



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Técnica Industrial
Especialidad Mecánica

Septiembre 2012

Materiales de Cambio de Fase. Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a altas temperaturas.

Realizado por:

Javier García Mayayo

Dirigido por:

Ana Lázaro Fernández

Belén Zalba Nonay

Resumen y objetivo del proyecto

La importancia del almacenamiento térmico de energía, la utilización de los materiales de cambio de fase (PCM) como ahorro energético y la necesidad del aumento de la eficiencia energética en las instalaciones nos mueve a la realización de este proyecto, con objeto de conocer, estudiar, caracterizar y desarrollar las posibilidades de los PCM.

De esta manera, este proyecto pretende obtener las características de algunas sustancias en el cambio de fase sólido-líquido para almacenamiento térmico de energía.

El trabajo consiste en el diseño y construcción de una nueva instalación para poder conocer y clasificar las propiedades térmicas y físicas de materiales de cambio de fase (PCM) a alta temperatura en un intervalo de temperaturas comprendido entre 20°C y 300°C.

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar esta ocasión para mostrar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han acompañado, ayudado o participado en mi vida mientras esta andadura se ha llevado a cabo.

Gracias a Ana, Belén y Conchita por hacer posible este proyecto, por su tiempo y dedicación en él y por la calidad humana y disposición que han mostrado en todo momento.

Gracias a Miguel Ángel y Esther, mis padres, por vuestra educación desde los valores y principios en los que he crecido y me he enriquecido como persona.

Gracias a ti, Cristina, mi única hermana y mi hermana única, porque probablemente sin tu cariño, tus sonrisas y tu presencia en mí, esto no sería posible.

Gracias a todas aquellas personas que desearon que esto saliera bien, y que con su apoyo y sus ánimos ha sido posible. Gracias a mis amigos de la carrera, esos con los que tan buenos momentos hemos pasado y que hoy siguen siendo mis amigos.

Gracias a todos los profesores que han formado parte de mí, desde que era niño hasta hoy, por darme la posibilidad de aprender de su experiencia.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Resumen y Objetivo del proyecto | 2 |
| Agradecimientos | 3 |
| Índice | 4 |
| Preludio | 7 |
| Planing de trabajo | 8 |
| <u>SECUENCIA DEL TRABAJO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</u> <u>(PRIMERA PARTE)</u> | |
| Capítulo 1: Introducción teórica de los materiales de cambio de fase y su clasificación | 9 |
| 1.1. Formas de almacenamiento de energía térmica (TES) | 9 |
| 1.1.1. Calor sensible | 9 |
| 1.1.2. Calor latente | 10 |
| 1.1.3. Energía química | 12 |
| 1.2. Materiales de cambio de fase y tipos | 12 |
| 1.2.1. Introducción | 12 |
| 1.2.2. PCM orgánicos | 13 |
| 1.2.3. PCM inorgánicos | 15 |
| 1.2.4. Requerimientos deseables para que una sustancia sea utilizada como PCM | 17 |
| Capítulo 2: Aplicaciones actuales de los materiales de cambio de fase | 20 |
| 2.1. Textil | 20 |
| 2.2. Construcción | 22 |
| 2.3. Otras aplicaciones | 24 |
| Capítulo 3: Revisión de otros métodos para la caracterización de las Propiedades termofísicas | 25 |
| 3.1. Técnicas de medición de las propiedades del material en función de la temperatura | 25 |
| 3.1.1. Calorímetros convencionales | 25 |
| 3.1.2. Análisis térmico diferencial (DTA) | 26 |
| 3.1.3. Calorímetro diferencial de barrido (DSC) | 26 |
| 3.1.4. Calorímetro adiabático | 29 |
| 3.1.5. Resumen | 29 |

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 4: El método T-History | 31 |
| 4.1. Fundamento teórico | 31 |
| SECUENCIA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL | |
| (SEGUNDA PARTE) | |
| Capítulo 1: Estudio previo para el diseño de la instalación. Inconvenientes principales que se presentan en el desarrollo de dicho diseño | 36 |
| 1.1. Introducción | 36 |
| 1.2. Tipos de instalaciones analizadas para el diseño de nuestra instalación | 37 |
| 1.2.1. Instalación 1 | 37 |
| 1.2.2. Instalación 2 | 43 |
| 1.2.3. Instalación 3 | 47 |
| 1.3. Análisis de las ventajas e inconvenientes que presentan cada una de las instalaciones | 54 |
| 1.4. Elección final del diseño de la instalación | 55 |
| 1.4.1. Debate | 55 |
| Capítulo 2: Estudio de los elementos que se requieren y componen el sistema. Discusión y elección de las alternativas que se presentan | 56 |
| 2.1. Punto crítico y fundamental para la instalación. Elección de una cámara aislada | 56 |
| 2.1.1. Cámara aislada | 56 |
| 2.1.2. Selección y características cámara final | 64 |
| 2.1.3. Proceso de calentamiento | 64 |
| 2.1.4. Sistema de enfriamiento de la cámara | 64 |
| 2.2. Sondas de temperatura | 65 |
| 2.3. Tubos de ensayo | 66 |
| 2.4. Sistema de adquisición y almacenamiento de datos | 67 |
| 2.5. Sistema de cálculos y tratamiento de datos | 68 |
| 2.6. Balanza de precisión | 69 |
| 2.7. Portamuestras | 70 |
| 2.8. Aislante para probetas | 70 |
| 2.9. Cableado de sondas y uniones vaina/cable | 70 |

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 3: Elección de la sustancia de referencia. Análisis de las distintas posibilidades | 71 |
| Capítulo 4: Esquematación y descripción gráfica de la instalación final y del montaje | 73 |
| 4.1. Esquema de la instalación | 73 |
| 4.2. Montaje | 74 |
| Capítulo 5: Conclusiones | 75 |
| 5.1. Conclusiones del trabajo | 75 |
| 5.2. Continuación y trabajo futuro | 75 |
| Bibliografía | 77 |
| Referencias de los componentes | 79 |
| Nomenclatura | 80 |
| Abreviaturas | 82 |
| Lista de tablas | 83 |
| Lista de figuras | 84 |
| ANEXOS | 85 |

Preludio

El presente proyecto forma parte de la continuación en la investigación en el almacenamiento térmico mediante materiales de cambio de fase sólido-líquido (PCM) que investiga y desarrolla el Grupo de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos (GITSE) del Área de Máquinas y Motores Térmicos, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza y está enmarcado en el trabajo desarrollado en el proyecto ENE2011-28269-C03-01, MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS MEDIANTE EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA, financiado por el **MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN**.

Se desarrolla así una nueva línea de acción en la experimentación con materiales de cambio de fase mediante el diseño de una instalación basada en el método T-History (método desarrollado por Zhang [6]) para altas temperaturas. La investigación y experimentación del método T-History para bajas temperaturas fue desarrollado anteriormente por Lázaro A [2] con el GITSE.

El agotamiento de los recursos naturales está muy presente en nuestros días. Necesitamos entender que estos recursos son de una cantidad limitada, éstos son combustibles fósiles como el carbón, petróleo o gas natural. Es por ello que surge la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía, que van a ser fundamentales para el futuro cercano en nuestra vida.

Aparecen así, los PCM como solución al ahorro energético, aprovechamiento de las fuentes renovables y los calores residuales.

El GITSE ha trabajado en aplicaciones de refrigeración gratuita (free cooling), en la mejora del rendimiento de depósitos de agua caliente sanitaria con energía solar, en PCM's microencapsulados en elementos de la construcción, almacenamiento térmico de energía en cogeneración, investigación de los PCM de forma teórica y experimental, etc.

En este proyecto quedan constatados documentos bibliográficos en los que ya se ha trabajado con PCM's, también hace mención de las instalaciones existentes actualmente y se procede al desarrollo del diseño de una nueva instalación para materiales de cambio de fase a altas temperaturas estudiando las posibilidades de la instalación, como de sus componentes y las ventajas e inconvenientes que se han presentado durante su desarrollo.

Secuencia del trabajo teórico y estado del arte (primera parte)

1. Introducción teórica de los materiales de cambio de fase y su clasificación.
2. Aplicaciones actuales de los materiales de cambio de fase.
3. Revisión de otros métodos para la caracterización de las propiedades termofísicas de los PCM en función de la temperatura.
4. Método T-History.

Secuencia del trabajo experimental (segunda parte)

1. Estudio previo para el diseño de la instalación. Inconvenientes principales que se presentan en el desarrollo de dicho diseño.
2. Estudio de los elementos que se requieren y componen el sistema. Discusión y elección de las alternativas que se presentan.
3. Elección de la sustancia de referencia. Análisis de distintas posibilidades.
4. Esquematización y descripción gráfica de la instalación final y del montaje.
5. Conclusiones.

Trabajo teórico y estado del arte

Capítulo 1:

Introducción teórica de los materiales de cambio de fase y su clasificación

1.1. Formas de almacenamiento de energía térmica (TES)

1.1.1. Calor sensible

Calor sensible es aquél que recibe un cuerpo y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular cristalina y por lo tanto sus estados inicial y final.

La cantidad de calor necesaria para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y a la diferencia de temperaturas. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de calor específico. El calor sensible sí lo notamos y lo podemos percibir, puesto que aumenta la temperatura de la sustancia, haciendo que se perciba como "más caliente", o por el contrario, si se le resta calor, la percibimos como "más fría".

Para aumentar la temperatura de un cuerpo hace falta aplicarle una cierta cantidad de calor. La cantidad de calor aplicada en relación con la diferencia de temperatura que se logre depende del calor específico del cuerpo, que es distinto para cada propiedad.

Al emplear el material como sistema de almacenamiento, la energía térmica se almacena atendiendo al calor específico del medio utilizado. El material es calentado hasta una temperatura elevada en el proceso de carga y se enfría durante el proceso de descarga, liberando la energía almacenada.

La energía que una sustancia puede acumular mediante calor sensible se puede calcular del siguiente modo:

- Si el proceso se efectúa a presión constante:

$$Q_s = \Delta H = mc_p(T_2 - T_1)$$

En donde H es la entalpía del sistema, m es la masa del cuerpo, c_p es el calor específico a presión constante (definido como la cantidad de calor requerida para aumentar en un grado la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo a presión constante), T_2 es la temperatura final y T_1 es la temperatura inicial del cuerpo.

- Si el proceso se efectúa a volumen constante:

$$Q_s = \Delta U = nc_v(T_2 - T_1)$$

En donde U representa la energía térmica del sistema, n son las moles de la sustancia y c_v es el calor específico a volumen constante. Los valores de calor específico varían también con la temperatura ambiente y el estado físico de agregación de las sustancias.

Los acumuladores de agua caliente de las viviendas son métodos de almacenamiento de energía por calor sensible. El agua es una sustancia con alto calor específico, $4.18 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, por lo que es una buena sustancia acumuladora. Además, es barata no pierde las propiedades químicas al someterla a ciclos de enfriamiento-calentamiento, no es tóxica y es abundante.

Sin embargo, para nuestro trabajo y las aplicaciones a las que este va dirigido, el almacenamiento de energía por calor sensible no resulta la mejor forma de almacenamiento, ya que los materiales más comunes poseen bajos valores de capacidad calorífica y necesita gran masa de material. Además es necesaria gran diferencia de temperatura (gran salto de temperaturas) para una cantidad suficiente de energía.

1.1.2. Calor Latente

Para que se produzca un cambio de fase, la sustancia tiene que absorber o ceder una determinada cantidad de calor. El calor es positivo cuando el cambio de fase se produce de izquierda a derecha de la figura, absorción. El calor es negativo cuando el cambio de fase se produce de manera inversa, de derecha a izquierda, cesión.

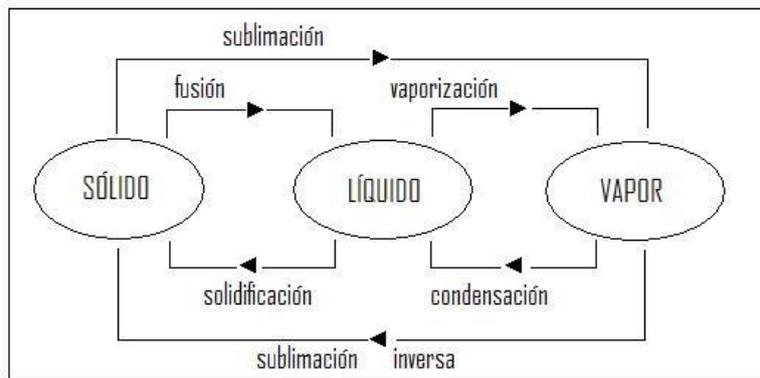


Figura 1.1. Cambios de fase entre los distintos estados (elaboración propia).

La energía suministrada o extraída de la sustancia se utiliza en el cambio de estado de agregación de la materia, por esto, ese calor cedido o absorbido no lleva un cambio en la temperatura. Este calor se denomina calor latente.

Cuando el cambio de estado es de sólido a líquido se denomina calor latente de fusión, si el cambio de estado es de líquido a vapor se denomina calor latente de vaporización, y si el cambio de estado es de sólido a vapor se denomina calor latente de sublimación, como se puede apreciar en la figura. Los procesos inversos tienen el mismo valor, pero serán negativos ya que es calor cedido.

Se ha calculado que el calor latente de un material es entre 80 y 100 veces mayor que el calor que se requiere para incrementar la temperatura del material un solo grado, calor sensible. Lo que nos lleva a deducir que obtendremos una mayor capacidad de acumulación de energía a lo largo del cambio de fase. De este modo, con una menor masa podemos tener el mismo salto térmico, o lo que se traduce como mayor densidad de almacenamiento de energía.

La cantidad de energía que una sustancia pura puede acumular por calor latente, viene dada por la expresión:

$$Q_l = m \cdot \Delta h_{cf}$$

El calor latente almacenado es directamente proporcional a la masa de la sustancia, m multiplicada por la variación de entalpía en el cambio de fase de la sustancia.

Los cambios de fase más empleados son los del cambio Líquido-Sólido, porque pueden tener entalpías de cambio de fase bastante elevadas y cambios de volumen tolerables, otros casos han sido desechados por el bajo rendimiento y el elevado coste. Con ello se solucionan los problemas que se originan al trabajar con gases, entre éstos destaca el elevado volumen de la fase vapor, que llevaría a la necesidad de grandes espacios para contener el material de cambio de fase.

Por ello, se va a profundizar en los cambios de fase por fusión (de sólido a líquido), o solidificación (de líquido a sólido).

La principal ventaja de este tipo de almacenamiento es la capacidad para mantener una temperatura concreta durante un largo tiempo, lo que resulta fundamental en aplicaciones como tejidos para ropa deportiva y de montaña que funcionan como aislantes, transporte de sangre u órganos, etc.

El principal objetivo es el almacenamiento de energía térmica aprovechando las horas en las que el coste de energía eléctrica es más bajo.

1.1.3. Energía Química

Es el método de energía basado en la energía liberada o absorbida por la rotura o la formación de los enlaces moleculares que se producen en las transformaciones químicas que son reversibles.

Este sistema de almacenamiento es complejo y es difícil encontrar las reacciones químicas más apropiadas.

1.2. Materiales de cambio de fase y tipos

1.2.1. Introducción

Para empezar, se procede a formular la definición de los materiales de cambio de fase. Así pues se puede decir que un material de cambio de fase (PCM) es una sustancia con un calor de fusión elevado, capaz de almacenar y liberar grandes cantidades de energía para su uso en las distintas aplicaciones de los sistemas de TES. Este calor es absorbido o liberado cuando la sustancia cambia de fase de sólido a líquido o en sentido contrario.

La clasificación de los materiales de cambio de fase se divide en PCM orgánicos y PCM inorgánicos. La utilización de cada uno de ellos dependerá de su campo de aplicación y de sus propiedades.

El agua ha sido el PCM más utilizado, sin embargo el objetivo común es la búsqueda y desarrollo de otros materiales con propiedades adecuadas para las distintas aplicaciones.

Los materiales de cambio de fase en rangos de bajas temperaturas son las parafinas, las sales hidratadas, las mezclas eutécticas y los ácidos grasos, esto ya fue estudiado previamente teórica y experimentalmente por Lázaro A [1].

Las parafinas tienen un calor latente inferior al de las sales hidratadas, además estas últimas son más baratas y al igual que las parafinas están disponibles en el mercado, sin embargo tienen puntos de fusión bajos y aparece la corrosión cuando entran en contacto con metales.

Los ácidos grasos alcanzan valores parecidos en cuanto al calor latente aunque son más caros. En las mezclas eutécticas aparecen dos componentes con un punto de fusión inferior al de los dos componentes por separado. Solidifican a esa temperatura eutéctica.

1.2.2. PCM orgánicos

Entre los materiales orgánicos utilizados como PCM hay que destacar las **parafinas** (hidrocarburos parafínicos, ceras parafínicas y aleaciones moleculares [2]) de fórmula química C_nH_{2n+2} (con $n > 16$), son mezclas de hidrocarburos saturados (mezcla de alcanos) obtenidos en el refinado del crudo de petróleo.

Tienen un calor específico de 2.1 kJ/kg·K y unas temperaturas de fusión de entre 20°C y 80°C. Su viscosidad es baja en fase líquida y posee baja conductividad térmica. Tienen alto calor de fusión, entre 70-250 kJ/kg y gran densidad de energía acumulada, entre 54-71 kW·h/m³.

Las parafinas presentan hasta cuatro o cinco veces mayor capacidad para acumular energía que el agua, para bajos gradientes de temperatura [4]. Además son inflamables, su punto de ignición se encuentra por encima de los 250°C.

La densidad de este material en estado líquido es de 750 a 850 kg/m³ y en estado sólido de 800 a 900 kg/m³, con lo que su máximo volumen de expansión

es de un 10 % durante el proceso de cambio de fase, un valor aceptable, si bien condiciona el dimensionado del contenedor.

También presentan buenas propiedades como:

- ✓ Buena estabilidad térmica: Las parafinas no pierden sus propiedades al estar sometidas a ciclos de carga y descarga térmica, esto se debe a que no existen reacciones químicas durante el proceso de almacenamiento de calor, ni en la propia parafina ni con el material que la contiene.
- ✓ Baja corrosión: Una característica muy importante de las parafinas es su poca afinidad química con otros materiales; por ello los problemas de corrosión son prácticamente inexistentes, sobretodo en el material que la contiene. Sin embargo presentan inconvenientes en contacto con los materiales plásticos.
- ✓ Bajo impacto ambiental: hoy en día es un aspecto fundamental. Las parafinas no son tóxicas para animales o plantas y no contaminan el agua; además son 100% reciclables.
- ✓ Tienen un alto coste por lo que se suelen utilizar mezclas de parafinas en vez de parafinas puras.

La diferencia básica entre utilizar sustancias puras a utilizar sustancias no puras es que en las primeras el cambio de fase se produce a una temperatura fija, mientras que en las segundas el cambio de fase se produce en un intervalo de temperaturas como se indica en el siguiente gráfico.

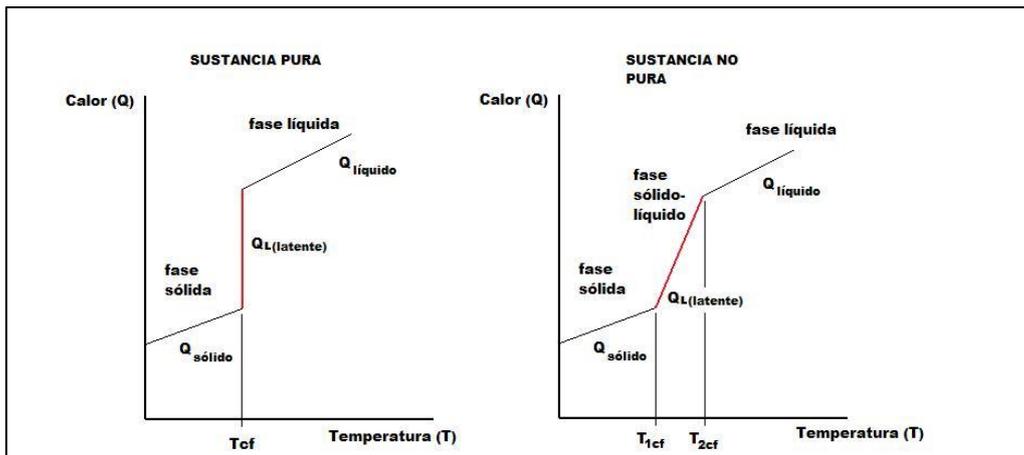


Figura 1.2. Curva teórica del calor frente a la temperatura. Temperaturas del cambio de fase. (elaboración propia).

Los **ácidos grasos** son compuestos de fórmula química con $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Tiene valores de calor de fusión comparables a los de las parafinas y se sitúan en el mismo rango de temperaturas. Sin embargo el precio de estos PCM son entre dos y dos veces y medio más caros que el de las parafinas.

Las **mezclas eutécticas** poseen la ventaja de tener un punto de fusión fijo, sin embargo aunque el calor de fusión puede llegar a unos valores aceptables, su investigación en este campo es reciente, por lo que tenemos poca información sobre sus propiedades termofísicas.

1.2.3. PCM inorgánicos

Las **sales hidratadas** son compuestos, de fórmula química MH_2O , donde M es un compuesto inorgánico. Han sido sustancias muy estudiadas debido a su alta densidad volumétrica de almacenamiento, en torno a 350 MJ/m^3 , poseen una alta conductividad térmica, en torno a $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, y moderado costo respecto al de las parafinas.

En concreto la **sal de Gauber** ($\text{Na}_2\text{SO}_4\text{H}_2\text{O}$) ha sido muy estudiada históricamente. Su punto de fusión se sitúa en 32.4°C y un calor latente de 254 kJ/kg . Además es uno de los materiales más baratos para el uso como PCM. Presenta el inconveniente de segregación de fases y el subenfriamiento, al igual que otras sales hidratadas. La solución es el uso de agentes nucleantes, así desaparece el subenfriamiento de la sal hidratada antes de la cristalización.

| Ventajas | Inconvenientes |
|--|--|
| Son más baratos Alta entalpía de fusión Temperatura de cambio de fase definida Alta conductividad térmica No son inflamables Son reciclables y biodegradables | El encapsulado es complejo, inconvenientes Subenfriamiento Corrosión con el contacto con algunos metales El uso prolongado necesita aditivos Los aditivos para evitar la segregación de fases reducen la capacidad de calor latente almacenado |

Tabla 1.1. Tabla que refleja las ventajas e inconvenientes del uso de PCM inorgánicos (elaboración propia).

| Ventajas | Inconvenientes |
|---|---|
| Estabilidad térmica y química No corrosivos No necesitan agentes nucleantes No hay subenfriamiento | Baja entalpía de fusión Baja conductividad térmica Inflamables Coste elevado Cambios de volumen significativos en el cambio de fase |

Tabla 1.2. Tabla que refleja las ventajas e inconvenientes del uso de PCM orgánicos (elaboración propia).

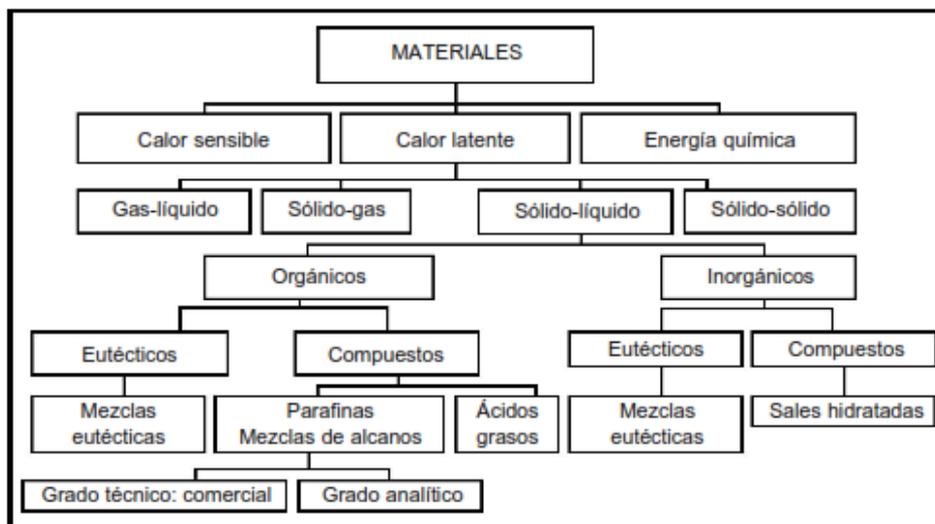


Figura 1.3. Clasificación de materiales para la acumulación de energía térmica mediante cambio de fase [3].

En nuestro caso, el trabajo se centrará en la búsqueda y experimentación de materiales de cambio de fase (punto de fusión) entre 30°C y 300°C, para la instalación que se quiere diseñar.

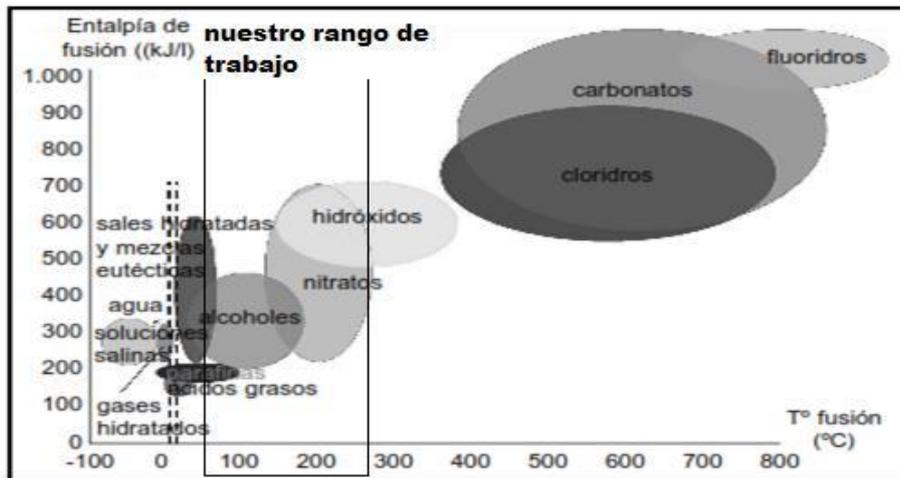


Figura 1.4. Relación Temperatura vs calor de fusión para sustancias utilizadas como PCM [2]

1.2.4. Requerimientos deseables para que una sustancia sea utilizada como PCM

A continuación se recogen algunas características deseables en los PCM's. No es necesario aclarar que el material perfecto o ideal no existe, como casi siempre en estas cuestiones de tipo técnico habrá que adoptar una solución de compromiso a la hora de elegir el PCM apropiado.

- Propiedades térmicas
 - ✓ Rango estable de temperatura de cambio de fase. El valor de esta temperatura es la propiedad más importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar el PCM más apropiado para nuestra aplicación.
 - ✓ Alta entalpía específica de cambio de fase.
 - ✓ Conductividad térmica alta en ambas fases, sólida y líquida. En la realidad esto es bastante complicado de encontrar, por esto se trabaja con materiales compuestos que no disminuyan mucho la

capacidad de almacenar energía y que, sin embargo, aumenten la conductividad térmica del PCM.

- Propiedades físicas
 - ✓ Densidad alta. Esto implica menos volumen por unidad de masa y por tanto más capacidad de almacenamiento para un mismo tamaño.
 - ✓ Fusión del material de forma congruente, es decir, que no se produzca la segregación de material por la diferencia de densidades puede presentar variaciones de la composición del material a largo plazo.
 - ✓ Variaciones pequeñas de densidad entre las fases, es decir, pequeñas variaciones de volumen al pasar de un estado a otro; esto originaría problemas de dimensionado.

- Propiedades químicas
 - ✓ Estabilidad. Los PCM's para nuestra aplicación pueden sometidos a varios ciclos de carga; debemos trabajar con materiales que no se degraden debido a su uso reiterado.
 - ✓ Estabilidad química del sistema PCM-módulo. Es importante que estos dos componentes del equipo no tengan afinidad química para que no reaccionen al entrar en contacto. Es importante que el material no produzca reacciones químicas como la corrosión en el tubo contenedor de la muestra.
 - ✓ No tóxicos, inflamables ni contaminantes.

- Propiedades cinéticas
 - ✓ Debe poseer un subenfriamiento pequeño en la fusión, es decir, que no necesite aporte de frío adicional para que se inicie la fusión. Para ello se utilizan agentes nucleantes sobre el PCM.

- Propiedades económicas
 - ✓ Otra característica importante a la hora de seleccionar el PCM es que sea de bajo coste, elevada disponibilidad y que no presente problemas ni limitaciones medioambientales.

Capítulo 2:

Aplicaciones actuales de los materiales de cambio de fase

Los sistemas de almacenamiento de calor latente han ganado mucha importancia debido al aumento de la demanda energética en todo el mundo, ya que estos sistemas son una alternativa para conseguir un ahorro importante de la energía consumida. En particular, las aplicaciones más importantes son las utilizadas en sistemas de energía solar, en sistemas de acondicionamiento de aire, en edificios energéticamente sostenibles y cada vez más desarrollado en la industria textil. A continuación se detalla alguno de ellos.

2.1. Textil

Los materiales de cambio de fase para la **regulación térmica de la temperatura corporal** es un campo realmente interesante.

Cualquier material corriente absorbe calor en el proceso de calefacción al mismo tiempo que aumenta su temperatura de manera constante. El material libera el calor almacenado mediante el proceso de enfriamiento, entonces la temperatura disminuye.

Para un material de cambio de fase, la cantidad de calor absorbida por el PCM es muy alta cuando este funde. Una parafina absorbe 200 kJ por kilogramo de calor al fundirse. Si un textil absorbe la misma cantidad de calor, la temperatura necesitaría ser aumentada en 200°C [7]. Durante el proceso de fundido la temperatura es constante.

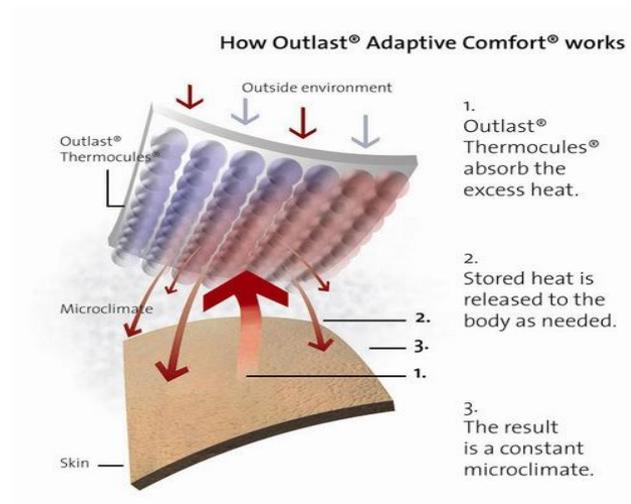


Figura 2.1. Funcionamiento de los tejidos con PCM [IM1].

En la aplicación de estos materiales de cambio de fase hay que especificar que estos son utilizados microencapsulados en esferas de plástico de tamaños del orden de micrómetros.

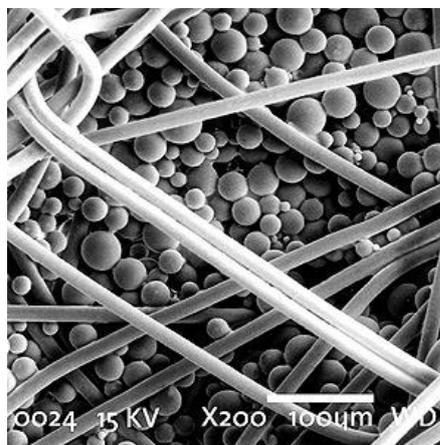


Figura 2.2. PCM en fibras textiles [9].

Estos materiales resultan especialmente interesantes en las **prendas deportivas** para dar equilibrio entre el calor que genera nuestro cuerpo cuando practicamos deporte, entonces el calor se libera al ambiente. De esta manera se favorecen las regulaciones térmicas entre nuestro cuerpo y la prenda que llevemos puesta.

El uso de materiales de cambio de fase ha sido ya implantado en la **vida doméstica**. Han sido utilizados en sábanas. Su principio de funcionamiento es

que mientras dormimos, tanto la temperatura corporal como la humedad son cambiantes, por lo que se puede generar una sensación de incomodidad. Estas sábanas pretenden amortiguar los cambios de temperatura para una correcta regulación de manera que absorba el exceso de calor o sea liberado si es necesario. El PCM se adapta al microclima de la piel. Este estudio fue realizado en EEUU, donde se obtuvo mejoras muy notables en el descanso de los participantes de dicho estudio.

En el **campo aeroespacial** han sido utilizados los materiales de cambio de fase para trajes guantes y sábanas térmicas, ya que sufren cambios excesivamente bruscos de frío extremo a calor extremos cuando están en el espacio [8].

2.2. Construcción

Al igual que en el punto anterior los PCM utilizados en la construcción deben estar contenidos en recipiente debido a la fase en la que se presenta en estado líquido.

Un edificio con paredes internas contenedoras de PCM encapsulado, con temperatura de fusión cercana a la temperatura ambiente, desarrolla el ahorro de energía de la siguiente manera, cuando se hace de noche y baja la temperatura del ambiente por debajo del promedio, el material empieza a solidificar generando calor que se elimina ventilando el interior del edificio. Al llegar el día y subir la temperatura el PCM absorbe calor del interior al fundirse, esto reduce el gasto de energía de climatización para mantener más frío el edificio en las horas de calor máximo.

El problema técnico no puede separarse del económico y como estos materiales son ciertamente costosos, deben de optimizarse o tener un uso moderado de su empleo. Debemos tener presentes dos aspectos importantes, uno la capacidad de almacenamiento y otro la potencia térmica disponible y la facilidad de su carga. La capacidad de almacenamiento va estar relacionada en función de la masa y del calor latente, en la facilidad de carga tiene participación el área, el coeficiente global de transmisión, en el que la conductividad térmica del PCM tiene una gran importancia y el salto de temperatura.

Se ha visto al analizar el comportamiento térmico de edificaciones en barro, que la evaporación del agua (el aprovechamiento de su calor latente de

evaporación) puede ser muy importante para reducir las entradas de calor en los meses cálidos en las edificaciones [10].

Los PCM resultan muy interesantes en la construcción, ya que al presentarse microencapsulados pueden ser agregados como áridos al cemento o al yeso [11], para su transporte en el agua [12], como transporte de calor. Esta línea de desarrollo y evolución de los PCM en la construcción está siendo investigada actualmente, sin embargo se sigue esperando que sea más desarrollado en los próximos años.

También son aplicados en muros trombe, que son muros o paredes orientados hacia el sol. Estos están contruidos con materiales acumuladores de calor en el interior (PCM), los materiales usados son piedra, hormigón, adobe, etc. En la siguiente figura se explica su funcionamiento de forma esquemática.

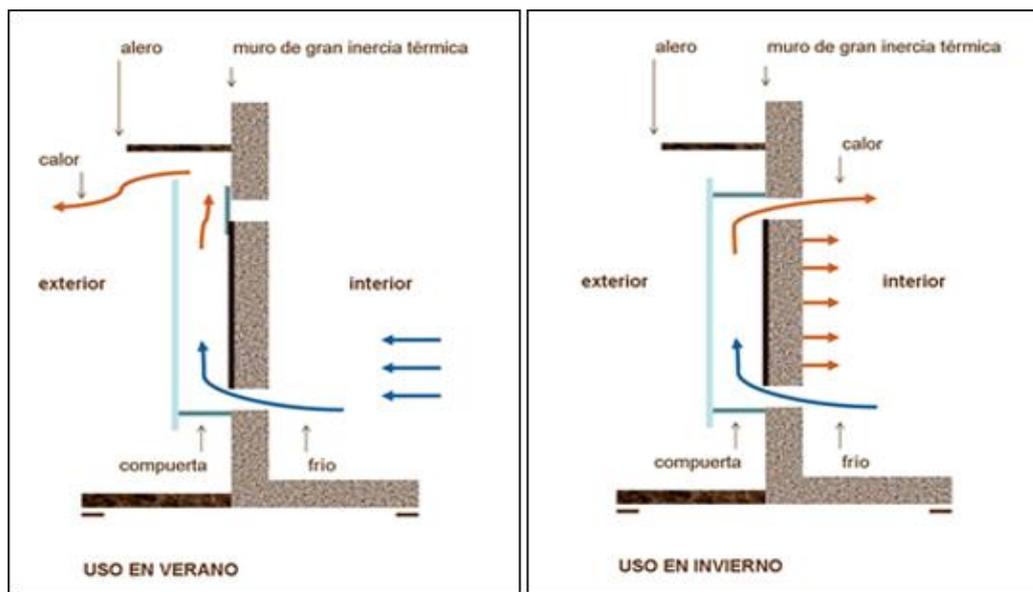


Figura 2.3. Explicación funcionamiento muros trombe [IM2].

Los edificios incluyen aislamiento en su construcción por la disminución de consumo energético que esto conlleva. Este ahorro energético en calefacción y aire acondicionado se traduce directamente en una disminución de las emisiones de CO₂. Cálculos teóricos preliminares constatan que un edificio típico de oficinas con aislamiento disminuye entre un 22 y un 52% sus emisiones de CO₂ anuales con respecto al mismo edificio sin ningún tipo de aislamiento [14]. Se aplican también en casetas de telefonía, polideportivos, granjas u oficinas.

2.3. Otras aplicaciones

También pueden emplearse los PCM en el campo de las energías renovables, lo cual resulta realmente interesante en la sociedad en la que vivimos. El aumento de la eficiencia energética es el camino más importante que se puede realizar en estos momentos para mejorar la economía, el medio ambiente y permitir un crecimiento sostenible de la humanidad, sin llegar a revoluciones o medidas drásticas sociológicas, como las sufridas en el último siglo.

Las energías renovables se caracterizan por su variabilidad en el tiempo y los materiales de cambio de fase (PCM) por requerir gran cantidad de calor para su intercambio y, manteniéndose constante la temperatura. Estas dos características han sido complementadas y su unión ha sido muy buena [13].

Los PCM's con puntos de fusión por debajo de los 15°C están destinados a aplicaciones de frío, con puntos de fusión medios, de 20°C-30°C, están destinados a aplicaciones de confort térmico (textil, construcción...), con puntos de fusión superiores van destinados al almacenamiento térmico para calefacción.

Se siguen estudiando algunas de las posibilidades del empleo de los PCM en diversas aplicaciones de las energías renovables como la solar, refrigeración gratuita, recuperación de calores residuales y la cogeneración, procedimiento en el que se obtiene al mismo tiempo energía eléctrica y energía térmica útil en un único proceso. En aplicaciones concretas como almacenamiento de energía térmica en energía solar de aplicación doméstica o el almacenamiento en sales en plantas termosolares para la producción de energía eléctrica, esta es una aplicación en gran desarrollo y estratégica, con interés en el almacenamiento para cubrir los picos de demanda, por la propia variabilidad de la fuente de energía y porque presenta una alta capacidad de almacenamiento. El método más avanzado de almacenamiento de energía térmica para plantas termosolares es un sistema basado en dos tanques de almacenamiento, donde el fluido caliente transferido también sirve como medio de almacenamiento.

Capítulo 3:

Revisión de otros métodos para la caracterización de las propiedades termofísicas de los PCM en función de la temperatura

Como ya ha sido explicado anteriormente, se utilizan materiales de cambio de fase (PCM) debido a su alta densidad energética y su comportamiento isotérmico durante la carga y descarga. La selección del PCM adecuado para un sistema de almacenamiento de calor latente es tan compleja como necesaria, por lo tanto hay que medir las propiedades térmicas del PCM [2].

3.1. Técnicas de medición de las propiedades del material en función de la temperatura

Los métodos disponibles para determinar el calor de fusión, calor específico y punto de fusión son los siguientes: los métodos calorímetros convencionales, análisis térmico diferencial (DTA), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y los calorímetros adiabáticos.

3.1.1. Calorímetros convencionales

Los calorímetros convencionales son aparatos que se utilizan para determinar el calor específico de un cuerpo y cuantificar la cantidad de calor que absorbe o libera dicho cuerpo.

Muchos calorímetros convencionales utilizan el principio de carga dual, en el cual una absorbe mientras la segunda hace de temperatura de referencia. Mientras más aumenta el calor lo mismo pasa con la temperatura. El sensor de temperatura registra la diferencia de temperatura entre esas dos cargas.

Algunas de las ventajas que presentan los calorímetros son la alta precisión y la estabilidad de calibración, sin embargo presentan bajas velocidades de respuesta y suelen ser muy voluminosos.

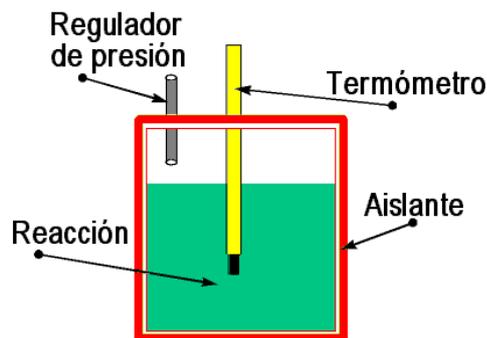


Figura 3.1. Esquema básico calorímetro convencional [IM3].

3.1.2. Análisis térmico diferencial (DTA)

La técnica del análisis térmico diferencial mide la diferencia de temperatura entre una muestra y un material de referencia inerte, siendo los dos sometidos al mismo proceso de calentamiento o de enfriamiento controlado.

El material de referencia debe ser el adecuado para el rango de temperaturas seleccionado, debe presentar una conductividad térmica y una capacidad calorífica similares a las de las muestras y no debe reaccionar ni con el termopar ni con el portamuestras. Además el horno puede ser purgado con un gas inerte y controlar la atmósfera de trabajo.

El instrumento utilizado en el análisis térmico diferencial consta de un bloque portamuestras, con la muestra, la sustancia de referencia y las sondas de medición de temperatura, un horno con sensor de temperatura, un dispositivo para registro con amplificador de señal, un programador de temperatura con sistema de control, un controlador de la atmósfera y otro para el enfriamiento.

3.1.3. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El análisis térmico mediante DSC está basado en provocar pulsos de temperatura mediante un calentador eléctrico o enfriando con nitrógeno líquido en un horno que es controlado por ordenador.

Debemos conocer y dejar bien definida la capacidad calorífica de la referencia en el intervalo de temperaturas en que vaya a tener lugar el barrido. El principio básico es que, cuando la muestra experimenta una transformación física (el cambio de fase) necesitará que fluya más o menos calor a la muestra que a la referencia para mantener ambas a la misma temperatura.

El DSC de potencia compensada es un método especial de calorimetría diferencial de barrido, en este método de análisis las muestras son estudiadas en dos hornos diferentes, separados y aislados térmicamente, en uno de estos hornos se coloca la muestra y en el otro la referencia. Las temperaturas en ambos hornos son medidas con termoresistencias de platino, la señal con la cual se obtiene la capacidad calorífica c_p proviene del calor necesario para mantener la muestra en la temperatura programada en el tiempo correspondiente al programa preestablecido.

La principal diferencia de calorimetría diferencial de barrido de potencia compensada con respecto de la calorimetría diferencial de barrido convencional, radica en que ambas muestras, están separadas y aisladas y es un experimento cuyo control termodinámico permite obtener resultados más precisos. Este método toma en cuenta además de los incrementos en temperatura, la potencia consumida para lograr el incremento de temperatura.

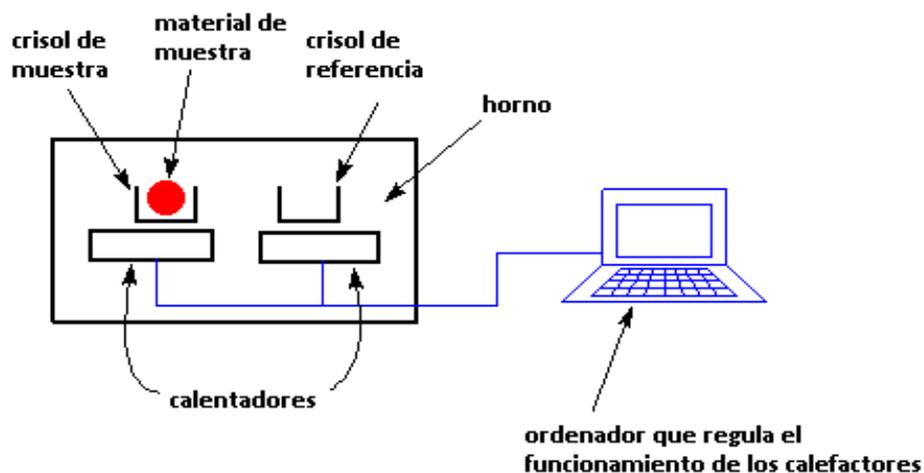


Figura 3.2. Esquema de análisis térmico mediante DSC [IM4].

Para la obtención del flujo de calor se compara la temperatura del horno con la de la referencia y la de la muestra. El horno, considerado de forma ideal, nos garantiza que la temperatura en ese horno sea uniforme y las resistencias térmicas sean iguales [2]. Se obtiene que:

$$\dot{Q} = \frac{T_H - T_R}{R_R} - \frac{T_H - T_M}{R_M} = \frac{T_M - T_R}{R}$$

En la que T_H es la temperatura del horno, T_R es la temperatura del crisol de la referencia y T_M es la temperatura del crisol la muestra. R_R es la resistencia térmica del crisol de la referencia, R_M es la resistencia térmica del crisol de la muestra y R es la resultante de ambas resistencias.

De esta manera se obtiene un termograma, que es la gráfica de la energía vs tiempo, en el que quedan reflejadas las absorciones o cesiones de energía en función de los picos hacia arriba o hacia abajo [2].

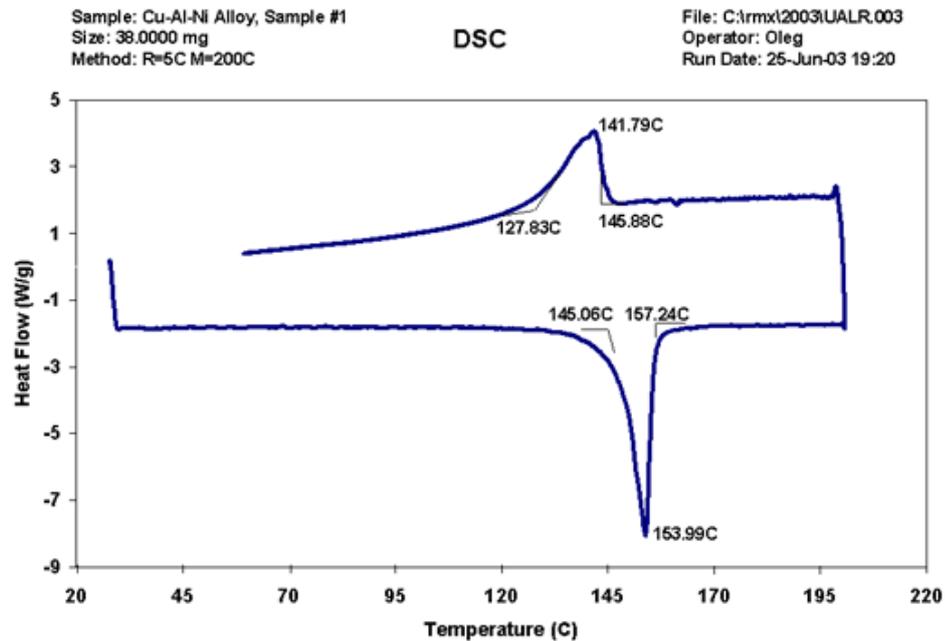


Figura 3.3. Ejemplo de termograma de DSC [IM5].

Las áreas de los picos DSC son proporcionales a los efectos térmicos que experimenta la muestra sometida a un programa de temperatura. Aunque también es necesario considerar una constante, en este caso es un factor de conversión eléctrico más que un término que dependa de las características de la muestra.

En un equipo DSC, se supone que el valor de esta constante es independiente de la temperatura, lo cual explica el atractivo de esta técnica para

determinaciones calorimétricas cuantitativas. Es posible determinar directamente los cambios de entalpía de una reacción a partir de la masa de la muestra, la constante anterior y el área del pico correspondiente. Una vez calculado su valor, basta con comprobarlo de forma regular.

El calentamiento o enfriamiento debe realizarse a la velocidad correcta, ya que si se produce demasiado lento y el volumen de la muestra es pequeño, la medida puede perder precisión por producirse una transferencia de calor entre los dos crisoles. Si fuera demasiado rápida y el volumen de la muestra es grande, se puede producir que toda la muestra no esté a la misma temperatura.

3.1.4. Calorimetría adiabática

Al igual que los anteriores métodos de análisis térmico, la calorimetría adiabática sirve para medir las cantidades de calor absorbidas o cedidas por un cuerpo, determinando su calor específico.

La particularidad del calorímetro adiabático es buscar reducir a un valor despreciable el calor que pueda salir de su interior o entrar en él, es decir, está basado en el principio de adiabaticidad. Mide así la variación de temperatura durante un determinado tiempo.

El resultado es también un termograma que representa la temperatura frente al tiempo. Sin embargo, estos sistemas son más apropiados para trabajar a bajas temperaturas.

3.1.5. Resumen

Estos métodos tienen inconveniente de que para ensayar las muestras, requieren una cantidad muy pequeña de las mismas (1-10 mg), y en el caso de los PCM esto puede dar lugar a errores importantes en la medida obtenida.

A la vista de este problema, se aplica el método T-history, con el que se puede determinar el punto de fusión, el calor específico y la conductividad térmica del material ensayado.

La elección de la utilización del método T-history para la caracterización de materiales de cambio de fase fue estudiada anteriormente por Lázaro A [2], con resultados notables para almacenamiento térmico de energía a bajas temperaturas.

Capítulo 4:

El método T-History

El método T-history fue desarrollado por Yinping Zhang & cols. para el departamento de Ingeniería Térmica de la Universidad Tsinghua de Beijing, en la República Popular China [6].

Comparado con los demás métodos disponibles como la calorimetría convencional y el DSC, el método T-history tiene algunas características a destacar. El sistema experimental es relativamente simple, se pueden hacer experimentos con muchas muestras y conseguir la obtención y caracterización de diversas propiedades termofísicas de cada PCM, la precisión de las medidas satisface los requisitos para aplicaciones desarrolladas en ingeniería y el proceso de cambio de fase de cada PCM puede ser observado claramente [6].

Este método está basado en comparar la evolución de la temperatura del material a ensayar con la de otro material de referencia, sometidos a un proceso de enfriamiento y/o un proceso de calentamiento en una cámara controlada. El material de referencia debe ser tal que su calor específico sea bien conocido, y ambos materiales tienen que estar contenidos en recipientes con la misma geometría para asegurar el mismo coeficiente de transferencia de calor y permitan considerar la transferencia de calor unidimensional y considerar al sistema formado por cada tubo como sistema de capacidad frente al aire ambiente [6],[2].

De esta manera se observa que se pueden calcular el calor específico del PCM en fase sólida y líquida, la obtención de las curvas temperatura-tiempo tanto del material de cambio de fase como de la sustancia de referencia. Mediante el tratamiento de datos se estiman las propiedades termofísicas [2].

Este método es útil para medidas rápidas del PCM que puede ser usado en aplicaciones de almacenamiento de calor latente.

4.1. Fundamento teórico

Un tubo que contiene un material de cambio de fase con una temperatura uniforme T_0 , siendo esta mayor que el punto de fusión del PCM se expone a la

atmósfera con temperatura T . La curva que se obtiene en el proceso es la curva T-history.

Cuando el $Bi = hR/2k < 0.1$, donde R es el radio del tubo, k la conductividad térmica del PCM y h el coeficiente de transferencia de calor por convección natural en la parte exterior del tubo la distribución de temperatura se puede definir uniforme [15]. Podemos hacer el balance:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,l})(T_0 - T_s) = h A_c A_1 \quad (1)$$

Donde m_p y m_t son las masas del PCM y del tubo y $c_{p,l}$ y $c_{p,t}$ son los calores específicos medios del PCM líquido y del tubo respectivamente. A_c es el área de transferencia de calor convectiva del tubo $A_1 = \int_0^{t_1} (T - T_{\infty,a}) dt$. Se tiene entonces:

$$m_p H_m = h A_c A_2 \quad (2)$$

Donde H_m es el calor de fusión del PCM y $A_2 = \int_n^{t_2} (T - T_{\infty,a}) dt$. El tiempo que transcurre durante el cambio de fase es el definido por t_1 y t_2 . Tenemos que:

$$(m_t c_{p,t} + m_p c_{p,s})(T_s - T_r) = h A_c A_3 \quad (3)$$

Donde $c_{p,s}$ es el calor específico medio del PCM sólido. $A_3 = \int_{t_2}^{t_3} (T - T_{\infty,a}) dt$ y T_r es la temperatura de la sustancia de referencia.

Si consideramos un tubo cuyo contenido es agua pura y es expuesto al mismo ambiente y considerando que $Bi < 0.1$ se tiene de forma análoga:

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_0 - T_s) = h A_c A'_1 \quad (4)$$

$$(m_t c_{p,t} + m_w c_{p,w})(T_s - T_r) = h A_c A'_2 \quad (5)$$

Donde m_w es la masa del agua y $c_{p,w}$ el calor específico medio del agua.

$$A'_1 = \int_0^{t_1'} (T - T_{\infty,a}) dt, \text{ y } A'_2 = \int_{t_1'}^{t_2'} (T - T_{\infty,a}) dt.$$

Si utilizamos la ecuación (4) podemos encontrar el coeficiente de convección natural en la parte exterior de un tubo (h). Su valor es de aproximadamente $5-6 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, así que la condición de $Bi < 0.1$ puede satisfacerse cuando $k_s > 0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, aquí, k_s es siempre mayor de $0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$.

De las ecuaciones (1) a la (5) se obtiene:

$$c_{p,s} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t} \frac{A_3}{A'_2}}{m_p} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t}$$

$$c_{p,l} = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t} \frac{A_1}{A'_1}}{m_p} - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t}$$

$$H_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t} \frac{A_2}{A'_1}}{m_p} (T_0 - T_s)$$

De esta manera se observa que se puede obtener el calor específico del material de cambio de fase en sus dos fases, sólida y líquida, y su energía de cambio de fase [6].

Si las sustancias no son puras, la temperatura del cambio de fase no es constante. Existe un enfriamiento del tubo entre las temperaturas inicial y final de cambio de fase T_{m1}, T_{m2} :

$$H_m = \frac{m_w c_{p,w} + m_t c_{p,t} \frac{A_2}{A'_1}}{m_p} (T_0 - T_s) - \frac{m_t c_{p,t} (T_{m1} - T_{m2})}{m_p}$$

En el año 2002, este método fue mejorado [16]. Esta mejora es debida a que, al tratarse de sustancias no puras (por lo general), no es preciso el momento en el que el cambio de fase se inicia. Por lo tanto, es más correcto utilizar la entalpía en función de la temperatura.

Realizando los cálculos anteriores, variando la temperatura en intervalos pequeños temporales $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, $\Delta t'_i = t'_{i+1} - t'_i$ para el PCM y la referencia, resulta [2]:

$$m_p \cdot \Delta h_p(T_i) + m_t \cdot c_{p,t}(T_i)(T_i - T_{i+1}) = h A_c A_i$$

Donde: $A_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (T - T_{\infty, a}) dt.$

$$(m_t \cdot c_{p,t}(T) + m_w \cdot c_{p,w}(T))(T_i - T_{i+1}) = hA_c A'_1$$

Donde: $A'_1 = \int_{t'}^{t' + \Delta t'} (T - T_{\infty, a}) dt.$

Se obtiene para $\Delta h_i(T)$, la ecuación:

$$\Delta h(T_i) = \frac{(m_w c_{p,w}(T_i) + m_t c_{p,t}(T_i)) A_i}{m_p} \Delta T_i - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t}(T_i) \Delta T_i$$

Siendo T_i la temperatura media en el intervalo ΔT_i .

Presentando entonces, los valores $\Delta h_p(T_i)$ que se han obtenido frente al tiempo, se puede obtener la gráfica. Las curvas entalpía – temperatura se determinan como la suma de los intervalos de entalpía, tomando como valor fijo de referencia h_{p0} , queda:

$$h_p(T) = \sum_{i=1}^N \Delta h_{pi} + h_{p0}$$

A partir de aquí, se puede obtener el intervalo de temperaturas de cambio de fase, la entalpía de cambio de fase y los calores específicos de la sustancia en cada punto, hallando la derivada en ese punto:

$$c_p = \frac{\delta h}{\delta T}$$

Esta mejora del método presenta algunas ventajas como [2]:

- ✓ Tiene en cuenta las variaciones en los calores específicos de las sustancias al variar la temperatura.
- ✓ Se cometen errores menores al no suponer constante el coeficiente de convección.

- ✓ Permite obtener los calores específicos en estado líquido y sólido a cada temperatura a partir de la curva entalpía – temperatura.
- ✓ Para la elección de una sustancia acumuladora de energía mediante cambio de fase, se puede calcular la cantidad de calor sensible y calor latente de forma sencilla.

Trabajo de diseño y experimental

Capítulo 1:

Estudio previo para el diseño de la instalación. Inconvenientes principales que se presentan en el desarrollo de dicho diseño.

1.1. Introducción.

Se necesita diseñar una instalación para la caracterización de materiales de fase a altas temperaturas, moviéndonos en un rango de temperaturas de trabajo entre temperatura ambiente y 250°C - 300°C de temperatura máxima, en este intervalo se situará el punto de fusión del material de cambio de fase. La instalación actual nos permitía la caracterización de materiales de cambio de fase en un rango de trabajo propuesto inicialmente desde -10°C hasta 150°C [2]. Se tiene el conocimiento de algunas instalaciones que ya han sido utilizadas para este fin, sin embargo queda una línea abierta en la búsqueda y desarrollo de una instalación de alta temperatura.

El método T-History, como ya se ha explicado en el capítulo anterior, es el sistema más interesante para la obtención de estas características. A partir de este método están basados los dos primeros tipos de instalación que se proponen.

En esta investigación aparece un tercer tipo de instalación a analizar, basado en el transporte de un fluido caloportador a través de un almacenador (no utiliza el método T-History), donde se sitúa la sustancia de cambio de fase.

Para los tres tipos de diseño de instalación que se proponen se adjuntan los croquis aproximados del aspecto gráfico de cada instalación con los componentes básicos que componen las instalaciones y se hace un análisis de dichos componentes y se citan las condiciones imprescindibles que deben cumplir dichas instalaciones para su preciso funcionamiento.

1.2. Tipos de instalaciones analizadas para el diseño de nuestra instalación.

1.2.1. Instalación 1

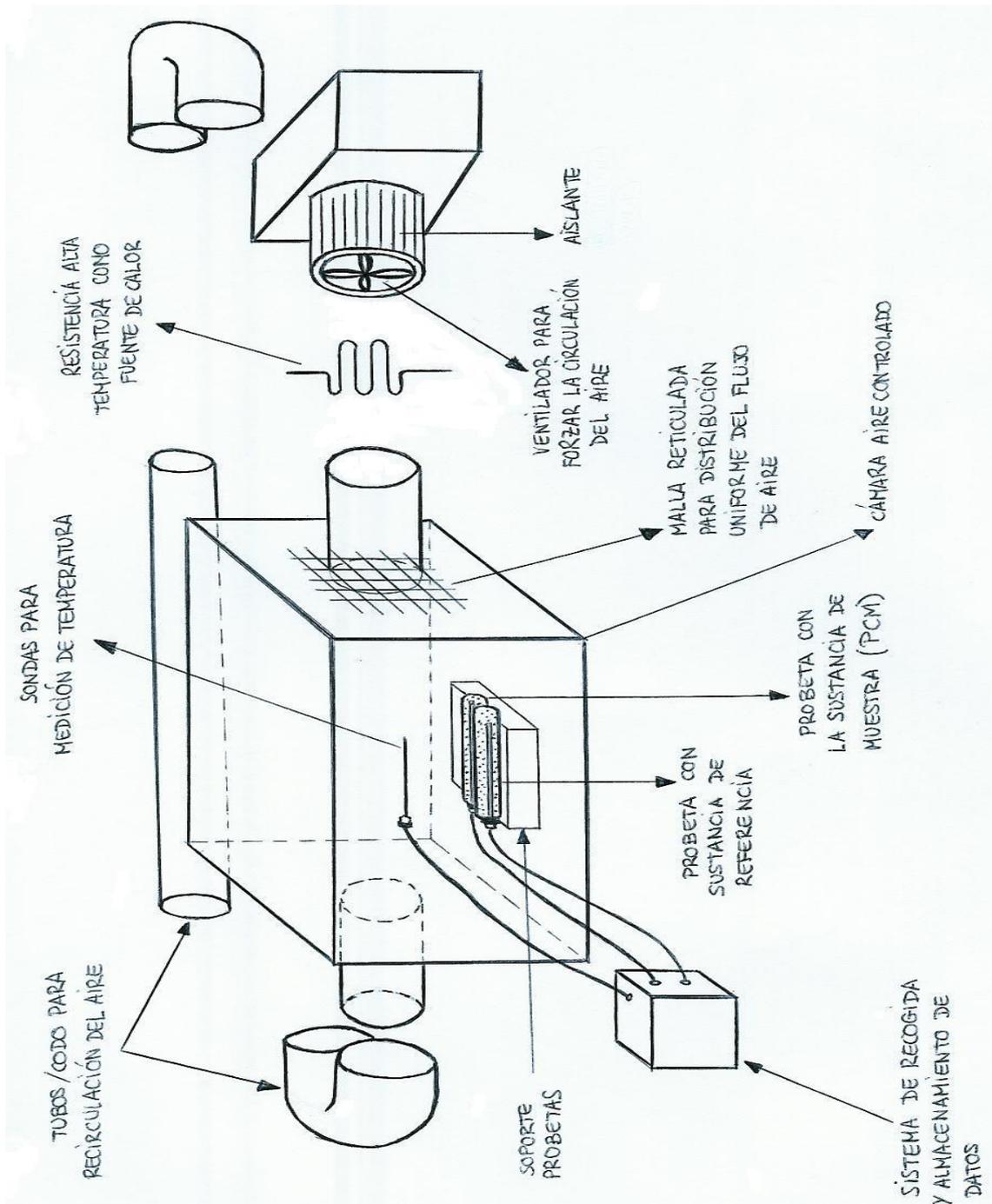


Figura 5.1. Prototipo (croquis) Instalación con recirculación con aire caliente.

Análisis de viabilidad de la instalación 1

Principio de funcionamiento

Se hace circular aire forzado mediante un ventilador, haciéndolo pasar a través de una resistencia térmica, que va a ser la fuente de calor. El aire fluye a su vez, a través de una malla reticulada con el fin de optimizar la distribución del aire, obteniendo un flujo uniforme y turbulento y una temperatura lo más controlada y estable posible, con el objetivo de mantener una temperatura de aire constante en el interior de la cámara.

El flujo de aire llega a una cámara aislada donde se encuentran nuestras probetas, es decir, la muestra de PCM y la sustancia de referencia. Ambas probetas contienen sondas para medición de la temperatura y estarán conectadas a un sistema de almacenamiento y tratamiento de datos.

Cuando la sustancia (PCM) acumula el calor necesario, cambia de fase. Entonces se apaga la resistencia y se deja funcionar el ventilador para facilitar la descarga (enfriamiento) del sistema. El sistema contará, además, con un sistema de conductos para la recirculación del aire, de esta manera se pretende que el aire caliente generado no sea desperdiciado y funcione como un ciclo cerrado.

La cámara debe de estar sellada en sus uniones para evitar las pérdidas de flujo de aire. También debe estar aislada respecto al exterior para evitar pérdidas de flujo de calor.

En la transferencia de calor por convección se provoca dicha transferencia del calor del aire a la superficie de los tubos. Dentro de la muestra, se produce la transferencia de calor por conducción. La convección se desprecia al quedar los tubos colocados en posición horizontal.

Componentes y características de la instalación

- Elementos calefactores:

- a) Resistencias térmicas especiales:

Resistencias térmicas de aleaciones especiales capaces de llegar a altas temperaturas como las resistencias de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2), son usadas en hornos de laboratorios capaces de llegar a temperaturas de trabajo entorno a los 1800°C (a).

- b) Resistencias térmicas aleteadas:

Fabricadas con blindaje de acero inoxidable y están provistas de aletas planas o circulares de forma helicoidal para generar una gran superficie de contacto y aumentar considerablemente la superficie de transferencia de calor. Están especialmente indicadas para el calentamiento de aire forzado. Además el aleteado garantiza que el gradiente térmico entre la temperatura del aire y la temperatura superficial del tubo sea mínimo (a).

Resistencias indicadas para el calentamiento de fluidos para convección natural y forzada. Temperatura máxima de trabajo de 650°C para los modelos con aletas de acero inoxidable (b), especialmente indicadas para su utilización como resistencias calefactoras.

- c) Resistencias/calentadores de cartucho:

Las resistencias de cartucho (c) tienen una altísima densidad superficial, lo que resulta muy interesante para nuestro fin. Alcanzan temperaturas de trabajo de 600°C .

Entre sus características destacan las siguientes:

- Óptimo intercambio térmico debido a la proximidad del filamento de la resistencia a las paredes internas de la vaina.
- Ahorro energético considerable.
- Indicado para la convección de aire forzado y natural.
- Posibilidad de incorporar un termopar en la resistencia para tener el control de la temperatura en todo momento.

- Ventiladores:

Tras varias búsquedas y comparativas los ventiladores son apropiados para un funcionamiento en torno a una temperatura máxima de trabajo de unos 180°C.

Existen ventiladores industriales que son capaces de trabajar a 300°C, sin embargo estos ventiladores tienen dimensiones notablemente más grandes de las que para la instalación se plantea.

También existen cajas de ventilación capaces de trabajar a 400°C pero tienen el accionamiento mediante turbinas, lo que supone un flujo muy grande y demasiada potencia para una instalación tan pequeña respecto a estos ventiladores.

- Sondas medición de temperatura:

Aquí aparecen varias opciones para la medición de temperatura. Por un lado se pueden utilizar termopares, que irían conectados al sistema de almacén de datos con una determinada frecuencia de registro. Tenemos los termopares tipo T, con rango de trabajo de -270°C a 400°C y los tipo K, con rango de trabajo de -270° a 1372°C. El principal inconveniente que presentan es que tienen limitación de exactitud, 1°C de error, lo que puede resultar demasiado.

Por otro lado tenemos la posibilidad de utilizar termorresistencias Pt-100. A continuación se muestra la tabla normalizada, donde quedan reflejadas las temperaturas de trabajo de las sondas y sus tolerancias.

TOLERANCIAS DE LA Pt100

| Temp. °C | Clase B | | Clase A | | Clase 1/3B | | Clase 1/10B | |
|----------|------------------------|-------|------------------------|-------|---------------------|-------|----------------------|-------|
| | 0,30+0,005* t (°C) | | 0,15+0,002* t (°C) | | 1/3* (clase B) (°C) | | 1/10* (clase B) (°C) | |
| | Ohm | °C | Ohm | °C | Ohm | °C | Ohm | °C |
| -200 | ±0,56 | ±1,30 | ±0,24 | ±0,55 | ±0,19 | ±0,43 | ±0,06 | ±0,13 |
| -100 | ±0,32 | ±0,80 | ±0,14 | ±0,35 | ±0,11 | ±0,27 | ±0,03 | ±0,08 |
| 0 | ±0,12 | ±0,30 | ±0,06 | ±0,15 | ±0,04 | ±0,10 | ±0,01 | ±0,03 |
| 100 | ±0,30 | ±0,80 | ±0,13 | ±0,35 | ±0,10 | ±0,27 | ±0,03 | ±0,08 |
| 200 | ±0,48 | ±1,30 | ±0,20 | ±0,55 | ±0,16 | ±0,43 | ±0,05 | ±0,13 |
| 300 | ±0,64 | ±1,80 | ±0,27 | ±0,75 | ±0,21 | ±0,60 | ±0,06 | ±0,18 |
| 400 | ±0,79 | ±2,30 | ±0,33 | ±0,95 | ±0,26 | ±0,77 | ±0,08 | ±0,23 |
| 500 | ±0,93 | ±2,80 | ±0,38 | ±1,15 | ±0,31 | ±0,93 | ±0,09 | ±0,28 |
| 600 | ±1,06 | ±3,30 | ±0,43 | ±1,25 | | | | |
| 650 | ±1,13 | ±3,55 | ±0,46 | ±1,45 | | | | |
| 700 | ±1,17 | ±3,80 | | | | | | |
| 800 | ±1,28 | ±4,30 | | | | | | |
| 850 | ±1,34 | ±4,60 | | | | | | |

t = temperatura °C

Figura 5.2. Clasificación termorresistencias pt 100 [IM6].

En la figura se puede observar que para el estudio a altas temperaturas en las termorresistencias de Clase A, se tiene un error en torno a 1°C, prácticamente igual que los termopares. Al ser iguales en cuanto al error, se optaría por las termorresistencias ya que resultan menos susceptibles de sufrir interferencias por la cercanía de otros equipos y la instalación que se plantea se instalará en un laboratorio.

Si se obtienen termorresistencias de la Clase 1/10, entonces se van a obtener valores mucho más precisos para esas altas temperaturas.

- Elementos (portamuestras, tubos, cámara):

Los materiales de los tubos pueden ser de aluminio. El portamuestras y la cámara se propone que se utilicen de acero inoxidable austenítico (serie 300), ya que son excelentes para la resistencia a la corrosión y soporta temperaturas de 1150°C.

También se propone como alternativa la adquisición de una cámara ya construida y aislada para facilitar el proceso.

- Aislantes:

El aislante Rockwool (d), es un aislante de lana de roca, capaz de soportar temperaturas de 1200°C. Además es aislante de temperatura y de ruidos, por lo que si se utilizaran termopares, estos son muy sensibles al ruido.

Este tipo de aislante tiene un amplio rango de espesores. Existen también en forma de paneles y mantas de diferentes características. Podría ser utilizado tanto para las probetas como para la cámara.

- Situación y colocación del soporte:

Se propone la colocación del soporte de manera que las probetas tanto muestra como la referencia estén colocadas a la misma distancia del eje central del soporte, para evitar así posibles gradientes de temperatura o transferencias de calor entre las probetas.

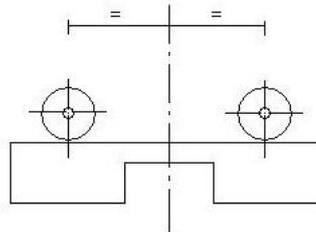


Figura 5.3. Descripción gráfica colocación portamuestras.

1.2.2. Instalación 2

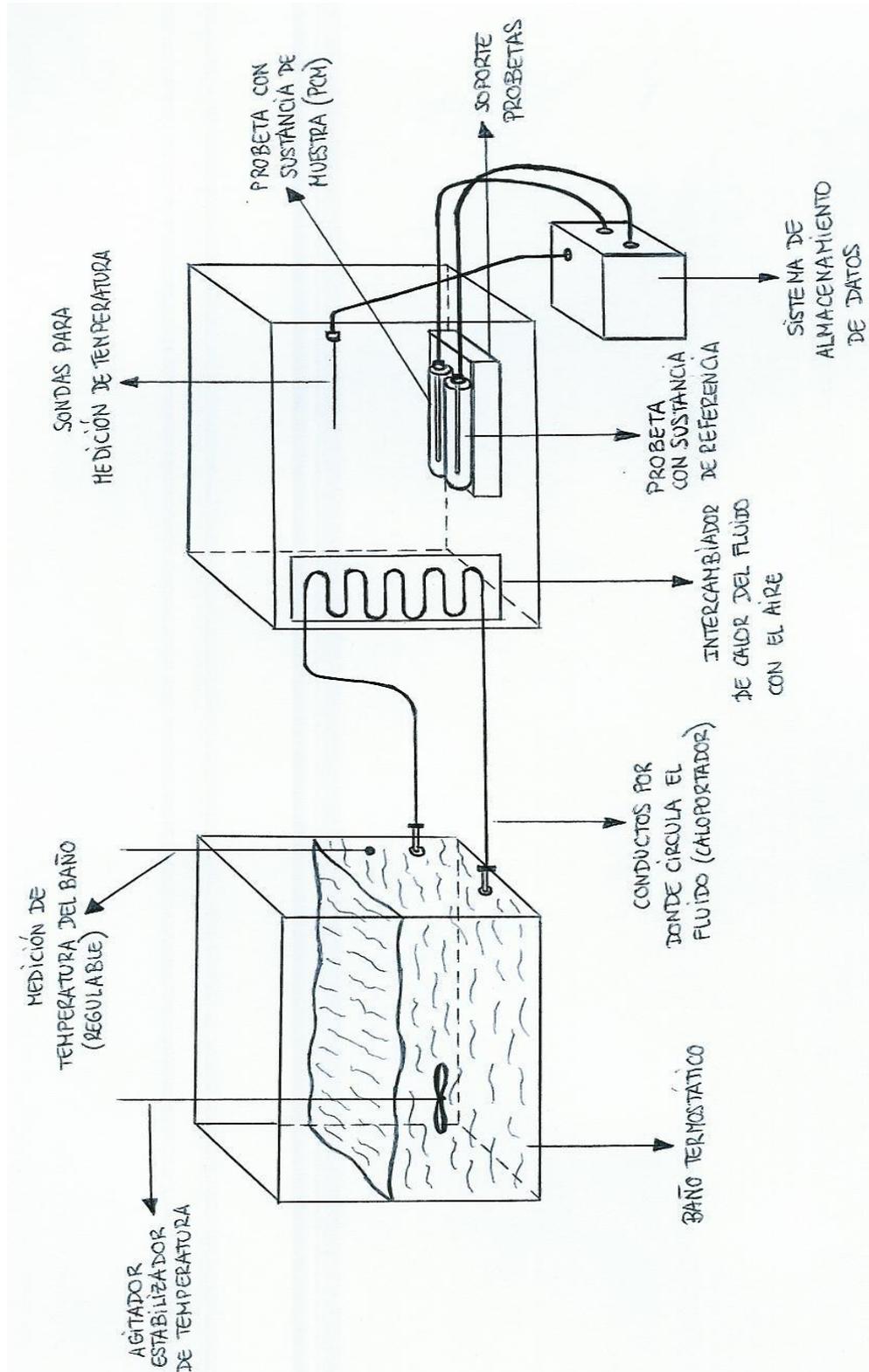


Figura 5.4. Prototipo (croquis) Instalación con intercambio de calor.

Análisis de viabilidad de la instalación 2

Principio de funcionamiento

Se calienta el baño termostático hasta que alcanzamos la temperatura deseada, este dispone de un agitador para estabilizar la temperatura y hacerla homogénea. La temperatura la regulamos también desde el baño termostático.

Se hace circular el fluido hacia dentro de la cámara mediante los conductos visibles en el croquis. De esta manera el fluido realiza un intercambio de calor con el aire. Dentro de la cámara están situadas las probetas y las sondas de temperatura, estas a su vez estarán conectadas al sistema de almacenamiento de datos.

El fluido circula como un ciclo cerrado desde el baño termostático a la cámara y viceversa. Cuando se obtiene la temperatura deseada de la muestra y se produce el cambio de fase, se apaga el baño termostático.

Del mismo modo que en la instalación 1, la cámara ha de estar aislada respecto del exterior y el principio de transferencia de calor dentro de la misma, será parecido al de la anterior instalación, teniendo en cuenta la posibilidad de aislamiento o no de las probetas para optar a la transferencia de calor por convección forzada o no.

Componentes y características de la instalación

- Baño termostático:

Baños termostáticos de lecho fluidizado (e), el fluido del baño es gas de partículas de alúmina. Su funcionamiento se sitúa en un rango de temperaturas entre -50°C a 600°C . Está fabricado en acero inoxidable y es utilizado como fuente de calor uniforme. El tiempo de calentamiento es de 20°C a 600°C en dos horas y presenta una estabilidad de 0.5°C en todo el rango. Además puede ser utilizado para calibración de temperatura.

Los baños termostáticos de circulación y recirculación, tienen la limitación de alcanzar temperaturas máximas de 300°C pero obtenemos gran estabilidad, del orden de $\pm 0.01^\circ\text{C}$. Hay gran variedad disponibles en el mercado (f),(g), etc.

- Aceites y fluido para baños termostáticos:

Existen diversos aceites y fluidos para los baños termostáticos. Estos fluidos poseen características favorables como baja toxicidad, alta estabilidad, buena conductividad térmica, baja viscosidad (evita taponamientos) y baja corrosividad. Estos fluidos permiten llegar a temperaturas de 350°C (h).

Por otro lado, los aceites térmicos también resultan interesantes, algunos alcanzan una temperatura máxima de trabajo de 400°C (i).

- Construcción de la cámara:

Al igual que para el modelo de la instalación 1, se proponen las dos opciones anteriormente citadas.

- Elementos de medición de temperatura:

Del mismo modo que la instalación 1, se proponen como opciones de sensores de temperatura los termopares y las termorresistencias Pt-100, siendo estas las más favorables como ya se ha debatido en el punto anterior.

- Cables conductores:

Son cables conductores resistentes al calor, existen amplia gama de tubos y aislante para estos tubos conductores, aislantes de tubos de lana mineral (j) que soportan temperaturas de hasta 450°C, aislantes de silicato de calcio que soportan temperaturas de trabajo aún mayores, de hasta 650°C.

- Aislante:

El aislante a utilizar sería el mismo de la instalación anterior, podría ser utilizado tanto para las probetas como para la cámara, ya que aislante

tiene un amplio rango de espesores y posibilidades en dimensiones y formas.

- Situación y colocación del soporte:

Se propone el montaje del soporte y las muestras de la misma forma que en el caso anterior.

1.2.3. Instalación 3

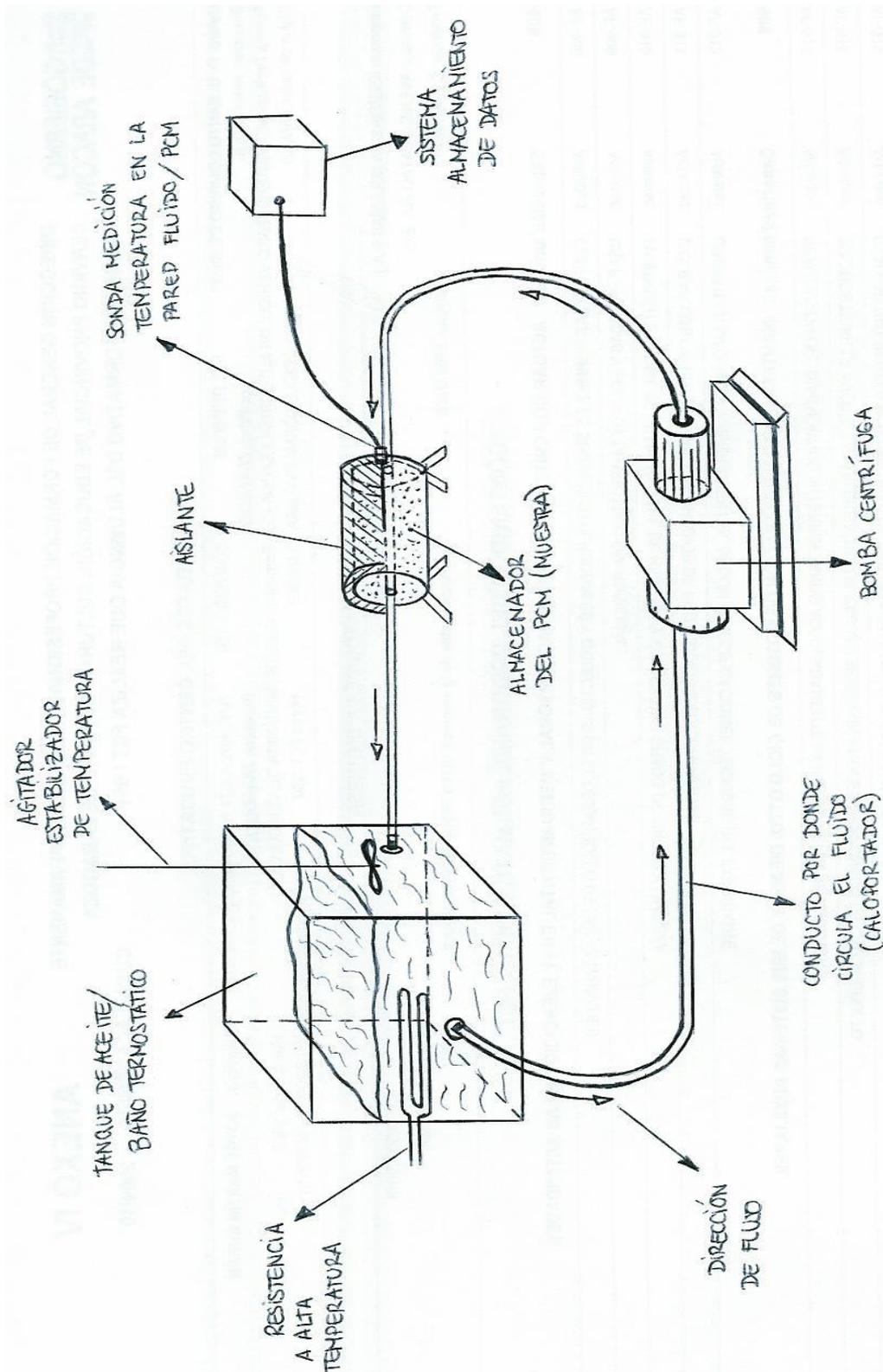


Figura 5.5. Prototipo (croquis) Instalación con almacenador de PCM y fluido calotransportador.

Análisis de viabilidad de la instalación 3

Principio de funcionamiento

La instalación dispone de un baño termostático o un tanque de aceite con una resistencia térmica (foco de calor).

El fluido alcanza altas temperaturas y circula como fluido caloportador a través del tubo interno del almacenador del PCM. Es entonces cuando se produce la transferencia de calor a la muestra, se produce el cambio de fase y entonces se desconecta la resistencia o el baño termostático.

La instalación dispone de una bomba centrífuga que fuerza el caudal del fluido caloportador hacia el almacenador de PCM.

El principio de medida de esta instalación estaría basado en el modelo matemático bidimensional en estado no estacionario, con la herramienta numérica FLUENT®, que es una plataforma que ya ha sido utilizada para realizar las simulaciones de fusión/solidificación aplicando el método entalpía-porosidad.

En esta técnica la interfase fundida no se obtiene de forma explícita. En cambio, una cantidad llamada fracción líquida, que indica la fracción de volumen en forma líquida que está asociado con cada celda del volumen de control. La fracción líquida es computada en cada iteración, sobre el balance de entalpía.

Para la formulación del modelo matemático se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

- El PCM es isotrópico y homogéneo.
- El fluido de transferencia de calor (HTF) se considera incompresible y newtoniano.
- La velocidad y temperatura de entrada del HTF son constantes.
- La temperatura inicial del sistema de almacenamiento de energía es uniforme y el PCM se encuentra en la fase sólida para el proceso de fusión.

- En el PCM, fluido de transferencia de calor y las paredes del tubo, las variaciones de temperatura en la dirección angular son asumidas despreciables.
- El problema se considera axisimétrico.
- Las propiedades termofísicas del fluido de transferencia de calor, las paredes del tubo y el PCM se consideran constantes.

Para el balance de energía, la entalpía se presenta en la siguiente ecuación, y es la contribución de calor sensible y calor latente (ΔH):

$$H_{PCM} = (h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dt) + \Delta H$$

Siendo h_{ref} , la entalpía de referencia, T_{ref} la temperatura de referencia y c_p el calor específico.

En la ecuación se observa que la entalpía por calor sensible está constituida por dos elementos, que son la entalpía de referencia, que es la condición inicial y tiene otro elemento que es la energía que va ganando a medida que aumenta la temperatura, la cual se sabe por definición que es función del calor específico del PCM [5].

La fracción líquida (β) se define a partir de la regla de la palanca:

$$\beta = 0, \text{ si } T < T_{sólido}$$

$$\beta = 1, \text{ si } T > T_{líquido}$$

$$\beta = \frac{T - T_{sólido}}{T_{líquido} - T_{sólido}}, \text{ si } T_{sólido} < T < T_{líquido}$$

A partir de la definición de fracción líquida, la cual mide la cantidad de material fundido que se encuentra en cada celda de control, se define el calor latente en la siguiente ecuación, en términos del calor latente del material (L) y la fracción fundida (β), variando entre 0 para el sólido y 1 para la fusión (título).

$$\Delta H = \beta L$$

Reemplazando esta ecuación en la anterior, queda:

$$H_{PCM} = (h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dt) + \beta L$$

Con el modelo se obtienen perfiles de temperatura del PCM y el HTF durante el proceso de solidificación y fusión.

Una de las principales debilidades del modelo es considerar las propiedades físicas del PCM constantes debido a esta suposición el modelo no logra tener un comportamiento cercano al experimental durante el cambio de fase [5].

Componentes y características de la instalación

- Tanque térmico con resistencia térmica:

Se necesita una resistencia térmica capaz de soportar la corrosión para poder entrar en contacto directo con el aceite del tanque térmico y que este pueda incrementar su temperatura hasta alcanzar la idónea para el ensayo.

- Baño termostático:

Si se diseña la instalación con baño termostático tendremos mayor precisión y estabilidad y uniformidad en cuanto a la regulación de la temperatura.

Además se evitaría el inconveniente de la corrosión que puede aparecer en la resistencia térmica por estar en contacto continuamente con el aceite térmico.

- Aceites para circulación en sistemas cerrados:

Se dispone en el mercado de varios aceites térmicos para circulación forzada, que alcanzan temperaturas máximas de 350°C, (Chevron Heat Transfer Oil grado 22).

El aceite térmico para baños termostáticos utilizado puede ser cualquiera de los propuestos para la instalación 2 (aceite para baños, Syltherm 800 que alcanza 400°C).

- Bombas centrífugas:

Para forzar el caudal del fluido caloportador se necesitan bombas centrífugas. En el mercado existe una amplia gama de bombas para impulsar aceites térmicos a altas temperaturas. Aquí están presentes las

referencias de algunas de ellas, capaces de impulsar aceite térmico hasta 350°C (finderpompe.com y etanorm SYA).

- Construcción del almacenador:

Para la construcción del almacenador podemos pensar en el acero inoxidable, sin embargo este presenta una baja conductividad térmica. El material del almacenador deberá ser entonces un material de gran conductividad térmica ya que la pared interna del almacenador es la que entra en contacto entre el fluido caloportador y el almacenador.

Las posibilidades que aparecen son el aluminio o el cobre:

- Aluminio: Posee una conductividad térmica de 237 W/m·K y un punto de fusión a 660°C.
- Cobre: Tiene una conductividad térmica aún superior a la del aluminio, en torno a 400 W/m·K y un punto de fusión de 1084°C. Además, especialmente el cobre es altamente resistente a la corrosión y la oxidación.

- Aislante:

Se tiene que colocar un aislante alrededor del almacenador, ya que tenemos que evitar las pérdidas de flujo de calor del material de cambio de fase al entrar en contacto con el aire la cara exterior del almacenador.

Los materiales para el aislante pueden ser los especificados para el aislante de la instalación 1.

Esquema del almacenador

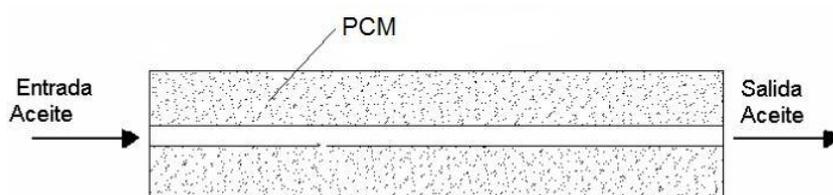


Figura 5.6. Esquema del almacenador de energía [5].

Un aspecto importante a tener en cuenta

La disposición del almacenador es una decisión importante. Se tiene que tener en cuenta el gradiente de temperatura. El almacenador del PCM aumentará de temperatura desde las zonas más internas (ceranas al fluido caloportador) hacia el exterior (lejanas al fluido caloportador).

Del mismo modo, al cambiar de fase, los puntos más cercanos a la pared interior del almacenador solidificarán primero, por lo que puede aparecer un gradiente de temperaturas y una segregación de fases. Esto puede llevar a errores en la medición de temperatura.

Si la disposición se realiza de manera vertical, el gradiente será máximo. Sin embargo con el almacenador en posición horizontal, el gradiente se reducirá notablemente, por lo que se propone como mejor disposición para nuestra instalación.

1.3. Análisis de las ventajas e inconvenientes que presentan cada una de las instalaciones.

| | Instalación 1 | Instalación 2 | Instalación 3 |
|----------------|---|--|--|
| INCONVENIENTES | <ul style="list-style-type: none"> • Difícil encontrar ventiladores que trabajen > 180°C • Con termopares incertidumbre mayores a 1°C • Complejidad construir una cámara casera y obtener las condiciones que necesitamos | <ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento variable de los aceites. Viscosidad y posible solidificación y complicaciones a temperatura ambiente • Limitación de los baños termostáticos convencionales a temperaturas de trabajo máximas de 300°C • Estabilidad del baño fluidizado de más de 0.05°C • Dificultad para obtener temperaturas en la cámara del orden de la temperatura del aceite al pasar por el intercambiador de calor | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema complejo y poco desarrollado, se sale del método T-history • Atendiendo al almacenador, segregación de fases, densidades desiguales partes sólida-líquida • Dificultad encontrar bombas centrífugas de temperaturas de trabajo > 350°C • Colocación de las sondas de temperatura |
| VENTAJAS | <ul style="list-style-type: none"> • Usando Pt 100, minimizamos incertidumbre a alta T hasta ± 0.18 a 300°C y ± 0.28 a 500°C • Existen calentadores y resistencias indicados para convección de aire forzado que alcanzan hasta 600°C • Aislantes de altas temperaturas fáciles de encontrar y con amplias posibilidades de aplicación • El uso del aire como flujo de calor nos da temperaturas de operación casi ilimitadas | <ul style="list-style-type: none"> • Fluido para baños termostáticos convencionales tienen baja viscosidad y buena conductividad térmica • Conducto para intercambio de calor de cobre, se favorece la transferencia de calor, la conductividad térmica y optimizamos transferencia de calor (400 W/m·K) • Aceites térmicos ofrecen temperaturas de 400°C • Aislantes de altas temperaturas fáciles de encontrar • Usando pt 100 minimizamos incertidumbre a alta T | <ul style="list-style-type: none"> • Construcción del almacenador en cobre para facilitar la transferencia de calor y obtener gran densidad superficial • Aislantes adaptables al contorno del almacenador y a altas temperaturas • Beneficio de utilizar el cobre en cuanto a la corrosión |

Tabla 5.1. Ventajas e inconvenientes de las instalaciones propuestas.

1.4. Elección final del diseño de la instalación.

1.4.1 Debate

Los prototipos de instalaciones fueron estudiados, analizados y se hizo una revisión de las ventajas e inconvenientes que presentaban.

Se tomó la decisión de diseñar una instalación mejorada del primer modelo explicado anteriormente. Las decisiones más significativas fueron:

- Suprimir la circulación cerrada de aire debido a la dificultad de encontrar ventiladores a altas temperaturas.
- Búsqueda de una cámara con sistema de calentamiento/enfriamiento, de construcción o ya construida disponible en el mercado, capaz de alcanzar temperaturas de trabajo elevadas como mínimo hasta 300°C y con precisión de regulación de temperatura.
- Utilización de sondas de contacto superficial para medición de la temperatura de las probetas de la muestra, de la referencia y del aire de la cámara.
- Tubos de ensayo de material adecuado para facilitar la conductividad térmica y el trabajo a altas temperaturas.
- Soporte para los tubos de ensayo capaz de soportar las altas temperaturas y de tal disposición que favorezca la correcta transferencia de calor y no haya pérdidas entre las probetas ni lugar a error entre ellas.
- Utilización de varios de los componentes para el T-history de baja temperatura y conectarlos con los componentes nuevos del T-history de alta temperatura. Estos son el sistema de adquisición y almacenamiento de datos y la balanza de precisión.

Capítulo 2:

Estudio de los elementos que se requieren y que componen nuestra instalación. Discusión y elección entre las alternativas que se presentan.

2.1. Punto crítico y fundamental para la instalación. Elección de una cámara aislada.

2.1.1. Cámara aislada.

Características que debemos tener en cuenta para la elección de la cámara:

- **Adiabaticidad:** La cámara debe tener un perfecto aislamiento con el exterior para que no haya pérdidas de calor y las muestras experimenten un ensayo estable.
- **Aislamiento:** Si la cámara la adquirimos ya fabricada, el aislamiento ya lo ha estudiado el fabricante. Si la cámara es de construcción propia, tenemos que hacer un estudio a cerca de los posibles aislantes viables para nuestra cámara.
- **Temperatura interior uniforme:** Hay de tener en cuenta que, a menor volumen, mayor facilidad de distribución de la temperatura de la cámara y mayor velocidad de calentamiento de la misma. Se necesita un calentamiento rápido de la cámara, tiempos de respuesta rápidos.
- **Temperatura regulable:** La temperatura de trabajo de la cámara se tiene que poder regular con precisión y estabilidad con la mayor exactitud posible para el rango requerido para la instalación, de 20°C hasta 300°C (como mínimo).
- **Recinto accesible:** Se necesita que la apertura de la cámara sea de fácil acceso para poder introducir los contenedores de la muestra, la referencia y nuestro portamuestras. Además, debe ser posible la apertura de la puerta de la cámara a altas temperaturas si es necesario.

- Sistema de enfriamiento: Posibilidad de adaptar un sistema de enfriamiento, soplos de aire a temperatura ambiente, etc.
- Dimensiones: Las medidas de la cámara se tienen que adecuar al espacio destinado en el laboratorio para su ubicación, de manera que quede bien situado y no interrumpa el acceso a otras instalaciones colindantes.

Teniendo en cuenta los requisitos citados se procede al estudio de la búsqueda de la cámara tipo.

A continuación se exponen las distintas opciones:

Hornos industriales y Hornos (estufas)

La principal variable por la que se hace diferenciación entre hornos industriales y estufas es la temperatura. Los hornos tipo estufa pueden alcanzar temperaturas máximas de trabajo de 700°C, mientras que los hornos industriales pueden alcanzar 1500°C - 2000°C. Además de esto, los hornos industriales suelen tener dimensiones mayores a las de las estufas y suelen tener variaciones en cuanto a la forma de regulación de temperatura.

Las estufas son hornos de laboratorio para altas temperaturas que disponen de un motor de circulación forzada de aire, que puede ser accionado para calentamiento pero no tiene enfriamiento controlado, aunque en algunas se puede accionar a modo de ventilación a temperatura ambiente. Tienen regulador electrónico de temperatura y poseen termostatos con sondas de temperatura o termopares. Sus dimensiones interiores se sitúan en torno a 500 x 500 x 500 mm (altura x anchura x profundidad).

Las estufas presentan estabilidades de temperatura de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ a $\pm 5^\circ\text{C}$, dependiendo del modelo, dimensiones, calidad de la estufa y temperatura a la que trabajan. La velocidad térmica se sitúa en $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ a $40^\circ\text{C}/\text{min}$. Presentan buena uniformidad de temperatura con controladores y en muchas se pueden programar rampas de calentamiento. Además tienen datos muy buenos en cuanto a homogeneidad de la temperatura en la cámara.

El horno es un equipo para calentamiento que suele ser de gran volumen y pesado. Los hornos industriales se utilizan para el secado de material y para secar sales químicas, llegando a alcanzar temperaturas de hasta 3000°C.

Los hornos disponen de circulación del aire, que es la que juega el papel de la transmisión del calor. El aire es renovado de forma continua mediante un orificio situado en una pared de la cámara.

Los hornos industriales disponen de enfriamiento controlado mediante un equipo de enfriamiento formado por una turbina exterior. Los ciclos de calentamiento y enfriamiento son relativamente cortos. Dispone de control de temperatura y se pueden programar rampas. Estos hornos se desconectan automáticamente al abrir la puerta, lo que puede ser un inconveniente para introducir nuestra muestra al habitáculo a determinadas temperaturas.

Las dimensiones de la cámara interior son muy variables, mientras que las dimensiones exteriores son demasiado grandes ya que el aislamiento exterior se efectúa mediante doble cámara con circulación forzada de aire.

El precio que puede llegar a alcanzar las estufas es elevado, pero podemos encontrar estufas con características realmente interesantes para nuestro diseño por aproximadamente 6000 euros. El de los hornos industriales grandes puede ser muy elevado, atendiendo a las características que presentan.

Muflas (eléctricas)

Las muflas son hornos de laboratorio normalmente pequeños, para realizar ensayos a altas temperaturas, a partir de 700°C, con un consumo de energía relativamente pequeño.

La cámara de cocción es el recinto donde se sitúan las muestras para realizar los ensayos, sus paredes están fabricadas de material refractario. Dentro de esta, se sitúan las termocuplas para el control de la temperatura interna de la cámara. Rodeando a la cámara existe un recinto, que es donde se produce el calor.

Las muflas disponen de un ventilador o turbina que facilita la distribución, circulación y uniformidad de temperatura en toda la cámara.

Se presentan tres variables de importante influencia en el precio, la homogeneidad, la estabilidad y las dimensiones de la cámara interna. Las muflas tienen dimensiones muy pequeñas, cuanto mayor exijamos la dimensión de la cámara interior, mayor será su coste. Del mismo modo, cuanto mejores sean los requerimientos en cuanto a homogeneidad y estabilidad, su coste también será mayor.

Las temperaturas de trabajo de las muflas se sitúan desde temperatura ambiente hasta 1200°C. Las dimensiones varían entre 100 x 150 x 150 mm, es decir, unos 1.5 - 2 litros de volumen hasta 360 x 360 x 360 mm, unos 45 litros de volumen, con su consecuente aumento de precio. La velocidad térmica de las muflas es de 0.1°C/min a 40°C/min.

Por ejemplo, para una mufla con valores de homogeneidad a 1000°C de $\pm 5^\circ\text{C}$ y una estabilidad a 1000°C de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ de dimensiones pequeñas, el precio oscila entre 1000 y 1500 euros. Por otro lado, para una mufla con homogeneidad a 1000°C de $\pm 3.5^\circ\text{C}$ y una estabilidad a 1000°C de $\pm 1.2^\circ\text{C}$ de dimensiones más grandes, el precio se sitúa entre 6500 y 9000 euros.

Cámaras climáticas

Las cámaras climáticas son un tipo de cámaras en las que se realizan ensayos de fiabilidad o de estrés (cambios de temperaturas bruscos) de forma precisa, estable y fiable, además disponen varios rangos de temperatura de trabajo. Su funcionamiento suele estar basado en un flujo de aire forzado por un ventilador axial en el fondo de la cámara y suelen tener tanto calentamiento como enfriamiento controlado.

Además, estas cámaras tienen otras características interesantes como pueden ser la tecnología avanzada para control de la temperatura, la necesidad de un bajo mantenimiento, su facilidad de uso o que son muy silenciosas.

Un gran inconveniente es el precio. Para las cámaras climáticas normales, se sitúan en torno a 12000 euros.

Otro inconveniente es que las temperaturas de trabajo de las cámaras climáticas no superan los 180°C. La estabilidad de temperatura se sitúa entre 0.1 y 1.5°C, y la apreciación entre 0.1 y 1°C. Las velocidades térmicas de estas cámaras son de 0.1°C/min hasta de 40°C/min.

Dentro de este tipo de cámaras existen diversas variantes atendiendo al tipo de ensayo, de este modo se pueden encontrar cámaras de simulación medioambiental, que nos permiten hacer ensayos entre -70°C a 180°C, cámaras de secado de seguridad, que permiten llevar a cabo ensayos de temperaturas por conducción simétrica del aire hasta 350°C y cámaras de secado y calor, para ensayos con cambios rápidos de temperatura hasta unos 300°C.

Además existen cámaras derivadas a estas, son las cámaras de choque térmico, en las que se producen intercambios muy bruscos de temperatura en un intervalo mínimo de tiempo. Consta de dos cámaras, una de ellas se mantiene a temperatura fría y la otra a temperatura caliente. Estas cámaras tienen una plataforma o ascensor portamuestras que se desplaza desde el compartimento caliente al frío y viceversa.

Permite cambios de temperatura de hasta 696°C en tan sólo 2 segundos. El ascensor o plataforma es cuadrada y tiene unas dimensiones de 400 x 400 mm. Sin embargo y como contraprestación las dimensiones exteriores de la cámara son muy grandes.

Hornos pirolíticos

La posibilidad de utilización de hornos pirolíticos para la instalación reside en aprovechar las temperaturas a las que se produce el ciclo de pirolisis para hacer nuestros ensayos.

Existen hornos con pirolisis compactos, que resultan interesantes ya que se reduce el volumen del compartimento interior del horno, lo cual facilitaría una transferencia de calor más rápida que en un horno de dimensiones normales.

La pirolisis se sitúa, dependiendo del tipo de hornos, en un rango entre 500°C y 600°C en las paredes del horno y se estima una temperatura del aire interior de 400°C. Los tiempos de los ciclos de pirolisis se podrían alargar modificando la electrónica.

Un inconveniente es el bloqueo de cierre de seguridad de la puerta mientras está funcionando el ciclo pirolítico. Las dimensiones de estos hornos pirolíticos compactos son de aproximadamente 400 x 400 x 250 mm, es decir, un volumen aproximado de 35 litros en los hornos más pequeños de este tipo.

Los precios de estos hornos varían entre 450 a 800 euros, aunque algunos incluso son más caros. El principal inconveniente es la calidad de estos hornos, tanto la estabilidad como la precisión de la cámara podrían resultar insuficientes debido a que no están fabricados para ensayos como el que se va a realizar.

Hornos de pan y pizza

Resulta interesante hacer un breve estudio sobre los hornos de pan y de pizza. Estos hornos están recubiertos de material refractario para obtener altas temperaturas de manera más rápida, por lo que alcanzan la temperatura deseada a mayor velocidad térmica que los hornos pirolíticos domésticos.

Una de las ventajas de los hornos para pizzas es que la dimensión correspondiente al plano horizontal es notablemente más pequeña que las otras dos dimensiones, debido a que las pizzas son finas, por lo que no requieren un habitáculo de gran altura.

Estos hornos permiten alcanzar temperaturas en aire de 500°C. Incorporan controles de temperatura por termostatos y tienen también incorporado el aislamiento, en lana mineral. Sin embargo no presentan características específicas de estabilidad, homogeneidad, apreciación, etc., por lo que puede ser posible que no alcance los valores de precisión mínimos que necesitamos.

Como ventaja, los hornos de pizzas no presentan restricciones en cuanto al acceso al interior de la cámara mediante la apertura de la puerta a alta temperatura, para introducción de las muestras.

Las dimensiones más pequeñas que tienen estos hornos para pizzas son de 420 x 420 x 140 mm, es decir, un volumen interior de unos 25 litros.

Tras comparar varios hornos de este tipo, podemos decir que el precio se sitúa en torno a 700 euros.

| Tipo de cámara | Temperatura máxima trabajo | Inconvenientes | Estabilidad y velocidades térmicas |
|-----------------------|-----------------------------------|---|--|
| Hornos industriales | Hasta 3000°C | Gran volumen, pesado. Se desconectan con la apertura de la puerta. Precio elevado | Amplia variabilidad de la estabilidad y velocidad térmica en función de las características del horno |
| Estufas | 700°C | No dispone de enfriamiento controlado | Estabilidad de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a $\pm 5^\circ\text{C}$, Velocidad térmica de $\pm 0,1^\circ\text{C}/\text{min}$ a $\pm 40^\circ\text{C}/\text{min}$ |
| Muflas | 1300°C | Precio elevado al aumentar el volumen interior | Estabilidad de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ a $\pm 1,5^\circ\text{C}$, Velocidad térmica de $\pm 0,1^\circ\text{C}/\text{min}$ a $\pm 40^\circ\text{C}/\text{min}$ |
| Cámaras climáticas | 180°C | Temperatura máxima de trabajo escasa y precio elevado | Estabilidad de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a $\pm 1,5^\circ\text{C}$, Velocidad térmica de $\pm 0,1^\circ\text{C}/\text{min}$ a $\pm 40^\circ\text{C}/\text{min}$ |
| Hornos pirolíticos | 400°C | Bloqueo de cierre de seguridad de la puerta mientras funciona el ciclo pirolítico | No se conocen datos de estabilidad y velocidades térmicas con garantías |
| Hornos de pan/pizza | 500°C | Homogeneidad y apreciación complejas | No se conocen datos de estabilidad y velocidades térmicas con garantías |

Tabla 7.1. Resumen tipos de cámara

Construcción casera

Por último, se presenta la opción de construir la cámara de forma casera y hacer el aislamiento.

La cámara puede estar fabricada en acero inoxidable resistente a la corrosión, ya que los ensayos se realizan a altas temperaturas. Se necesitaría instalar sistemas de control y regulación de temperatura, así como un sistema de calentamiento, generar un flujo continuo de calor, por lo que tenemos que instalar una resistencia u otra alternativa como foco de calor para poder realizar el calentamiento. Además, deberíamos instalar el sistema de enfriamiento.

Por otro lado, existen aislamientos especialmente indicados para cámaras, depósitos, hornos y calderas, estos están disponibles en un amplio rango de espesores, de diferentes características, para superficies tanto regulares como irregulares, son repelentes al agua y por supuesto, son excelentes aislantes térmicos.

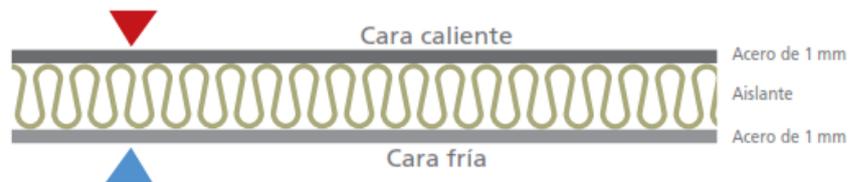


Figura 7.1. Disposición gráfica del aislamiento de la cámara (d).

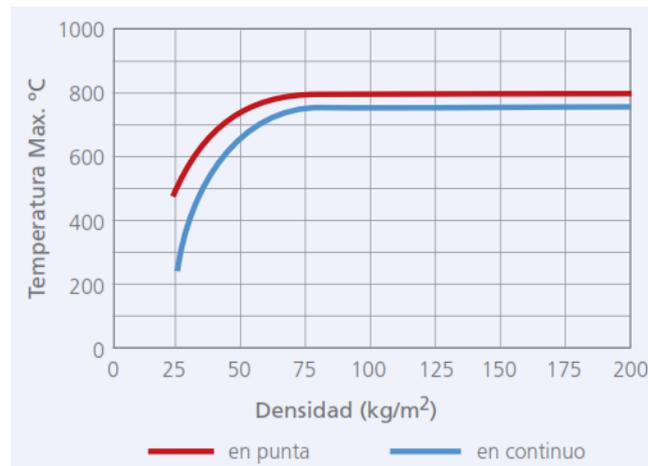


Figura 7.2. Comparativa Densidad frente a Temperatura (d).

Sin embargo esta opción de cámara va a resultar compleja y laboriosa, los sistemas para unión de juntas, búsqueda de materiales adecuados, fabricación de una puerta con cierre perfecto para que no existan fugas del calor, etc. Además no se sabe si se va a conseguir la precisión y fiabilidad que requieren nuestros ensayos.

2.1.2. Selección y características de la cámara final

| | Temperatura max [°C] | Velocidad media calentamiento [°C/min] | Velocidad media enfriamiento [°C/min] | Desviación momentánea de la temperatura [°C] | Precio [€] | Dimension [l] |
|-----------------|----------------------|--|---------------------------------------|--|-------------|---------------|
| CCI | 500 | 3.3 a 400°C 2.7 a 500°C | 13.75 a 650°C | --- | 19850 | 120 |
| BINDER MK-53 | 180 | 4.6 | 4.1 | 0.1-0.5 | 10800 | 53 |
| BINDER MK-115 | 180 | 5.3 | 5.0 | 0.1-0.5 | 16025 | 115 |
| Binder M | 300 | 8.3 a 300°C | --- | 0.3 | 6480 | 115 |
| Binder MDI | 350 | 30 a 300°C | --- | 0.5 | 10825 | 115 |

Tabla 7.2. Selección de la cámara elegida (en rojo).

La elección de la cámara estuvo basada en los requerimientos necesarios para la instalación. Se adquirió así, la cámara Binder M, para ensayos de precisión, cuya temperatura máxima de trabajo se sitúa en los 300°C y tiene una capacidad de 115 litros. Las características de la adquisición de la cámara, así como sus opcionales quedan detalladas en el anexo.

2.1.3. Proceso de calentamiento.

Como ya queda reflejado en la tabla, en el proceso de calentamiento, la media de este es de 8.3°C por minuto hasta la temperatura máxima de trabajo de la cámara, los 300°C, todo ello con una desviación momentánea de la temperatura de 0.3°C.

2.1.4. Sistema de enfriamiento de la cámara.

En principio, no se dispone de un enfriamiento controlado por la cámara, ni se dispone de velocidades de enfriamiento, la forma de enfriamiento que se

propone para el proceso de enfriamiento es la apertura de la puerta, cuando el PCM ya haya cambiado de fase, de manera que el ambiente vaya asumiendo el calor que la cámara contiene al llegar a temperaturas tan altas y se produzca el proceso de enfriamiento.

A falta de realizar las primeras pruebas con los primeros materiales de cambio de fase, se esperan los resultados para, si estos son favorables mantener nuestro sistema de enfriamiento o en su defecto, proponer un nuevo sistema de enfriamiento para la cámara adquirida y las mejoras pertinentes al respecto.

2.2. Sondas de temperatura.

Aquí aparecen varias opciones para la medición de temperatura. Por un lado se pueden utilizar termopares, que irían conectados al sistema de almacén de datos con una determinada frecuencia de registro. Aparecen los termopares tipo T, con rango de trabajo de -270°C a 400°C y los tipo K, con rango de trabajo de -270°C a 1372°C . El principal inconveniente que presentan es que tienen limitación de exactitud, 1°C de error, lo que puede resultar demasiado.

Se hizo un estudio para adquirir sondas de temperatura Pt-100 de contacto superficial, de manera que estas se colocaran 'pegadas' a los tubos de ensayo. Finalmente se adquirieron sondas de temperatura Pt-100 que se acoplaban a los tubos mediante un anillo ajustable con un sensor. Están disponibles en un número de tamaños para adaptarse a su diámetro de tubería.

Las características de estas sondas son las siguientes:

- ✓ Configuración de tres hilos
- ✓ Elemento Pt-100 cumple con la norma BS EN 60751:1996 Clase A
- ✓ Versiones para tubos de 32mm-50mm, 50-150mm o 300mm
- ✓ Rango de funcionamiento: -50°C a 350°C
- ✓ Leads: 2 metros de fibra de vidrio aislado con un acero inoxidable overbraid



Figura 7.3. Sensor de temperatura Pt-100 con abrazadera (k).

Del mismo modo, se pidió a la misma empresa, TC Direct la calibración de una de las sondas de temperatura Pt-100 y calibrar las demás sondas a partir de la primera.

2.3. Tubos de ensayo.

Se estudiaron las distintas posibilidades de los materiales de los tubos contenedores de las muestras. Las dos posibilidades más viables a priori para nuestro caso eran tubos huecos fabricados en cobre o aluminio.

Una de las opciones que se han propuesto es la de utilizar un tocho macizo de cobre para ser utilizado directamente como sustancia de referencia. La alternativa es utilizar el aluminio e introducir dentro la sustancia de referencia.

Se puso en contacto con el departamento de metal para adquirir tubos de cobre y aluminio y hacer pruebas en ambos casos.

Los tubos finalmente son de los dos materiales: un tubo de cobre con diámetro interior de 10 mm y espesor de 0.8 mm y un tocho macizo del mismo diámetro exterior. El otro tubo es de aluminio con diámetro interior de 13 mm y espesor de 1.5 mm. Todos ellos normalizados y ya disponibles.

2.4. Sistema de adquisición y almacenamiento de datos.

Se dispone en el laboratorio de determinación de propiedades termofísicas en el área de Máquinas y Motores Térmicos de una unidad de adquisición y conmutación de datos de Agilent Technologies, modelo 34970A, serial MY41018117.

Este equipo de medida deja cubiertas las necesidades que requiere nuestra instalación. Además es utilizada en otras instalaciones disponibles en el laboratorio.

Las características del equipo son:

- ✓ Resolución de 6 ½ dígitos
- ✓ 22 bits
- ✓ Precisión básica de 0.004% Vdc
- ✓ Termopares, Termoresistencias y termistores
- ✓ Tensión, corriente AC, DC
- ✓ Resistencia, frecuencia y periodo
- ✓ 50 K de memoria no volátil con marca de tiempo
- ✓ Comunicación RS-232 e IEEE-488
- ✓ Posibilidad de conexión de hasta 3 tarjetas multiplexoras de 40 canales cada una

Este equipo de medida ya fue utilizado con éxito en la caracterización de materiales a baja temperatura [2].

Se conectó un modulo multiplexor de 20 canales de tensión y 2 de corriente con características de:

- ✓ Muestreo de 20 canales por segundo
- ✓ Medidas de 2 y 4 hilos
- ✓ Tensión máxima de entrada de 300 V
- ✓ Corriente máxima de 1 A
- ✓ Potencia máxima de 50 W
- ✓ Ancho de bando 10 MHz
- ✓ Compensación interna de temperatura en unión fría para termopares
- ✓ Medida de TC, RTD, termistores
- ✓ Voltaje e intensidad AC DC, resistencia, frecuencia, periodo

Las sondas de temperatura van conectadas al módulo multiplexor, en concreto las Pt-100 van montadas a cuatro hilos, ya que ocupan dos canales por sonda.

Además, el equipo es ampliable si fuera necesario en un momento determinado.

2.5. Sistema de cálculos y tratamiento de datos.

Para el sistema de cálculos y tratamientos de datos se dispone de una aplicación en Labview que nos permite el tratamiento de datos en tiempo real. Este sistema de cálculos ya fue utilizado con éxito para la caracterización de materiales de cambio de fase a bajas temperaturas [2].

Los datos se introducen en una pantalla del programa, que dispone de las características de velocidad, promedio y media, los nombres de los ficheros generados con los cálculos, etc. Por la segunda pantalla aparecen los resultados obtenidos de dichos cálculos.

El programa se comunica con el sistema de adquisición de datos de Agilent Technologies y le proporciona pares de datos:

- Pares de datos de temperatura de la sustancia de referencia (°C) y tiempo (s).
- Pares de datos de temperatura del PCM (°C) y tiempo (s).
- Pares de datos de temperatura ambiente (°C) y tiempo (s).

El sistema permite variaciones en cuanto a su configuración, atendiendo a tipos de sensor de temperatura, velocidades de adquisición de datos, etc.

Además se introducen los siguientes datos:

- Material del tubo
- Masa del tubo (g)
- Calor específico del tubo (J/°C·g)
- Sustancia de referencia que se va a utilizar
- Masa de la sustancia de referencia (g)
- Calor específico de la sustancia de referencia (J/°C·g)
- Material del PCM
- Masa del PCM (g)
- Temperatura de referencia entalpía (0°C)

- Entalpía de referencia (0 J/g)

Los datos de salida son:

- Representación en tiempo real de la evolución de las tres temperaturas (°C).
- Pares de datos entalpía PCM (J/g), Temperatura (°C) representados gráficamente.
- Pares de datos de calor específico del PCM (J/°C·g), Temperatura (°C) representados gráficamente.

Además se generaran ficheros directamente:

- Fichero con los datos adquiridos de las tres temperaturas y el tiempo.
- Pares de datos de la entalpía del PCM y de la temperatura representados gráficamente.
- Pares de datos del calor específico del PCM y de la temperatura representados gráficamente.
- Cálculos realizados en cada paso del programa.

2.6. Balanza de precisión.

La elección de una balanza de precisión es de gran importancia, ya que es de aquí de donde provienen principalmente los errores en las medidas de temperaturas en función de la masa, ya que la medida viene dada en J/g.

Es por esto por lo que tiene que existir una gran precisión en la medida del peso de nuestro conjunto formado por el PCM, la sustancia de referencia y los tubos contenedores de las mismas.

La balanza disponible en el laboratorio es una balanza de precisión Mettler-Toledo, que presenta las siguientes características:

- ✓ Capacidad de 120g
- ✓ Precisión de 0.01mg hasta 31g/0.1mg hasta 120g.
- ✓ Repetibilidad de 0.03mg hasta 31g/0.1mg hasta 120g.
- ✓ Linealidad de ± 0.2 mg

2.7. Portamuestras.

Se fabricará un portamuestras en material capaz de soportar las altas temperaturas de los ensayos a realizar, donde se situarán los tubos con la sustancia de referencia y el PCM.

Estos tubos se colocarán en el portamuestras a la mínima distancia entre ambos y a la misma distancia del eje central del portamuestras con el objetivo de que no exista diferencia de temperatura ambiente entre ellos, de esta manera se pretende minimizar los gradientes de temperatura.

2.8. Aislante para probetas.

Se realizó la búsqueda de un aislante para acoplar a los tubos de las probetas. Finalmente se optó por adquirir una manta de fibra cerámica refractaria que resiste temperaturas de trabajo de hasta 1260°C.

Tiene un calor específico a 1000°C de 1.1 kJ/kg·K, y una conductividad térmica a 400°C de 0.12 W/m·K.

Este tipo de aislante está dirigido especialmente para aislamiento térmico, pantallas térmicas, etc.

El resto de las características vienen especificadas y detalladas en el anexo.

2.9. Cableado de sondas y uniones vaina/cable:

El cableado de las sondas y la unión del cable con dicha sonda quedan fijados por el proveedor de las sondas, ya que establece las especificaciones sobre el cable y la unión.

Capítulo 3:

Elección de la sustancia de referencia. Análisis de distintas posibilidades.

Se presentan tres condiciones necesarias para la elección de un buen material de referencia:

1. Se debe elegir una sustancia de la que conocemos su calor específico, que es la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de una sustancia para que eleve su temperatura en un grado.
2. Necesitamos elegir una sustancia que no cambie de fase en todo el proceso en el rango de temperaturas de trabajo a los que la vamos a someter.
3. La sustancia de referencia debería ser lo más parecida posible a las sustancias a analizar en cuanto a propiedades como conductividad térmica, viscosidad, etc, para que la precisión en el ensayo sea lo más correcta posible.

Se presenta como una posible sustancia de referencia el cobre, que posee un punto de fusión de 1084°C, por lo que, para nuestros ciclos la sustancia permanecería en estado sólido durante todo el proceso. El cobre además, posee buena resistencia a la corrosión, gran durabilidad, no requiere mantenimiento ni limpieza, es un gran conductor térmico (400 W/m·K), es un gran conductor eléctrico, y conocemos su calor específico, $c_p = 0.385 \text{ J/g}\cdot\text{K}$.

Hay que tener en cuenta la dilatación del material de referencia dentro del tubo, ya que podrían aparecer problemas al estar contenido en dicho tubo.

Sin embargo, resulta interesante pensar en la búsqueda de una sustancia que permanezca en estado líquido durante todo el proceso, una sustancia que se amolde de forma casi perfecta al recipiente que la contiene. Se estudian entonces distintos materiales de referencia con temperaturas de fusión cercanas a la temperatura ambiente y temperaturas de ebullición lejos de los 300°C.

Aparecen así materiales como el Francio, el Cesio, el Galio o el Potasio. De éstos, el Francio, 27°C-677°C (temperatura fusión-ebullición), quedó descartado debido a su alta toxicidad, además el calor específico del mismo no queda bien definido. El Cesio, 28°C-671°C, $c_p = 240 \text{ J/ kg}\cdot\text{K}$, reacciona vigorosamente con el oxígeno formando óxidos y también posee niveles altos de toxicidad. El potasio, 63°C-759°C, $c_p = 757 \text{ J/ kg}\cdot\text{K}$, es altamente tóxico y hay que almacenarlo recubierto en aceite por su rápida oxidación. El Galio, 30°C-2204°C, $c_p = 370 \text{ J/ kg}\cdot\text{K}$, resulta un material interesante, su toxicidad es

tan baja que no es considerado como tóxico, sólo en exposiciones muy largas y prolongadas puede causar un pequeño enrojecimiento en la piel. Lo único a tener en cuenta es que se expande al solidificar en torno a un 3 %.

Capítulo 4:

Esquematación y descripción gráfica de la instalación final y del montaje.

4.1. Esquema de la instalación

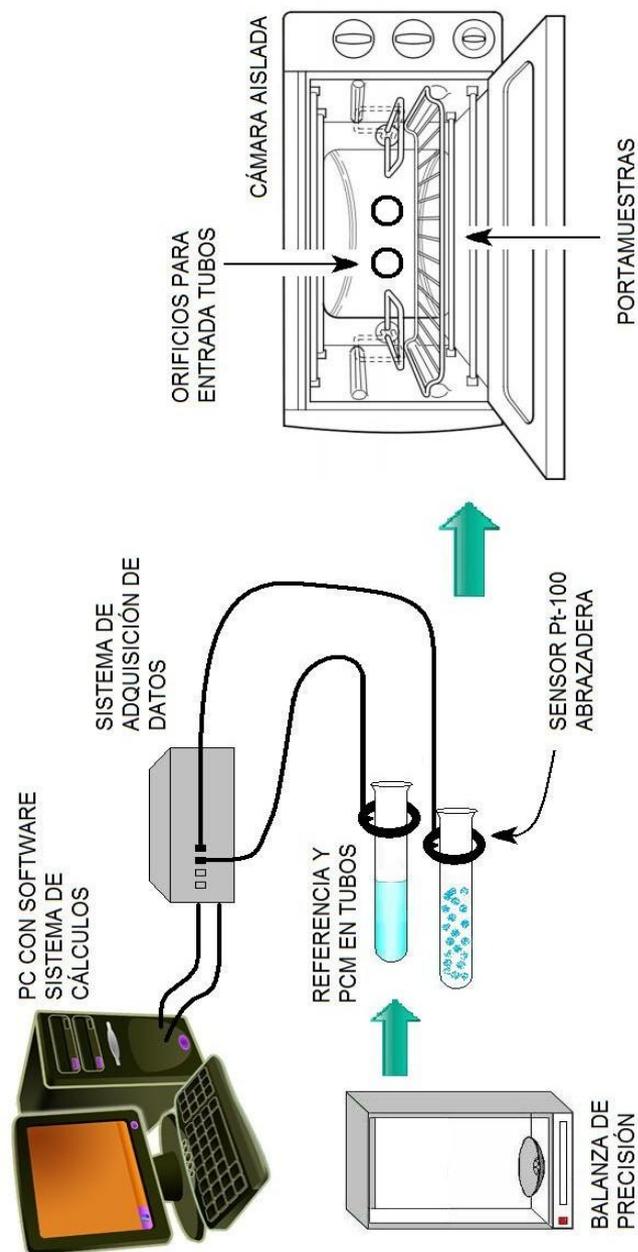


Figura 9.1. Esquema del montaje final de la instalación [IM7,8,9].

4.2. Montaje

Se ha tenido en cuenta el espacio disponible en el laboratorio. La instalación, en especial la cámara por ser de mayor dimensión, ha sido colocada de manera que no dificulte el acceso y funcionamiento de las otras instalaciones disponibles en el laboratorio y se pueda proceder a la apertura de la puerta sin inconvenientes.

Para su ubicación, también se ha tenido en cuenta que no se dificulte el paso del personal del laboratorio, ni suponga un impedimento para la evacuación de dicha sala.

Las conexiones se realizan atendiendo a la figura 9.1.

Capítulo 5:

Conclusiones

5.1. Conclusiones del trabajo

Los materiales de cambio de fase se presentan como una forma de almacenamiento de la energía presente y futuro para el aprovechamiento y rendimiento al máximo nivel de nuestras energías renovables. Por ello, resulta de gran interés el desarrollo y la evolución de los materiales de cambio de fase.

Como ya se ha citado en otras ocasiones, el método T-history presenta ventajas como la posibilidad de análisis de materiales tanto orgánicos como inorgánicos, obtención directa de las curvas entalpía frente a temperatura, coste económico menor al de otras instalaciones, facilidad de manejo, versatilidad de la instalación, pudiendo ampliarse o modificarse aprovechando los componentes que tenemos ya disponibles.

El diseño de esta instalación para caracterización de materiales de cambio de fase nos va a permitir trabajar con temperaturas de trabajo máximas de 300°C, lo cual nos da una evolución notable respecto a los anteriores ensayos con el método T-history.

En los próximos meses se procederá a realizar los primeros ensayos y al análisis de distintas sustancias que pueden ser utilizadas como materiales de cambio de fase para su continuar con su desarrollo e investigación.

5.2. Continuación y trabajo futuro

Han sido ya realizadas pruebas de funcionamiento de la cámara y las sondas a altas temperaturas. Los siguientes pasos a realizar a partir de este proyecto es la verificación, y una vez esta resulte satisfactoria, realizar los primeros ensayos con distintas sustancias para su utilización como materiales de cambio de fase.

Mediante el programa de cálculos, se obtendrán las curvas entalpía-temperatura y se estudiarán los resultados, siendo estos recogidos en tablas comparativas, tanto para ensayos de calentamiento como para ensayos de enfriamiento, además de la histéresis, es decir, comparando y estudiando la

diferencia entre los procesos de fusión y solidificación (calentamiento y enfriamiento).

También serán estudiados los valores de la capacidad calorífica frente a la temperatura, para ensayos de calentamiento, enfriamiento y se estudiará la histéresis.

Cada ensayo ha de ser registrado en una hoja de experimento, donde quede constancia del mismo con todos los detalles del ensayo.

A partir de aquí, continúa abierta una línea de trabajo destinada a buscar nuevas mejoras y avances en el campo del almacenamiento térmico de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ZALBA B., *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 2002.
- [2] LÁZARO A., *Caracterización del comportamiento de materiales de cambio de fase para almacenamiento térmico de energía*. Proyecto Fin de Carrera. Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, 2004.
- [3] OLIVER A., NELIA F.J., GARCÍA-SANTOS A., *Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica*, 2011.
- [4] ALMUDENA M., *Análisis térmico de la aplicación de materiales de cambio de fase en climatización*. Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento Ingeniería Térmica y de Fluidos.
- [5] FELIPE A., *Almacenamiento de energía solar térmica usando cloruro de magnesio hexahidratado*. Tesis de Maestría. Área de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia (Medellín), 2007.
- [6] YINPING Z., YI J., *A simple method, the T-History method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials*. Meas Sci. Technol, 1999.
- [7] BENDKOWSKA W, TYSIAK J, GRABOWSKI L, *Int J.Clothing Science and Technology*, 2005.
- [8] ÁLVAREZ F., doc. *Sábanas de la NASA para la prevención de resfriados ante cambios bruscos de temperatura*. Enero 2012.
- [9] PROJET COFINANCE PAR L'UNION EUROPEENNE, INTERREG III C, MATEO. *Un estado del arte de los textiles inteligentes. (III) Textiles inteligentes*.
- [10] DOMÍNGUEZ M., GARCÍA C. *Transmisión de calor y de masa en régimen variable en los muros*. XXXI Biental de la R.S.E.F. Granada, 2007.
- [11] FAUSTINI C. *Análisis del aprovechamiento energético de los acumuladores de cambio de fase en algunas propuestas constructivas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Arquitectura, 2007.

[12] DOMÍNGUEZ M., GARCÍA C., VITI A. *Los microencapsulados en las instalaciones de climatización. El Instalador*, 2008.

[13] DOMÍNGUEZ M., *Algunas posibilidades de los materiales de cambio de fase en las energías renovables. Artículos del Instituto del Frío, CSIC*, 2009.

[14] Informe: *Proyectos de investigación industrial y de desarrollo, estudios de viabilidad técnica y actuaciones favorecedoras de la participación en programas de cooperación internacional en materia de I+D+I*, 2007.

[15] P. INCROPERA F., P. DEWITT D., *Fundamentos de transferencia de calor*, 4ª Ed.1999.

[16] SERRANO R., MARÍN J.M., ZALBA B., *Método T-History, II Jornadas de Ingeniería Termodinámica*, 2001.

[IM] Google® Imágenes:

1. How Outlast® Adaptive Comfort® works.
2. Muro trombe.
3. Esquema calorímetro convencional.
4. Calorimetría diferencial de barrido (modificado).
5. DSC.
6. Clasificación temo-resistencias pt-100.
7. Ordenador.
8. Esquema balanza precisión.
9. Dibujo horno.

REFERENCIAS DE LOS COMPONENTES

- (a) <http://www.resistenciaselectricas.es>
- (b) <http://www.crntecnopart.com>
- (c) <http://www.resistencias-electricas.com>
- (d) <http://www.rockwool.es>
- (e) <http://www.weisz.com>
- (f) http://www.julabo.de/es/p_10.asp?productgroup=03
- (g) http://www.huber-online.com/es/product_listing.aspx?group=3.06
- (h) http://www.julabo.de/es/p_14.htm#waerme
- (i) <http://www.loikitsdistribution.com>
- (j) <http://www.dic.pe/aislamientotermico.htm7>
- (k) <http://www.tcdirect.es/deptprod.asp?deptid=230/40>

NOMENCLATURA

| | |
|------------------|---|
| H | Entalpía del sistema (kJ) |
| h | Entalpía (kJ/kg) |
| Δh | Variación de entalpía (kJ/kg) |
| h_{ref} | Entalpía de referencia (kJ/kg) |
| h_{cf} | Entalpía de cambio de fase (kJ/kg) |
| U | Energía interna del sistema (kJ) |
| u | Energía interna (kJ/kg) |
| Δu | Variación de la energía interna (kJ/kg) |
| n | Número de moles de una sustancia |
| c_p | Calor específico a presión constante (kJ/kg·K) |
| c_v | Calor específico a volumen constante (kJ/kg·K) |
| T | Temperatura (K) |
| T_{cf} | Temperatura de cambio de fase (K) |
| T_{ref} | Temperatura de referencia (K) |
| T_{m1}, T_{m2} | Intervalo de temperaturas en los que se produce el cambio de fase (K) |
| t_1 | Temperatura inicial (K) |
| t_2 | Temperatura final (K) |
| t | Tiempo (s) |
| t_1, t_2 | Intervalo de tiempo en el que transcurre el cambio de fase (s) |
| h_f | Entalpía de cambio de fase (kJ/kg) |
| M, m | Masa (kg) |
| Q_s | Calor sensible (kJ) |

| | |
|------------------|--|
| Ql | Calor latente (kJ) |
| R | Radio del tubo (m) |
| k | Conductividad térmica del PCM (W/m·K) |
| h | Coeficiente de transferencia de calor por convección natural (W/m ² ·K) |
| m _p | Masa del PCM (kg) |
| m _t | Masa del tubo (kg) |
| c _{p,l} | Calor específico medio PCM líquido (kJ/kg·K) |
| c _{p,t} | Calor específico medio tubo (kJ/kg·K) |
| A _c | Área de transferencia de calor convectiva del tubo (m ²) |
| c _{p,s} | Calor específico medio PCM sólido (kJ/kg·K) |
| T _r | Temperatura de la sustancia de referencia (K) |
| m _w | Masa del agua (kg) |
| c _{p,w} | Calor específico medio del agua (kJ/kg·K) |

ABREVIATURAS

| | |
|-----|--|
| PCM | Phase Change Material (Material de cambio de fase) |
| TES | Thermal Energy Storage (Almacenamiento de energía térmica) |
| DTA | Análisis térmico diferencial |
| DSC | Calorimetría diferencial de barrido |
| Bi | Número de Biot |
| HTF | Fluido de transferencia de calor |

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Tabla que refleja las ventajas e inconvenientes del uso de PCM inorgánicos.

Tabla 1.2. Tabla que refleja las ventajas e inconvenientes del uso de PCM orgánicos.

Tabla 5.1. Ventajas e inconvenientes de las instalaciones propuestas.

Tabla 7.1. Resumen tipos de cámara.

Tabla 7.2. Selección de la cámara elegida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Cambios de fase entre los distintos estados.

Figura 1.2. Curva teórica del calor frente a la temperatura. Temperaturas del cambio de fase.

Figura 1.3. Clasificación de materiales para la acumulación de energía térmica mediante cambio de fase.

Figura 1.4. Relación Temperatura vs calor de fusión para sustancias utilizadas como PCM.

Figura 2.1. Funcionamiento de los tejidos con PCM.

Figura 2.2. PCM en fibras textiles.

Figura 2.3. Explicación de funcionamiento de los muros trombe.

Figura 3.1. Esquema básico calorímetro convencional.

Figura 3.2. Esquema de análisis térmico mediante DSC.

Figura 3.3. Ejemplo de termograma de DSC.

Figura 5.1. Prototipo (croquis) Instalación con recirculación con aire caliente.

Figura 5.2. Clasificación termoresistencias pt 100.

Figura 5.3. Descripción gráfica colocación portamuestras.

Figura 5.4. Prototipo (croquis) Instalación con intercambio de calor.

Figura 5.5. Prototipo (croquis) de la instalación con almacenador de PCM y fluido calotransportador.

Figura 5.6. Esquema del almacenador de energía.

Figura 7.1. Disposición gráfica del aislamiento de la cámara.

Figura 7.2. Comparativa Densidad frente a Temperatura.

Figura 7.3. Sensor de temperatura Pt-100 con abrazadera.

Figura 9.1. Esquema del montaje final de la instalación.

Anexos

Anexo 1.1. Calibración sistema de adquisición de datos.

Anexo 1.2. Balanza de precisión disponible.

Anexo 1.3. Características sondas temperatura.

Anexo 1.4. Acreditación calibración sondas.

Anexo 1.5. Aislante probetas.

Anexo 1.6. Oferta de cámara.

Anexo 1.1.

| | | |
|---|---|--|
|  Agilent Technologies | Agilent Technologies (M) Sdn. Bhd. (012767-W) Bayan Lepas Free Industrial Zone 11900 Penang Malaysia |  5962-0476 |
|---|---|--|

Certificate Of Calibration

Certificate No: 34970AMY41018117

Manufacturer: Agilent Technologies
Model No: 34970A
Options Installed With Specifications: N/A

Description: Data Acquisition/Switch Unit
Serial No: MY41018117

Date of Calibration: 08-MAY-2003
Temperature: (23 +/-5)C
Procedure: VM_34970AF/189128294831

Humidity: 0 to 50% RH

This certifies that the above product was calibrated in compliance with a quality system registered to ISO 9002:1994, using applicable Agilent Technologies' procedures.

As Received: Factory tested. No incoming data available.

As Shipped Conditions: At the completion of the calibration, measured values were IN-SPECIFICATION at the points tested.

These calibration procedures and test points are those recommended in a procedure developed by Agilent.

Remarks or special requirements:

Traceability Information: Traceability is to national standards administered by the U.S. NIST, NRC Canada, Euromet members (NPL, PTB, BNM, etc.) or other recognized standards laboratories. Some measurements are traceable to natural physical constants, consensus standards or ratio type measurements. Supporting documentation relative to traceability is available for review by appointment. This report shall not be reproduced, except in full, without prior written approval of the calibration facility.

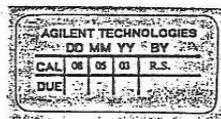
Calibration Equipment Used:

| Model Number | Model Description | Trace Number | Cal Due Date |
|--------------|-------------------|--------------|--------------|
| 3458A | Multimeter | 0930620 | 15-NOV-2003 |
| Fluke 5720A | Calibrator | 7930204 | 04-JAN-2004 |
| Fluke 5725A | Amplifier | 0950257 | 04-JAN-2004 |

Print Date: 08-MAY-2003



Boon Juan TAN
Quality Manager



Anexo 1.2.



Balanza analítica METTLER TOLEDO mod. AB105-S Du

Capacidad 31g / 120 g

Precisión 0,01 mg / 0,1 mg

Repetibilidad (s) 0,03 mg / 0,1 mg

Linealidad $\pm 0,2$ mg

Celula de medida especial con protección (Cell protector)

Carcasa metálica

Dispositivo para pesar por debajo

Unidad de pesada seleccionable

Conteo de piezas, Pesada en porcentaje

Pesadas dinámicas

Diámetro de platillo 80 mm

Espacio libre sobre el platillo 237 mm

Tara automática

Cero automático

Autocalibración con pesa de ajuste interna

Salida de datos RS232C

Declaración de Conformidad CE

Anexo 1.3.

SONDA DE TEMPERATURA PT-100

AJUSTABLE SENSOR RTD - PT100

Para la medición de temperatura del tubo hasta 350°C. Este sensor incorpora un sensor Pt-100 unido a un anillo ajustable.

Están disponibles en un número de tamaños para adaptarse a su diámetro de tubería.



Para un mejor rendimiento se recomienda que se queden después de conectar el sensor a la tubería.

- Configuración de 3 hilos
- Elemento Pt100 cumple con la norma BS EN 60751:1996 Clase B
- Versiones para tubos de 32mm-50mm, 50-150mm o 300mm-150 ofrece
- Rango de funcionamiento: -50 ° C a 350 ° C
- Leads: 2 metros de fibra de vidrio aislado con un acero inoxidable overbraid

Los siguientes modelos están disponibles:

Pt100 Abrazadera

Pt100 Abrazadera

| Código | Descripción | Precio:1-9 | Precio:10-24 | Precio:25-49 |
|---------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 515-270 | Pt100 abrazadera, 32-50mm | € 36,10 | € 32,60 | € 28,70 |
| 515-273 | Pt100 abrazadera, 50-150mm | € 37,80 | € 34,30 | € 30,20 |
| 515-276 | Pt100 abrazadera, 150-300mm | € 41,20 | € 37,70 | € 33,20 |

Anexo 1.4.

Schedule of Accreditation
 issued by
United Kingdom Accreditation Service
 21 - 47 High Street, Feltham, Middlesex, TW13 4UN, UK

| | | |
|--|--|--|
|  <p align="center">UKAS CALIBRATION 0564</p> <p align="center">Accredited to ISO/IEC 17025:2005</p> | TC Ltd Issue No: 018 Issue date: 30 June 2010 | |
| | Brimington Road North Whittington Moor Chesterfield Derbyshire S41 9BE | Contact: Mr L R Walker Tel: +44 (0)1246 454672 Fax: +44 (0)1895 273540 E-Mail: laboratory@tc.co.uk Website: www.tc.co.uk |

Calibration performed at the above address only

DETAIL OF ACCREDITATION

| Measured Quantity Instrument or Gauge | Range | Best Measurement Capability Expressed as an Expanded Uncertainty (k=2) | Remarks |
|--|---------------------------------|---|--|
| TEMPERATURE | | | |
| Resistance thermometers | Triple point of water (0.01 °C) | 0.05 °C | 2 wire, 3 wire and 4 wire resistance thermometers |
| | - 30 °C to 20 °C | 0.20 °C | |
| | 20 °C to 90 °C | 0.20 °C | |
| | 90 °C to 200 °C | 0.20 °C | |
| | 200 °C to 400 °C | 0.60 °C | |
| Thermocouples - noble metal | 20 °C to 200 °C | 1.0 °C | Extension and Compensating Cables |
| | 200 °C to 400 °C | 1.0 °C | |
| | 400 °C to 620 °C | 1.0 °C | |
| | 620 °C to 1100 °C | 1.0 °C | |
| | 1100 °C to 1330 °C | 1.0 °C | |
| Thermocouples - base-metal | - 30 °C to 200 °C | 0.30 °C | |
| | 200 °C to 400 °C | 0.60 °C | |
| | 400 °C to 620 °C | 0.60 °C | |
| | 620 °C to 1100 °C | 0.80 °C | |
| Temperature indicators and transmitters with probes | Ranges as for probe type | As for probe type+ resolution of indicator | Including instruments with electrical outputs |
| END | | | |

Anexo 1.5.



REFRACTARIOS Y ANTIÁCIDOS GARCÉS, S.L.

Avda. de Fuenlabrada, 97 - 1º B Tels: +34-91 694 99 97 / 91 693 15 39
28912 LEGANES (Madrid) Fax: +34-91 693 16 45

RAG-FC 1250

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| TIPO DE PRODUCTO: | MANTA |
| MATERIA PRIMA BASE: | Fibra cerámica refractaria |
| TEMPERATURA DE CLASIFICACIÓN: | 1.260 °C |
| COLOR: | Blanco / azulado |
| DENSIDAD: | 64-70 kg/m ³ |
| ALMACENAMIENTO: | Bajo cubierto, en lugar fresco y seco |

PROPIEDADES

Análisis Químico (% p/p, base calcinada)

Valores medios

| | |
|--------------------------------------|-------|
| Al ₂ O ₃ | 45-50 |
| SiO ₂ | 50-55 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,2 |
| CaO + MgO | 0,2 |
| Na ₂ O + K ₂ O | 0,3 |

Propiedades Físicas

| | | |
|-----------------------------------|--|------|
| CALOR ESPECÍFICO (kJ/kg K) | a 1000 °C | 1,1 |
| CONTRACCIÓN LINEAL PERMANENTE (%) | (después de 24 h. de calentamiento isotérmico a 1000 °C) | < 2 |
| RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (kPa) | | 30 |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m K) | Temperatura media | |
| | 200 °C | 0,07 |
| | 400 °C | 0,12 |
| | 600 °C | 0,19 |
| | 800 °C | 0,28 |

OBSERVACIONES

USOS: aislamiento térmico, estanqueidad, calorifugado, pantallas térmicas, protección de soldadura, etc.

NOTA: Estos datos son valores promedio de los controles de producción, por consiguiente no constituyen especificación.



Anexo 1.6.



Nº Ref. E/13977

Rev: 001

Fecha: 01/06/2012

OFERTA ECONÓMICA

CPS Zalba cámara termica



Realizada por:

D. Carlos Nuzzo Nacenta
Instrumentación y Componentes, S.A. (Inycom)
Unidad de Negocio de Electrónica

Plataforma Logística (Pla-za)
C/ Alaún, 8. 50197- Zaragoza
CIF. A50086412
☎ +34 976 013300
Fax.: +34 976 010977
E-mail: carlos.nuzzo@inycom.es

Nº Cod.: Documento2

Realizada para:

Universidad de Zaragoza
Area de Máquinas y motores térmicos

Att. Belen Zalba

☎
☎
Fax.:
E-mail: bzalba@unizar.es

S/ref.



OFERTA ECONÓMICA

| Referencia | Cant. | Descripción | TOTAL |
|------------|-------|--|----------------|
| M115 | 1 | Cámara térmica para ensayos de precisión Binder M115 | 6.095 € |
| | | APT.Line Serie M. Cámara para ensayos de precisión | 5.950 € |
| 8012-0001 | 1 | Pies de goma (4 unidades) para posicionamiento estable. | 47 € |
| 8012-0057 | 1 | Puerta con ventana (320x260mm) e iluminación interior, 15W | 699 € |
| 8012-038x | 1 | Puerto de acceso con tapón de silicona 10mm de diámetro. Posibilidad de realizarlo en la parte superior, derecha, izquierda o trasera. | 262 € |
| 8012-053x | 1 | Puerto de acceso con tapón de silicona 30mm de diámetro. Posibilidad de realizarlo en la parte superior, derecha, izquierda o trasera. | 342 € |
| 8012-054x | 1 | Puerto de acceso con tapón de silicona 50mm de diámetro. Posibilidad de realizarlo en la parte superior, derecha, izquierda o trasera. | 398 € |
| 8012-072x | 1 | Puerto de acceso con tapón de silicona 100mm de diámetro. Posibilidad de realizarlo en la <u>parte derecha o izquierda</u> . | 660 € |
| 8012-0156 | 1 | Protocolo de medición según DIN 12880-2 (27 puntos) con certificado. | 1.460 € |



Instrumentación y componentes

CONDICIONES PARTICULARES DE LA OFERTA

| | |
|--|--|
| IMPUESTOS | • I.V.A. 18%: No Incluido |
| PLAZO DE ENTREGA | El suministro se ejecutará desde la recepción formal en Inycom de la orden de compra. Plazo de Entrega: 4-6 semanas |
| CONDICIONES DE PAGO: | • Habitual |
| FORMA DE PAGO | • PAGARÉ ó TRANSFERENCIA |
| EMBALAJE Y TRANSPORTE | • Embalaje estándar de fabricante. Portes: Pagados |
| PRESTACIÓN DE SERVICIOS Y DESPLAZAMIENTOS | • Instalación No incluida. |
| TÉRMINOS DE GARANTÍA | • Garantía de los productos ofertados según fabricante. Garantía: La del fabricante |
| VALIDEZ DE LA OFERTA | • Validez de la Oferta: 30 días |

Fecha de creación: 01/06/2012 9:18:00

OBSERVACIONES

- Será necesario que el cliente asuma y valide los REQUISITOS TÉCNICOS PARA EL SUMINISTRO detallados en el apartado PROPUESTA DE SOLUCIÓN TÉCNICA para que el mismo sea ejecutado con garantías de calidad.
- Oferta sujeta a las Condiciones Generales de Venta de Inycom, puede consultarlas en www.inycom.es o solicitarlas a su agente comercial.