

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BATERÍA TÉRMICA SOLAR A BASE DE MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Autor

**CARLOS ARTURO GONZALEZ VESGA**

Director

**CLAUDIA PATRICIA PARRA MEDINA**  
MS.c en Ingeniería Mecánica

Co-Director

**ARIEL REY BECERRA BECERRA**  
Ph.D En Física

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**Universidad de Pamplona**

Pamplona, 16 de mayo de 2016



# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BATERÍA TÉRMICA SOLAR A BASE DE MATERIAL DE CAMBIO DE FASE**

**CARLOS ARTURO GONZÁLEZ VESGA**

**cgonzalez22-ing@outlook.com**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
**Ingeniero Mecánico**

**Director**

**CLAUDIA PATRICIA PARRA MEDINA**

**MS.c en Ingeniería Mecánica**

**claudypame@gmail.com**

**Co-Director**

**ARIEL REY BECERRA BECERRA**

**Ph.D En Física**

**arik@fisica.ru**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**Pamplona, 16 de mayo de 2016**



# Dedicatoria

Gracias a mi señor Dios que me enseñó que nada en esta vida es casualidad y que su plan para mi vida es perfecto.

Dedico este trabajo a mi madre Raquel Vesga Rodríguez, a mi padre Reynaldo González Márquez, a mi hermana Sandra González Vesga, a mi sobrina María A. Fallad González y a mi abuela María A. Rodríguez.

GRACIAS POR CREER EN MÍ...



# Agradecimientos

Agradezco de todo corazón por la ayuda y la paciencia prestada por mi directora Claudia Patricia Parra Medina, y a mi codirector Ariel Rey Becerra Becerra.

A mis amigos Camilo Brito Molina y Andrés Pinto Castro y demás compañeros que siempre estuvieron apoyándome.

A la empresa Heliotérmica S.A.S por su apoyo en el préstamo de los materiales usados en esta tesis.



# Contenido

Agradecimientos	VII
Introducción	2
<b>1. EL PROBLEMA</b>	<b>4</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA . . . . .	4
1.2. OBJETIVOS . . . . .	4
1.2.1. Generales . . . . .	4
1.2.2. Específicos . . . . .	4
1.3. JUSTIFICACIÓN . . . . .	5
1.4. ALCANCE . . . . .	5
1.5. LIMITACIONES . . . . .	6
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1. LA ENERGIA SOLAR TÉRMICA EN EL MUNDO . . . . .	7
2.1.1. El Sol, fuente de energía . . . . .	8
2.2. MATERIALES DE CAMBIO DE FASE . . . . .	8
2.2.1. Clasificación y propiedades de los MCF . . . . .	11
2.3. PARAFINA Y BREA COMO MCF . . . . .	15
2.3.1. Parafina . . . . .	16
2.3.2. Brea asfáltica . . . . .	17
2.4. APLICACIONES DE LOS MCF . . . . .	18
2.4.1. los materiales de cambio de fase en temperaturas por encima de los 10 °C en la climatización doméstica . . . . .	18
2.4.2. Aplicaciones de los materiales de cambio de fase en la cocción de alimentos . . . . .	19
2.5. Caracterización de los materiales de cambio de fase . . . . .	20
2.6. ENCAPSULADO . . . . .	20
2.6.1. Macro encapsulado de PCM . . . . .	21
2.6.2. Micro encapsulación de MCF . . . . .	21
2.7. CALENTADORES . . . . .	22

2.8. TUBOS EVACUADOS . . . . .	24
2.9. CALOR ESPECÍFICO . . . . .	27
2.9.1. Cálculo del calor específico . . . . .	27
2.10. ANTECEDENTES . . . . .	28
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL . . . . .</b>	<b>30</b>
3.1. SELECCIÓN DEL TUBO EVACUADO . . . . .	30
3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN . . . . .	32
3.2.1. Diseño CAD . . . . .	32
3.2.2. Construcción . . . . .	35
3.3. PRUEBAS EXPERIMENTALES . . . . .	39
3.3.1. Pruebas experimentales del tubo evacuado con cápsula sin MCF . . . . .	40
3.3.2. Pruebas experimentales del tubo evacuado con cápsula llena de MCF . . . . .	40
3.4. CÁLCULO TERMODINÁMICO . . . . .	43
3.4.1. Parafina . . . . .	44
3.4.2. Brea . . . . .	46
3.4.3. Agua . . . . .	48
3.5. RELACIONES DE VOLÚMENES . . . . .	51
3.6. CALOR REMANENTE DE LAS CÁPSULAS . . . . .	53
3.6.1. Calor remanente en la parafina. . . . .	53
3.6.2. Calor remanente de la brea. . . . .	53
3.6.3. Calor remanente del agua. . . . .	54
3.7. MODELO MATEMÁTICO . . . . .	55
<b>4. ANÁLISIS Y RESULTADOS . . . . .</b>	<b>57</b>
4.1. ANÁLISIS DE DATOS . . . . .	57
4.1.1. Caracterización de los materiales mediante DSC. . . . .	57
4.1.2. Cálculo experimental del calor específico de los MCF. . . . .	62
4.2. RESULTADOS . . . . .	63
4.2.1. Material de cambio de fase seleccionado para la construcción del prototipo de batería térmica solar . . . . .	63
4.2.2. Volumen de los MCF (parafina y brea) comparados con el volumen de agua para almacenar la misma energía . . . . .	64
4.2.3. Calor específico de los MCF usados en el desarrollo del proyecto mediante DSC y de manera experimental . . . . .	64
4.2.4. Diseño final del prototipo con MCF . . . . .	64
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>66</b>
5.1. CONCLUSIONES . . . . .	66
5.2. RECOMENDACIONES . . . . .	67

<b>A. Planos</b>	<b>68</b>
<b>B. Datos Experimentales</b>	<b>76</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>89</b>

# Lista de Figuras

<b>2-1.</b> Clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico. . . . .	12
<b>2-2.</b> Clasificación de los diversos tipos de Materiales de fase en función de sus temperaturas y sus entalpías de fusión, [5] . . . . .	13
<b>2-3.</b> Tipos de Calentadores solares térmicos. a. Calentador no presurizado b. Calentador plano. c. Calentador presurizado con tubos de calor.[19] . . . . .	23
<b>2-4.</b> Tipos de Calentadores solares térmicos. a. Calentador no presurizado b. Calentador plano. c. Calentador presurizado con tubos de calor.[19] . . . . .	25
<b>3-1.</b> Tubo evacuado 45/500 (izq) y 58/1800 (der) . . . . .	31
<b>3-2.</b> Prototipo (BST) CAD . . . . .	33
<b>3-3.</b> Prototipo (BST) CAD con corte lateral . . . . .	34
<b>3-4.</b> Prototipo (BST) CAD planos . . . . .	34
<b>3-5.</b> Prototipo (BST) CAD con corte lateral . . . . .	35
<b>3-6.</b> Construcción de la cápsula madre . . . . .	36
<b>3-7.</b> Introducción del tubo de cobre a la cápsula madre . . . . .	36
<b>3-8.</b> Procedimiento para derretir la parafina y caracterización de la misma . . . . .	37
<b>3-9.</b> Procedimiento para derretir la brea y caracterización de la misma . . . . .	38
<b>3-10.</b> Introducción de la brea en la cápsula madre . . . . .	38
<b>3-11.</b> Equipo de medición de la radiación solar y sensor usado en campo para la medición de esta. a. Equipo GUNT ET 202 b. Sensor de radiación . . . . .	39
<b>3-12.</b> Caracterización de los MCF . . . . .	42
<b>3-13.</b> Esquema del montaje para el cálculo del calor almacenado en cada una de las cápsulas. . . . .	44
<b>4-1.</b> Análisis por (DSC) de la Parafina Calor vs Temperatura. . . . .	59
<b>4-2.</b> Análisis por (DSC) de la Parafina Temperatura vs Flujo de calor. . . . .	59
<b>4-3.</b> Análisis por (DSC) de la Parafina Peso vs Temperatura. . . . .	60
<b>4-4.</b> Análisis por (DSC) de la Brea Calor vs Temperatura. . . . .	60
<b>4-5.</b> Análisis por (DSC) del flujo de calor vs temperatura . . . . .	61
<b>4-6.</b> Análisis por (DSC) de la Brea Peso vs Temperatura . . . . .	61
<b>A-1.</b> Conjunto prototipo batería solar térmica CAD. . . . .	68

---

<b>A-2.</b> Conjunto con corte lateral del prototipo de batería solar térmica. . . . .	69
<b>A-3.</b> Plano tubo evacuado. . . . .	69
<b>A-4.</b> Diseño CAD tubo evacuado. . . . .	70
<b>A-5.</b> Plano cápsula madre. . . . .	70
<b>A-6.</b> Diseño CAD cápsula madre. . . . .	71
<b>A-7.</b> Diseño CAD con corte lateral de la cápsula madre. . . . .	71
<b>A-8.</b> Diseño CAD, acercamiento del corte lateral de la cápsula madre. . . . .	72
<b>A-9.</b> Plano tapa con rosca de la cápsula madre. . . . .	72
<b>A-10</b> Diseño CAD tapa con rosca de la cápsula madre. . . . .	73
<b>A-11</b> Plano tubo disipador de calor. . . . .	73
<b>A-12</b> Diseño CAD tubo disipador de calor. . . . .	74
<b>A-13.</b> Plano tapa para el tubo evacuado. . . . .	74
<b>A-14</b> Diseño CAD tapa para el tubo disipador. . . . .	75
<b>A-15</b> Diseño CAD vista posterior de la tapa para él tuvo evacuado. . . . .	75

# Lista de Tablas

<b>2-1.</b> Nivel alcanzado en Europa por la energía solar térmica. [15] . . . . .	8
<b>2-2.</b> Comparativa entre el almacenamiento de calor sensible y el almacenamiento de calor latente, [10] . . . . .	15
<b>2-3.</b> Propiedades termo-físicas de la parafina, [10] . . . . .	17
<b>2-4.</b> Especificaciones técnicas de los tubos evacuados. . . . .	26
<b>3-1.</b> Características dimensionales de los tubos. . . . .	30
<b>3-2.</b> Radiación y temperatura del tubo 58/1800 evacuado, ver Anexo A para datos completos. . . . .	31
<b>3-3.</b> Radiación y temperatura del tubo 45/500 evacuado, ver Anexo A para datos completos. . . . .	32
<b>3-4.</b> Relación de temperaturas del tubo evacuado más la cápsula madre sin MCF.	40
<b>3-5.</b> Datos seleccionados del prototipo con MCF (PARAFINA) . . . . .	41
<b>3-6.</b> Datos seleccionados del prototipo con MCF (BREA) . . . . .	42
<b>3-7.</b> Relación de las temperaturas con respecto al tiempo para el experimento de transferencia de calor desde la cápsula de parafina hacia el volumen de agua	45
<b>3-8.</b> Relación de las temperaturas con respecto al tiempo para el experimento de transferencia de calor desde la cápsula de brea hacia el volumen de agua. . .	47
<b>3-9.</b> Relación de las temperaturas con respecto al tiempo para el experimento de transferencia de calor desde la cápsula de agua hacia el volumen de agua . .	49
<b>4-1.</b> Calores específicos de los MCF. . . . .	64
<b>B-1.</b> Caracterización y comparación parafina, brea y agua. . . . .	81
<b>B-2.</b> Caracterización prototipo con material de cambio de fase (parafina-brea). . .	82
<b>B-3.</b> Caracterización prototipo con MCF(parafina-brea). . . . .	85
<b>B-4.</b> Caracterización prototipo sin MCF. . . . .	86
<b>B-5.</b> Caracterización tubo evacuado. . . . .	88

# Introducción

La energía solar térmica o energía termo solar consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor. La energía suministrada por el Sol se puede almacenar para posteriormente ser utilizada en diferentes aplicaciones, tales como la cocción de alimentos, calentadores de agua, calefacciones o producción de energía mecánica y a partir de ella energía eléctrica. Una de las grandes dificultades que ha tenido la tecnología solar es no tanto su captación, si no su almacenamiento, precisamente este ha sido durante la historia de la energía solar el mayor obstáculo en su implementación a gran escala, ya que, en la mayoría de los casos, sobre todo en el ámbito familiar, la energía se utiliza cuando el Sol está ausente, por lo que se requiere su almacenamiento [18]. Es claro, que los intentos de generar procesos y métodos de almacenamiento han sido numerosos, sin embargo, no ha habido hasta el momento un sistema satisfactorio ni en el almacenamiento de energía solar eléctrica, ni en el almacenamiento de calor. Tanto en el primer caso como en el segundo, el principal problema ha sido el volumen de los cuerpos que almacenan la energía. La energía solar fotovoltaica se ha refugiado en la mayoría de los casos en las baterías, mientras que la energía térmica en el almacenamiento de agua caliente en tanques, siendo estos los métodos más prácticos y accesibles, sin despreciar otros menos comunes.

Con el desarrollo de este proyecto se realizó un análisis teórico y termodinámico, mediante el diseño, elaboración y caracterización de un prototipo de batería térmica solar que utiliza las propiedades de los materiales de cambio de fase, específicamente la propiedad de que cuando un material cambia de fase necesita mucha más energía que cuando eleva su temperatura sin cambiar de fase. Esto permite almacenar energía como calor latente sin que el material (dependiendo de las condiciones) aumente su volumen.

Para el diseño y construcción de este prototipo primero se realizaron los estudios bibliográficos relacionados con el tema, particularmente se estudió la primera ley de la termodinámica que relaciona el calor transferido de un cuerpo hacia otro con el cambio de temperatura, la masa y el calor específico. Así mismo, se analizó el calor latente de los materiales MCF y su proceso de almacenamiento. Luego se analizaron los diferentes materiales y su caracterización a fin de seleccionar el material óptimo a usar en el desarrollo de este proyecto teniendo en cuenta la disponibilidad de los mismos en la región y que fueran amigables con el medio

---

ambiente y la salud humana. Posteriormente, se realizaron las pruebas experimentales con los materiales de cambio de fase usados: brea y parafina y con el material de referencia (agua) y se analizaron los resultados obtenidos, encontrándose que bajo las mismas condiciones experimentales el material que mayor calor almacenaba era la parafina.

# Capítulo 1

## EL PROBLEMA

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los grandes desafíos en el tema de energía es su almacenamiento. Esto incluye cualquier tipo de energía, desde una simple batería para encender una linterna, hasta la energía necesaria para mover un vehículo y la energía para alumbrar toda una ciudad. Aunque existen fuentes continuas de energía como las centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, term nucleares y otras que abastecen gran parte de nuestro consumo, también es cierto que se mantiene latente la necesidad de almacenar cierta cantidad de energía para suplir las necesidades cuando las fuentes continuas no están al alcance. Este caso se extiende asimismo a la energía térmica, y en este caso el almacenamiento de agua caliente en tanques es el más común. Sin embargo el almacenamiento en agua está limitado a la temperatura máxima del agua que es 100 grados centígrados. A veces para fines domésticos se requiere almacenar energía térmica a mayores temperaturas. En el presente trabajo se plantea la construcción de un prototipo de batería térmica que puede ser una solución alternativa de almacenamiento de calor en menor volumen.

### 1.2. OBJETIVOS

#### 1.2.1. Generales

Diseño y construcción de un prototipo de batería térmica solar a base de material de cambio de fase.

#### 1.2.2. Específicos

- Revisar la bibliografía científica relacionada con los materiales de cambio de fase a temperatura baja o media.
- Definir el modelo matemático de funcionamiento de la batería solar térmica.

- Diseñar y construir el prototipo de batería solar a escala laboratorio para uso doméstico.
- Realizar la toma de datos experimental del prototipo de batería solar.
- Caracterizar el prototipo de batería solar.
- Socializar los resultados y conclusiones obtenidas en el desarrollo del trabajo

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

La investigación en el tema de almacenamiento de la energía, sobre todo aquella proveniente del Sol, es un tema vigente y necesario para el desarrollo de nuevas metodologías y procesos más eficientes que conduzcan a almacenar la energía en volúmenes cada vez más pequeños. Debido a que en la actualidad el almacenamiento energético para el caso de energía solar térmica se da en grandes volúmenes de agua, teniendo el agua un calor específico relativamente alto, es pertinente el estudio y análisis de nuevos métodos de almacenamiento que disminuyan su volumen con la misma cantidad de calor almacenada. El uso de materiales que cambien su fase de sólido a líquido en el proceso de almacenamiento de energía puede presentarse como la alternativa más cercana debido a la mayor capacidad de acumulación de energía por unidad de volumen de estos materiales con respecto a los materiales que no cambian su fase en el proceso de almacenamiento, como es el caso del agua.

En el presente proyecto se diseñó y construyó un prototipo de almacenamiento térmico a base de material de cambio de fase (MCF), que lo llamaremos batería térmica. El prototipo, además de contar con las ventajas ya mencionadas buscó realizar un estudio y análisis sobre el almacenamiento de energía térmica y su aplicación en energías renovables teniendo presente las propiedades de los materiales de cambio de fase.

### 1.4. ALCANCE

Este proyecto busca estudiar los MCF como materiales de almacenamiento energético, determinar sus ventajas en esta función y compararlos con el agua que es el material de referencia en el desarrollo de este estudio. Para esto se estudió la capacidad de almacenamiento de energía en dos materiales (parafina y brea) y la relación de volumen que estos requieren para almacenar energía con respecto al agua. Para de esta manera reemplazar el agua con el material seleccionado y a su vez utilizar menos volumen y acumular la misma energía.

## **1.5. LIMITACIONES**

Las limitaciones que se vieron presentes en el desarrollo de este proyecto más que una limitación fue la falta de recurso tecnológicos que facilitaran la realización de las pruebas y la toma de datos. Así mismo, hubo una limitante de tiempo para cumplir con el cronograma.

# Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. LA ENERGIA SOLAR TÉRMICA EN EL MUNDO

La contribución de la energía solar térmica al consumo energético mundial es muy escasa todavía debido a varios factores como costos, falta de tecnología menos voluminosa, etc, aunque se perciben síntomas de cambios que permiten encarar el futuro con un cierto optimismo, pues han surgido factores favorables como extensión del mercado disminuyendo los costos (aunque todavía no lo suficiente), incentivos por parte de los gobiernos [11].

En la actualidad la capacidad o potencia de la energía solar instalada en el mundo, supera a las de otras renovables con altos índices de desarrollos, como es el caso de la energía eólica, con una potencia instalada de 120 GW térmicos a finales del año 2006.

La energía solar térmica ha alcanzado unos niveles de popularidad impensables en tan solo unos años, actualmente la mayoría de captadores solares instalados en el mundo se utilizan en viviendas unifamiliares para la producción de agua caliente sanitaria, según [11].

En la Tabla **2-1** se presentan datos sobre los Niveles alcanzado en Europa por la energía solar térmica hasta el año 2012.

País	Superficie instalada ( $m^2$ )	Potencia instalada (MW)
Alemania	1920.000	1.344
España	466.000	326.2
Italia	421.000	294.7
Francia	374.252	262
Grecia	300.000	210
Polonia	129.632	90.7
Bélgica	91.000	63.7
Republica Checa	90.000	63
Portugal	86.620	60.6
Reino Unido	81.000	56.7

**Tabla 2-1:** Nivel alcanzado en Europa por la energía solar térmica. [15]

### 2.1.1. El Sol, fuente de energía

El Sol es una estrella que se encuentra a una distancia de unos 150 millones de km de la Tierra, de naturaleza gaseosa, tiene un diámetro aproximado 1400000 km y una masa de  $1,99 \times 10^{30}$  kg, y genera energía producida debido a las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su núcleo que se encuentra a una temperatura media de 15.000.000 °C. El Sol está constituido principalmente por hidrógeno (78 % de su masa) y helio (20 % de su masa). El sol es un inmenso reactor nuclear de fusión que transforma cada segundo 600.000.000 toneladas de hidrógeno en 596.000.000 toneladas de helio. Se pierden, por tanto 4.000.000 de materia cada segundo, que se transforman en energía, unos  $3,7 \times 10^{23}$  kW en unidades de energía [3].

## 2.2. MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Para fundir un sólido o vaporizar un líquido se requiere una energía mayor que la energía requerida para subir su temperatura. La cantidad de ésta que es absorbida o liberada durante el proceso de cambio de fase se llama calor latente. Específicamente, la cantidad de energía absorbida durante la fusión se llama calor latente de fusión y equivale a la cantidad de energía liberada durante la congelación [6].

Los materiales de cambio de fase MCF son materiales cuyo calor latente es utilizado para almacenar energía a la temperatura de cambio de fase (sólido  $\leftrightarrow$  líquido) y son capaces de almacenar o liberar grandes cantidades de energía (hasta 100 veces más que si emplea el calor sensible). El interés de este tipo de materiales radica en que, durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras que el material va absorbiendo o liberando

energía. La temperatura de cambio de fase es característica de cada material. Se trata de materiales inteligentes y pasivos, los cuales actúan de manera reversible en base a las condiciones térmicas del entorno.

Desde principios del siglo XIX se empezó a hablar y a usar los materiales de cambio de fase para la calefacción de trincheras. Estos materiales son sustancias que requieren energía para cambiar de fase, es decir para pasar de sólido a líquido o viceversa, ese calor cedido o absorbido para su cambio de fase se puede aprovechar en el momento adecuado. Durante mucho tiempo en grandes instalaciones se empleó como MCF el agua, pero en los últimos años ha caído en desuso por los problemas de sobre costo que supone, tanto por la inversión inicial como por tener que emplear fluidos secundarios y bajar mucho la temperatura de evaporación de la máquina.

Los sistemas de almacenamiento de calor son utilizados principalmente en la recuperación de energía y procesos de conservación, concretamente para sistemas solares térmicos. De los métodos de almacenamiento de calor existentes hoy en día, el almacenamiento de calor latente se consagra como uno de los sistemas más eficientes para almacenar energía térmica y, sin duda, el más atractivo debido a su alta densidad de almacenamiento y a la pequeña variación de temperaturas obtenida del almacenamiento a la recuperación [2].

La diferencia con el método tradicional de almacenaje de calor sensible es que el almacenamiento de calor latente proporciona, como decimos, una densidad de almacenaje mucho más alta, ante una diferencia de temperaturas entre el calor de liberación y el de almacenaje más pequeña [10].

Los materiales de cambio de fase a base de sales hidratadas han tenido problemas por el envejecimiento prematuro en la decantación; recientemente han aparecido productos orgánicos que no presentan estos problemas, que no son oxidantes y no presentan dilatación como el hielo, pudiendo además escoger la temperatura deseada de cambio de fase.

Los materiales de cambio de fase que más se están estudiando o empleando son en mayor parte parafinas o similares, cuyo envejecimiento con los ciclos y en el tiempo es prácticamente nulo. Los materiales de cambio de fase a base de sales hidratadas de entrada parecen muy interesantes, pero por su mal comportamiento a los ciclos deben desecharse; así mismo, las aleaciones moleculares por precio no terminan de imponerse [14]. Aparte de los problemas propios, entre los que se encuentra el comportamiento al fuego, nos encontramos con los inconvenientes derivados del recipiente y del sistema de disipación del calor. El fluido intercambiador del calor puede ser el aire o el agua, influyendo grandemente en los contenedores y en sus superficies de intercambio. La generalización del empleo de los MCF requiere pasar por estudios de viabilidad técnico-económicos y en casos de cierto riesgo por una parte expe-

rimental o montaje del sistema demostrativo. Se debe tener muy presente, que toda solución técnica no terminará de imponerse sí no va acompañada de una solución económica. Puede ser interesante durante su lanzamiento o promoción, apoyarlas con subvenciones, como se está realizando con algunas energías renovables, pero a la larga no serán soluciones efectivas, sino son competitivas con otras soluciones impuestas. El interés en los materiales de cambio de fase para el almacenamiento de energía en forma de calor latente data probablemente de investigaciones científicas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, en las que se trataban de encontrar alternativas al calentamiento de espacios cerrados, mejores que el calor sensible de los lechos de rocas y del agua, de ahí a la fecha se han realizado infinidad de análisis que muestran la viabilidad de usar los materiales de cambio de fase MCF como una buena alternativa para el almacenamiento de energía [8].

En general los MCF son materiales de bajo costo y las ventajas principales que ofrecen en el almacenaje de calor mediante calor latente frente al que emplea el calor sensible son:

- La densidad de almacenaje de calor es muy superior. Por ejemplo, el agua líquida, su calor específico es  $4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$  y el calor latente de fusión sólido-líquido (hielo) es  $334,24 \text{ kJ/kg}$ . Por consiguiente, la densidad de calor almacenado por calor latente a  $0$   $^\circ\text{C}$  es equivalente al calor que almacena el agua al pasar de  $0$  a  $80$   $^\circ\text{C}$  por calor sensible.
- El calor liberado/almacenado se realizará a temperatura constante.

De forma general, se puede afirmar, que en el amplio margen de temperaturas entre  $0$  y  $90$   $^\circ\text{C}$ , se dispone de MCF estables que permiten acumular calor del orden de  $50 \text{ kWh/m}^3$ , con precios instalados, del orden de  $5.000 \text{ €/m}^3$ . En los casos que resulte económico su empleo, terminarán por imponerse y en los restantes no lo harán, salvo que las autoridades competentes, subvencionen las instalaciones como se está realizando con algunas de las energías renovables. No se debe considerar la acumulación de calor con estos materiales como una competencia a las energías renovables, sino como un complemento o conjunto con ellas y potenciar su empleo en los casos interesantes [10].

Los MCF se están desarrollando muy recientemente para ser aplicados en el transporte, en la construcción, en las aplicaciones solares y en la climatización, como se ha mostrado en este trabajo. Se considera que en un futuro se deben unir todas las aplicaciones y esfuerzos de las industrias químicas relacionadas con los PCM, para su mejor aprovechamiento. Se prestó más atención en este trabajo a la climatización por ser menos conocida. Se consideró, por último, que sí se pudieran microencapsular estos materiales con precios no muy elevados, se podrían introducir en los circuitos de distribución de frío y de calor, es decir, hacer el transporte y la acumulación conjunta. En las instalaciones de frío hay tres temperaturas o niveles térmicos a los que se podría acumular energía térmica, el ya indicado de  $7^\circ\text{C}$ , el del calor de condensación, sobre los  $40^\circ\text{C}$ , y el aprovechamiento del calor sensible a la salida de

los compresores, del orden de 70°C y se estima que puede funcionar satisfactoriamente con materiales de cambio de fase de hasta un 30 % en volumen, según [8].

### 2.2.1. Clasificación y propiedades de los MCF

Debemos tener claro que los materiales de cambio de fase utilizados en el almacenamiento de energía térmica han de cumplir ciertos requisitos indispensables:

- Alto calor latente
- Elevada conductividad térmica.

Los materiales de cambio de fase MCF estudiados en los últimos 40 años engloban un amplio conjunto, desde sales hidratadas, ceras de parafina, ácidos grasos hasta compuestos orgánicos eutécticos y no orgánicos.

Como recomendación, cabe decir, que la temperatura de fusión característica debe estar comprendida en el rango de la operación que deseamos realizar. Esta condición resulta esencial para conseguir una cierta estabilidad química. Es por ello que el MCF será siempre escogido basándonos en su temperatura de fusión, según los usos para los que le vayamos a destinar. Según este criterio un MCF con un punto de fusión fácilmente ajustable es apropiado para estos usos.

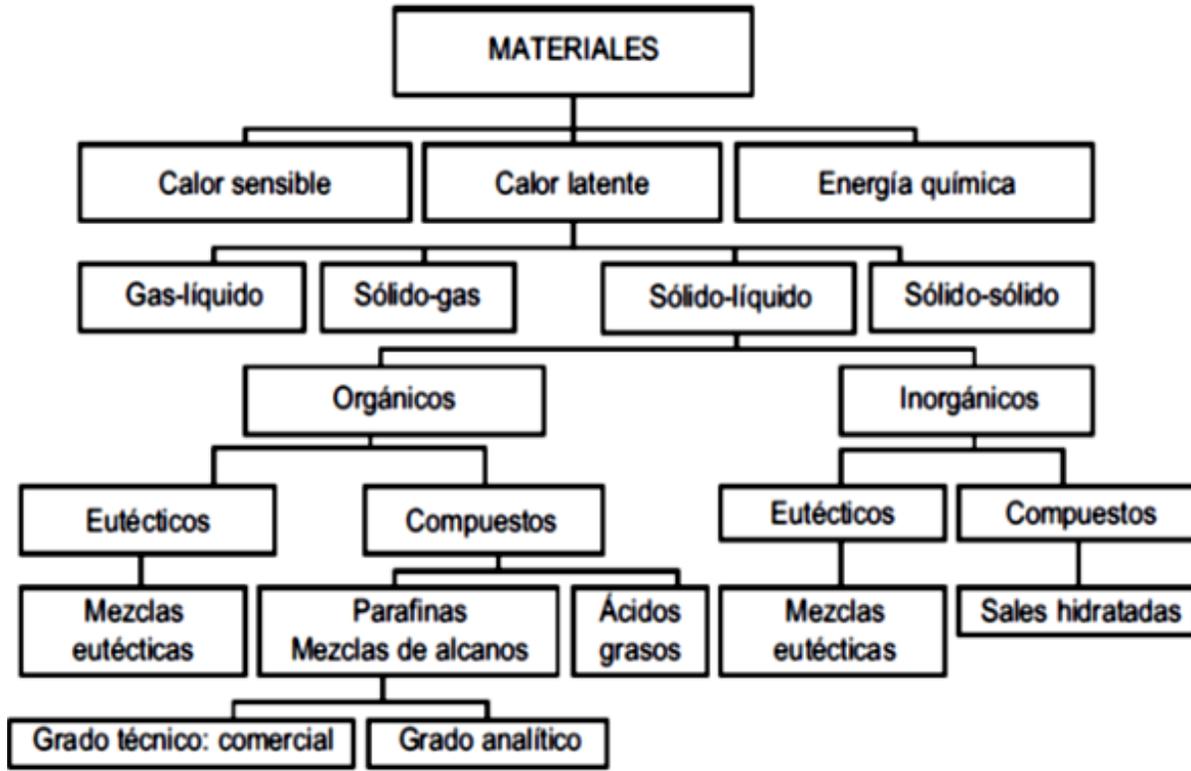
Dependiendo de las aplicaciones, los MCF pueden ser seleccionados basándonos en su temperatura de fusión, podemos distinguir entre materiales que:

- Funden por debajo 15 °C, utilizados para el almacenamiento de frío en diversos usos de aire acondicionado.
- Funden a más de 90 °C, destinados a la refrigeración por absorción.

De entre los posibles cambios de fase, el más interesante es el de sólido a líquido, ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que entre otros cambios de estado (sólido ↔ gas), la variación de volumen es menor. Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

En la Figura 2-1, se representa la clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico, según [4].

Las ceras de parafina están disponibles en el mercado, pero su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es sólo la mitad del de las sales hidratadas. Las sales hidratadas son más baratas que las ceras de parafina y también están disponibles en el mercado, pero tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales.



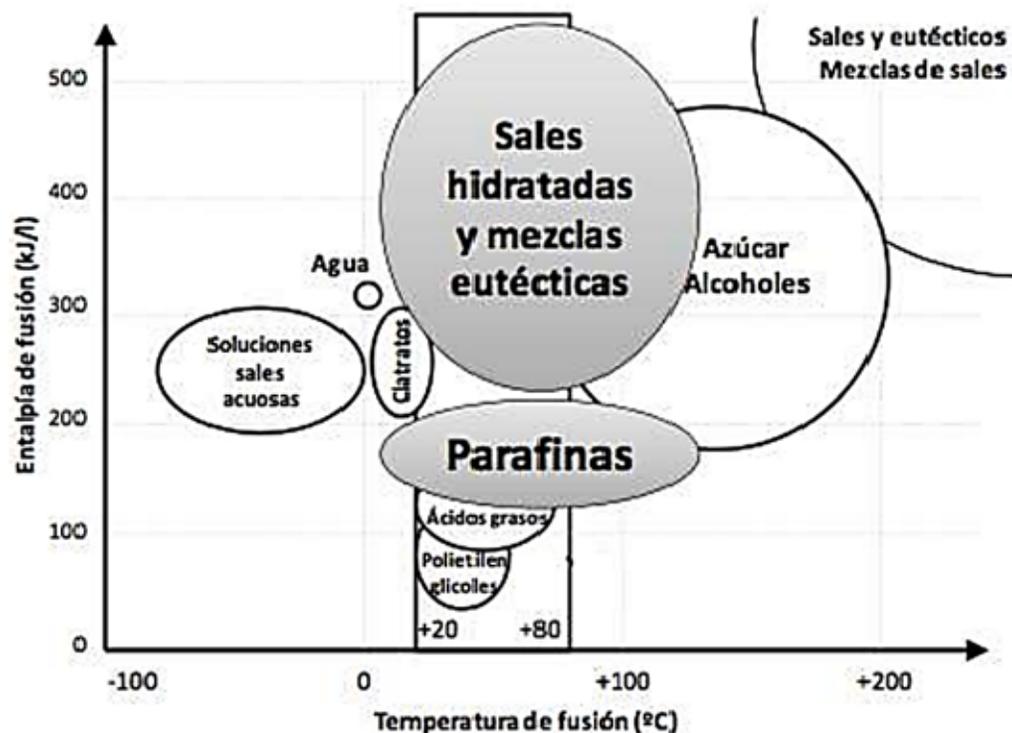
**Figura 2-1:** Clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico.

En las mezclas eutécticas intervienen dos componentes con punto de fusión (solidificación) más bajo que el que poseen los compuestos individualmente. Esto hace que la mezcla alcance el punto de congelación más bajo posible y ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica.

Los ácidos grasos tienen, al igual que las ceras de parafina, un calor latente de aproximadamente 200 kJ/kg, pero son más caros. En cuanto a los compuestos orgánicos, en contraposición a los inorgánicos, no presentan problemas de subenfriamiento y son más estables [5].

Los materiales orgánicos, especialmente sustancias como las ceras, grasas y sus ésteres, han sido recomendados como acumuladores. Su calor latente de fusión, densidad, conductividad térmica y calor específico se encuentran en el orden de 120 kJ/kg, 800 kg/m<sup>3</sup>, 0,20 W/m °K y 1500 J/kg °K, respectivamente.

En la Figura 2-2, se representan los parámetros térmicos más representativos como: la temperatura de fusión y entalpía de las familias químicas de materiales de cambio de fase.



**Figura 2-2:** Clasificación de los diversos tipos de Materiales de fase en función de sus temperaturas y sus entalpías de fusión, [5]

### 2.2.1.1. Compuestos Orgánicos

Son materiales químicamente estables, no resultan corrosivos. Presentan un pequeño o bien inexistente subenfriamiento y son compatibles con la mayor parte de los materiales construcción. Poseen un alto calor latente por unidad de peso y una presión de vapor baja.

Entre sus desventajas cuentan con una baja conductividad térmica, grandes cambios del volumen durante el cambio de fase e inflamabilidad. Como materiales compuestos orgánicos tenemos: la parafina, y los ácidos grasos.

En los ácidos grasos al analizar sus propiedades térmicas y mezclas binarias, los resultados evidencian un atractivo para el almacenamiento de energía térmica, gracias a su calor latente. Su rango de temperaturas de fusión se encuentra entorno a los 30-65 °C, mientras que su calor latente de transición puede variar de 153 a 182 kJ/kg.

### 2.2.1.2. Compuestos Inorgánicos

Tienen alto calor latente por unidad de volumen y alta conductividad térmica. Por otro lado, no resultan inflamables y suponen bajos costes en comparación con los compuestos

anteriores.

Como contrapunto, son corrosivos ante la mayor parte de los metales y sufren descomposición y subenfriamiento. Su uso requiere el empleo de agentes nucleadores para reducir al mínimo la segregación de fases y el subenfriamiento.

### 2.2.1.3. Sales hidratadas

Cuentan con una alta densidad volumétrica de almacenaje ( $350 MJ/m^3$ ), una conductividad térmica relativamente alta ( $0.5 W/m \text{ } ^\circ C$ ) y sus costos son muy inferiores a los de las ceras parafinas. Estas características hacen de las sales hidratadas materiales muy aconsejables para su empleo en el almacenamiento térmico. Actualmente representan una de las opciones más baratas que pueden ser utilizadas para el almacenamiento de calor. Aun así, conllevan problemas de segregación de fases y subenfriamiento, que igualmente restringen su uso.

La mayoría funden congruentemente con la formación de una sal hidratada menor, volviéndose el proceso irreversible, lo cual conduce a una continua disminución de su eficiencia de almacenaje, más aún, teniendo en cuenta que disminuye con los ciclos. Como solución a la formación de sales anhidras pesadas se utiliza un principio de exceso de agua que reduce mucho la densidad de almacenamiento y obliga al sistema a funcionar dentro de una gran oscilación de temperaturas [17].

También se suele emplear algún agente de hinchamiento para solventar la segregación de fase, pero igualmente se reducen los índices de cristalización y eleva la transferencia de calor a la sal.

El subenfriamiento es otro problema grave asociado. La mayor parte de ellas tiene como inconveniente que, durante la extracción del calor almacenado, el material se subenfria antes de la solidificación, reduciendo la utilidad de estos materiales y, si el subenfriamiento es demasiado severo, puede impedir por completo la recuperación de calor.

En la Tabla **2-2** , se muestra la comparación entre el almacenamiento de calor sensible utilizando una cama de piedras, un tanque de agua y el almacenamiento de calor latente con el uso de compuestos orgánicos y no orgánicos. La principal ventaja del uso del calor latente frente al calor sensible resulta clara si atendemos a la comparación del volumen y la masa de la unidad de almacenaje requerida para almacenar una cierta cantidad de calor.

Se hace evidente que los compuestos inorgánicos poseen una densidad volumétrica de almacenaje termal más alta que la de compuestos orgánicos, debido a su mayor calor latente y densidad.

Propiedad	Roca	Agua	MCF Orgánicos	MCF Inorgánicos
Densidad ( $kg/m^3$ )	2240	1000	800	1600
Calor Específico (kJ/kg)	1.0	4.2	2.0	2.0
Calor Latente (kJ/kg)	-	-	190	230
Calor Latente ( $kJ/m^3$ )	-	-	152	368
Almacenamiento Másico para $10^6$ J, $m^3$	67,000	16,000	5300	4350
Almacenamiento Volumétrico para $10^6$ J, $m^3$	30	16	6.6	2.7
Relación de almacenamiento másico	15	4	1.25	1.0
Relación de almacenamiento volumétrico	11	6	2.5	1.0

**Tabla 2-2:** Comparativa entre el almacenamiento de calor sensible y el almacenamiento de calor latente, [10]

## 2.3. LA PARAFINA Y LA BREA COMO MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (MCF)

Los MCF en términos generales tienen sus aplicaciones, como se dijo anteriormente gracias a los siguientes factores:

- **Su alta capacidad de almacenaje de energía en forma de calor.** Almacenar calor en un momento determinado para disponerlo más tarde. Esto permite obtener una gestión térmica más eficiente. Por ejemplo, en un sistema de colector solar, durante el día se almacenaría el exceso de calor y se dispondría por la noche y justo al día siguiente cuando no allá radiación solar.
- **Sus prestaciones como termorregulador para reducir las oscilaciones térmicas de un espacio, en torno a la temperatura de cambio de fase del material de cambio de fase.** Con esto se consigue reducir la dependencia con los sistemas de climatización convencionales y por tanto un ahorro energético. Por ejemplo, en viviendas para reducir las oscilaciones de temperatura en torno a la temperatura confort (22 °C)

A continuación, se enumeran algunas aplicaciones específicas donde han sido utilizados los materiales de cambio de fase MCF:

- Almacenaje térmico de energía solar.

- Almacenaje pasivo en edificios, para obtener temperaturas de confort constantes.
- Para enfriamiento (banco de hielo).
- Obtención de agua caliente sanitaria (ACS).
- Mantenimiento de temperaturas constantes en habitaciones con ordenadores y dispositivos eléctricos.
- Protección térmica de alimentos durante el transporte.
- Protección térmica de productos agrícolas (vino, leche, verduras, etc.).
- Protección térmica de dispositivos electrónicos, evitando sobrecalentamientos.
- Reducción de fatiga térmica en dispositivos.
- Aplicaciones médicas: protección térmica para el transporte de sangre, mantenimiento de la temperatura de la mesa de operaciones, terapias de frío-calor.
- Refrigerante de máquinas.
- Obtención de confort térmico en vehículos.
- Amortiguación de los picos de temperaturas exotérmicos en reacciones químicas.
- Plantas de energía solar.
- Sistemas aeroespaciales.

### 2.3.1. Parafina

La cera parafina es un sólido ceroso, inodoro y sin sabor. Su color es blanco o ligeramente amarillento. Es un derivado que se obtiene en el refinado del petróleo. La cera parafina es un excelente material para almacenar calor (material de cambio de fase) debido a su alto calor latente de fusión. Entre las propiedades de la parafina podemos citar su punto de fusión, que varía entre 47 °C y 64 °C y su peso molecular que varía entre 350-420 g/mol. Inflama con facilidad y no reacciona ante la presencia de agentes químicos. Aunque, posiblemente, las propiedades más importantes son las que hacen referencia a su capacidad para almacenar calor: tiene una capacidad calorífica de 2,14-2,19 J/g°K y un calor latente de fusión muy alto de 200-220 J/g, [1].

Las ceras de parafina están disponibles en el mercado y presenta la desventaja que su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es sólo la mitad del de las sales hidratadas. Las sales hidratadas de uso industrial, si bien son más baratas que las ceras de parafina, son difíciles de conseguir

en el mercado, y tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales.

La parafina de uso comercial, forma parte de los PCM orgánicos, es esencialmente un alcano sólido refinado. La temperatura de fusión de la parafina comercial, se encuentra entre los 63°C y 68°C, mientras que la temperatura de solidificación entre los 62°C y 66°C. Numerosos autores centran su trabajo en materiales orgánicos del tipo alcanos, ceras o parafinas y han proporcionado una amplia información sobre las propiedades termo físicas de parafinas y ceras. Estos materiales, están disponibles comercialmente y se producen a gran escala utilizándose ampliamente en varios campos, [16].

Dadas las características de la parafina y los requerimientos térmicos de esta investigación, es que se selecciona la parafina de uso industrial como material de almacenamiento térmico para este trabajo.

En la Tabla 2-3, se muestran las propiedades termo-físicas de la parafina.

Temperatura de fusión (°C)	Calor de fusión (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
63 - 68	173.6	0.167 (Líquida, 63.5 °C)	790 (Líquida, 63.5 °C)
	.	0.346 (Sólida, 33.6 °C)	916 (Sólida, 33.6 °C)

**Tabla 2-3:** Propiedades termo-físicas de la parafina, [10]

### 2.3.2. Brea asfáltica

La brea es un residuo de la pirólisis de un material orgánico o destilación de alquitranes. Es líquida a temperatura ambiente, pese a que parece sólida pues tiene una viscosidad muy alta. Está constituida por una mezcla compleja de muchos hidrocarburos de las siguientes clases: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) (alquil sustituidos, con el grupo ciclopentadieno, parcialmente hidrogenados, heterosustituidos, con grupos carbonilo, etc.), oligoarilos y oligoarilmetanos, compuestos policíclicos heteroaromáticos (benzólogos de pirrol, furano, tiofeno y piridina). Las breas presentan un amplio intervalo de ablandamiento en vez de una temperatura definida de fusión. Cuando se enfría el fundido las breas solidifican sin cristalización.

Los HAP constituyen el grupo de compuestos más abundantes en las breas. Según su estructura, pueden clasificarse en cata-condensados y peri-condensados. Los cata-condensados presentan átomos de carbono terciario comunes, como máximo, a dos anillos aromáticos, mientras que, en los peri-condensados, algún átomo de carbono terciario pertenece a tres unidades aromáticas. La diferente tipología de esas dos clases de compuestos poliaromáticos

afecta a su comportamiento, por ejemplo, a su reactividad térmica.

### 2.3.2.1. Tipos de brea

Según su origen existen varios tipos de brea:

- **Brea de alquitrán de hulla:** Es un residuo de la destilación o tratamiento térmico del alquitrán de hulla. Están constituidas por mezclas complejas de numerosos HAP y compuestos heterocíclicos.
- **Brea de petróleo:** Son residuos del tratamiento térmico y destilación de distintas fracciones del petróleo. En estas breas abundan los hidrocarburos aromáticos con sustituyentes alquilo y grupos nafténicos.
- **Brea vegetal o de biomasa:** Se obtienen a partir de alquitranes de origen vegetal por procedimientos similares a los empleados en la obtención de breas de alquitrán de hulla o petróleo
- **Brea sintética:** Se obtiene mediante “polimerización” de compuestos aromáticos puros como el naftaleno, o mediante pirolisis de polímeros. Su estructura y propiedades dependen del compuesto de partida.
- **Brea de mesofase:** La brea de mesofase es un material con las características de un cristal líquido. Está formada por unas unidades básicas con forma de esfera que poseen una estructura similar a la del grafito, aunque la forma de apilamiento de los planos grafiticos es muy diferente a la de éste. Se obtiene por diversos tratamientos térmicos en los que, partiendo de otras breas con características adecuadas, se consigue separar o concentrar la fracción rica en mesofase.

La brea es un subproducto de procesos de conversión de carbones, petróleo o biomasa, es decir un producto de, relativamente, poco valor añadido que, sin embargo, es el precursor de productos con un gran valor añadido, como son los materiales de carbón, [4].

## 2.4. APLICACIONES DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

### 2.4.1. los materiales de cambio de fase en temperaturas por encima de los 10 °C en la climatización doméstica

Existen instalaciones de climatización singulares en las cuales se requieren fuentes de calor y de frío, hay otras que producen calores residuales importantes, y también hay otras en donde se podría aprovechar los calores de las propias máquinas, para cubrir las necesidades

de agua caliente sanitaria (ACS) o para precalentar el agua en calderas de vapor. En general, se tiende al aprovechamiento de las energías renovables disponibles, entre las que se encuentran: la solar, la del propio suelo o terreno y la del aire ambiente. Todas estas fuentes se podrán usar si se resuelve su gran problema, la estacionalidad o variabilidad en el tiempo. Es aquí donde los materiales de cambio de fase, conocidos internacionalmente por sus siglas en inglés como PCM, adquieren su importancia. El margen de temperatura de cambio de fase de solidificación en la climatización, puede extenderse desde 0 °C hasta 100 °C, siendo conveniente que presenten características, tales como: suficiente energía en dicho cambio, que sean estables en el tiempo y con los ciclos, compatibles con los materiales que los contienen, sin problemas de toxicidad y de bajo costo. Teniendo en cuenta todos estos condicionamientos y que la temperatura sea la adecuada, se reducen la cantidad de MCF disponibles, según [13].

En este trabajo se resumen y analizan algunas contribuciones relacionadas con la mejora de la eficiencia energética en general y en particular con el empleo de estos materiales. Se presentan posibles aplicaciones, en particular el aprovechamiento del frío gratuito o como se le conoce internacionalmente “free cooling” que, junto con el enfriamiento evaporativo, tiene grandes posibilidades de uso en la climatización de casetas de telefonía, bodegas de crianza y naves industriales, polideportivas y edificios de oficinas. Se discuten también otros trabajos relacionados sobre el tema y la técnica de medida de las propiedades termo físicas de estos materiales, con cálculo de transmisión de calor empleando la analogía eléctrica resuelta con ordenador, optimización de grandes tanques de acumulación y utilización de micro-encapsulados en circuitos de enfriamiento relacionados con sistemas de acumulación con estos materiales y métodos de cálculo de las instalaciones de climatización con estos materiales.

La mayoría de estos materiales son parafinas o similares, cuyo envejecimiento con los ciclos y en el tiempo es prácticamente nulo. Los MCF a bases de sales hidratadas, que de entrada parecen muy interesantes, por su mal comportamiento a los ciclos deben desecharse y las aleaciones moleculares por precio, no terminan de imponerse [9].

De forma general, se puede afirmar, que en el amplio margen de temperaturas, entre 0 y 90°C, se dispone de MCF estables que permiten acumular calor del orden de 50 kWh/m<sup>3</sup>, [10].

### **2.4.2. Aplicaciones de los materiales de cambio de fase en la cocción de alimentos**

En las últimas décadas el almacenamiento de calor latente mediante la utilización de materiales de cambio de fase (MCF), ha suscitado gran interés. El almacenamiento de calor

latente hace uso de la energía almacenada cuando una sustancia pasa de una fase a otra. Esta forma de almacenamiento posee la característica deseada de gran densidad de acumulación, por lo que se elimina la necesidad de la construcción de grandes instalaciones, reducción de las pérdidas energéticas derivadas de la variación de temperatura (necesaria en la forma de almacenamiento sensible) y la posibilidad de selección de la temperatura de trabajo (proceso de carga y descarga energética del material) según las necesidades. Con una adecuada selección del material, es posible lograr un mayor aumento de la entalpía por unidad de masa de material de almacenamiento, con el mismo cambio de temperatura, [14].

Los hornos solares son dispositivos diseñados para utilizar la energía del sol para cocinar. Es un hecho evidente, que hay un sinnúmero de estilos de hornos solares en la actualidad; y que se mejoran constantemente por investigadores y fabricantes. Por lo tanto, la clasificación de los mismos es un trabajo duro. Sin embargo, se puede afirmar que la mayoría de los hornos solares desarrollados para cocinar entran en tres categorías principales, que son: de tipo concentrador, de tipo caja y tipo indirecto.

## 2.5. Caracterización de los materiales de cambio de fase

A continuación, se exponen los procesos más comunes de caracterización de materiales de cambio de fase:

- **Calorimetría de barrido diferencial (DSC2):** esta técnica compara una muestra del PCM a ensayar con otra de un material de referencia, del que ya se conocen las propiedades, en un rango de temperaturas determinado. Las diferencias en las señales registradas de ambas muestras permiten determinar el calor almacenado en el material.
- **T-History Method:** esta técnica consiste en comparar las curvas de temperatura de una muestra del MCF a ensayar y otra de un material de referencia, del que ya se conocen las propiedades, obtenidas al dejarlos enfriar en el ambiente desde la misma temperatura inicial. Este método es mucho más sencillo que el anterior y proporciona unos resultados suficientemente fiables para aplicaciones de ingeniería, [5].

## 2.6. ENCAPSULADO

Para el empleo de los materiales con cambio de fase MCF en aplicaciones, es necesario encapsular el material de cambio de fase MCF con el fin de evitar pérdidas cuando el material cambie de estado (fase líquida). Existen principalmente dos posibilidades: macroencapsulado

y microencapsulado.

### 2.6.1. Macro encapsulado de PCM

Para el caso macroencapsulado, se han desarrollado diferentes formas, geometrías y tipos de materiales, dependiendo de la aplicación. Los materiales empleados generalmente son plásticos, y en particular, polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), aunque existen algunos casos en que se han empleado contenedores metálicos.

En el trabajo desarrollado por [8], se presenta el diseño de un sistema de almacenamiento térmico con material de cambio de Fase (SATCF), para calentamiento de agua de consumo industrial operando por termosifón. El sistema contiene un apartado con material de cambio de fase MCF el cual ayudará para que se pueda abastecer en forma continua la demanda energética de las actividades que lo demanden en la industria y disminuir su dependencia de combustibles fósiles en la mayor medida de lo posible. Para determinar su funcionabilidad se sometió a las pruebas para la obtención de la constante de tiempo y curva de rendimiento según la norma NMX-ES-001- NORMEX-2005 para calentadores solares comercializados en México.

### 2.6.2. Micro encapsulación de MCF

Por otro lado, los materiales de cambio de fase MCF se han microencapsulado, facilitando su incorporación en diferentes matrices como una carga/aditivo. Por ejemplo, en cementos, yeso, plásticos, etc. dándoles un carácter termorregulador además de su función puramente estructural, [9]. El tamaño de la micro encapsulación puede ser muy variable, presentando ventajas a nuestro juicio, las comprendidas entre 10 y 50 micras, pues el área de intercambio es muy grande, facilitándolo muy considerablemente, no requieren espesores muy elevados de las paredes, permiten soportar sin colapsar por presiones o impactos y no aumentan grandemente la viscosidad del fluido, si no se sobre pasa una concentración muy elevada.

Se considera que el micro encapsulado de los MCF presenta muchas ventajas, pues permite su empleo en diferentes campos, desde: la reprografía, pasando por la alimentación y la medicina, a la construcción y a la climatización. En el campo de las energías renovables, se considera que pueden tener una gran importancia, sobre todo en la acumulación y en el transporte.

Las energías renovables que están caracterizadas por su intermitencia, se pueden aprovechar muy bien junto a los acumuladores de calor de cambio de fase. Se considera muy interesante el empleo de los MCF microencapsulados debido al área tan grande que tienen de inter-

cambio térmico y por ello se reduce grandemente el salto de temperatura necesario para la transmisión de calor [13].

## 2.7. CALENTADORES SOLARES TÉRMICOS DE USO DOMÉSTICO.

La energía solar puede ser aprovechada de forma eficiente a través de los calentadores solares en diferentes fines, principalmente para agua caliente sanitaria. La batería térmica puede tener un rol importante en el almacenamiento de energía térmica en estos calentadores disminuyendo su volumen. Veamos algunas características de los calentadores solares.

Los sistemas solares para calentamiento de agua tienen un principio de funcionamiento muy básico, son muy sencillos en su construcción y muy eficientes. Un sistema solar térmico tiene básicamente los siguientes componentes:

- **Colector solar:** su función es convertir la radiación solar en energía térmica, calentando directamente un líquido, por lo general agua.
- **Tanque de almacenamiento:** hace las veces de la batería para el sistema eléctrico. En el tanque se almacena el agua caliente para ser utilizada con diferentes fines. Un tanque aislado debidamente puede conservar el agua caliente aproximadamente 72 horas.
- **Bomba:** hace circular el agua para llevarla del colector al tanque. Es necesaria en ciertos casos solamente; los sistemas no presurizados no requieren bomba, pues la circulación del agua sucede por un proceso natural que se llama convección (efecto termosifón.)
- **Sistema de control:** es un sistema electrónico que controla parámetros como presión, temperatura, nivel de agua, funcionamiento de la bomba.

Se puede encontrar colectores solares de diferente tipo: de placa plana, de tubo evacuado no presurizado y de tubo evacuado con tubo de calor, y otros, según (Heliotérmica S.A.S, 2015), ver Figura 2-3.



**Figura 2-3:** Tipos de Calentadores solares térmicos. a. Calentador no presurizado b. Calentador plano. c. Calentador presurizado con tubos de calor.[19]

El calentador solar es un sistema de aprovechamiento de la energía que utiliza varios procesos con ciclos naturales como el comúnmente llamado efecto invernadero y el proceso de convección. El efecto invernadero, que consiste en que la radiación solar de onda corta (como la luz) atraviesa el vidrio del tubo evacuado y al chocar con un material interno (película de absorción) se convierte en calor y emite radiación de onda larga (calor). Esta radiación de onda larga no puede regresarse al exterior, pues el vidrio no la deja pasar; tampoco puede atravesar el espacio vacío. Precisamente los tubos de vacío permiten que sucedan estos dos fenómenos al mismo tiempo logrando que casi toda la radiación que cae sobre ellos se convierta en calor y quede atrapada dentro del tubo y luego suba por convección. Un tubo evacuado sin agua expuesto a los rayos directos del Sol puede alcanzar temperaturas internas hasta de 250 °C. El agua que entra al tubo a temperatura ambiente con una densidad determinada, se calienta en la profundidad del tubo y se vuelve menos densa, con lo cual su peso relativo es menor en comparación con el agua fría y por consiguiente tiende a subir. Entonces, el agua fría entra al tubo, se calienta y sube al tanque mientras que agua de menor temperatura entra al tubo se calienta y sube, formando un proceso de circulación natural que va almacenando calor en el tanque de almacenamiento. Es por esto que los tubos tienen una inclinación. El rendimiento de los tubos depende tanto de la inclinación como de la orientación con respecto a la trayectoria del Sol. Otra ventaja muy particular de los tubos evacuados es su forma: debido a la forma cilíndrica, los rayos del Sol pueden incidir perpendicularmente sobre la superficie del vidrio durante todo el día, a diferencia de los colectores solares planos, en donde incide perpendicularmente solamente al medio día. Esto hace que su rendimiento sea mucho más alto que el de los colectores planos, [19].

La técnica de vacío utilizada por los fabricantes de tubos evacuados, entre otros, se ha desarrollado hasta el punto de hacer rentable la producción en masa y la comercialización de sus equipos. Mediante la aplicación de esta tecnología, ha sido posible la construcción de los colectores solares de vacío que se comercializan en la actualidad y el mantenimiento de

su elevado vacío. Debido a sus características geométricas, reciben el nombre de colectores de tubos de vacío. Existen dos tipos de colectores tubulares de vacío, según sea el método empleado para el intercambio de calor, [7]:

- De flujo directo.
- Con tubo de calor (heat pipe).

Los calentadores de flujo directo también son clasificados debido a su aplicación como colectores de baja presión. Estos consisten en un grupo de tubos de vidrio (dentro de cada uno de los cuales hay una aleta de aluminio, conectada a un tubo de metal (normalmente cobre) o tubo de vidrio. La aleta posee un recubrimiento selectivo que absorbe la radiación solar, e inhibe la pérdida de calor radiactivo. El fluido de transferencia de calor es el agua y se distribuye a través de las tuberías, de las cuales una se utiliza para la entrada del líquido y la otra para la salida de fluidos. Los colectores de tubos de vacío de flujo directo se encuentran en diferentes variedades de acuerdo al tipo de tubería utilizada:

- Fluido concéntrico de entrada y salida (vidrio-metal). Estos utilizan un único tubo de vidrio. Dentro de este está la tubería de cobre adosada a la aleta. Este tipo de construcción permite que cada una de las tuberías roten para otorgar el ángulo de inclinación deseado y permitir la máxima absorción en la aleta, aun cuando el colector se monta horizontalmente. El diseño de vidrio y metal es eficiente, pero pueden tener problemas, las diferentes tasas de expansión térmica del vidrio y los tubos de metal pueden hacer que la junta entre ellos se debilite y provocar una pérdida de vacío. Sin el vacío, la eficiencia de estos colectores no es mejor, y puede ser peor que la de un colector de placa plana.
- Tuberías de entrada y salida separadas (vidrio-metal). Este es el tipo tradicional de colectores de tubos de vacío. El absorbedor puede ser plano o curvo. Como en el caso del diseño de tubos concéntricos, la eficiencia puede ser muy elevada, sobre todo cuando se requieren temperaturas de trabajo relativamente bajas. La posible pérdida de vacío después de algunos años de funcionamiento vuelve a ser el inconveniente.
- Dos tubos de vidrio fundido (evacuados) juntos en un extremo (vidrio-vidrio). El tubo interior está revestido con un absorbedor integrado cilíndrico de metal. En general no son tan eficientes como los tubos de vidrio-metal, pero son más baratos y tienden a ser más confiables. Para aplicaciones de muy alta temperatura, los tubos de vidrio-vidrio pueden ser más eficientes que sus homólogos de vidrio y el metal, según [7].

## 2.8. TUBOS EVACUADOS

Los tubos evacuados al alto vacío convierten la radiación solar en calor, transmitiéndolo al agua que circula por ellos; los tubos no son afectados por condiciones climáticas tales como:

lluvia, viento, granizo.

El tubo está elaborado con vidrio de borosilicato, capaz de resistir granizo de hasta 2.5 cm de diámetro y tensiones hasta 100 kg de peso, contiene una capa de nitrito de aluminio que absorbe la energía solar y la convierte en calor, ver Figura 2-4.

La fabricación del tubo es al vacío para mantener el calor en el interior y evitar pérdidas.



**Figura 2-4:** Tipos de Calentadores solares térmicos. a. Calentador no presurizado b. Calentador plano. c. Calentador presurizado con tubos de calor.[19]

Los tubos evacuados están hechos de vidrio de borosilicato para disminuir las pérdidas por reflexión. El tubo exterior es transparente, con el propósito de permitir que el rayo de luz penetre. El tubo interior está recubierto con una capa de material selectivo especial (Al-N/Al) con una excelente absorción de la radiación solar y una reflexión mínima, que mejoran en gran medida la absorbancia. La parte superior de los dos tubos se funden a alta temperatura y el aire entre los tubos es evacuado. Esta evacuación del aire entre los dos tubos concéntricos es una característica importante para el buen desempeño de los tubos de vacío.

El vacío es un aislante térmico excelente, y esta propiedad es utilizada para fabricar los tubos evacuados, ya que disminuye considerablemente las pérdidas energéticas. Estas propiedades se hacen más notorias cuando la temperatura alcanza los 150 °C en el interior del tubo, mientras que en su parte externa el tubo permanece frío al tacto. Esto significa que los calentadores de agua de tubos de vacío también pueden funcionar bien incluso en climas fríos, mientras que en estos climas los colectores planos no funcionan tan bien, debido a las

pérdidas de calor por convección y conducción por encima del colector.

A fin de mantener el buen desempeño de vacío, hay un indicador de bario entre las dos capas de vidrio (el mismo que en los tubos de televisión). Durante la fabricación del tubo evacuado, este indicador está expuesto a altas temperaturas y forma una capa pura de bario en la parte inferior del tubo evacuado. Cuando el tubo pierde vacío el bario se oxida y cambia de color, por lo cual podemos notar si un tubo está averiado o no [12].

En la Tabla 2-4, se muestran las especificaciones técnicas de los tubos evacuados.

Largo	1500mm	1800mm
Diámetro del tubo exterior	47mm	58mm
Diámetro del tubo interior	37mm	47mm
Peso	1.3kg	2.2kg
Espesor del vidrio	1.6mm	1.6mm
Material	Vidrio borosilicato 3.3	Vidrio borosilicato 3.3
Recubrimiento de absorción	Calificado A1 / N / A1	Calificado A1 / N / A1
Grado de vacío	$P < 5 * 10^{-3}$ Pa	$P < 5 * 10^{-3}$ Pa
Expansión térmica	$3,3 * 10^{-6}/^{\circ}C$	$3,3 * 10^{-6}/^{\circ}C$
Temperatura de insola- ción	$> 200^{\circ}C$	$> 200^{\circ}C$
Absorción	$> 93\%$	$> 93\% / ^{\circ}C$
Emitancia	$< 8\%$	$< 8\%$
Pérdida de calor	$< 0,8 W / m^2 ^{\circ}C$	$< 0,8 W / m^2 ^{\circ}C$
Presión máxima	0.8MPa	0.8MPa
Temperatura mínima	$-35^{\circ}C$	$-35^{\circ}C$
Resistencia al granizo (diámetro máx)	25 mm	25 mm
Resistencia al viento	30 m/s	30 m/s
Temperatura de puesta en marcha)	$\leq 25^{\circ}C$	$\leq 25^{\circ}C$

Tabla 2-4: Especificaciones técnicas de los tubos evacuados.

## 2.9. DETERMINACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DE UN SÓLIDO

### 2.9.1. Cálculo del calor específico

Cuando dos cuerpos A y B que tienen diferentes temperaturas se ponen en contacto térmico, después de un cierto tiempo, alcanzan la condición de equilibrio térmico, es decir ambos cuerpos alcanzan la misma temperatura.

Cuando un sistema de masa grande se pone en contacto con un sistema de masa pequeña que está a diferente temperatura, la temperatura de equilibrio resultante está próxima a la del sistema grande. Se dice que una cantidad de calor  $\Delta Q$  se transfiere desde el sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura. La cantidad de calor transferida es proporcional al cambio de temperatura  $\Delta T$ :

$$\Delta Q = C * \Delta T$$

La constante de proporcionalidad C se denomina capacidad calorífica del sistema.

Si los cuerpos A y B son los dos componentes de un sistema aislado, el cuerpo que está a mayor temperatura transfiere calor al cuerpo que está a menor temperatura hasta que ambas se igualan.

Si ( $T_A > T_B$ ):

El cuerpo A cede calor  $\Delta Q_A = C_A * (T - T_A)$ , entonces  $\Delta Q_A < 0$ .

El cuerpo B recibe calor  $\Delta Q_B = C_B * (T - T_B)$ , entonces  $\Delta Q_B > 0$ .

Como  $\Delta Q_A + \Delta Q_B = 0$ , la temperatura de equilibrio se obtiene mediante la media ponderada.

La capacidad calorífica por unidad de masa se denomina calor específico  $c$  y la capacidad calorífica C se relaciona con ésta, como se muestra en la Ecuación 2-1.

$$C = mc \tag{2-1}$$

La fórmula para la transferencia de calor entre los cuerpos se expresa en términos de la masa m, del calor específico c y del cambio de temperatura, Ecuación 2-2:

$$\Delta Q = m * c * (T_f - T_i), \tag{2-2}$$

donde  $T_f$  es la temperatura final y  $T_i$  es la temperatura inicial.

El calor específico es la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de una sustancia para que eleve en un grado centígrado su temperatura. Joule demostró la equivalencia entre calor y trabajo, en la cual una caloría es igual a 4.186 joule,  $1\text{ cal} = 4,186\text{ J}$ . Por razones históricas la unidad de calor no es la misma que la de trabajo, el calor se suele expresar en calorías. En particular, el calor específico del agua es  $c = 1\text{ cal}/(g^\circ\text{C})$ , es decir hay que suministrar una caloría para que un gramo de agua eleve su temperatura en un grado centígrado.

Partiendo del principio de conservación de la energía se puede determinar que la energía no se destruye sino se transforma, es decir la energía almacenada en un material al colocarlo en contacto con otro no pierde su energía, éste la transfiere.

El calor específico se puede hallar para un material a partir de otro ya conocido, si a ambos se le suministra el mismo calor, es decir el calor entregado por un cuerpo en contacto con otro es igual al calor recibido por el segundo cuerpo:

$$Q_1 = Q_2, \quad (2-3)$$

donde  $Q_1$  es el calor entregado y  $Q_2$  es el calor recibido, entonces conociendo el calor específico del cuerpo 2 se halla el calor específico del cuerpo 1:

$$m_1 * c_1 * \Delta T_1 = m_2 * c_2 * \Delta T_2$$

$$c_1 = \frac{m_2 * c_2 * \Delta T_2}{m_1 * \Delta T_1} \quad (2-4)$$

$$c_1 = \frac{\rho_2 * V_2 * c_2 * \Delta T_2}{\rho_1 * V_1 * \Delta T_1} \quad (2-5)$$

## 2.10. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el trabajo titulado: "Posibilidades de los acumuladores de cambio de fase en la climatización desarrollada por [13], se analizan algunas posibilidades que se ha visto tienen el empleo de los acumuladores de cambio de fase en la climatización, destacándose las ventajas que se han encontrado, tales como: la posible eliminación de las torres y condensadores evaporados, por los problemas de la bacteria Legionella; la disminución de las puntas eléctricas y con ello la posible rebaja de los costos de electricidad; la economía energética que contribuirá a el cumplimiento de los acuerdos de Kyoto y sobre todo, la posibilidad del aprovechamiento de fuentes renovables, como la solar.

Por otra parte, en el trabajo denominado: "Algunas posibilidades de aplicación de los acumuladores de cambio de fase en las energías renovables" se caracterizan las energías renovables por su intermitencia o variabilidad en el tiempo y los materiales de cambio de fase (MCF)

por requerir gran cantidad de calor para su intercambio y, manteniéndose constante la temperatura. Estas dos características se complementan, por lo que su unión tiene que ser muy buena. Se estudian algunas de las posibilidades del empleo de los PCM, en diversas aplicaciones o aprovechamiento de las energías renovables, en particular: La solar, el frío gratis y la cogeneración, [10].

El almacenamiento térmico ha estado ligado a la edificación desde la antigüedad, en las grandes construcciones masivas, mediante el calor sensible. Otra forma de almacenamiento térmico, que ha suscitado gran interés en las últimas décadas, es en forma de calor latente, mediante materiales de cambio de fase. Estos materiales mantienen constante la temperatura durante el cambio de fase mientras que el material almacena o cede energía. Este hecho supone una mayor densidad energética en comparación con cualquier otro. Su uso está ligado al de las energías renovables para ajustar los periodos de suministro a los de demanda. En este trabajo,[1], se estudian los diferentes materiales de cambio de fase, clasificándolos en diferentes grupos y analizando sus características físicas, químicas, propiedades mecánicas, térmicas, así como su compatibilidad con otros materiales, disponibilidad, precios, durabilidad.

Así mismo, en el trabajo desarrollado por [9] y denominado: "Aprovechamiento de los materiales de cambio de fase (mcf) en la climatización" se analizan las posibilidades que presentan los materiales de cambio de fase en la acumulación de grandes cantidades de calor en espacios reducidos en el campo de la climatización. Se describen diversas instalaciones de climatización en donde se han incorporado de forma satisfactoria los materiales de cambio de fase (PCM), y se estudian diversos tipos de instalaciones tanto con sistemas de producción de energía térmica, como las que aprovechan el frío gratis del aire de forma directa (free cooling) o indirecta mediante sistemas evaporados, o los que aprovechan calores residuales o cogeneración. Considerando las múltiples.

# Capítulo 3

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1. SELECCIÓN DEL TUBO EVACUADO

En el proceso de selección de los componentes del prototipo se eligió un tubo evacuado como captador de radiación por razones de eficiencia y sensibilidad a la radiación difusa. El tubo evacuado además es un elemento del colector solar en el que se puede encapsular el material de cambio de fase sin interrumpir considerablemente el diseño del mismo.

La empresa Heliotérmica S.A.S suministró dos tipos de tubos evacuados que se diferencian por su tamaño y diámetro, ver Tabla 3-1 y Figura 3-1.

Tipo de Tubo	Diámetro interno (cm)	Diámetro externo (cm)	Longitud (cm)
Tubo 58/1800	4.6	5.8	180
Tubo 45/500	3.3	4.5	50

**Tabla 3-1:** Características dimensionales de los tubos.

Aunque el tubo pequeño aparentaba ser más atractivo para la implementación del prototipo, luego de realizar algunas pruebas térmicas en campo con cada uno de ellos se llegó a la conclusión de que los parámetros térmicos podían ser más manejables en el tubo grande debido a su mayor estabilidad en sus valores y teniendo en cuenta su mayor acercamiento a las aplicaciones reales, pues son utilizados en calentadores solares de uso doméstico.



**Figura 3-1:** Tubo evacuado 45/500 (izq) y 58/1800 (der)

En las Tablas **3-2** y **3-3** se muestran los datos de caracterización de los tubos de 1800 mm y de 500 mm.

Tabla de temperatura en el interior del tubo evacuado expuesto a la radiación solar.		
Tubo 58/1800.		
Fecha:	SÁBADO 3 DE OCTUBRE DE 2015	
Hora de Inicio:	8:30 am	
T°ambiente promedio:	21.4 °C	
Clima:	SOLEADO	
TIEMPO (min)	RADIACIÓN SOLAR(W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
30	100	45,8
60	300	60,6
90	400	73,5
120	400	88,1
150	500	100,6
180	300	114,6
210	200	129,5
240	400	143,5
270	500	158,4
300	500	174,7

**Tabla 3-2:** Radiación y temperatura del tubo 58/1800 evacuado, ver Anexo A para datos completos.

Tabla de temperatura en el interior del tubo evacuado expuesto a la radiación solar.		
Tubo 45/500.		
Fecha:	SÁBADO 3 DE OCTUBRE DE 2015	
Hora de Inicio:	8:30 am	
T° ambiente promedio:	21.4 °C	
Clima:	SOLEADO	
TIEMPO (min)	RADIACIÓN SOLAR(W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
30	200	24,5
60	300	33,6
90	400	42,3
120	400	51,4
150	500	60,2
180	400	69,5
210	300	78,9
240	400	88,3
270	500	97,2
300	400	106,5

**Tabla 3-3:** Radiación y temperatura del tubo 45/500 evacuado, ver Anexo A para datos completos.

## 3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE BATERÍA TÉRMICA SOLAR

### 3.2.1. Diseño CAD

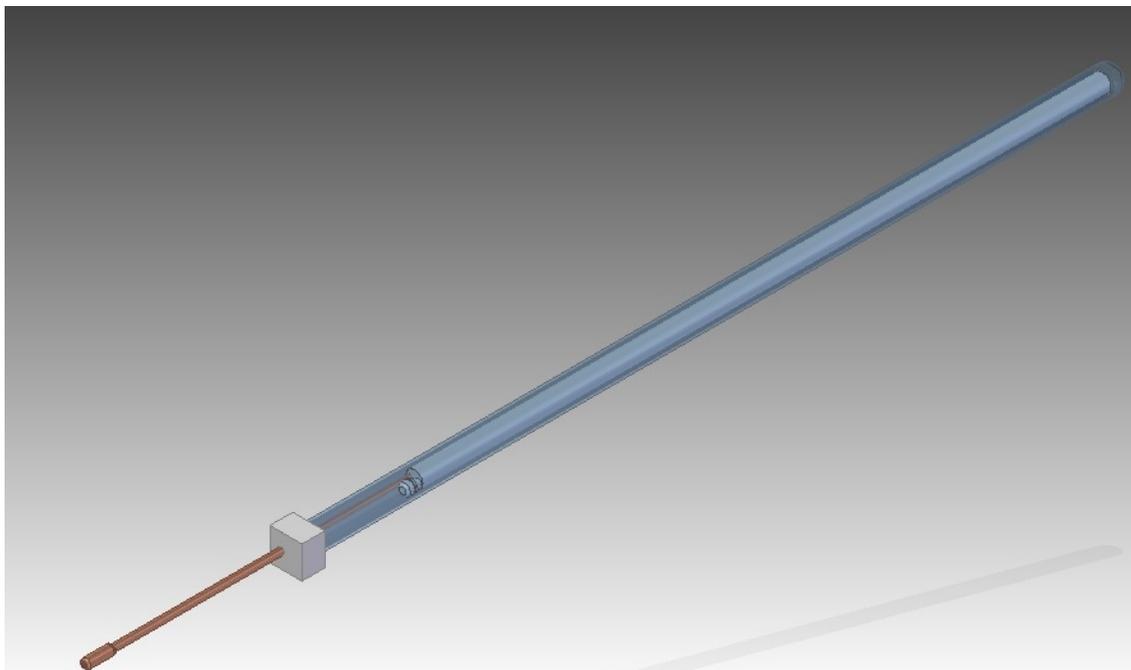
El diseño del prototipo de batería térmica solar fue realizado en el software Solid Edge V17 Académica, teniendo en cuenta su futura aplicación, la cual se determinó para fines domésticos, con dimensiones y características ajustadas a un calentador de agua tipo doméstico con tubos evacuados de dimensiones estándar 58/1800.

Las partes del prototipo son:

- **Cápsula madre.** Es la cápsula que contiene el material de cambio de fase. Está compuesta de un tubo de acero de una pulgada y media de diámetro, 1.5 m de longitud, con un contenedor interno para un tubo de calor, abierto y roscado en uno de sus lados para el llenado de material de cambio de fase.

- **Contenedor para el tubo de calor (disipador).** Está incrustado en la cápsula madre y tiene como objetivo contener el tubo de calor y protegerlo del material de cambio de fase. Está hecho de tubo de cobre de media pulgada de diámetro y 1.30 m de longitud.
- **Lámina de encamisado de aluminio.** Es una lámina de aluminio que tiene por finalidad conducir el calor hacia la cápsula madre. Es una lámina rectangular de calibre 22 y con dimensiones de 9 cm de ancho x 1.6 m de largo.
- **Tubo evacuado.** Consta de dos tubos de vidrio concéntricos soldados entre sí en una de sus fronteras y con vacío entre ellos. Los tubos tienen una longitud de 1800 mm, diámetro externo de 58 mm y diámetro interno de 46 mm.

En las Figuras 3-2, 3-3,3-4 y 3-5 se muestra el diseño CAD del prototipo de batería solar térmica.



**Figura 3-2:** Prototipo (BST) CAD



Figura 3-3: Prototipo (BST) CAD con corte lateral

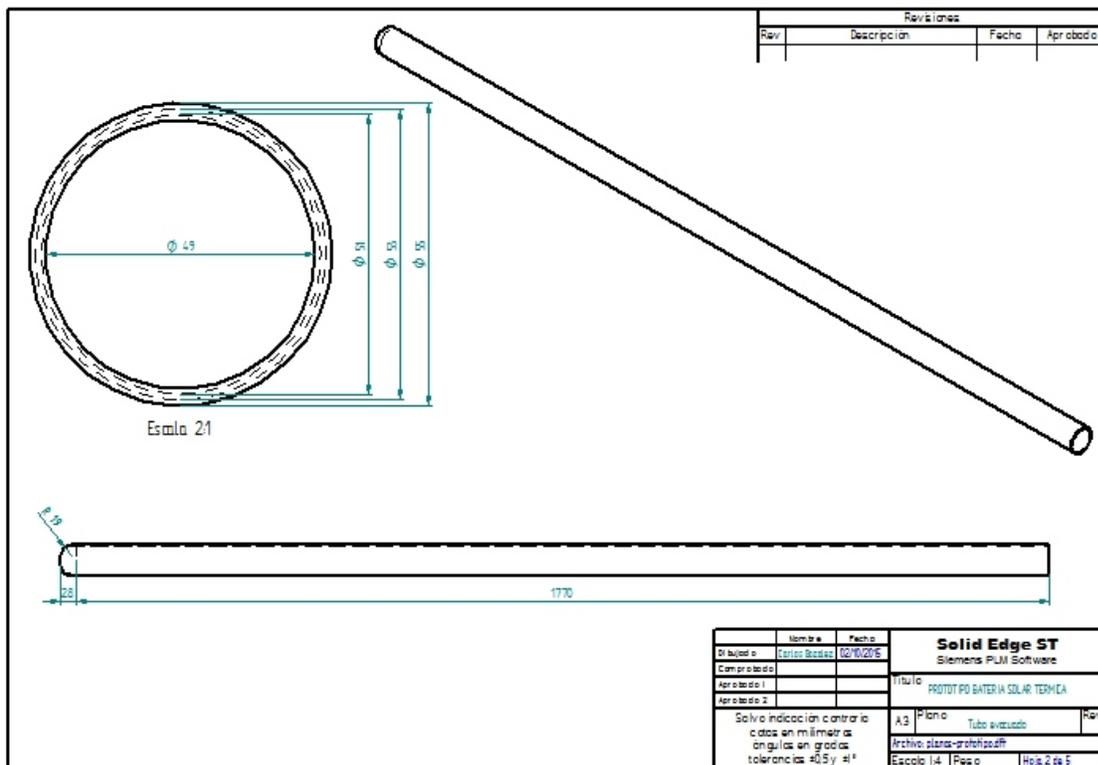


Figura 3-4: Prototipo (BST) CAD planos

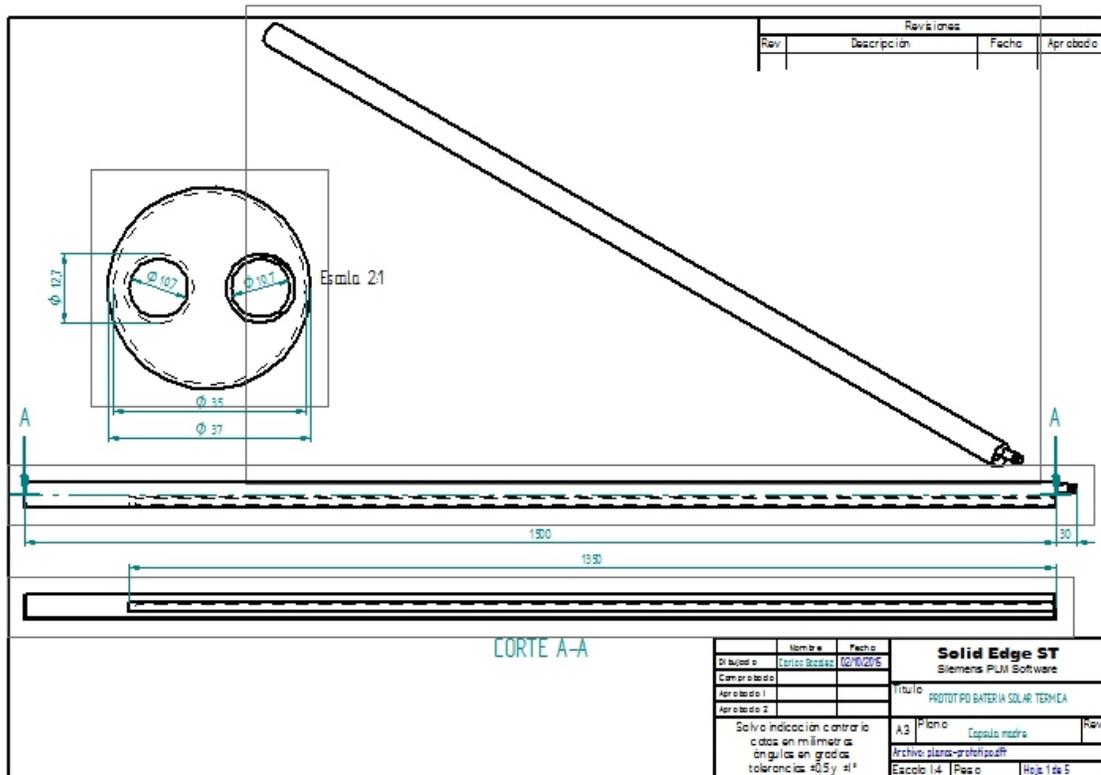


Figura 3-5: Prototipo (BST) CAD con corte lateral

En el Anexo A, se presenta el diseño CAD detallado del prototipo de batería térmica solar.

### 3.2.2. Construcción

Para la elaboración del prototipo se tuvieron en cuenta los componentes arriba descritos. En el proceso de construcción de la cápsula madre se procedió a unir las partes correspondientes, es decir unir con soldadura autógena la boca de la cápsula del tubo de calor a la tapa superior de la cápsula madre, ver Figura 3-6, dejando la cápsula del tubo de calor dentro de la cápsula madre.

La cápsula madre en su tapa superior, y al lado de la cápsula del tubo de calor, lleva además una boquilla de alimentación para el llenado con material de cambio de fase.



**Figura 3-6:** Construcción de la cápsula madre

En la figura 3-7, se puede observar la introducción del tubo de cobre en la cápsula madre.



**Figura 3-7:** Introducción del tubo de cobre a la cápsula madre

Posteriormente, la cápsula madre ya terminada e inspeccionada por fugas, se ensambló en el tubo evacuado con la lámina de encamisado de aluminio en éste. En la construcción del prototipo se tuvo especial cuidado de no permitir fugas del MCF. En el proceso de ensamble de las partes no se necesitó de ningún tipo de soldadura ni pegamentos especiales, pues la cápsula madre está diseñada para ser introducida y retirada del tubo evacuado las veces que se requiera. Finalmente, se realizaron pruebas de correcto ensamblaje y funcionamiento del prototipo y se llevaron a cabo las correcciones pertinentes. La cápsula para el tubo de calor en el momento de las pruebas se utiliza para introducir el sensor de temperatura (termocupla) y medir la variación de la temperatura del MCF con más precisión, por lo cual, esta cápsula está diseñada para introducir o extraer el tubo de calor las veces que se requiera.

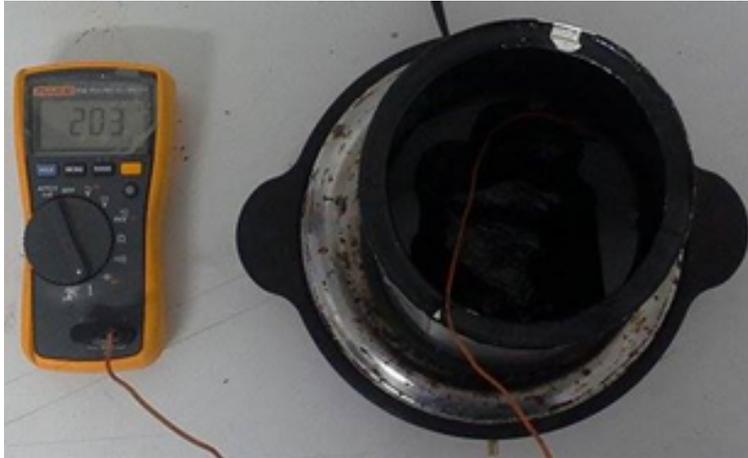
Para el desarrollo de este proyecto, se construyeron tres cápsulas destinadas a tres materiales: parafina, brea y agua. Una vez ensambladas completamente las partes mecánicas de los tres prototipos se procedió a llenarlos con los materiales de cambio de fase (parafina y brea) y el agua, esta última no se trata como MCF sino como material de referencia para cálculos termodinámicos, ya que sus propiedades y comportamiento son conocidos de manera amplia en la bibliografía. Debido a que los materiales de cambio de fase utilizados, en su estado natural a temperatura ambiente se encuentran en estado sólido (o en el caso de la brea líquida, pero de alta viscosidad), se hace necesario llevarlos a una temperatura de completa licuefacción, para ser vertidos dentro de las cápsulas. Para el proceso de encapsulado de los dos materiales de fase se requirió calentar además la cápsula para asegurar una completa ocupación del volumen interno de la misma. El llenado con agua no presentó por razones obvias ninguna complicación. En las Figuras 3-8 y 3-9 se muestra una parte del proceso para derretir los materiales de cambio de fase usados en los prototipos de pruebas para su posterior vertimiento dentro de la cápsula madre, ver Figura 3-10.

- Proceso para derretir la parafina



**Figura 3-8:** Procedimiento para derretir la parafina y caracterización de la misma

- Proceso para derretir la brea



**Figura 3-9:** Procedimiento para derretir la brea y caracterización de la misma

- Vertimiento de la brea líquida en la cápsula madre



**Figura 3-10:** Introducción de la brea en la cápsula madre

### 3.3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Estas pruebas experimentales consistieron en exponer los prototipos de prueba con su respectivo material de cambio de fase a la radiación solar, midiendo la radiación solar mediante con el sensor del equipo GUNT ET 202 y tomando la temperatura interna de cada uno de los prototipos en intervalos de tiempo preestablecidos (de 30 s y 5 min), estas pruebas se realizaron durante un mes en la ciudad de Pamplona en diferentes condiciones climáticas. Para lo anterior se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

- Temperatura ambiente y condiciones climáticas
- Radiación solar
- Temperatura interna de los prototipos
- Volúmenes de las cápsulas.

Durante las pruebas experimentales se dispuso de los instrumentos de medición de radiación y temperatura los cuales fueron GUN HAMBURG ET 202 y FLUKE 117 respectivamente. El experimento se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la Universidad de Pamplona, a la intemperie, exactamente en la Media Torta del campus principal ubicado en la ciudad de Pamplona.

En la Figura 3-11 se muestra el equipo de medición de la radiación solar y el sensor usado en campo.



**Figura 3-11:** Equipo de medición de la radiación solar y sensor usado en campo para la medición de esta. a. Equipo GUNT ET 202 b. Sensor de radiación

### 3.3.1. Pruebas experimentales del tubo evacuado con cápsula sin MCF

Posterior al diseño y construcción del prototipo de batería térmica solar, se prosiguió con la caracterización y toma de datos del montaje, estas pruebas experimentales consistieron en exponer el prototipo de batería solar termina sin el MCF dentro de la cápsula madre, durante esta exposición a la radiación solar se midió la temperatura interna de la cápsula madre en intervalos de tiempo de (30s y 5min) con el fin de caracterizar el prototipo sin material de cambio de fase y de esta manera tener una noción más clara de cómo sería su comportamiento ya con el material dentro, con el fin de tener un punto inicial de referencia en cuanto al almacenamiento de calor.

Los resultados obtenidos de esta caracterización se presentan en la Tabla 3-4.

En esta tabla se registraron los datos de temperatura, radiación solar y tiempo durante la prueba experimental del prototipo expuesto a la intemperie.

Tabla de temperatura interior de la cápsula madre sin MCF, introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.		
Fecha:	VIERNES 09 DE OCTUBRE DE 2015	
Hora de Inicio:	8:00 am	
T <sup>ambiente</sup> promedio:	23 °C	
Clima:	SOLEADO	
RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO:	40 W/m <sup>2</sup>	
TIEMPO (min)	RADIACIÓN SOLAR(W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
30	100	50,3
60	300	67,4
90	400	89,3
120	500	106,8
150	300	125,6
180	200	143,3
210	400	162,5
240	500	180,5
270	500	198,3
300	400	216,8

**Tabla 3-4:** Relación de temperaturas del tubo evacuado más la cápsula madre sin MCF.

### 3.3.2. Pruebas experimentales del tubo evacuado con cápsula llena de MCF

#### 3.3.2.1. Parafina.

Por medio de la revisión bibliográfica y de la caracterización experimental que se le hizo a la parafina se pudo conocer sus propiedades físico-químicas, esto con el fin de saber y tener en cuenta su punto de fusión, y conocer el rango de temperaturas dentro de las cuales este

material cambia de fase y de esta manera pudiera ser utilizado en el prototipo. Esta prueba experimental consistió en preparar el prototipo de batería térmica solar con parafina como MFC dentro de la cápsula, ensamblar sus partes, introducir una termocupla dentro de la cápsula para medir la temperatura de la parafina durante intervalos de tiempo de 30s y 5min, y finalmente exponer el prototipo a la radiación solar por 3 horas para realizar las mediciones ya descritas.

En la Tabla **3-5** se relacionan los datos de tiempo vs temperatura del prototipo que usa parafina.

Tabla de temperatura en el interior de la cápsula madre con MCF, (parafina) introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.		
Fecha:	SÁBADO 31 DE OCTUBRE DE 2015	
Hora de Inicio:	8:00 am	
T°ambiente promedio:	22 °C	
Clima:	SOLEADO	
RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO:	50 W/m <sup>2</sup>	
TIEMPO (min)	RADIACIÓN SOLAR(W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
30	200	49,6
60	300	57,8
70	500	60,1
80	400	63,6
90	500	65,5
100	400	68,4
110	400	70,3
120	500	74,5
150	500	94,2
180	500	113,6

**Tabla 3-5:** Datos seleccionados del prototipo con MCF (PARAFINA)

### 3.3.2.2. Brea

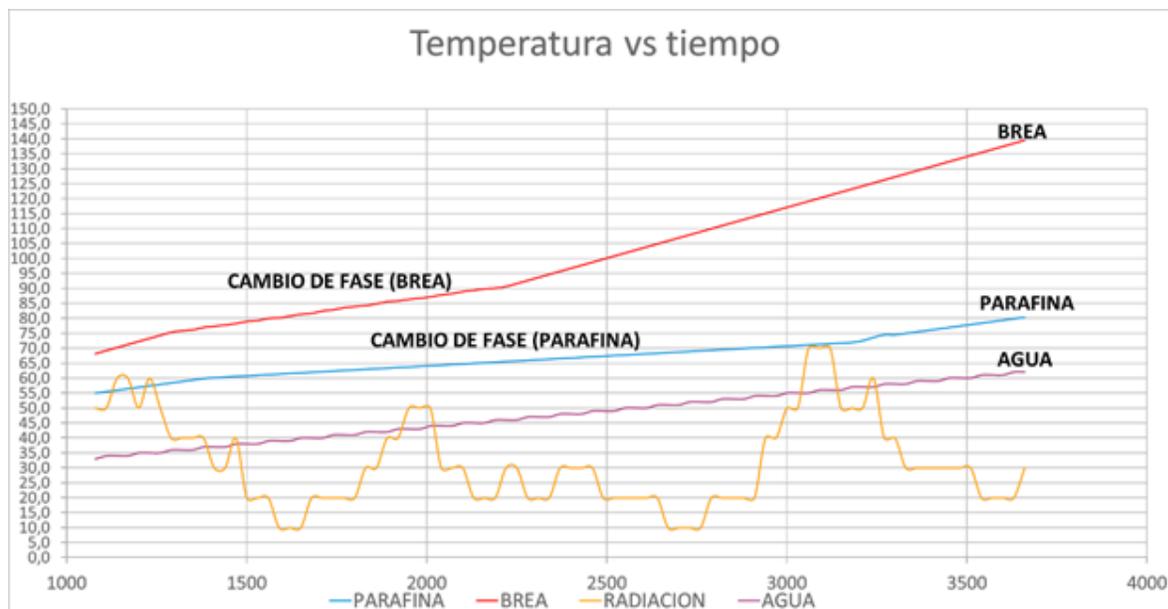
Para el caso de la brea se realizó el mismo procediendo de la parafina.

En la Tabla **3-6** se relacionan los datos de tiempo vs temperatura del prototipo que usa brea.

Tabla de temperatura en el interior de la cápsula madre con MCF (brea), introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.		
Fecha:	SÁBADO 31 DE OCTUBRE DE 2015	
Hora de Inicio:	8:00 am	
T°ambiente promedio:	22 °C	
Clima:	PARCIALMENTE SOLEADO	
RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO:	40 W/m <sup>2</sup>	
TIEMPO (min)	RADIACIÓN SOLAR(W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
30	200	49,1
60	300	68,3
70	500	74,8
75	400	77,6
80	500	81,2
85	400	82,4
90	400	84,6
95	500	86,2
100	500	87,9
105	500	91,4
115	400	100,4
130	400	110,6

**Tabla 3-6:** Datos seleccionados del prototipo con MCF (BREA)

En la Figura 3-12 se puede visualizar la evolución de las temperaturas de la parafina (azul) y la brea (roja) encapsuladas en los prototipos de baterías térmicas solares y expuestos simultáneamente a la misma radiación solar.



**Figura 3-12:** Caracterización de los MCF

Como se puede observar, la pendiente para la parafina cambia desde los 60 °C hasta 66 °C, lo que corresponde aproximadamente al rango teórico, en el caso de la brea el cambio de pendiente ocurre desde los 80 °C hasta 90.6 °C.

Analizando el comportamiento de estos materiales se observa que tanto para la brea como para la parafina el calor suministrado en estos rangos de temperatura se va al proceso de cambio de fase; este calor acumulado puede ser liberado en el proceso contrario.

En el caso del agua se observa una pendiente constante, lo que quiere decir que el cambio de temperatura se debe solamente al calor sensible, ya que en el experimento no se sobre paso el punto de ebullición del agua, por tanto, esta no cambió de fase.

### 3.3.2.3. Agua

El agua en el desarrollo de este proyecto no se usó como material de cambio de fase sino como material de referencia ya que sus propiedades físico-químicas son conocidas en la bibliografía y a partir de sus parámetros conocidos como el calor específico y su densidad se puede hallar el calor recibido y suministrado por los materiales en estudio.

## 3.4. CÁLCULO TERMODINÁMICO DEL CALOR ALMACENADO POR LAS CÁPSULAS CON MCF

Para determinar el calor que fue almacenado por las tres cápsulas después de haberlas expuesto a la radiación solar, se introdujeron secuencialmente dentro de un cilindro con volumen más grande y que contenía una cantidad preestablecida de agua, midiendo el calor transferido desde la cápsula al volumen de agua, teniendo en cuenta que el calor transferido desde la cápsula es igual al calor recibido por el agua, según la Ecuación 2-3, ver Figura 3-13. Por otra parte, el calor a partir del volumen de agua se calcula por la Ecuación 3-1:

$$Q = m * c_p * \Delta T, \quad (3-1)$$

donde:

**Q:** calor almacenado en la cápsula con MCF y cedido al agua.

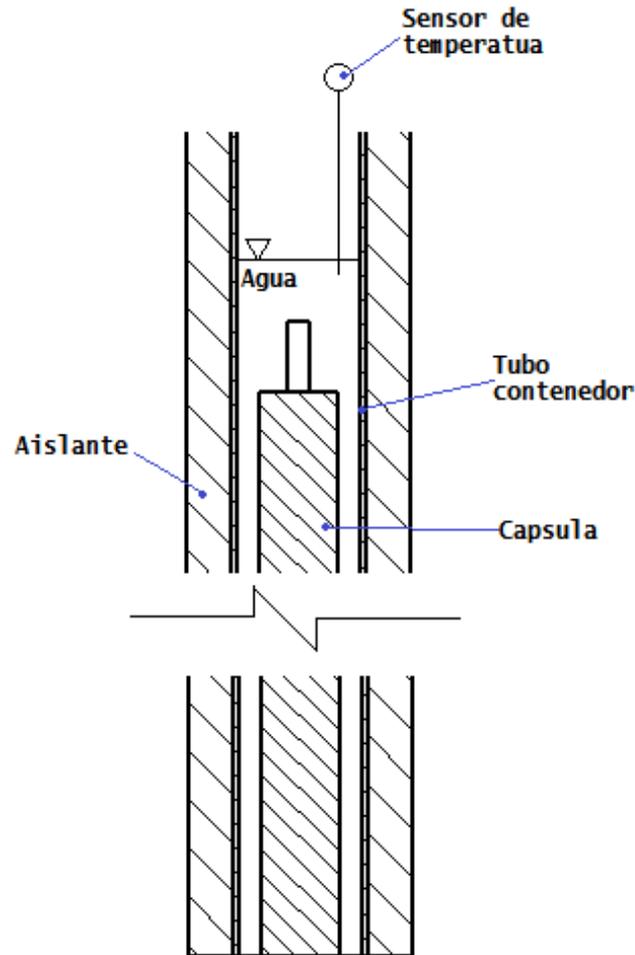
**m:** masa del agua dentro del recipiente.

**$c_p$**  : calor específico del agua.

**$\Delta T$**  : variación de la temperatura del agua.

El calor específico del agua en la Ecuación 3-1 ya es conocido desde la literatura, la diferencia de temperaturas se obtiene de forma experimental. El calor Q absorbido por el agua se considera, por la primera ley de la termodinámica, que es el calor almacenado durante la exposición a la radiación solar por cada una de las cápsulas con MCF.

Asumiendo que debido a que las tres cápsulas fueron expuestas a la radiación de forma simultánea a las mismas condiciones aproximadamente, éstas recibieron la misma cantidad



**Figura 3-13:** Esquema del montaje para el cálculo del calor almacenado en cada una de las cápsulas.

de radicación durante el mismo tiempo, por consiguiente, la misma cantidad de calor del medio.

### 3.4.1. Parafina

De acuerdo al procedimiento descrito anteriormente, y para realizar los cálculos mediante la Ecuación 3-1, se procede a introducir la cápsula de parafina con el calor almacenado al agua, luego de haberla expuesto a la radicación solar. En la Tabla 3-7 se muestran los datos obtenidos de la temperatura con respecto al tiempo del agua dentro del contenedor luego de introducir la cápsula con MCF (parafina). Las lecturas de temperatura se registraron cada 30 segundos hasta alcanzar el equilibrio térmico para el prototipo que usa parafina.

TIEMPO (seg)	TEMPERATURA (°C)
30	18,0
60	18,9
90	19,5
120	20,4
150	21,7
180	22,1
210	23,8
240	25,3
270	26,7
300	26,9
330	27,1
360	27,2
390	27,2
420	27,2
450	26,9

**Tabla 3-7:** Relación de las temperaturas con respecto al tiempo para el experimento de transferencia de calor desde la cápsula de parafina hacia el volumen de agua

A continuación, se determina el volumen de agua del contenedor (Ecuación 3-2) y su respectiva masa (Ecuación 3-3). Es de notar que, aunque el contenedor para el agua tiene una longitud de 1.78 m, se escogió una columna de agua con altura de 1.46m para evitar el derramamiento de fluido al introducir la cápsula. El volumen de agua se calcula entonces por la ecuación:

$$V_{agua} = \pi * r^2 * h \quad (3-2)$$

Donde:

$V_{agua}$  = Volumen del agua en el contenedor.

$r$  =Radio contenedor.

$h$  =Altura de la columna de agua.

$$V_{agua} = (\pi) * (0,0508 \text{ m}^2) * (1,46 \text{ m})$$

$$V_{agua} = 1,1836 * 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$m_{agua} = \rho * V_{agua} \quad (3-3)$$

Donde:

$m_{agua}$  = Masa de la columna de agua.

$\rho$  = Densidad del agua.

$$m_{agua} = (1000 \text{ Kg}/m^3) * (1,1836 * 10^{-2} \text{ m}^3)$$

$$m_{agua} = 11,8367 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta que el calor específico del agua ( $c_{agua}$ ), según las tablas termodinámicas es:

$$c_{agua} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C})$$

Por la segunda ley de la termodinámica, cuando dos cuerpos de diferentes temperaturas se unen por contacto, la entropía del sistema compuesto aumenta hasta tal punto de conseguir la entropía máxima cuando se alcanza un equilibrio de temperatura, esto a su vez quiere decir que el calor del cuerpo más caliente se transmite al calor del cuerpo más frío. Considerando que el calor almacenado por la parafina encapsulada se transmite al agua hasta alcanzar un equilibrio de temperatura, se calcula el calor cedido al agua por parte de la parafina y el calor remanente en la cápsula de parafina. Entonces el calor recibido por el agua es igual al calor transmitido a ésta por parte de la parafina:

$$Q_{\text{recibido por el agua}} = m_{agua} * c_{agua} * \Delta T = Q_{\text{cedido por la parafina}}$$

$$Q_P = (11,8367 \text{ kg}) * (4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C})) * (27,2^\circ\text{C} - 18,0^\circ\text{C})$$

Calor cedido por la cápsula con parafina al agua:

$$Q_P = 457,37 \text{ kJ} \tag{3-4}$$

El calor de la Ecuación Ec 3-4 es el calor recibido por el agua pero no es el calor total almacenado por la parafina, ya que queda un calor remanente por haber subido la parafina desde una temperatura de 18 °C hasta la temperatura de equilibrio de los dos cuerpos, es decir 27.2 °C.

### 3.4.2. Brea

Los datos obtenidos de temperatura con respecto al tiempo del agua dentro del contenedor luego de introducir la cápsula con MCF (brea) se muestran en la Tabla 3-8. Se registraron las lecturas de temperatura cada 30 segundos hasta alcanzar el equilibrio térmico para el prototipo que usa brea.

TIEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)
30	18,0
60	19,5
90	19,9
120	20,2
150	20,7
180	21,4
210	21,9
240	22,3
270	22,4
300	22,9
330	23,1
360	23,3
390	23,3
420	23,3
450	22,9

**Tabla 3-8:** Relación de las temperaturas con respecto al tiempo para el experimento de transferencia de calor desde la cápsula de brea hacia el volumen de agua.

A continuación, se determina el volumen de la columna de agua del contenedor 3-2 y su respectiva masa 3-3.

$$V_{agua} = \pi * r^2 * h$$

Donde:

$V_{agua}$  = Volumen del agua en el contenedor.

$r$ : Radio contenedor.

$h$ : Altura de la columna de agua.

$$V_{agua} = (\pi) * (0,0508 \text{ m}^2) * (1,46 \text{ m})$$

$$V_{agua} = 1,1836 * 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$m_{agua} = \rho * V_{agua}$$

Donde:

$m_{agua}$  : Masa de la columna de agua.

$\rho$  : Densidad del agua.

$$m_{agua} = (1000 \text{ Kg/m}^3) * (1,1836 * 10^{-2} \text{ m}^3)$$

$$m_{agua} = 11,8367 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta que el calor específico del agua ( $c_{agua}$ ), según las tablas termodinámicas es:

$$c_{agua} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C})$$

De forma análoga a como fue descrito el proceso de transferencia de calor para la parafina, sucede con la brea. Considerando que el calor almacenado por la brea encapsulada se transmite al agua hasta alcanzar un equilibrio de temperatura, se calcula el calor cedido al agua por parte de la brea y el calor remanente en la cápsula de brea. Entonces el calor recibido por el agua es igual al calor transmitido a ésta por parte de la brea:

$$Q_{\text{recibido por el agua}} = m_{agua} * c_{agua} * \Delta T = Q_{\text{cedido por la brea}}$$

$$Q_B = (11,8367 \text{ kg}).(4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C})).(23,3^\circ\text{C} - 18,0^\circ\text{C})$$

Calor cedido por la cápsula con brea al agua:

$$Q_B = 263,48 \text{ kJ} \quad (3-5)$$

Así mismo, el calor de la Ecuación 3-5 es el calor recibido por el agua pero no es el calor total almacenado por la brea, ya que queda un calor remanente por haber subido la brea desde una temperatura de 18 °C hasta la temperatura de equilibrio de los dos cuerpos, es decir 23.3 °C.

### 3.4.3. Agua

Los datos obtenidos de temperatura con respecto al tiempo del agua dentro del contenedor luego de introducir la cápsula con agua como material de referencia sin cambiar de estado, se muestran en la Tabla **3-9**. Se registraron las lecturas de temperatura cada 30 segundos hasta alcanzar el equilibrio térmico para el prototipo que usa agua.

TIEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)
30	18,2
60	19,2
90	19,9
120	20,5
150	20,8
180	21,7
210	22,2
240	22,6
270	23,4
300	23,9
330	24,2
360	24,2
390	24,2
420	24,2
450	24,2
480	24,2
510	24,2
540	24,2
570	23,9
600	23,9
630	23,9
660	23,9

**Tabla 3-9:** Relación de las temperaturas con respecto al tiempo para el experimento de transferencia de calor desde la cápsula de agua hacia el volumen de agua

A continuación, se determina el volumen de la columna de agua del contenedor 3-2 y su respectiva masa 3-3.

$$V_{agua} = \pi * r^2 * h$$

Donde:

$V_{agua}$  : Volumen del agua en el contenedor.

$r$ : Radio contenedor.

$h$ : Altura de la columna de agua en el contenedor.

$$V_{agua} = (\pi) * (0,0508 \text{ m}^2) * (1,46 \text{ m})$$

$$V_{agua} = 1,1836 * 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$m_{agua} = \rho * V_{agua}$$

Donde:

$m_{agua}$  : Masa de la columna de agua.

$\rho$  : Densidad del agua.

$$m_{agua} = (1000 \text{ Kg}/m^3) * (1,1836 * 10^{-2} m^3)$$

$$m_{agua} = 11,8367 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta que el calor específico del agua ( $c_{agua}$ ), según las tablas termodinámicas es:

$$c_{agua} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C})$$

Por la segunda ley de la termodinámica, cuando dos cuerpos de diferentes temperaturas se unen por contacto, la entropía del sistema compuesto aumenta hasta tal punto de conseguir la entropía máxima cuando se alcanza un equilibrio de temperatura, esto a su vez quiere decir que el calor del cuerpo más caliente se transmite al calor del cuerpo más frío. Considerando que el calor almacenado por el agua encapsulada se transmite al agua en el contenedor hasta alcanzar un equilibrio de temperatura, se calcula el calor cedido al agua por parte de la cápsula con agua y el calor remanente. Entonces el calor recibido por el agua es igual al calor transmitido a ésta por parte del agua:

$$Q_{\text{recibido por el agua}} = m_{agua} * c_{agua} * \Delta T = Q_{\text{cedido por el agua}}$$

$$Q_A = (11,8367 \text{ kg}) * (4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})) * (24,2^\circ\text{C} - 18,2^\circ\text{C})$$

Calor cedido por la cápsula con agua al agua del contenedor

$$Q_A = 298,28 \text{ kJ} \quad (3-6)$$

Como en los casos anteriores, el calor de la Ecuación 3-6 es el calor recibido por el agua pero no es el calor total almacenado por el agua, ya que queda un calor remanente por haber subido la el agua desde una temperatura de 18,2 °C hasta la temperatura de equilibrio de los dos cuerpos, es decir 24.2 °C.

### 3.5. CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE VOLÚMENES DE MCF CON RESPECTO AL AGUA PARA ALMACENAR UNA MISMA CANTIDAD DE CALOR

Mediante el cálculo experimental del calor almacenado en cada cápsula con MCF y agua, se puede hacer un análisis sobre la disminución del volumen de material necesario para almacenar la misma cantidad de calor. Como se ha observado, en las pruebas experimentales anteriores se utilizó un mismo volumen para las tres cápsulas que contenían parafina, brea y agua, específicamente un volumen  $V = 1,51 * 10^{-3} m^3$ , es decir,

$$V_P = V_A = V_B = V.$$

Sin embargo, el calor almacenado por cada cápsula fue diferente:

Calor almacenado por la cápsula con parafina  $Q_P = 457,34 kJ$

Calor almacenado por la cápsula con brea  $Q_B = 263,47 kJ$

Calor almacenado por la cápsula con agua  $Q_A = 298,28 kJ$

Comparando con el del agua cada resultado del calor almacenado de los MCF, se puede determinar el porcentaje de calor acumulado por cada uno de los MCF con respecto al agua. Cada prueba experimental fue realizada en igualdad de condiciones climáticas y de tiempo. La relación del calor de la parafina con respecto al del agua es:

$$\frac{Q_P}{Q_A} * 100 \%$$

$$\frac{457,34 kJ}{298,28 kJ} * 100 \% \cong 153 \%,$$

es decir:

$$Q_P \cong 1,53 * Q_A. \quad (3-7)$$

Se encuentra entonces que la parafina supera en un 53 % el almacenamiento de energía con respecto al agua, y la brea tiene un porcentaje inferior de aproximadamente el 11 % comparado con la capacidad de almacenamiento en la cápsula con agua.

Partiendo de estos resultados, se procede a hacer el ejercicio contrario. Se supone que para almacenar la misma cantidad de calor, va a cambiar el volumen de almacenamiento. Si se

considera que para todos los materiales:

$$Q_P = Q_A = Q_B$$

Para calcular el volumen que ocuparía la parafina almacenando el mismo calor que el agua, se tiene:

$$Q_P = Q_A$$

$$\rho_A * V_P * c_A * \Delta T_P = \rho_A * V_A * c_A * \Delta T_A$$

$$V_P = \frac{\rho_A * V_A * c_A * \Delta T_A}{\rho_A * c_A * \Delta T_P} \quad (3-8)$$

Donde,

$\rho_A$  : densidad del agua.

$V_P$  : volumen de la capsula con parafina.

$c_A$  : calor especifico del agua.

$\Delta T_P$ : variación de la temperatura del agua en el contenedor luego de introducir la cápsula con parafina.

$V_A$  : volumen de la cápsula con agua.

$\Delta T_A$  : variación de la temperatura del agua en el contenedor luego de introducirla cápsula con agua.

Reemplazando los valores en la Ecuación 3-8:

$$V_P = \frac{(24, 2^{\circ}C - 18, 2^{\circ}C)}{(27, 2^{\circ}C - 18, 0^{\circ}C)} * V_A$$

$$V_P = (0, 65) * V_A \quad (3-9)$$

Es decir, una cápsula de parafina que almacena una misma cantidad de calor que una cápsula de agua ocuparía sólo un volumen del 65 % de esta última; dicho de otra manera, la parafina requiere de un 35 % menos de volumen que el agua para almacenar la misma energía. Esta relación es importante, ya que permite calcular relativamente la disminución del volumen de almacenamiento de energía térmica con MCF respecto al agua. La ecuación 3-9 puede ser usada para cualquier volumen sin grandes riesgos de error, asimismo para implementaciones mixtas, en donde una parte del almacenamiento sea a base de agua y otra como respaldo o refuerzo con material de cambio de fase.

## 3.6. CALOR REMANENTE DE LAS CÁPSULAS

El calor cedido por cada cápsula, como se mencionó anteriormente, es:

- Calor almacenado por la cápsula con parafina  $Q_P = 457,34 \text{ kJ}$
- Calor almacenado por la cápsula con brea  $Q_B = 263,47 \text{ kJ}$
- Calor almacenado por la cápsula con agua  $Q_A = 298,28 \text{ kJ}$

Se recalca además que queda un calor remanente, pues no todo el calor fue transmitido al agua, debido a que, por la segunda ley de la Termodinámica, el equilibrio de temperaturas ocurre a una temperatura mayor que la temperatura inicial (la cual fue de  $18^\circ\text{C}$ ). Calculemos el calor remanente para cada cápsula y su eficiencia.

### 3.6.1. Calor remanente en la parafina.

$$V_{\text{capsula de parafina}} = 1,51 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\Delta T_{\text{parafina}} = 27,2^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{parafina}} = (1,51 * 10^{-3} \text{ m}^3) * (916 \text{ kg/m}^3) = 1,38 \text{ kg}$$

- *Calor remanente de la parafina:*

$$Q_{\text{remanente de la parafina}} = m_p * c_p * \Delta T_p$$

$$Q_{R.P} = (1,38 \text{ kg}) * (3,126 \text{ KJ/(kg}^\circ\text{C)}) * (27,2^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C})$$

$$\mathbf{Q_{R.P} = 39,68 \text{ kJ}}$$

- *Calor total de la parafina:*

$$Q_T = Q_P + Q_{R.P}$$

$$Q_T = 457,34 \text{ kJ} + 39,68 \text{ kJ}$$

$$\mathbf{Q_T = 497,05 \text{ kJ}}$$

### 3.6.2. Calor remanente de la brea.

$$V_{\text{capsula de brea}} = 1,51 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\Delta T_{\text{Brea}} = 23,3^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{Brea}} = (1,51 * 10^{-3} \text{ m}^3) * (1110 \text{ kg/m}^3) = 1,68 \text{ kg}$$

- *Calor remanente de la breca:*

$$Q_{\text{remanente de la breca}} = m_B * c_B * \Delta T_B$$

$$Q_{R.B} = (1,68 \text{ kg}) * (1,243 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})) * (23,3^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C})$$

$$\mathbf{Q_{R.P} = 11,04 \text{ kJ}}$$

- *Calor total de la breca:*

$$Q_T = Q_P + Q_{R.P}$$

$$Q_T = 263,48 \text{ kJ} + 11,04 \text{ kJ}$$

$$\mathbf{Q_T = 274,52 \text{ kJ}}$$

### 3.6.3. Calor remanente del agua.

$$V_{\text{capsula con agua}} = 1,51 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\Delta T_{\text{Agua}} = 24,2^\circ\text{C} - 18,2^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{Agua}} = (1,51 * 10^{-3} \text{ m}^3) * (1000 \text{ kg}/\text{m}^3) = 1,51 \text{ kg}$$

- *Calor remanente del agua:*

$$Q_{\text{remanente del agua}} = m_A * c_A * \Delta T_A$$

$$Q_{R.B} = (1,51 \text{ kg}) * (4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})) * (24,2^\circ\text{C} - 18,2^\circ\text{C})$$

$$\mathbf{Q_{R.A} = 38,28 \text{ kJ}}$$

- *Calor total del agua:*

$$Q_T = Q_A + Q_{R.A}$$

$$Q_T = 298,28 \text{ kJ} + 38,28 \text{ kJ}$$

$$\mathbf{Q_T = 336,332 \text{ kJ}}$$

### 3.7. MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE CALOR DE LA CÁPSULA

Por medio de los cálculos del calor almacenado por cada cápsula y la relación de calor entre la parafina y el agua que fue determinada mediante la Ec 3-8, se prosiguió a determinar la potencia de cada cápsula.

La potencia de cápsula se halla a partir de la potencia conocida del tubo evacuado usado, la cual se conoce de la ficha técnica del fabricante y que es de 67.5 W.

El calor almacenado por la cápsula de parafina es 1.53 veces el calor almacenado por el agua en el tubo. Además, el calor del tubo se calcula mediante las horas sol de exposición, por la siguiente ecuación:

$$Q_{Tubo} = P_{Tubo} * R_{h.sol}, \quad (3-10)$$

Donde  $R_{h.sol}$  es la energía solar promedio diaria expresada en horas sol, que tiene un valor para cada lugar.

De la misma manera se hace con la cápsula utilizando la ecuación (Ec 3-10):

$$Q_C = 1,53 * Q_T = 1,53 * P_{Tubo} * R_{h.sol}$$

Comparando esta ecuación con la ecuación 3-8 se puede deducir que:

$$P_C = 1,53 * P_{Tubo}$$

Teniendo en cuenta que en Pamplona se tiene una energía solar diaria promedio de 4,5 horas sol, entonces la cápsula relativa tendría una potencia de:

$$P_C = (1,5)(67,5) = 101,25 \text{ W}$$

Así mismo, partiendo de la ecuación de calor se calcula la masa de agua que calentaría la cápsula a una diferencia de temperatura  $\Delta T$ :

$$Q_C = m * c_{agua} * \Delta T$$

$$m_{agua} = \frac{Q_C}{c_{agua} * \Delta T} = \frac{P_C * R_{h.sol}}{c_{agua} * \Delta T} \quad (3-11)$$

Mediante la Ecuación 3-11, se puede determinar la masa de agua almacenada a una temperatura  $\Delta T$  con una cápsula de material de cambio de fase, a partir de ella, también se puede calcular el número N de cápsulas requerido para incrementar la temperatura de una masa determinada de agua M en un  $\Delta T$ .

- *Número de tubos necesarios:*

$$N = \frac{(M * \Delta T)}{(24 * R_{h.sol})}, \quad (3-12)$$

De aquí se deduce la masa de agua elevada a una temperatura  $\Delta T$  teniendo el número de N de tubos:

$$M = 24,1 * N \frac{R_{h.sol}}{\Delta T_{Agua}} \quad (3-13)$$

# Capítulo 4

## ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.

### 4.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Los parámetros termodinámicos que caracterizan los materiales de cambio de fase del presente trabajo fueron analizados mediante dos métodos: calorimetría diferencial de barrido (DSC) y utilizando la fórmula de transferencia de calor, tomando como referencia el valor del calor específico del agua, el cual ya es suficientemente conocido.

#### 4.1.1. Caracterización de los materiales mediante DSC.

Las técnicas termo analíticas han sido y siguen siendo en la actualidad ampliamente utilizadas en la caracterización de materiales. El análisis térmico abarca todos los métodos de medida basados en el cambio, con la temperatura, de una propiedad física o mecánica del material. Las condiciones de fabricación de un producto, así como su historia y tratamientos térmicos, son decisivos en las propiedades finales del material, por lo que las técnicas termo analíticas son imprescindibles en cualquier proceso de control sobre la fabricación de un material.

#### Calorimetría diferencial de barrido (DSC.)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, Differential Scanning Calorimetry) permite el estudio de aquellos procesos en los que se produce una variación entálpica, por ejemplo, determinación de calores específicos, puntos de ebullición y fusión, pureza de compuestos cristalinos, entalpías de reacción y determinación de otras transiciones de primer y segundo orden.

En general, el DSC puede trabajar en un intervalo de temperaturas que va desde la tempe-

ratura del nitrógeno líquido hasta una temperatura de cerca de 600 °C. Por esta razón esta técnica de análisis se emplea para caracterizar aquellos materiales que sufren transiciones térmicas en dicho intervalo de temperaturas. La familia de materiales que precisamente presenta todas sus transiciones térmicas en ese intervalo es la de los polímeros.

Mediante el análisis por DSC de flujo de calor, se mide la diferencia de cantidad de calor de la muestra y de la referencia cuando la temperatura de la muestra se aumenta (o disminuye) linealmente. El DSC mide el flujo de calor en la muestra a estudiar y en un material inerte de referencia de forma independiente.

El calor total correspondiente a la transformación producida en una muestra ( $\Delta H_m$ ) se determina a partir del termograma obtenido en el DSC. El coeficiente de calibración,  $K_H$ , es la constante de proporcionalidad que relaciona directamente el área  $A$ , que hay entre el pico de una curva y la línea base con el cambio de entalpía, es decir:

$$\Delta H_m = K_H * A \quad (4-1)$$

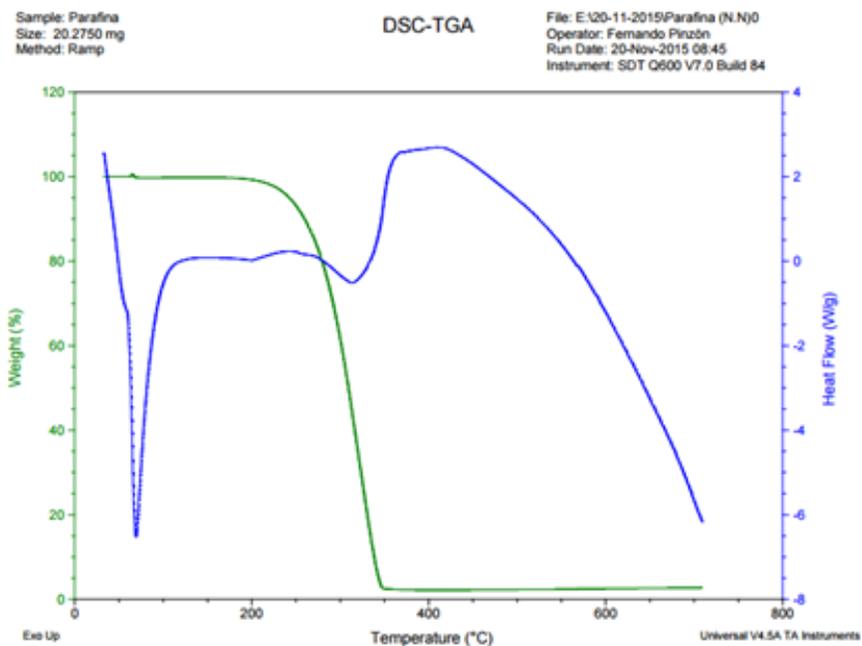
Para determinar  $K_H$  es necesario utilizar un material con calores de fusión perfectamente conocidos como muestra patrón. Con frecuencia se suelen utilizar metales de alta pureza como patrones de calibración.

Determinando el área del pico de la muestra patrón se puede calcular  $K_H$ . El valor de  $K_H$  puede utilizarse entonces para determinar valores de entalpía de cualquier otra sustancia ya que no depende de la velocidad de calentamiento ni de la temperatura. Cuando se hace un barrido a una velocidad determinada  $\delta T/\delta t$ , la temperatura de la muestra aumenta (o disminuye) linealmente, y el flujo de calor es:  $\delta H/\delta t = (\delta H/\delta T) * (\delta T/\delta t)$ ; es decir, el flujo de calor es proporcional a la velocidad de calentamiento ( $\delta T/\delta t$ ) y a la capacidad calorífica ( $c = \delta H/\delta t$ ). Por tanto, las curvas de DSC pueden representarse en función de la capacidad calorífica.

Para realizar este análisis se acudió al laboratorio de Calorimetría de la Universidad de Pamplona, estas pruebas permiten sustentar lo realizado de manera experimental y conocer con más certeza las propiedades físico-químicas de los dos MCF usados para este proyecto.

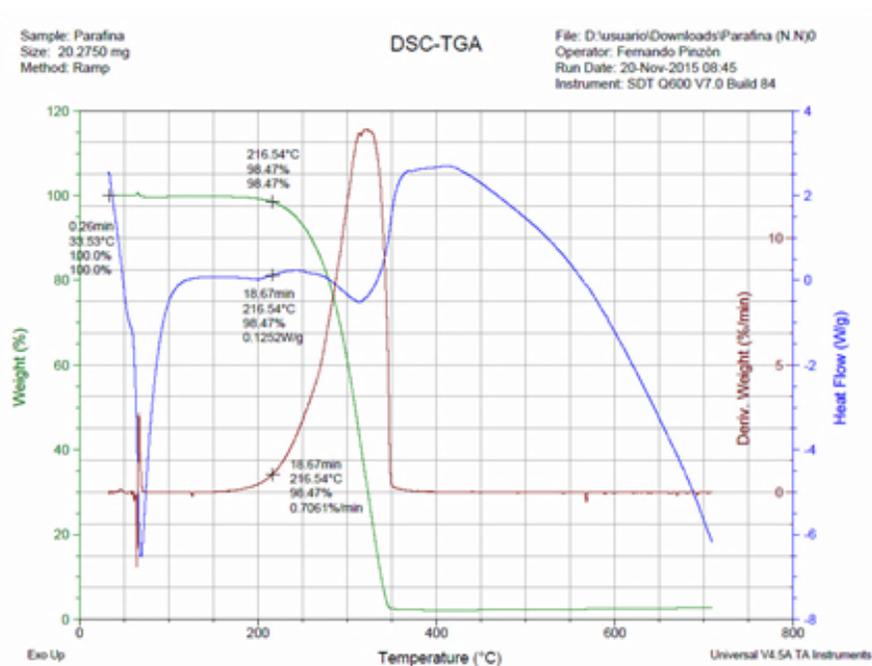
#### 4.1.1.1. Parafina.

En la Figura 4-1 se presenta la gráfica Temperatura vs. Flujo de calor y peso porcentual para la parafina mediante la prueba DSC-TGA.



**Figura 4-1:** Análisis por (DSC) de la Parafina Calor vs Temperatura.

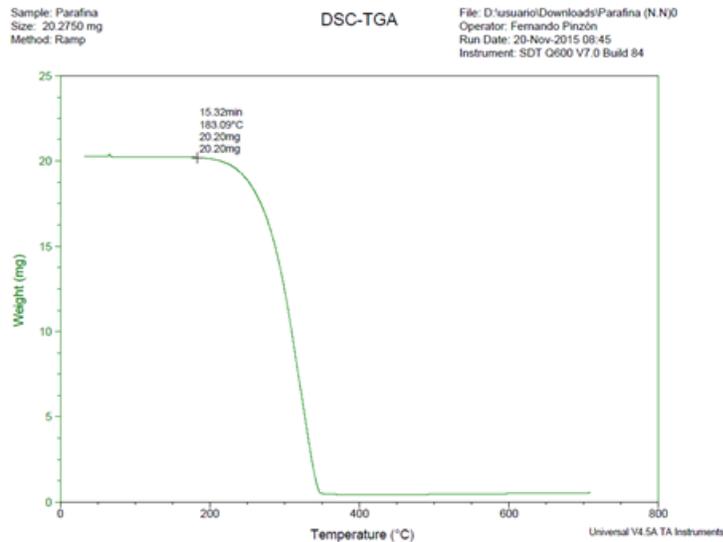
En la Figura 4-2 se presenta la gráfica Temperatura vs Flujo de calor, eso porcentual y peso derivado para la parafina mediante la prueba DSC-TGA.



**Figura 4-2:** Análisis por (DSC) de la Parafina Temperatura vs Flujo de calor.

En la Figura 4-3 se presenta la gráfica Temperatura vs. Peso para la parafina mediante la

prueba DSC-TGA



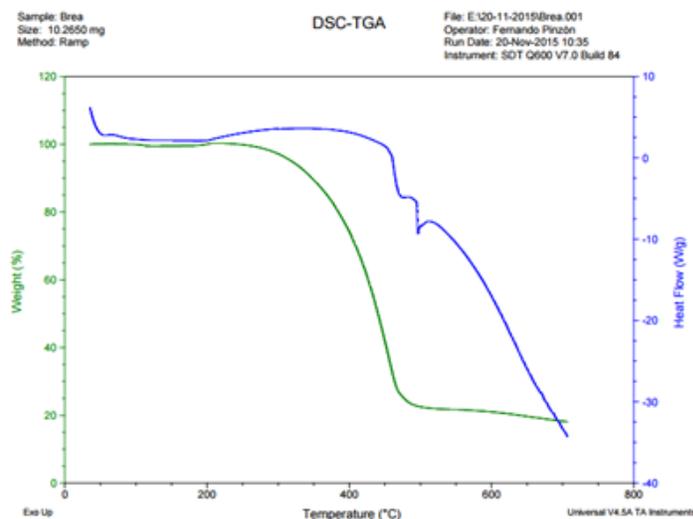
**Figura 4-3:** Análisis por (DSC) de la Parafina Peso vs Temperatura.

El valor de del calor específico  $c$  obtenido mediante la caracterización por (DSC-TGA) para la parafina es:

$$c=3,26 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

#### 4.1.1.2. Brea

En la Figura 4-4 se presenta la gráfica Temperatura vs. Flujo de calor y peso porcentual para la brea mediante la prueba DSC-TGA.



**Figura 4-4:** Análisis por (DSC) de la Brea Calor vs Temperatura.

En la Figura 4-5 se presenta la gráfica Temperatura vs. Flujo de calor y peso porcentual para la brea mediante la prueba DSC-TGA.

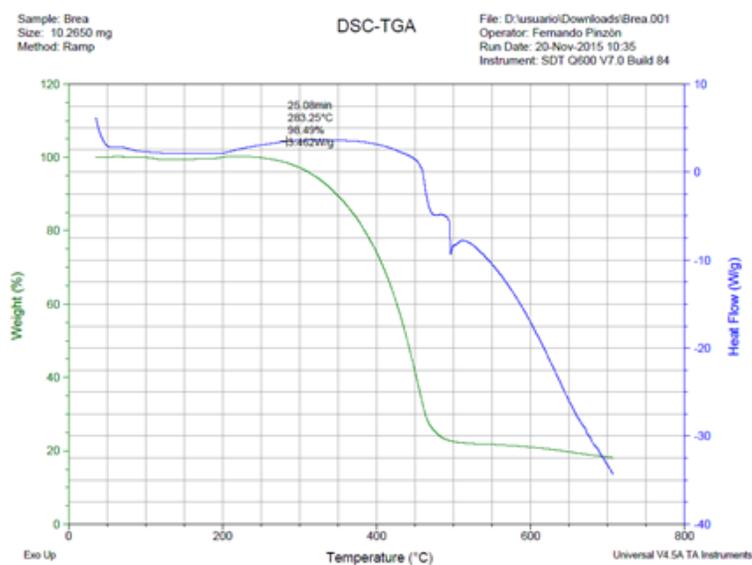


Figura 4-5: Análisis por (DSC) del flujo de calor vs temperatura

En la Figura 4-6 se presenta la gráfica Temperatura vs. Peso derivado para la brea mediante la prueba DSC-TGA.

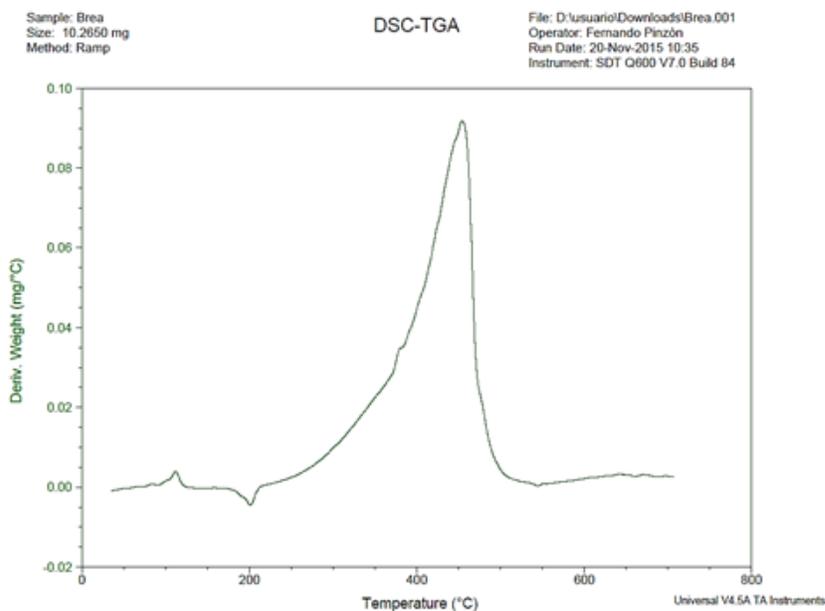


Figura 4-6: Análisis por (DSC) de la Brea Peso vs Temperatura

El valor de  $c$  obtenido mediante la caracterización por (DSC) para la brea es:

Carlos A. González V; Claudia P. Parra M.; Ariel R. Becerra B.

$$c = 1,357 \text{ KJ}/(\text{Kg } ^\circ\text{C})$$

#### 4.1.2. Cálculo experimental del calor específico de los MCF.

Con el fin de encontrar el calor específico de forma experimental de cada uno de los materiales de cambio de fase utilizados en el experimento (parafina y brea), se procedió a exponer cada una de las cápsulas a la radiación solar durante un tiempo determinado de forma simultánea, y se midieron las temperaturas en intervalos de 30 segundos durante tres horas de exposición a la radiación solar. Este procedimiento se repitió durante 15 días. De la misma manera se expuso a la radiación solar una cápsula de agua con el mismo volumen y se registraron las temperaturas para ésta. Conociendo por tablas el calor específico del agua y el comportamiento de las temperaturas, se pudo deducir mediante la Ecuación 2-5, el calor específico para cada MCF.

##### 4.1.2.1. Parafina.

Partiendo de los valores de temperatura obtenidos de las gráficas experimentales, y del volumen también calculado experimentalmente, se encontró el calor específico de la parafina:

$$c_2 = \frac{V_1 * \rho_1 * \Delta T_1}{V_2 * \rho_2 * \Delta T_2} * c_1$$

donde;

$c_2$  : calor específico de la parafina.

$V_2$  : volumen de la parafina.

$\rho_1$  : densidad del agua.

$\Delta T_1$  : diferencia de temperaturas del agua.

$V_1$  : volumen del agua.

$\rho_2$  : densidad de la parafina.

$\Delta T_2$  : diferencia de temperaturas de la parafina.

$c_1$  : calor específico del agua.

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$c_2 = \frac{1000\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)1,51 * 10^{-3}\text{m}^3 * (32 - 26)^\circ\text{C}}{1,51 * 10^{-3}\text{m}^3 * 916\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (52,9 - 44,1)^\circ\text{C}} * 4,2\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right)$$

entonces, el calor específico para la parafina resulta igual a:

$$C_2 = 3,126 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})}$$

Como se puede observar, el valor encontrado del calor específico de forma experimental es cercano al encontrado en las tablas bibliográficas para la parafina, y también es cercano al valor encontrado mediante el método DSC arriba descrito.

#### 4.1.2.2. Brea

Partiendo de los valores de temperatura obtenidos de las gráficas experimentales, y del volumen también calculado experimentalmente, se encontró el calor específico de la brea:

$$c_2 = \frac{V_1 * \rho_1 * \Delta T_1}{V_2 * \rho_2 * \Delta T_2} * c_1$$

donde;

$c_2$  : calor específico de la brea.

$V_2$  : volumen de la brea.

$\rho_1$  : densidad del agua.

$\Delta T_1$  : diferencia de temperaturas del agua.

$V_1$  : volumen del agua.

$\rho_2$  : densidad de la brea.

$\Delta T_2$  : diferencia de temperaturas de la brea.

$c_1$  : calor específico del agua.

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$c_2 = \frac{1000\left(\frac{kg}{m^3}\right)1,51 * 10^{-3}m^3 * (34 - 27)^\circ C}{1,51 * 10^{-3}m^3 * 1110\left(\frac{kg}{m^3}\right) * (69,2 - 47,9)^\circ C} * 4,2\left(\frac{kJ}{kg^\circ C}\right)$$

entonces, el calor específico para la brea resulta igual a:

$$C_2 = 1,243 \frac{kJ}{(kg \cdot ^\circ C)}$$

Como se puede observar, el valor encontrado del calor específico de forma experimental es cercano al encontrado mediante el método DSC arriba descrito.

## 4.2. RESULTADOS

### 4.2.1. Material de cambio de fase seleccionado para la construcción del prototipo de batería térmica solar

Para la selección del MCF a utilizar en la construcción del prototipo de batería térmica solar se realizaron pruebas experimentales con dos prototipos, cada uno con su respectivo material de cambio de fase (parafina y brea), con el fin de estudiar el comportamiento térmico de

ellos y su capacidad de almacenamiento de calor.

Como se puede observar en las Ecuaciones 9 y 10 el calor almacenado por la parafina supera en cerca de un 53,32% el calor almacenado por el agua en las mismas condiciones mientras que la brea comparada con el agua en el almacenamiento de energía está por debajo un 11,54%. Esto revela que la parafina es un mejor candidato para la elaboración de una batería térmica en comparación con la brea y con el agua sin cambiar de fase.

#### 4.2.2. Volumen de los MCF (parafina y brea) comparados con el volumen de agua para almacenar la misma energía

Se demostró mediante la relación de volúmenes que la parafina requiere de un 35% menos de volumen que el agua para almacenar la misma cantidad de energía.

$$V_P = (0,65)V_A$$

#### 4.2.3. Calor específico de los MCF usados en el desarrollo del proyecto mediante DSC y de manera experimental

Los resultados obtenidos para el cálculo del calor específico  $c$  de forma teórica mediante la búsqueda bibliográfica y los obtenidos de forma experimental, mediante el método DSC y de forma empírica son muy cercanos y se muestran en la tabla B-5.

Material	Valor teórico	Valor por DSC	Valor Experimental
Parafina	$c = 3,263 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$	$c = 3,26 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$	$c = 3,126 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$
Brea	No se encontraron valores	$c = 1,357 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$	$c = 1,243 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$

Tabla 4-1: Calores específicos de los MCF.

#### 4.2.4. Diseño final del prototipo con MCF

De acuerdo a los numerales 4.2.1 y 4.2.2 se puede concluir que el prototipo con MCF puede estar compuesto por los siguientes elementos:

1. **Cápsula madre.** Tubo de acero de  $1\frac{1}{2}$  pulgadas de diámetro y 1.5 m de longitud, con una cavidad para el tubo de calor y una apertura con rosca para el llenado de material de cambio de fase.

2. **Cápsula para el tubo de calor (disipador.)** Es un tubo de cobre de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro y 1.30 m de longitud.
3. **Lámina de encamisado de aluminio.** Es una lámina de calibre cc y de 9 cm de ancho x 1.6 m de largo.
4. **Material de cambio de fase:** Parafina.
5. **Tubo evacuado.** Los tubos tienen una longitud de 1.8 m, diámetro externo de 58 mm y diámetro interno de 46 mm.

# Capítulo 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

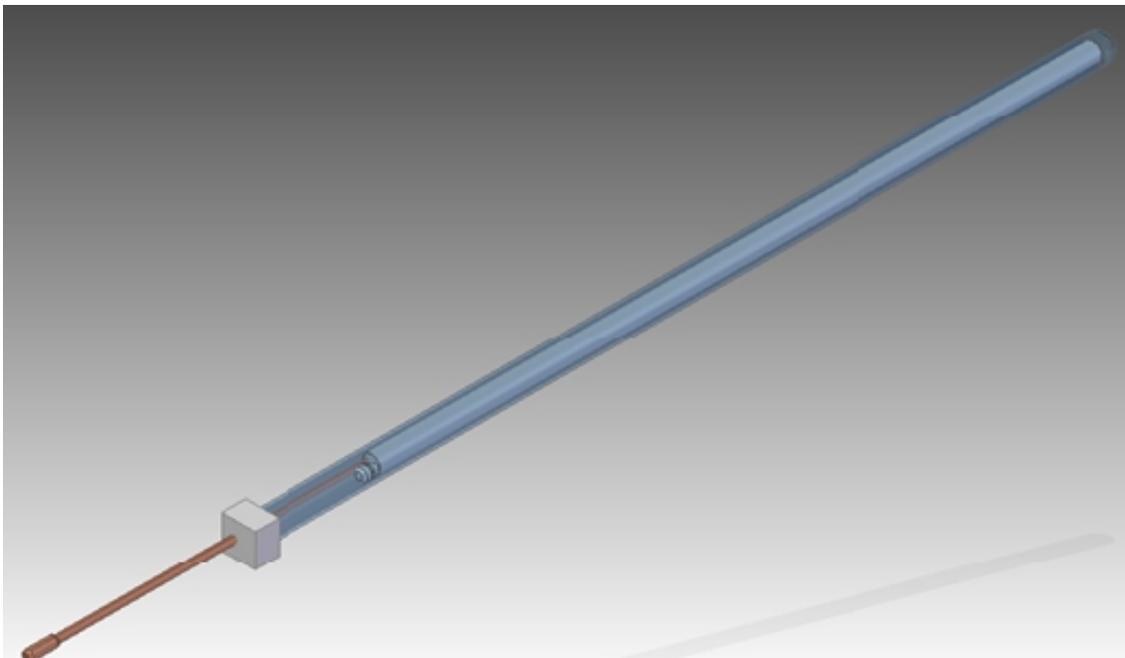
1. Se encontró que el almacenamiento de calor en la parafina como material de cambio de fase supera en más del 53 % el almacenamiento de calor en el agua sin cambiar de fase (a temperaturas menores de 100 °C). La brea está un 11 % por debajo de la capacidad para almacenar calor en comparación con el agua.
2. La cápsula diseñada permite ser utilizada en los calentadores convencionales de tubos evacuados sin tubo de calor gracias a sus dimensiones y forma. En este caso, en lugar de reducir el tamaño del calentador, se gana capacidad de almacenamiento de calor, es decir puede ser utilizado como batería térmica adicional.
3. Se determinó el calor específico de la brea y la parafina por dos métodos experimentales: método DSC - TGA y mediante la comparación experimental con el agua. Se encontró que los valores para los calores específicos de estos materiales no se diferenciaron por sus métodos de cálculo y están muy cerca de los valores que se encuentran en la bibliografía científica, ver Tabla 14. En el caso de la brea, debido a sus múltiples variantes de composición química en la bibliografía no se encontró un valor de referencia para su capacidad calorífica y en el presente trabajo se encontró para la brea un valor de calor específico de:  $1,357 \frac{KJ}{(Kg^{\circ}C)}$  mediante DSC, y  $1,243 \frac{KJ}{(Kg^{\circ}C)}$  mediante el cálculo experimental comparado con el agua.
4. Se estableció matemáticamente la relación entre el volumen de parafina como MCF para almacenar calor y el volumen de agua que almacena la misma energía, observándose que se requiere un 35 % menos de volumen con la parafina.
5. Se dedujo la relación matemática que permite encontrar la cantidad de cápsulas que se necesitan para elevar una cantidad M de agua a un  $\Delta T$  de temperatura (Ec 17).
6. Se dedujo la relación matemática que permite encontrar la masa de agua que se puede elevar un  $\Delta T$  con una cantidad N de cápsulas (Ec 18).

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Se ha estudiado un prototipo de bajo volumen para almacenamiento de energía térmica y se observó un aumento en el almacenamiento del 53,32%. Es interesante extender este estudio a sistemas de volúmenes mayores.

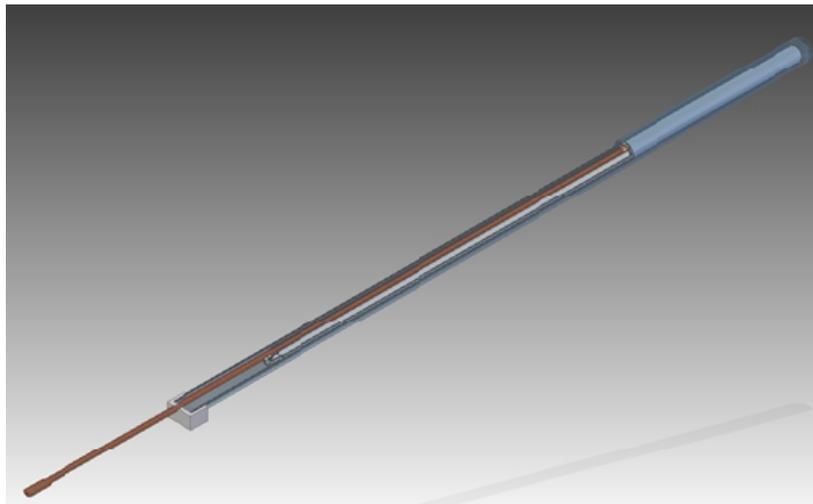
# Anexo A

## Planos

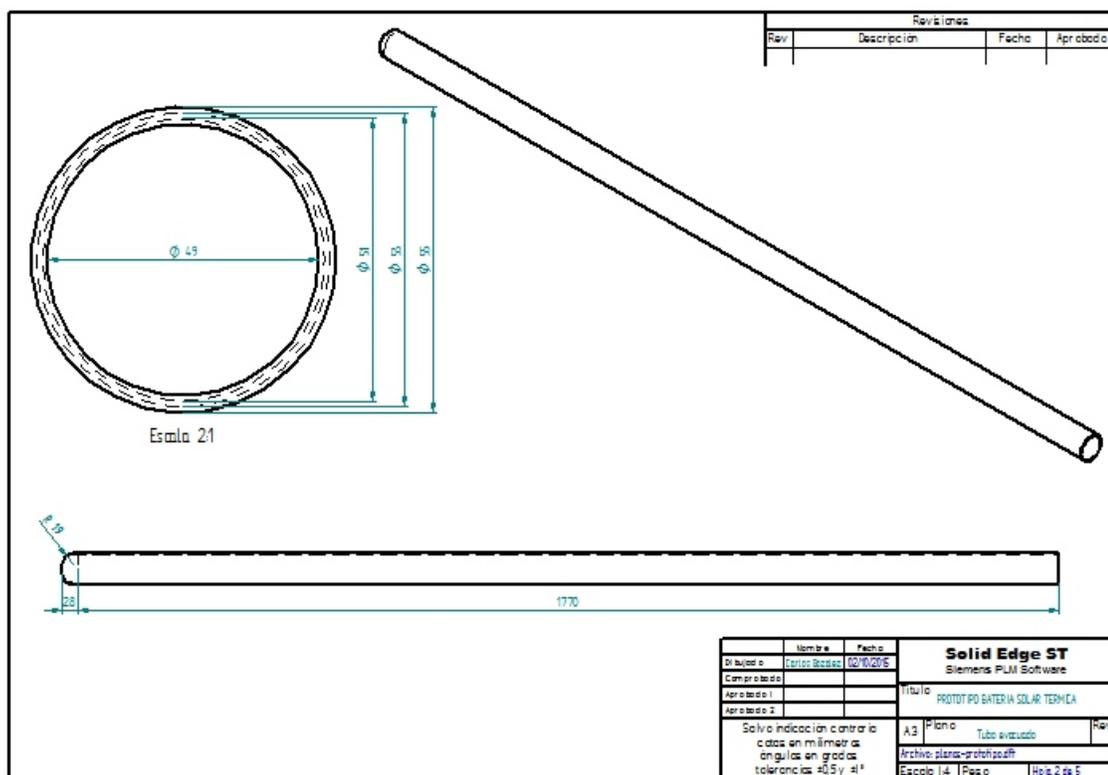


**Figura A-1:** Conjunto prototipo batería solar térmica CAD.

Carlos A. González V; Claudia P. Parra M.; Ariel R. Becerra B.



**Figura A-2:** Conjunto con corte lateral del prototipo de batería solar térmica.



**Figura A-3:** Plano tubo evacuado.

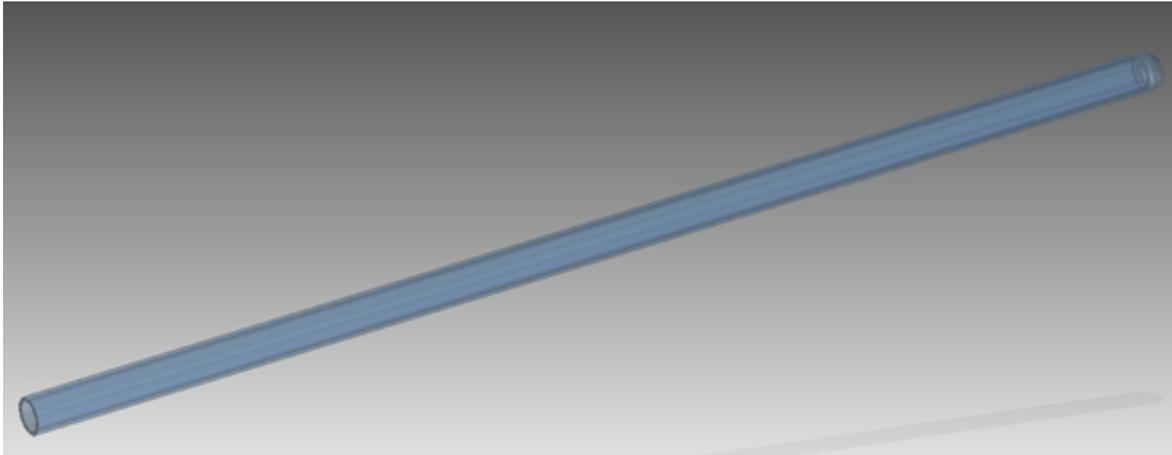


Figura A-4: Diseño CAD tubo evacuado.

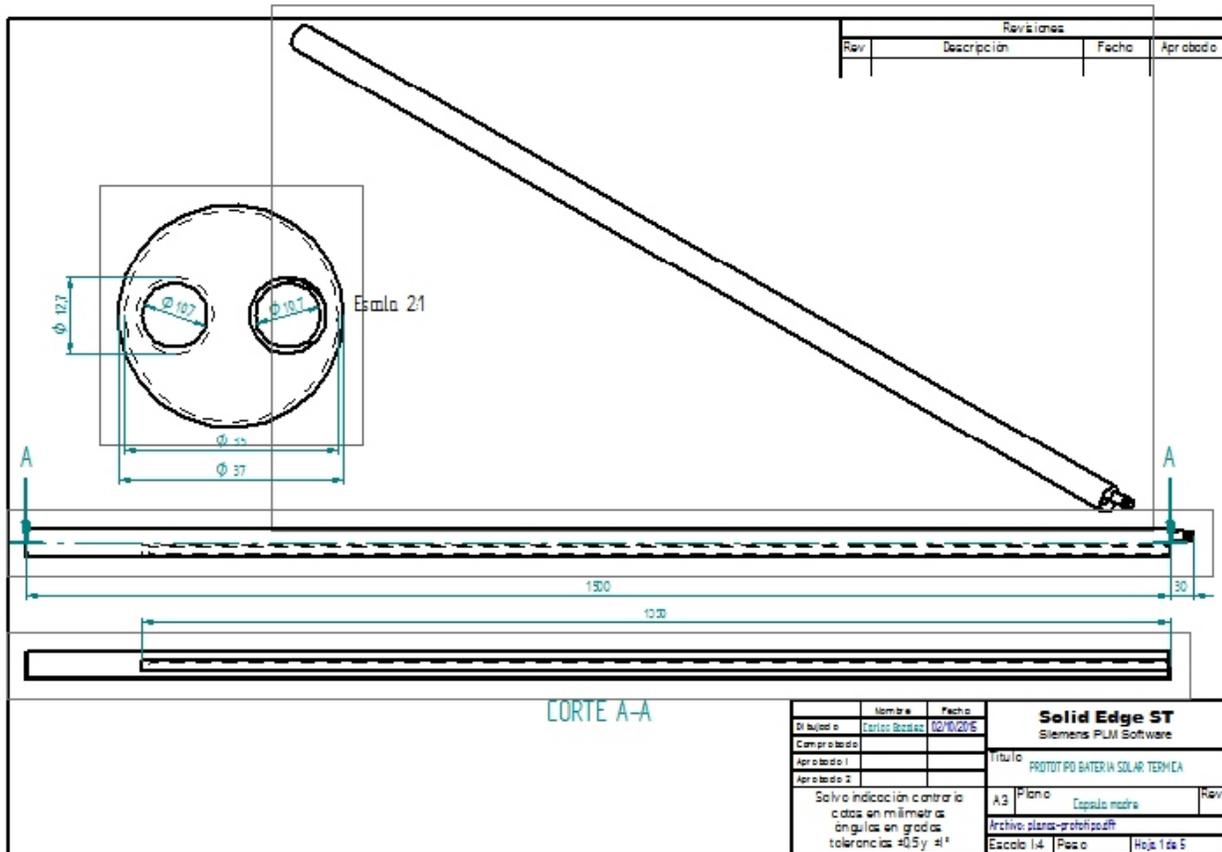
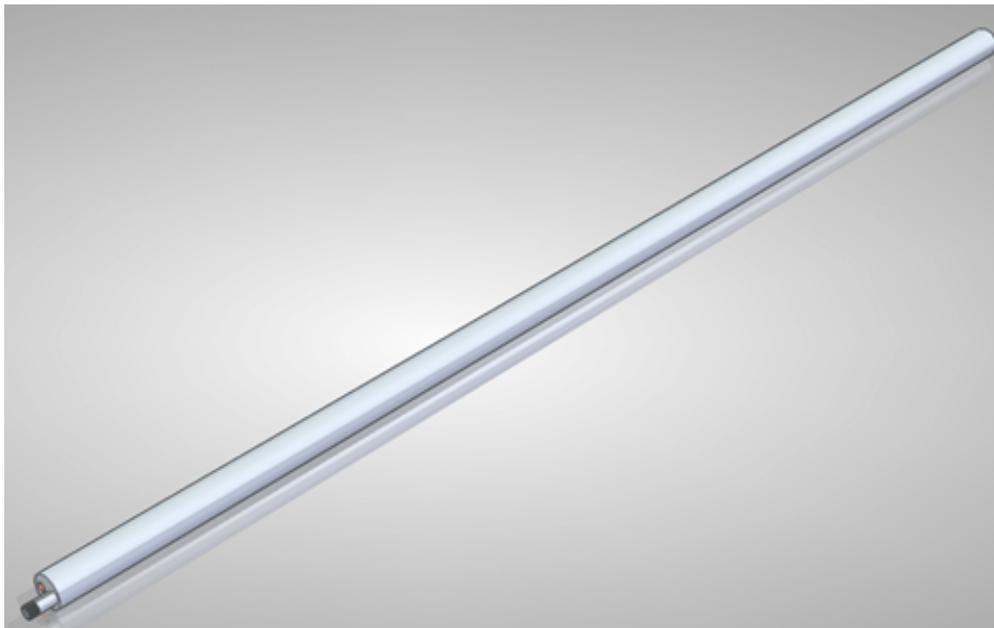
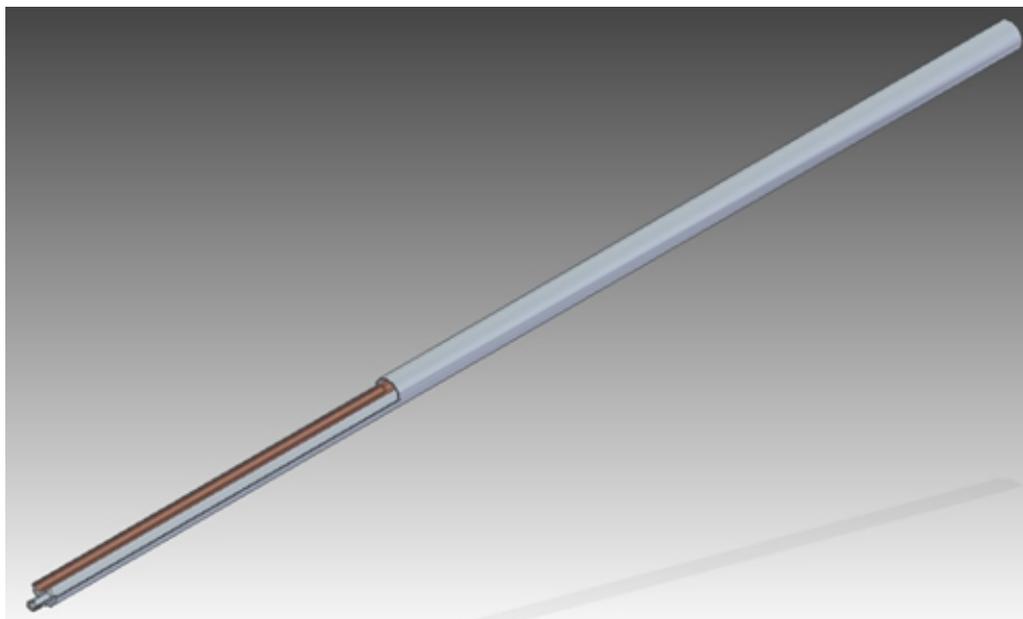


Figura A-5: Plano cápsula madre.



**Figura A-6:** Diseño CAD cápsula madre.



**Figura A-7:** Diseño CAD con corte lateral de la cápsula madre.

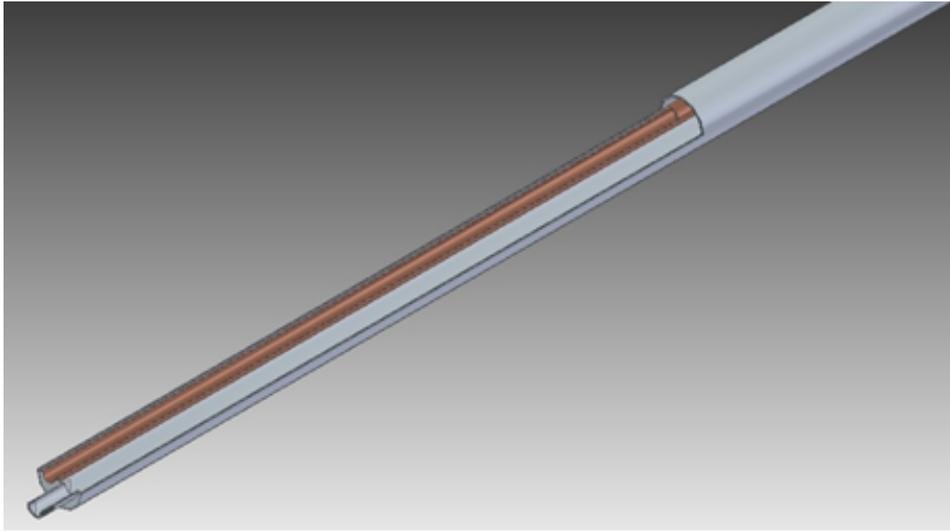


Figura A-8: Diseño CAD, acercamiento del corte lateral de la cápsula madre.

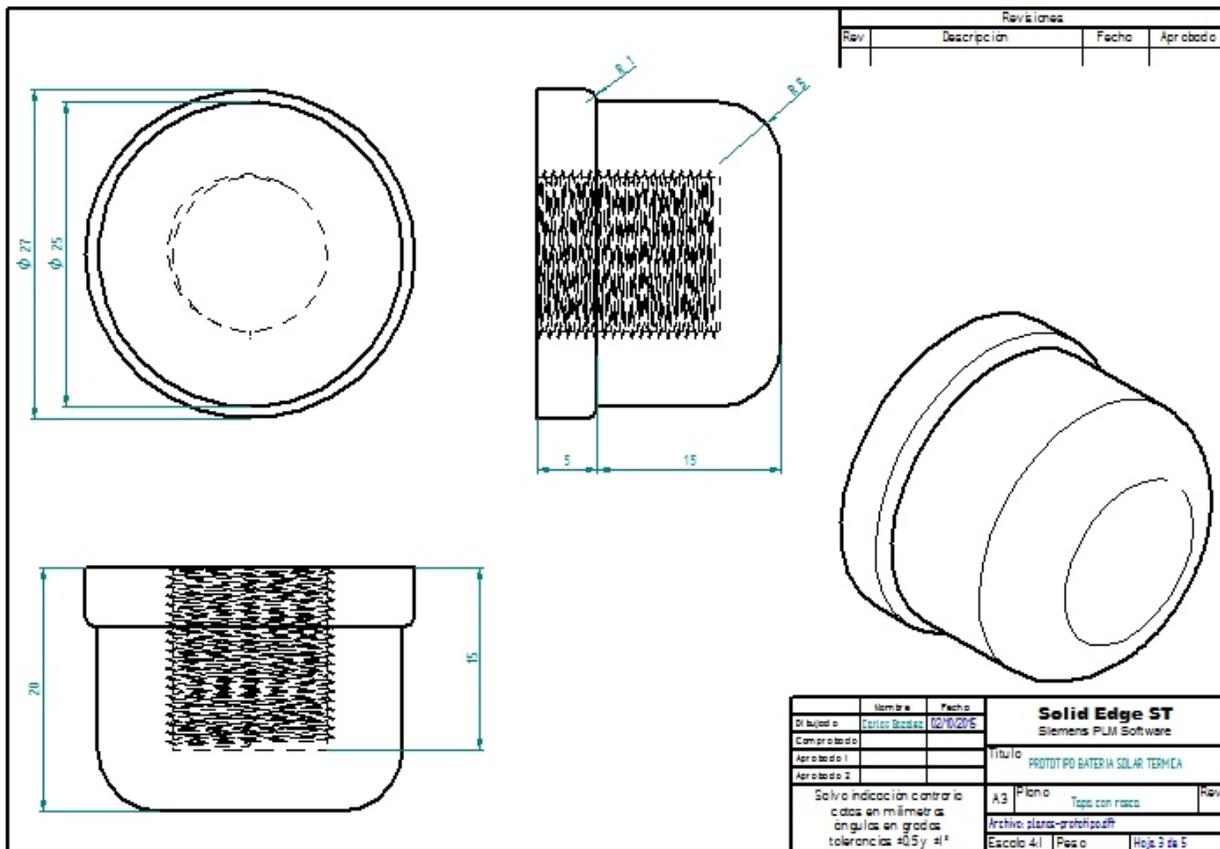


Figura A-9: Plano tapa con rosca de la cápsula madre.

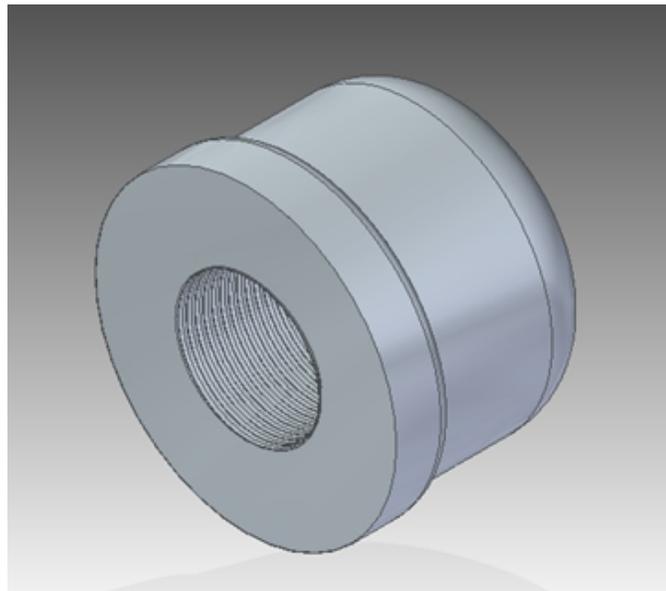


Figura A-10: Diseño CAD tapa con rosca de la cápsula madre.

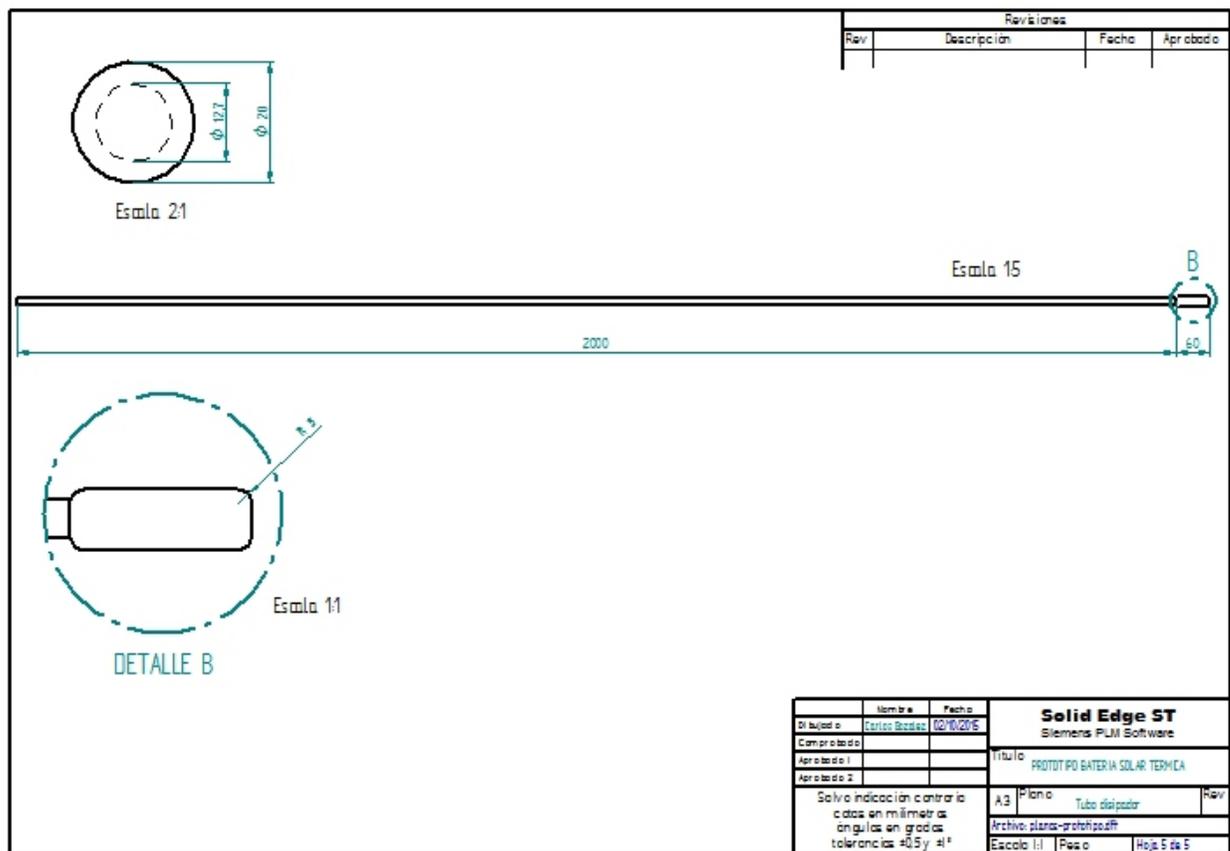


Figura A-11: Plano tubo disipador de calor.

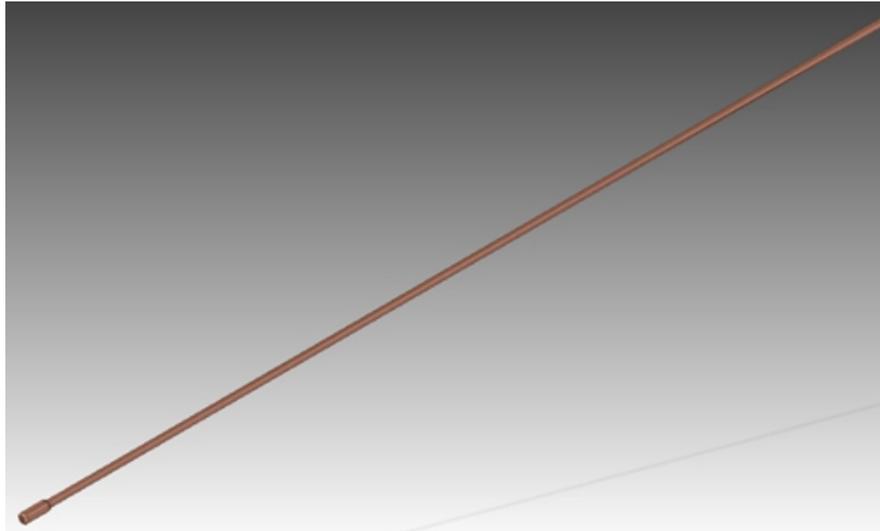


Figura A-12: Diseño CAD tubo disipador de calor.

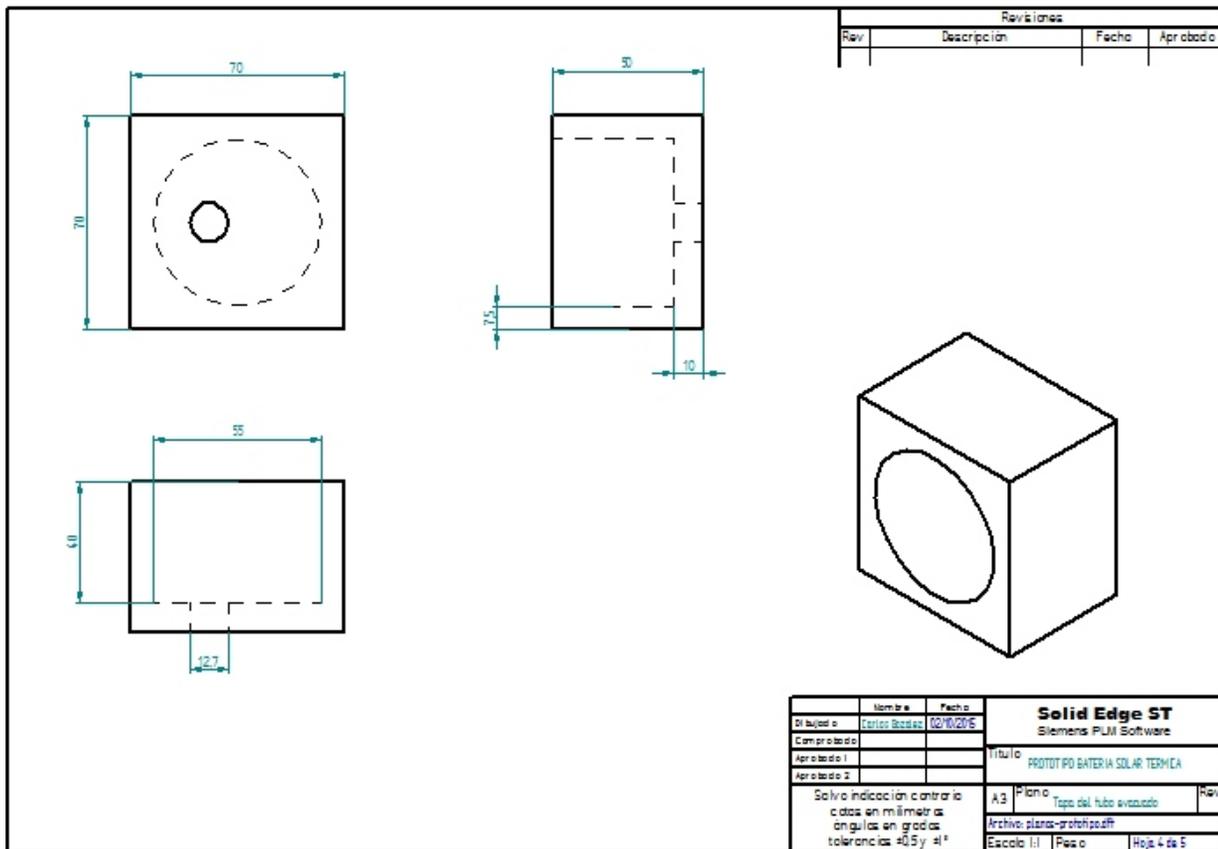
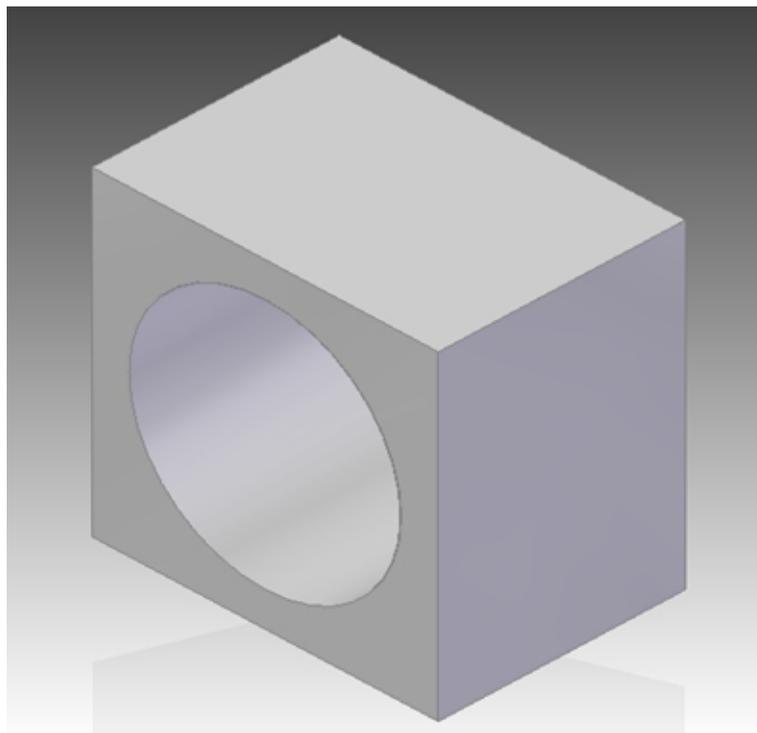
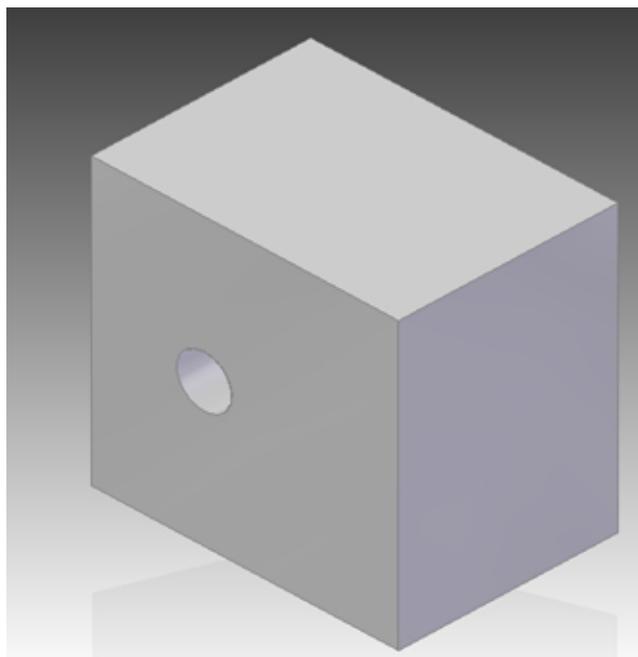


Figura A-13: . Plano tapa para el tubo evacuado.



**Figura A-14:** Diseño CAD tapa para el tubo disipador.



**Figura A-15:** Diseño CAD vista posterior de la tapa para el tubo evacuado.

# Anexo B

## Datos Experimentales

CARACTERIZACIÓN PROTOTIPO DE BATERÍA CON MCF. COMPARACIÓN BREA-AGUA-PARAFINA.				
Temperatura interna de la cápsula madre introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.				
<b>Fecha:</b>	VIERNES 20 DE NOVIEMBRE DE 2015			
<b>Hora de Inicio:</b>	10:00 am			
<b>T°ambiente promedio:</b>	18 °C			
<b>Clima:</b>	PARCIALMENTE NUBLADO			
TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°AGUA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
30	37.8	21.8	32.3	100
60	38.2	22.0	33.4	100
90	38,8	22,0	34,5	100
120	39,0	23,0	35,6	200
150	39,8	23,0	36,7	200
180	40,1	23,0	37,8	100
210	40,8	24,0	38,9	200
240	41,1	24,0	39,6	100
270	41,7	24,0	40,1	200
300	42,2	25,0	41,5	200
330	42,6	25,0	42,6	300
360	43,1	25,0	43,7	300
Sigue en la página siguiente.				

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°AGUA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
390	43,6	26,0	44,8	200
420	44,1	26,0	45,6	200
450	44,6	26,0	46,7	100
480	45,1	27,0	47,9	200
510	45,6	27,0	48,8	200
540	46,1	27,	49,8	200
570	46,6	28,0	50,8	200
600	47,1	28,0	51,8	200
630	47,5	28,0	52,8	200
660	48,0	29,0	53,9	200
690	48,5	29,0	54,9	200
720	49,0	29,0	55,9	200
750	49,5	30,0	56,9	200
780	50,0	30,0	57,9	300
810	50,5	30,0	59,0	300
840	51,0	31,0	60,0	300
870	51,5	31,0	61,0	300
900	52,0	31,0	62,0	300
930	52,4	32,0	63,0	300
960	52,9	32,0	64,1	300
990	53,4	32,0	65,1	300
1020	53,9	33,0	66,1	300
1050	54,4	33,0	67,1	200
1080	54,9	33,0	68,1	300
1110	55,4	34,0	69,2	300
1140	55,9	34,0	70,2	300
1170	56,4	34,0	71,2	300
1200	56,9	35,0	72,0	300
1230	57,3	35,0	73,2	300
1260	57,8	35,0	74,3	300
1290	58,3	36,0	75,3	300
1320	58,8	36,0	75,8	400
1350	59,3	36,0	76,1	400
1380	59,8	37,0	76,9	300
1410	60,1	37,0	77,7	300
1440	60,3	37,0	77,7	300
Sigue en la página siguiente.				

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°AGUA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
1470	60,5	38,0	78,2	300
1500	60,7	38,0	78,9	300
1530	60,9	38,0	79,2	300
1560	61,1	39,0	79,9	300
1590	61,3	39,0	80,1	300
1620	61,5	39,0	80,7	300
1650	61,7	40,0	81,3	300
1680	61,9	40,0	81,6	400
1710	62,1	40,0	82,4	400
1740	62,3	41,0	82,8	400
1770	62,5	41,0	83,5	400
1800	62,7	41,0	83,9	400
1830	62,8	42,0	84,2	300
1860	63,1	42,0	84,8	300
1890	63,3	42,0	85,5	300
1920	63,5	43,0	85,8	300
1950	63,7	43,0	86,3	300
1980	63,9	43,0	86,7	300
2010	64,1	44,0	87,1	400
2040	64,3	44,0	87,8	400
2070	64,5	44,0	88,2	400
2100	64,7	45,0	88,9	400
2130	64,9	45,0	90,0	300
2160	65,1	45,0	89,8	300
2190	65,3	46,0	90,6	300
2220	65,5	46,0	90,6	300
2250	65,7	46,0	91,6	300
2280	65,9	47,0	94,6	300
2310	66,1	47,0	93,6	200
2340	66,3	47,0	94,6	200
2370	66,5	48,0	95,7	300
2400	66,7	48,0	96,7	300
2430	66,9	48,0	97,7	300
2460	67,1	49,0	98,7	300
2490	67,3	49,0	99,7	200
2520	67,5	49,0	100,8	200
Sigue en la página siguiente.				

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°AGUA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
2550	67,7	50,0	101,8	200
2580	67,9	50,0	102,8	200
2610	68,1	50,0	103,8	200
2640	68,3	51,0	106,9	200
2670	68,5	51,0	105,8	200
2700	68,7	51,0	106,9	300
2730	68,9	52,0	107,9	300
2760	69,1	52,0	108,9	300
2790	69,3	52,0	108,9	300
2820	69,5	53,0	110,9	300
2850	69,7	53,0	113,0	300
2880	69,9	53,0	113,0	300
2910	70,1	54,0	114,0	300
2940	70,3	54,0	115,0	300
2970	70,5	54,0	116,0	300
3000	70,7	55,0	117,,1	300
3030	70,9	55,0	118,1	300
3060	71,1	55,0	119,1	300
3390	76,0	59,0	130,3	300
3420	76,5	59,0	131,3	300
3450	76,9	60,0	133,4	300
3480	77,4	60,0	133,4	300
3510	77,9	60,0	134,4	300
3540	78,4	61,0	136,4	300
3570	78,9	61,0	136,4	300
3600	79,4	61,0	136,4	300
3630	79,9	62,0	138,5	300
3660	80,4	62,0	139,5	300
3690	80,4	62,0	140,5	300
3720	81,4	63,0	141,5	300
3750	81,8	63,0	142,5	400
3780	82,3	63,0	143,6	400
3810	82,8	64,0	144,6	400
3840	83,3	64,0	145,6	400
3870	83,8	64,0	146,6	400
3990	85,8	66,6	150,7	400
Sigue en la página siguiente.				

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°AGUA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
3930	84,8	65,0	148,7	400
3960	85,3	65,0	149,7	400
3990	85,8	66,0	150,7	300
4020	86,3	66,0	150,7	300
4050	86,7	66,0	152,7	300
4080	87,2	67,0	153,8	300
4110	87,7	67,0	154,8	300
4140	88,2	67,0	155,8	300
4170	88,7	68,0	156,8	300
4200	89,2	68,0	157,8	300
4230	89,7	68,0	158,9	300
4260	90,2	69,0	159,9	300
4290	90,7	69,0	160,9	300
4320	91,2	69,0	161,9	300
4350	91,6	70,0	162,9	300
4380	92,1	71,0	163,9	300
4410	92,6	71,0	165,0	300
4440	93,1	71,0	166,0	300
4440	94,1	72,0	167,0	200
4470	94,6	72,0	167,0	200
4500	95,1	72,0	168,0	200
4530	95,6	73,0	169,0	200
4560	96,1	73,0	170,0	200
4590	96,5	73,0	171,0	200
4620	97,0	73,0	172,0	200
4650	97,5	74,0	173,0	200
4680	98,0	74,0	174,0	200
4710	98,5	74,0	175,0	200
4740	99,0	75,0	176,0	300
4800	99,5	75,0	177,0	300
4830	100,0	75,0	178,0	300
4860	100,5	75,0	179,0	300
4890	101,9	76,0	180,0	300
4920	102,2	76,0	181,0	300
4950	102,9	76,0	182,0	300
Sigue en la página siguiente.				

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°AGUA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
------------	-----------------	-------------	-------------	---------------------------

**Tabla B-1:** Caracterización y comparación parafina, brea y agua.

CARACTERIZACIÓN PROTOTIPO DE BATERÍA CON MCF.			
COMPARACIÓN PARAFINA-BREA			
Temperatura interna de la cápsula madre introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.			
<b>Fecha:</b>	SABADO 07 DE NOVIEMBRE DE 2015		
<b>Hora de Inicio:</b>	8:00 am		
<b>T°ambiente promedio:</b>	23 °C		
<b>Clima:</b>	PARCIALMENTE NUBLADO		
TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACION $\frac{W}{m^2}$
5	33,7	35,8	100
10	36,8	39,3	100
15	39,5	43,3	100
20	42,6	47,5	200
25	45,7	51,2	200
30	48,9	55,7	100
35	51,3	59,6	200
40	54,8	63,4	100
45	57,3	67,7	200
50	60,1	71,8	200
55	63,5	75,3	300
60	65,3	79,4	300
65	67,2	83,2	200
70	68,9	85,3	200
75	69,1	90,8	100
80	70,8	94,7	200
85	76,7	98,7	200
90	79,3	102,6	200
Sigue en la página siguiente.			

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACION $\frac{W}{m^2}$
95	81,9	106,5	200
100	84,5	110,4	200
105	87,1	114,4	200
110	89,7	118,3	200
115	92,3	122,2	200
120	94,8	126,2	200
125	97,4	130,1	200
130	100,0	134,0	300
135	102,6	137,9	300
140	105,2	141,9	300
145	107,8	148,8	300
150	110,4	149,7	300
155	113,0	153,7	300
160	115,6	157,6	300
175	123,3	169,4	300
180	125,9	173,3	300
185	128,5	177,2	200
190	131,1	181,2	300
195	133,7	185,1	300
200	136,3	189,0	300
205	138,9	193,0	300
210	141,4	196,9	300
215	144,0	200,8	300
220	146,6	204,7	300
225	149,2	208,7	300
230	151,8	212,6	400
235	154,4	216,5	400
240	157,0	220,5	300
245	159,6	224,4	300

**Tabla B-2:** Caracterización prototipo con material de cambio de fase (parafina-brea).

CARACTERIZACIÓN PROTOTIPO DE BATERÍA CON MCF.			
COMPARACIÓN PARAFINA-BREA			
Temperatura interna de la cápsula madre introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.			
<b>Fecha:</b>	SABADO 31 DE OCTUBRE DE 2015		
<b>Hora de Inicio:</b>	08:00 am		
<b>T°ambiente promedio:</b>	22 °C		
<b>Clima:</b>	PARCIALMENTE SOLEADO		
TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACION $\frac{W}{m^2}$
5	33,2	32,1	100
10	36,4	36,4	100
15	39,8	39,6	100
20	44,8	42,3	200
25	47,3	45,7	200
30	49,6	49,1	100
35	51,8	52,7	200
40	53,3	56,3	100
45	54,9	58,9	200
50	55,2	61,8	200
55	56,1	64,5	300
60	57,8	68,3	300
65	58,9	71,5	200
70	60,1	74,8	200
75	64,7	77,6	200
80	66,7	81,2	200
85	68,6	82,4	200
90	70,6	84,6	200
95	72,6	86,2	200
100	74,5	87,9	200
105	76,5	94,4	200
110	78,5	97,4	200
115	80,4	100,4	200
120	82,4	103,4	200
Sigue en la página siguiente.			

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACION $\frac{W}{m^2}$
125	84,4	106,4	200
130	86,3	109,4	300
135	88,3	112,5	300
140	90,3	115,5	300
145	92,2	118,5	300
150	94,2	121,5	300
155	96,2	124,5	300
160	98,1	127,5	300
175	104,0	136,6	300
180	106,0	139,6	300
185	108,0	142,6	200
190	110,0	145,6	300
195	111,9	148,7	300
200	113,9	151,7	300
205	115,9	154,7	300
210	117,8	157,7	300
215	119,8	160,7	300
220	121,8	163,7	300
225	123,7	166,8	300
230	125,7	169,8	400
235	127,7	172,8	400
240	129,6	175,8	300
245	131,6	178,8	300
250	133,6	181,8	200
260	137,5	187,9	200
265	139,5	190,9	200
270	141,4	193,9	200
275	143,4	196,9	300
280	145,4	199,9	300
285	147,3	203,0	300
290	149,3	206,0	300
295	151,3	209,0	300
300	153,2	212,0	300
305	155,2	215,0	300
310	157,2	218,0	300
315	159,1	221,1	300
Sigue en la página siguiente.			

TIEMPO (s)	T°PARAFINA (°C)	T°BREA (°C)	RADIACION $\frac{W}{m^2}$
320	161,1	224,1	300
325	163,1	227,1	300
330	165,0	230,1	300
335	167,0	233,1	300
340	169,0	236,1	300
345	170,9	239,1	300
350	172,9	242,2	300
355	174,9	245,2	300
360	176,8	248,2	300
365	178,8	251,2	300

**Tabla B-3:** Caracterización prototipo con MCF(parafina-brea).

CARACTERIZACIÓN PROTOTIPO BATERÍA SIN MATERIAL DE CAMBIO DE FASE		
(Temperatura interna de la cápsula madre introducida en el tubo evacuado expuesto a la radiación solar.)		
<b>Fecha:</b>	VIERNES 09 DE OCTUBRE DE 2015	
<b>Hora de Inicio:</b>	09:00 am	
<b>T°ambiente promedio:</b>	21 °C	
<b>Clima:</b>	NUBLADO	
TIEMPO (s)	T°TEMPERATURA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
5	35,6	100
10	38,4	100
15	41,6	100
20	44,3	200
25	47,2	200
30	50,3	100
35	53,8	200
40	56,7	100
Sigue en la página siguiente.		

TIEMPO (s)	T°TEMPERATURA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
45	59,6	200
50	62,5	200
55	65,6	300
60	67,4	300
65	70,3	200
70	73,2	200
75	76,8	200
80	82,4	200
85	86,5	200
90	89,3	200
95	93,8	200
100	96,2	200
105	96,2	200
110	102,3	200
115	104,5	200
120	106,8	200
125	109,7	200
130	113,5	300
135	117,8	300
140	120,4	300
145	122,6	300
150	125,6	300
155	128,5	300
160	137,3	300
175	140,3	300
180	143,2	300

**Tabla B-4:** Caracterización prototipo sin MCF.

CARACTERIZACIÓN TUBO DE VIDRIO EVACUADO		
TIEMPO VS TEMPERATURA		
Temperatura interna del tubo evacuado expuesto a la radiación solar.		
<b>Fecha:</b>	SÁBADO 03 DE OCTUBRE DE 2015	
<b>Hora de Inicio:</b>	08:30 am	
<b>T° ambiente promedio:</b>	22,4 °C	
<b>Clima:</b>	SOLEADO	
TIEMPO (s)	T° TEMPERATURA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
5	30,6	100
10	33,7	100
15	36,5	100
20	39,4	200
25	42,7	200
30	45,8	100
35	48,9	200
40	51,1	100
45	53,4	200
50	56,4	200
55	58,6	300
60	60,6	300
65	62,7	200
70	64,7	200
75	66,8	200
80	69,0	200
85	71,2	200
90	73,5	200
95	75,9	200
100	78,1	200
105	80,6	200
110	83,1	200
115	85,6	200
120	88,1	200
125	90,8	200
Sigue en la página siguiente.		

TIEMPO (s)	T° TEMPERATURA (°C)	RADIACIÓN $\frac{W}{m^2}$
130	92,7	300
135	94,4	300
140	96,6	300
145	98,5	300
150	100,6	300
155	103,4	300
160	105,6	300
175	107,9	300
180	110,1	300
185	112,4	300
190	120,1	300
195	122,5	300
200	124,8	300
205	127,2	300
210	129,5	300
215	131,8	300
220	134,2	300
225	136,5	300
230	138,8	300
235	141,2	300
240	143,5	300
245	145,9	300
250	148,2	300
255	150,5	300
260	152,9	300

**Tabla B-5:** Caracterización tubo evacuado.

# Bibliografía

- [1] A, Neila; G A. *Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento*. ANDAS. 2012
- [2] ASHBY, David R. ; REVERTÉ, EDITORIAL (Ed.): *Materiales para ingeniería II*. 2009
- [3] BEHLING, Stephan ; EDITORIAL GUSTAVO GILI, S.L. (Ed.): *Sol power*. 2002
- [4] BERTUZZI, A; Gottifredi J C. *Caracterización de los Materiales de cambio de fase*. Universidad nacional de salta. 2012
- [5] CANCELLO MARTÍNEZ, Pablo J. *Transferencia de calor avanzada mediante materiales de cambio de fase*. Escuela tècnica superior de ingeniería. 2012
- [6] CENGEL, Michael A. ; HILL, Mc G. (Ed.): *Termodinamica*. 2006
- [7] CONDE SÁNCHEZ, Zamir a. ; NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Universidad (Ed.): *Diseño de un calentador solar de placa de calor para calentamiento de agua para uso domestico*. 2014
- [8] CONEJO HERNÁNDEZ, F; Zaleta Aguilar A; Rodriguez Alejandro; Ramírez Hernandez A; Pérez Mata R.: Análisis de un sistema de almacenamiento térmico con cambio de fase mediante la norma nmx-es-001-normex-2005. En: *Somim* (2012)
- [9] DOMINGUEZ, Carmen: Aprovechamiento de los materiales de cambio de fase (MCF) en la climatización. En: *Informacion Tecnologica* (2009)
- [10] DOMÍNGUEZ, C; Arias J M. *Algunas posibilidades de aplicación de los acumuladores de cambio de fase en las energías renovables*. Ide@s CONCYTEG 7 (88). 2012
- [11] VALENCIANA DE LA ENERGIA, Agencia. *Guía práctica de energía solar térmica*. La imprenta CG. 2008
- [12] ENERGY, Sunflower R. *Renewable Energy*. 2013

- 
- [13] GARCÍA, José M<sup>a</sup>; Domínguez Manuel; Viti A. *Instalaciones de climatización con materiales de cambio de fase microencapsulados*. 2009
- [14] GONZALEZ M, Ana. *Almacenamiento energetico en MCF*. UNIVERSAL TEC. 2012
- [15] OUNAE. *Energía solar*. 2012
- [16] PONTIN, J M; Lema A I. *Análisis numérico del comportamiento térmico de un horno solar con material de cambio de fase*. Universidad Nacional de Rio Cuarto. 2013
- [17] ROCIO UTANDE, Clemente. *Materiales de cambio de fase basados en la caleccfación*. Universidad Carlos III de Madrid. 2013
- [18] RUFES MARTINEZ, Pedro ; MARCOMBO, S.A (Ed.): *Energía solar termica tecnicas para su aprovechamiento*. 2010
- [19] S.A.S, Heliotérmica. *Colectores solares*. 2015