*

Con este cerramiento conseguimos al cerrar las puertas un volumen cerrado en el que imprimir sin perturbaciones externas.

Se reubicaron la fuente de alimentación afuera del cabinet y la bobina a un recipiente hermético que impida la presencia de humedad en el plástico.

Al trabajar en un volumen cerrado con altas temperaturas se colocó una cámara de seguridad y un switch de corriente, ambos inalámbricos y conectados a la red para apagar la impresora en caso de riesgo de incendio.

### 2.3.2 Ensayo de las piezas muestra.

Con todos los problemas resueltos y habiendo encontrado una configuración de impresión óptima pudimos imprimir de forma exitosa las piezas de las anteriores imágenes.

Una vez impresas se procedió a ensayar las piezas en un baño termostático de agua a unos 100°C para comprobar el comportamiento final en tales condiciones.

Ninguno de los tres materiales superó la prueba, pues al sacar las piezas del baño presentaban graves deformaciones provocadas por la exposición continuada a una temperatura cercana a la de reblandecimiento.



*Figura 29. Aureolas de ABS y PETG tras el ensayo.*

Al sacar las piezas del baño termostático pudimos observar la presencia de deformaciones, las cuales parecen magnificarse si comparamos este estado, con su estado antes del ensayo.

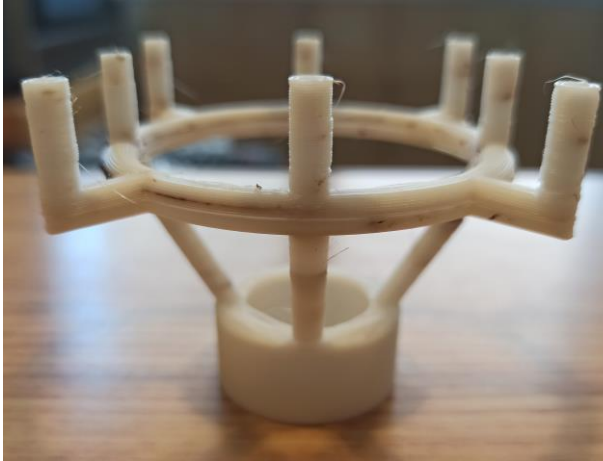


Figura 32. Aureola sin deformar (ABS).



Figura 31. Aureola sin deformar (PETG).



Figura 30. Aureola deformada tras ensayo (ABS).



Figura 33. Aureola deformada tras ensayo (PETG).

Las deformaciones son más que notorias en PETG y ABS, pero en el caso del NYLON fueron aún peores, volviéndose pegajoso y descomponiéndose en contacto con el agua del baño.

Damos por concluido el ensayo y precedemos a decantarnos por uno de los materiales técnicos estudiados con anterioridad.

Decidiendo finalmente usar por sus propiedades mecánicas, la mezcla de Nylon y fibra de vidrio de Smartfill, que recibe el nombre de *NylonStrong*.

La decisión de usar este material estuvo empujada por:

- Su conductividad térmica, muy similar a la del PCM, homogeneizando el interior del acumulador.
- Sus condiciones de almacenaje e impresión más sencillas que otros materiales técnicos, sin necesidad de deshumidificar en autoclave previa impresión.
- Buena relación calidad/precio para tratarse de un material técnico.

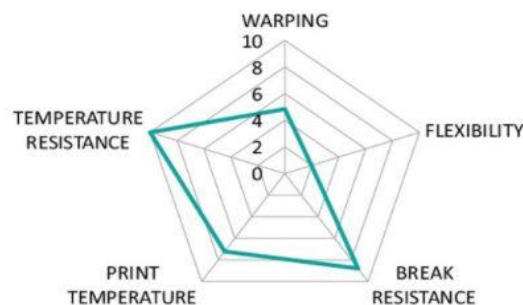


Figura 34. Pentágono de características NylonStrong.

Este material nos permitirá imprimir piezas con detalle como las nuestras con una calidad muy aceptable sin tener que sacrificar las propiedades mecánicas que necesitamos, al tener un efecto de *warping* reducido.

Sólo encontramos un problema en este material, y es su alta capacidad abrasiva como consecuencia de la presencia de fibra de vidrio en él.

Lo que provocó una vez impresas todas las piezas, el colapso del fusor de la máquina por este motivo.

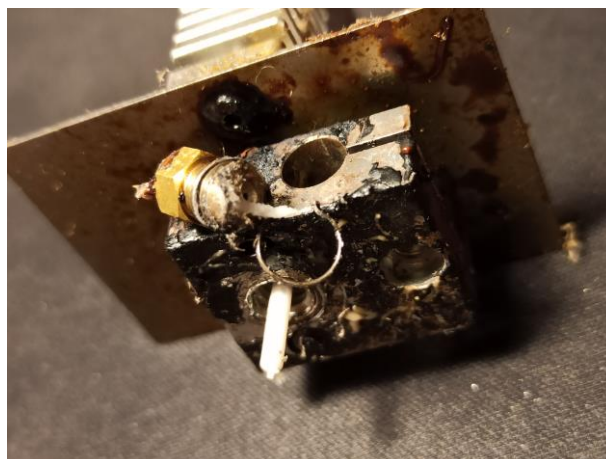


Figura 35. Fusor desgastado tras +200 horas de trabajo.

## 2.4. Calibración de la instrumentación.

Por cómo funcionan los termopares, antes de ser instalados en el acumulador debemos conectarlos a la tarjeta de conexión para calibrarlos, es decir, tabular los cambios de voltaje registrados por la tarjeta y asociados a los cambios de temperatura del baño termostático dónde estarán sumergidos los termopares.

Para calibrar usamos un baño termostático y una sonda ya calibrada, en nuestro caso una sonda PT100, la cual nos permite controlar la temperatura con un menor margen de error, resultando en una mejor calibración de nuestros termopares.

El procedimiento es sencillo, se hacen varias tomas de datos a distintas temperaturas, en nuestro caso desde 25°C a 92´5°C, en saltos de 7´5°C.

Cuando cada salto de temperatura es estable y por tanto se mantiene constante la temperatura de medición en el baño, se procede a medir qué registran los termopares a esa temperatura, nuestra calibración consta de 30 mediciones en cada salto, de modo que el valor final que se aporta a cada termopar es la media de esas 30 medidas.

Después se hace una regresión lineal con la media de cada salto para modelar la curva de medida del termopar y cómo éste varía su resistencia interna en relación con la temperatura.

Tarjeta de conexión 1				Tarjeta de conexión 2	
Termopar	Posición	Termopar2	Posición 3	Termopar5	Posición 6
A1	1	C5	21	S7	1
A2	2	C6	22	S8	2
A3	3	C7	23	Ri 1	3
A4	4	C8	24	Ri 2	4
A5	5	C9	25	Ri 3	5
A6	6	C10	26	Ri 4	6
A7	7	C11	27	Ri 5	7
A8	8	C12	28	Ri 6	8
B1	9	P1	29	Ri 7	9
B2	10	P2	30	Ri 8	10
B3	11	P3	31	Ro 1	11
B4	12	P4	32	Ro 2	12
B5	13	P5	33	Ro 3	13
B6	14	P6	34	Ro 4	14
B7	15	S1	35	Ro 5	15
B8	16	S2	36	Ro 6	16
C1	17	S3	37	Ro 7	17
C2	18	S4	38	Ro 8	18
C3	19	S5	39		
C4	20	S6	40		

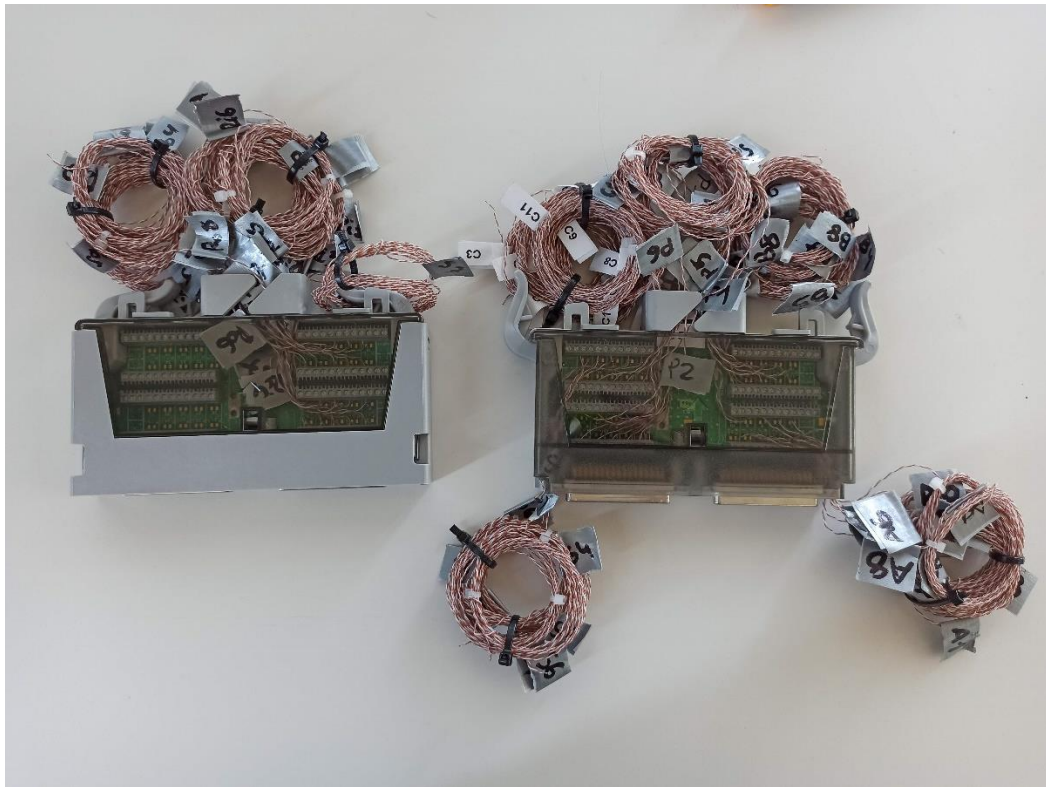


Figura 36. Tarjetas 1 y 2 con termopares etiquetados y conectados.



Figura 37. Baño termostático durante calibración.

## 2.5. Alcance de la instrumentación.

Cómo ya hemos comentado con anterioridad, disponemos de una instrumentación muy completa pero aún no se ha hablado aún de su alcance o del peso que tiene cada termopar a la hora de medir en el área que le rodea.

Para ello estudiamos cada sección y establecemos un área de acción delimitado por las mediatrices de la línea imaginaria en la que se encuentran los termopares.

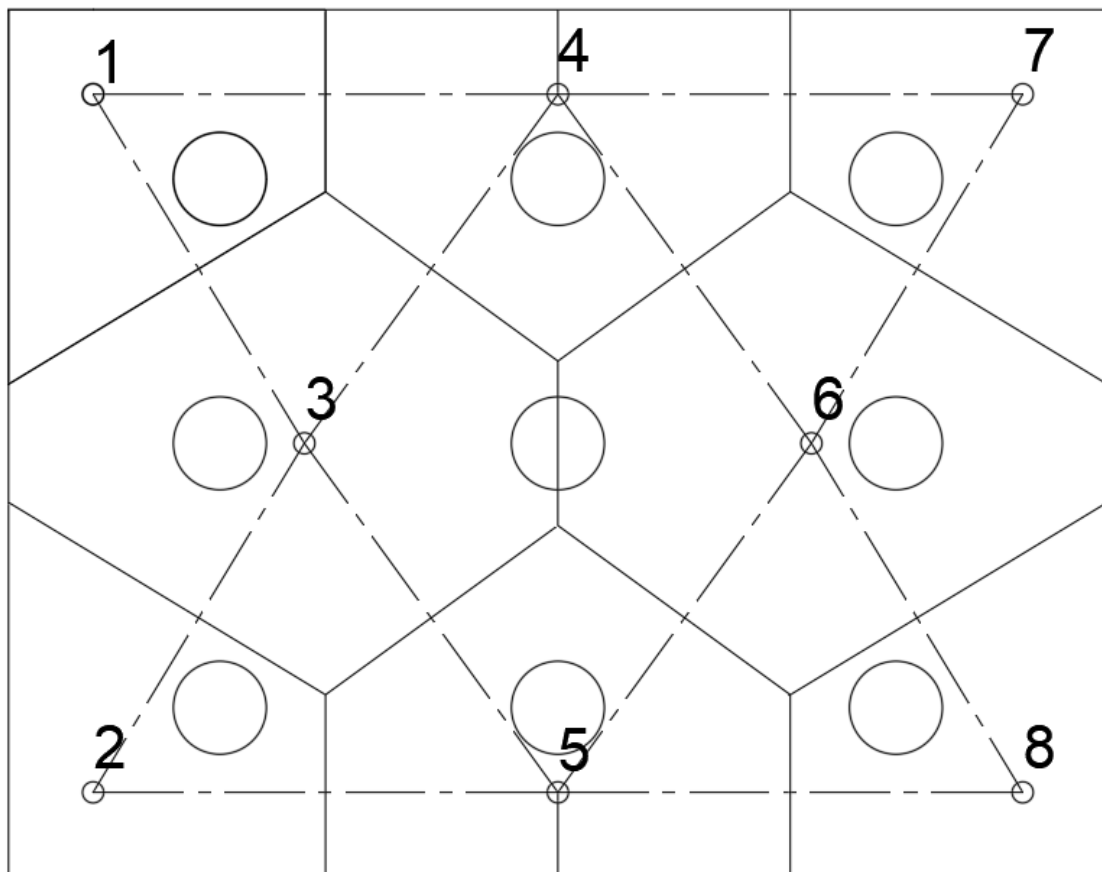


Figura 38. Mapa de alcance de termopares en secciones A y B.

En esta figura podemos observar las posiciones que ocupan los termopares en las secciones A y B, y el área correspondiente que les rodea.

Usaremos la herramienta de medir área de AutoCAD para ver qué porcentaje de área mide cada termopar respecto del área total.

Por simetría es evidente que los termopares en las posiciones 1,2,7 y 8 tienen el mismo alcance en ambas secciones. (%A1=%B1=.....=%A8=%B8)

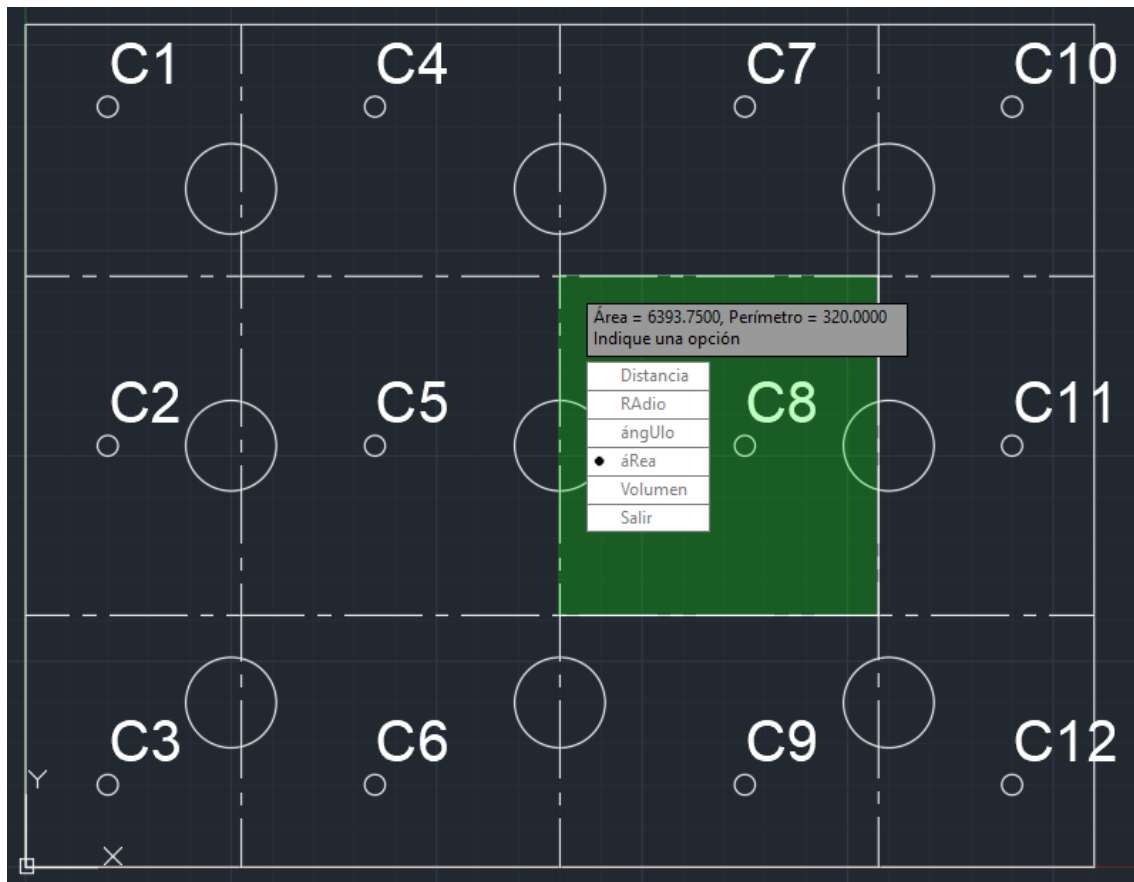


Figura 39. Área correspondiente en  $\text{mm}^2$  al termopar C8 en la sección C.

En esta otra figura es apreciable la herramienta utilizada para el cálculo de las áreas, seleccionando el perímetro que delimita cada área obtenemos su valor en  $\text{mm}^2$ . A este valor hemos de restarle el área ocupada por las secciones de los tubos de diámetro 22mm.

En el caso de la figura y de C8 deberemos tener en cuenta las dos porciones de tubo presentes dentro del perímetro.

Se han obviado en este alcance los termopares presentes en las aureolas debido a que éstos no barren toda la sección y su finalidad es conocer lo que sucede en la periferia de dos de los tubos, pero no del volumen total de parafina.

Obteniendo todas las áreas podemos finalmente saber qué porcentaje del espectro total de la sección mide cada termopar.



<b>Alcance termopares secciones A y B</b>					
	área	área tubo	área sin tubo	tanto por uno	porcentaje
X1	4934,6591	380,1327111	4554,526389	0,091311857	<b>9,13118575</b>
X2	4934,6591	380,1327111	4554,526389	0,091311857	<b>9,13118575</b>
X3	9843,1818	570,1990666	9272,982733	0,18591028	<b>18,591028</b>
X4	6937,5	380,1327111	6557,367289	0,131466005	<b>13,1466005</b>
X5	6937,5	380,1327111	6557,367289	0,131466005	<b>13,1466005</b>
X6	9843,1818	570,1990666	9272,982733	0,18591028	<b>18,591028</b>
X7	4934,6591	380,1327111	4554,526389	0,091311857	<b>9,13118575</b>
X8	4934,6591	380,1327111	4554,526389	0,091311857	<b>9,13118575</b>
		<b>AREA TOTAL</b>	<b>49878,8056</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Tabla 1. Alcance termopares secciones A y B.

<b>Alcance termopares sección C</b>					
	área	área tubo	área sin tubo	tanto por uno	porcentaje
<b>C1</b>	3215,625	244,5891111	2971,035889	0,059565097	<b>5,95650969</b>
<b>C2</b>	4331,25	244,5891111	4086,660889	0,081931811	<b>8,19318113</b>
<b>C3</b>	3215,625	244,5891111	2971,035889	0,059565097	<b>5,95650969</b>
<b>C4</b>	4746,875	325,6099555	4421,265044	0,088640155	<b>8,86401547</b>
<b>C5</b>	6393,75	325,6099555	6068,140044	0,121657685	<b>12,1657685</b>
<b>C6</b>	4746,875	325,6099555	4421,265044	0,088640155	<b>8,86401547</b>
<b>C7</b>	4746,875	325,6099555	4421,265044	0,088640155	<b>8,86401547</b>
<b>C8</b>	6393,75	325,6099555	6068,140044	0,121657685	<b>12,1657685</b>
<b>C9</b>	4746,875	325,6099555	4421,265044	0,088640155	<b>8,86401547</b>
<b>C10</b>	3215,625	244,5891111	2971,035889	0,059565097	<b>5,95650969</b>
<b>C11</b>	4331,25	244,5891111	4086,660889	0,081931811	<b>8,19318113</b>
<b>C12</b>	3215,625	244,5891111	2971,035889	0,059565097	<b>5,95650969</b>
		<b>AREA TOTAL</b>	<b>49878,8056</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Tabla 2. Alcance termopares sección C.

En las tablas se muestra el área en mm<sup>2</sup> que cubre cada uno de los termopares presentes en las distintas secciones y el porcentaje que representa esa área sobre el plano de la sección.

## 2.6. Instalación Instrumentación.

Una vez definida, calibrada y acotada la instrumentación es momento de imprimir la totalidad de las piezas necesarias para proceder con la instalación final de la instrumentación en el acumulador.

Para facilitar esta tarea se dejó la carcasa del acumulador con una de las tapas sin instalar, de modo que pudiésemos acceder al interior del tanque con facilidad.



*Figura 40. Entramado de instrumentación completamente impreso en 3D.*

El procedimiento a seguir en la instalación es:

Acotar y marcar el emplazamiento de los termopares en su posición del interior del acumulador.

Introducir los termopares en el interior de la carcasa a su vez conectados a las tarjetas de conexión.

Fijar las piezas de la malla de instrumentación en las secciones A, C y B, e instalar en ellas los termopares correspondientes.

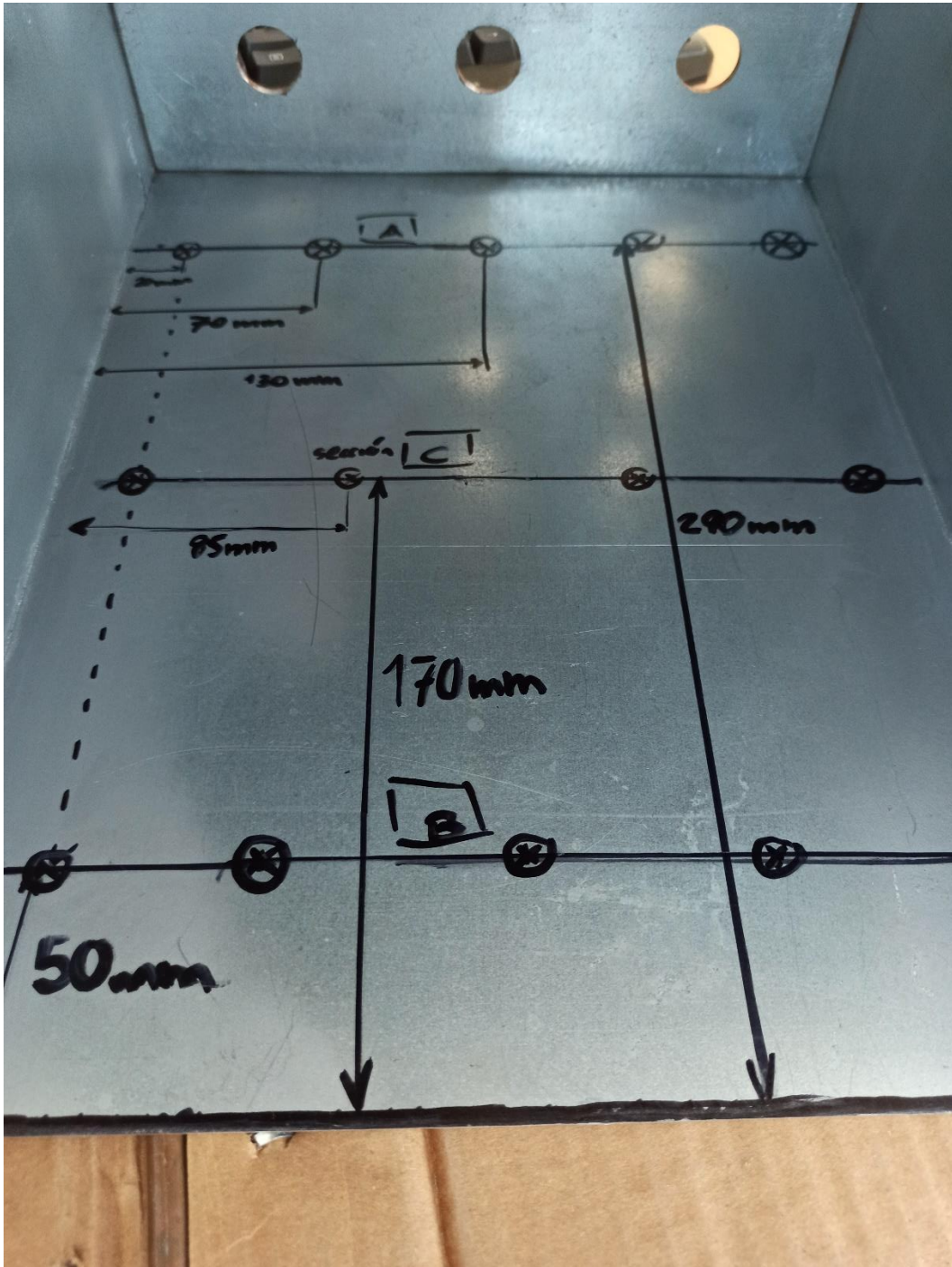


Figura 41. Interior de la carcasa con las posiciones finales acotadas y marcadas.

Para la colocación de las piezas nos serviremos de las marcas y fijaremos las piezas y los termopares con soldadura fría (Nural 27) para asegurarlos en su posición.

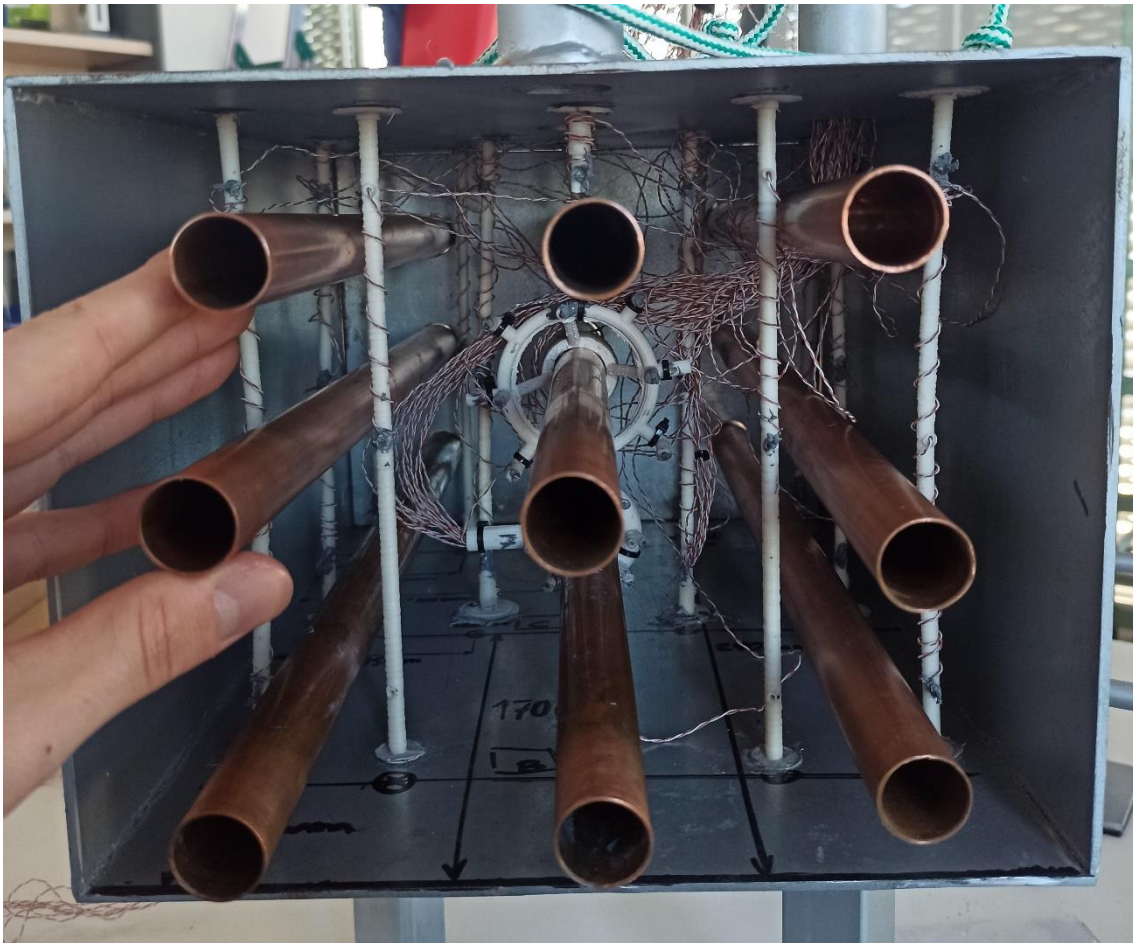


Figura 42. Acumulador completamente instrumentado.

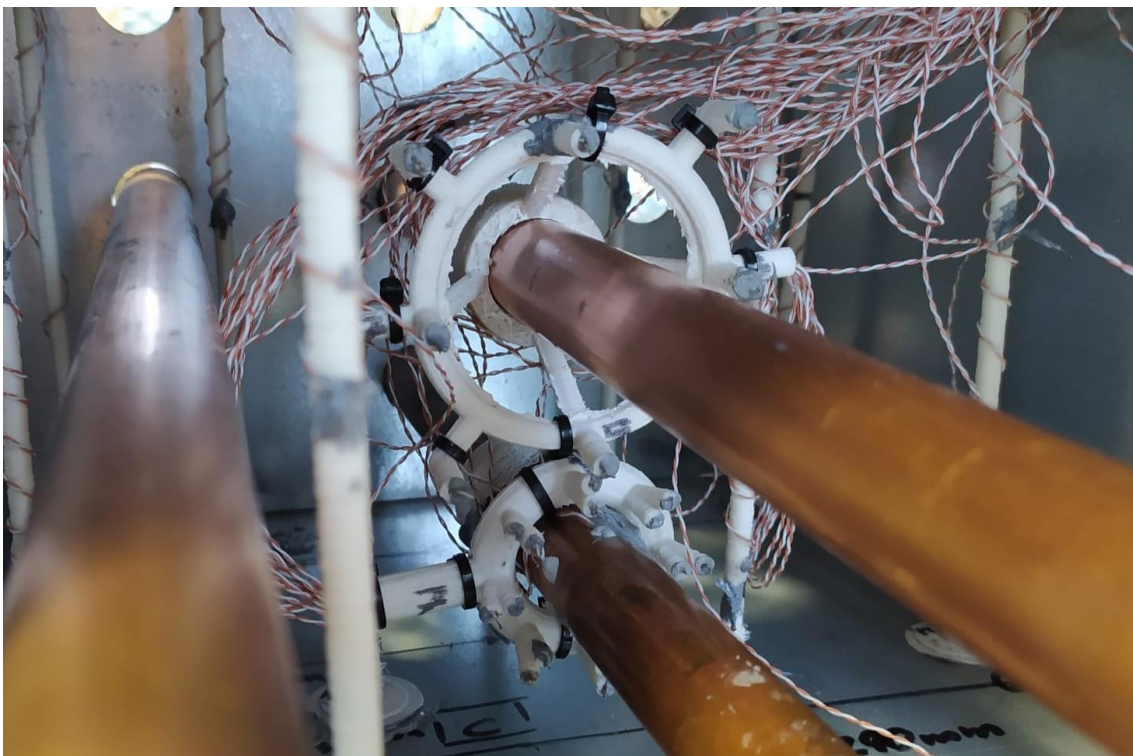


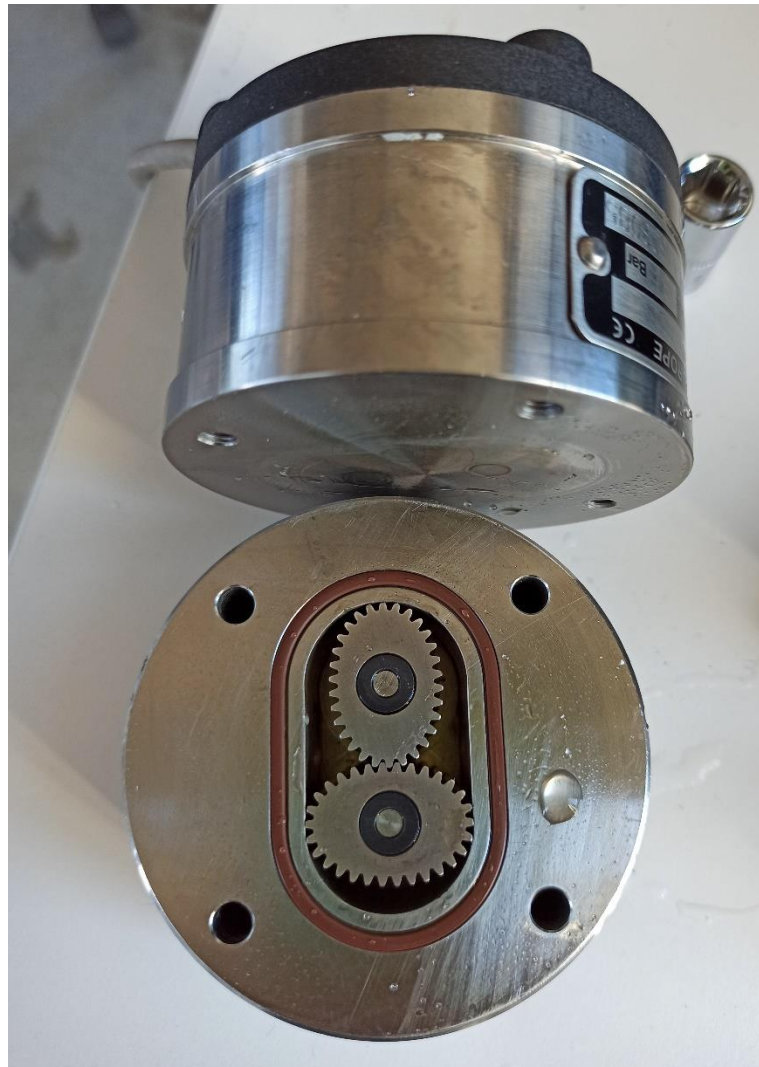
Figura 43. Detalle aureolas instaladas y fijadas.

Como parte de la instrumentación contamos con dos sondas PT100 en la entrada y la salida y un caudalímetro ubicado entre la bomba de la instalación y la entrada al acumulador.

Se trata de un caudalímetro de engranajes ovoidales con una relación de **1Hz=1l/s**.

Al tratarse de un equipo usado requería de un mantenimiento básico, fue abierto, lubricado y se le sustituyó la junta de estanqueidad.

Se comprobó su correcto funcionamiento y se montó en la instalación, cableado al equipo de toma de datos dónde se encuentran a su vez las tarjetas de conexión de los termopares y el controlador de la bomba de frecuencia variable.



*Figura 44. caudalímetro de la instalación.*

## 2.7. Ensamblaje final del acumulador.

Con la instrumentación ya emplazada en el interior del acumulador podemos proceder a cerrar la carcasa y sellar totalmente la carcasa.

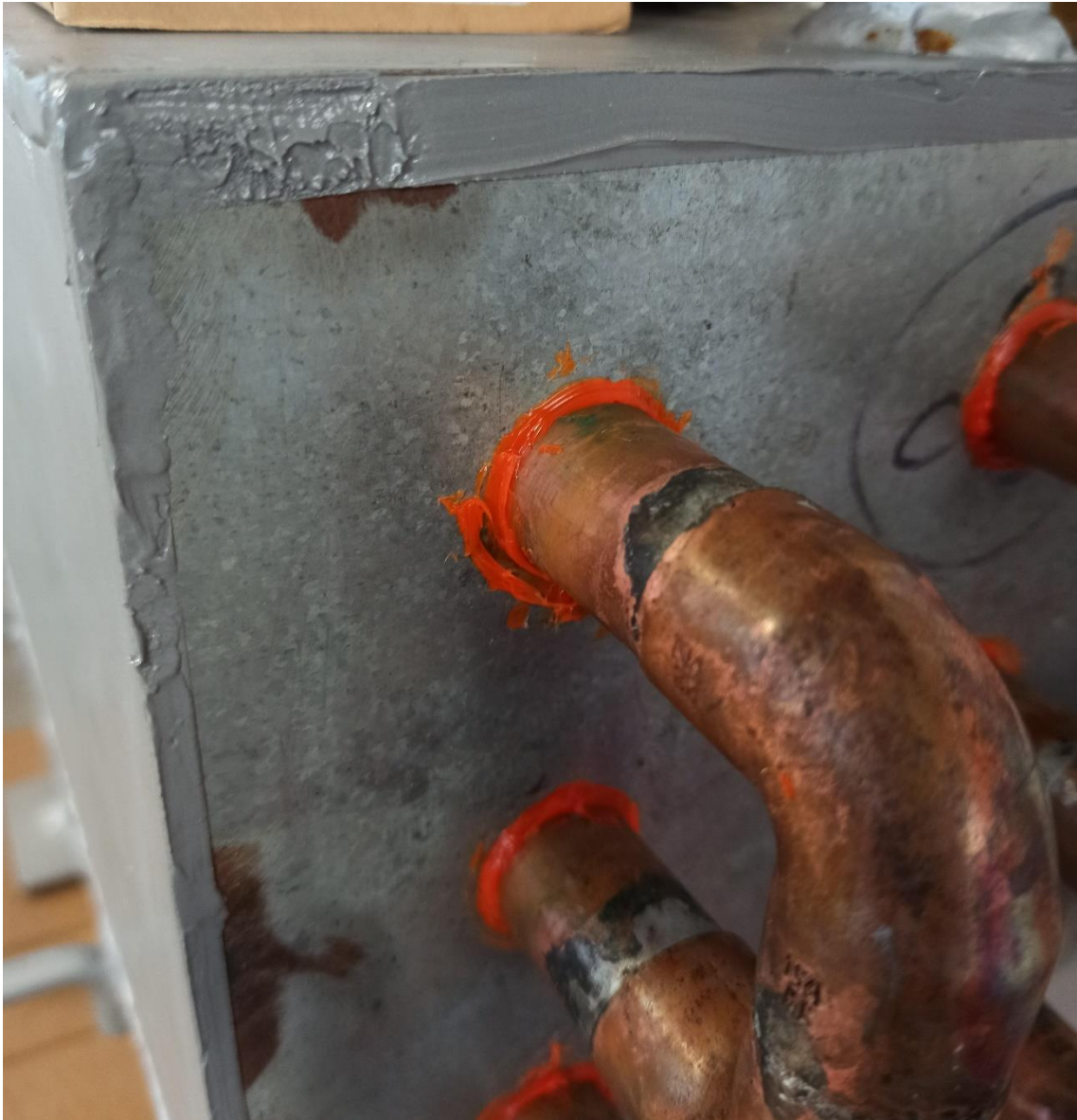
De modo que colocamos en el acumulador la tapa que faltaba, y la aseguramos en posición con soldadura fría para evitar desperfectos provocados por el calor de la soldadura convencional.

Con la tapa asegurada cerramos el circuito de los tubos de cobre colocando los codos correspondientes y sellando con soldadura blanda, teniendo la precaución de no calentar en demasía y dañar la instrumentación en contacto con los tubos.

Se procede de misma forma en las tapas A y B. (1 y 2 respectivamente en las imágenes).



Figura 45. Acumulador ensamblado a la espera de fijación definitiva.



*Figura 46. Detalle constructivo acumulador.*

En el detalle de la figura anterior se puede apreciar la soldadura de los tubos de cobre, la soldadura fría de la tapa a la carcasa y la junta entre la carcasa y el tubo (Nural 28).

Una vez seca la soldadura fría se aplica sellador de alta temperatura (Nural 30) para tapar los posibles poros de la soldadura fría.

Finalmente se introdujo agua en la carcasa y los tubos para localizar y reparar las fugas hasta conseguir un sellado total.



*Figura 47. Acumulador totalmente sellado.*

Una vez sellado por completo el acumulador se continúa aislándolo del exterior con lana de roca que minimice las pérdidas de calor, y con un revestimiento textil de aluminio para protección frente a la radiación solar, haciendo posible ser instalado en la azotea del edificio ELDI.

La lana de roca usada fue de la marca ISOVER en formato de 40mm de espesor y se rodeó el acumulador en todas sus caras con 2 capas de este aislante, consiguiendo un espesor de 80mm en todo su perímetro.

El modelo en concreto es ISOVER AUSTILAINÉ70 [5]





*Figura 48. Acumulador aislado con lana de roca.*

Con el aislante en posición y lana de roca más flexible se cubre el cobre al descubierto para evitar pérdidas en la ubicación de las dos sondas PT100 y mejorar su medición.

Posteriormente y con el recubrimiento textil de aluminio se protege todo el aislamiento de lana de roca para aislarlo de los elementos una vez instalado en el exterior, asegurando que no se moja el aislante ni se deteriora con el sol o el viento, además el recubrimiento de aluminio al ser brillante evita que se posen aves que dañen el acumulador.

## 2.8. Instalación del acumulador en banco de pruebas.

Al término de la fabricación del acumulador, éste es instalado en una bancada de pruebas próxima al equipo de medidas para ensayar el acumulador en distintas condiciones simuladas con ayuda de una resistencia eléctrica en el depósito de la instalación de pruebas.

La bancada de pruebas se compone básicamente del acumulador, 2 líneas para entrada y salida del acumulador, y otra adicional que trataremos más en profundidad y que actúa como bypass para regular la carga de nuestra bomba, una bomba de frecuencia variable, la instrumentación ya mencionada y un depósito.

Con ayuda de la resistencia eléctrica presente en el circuito es posible ensayar el acumulador con distintas temperaturas permitiéndonos simular diferentes escenarios, en combinación con una bomba de frecuencia variable que nos permite funcionar con diferentes cargas.

Pero encontramos un problema de compatibilidad con el software de regulación de la bomba y el software de recogida de datos, siendo imposible recoger datos al mismo tiempo que se regula la frecuencia de la bomba.

Por este motivo concluimos que una buena solución sería añadir una línea de bypass a la salida de la bomba para poder regular pequeñas variaciones en la carga de la bomba, provocadas por la diferencia de temperaturas en el inicio de los ensayos.

### **Leyenda bancada de pruebas:**

- 1. Acumulador completo.
- 2. Caudalímetro de engranajes ovoidales para el flujo de entrada.
- 3. Sonda PT100 de entrada.
- 4. Manguera línea de entrada.
- 5. Línea bypass al depósito.
- 6. Válvula de regulación para desvío bypass.
- 7. Bomba de frecuencia variable aguas abajo del depósito.
- 8. Línea de salida del acumulador al depósito.
- 9. Depósito para alimentación de bomba.
- 10. Válvulas de bola para cebado de parafina.
- 11. Salida derivación para los terminales de los termopares.

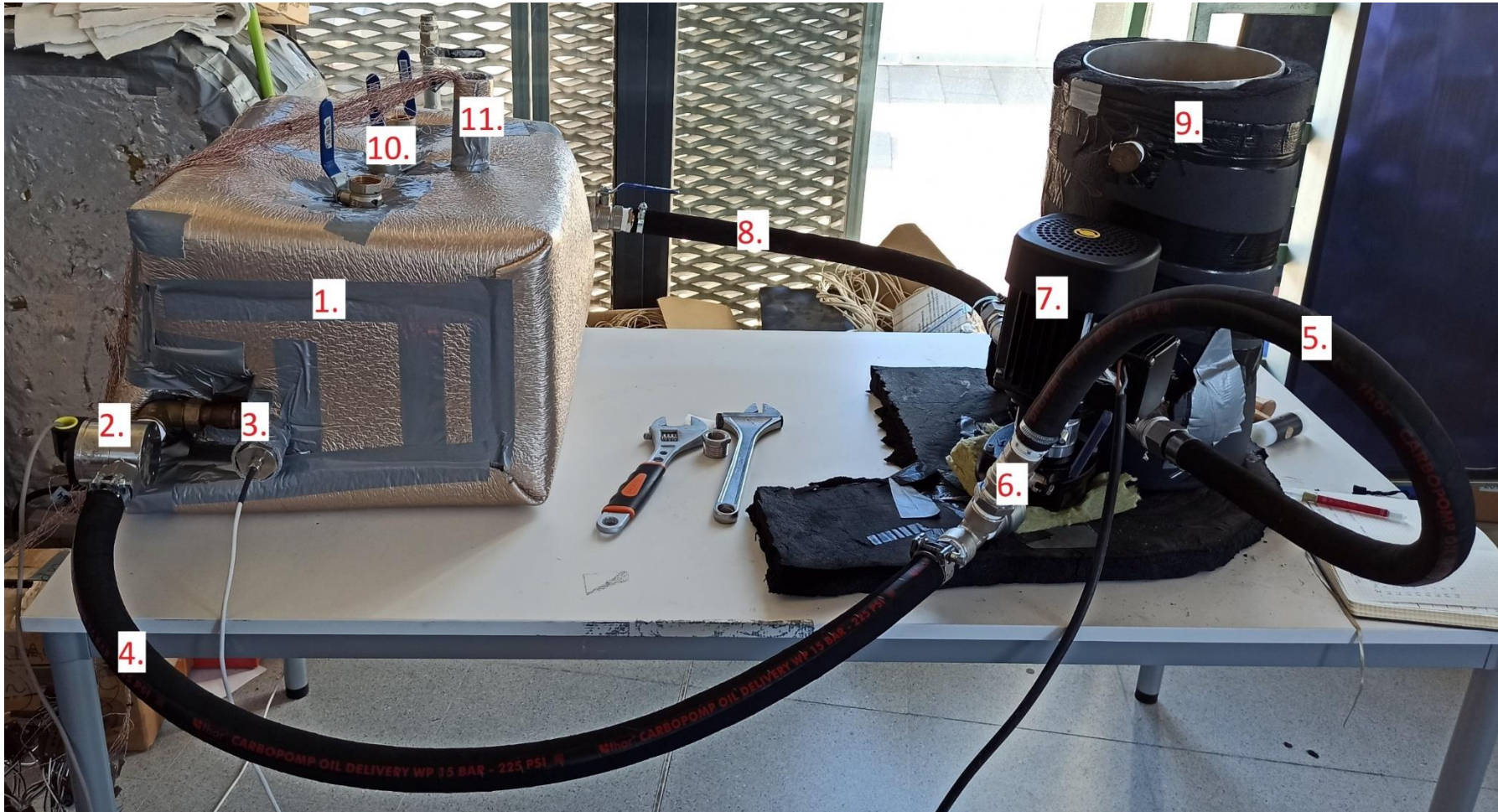


Figura 49. Acumulador completo instalado en bancada de pruebas.



### 3. Ensayos en banco de pruebas.

Habiendo puesto en marcha el acumulador en el banco de pruebas se procede a elaborar ensayos que esclarezcan los objetivos de este proyecto, comprobando la validez de la instrumentación empleada.

Conociendo el alcance de los termopares calculado en el apartado 2.5 y las temperaturas registradas por la instrumentación podemos graficar lo sucedido en los ensayos con ayuda del programa *Matlab*.

A continuación, se muestran varias gráficas que hacen referencia a las distintas partes del acumulador y a diversas propiedades físicas del PCM.

#### 3.1. Análisis de temperaturas en una sección del acumulador.

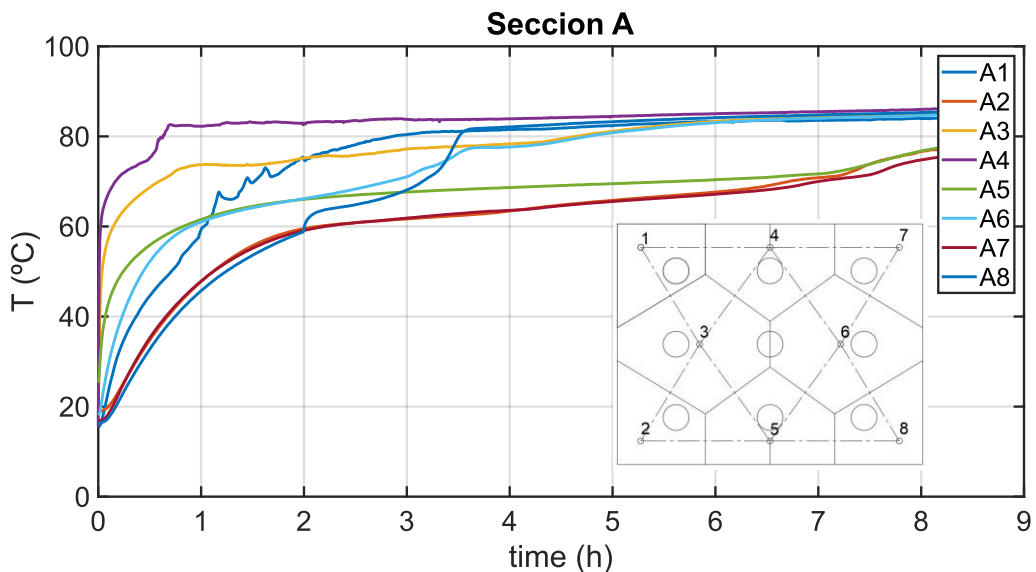


Figura 50. Temperaturas Sección A. Ensayo a 80°C.

En este ensayo se estableció la temperatura de entrada en 80°C siendo a su vez la temperatura de salida de unos 79°C~78°C, en las curvas son apreciables los escalones que aparecen cuando ciertos puntos alcanzan los 70°C y rápidamente aumentan su temperatura al cambiar de fase, pues aumenta la transferencia de calor una vez fundido el PCM.

Los puntos A1, A7, A2, A8 se muestran más tardíos debido a que la parafina tiende a fundir desde el centro a la parte superior, quedando las zonas pegadas a esquinas y paredes, más tiempo en estado sólido.

Cuando las curvas se estabilizan una vez que el PCM ha fundido totalmente se puede apreciar una estratificación debido a las corrientes convectivas producto de la diferencia de densidades entre las zonas más calientes y las más frías como veremos en los siguientes apartados.

### 3.2. Evaluación de la Energía almacenada en distintos ensayos.

En esta otra gráfica podemos identificar cómo una variación en la temperatura de entrada afecta al tiempo necesario para que el acumulador alcance el máximo de energía que puede almacenar.

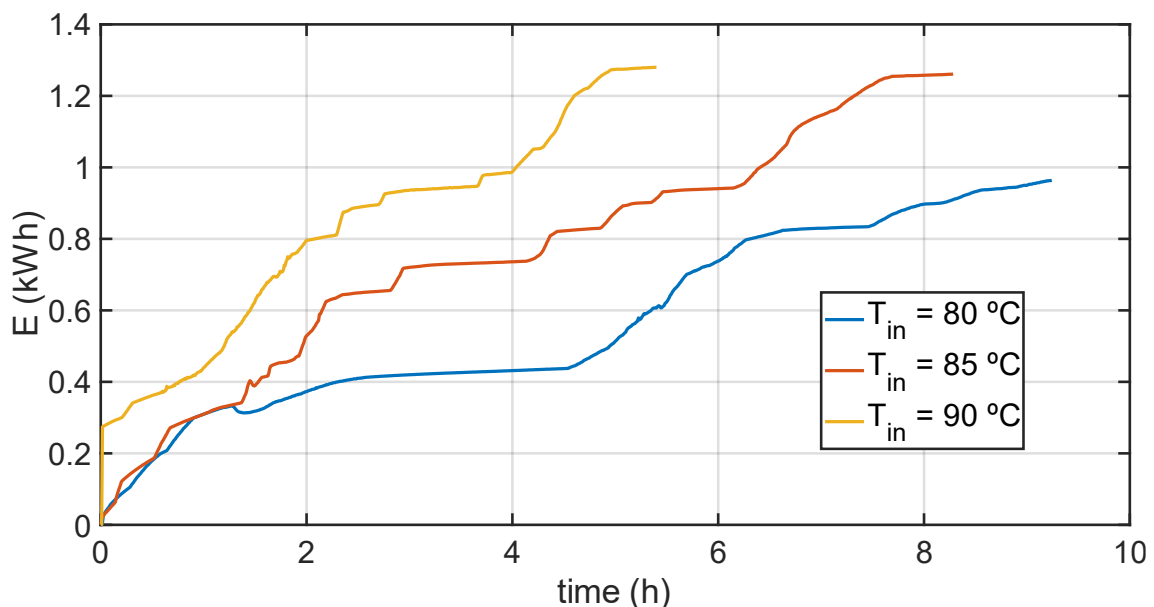


Figura 51. Energía almacenada a diferentes temperaturas de entrada.

En el caso del ensayo a 90°C se requirieron unas 2 horas menos que en el ensayo a 85°C para alcanzar el máximo de alrededor de 1.3kW cuando todo el PCM ha cambiado a su fase líquida.

Para el ensayo a 80°C se requerirían 10 horas o más para fundir por completo el PCM y conseguir llegar a esos casi 1.3kW.

Por tanto, hablamos de que la pendiente de la curva se incrementa conforme aumenta la temperatura de entrada, pero esto puede ser peligroso, ya que un sobrecalentamiento del PCM puede desencadenar una degradación de éste y alterar las propiedades químicas de éste, reduciendo drásticamente su vida útil.

En el caso de nuestro PCM (*Rubitherm RT70HC*), la temperatura máxima de operación sin sufrir degradación es de 100°C.

### 3.3. Estudio de la evolución de la fracción líquida en el acumulador.

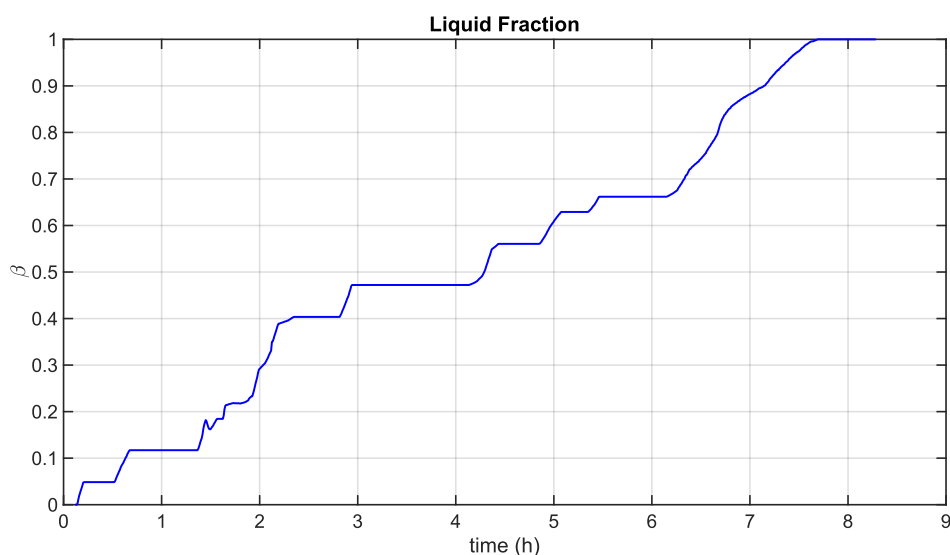


Figura 52. Fracción líquida secciones A, B y C.

Esta curva representa la fracción líquida del PCM en el interior del acumulador, y viene dada por la unión de los datos obtenidos en las secciones A, B y C.

La teoría nos dice que la progresión debería ser una línea recta, pero la práctica nos muestra cierto escalonado debido a que entendemos que el PCM entra en estado líquido al alcanzar los 70°C, a su vez cada termopar recibe un área calculada en el apartado 2.5, de modo que hasta que cada punto no alcanza los 70°C no se suma su porcentaje a la fracción líquida.

Al tratarse de una superposición de las medidas en tres secciones distintas, la curva tiene una mayor resolución y se acerca más a la curva teórica que cabría esperar.

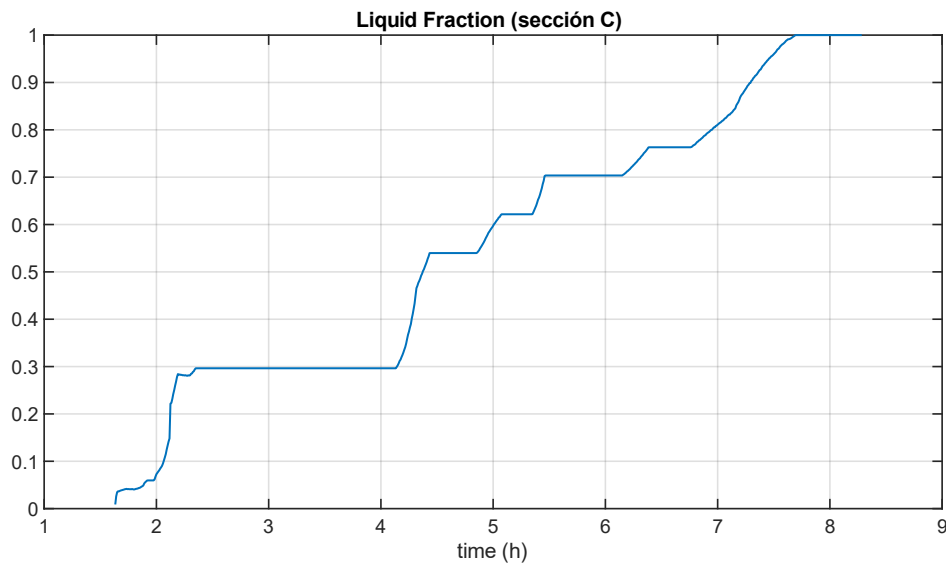


Figura 53. Fracción líquida sección C.

En la *figura 53* podemos observar cómo evoluciona la fracción líquida refiriéndose únicamente a la sección C, y es apreciable cómo cada escalón debería mostrar como cada uno de los 12 termopares presentes en la instrumentación llegan a  $70^{\circ}\text{C}$ , pero no es así ya que en los tramos con mayor pendiente asumimos que dos puntos han alcanzado  $70^{\circ}\text{C}$  al mismo tiempo.

Teniendo esta sección un mayor peso instrumental que las secciones A y B presenta una regresión lineal muy parecida a la gráfica de la *figura 52* aunque con una menor resolución.

A pesar de la menor resolución podríamos afirmar que la sección C es suficientemente representativa para modelizar el comportamiento en cualquier sección del acumulador debido a su parecido con la *figura 52* y a que presenta la ventaja de una mayor sencillez constructiva.



### 3.4. Análisis de temperaturas alrededor de tubo en aureola tipo R.

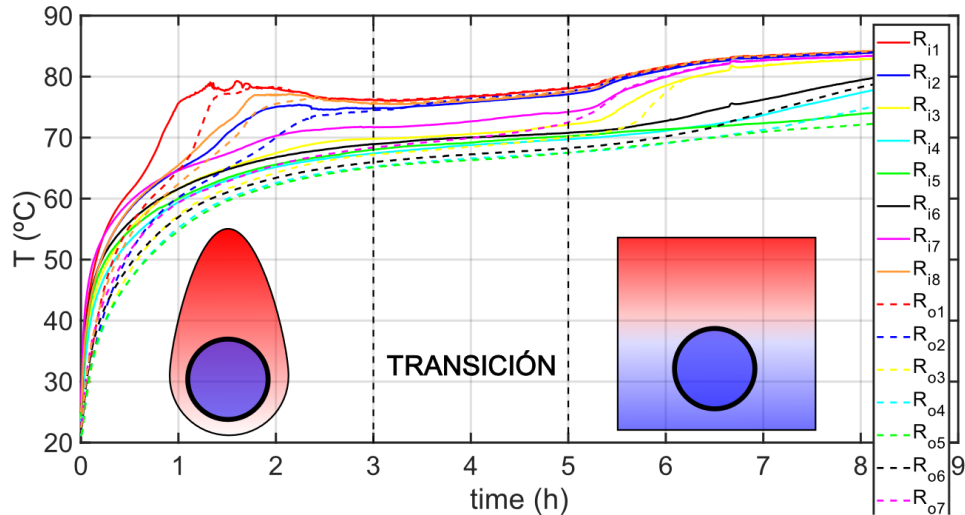


Figura 54. Temperaturas registradas por la aureola tipo R.

Por último, analizaremos las medidas tomadas por la aureola tipo R, la más completa y en la que podemos apreciar cómo evoluciona la transferencia de calor a medida que aumenta la fracción líquida.

Es apreciable cómo durante las primeras horas los termopares con las mayores temperaturas siguen un patrón parecido al de un penacho, fundiendo desde los alrededores de los tubos hacia arriba.

Pasado un tiempo y conforme aumenta la fracción líquida, se comienzan a producir corrientes convectivas en las partes donde el PCM ya ha cambiado de fase, lo que acelera la fusión de las zonas que aún eran sólidas.

En la última fase del ensayo y según sugieren las temperaturas estas corrientes provocan una estratificación, donde la parte más fría del PCM acabará en el fondo del acumulador y la más caliente en la parte superior.

## 4. Conclusiones

La conclusión principal es que experimentalmente hemos podido comprobar a través de los ensayos que el diseño y la instrumentación funcionan y pueden ser de gran utilidad cuando se ensaye más en profundidad y se proceda a crear modelos más completos y precisos de qué ocurre en el interior del acumulador.

Una instrumentación tan completa cómo esta puede ayudar a confirmar las hipótesis actuales del comportamiento del PCM y establecer una base de información sobre la que diseñar sistemas más eficientes de transmisión de calor para conseguir un mayor rendimiento térmico.

De modo que, hay que destacar la importancia de remontarse a lo más primario para poder cimentar una buena base sobre la que mejorar, y con la que podamos cuantificar esas mejoras en términos de eficiencia, densidad energética y demás propiedades importantes en este ámbito.

Gran parte del aprendizaje ha sido entender la importancia de un buen registro y control de todos y cada uno de los pasos dados en cada etapa del proyecto, dando así una solidez al trabajo y una seguridad que nos permite confiar en la veracidad de los resultados obtenidos y en que éstos, como consecuencia, son igual de sólidos.

Queda abierta la puerta a proyectos venideros que apoyen sus cálculos e hipótesis en parte de los resultados aquí obtenidos, dónde se busque profundizar más en las inmensas posibilidades de este campo del almacenamiento latente por materiales de cambio de fase.

## 5. Bibliografía

- [1] “Rubitherm RT70HC Datasheet.” [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_RT70HC\\_EN\\_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT70HC_EN_09102020.PDF) (accessed Jan. 11, 2021).
- [2] A. Oliver, F. J. Neila, and A. García-Santos, “Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica - PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems,” doi: 10.3989/mc.2012.58010.
- [3] A. Egea, “Diseño, construcción y ensayo de un sistema de acumulación de calor latente de origen solar térmico basado en el empleo de espumas metálicas de aluminio. - Universidad Politécnica de Cartagena,” pp. 40–41, 2020.
- [4] “Warping and Cracking With Closed Environment FDM 3D Printers, Box3d.” <https://www.box3d.eu/warping-cracking-closed-environment-3d-printers/> (accessed Mar. 08, 2021).
- [5] “Ficha técnica lana de roca.” <https://assets.leroymerlin.es/is/content/lmes/15929361-0200m-es/15-unid-l-r-acustil-70-kg-135x60x4-cm.pdf> (accessed Apr. 07, 2021).

