

# ANEXOS

---

**“Evaluación técnica y ambiental de la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) en la operación de las placas fotovoltaicas integradas en edificios (BIPV)”**

Autora

Patricia Royo Gutiérrez

Director

Germán Ferreira Ferreira

Titulación: Ingeniería Industrial

Especialidad: Energía y Tecnología de Calor y Fluidos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA)

2013 / 2014



## **TABLA DE CONTENIDO DE ANEXOS**

<b>Índice de Figuras de Anexos.....</b>	<b>3</b>
<b>Índice de Tablas de Anexos .....</b>	<b>4</b>
<b>A Anexo: Estado del Arte.....</b>	<b>5</b>
Materiales para almacenamiento .....	5
Materiales de cambio de fase: PCM.....	6
Definición.....	6
Clasificación.....	6
Propiedades características .....	7
Encapsulación .....	8
Aplicaciones.....	8
Placas Solares Fotovoltaicas .....	8
Definición.....	8
Principio de funcionamiento.....	9
Tipos de placas .....	9
Generaciones de PV .....	11
Temperatura de operación, Eficiencia y Potencia Pico .....	11
Aplicación de PCM en BIPV .....	13
<b>B Anexo: Localización geográfica y Variables climatológicas .....</b>	<b>17</b>
Localización geográfica - Severidades Climáticas .....	17
Variables Climatológicas .....	18
<b>C Anexo: Caracterización de PV y PCM.....</b>	<b>19</b>
Identificación de las características de PV.....	19
Selección del material de cambio de fase.....	20
Tablas PCM globales: Orgánicos, Inorgánicos y Eutécticos .....	20
Mapas puntos PCM.....	29
Tablas de alternativas PCM para Zaragoza.....	32
<b>D Anexo: Comportamiento de operación BIPV con y sin PCM .....</b>	<b>34</b>
Operación de BIPV sin PCM.....	34
Programa EES cálculo sin PCM para Zaragoza.....	34
Operación de BIPV con PCM y Análisis de los parámetros críticos de diseño.....	35
Programa EES cálculo con PCM de distintos parámetros críticos .....	35
Gráficos mensuales de Zaragoza para análisis de parámetros críticos.....	41

Gráficas comparativas de Tpv de alternativas Zaragoza según espesor .....	51
Comparación de los mejores comportamientos de PCM en BIPV Zaragoza.....	54
Viabilidad en SC distintas .....	55
Datos geográficos y climatológicos de nueva SC: Sevilla.....	55
Gráficas de temperatura y eficiencia para nueva SC: Sevilla.....	55
<b>E Anexo: Implicaciones Ambientales y Viabilidad Económica.....</b>	<b>60</b>
Tiempo de vida útil y degradación.....	60
Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV .....	63
Análisis económico.....	68
Precios elementos.....	68
Tablas de VAN, TIR y Payback .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS DE ANEXOS

Figura A-1. Calor sensible y latente en la evolución temporal de la fase al aumentar temepratura .....	5
Figura A-2. Clasificación esquemática de los PCM.....	6
Figura A-3. Clasificación de las placas fotovoltaicas (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012).....	9
Figura A-4. Evolución temporal de los tipos de PV y el incremento en su eficiencia % (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012). Fuente: NREL .....	10
Figura A-5. Tpv [°C] a lo largo del tiempo, para distintos valores de irradiación G= 500, 750 y 1000 [W/m <sup>2</sup> ]. (Hasan y col., 2010) .....	11
Figura A-6. Potencia Máxima y Voc en función de Tpv, G= 1000W/m <sup>2</sup> constante. (Qiang Fu, 2013).....	12
Figura A-7. Diagrama esquemático de la transferencia de calor en el sistema BIPV/PCM (Huang, Eames, y Norton, 2004).....	14
Figura B-1. Zonas climáticas a partir de SV en España. Apéndice D del documento básico HE (CTE).....	17
Figura B-2. Mapa de España con las 12 Zonas Climáticas. Fuente: Construmatica.....	18
Figura C-1. Mapa de puntos para PCM Orgánicos. Representan su Tfusión [°C] y H[kJ/kg] .....	29
Figura C-2. Mapa de puntos para PCM Inorgánicos. Representan su Tfusión [°C] y H[kJ/kg] .....	30
Figura C-3. Mapa de puntos para PCM Eutécticos. Representan su Tfusión [°C] y H[kJ/kg] .....	31
Figura D-1. Comparación de Tpv [°C] y ηPV[%] con y sin PCM en función de Tfusion para Zaragoza .....	50
Figura D-2. Comparación de Tpv [°C] con y sin PCM en función del espesor x para Zaragoza .....	53
Figura D-3. Comparación de Tpv [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Zaragoza.....	54
Figura D-4. Tpv anuales SIN PCM en Sevilla [°C] .....	55
Figura D-5. Eficiencias anuales SIN PCM en Sevilla ηPV[%] .....	56
Figura D-6. Comparación de temperaturas [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Sevilla .....	58
Figura E-1. Fases principales y estructura para la realización de un ACV.....	63
Figura E-2. Porcentajes relativos de los criterios de impacto ambiental del método RECIPE para el ACV de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS DE ANEXOS

Tabla C-1. PCM Orgánicos.....	20
Tabla C-2. PCM Inorgánicos .....	23
Tabla C-3. PCM Eutécticos.....	25
Tabla C-4. Alternativas para <b>Tfusion</b> en torno a los 30°C.....	32
Tabla C-5. Alternativas para <b>Tfusion</b> en torno a los 40°C.....	32
Tabla D-1. Coeficientes SNL (Trinuruk 2009).....	34
Tabla D-2. Parámetros críticos de diseño relativos a PCM .....	35
Tabla E-1. $R_D$ en función de $T_{pv}$ para dos valores de $E_a$ .....	62
Tabla E-2. Dimensiones y masa del contenedor metálico de aluminio para PCM.....	64
Tabla E-3. Porcentajes de masa del PCM.....	64
Tabla E-4. Indicadores criterios de impacto ambiental del método RECIPE para el ACV de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM .....	66
Tabla E-5. Ahorro Energético [ $kWh/m^2$ ] de cada mes del año.....	69
Tabla E-6. Datos de entrada para el análisis económico.....	69
Tabla E-7. Datos de salida para análisis económico.....	70
Tabla E-8. Relación tiempo de vida útil y tiempo de retorno.....	70

## A ANEXO: ESTADO DEL ARTE

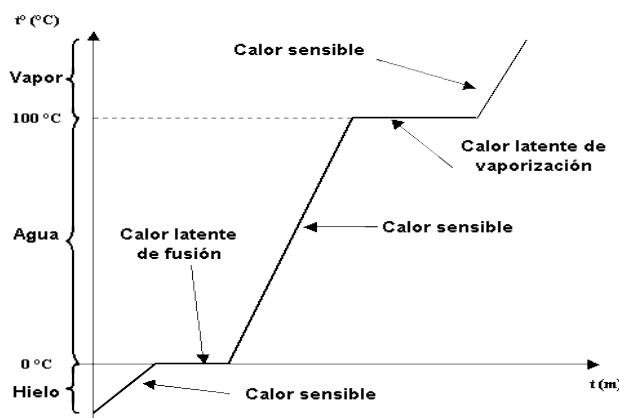
Para dar el primer paso, es necesaria una revisión del Estado del Arte y de la literatura. El análisis de publicaciones que engloben los temas a tratar permite obtener una idea inicial y general. Para ello, ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>) se erige como la fuente principal de recursos.

### Materiales para almacenamiento

Los materiales usados para el almacenamiento de energía solar térmica se dividen en tres categorías, dependiendo de los mecanismos de almacenamiento que utilicen: por calor sensible, por calor latente o químicamente.

En primer lugar, como aclaración es recomendable dar una definición sencilla de calor latente y calor sensible (*Sharma y col., 2009*):

- ▶ Calor sensible es la energía que absorbe un cuerpo y hace que aumente su temperatura sin afectar ni su estructura molecular ni, por tanto, su estado. Es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas a la que se somete y a la masa del cuerpo o sustancia. Esta constante de proporcionalidad es el calor específico [ $J/kg^*K$ ].
- ▶ Calor latente es la energía que necesita un cuerpo para cambiar de fase, modificando su estructura molecular. A pesar de absorber calor, no hay un aumento de temperatura, como se aprecia en la *Figura A-1* quedando prácticamente constante durante el proceso. Es directamente proporcional a la masa y al calor latente de fusión,  $H [J/kg]$ .



**Figura A-1. Calor sensible y latente en la evolución temporal de la fase al aumentar temepratura**

En la elección del material, se debe hacer un balance entre las ventajas e inconvenientes que ofrecen cada uno de ellos. *Tian y Zhao (2013)* resumen las principales características, y a raíz de ellas, se expone que:

- Por calor sensible: Es la tecnología más desarrollada y más económica. Por el contrario, tiene la menor capacidad de almacenamiento, aumentando significativamente en tamaño del sistema.
- Por calor latente: El calor latente de fusión es entre 100 y 200 veces mayor que el sensible, de modo que aumenta notablemente la capacidad de almacenamiento. En su contra están los bajos valores de conductividad térmica [ $0.2-0.5 \text{ W/m}^*K$ ]. De ahí la necesidad de adoptar técnicas para mejorar la transferencia de calor.

- Químicamente: Posee la mayor capacidad de almacenamiento, pero estos procesos se ven restringidos por su novedad ya que no han sido profundamente investigados. También por la implicación de complicados reactores, su inestabilidad y su débil reversibilidad a largo plazo.

Haciendo un balance de las posibilidades que ofrecen, la elección se centró el calor latente, debido a su alta capacidad de almacenamiento, amplio estudio literario previo y las técnicas disponibles para cubrir sus carencias.

## Materiales de cambio de fase: PCM

### Definición

Un PCM (Phase Change Material en inglés) es una sustancia con capacidad de almacenar y liberar calor latente, además de mantener una temperatura estable durante el proceso de absorción o liberación de calor ([Kelly, 2000](#); [Sharma S.D., 2005](#)). Como su propio nombre indica, es un material capaz de cambiar de fase. De hecho, cualquier material podría ser clasificado como PCM. Obviamente, cada uno tendrá especial interés en una u otra aplicación dependiendo del rango de temperatura en el que se produzca este cambio de fase.

### Clasificación

La división se hace en tres grupos atendiendo a su composición química: orgánicos, inorgánicos y eutécticos. Sin embargo, existe controversia en cómo clasificar los subgrupos de PCM, ya que no están uniformemente definidos. Se da una breve descripción de cada tipo para resaltar las características de cada grupo, con el apoyo de los trabajos de [Memon \(2014\)](#), [Sharma y col. \(2009\)](#) y [Zalba y col. \(2003\)](#).



Figura A-2. Clasificación esquemática de los PCM

#### ► **Orgánicos**

Los materiales orgánicos se dividen en compuestos parafínicos y no parafínicos. Algunas de sus principales ventajas son la capacidad de auto-nucleación (cristalizando con poco o ningún subenfriamiento), puede cambiar de fase durante varios ciclos sin que haya ni segregación ni su consecuente degradación. Estos compuestos son inertes y estables por debajo de los 500°C. Además, no son tóxicos ni corrosivos, pudiendo reciclarse el 100%. Por el contrario, su precio hace que solo algunas de estas sustancias

sean consideradas para ciertas aplicaciones. Por un lado, las parafinas consisten en una mezcla de cadenas de n-alcanos de fórmula química  $C_nH_{2n+2}$ , cuyo punto de fusión y calor latente de fusión crecen con el número de átomos de carbono. Por otro lado, los no parafínicos incluyen los ácidos grasos, saturados, alcoholes, glicoles, esteres... son el grupo más numeroso y con un amplísimo rango de propiedades. Tienen la ventaja de poseer altos calores latentes de fusión, sin embargo su conductividad térmica es baja.

#### ► Inorgánicos

Dentro de este grupo se distinguen las sales hidratadas, de fórmula química  $MH_2O$ , donde M es un compuesto inorgánico. Destacan su alta densidad volumétrica de almacenamiento y su alta conductividad térmica, en torno a  $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Otra ventaja es que el coste es moderado, debido a su abundante disponibilidad, comparado con los orgánicos. Por el contrario, tienen gran variación de volumen al cambiar de fase, y problemas como subenfriamiento antes de la cristalización y segregación; la solución para por el uso de agentes nucleantes. Dentro del otro subgroupo, se engloban los demás inorgánicos como el agua, pero la mayoría son los metales. Este tipo de materiales no se ha estudiado extensamente, por lo que muchas de sus propiedades son desconocidas y su uso poco frecuente. Los metales son caros comparados con los otros PCM, y normalmente su alta densidad conlleva un exceso de peso no deseado. Sin embargo, tanto su alta capacidad de conducción térmica como su alto punto de fusión hacen de ellos una herramienta con poderoso potencial.

#### ► Eutécticos

Los eutécticos son la mezcla de dos o más compuestos orgánicos y/o inorgánicos, abriendo las posibilidades de combinar las ventajas de ambos tipos. No suele haber segregación en sus cambios de fase porque cristalizan congruentemente. Poseen la ventaja de tener bien definida su temperatura de fusión, y no un intervalo. Desafortunadamente, el campo de investigación es reciente y no hay mucha información acerca de sus propiedades termofísicas.

#### Propiedades características

Los requisitos básicos impuestos sobre los PCM para ser utilizados en aplicaciones energéticas han sido formulados por diversos autores, (*Abhat, 1983; Sharma y col., 2009*), y coinciden en que estos materiales deberían poseer las siguientes características:

- La temperatura de fusión que se adapte al rango de operación deseado
- Alto calor latente de fusión
- Alta conductividad térmica
- Densidad moderada (para evitar grandes volúmenes pero sin ser muy pesado)
- Buena estabilidad química durante su vida útil
- Inerte para no reaccionar con los otros compuestos que estén en contacto
- Mínima variación de volumen al cambiar de fase
- Evitar subenfriamiento
- Suficiente ratio de cristalización
- No degradación, ni corrosión
- Materiales no tóxicos
- No inflamables
- Abundantes y fácilmente disponibles
- Económicos
- Reciclables y con nulo o bajo impacto medioambiental

### Encapsulación

Anteriormente se señalaron algunas características indeseables de los PCM. Para paliar su efecto se utiliza el método de encapsulación, el cual consiste en separar el PCM de su entorno para que no se disperse en su fase líquida y sea estable. Hay tres tipos dependiendo del continente: macroencapsulados, cuando los contenedores que envuelven las partículas PCM son de un tamaño considerable ( $<1\text{mm}$  de diámetro); microencapsulados, si dichas partículas tienen de 1 a  $1000\mu\text{m}$  de diámetro; y la más novedosa, nanoencapsulado, con partículas de diámetro menor que  $1000\text{nm}$ .

En la última década, se ha desarrollado y estudiado un nuevo tipo de PCM en forma estable (SSPCM), mezclados normalmente con polímeros [Cai y col. \(2008\)](#). A favor tiene que no hay necesidad de elementos adicionales para su aplicación; en su contra está difusión gradual del PCM. Como solución para evitar estas pérdidas de material, el microencapsulado se erige como la mejor alternativa. Algunas de las ventajas que ofrecen tanto su geometría, las mejoras en compatibilidad, baja reactividad con el medio externo envolvente, así como un control volumétrico durante el cambio de fase ([Farid y col., 2004](#); [Salunkhe y Shembekar, 2012](#)).

El proceso de microencapsulación es el proceso de revestimiento individual de partículas con una película continua para producir cápsulas de tamaño micrométrico. Se compone de la corteza y el núcleo de PCM, generalmente con un ratio de composición en peso de 20-80%, respectivamente. Los distintos métodos para microencapsular, se categorizan en físicos, químico-físicos y químicos; de los cuales el más utilizado es la polimerización ([Jamekhorshid, Sadrameli, y Farid, 2014](#)).

### Aplicaciones

Dado el amplio rango de temperatura de fusión y calor latente de fusión, las aplicaciones de los PCM no se restringen a un solo campo. Su utilización ha ido desarrollándose en las últimas décadas conforme se descubrían nuevas características. En la siguiente revisión de [Zalba y col. \(2003\)](#) se dividen las aplicaciones en dos grupos principales: protección térmica y almacenamiento. En el primer grupo sería conveniente una conductividad térmica baja, al contrario que en el segundo donde se requieren valores elevados.

Las aplicaciones de los PCM se resumen a continuación. La refrigeración tanto en componentes electrónicos y motores eléctricos o de combustión, como en la industria alimentaria (conservación de alimento), medicina (transporte de sangre, terapia de frío-calor) y química (reducción de picos exotérmicos en reacciones). Su capacidad de almacenamiento destaca en la energía solar y construcción bioclimática (parafinas con HDPE). También señalar la aclimatación de edificios (calefacción y agua caliente sanitaria), invernaderos, vehículos...

## Placas Solares Fotovoltaicas

### Definición

Fotovoltaico (PV, en inglés Photovoltaic) es la mezcla de luz y electricidad, haciendo referencia a la conversión que se produce en este tipo de placas. Aunque ya en 1839, el físico francés Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, no sería hasta 1883 cuando se construyó la primera célula sola. El primitivo dispositivo de Charles Fritts, presentaba una eficiencia de sólo un 1% ([Singh, 2013](#)). Era solo el comienzo, pero dio pie a sucesivas mejoras, alcanzando valores superiores al 40% en el 2010 (ver la posterior [Figura A-4](#)). Para que la energía solar sea una de las bases energéticas, es más

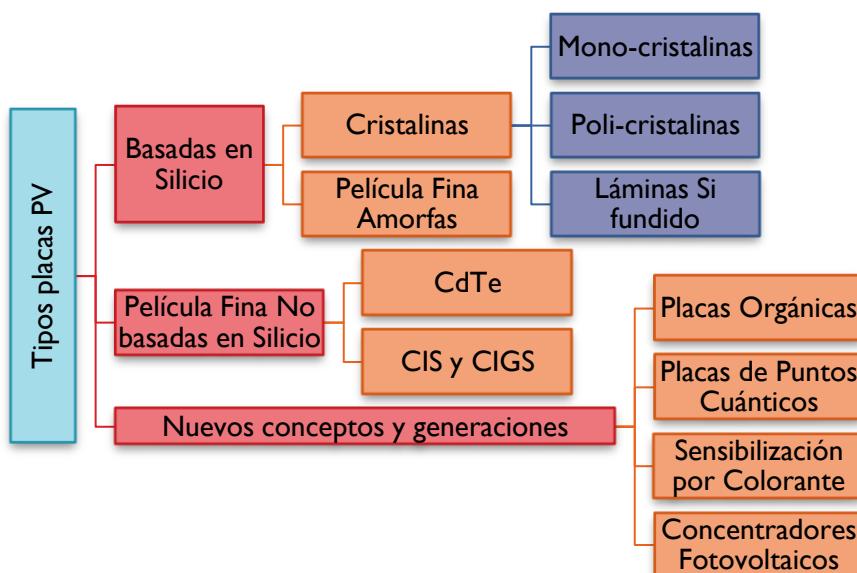
que necesario conseguir un porcentaje de conversión irradiación/electricidad lo más alto posible y disminuir las pérdidas de calor. Y es ahí donde se fija el enfoque de este proyecto, con la ayuda de los PCM. Para ampliar la información relativa a los paneles fotovoltaicos, su funcionamiento de generación de electricidad, materiales y generaciones de PV se recomienda el siguiente libro de los autores *Goetzberger y Hoffmann (2005)*. En los apartados posteriores, se resumen los aspectos principales.

### Principio de funcionamiento

Una explicación simplificada es que los fotones que provienen de la radiación solar, impactan y penetran en la placa. Los materiales semiconductores, como pueden ser Silicio (Si) o Arseniuro de Galio (GaAs), los absorben. En este proceso, los fotones golpean los electrones, alojados en orbitales de energía cuantizada, liberándolos de los átomos a los que estaban confinados. Esto les permite circular libremente por el material y producir electricidad. Mientras, los huecos, como cargas positivas que son, dejados por los electrones fluyen en sentido opuesto.

### Tipos de placas

La mayoría de las placas en uso están hechas de Silicio (Si), procesada con semiconductores como boro y fósforo. Otras cambian su material principal, basándose en materiales como arseniuro de galio (GaAs), telururo de cadmio (CdTe), diseleniuro de indio con cobre (CIS) y diseleniuro de galio, indio y cobre (CIGS). Poco a poco, las nuevas generaciones incorporan nuevos materiales y posibilidades al mercado. Más detalles acerca de los materiales en los siguientes artículos: (*Parida, Iniyani, y Goic, 2011; Tyagi y col., 2013*). La *Figura A-3* presenta la clasificación de PV:



**Figura A-3. Clasificación de las placas fotovoltaicas (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012)**

En las placas con Si, la efectividad varía dependiendo del tamaño de los cristales. Un mayor tamaño aumenta la eficiencia, sin embargo también lo hace el peso y el coste. Las eficiencias de las placas varían en función del diseño y los materiales (*Tyagi y col., 2013*). En las monocristalinas llega hoy en día casi hasta el 25%, mientras que las policristalinas entre 15 y 18%. Las amorfas por su parte se quedan en un 10%; aunque su coste y peso son muy inferiores. Las placas de película fina se mueven entre el 10 y el 18%, encontrando en CdTe y CIGS los materiales que mejor relación coste-eficacia presentan. En septiembre de 2013, el Instituto de Fraunhofer para los Sistemas de

Energía Solar ([ISE](#)), Soitec, CEA-Leti y el Centro Helmholtz de Berlín, anunciaron conjuntamente el logro de un nuevo récord mundial en conversión con 44.7% de eficiencia, utilizando unas placas solares multijuntura con semiconductores del tipo III-V. También se van introduciendo nuevos materiales, tales como partículas orgánicas o células sensibilizadas con colorante todavía tienen un baja eficiencia en torno al 11.4%, sin embargo son totalmente ecológicas.

Actualmente, muchas investigaciones se están llevando a cabo para lograr el aumento de la eficiencia. Según el artículo de [Tyagi y col. \(2013\)](#), es probable que eficiencias de un 45% sean demostradas dentro de un par de años, mientras que, si se sigue un arduo y tenaz desarrollo, el 50% sería una aproximación real y alcanzable. Pero a corto plazo, las mejoras en la eficiencia para placas solares comerciales sería lo que facilitaría su despegue en el mercado.

Investigaciones recientes, como las recogidas en la publicación de [Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes \(2012\)](#), entre ellas la generación por excitación múltiple (MEG, del inglés Multiple Excitation Generation), abren nuevas posibilidades con semiconductores de nanocristales y placas de puntos cuánticos. En este mismo estudio, se recoge ilustrativamente, como se aprecia en la [Figura A-4](#), la evolución temporal durante los últimos 40 años de los distintos tipos de placas solares y su eficiencia, alcanzando cada vez valores mayores hasta superar el 40%.

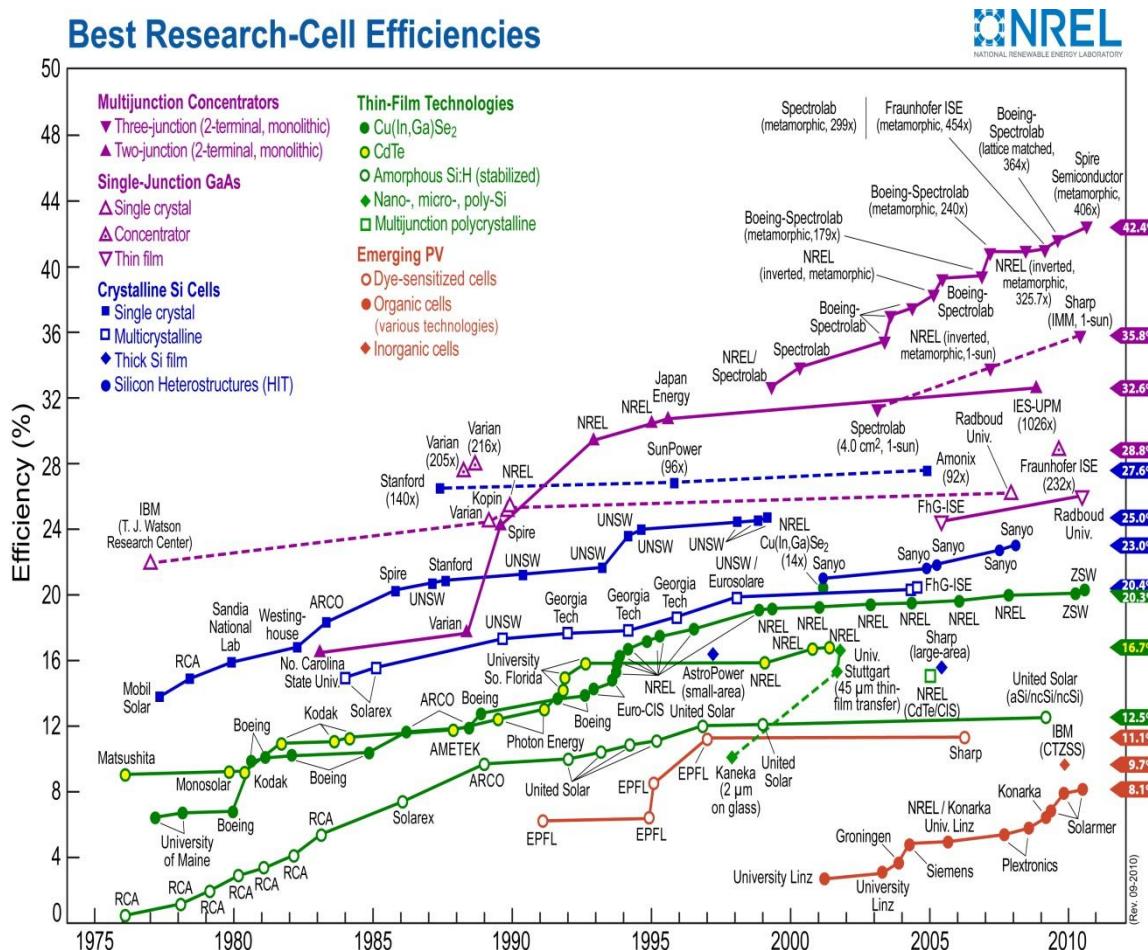


Figura A-4. Evolución temporal de los tipos de PV y el incremento en su eficiencia % (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012). Fuente: NREL

## Generaciones de PV

La continua evolución de las placas fotovoltaicas se categoriza en cuatro generaciones:

La primera generación consiste en una gran superficie de cristal y una capa con unión diodo p-n. También son denominadas como células solares basadas en obleas de silicio. Actualmente, constituyen el mayor porcentaje de placas PV terrestres en el mercado.

La segunda generación destaca por tener capas de semiconductores de reducido espesor. La inclusión de materiales como el silicio amorfo, monocrystalino y policristalino, telururo de cadmio, sulfuros y seleniuros de indio, galio y arsenio prometen ratios de eficiencia más elevados. La tecnología de película fina permite reducir los costes por la disminución de masa. Son muy apropiadas para la industria textil, ya que son ligeras y flexibles.

La tercera generación rompe con la idea de diodos p-n, y surgen los dispositivos de huecos cuánticos y otros que incorporan nanotubos de carbono. Entre sus aplicaciones se encuentran las células foto-electroquímicas, células solares de polímeros, células con incorporación de nanocristales y sensibilizadas con colorante. Con ellas se podría crear pintura que recubriría las fachadas o las carreteras para generar energía. Su comercialización se prevé para el 2020.

La cuarta generación de placas solares uniría las nanopartículas con polímeros para formar una capa simple multiespectral. Apilando varias de estas capas se puede llegar a sacar provecho del espectro infrarrojo. Su meta es lograr más eficiencia y una reducción de coste. Basadas en la tecnología multiunión, se han usado en las misiones de Marte que ha llevado a cabo la NASA (del inglés, North American Space Agency).

## Temperatura de operación, Eficiencia y Potencia Pico

Respecto al comportamiento de las principales variables dentro de una placa fotovoltaica, se han reunido revisiones con fórmulas que relacionan la temperatura del módulo PV, la potencia eléctrica de salida, la eficiencia de conversión eléctrica y sus dependencias entre ellas (*Dubey, Sarvaiya, y Seshadri, 2013; Skoplaki y Palyvos, 2009*).

### ► Temperatura de operación: $T_{pv}$

Hay varios factores que influyen: materiales de fabricación (absorbancia  $\alpha$  y transmitancia  $\tau$ ), espesor de la placa, condiciones ambientales que lo rodean (temperatura del aire, humedad, viento...), forma de montaje, si es aislada o integrada y, sobre todo, la irradiación solar recibida  $G$ , como se ve en la *Figura A-5*:

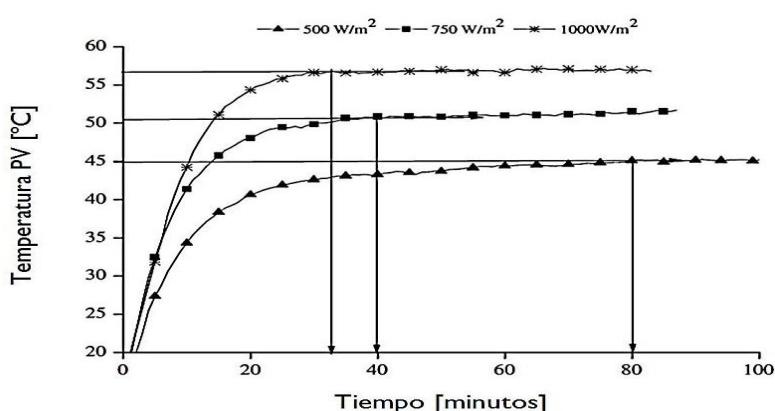


Figura A-5.  $T_{pv}$  [°C] a lo largo del tiempo, para distintos valores de irradiación  $G= 500, 750$  y  $1000$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. (Hasan y col., 2010)

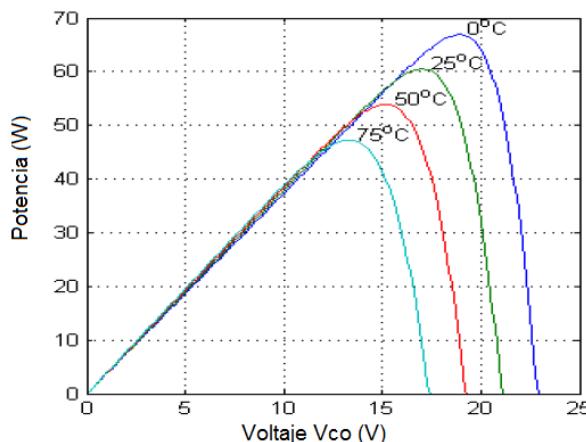
### ► Potencia Pico: $P_{max}$

El punto de potencia máximo o pico varía con la incidencia de la luz solar, como se puede ver en la *Ecuación A-1*:

**Ecuación A-1. Potencia pico [W] en función de factor de llenado, voltaje [V] e intensidad [A]**

$$P_{max} = V_{pv} * I_{pv} = FF * V_{oc} * I_{cc}$$

En la cual  $FF$  corresponde al factor de llenado,  $I_{cc}$  es la corriente en cortocircuito y  $V_{oc}$  el voltaje en circuito abierto. La potencia pico corresponde al punto óptimo de la curva I-V característica de la placa. Según el estudio que *Zondag (2008)* publicó, tanto  $V_{oc}$  como  $FF$  disminuyen con la temperatura de operación de la placa. Esto se debe a la contracción del hueco en la banda, por lo que la tensión en vacío bajará. Durante este tiempo también habrá más cargas que pasen de la banda de valencia a la de conducción. Es verdad que aumentaría  $I_{cc}$ , pero solo ligeramente. Como consecuencia, la potencia pico,  $P_{max}$ , también decrece al aumentar la temperatura de operación.



**Figura A-6. Potencia Máxima y  $V_{oc}$  en función de  $T_{pv}$ ,  $G= 1000\text{W/m}^2$  constante. (Qiang Fu, 2013)**

Así se calcularía la potencia máxima teórica. Pero, la *Ecuación A-2*, permite saber cuál es la potencia de operación en cada momento como producto de la irradiación solar, el área y la eficiencia de la PV.

**Ecuación A-2. Potencia  $P$  [W] directamente proporcional a la irradiación solar  $G$  [ $\text{W/m}^2$ ], al área  $A$  [ $\text{m}^2$ ] y eficiencia de la PV:**

$$P = G * A * \eta_{pv}$$

Es primordial la relación entre  $G$  y  $P$ . Sin embargo, la irradiación solar es un elemento fuera del alcance del ser humano y el área de la placa vendrá dado. Por tanto, el único término sobre el que podemos actuar es la eficiencia del módulo solar.

### ► Eficiencia: $\eta_{pv}$

Hay tres elementos que afectan notablemente a la eficiencia de conversión eléctrica: la temperatura de la placa, el polvo acumulado en la superficie y la irradiación (por su relación con la potencia, descrito en el apartado anterior). Un aumento en  $T_{pv}$  sería perjudicial para la eficiencia. Dependiendo del tipo de placa, la reducción de eficiencia será mayor o menor. Por ejemplo, si la temperatura de las placas es de 40°C,  $\eta_{pv}$  sufre una caída del 7.5% (*Biwole, Eclache, y Kuznik, 2013*). Y si la temperatura llegase a alcanzar los 70°C, la reducción sería tres veces mayor (22.5%).

Existen varias expresiones que relacionan  $T_{pv}$  y  $\eta_{pv}$ . Se propone una ecuación lineal para la eficiencia eléctrica, [Ecuación A-3](#). Donde  $\beta_{ref}$  es el coeficiente de temperaturas y  $\eta_{Tref}$  la eficiencia de la PV a la temperatura de referencia  $T_{ref}$  e irradiación  $G=1000 \text{ W/m}^2$ , ([Evans y Florschuetz, 1978](#)).

**Ecuación A-3. Eficiencia de la placa, por Evans Florschuetz (1978). Eficiencias [%], temperaturas [°C] y  $\beta_{ref}$  [°C<sup>-1</sup>].**

$$\eta_{pv} = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} * (T_{pv} - T_{ref})]$$

Por su parte, el polvo bloquea la irradiación incipiente en los módulos solares. También se ha investigado el efecto de la velocidad del viento y la concentración de polvo en el aire sobre el funcionamiento de la placa PV ([Goossens y Van Kerschaever, 1999](#)). Con una densidad de deposición de 22 g/m<sup>2</sup> la potencia cayó drásticamente un 26%, con su consecuente descenso en eficiencia.

### Aplicación de PCM en BIPV

BIPV (del inglés Building Integrated Photovoltaics) hace referencia a la combinación de diseño arquitectural que relaciona las placas fotovoltaicas y los elementos tradicionales de construcción. En el siguiente artículo de [Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes \(2012\)](#), se muestra claramente el progreso: en 2009, el mercado global de BIPV movió alrededor de 1800 millones de dólares, mientras que en 2016 esa cifra se estima casi cinco veces mayor (8700 millones de dólares). Este constante desarrollo de las generaciones de placas solares y la investigación de nuevo materiales propulsa la integración fotovoltaica en el sector de la construcción. La versión más comercializada es la colocación de una pequeña planta solar en el tejado del edificio. Por el contrario, la integración de PV con cemento (elemento constructivo por excelencia), está sin explotar pudiendo ser un campo de investigación de gran potencial.

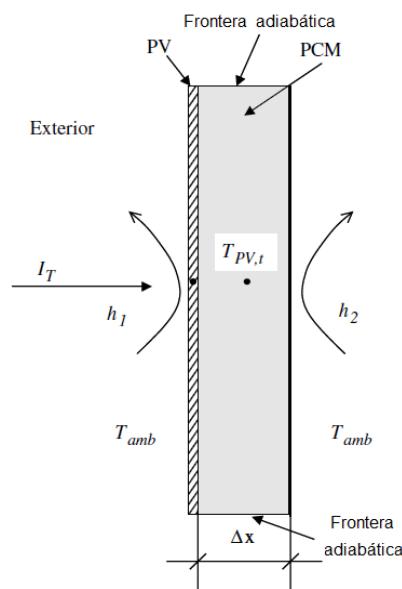
Aparte de la generación de electricidad, se puede conseguir una reducción de consumo aprovechando la luz del día o la sombra y la protección que las placas ofrecen. Hoy en día, no es de extrañar ver edificaciones con muros recubiertos de placas solares, formando parte de la fachada. Es más, técnicas sencillas aunque poco eficientes, como la pintura, en finas capas, brocha o sprays son un claro ejemplo de la variedad de aplicaciones. En Israel, se han desarrollado persianas con pequeñas superficies fotovoltaicas, así dan sombra a la vez que absorben la energía del sol. La integración en los cristales dan lugar a las ventanas “inteligentes”, que tienen triple función: protección del exterior, elemento decorativo y fuente de energía. También existen PV transparentes a no ser que la luz incida en ellas, volviéndose opacas. La flexibilidad, la reducción de espesor y peso de las PV de las nuevas generaciones impulsa fuertemente al sector BIPV, ya que estas características permiten su completa integración.

Se podrían seguir enumerando incontables ejemplos de BIPV y son numerosas las ventajas que ofrecen. Sin embargo, también existen inconvenientes. La integración de PV en edificios ha mostrado hasta hoy un incremento en la temperatura de operación de los módulos, hasta tal punto que, existe una reducción en la potencia eléctrica de un 9.3% más, comparando con PV no integrada, debido a que hay más pérdidas en forma de calor ([Hasan y col., 2010](#)). Según numerosos estudios, como el presentado por [Emery y col. \(1996\)](#), en las PV el ratio de conversión decae alrededor de un 0.5%/°C. En el artículo de [Zhao y col. \(2011\)](#), se muestra la variación de este coeficiente

dependiendo del tipo de panel PV (0.5%/°C Si monocristalinas y 0.25%/°C Si amorfas o película delgada). Por tanto, no deben ser subestimadas en absoluto.

Durante las pasadas tres décadas, la aplicación de PCM ha sido un campo ampliamente estudiado en muchos ramas de la ciencia, como la electrónica, la construcción, refrigeración, el almacenamiento y transporte de energía, por citar algunos. Recientemente, varios autores han hecho revisiones de las potenciales aplicaciones de PCM como reguladores térmicos en este tipo de instalaciones, (*Du, Darkwa, y Kokogiannakis, 2013*) y (*Zalba y col., 2003*).

Pero fue en 2004 cuando se desarrolló un método numérico para un sistema que, utilizando PCM, moderase el aumento de temperatura en una BIPV (*Huang, Eames, y Norton, 2004*). Su diagrama, el cual se muestra en la *Figura A-7*, sirve de inspiración y base de este proyecto. Otros trabajos estudiaron la actuación de las aletas, dependiendo de su anchura y número, las cuales ayudan a controlar el aumento de la temperatura del sistema BIPV/PCM mejorando la transferencia de calor, como muestra en su artículo (*Huang, Eames, y Norton, 2006*). Además, también evaluó la efectividad de un PCM u otro en función de su temperatura de fusión. Para finalizar, en su estudio más reciente, *Huang (2011)* integró en un mismo sistema dos PCM con distinto punto de cambio de fase en una estructura triangular, la cual alivia el problema de expansión volumétrica.



**Figura A-7. Diagrama esquemático de la transferencia de calor en el sistema BIPV/PCM (Huang, Eames, y Norton, 2004)**

Desde el punto de vista de los PCM, como vimos previamente en su definición, un inconveniente a tener en cuenta es la baja conductividad térmica que poseen. La implementación de técnicas para mejorar la transferencia de calor adquiere, consecuentemente, gran importancia. Varios de estos métodos fueron expuestos hace tres años, y los recientes estudios se han centrado en ellos (*Agyenim y col., 2010*). Entre ellos destacan el uso de aletas, utilización de multitubos (*Agyenim, Eames, y Smyth, 2010*), la inserción o dispersión en el PCM de un material de alta conductividad (por ejemplo, un metal, grafito expandido o fibras de carbono) (*Maiti y col., 2011*), desarrollo de espumas metálicas (*Tian y Zhao, 2013*) y materiales de cambio de fase macro/microencapsulados.

Precisamente, estos últimos destacan en la tecnología de BIPV. La refrigeración pasiva con MEPCM consiguió aumentos de la mínima eficiencia de conversión en un 0.43%, según el estudio de *Ho, Tanuwijaya, y Lai (2012)*. Los nuevos materiales podrían ser concebidos como almacenamiento interno de energía, ya sea en forma de batería compuesta por metales híbridos, aumento de la densidad de almacenamiento por nanocristales o placas fotoelectroquímicas, (*Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012*).

Otros estudios centran la atención en mantener el sistema PV/PCM a una temperatura constante durante el máximo tiempo posible (*Hasan y col., 2010*). Una reducción máxima de 18°C se consiguió durante 30 minutos, mientras que reducir 10°C a una irradiación alta de 1000 W/m<sup>2</sup> se mantuvo durante 5 horas. Recientemente se ha propuesto un modelo que permite mantener la temperatura de operación de la placa por debajo de los 40°C durante 80 minutos bajo una irradiación constante de 1000 W/m<sub>2</sub>, mientras que una placa sin PCM los alcanzaría tan solo en 5 minutos (*Biwole, Eclache, y Kuznik, 2013*).

La utilización de PCM en el campo de la energía solar puede ser una herramienta con mucho potencial. Cuando cambian de fase, tienen la capacidad de absorber esas pérdidas en forma de calor latente, disminuyendo así la temperatura de operación. Este proyecto se centra en esta característica y los resultados que conlleva.



## B ANEXO: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y VARIABLES CLIMATOLÓGICAS

### Localización geográfica - Severidades Climáticas

En la página web [http://www.geografiainfo.es/nombres\\_geograficos/index.html](http://www.geografiainfo.es/nombres_geograficos/index.html) se pueden encontrar las coordenadas geográficas y altitud para la ciudad que se precisen. Fuente: Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (National Geospatial-Intelligence Agency, Bethesda, MD, USA).

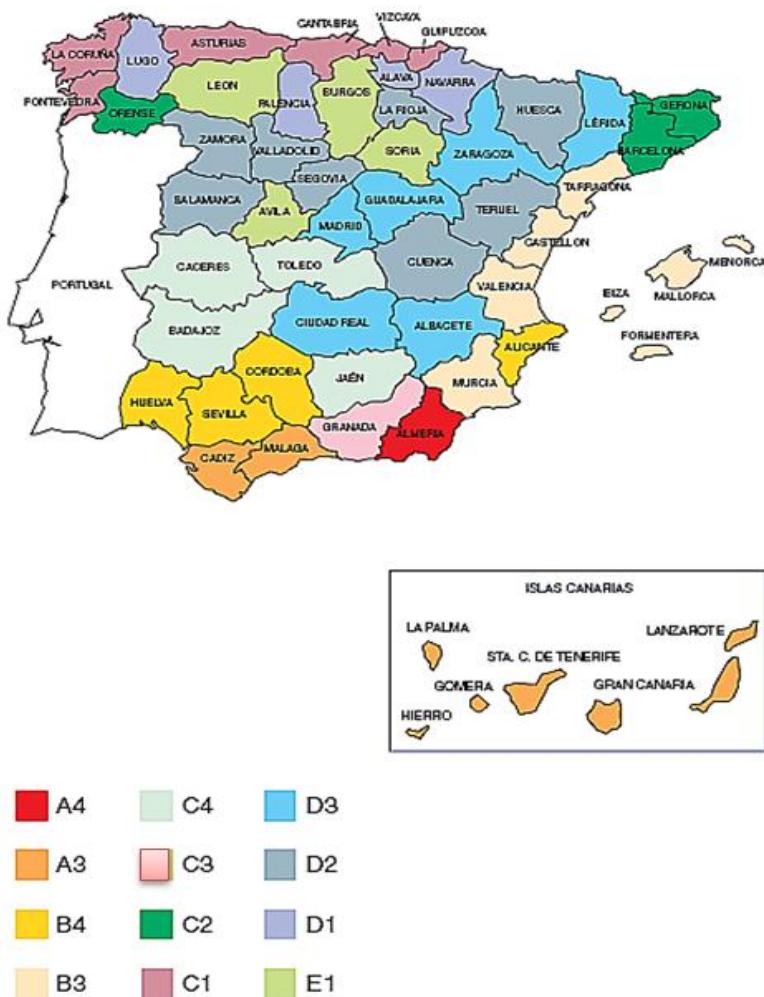
- Coordenadas Zaragoza:
  - Latitud:  $41^{\circ} 38' 00''$  Norte Decimal: 41.63
  - Longitud:  $53^{\circ} 53' 00''$  Oeste Decimal: -0.88

La división en zonas climáticas se determina a partir del cálculo de las severidades climáticas de invierno (SCI) y verano (SCV). Estas variables son el resultado de la combinación de los grados-día y la irradiación solar de una localidad. En el *Documento Básico HE -Ahorro de Energía- del Código Técnico de Edificación (CTE)* se definen 5 divisiones para invierno (designadas con una letra A-E), y 4 para verano (designadas con un número 1-4); incrementando en ambas su nivel de severidad. El resultado es un total de 20 zonas climáticas, de las cuales 12 existen en España, como se puede ver en la *Figura B-1* recogida en el CTE. Por ejemplo, E1 correspondería a inviernos extremadamente frío y veranos muy suaves; mientras que C4 tendría veranos muy calurosos e inviernos muy templados.

	A4	B4	C4		
SC (verano)			C3	D3	E1
	A3	B3	C2	D2	
			C1	D1	
			SC (invierno)		

Figura B-1. Zonas climáticas a partir de SV en España. Apéndice D del documento básico HE (CTE).

En el mapa de la *Figura B-2* se ve la distribución de las zonas climáticas en España.



**Figura B-2. Mapa de España con las 12 Zonas Climáticas. Fuente: Construmatica**

### Variables Climatológicas

La validación del método y fiabilidad de los datos suministrados por el Software de PV <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> ha sido estudiada por *Huld, Müller, y Gambardella (2012)*, con el resultado de ser reconocidamente precisos tras la integración de los sistemas de CM-SAF (del inglés, Climate Monitoring Satellite Application Facility) y PVGIS-3 (del inglés Photovoltaic Geographical Information System). En consecuencia, este sistema es ampliamente utilizado por la comunidad fotovoltaica en Europa. La aplicación permite acceder a una base de datos por satélite que proporciona para la localidad elegida, entre otras medidas, las medias diarias durante todos los meses del año de:

- Radiación solar global o Potencia solar
- Orientación óptima de la placa solar
- Temperaturas del aire durante el día
- Horas de luz al día

## C ANEXO: CARACTERIZACIÓN DE PV Y PCM

### Identificación de las características de PV

A continuación se presentan los datos considerados:

- ▶ Tipología: PV policristalina de Si (I°Generación)
- ▶ Absorbancia:  $\alpha = 0.95^*$
- ▶ Transmitancia:  $\tau = 0.91^*$
- ▶ Conductividad térmica:  $k = 0.2 \text{ W/mK}^*$
- ▶ Área:  $A = 1 \text{ m}^2$
- ▶ Peso: 20kg
- ▶ Eficiencia de la placa fotovoltaica a  $T_{ref}$  y  $1000 \text{ W/m}^2 [\%]$ :  $\eta_{Tref} = 11.7\%^{**}$
- ▶ Temperatura de referencia:  $T_{ref} = 28^\circ\text{C}^{**}$
- ▶ Coeficiente de temperaturas:  $\beta_{ref} = 0,0038 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}^{**}$
- ▶ Potencia máxima:  $P_{max} = 250 \text{ W}$

\* Valores razonables dentro del rango en las PV consultadas con comerciales.

\*\*Estos valores están tabulados. Se ha escogido un valor promedio para PV comerciales dada por la Oficina de Evaluación Tecnológica (OTA, en inglés Office of Technology Assessment) referenciado en el siguiente artículo de *Dubey, Sarvaiya, y Seshadri (2013)*.

## Selección del material de cambio de fase

### Tablas PCM globales: Orgánicos, Inorgánicos y Eutécticos

Tabla C-I. PCM Orgánicos

ORGÁNICOS - Parafinas					
Nombre	Fórmula química	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
n- Tetradecane	C14H30	O-PF1	5,5	228	(Sharma y col., 2009)
n - Pentadecane	C15H32	O-PF2	10	205	(Sharma y col., 2009)
n - Hexadecane	C16H34	O-PF3	16,7	237,1	(Sharma y col., 2009)
n - Heptadecane	C17H36	O-PF4	21,7	213	(Sharma y col., 2009)
n - Octadecane	C18H38	O-PF5	28	244	(Sharma y col., 2009)
n - Nonadecane	C19H40	O-PF6	32	222	(Sharma y col., 2009)
n - Eicosane	C20H42	O-PF7	36,7	246	(Sharma y col., 2009)
n - Heneicosane	C21H44	O-PF8	40,2	200	(Sharma y col., 2009)
n - Docosane	C22H46	O-PF9	44	249	(Sharma y col., 2009)
n - Tricosane	C23H48	O-PF10	47,5	232	(Sharma y col., 2009)
n - Pentacosane	C25H52	O-PF11	49,4	238	(Sharma y col., 2009)
n - Tetracosane	C24H50	O-PF12	50	255	(Sharma y col., 2009)
n - Hexacosane	C26H54	O-PF13	56,3	256	(Sharma y col., 2009)
n - Heptacosane	C27H56	O-PF14	58,8	236	(Sharma y col., 2009)
n - Octacosane	C28H58	O-PF16	61,6	253	(Sharma y col., 2009)
n - Nonacosane	C29H60	O-PF17	63,4	240	(Sharma y col., 2009)
n - Triacontane	C30H62	O-PF18	65,4	251	(Sharma y col., 2009)
n - Hentriacontane	C31H64	O-PF19	68	242	(Sharma y col., 2009)
n - Dotrícontane	C32H66	O-PF20	69,5	170	(Sharma y col., 2009)
n - Tritrícontane	C33H68	O-PF21	74	268	(Sharma y col., 2009)
ORGÁNICOS - No Parafínicos					
Formic acid	CH2O2	O-NP2	7,8	247	(Sharma y col., 2009)
Caprylic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COOH	O-NP1	16	148,5	(Sharma y col., 2009)
Acetic acid	CH <sub>3</sub> COOH	O-NP3	16,7	184	(Sharma y col., 2009)
Glycerin	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	O-NP4	17,9	199	(Sharma y col., 2009)
Propyl palmitate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOC <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	O-NP5	19	186	(Kelly, 2000)
Butyl stearate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COO(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	O-NP6	19	140	(Kelly, 2000)
Polyethylene glycol 599	H(OC <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> OH	O-NP7	22,5	146	(Sharma y col., 2009)
Ethyl palmitate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	O-NP8	23	122	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
l-dodecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> OH	O-NP9	26	200	(Kelly, 2000)
d-Lactic acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	O-NP10	26	184	(Sharma y col., 2009)
Capric acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	O-NP11	32	152	(Sharma y col., 2009)
Methyl palmitate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> COOCH <sub>3</sub>	O-NP12	33	205	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)

	4CO <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>				2007)
Ethyl stearate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	O-NP13	33	134	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
I-tetradecanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> OH	O-NP14	38	205	(Kelly, 2000)
Methyl stearate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CO <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	O-NP15	39	169	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Caprylone	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	O-NP16	40	259	(Sharma y col., 2009)
Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	O-NP17	41	120	(Sharma y col., 2009)
Heptadecanone	C <sub>15</sub> H <sub>28</sub> O <sub>3</sub>	O-NP18	41	201	(Sharma y col., 2009)
I-Cyclohexyloctadecane	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>	O-NP19	41	218	(Sharma y col., 2009)
4-Heptadecanone	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O	O-NP20	41	197	(Sharma y col., 2009)
p-Toluidine	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N	O-NP21	43,3	167	(Sharma y col., 2009)
Cyanamide	CH <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	O-NP22	44	209	(Sharma y col., 2009)
Methyl isocyanate	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NO	O-NP23	45	230	(Sharma y col., 2009)
Elaidic acid	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> COOH	O-NP24	47	218	(Sharma y col., 2009)
3-Heptadecanone	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O	O-NP25	48	218	(Sharma y col., 2009)
2-Heptadecanone	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O	O-NP26	48	218	(Sharma y col., 2009)
Hydrocinnamic acid	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	O-NP27	48	118	(Sharma y col., 2009)
Lauric acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	O-NP28	49	178	(Sharma y col., 2009)
Cetyl alcohol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> OH	O-NP29	49,3	141	(Sharma y col., 2009)
α-Neptylamine	C <sub>10</sub> H <sub>9</sub> N	O-NP30	50	93	(Sharma y col., 2009)
Camphene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	O-NP31	50	238	(Sharma y col., 2009)
O-Nitroaniline	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (NH <sub>2</sub> )(NO <sub>2</sub> )	O-NP32	50	93	(Sharma y col., 2009)
9-Heptadecanone	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O	O-NP33	51	213	(Sharma y col., 2009)
Thymol	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	O-NP34	51,5	115	(Sharma y col., 2009)
Methyl behenate	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	O-NP35	52	234	(Sharma y col., 2009)
Pentadecanoic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>13</sub> COOH	O-NP36	52,5	178	(Sharma y col., 2009)
Diphenyl amine	C <sub>12</sub> H <sub>11</sub> N	O-NP37	52,9	107	(Sharma y col., 2009)
Myristic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	O-NP38	53	199	(Sharma y col., 2009)
p-Dichlorobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	O-NP39	53,1	121	(Sharma y col., 2009)
Oxolate	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O-NP40	54,3	178	(Sharma y col., 2009)
Hypophosphoric acid	H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> P <sub>2</sub>	O-NP41	55	213	(Sharma y col., 2009)
O-Xylene dichloride	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> Cl <sub>2</sub>	O-NP42	55	121	(Sharma y col., 2009)
Tristearin	(C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COO) <sub>3</sub> C <sub>3</sub> H <sub>5</sub>	O-NP43	56	191	(Sharma y col., 2009)
β-Chloroacetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO <sub>2</sub>	O-NP44	56	147	(Sharma y col., 2009)

Chloroacetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO <sub>2</sub>	O-NP45	56	130	(Sharma y col., 2009)
Nitro naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	O-NP46	56,7	103	(Sharma y col., 2009)
Trimyristin	C <sub>45</sub> H <sub>86</sub> O <sub>6</sub>	O-NP47	57	207	(Sharma y col., 2009)
Palmatic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	O-NP48	58	163	(Sharma y col., 2009)
Heptadecanoic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> COOH	O-NP49	60,6	189	(Sharma y col., 2009)
α-Chloroacetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO <sub>2</sub>	O-NP50	61,2	130	(Sharma y col., 2009)
Bee wax	C <sub>15</sub> H <sub>31</sub> COOC <sub>30</sub> H <sub>61</sub>	O-NP51	61,8	177	(Sharma y col., 2009)
Glycolic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	O-NP52	63	109	(Sharma y col., 2009)
p-Bromophenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> BrO	O-NP53	63,5	86	(Sharma y col., 2009)
Azobenzene	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	O-NP54	67,1	121	(Sharma y col., 2009)
Acrylic acid	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	O-NP55	68	115	(Sharma y col., 2009)
Stearic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	O-NP56	69,4	199	(Sharma y col., 2009)
Dinitrotoluene (2,4)	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	O-NP57	70	111	(Sharma y col., 2009)
Phenylacetic acid	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	O-NP58	76,7	102	(Sharma y col., 2009)
Thiosinamine	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> S	O-NP59	77	140	(Sharma y col., 2009)
Bromocamphor	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> BrO	O-NP60	77	174	(Sharma y col., 2009)
Benzylamine	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	O-NP61	78	174	(Sharma y col., 2009)
Durene	C <sub>6</sub> H <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	O-NP62	79,3	156	(Sharma y col., 2009)
Acetamide	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>	O-NP63	81	241	(Sharma y col., 2009)
Methyl bromobrenzoate	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> BrO <sub>2</sub>	O-NP64	81	126	(Sharma y col., 2009)
Xilitol	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>5</sub>	O-NP65	94	263,3	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
α-Naphthol	C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> OH	O-NP66	96	163	(Sharma y col., 2009)
D-sorbitol	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub>	O-NP67	97	185	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Glutaric acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (COOH) <sub>2</sub>	O-NP68	97,5	156	(Sharma y col., 2009)
p-Xylene dichloride	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> Cl <sub>2</sub>	O-NP69	100	138,7	(Sharma y col., 2009)
Methyl fumarate	(CHCO <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	O-NP70	102	242	(Sharma y col., 2009)
Catechol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	O-NP71	104,3	207	(Sharma y col., 2009)
Quinone	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	O-NP72	115	171	(Sharma y col., 2009)
Acetanilide	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO	O-NP73	118,9	222	(Sharma y col., 2009)
Succinic anhydride	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	O-NP74	119	204	(Sharma y col., 2009)
Erythritol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	O-NP75	120	339,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Benzoic acid	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	O-NP76	121,7	142,8	(Sharma y col., 2009)
Stilbene	C <sub>14</sub> H <sub>12</sub>	O-NP77	124	167	(Sharma y col., 2009)
Benzamide	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO	O-NP78	127,2	169,4	(Sharma y col., 2009)

Salicylic acid	C7H6O3	O-NP79	159	199	(Oró y col., 2012)
Benzanilide	C13H11NO	O-NP80	161	162	(Oró y col., 2012)
D-mannitol	C6H8 (OH)6	O-NP81	167	316,4	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Hydroquinone	C6H6O2	O-NP82	172,4	258	(Oró y col., 2012)
Potassium thiocynate	KSCN	O-NP83	173	280	(Oró y col., 2012)
Galactitol	C6H14O6	O-NP84	188	351,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)

**Tabla C-2. PCM Inorgánicos**

INORGÁNICOS – Sales Hidratadas				
Fórmula química	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
LiClO <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	I-SH1	8	253	(Sharma S.D., 2005)
K <sub>2</sub> HO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH2	14	108	(Sharma S.D., 2005)
KF · 4H <sub>2</sub> O	I-SH3	18	330	(Sharma S.D., 2005)
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH4	25	148	(Sharma S.D., 2005)
LiBO <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	I-SH5	25,7	289	(Sharma S.D., 2005)
FeBr <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH6	27	105	(Sharma S.D., 2005)
CaCl <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH7	29,8	174	(Sharma y col., 2009)
LiNO <sub>3</sub> · 2H <sub>2</sub> O	I-SH8	30	296	(Sharma y col., 2009)
LiNO <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	I-SH9	30	189	(Sharma y col., 2009)
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O	I-SH10	32	267	(Sharma y col., 2009)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	I-SH11	32	241	(Sharma S.D., 2005)
KFe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH12	33	173	(Sharma S.D., 2005)
CaBr <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH13	34	138	(Sharma S.D., 2005)
LiBr <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	I-SH14	34	124	(Sharma S.D., 2005)
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH15	36	134	(Sharma S.D., 2005)
FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH16	37	223	(Sharma S.D., 2005)
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH17	37	115	(Sharma S.D., 2005)
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH18	40	281	(Sharma y col., 2009)
CoSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	I-SH19	40,7	170	(Sharma y col., 2009)
KF · 2H <sub>2</sub> O	I-SH20	42	162	(Sharma y col., 2009)
MgI <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	I-SH21	42	133	(Sharma y col., 2009)
CaI <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH22	42	162	(Sharma y col., 2009)
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	I-SH23	45	145	(Sharma y col., 2009)
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH24	45	110	(Sharma y col., 2009)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH25	47	142	(Sharma y col., 2009)
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH26	47	153	(Sharma y col., 2009)
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O	I-SH27	47	155	(Sharma y col., 2009)
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH28	48	168	(Sharma y col., 2009)
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	I-SH29	48	99	(Sharma y col., 2009)
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	I-SH30	48,5	210	(Sharma y col., 2009)
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	I-SH31	48,5	202	(Sharma y col., 2009)

<chem>Ca(NO3)2 · 3H2O</chem>	I-SH32	51	104	(Sharma y col., 2009)
<chem>Zn(NO3)2 · 2H2O</chem>	I-SH33	55	68	(Sharma y col., 2009)
<chem>FeCl3 · 2H2O</chem>	I-SH34	56	90	(Sharma y col., 2009)
<chem>Ni(NO3)2 · 6H2O</chem>	I-SH35	57	169	(Sharma y col., 2009)
<chem>MnCl2 · 4H2O</chem>	I-SH36	58	151	(Sharma y col., 2009)
<chem>MgCl2 · 4H2O</chem>	I-SH37	58	178	(Sharma y col., 2009)
<chem>CH3COONa · 3H2O</chem>	I-SH38	58	265	(Sharma y col., 2009)
<chem>Fe(NO3)2 · 6H2O</chem>	I-SH39	60,5	126	(Sharma y col., 2009)
<chem>NaAl(SO4)2 · 10H2O</chem>	I-SH40	61	181	(Sharma y col., 2009)
<chem>NaOH · H2O</chem>	I-SH41	64,3	273	(Sharma y col., 2009)
<chem>Na3PO4 · 12H2O</chem>	I-SH42	65	190	(Sharma y col., 2009)
<chem>LiCH3COO · 2H2O</chem>	I-SH43	70	150	(Sharma y col., 2009)
<chem>Al(NO3)2 · 9H2O</chem>	I-SH44	72	155	(Sharma y col., 2009)
<chem>Ba(OH)2 · 8H2O</chem>	I-SH45	78	265	(Sharma y col., 2009)
<chem>Al2(SO4)3 · 18H2O</chem>	I-SH46	88	-	(Zalba y col., 2003)
<chem>Al(NO3)3 · 8H2O</chem>	I-SH47	89	-	(Zalba y col., 2003)
<chem>Mg(NO3)2 · 6H2O</chem>	I-SH48	89,9	167	(Sharma y col., 2009)
<chem>KAl (SO4)2 · 12H2O</chem>	I-SH49	91	184	(Sharma y col., 2009)
<chem>(NH4)Al(SO4) · 6H2O</chem>	I-SH50	95	269	(Zalba y col., 2003)
<chem>Na2S · 5/2 H2O</chem>	I-SH51	97,5	-	(Zalba y col., 2003)
<chem>CaBr2 · H2O</chem>	I-SH52	110	-	(Zalba y col., 2003)
<chem>Al2(SO4)3 · 6H2O</chem>	I-SH53	112	-	(Zalba y col., 2003)
<chem>MgCl2 · 6H2O</chem>	I-SH54	117	167	(Zalba y col., 2003)
<chem>Mg(NO3) · H2O</chem>	I-SH55	130	-	(Zalba y col., 2003)
<b>INORGÁNICOS – Metales y otros</b>				
Fórmula química	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
<chem>H2O</chem>	I-IN1	0	333	(Sharma S.D., 2005)
<chem>POCl3</chem>	I-IN2	1	85	(Sharma S.D., 2005)
<chem>D2O</chem>	I-IN3	3,7	318	(Sharma S.D., 2005)
<chem>SbCl5</chem>	I-IN4	4	33	(Sharma S.D., 2005)
<chem>H2SO4</chem>	I-IN5	10,4	100	(Sharma S.D., 2005)
<chem>IC(β)</chem>	I-IN6	13,9	56	(Sharma S.D., 2005)
<chem>MOF6</chem>	I-IN7	17	50	(Sharma S.D., 2005)
<chem>SO3(α)</chem>	I-IN8	17	108	(Sharma S.D., 2005)
<chem>IC(α)</chem>	I-IN9	17,2	69	(Sharma S.D., 2005)
<chem>P4O6</chem>	I-IN10	23,7	64	(Sharma S.D., 2005)
<chem>H3PO4</chem>	I-IN11	26	147	(Sharma S.D., 2005)
<chem>Cs</chem>	I-IN12	28,3	15	(Sharma S.D., 2005)
<chem>Ga</chem>	I-IN13	30	80	(Sharma S.D., 2005)
<chem>AsBr35</chem>	I-IN14	30	38	(Sharma S.D., 2005)
<chem>SnBr4</chem>	I-IN15	30	28	(Sharma S.D., 2005)
<chem>Bi3</chem>	I-IN16	31,8	10	(Sharma S.D., 2005)
<chem>SO3(β)</chem>	I-IN17	32,3	151	(Sharma S.D., 2005)
<chem>TiBr4</chem>	I-IN18	38,2	23	(Sharma S.D., 2005)

H4P2O6	I-IN19	55	213	(Sharma S.D., 2005)
SO3 ( $\gamma$ )	I-IN20	62,1	331	(Sharma S.D., 2005)
NaOH	I-IN21	64,3	228	(Zalba y col., 2003)
SbCl3	I-IN22	73,4	25	(Sharma S.D., 2005)
Li	I-IN23	180	432	(Royal Society of Chemistry)

Tabla C-3. PCM Eutécticos

EUTÉCTICOS – Metales Eutécticos				
Nombre	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
Ga-In-Zn	E-ME1	10,7	67,2	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-In	E-ME2	15,7	69,7	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-Sn-Zn	E-ME3	18,8	86,5	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga 74-Sn-Cd	E-ME4	20,2	75,2	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-Sn	E-ME5	20,55	81,9	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga 93-Sn-Cd	E-ME6	24,6	85	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-Zn	E-ME7	25	88,5	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Gallium–gallium antimony	E-ME8	29,8	–	(Sharma y col., 2009)
Cerrolow	E-ME9	58	90,9	(Sharma y col., 2009)
Bi–Cd–In	E-ME10	61	25	(Sharma y col., 2009)
Cerrobend	E-ME12	70	32,6	(Sharma y col., 2009)
Bi–Pb–In	E-ME13	70	29	(Sharma y col., 2009)
Bi–In	E-ME14	72	25	(Sharma y col., 2009)
Bi–Pb–tin	E-ME15	96	–	(Sharma y col., 2009)
Bi–Pb	E-ME16	125	–	(Sharma y col., 2009)
EUTÉCTICOS – Inorgánicos Eutécticos				
Fórmula Química	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
CaCl2 ·6H2O + CaBr2 ·6H2O	E-II1	-3,0	26,6	(Sharma y col., 2009)
CaCl2 + MgCl2 ·6H2O	E-II2	25	95	(Sharma y col., 2009)
Ca(NO3)4 ·4H2O + Mg(NO3)3 ·6H2O	E-II3	30	136	(Sharma y col., 2009)
AlCl3 + BaCl2 + NaCl	E-II4	50	168,5	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
Mg(NO3)3 ·6H2O + NH4NO3	E-II5	52	125,5	(Sharma y col., 2009)
Mg(NO3)3 ·6H2O + MgCl2 ·6H2O [59-41]	E-II6	59	132,2	(Sharma y col., 2009)
Mg(NO3)3 ·6H2O + MgCl2 ·6H2O [50-50]	E-II7	59,1	144	(Sharma y col., 2009)
Mg(NO3)3 ·6H2O + Al(NO3)2 ·9H2O	E-II8	61	148	(Sharma y col., 2009)

Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + MgBr <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	E-II9	66	168	(Sharma y col., 2009)
AlCl <sub>3</sub> + LiCl	E-II10	80	199	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub>	E-II11	80,5	113	(Sharma y col., 2009)
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub>	E-II12	81,5	116	(Sharma y col., 2009)
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> Cl	E-II13	81,6	108	(Sharma y col., 2009)
AlCl <sub>3</sub> + KCl + LiCl	E-II14	85	196	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
AlCl <sub>3</sub> + KCl + NaCl	E-II15	88	191	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
AlCl <sub>3</sub> + NaCl + TiCl <sub>3</sub>	E-II16	98	192	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
AlCl <sub>3</sub> + KCl + TiCl <sub>3</sub>	E-II17	100	184,2	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
AlCl <sub>3</sub> + KCl + TiCl <sub>3</sub>	E-II18	100	156,1	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)
LiNO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub> + Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	E-II19	105	110	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub> [33-67]	E-II20	133	170	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub> [31,7-68,3]	E-II21	135	136	(Kenisarin, 2010)
KNO <sub>3</sub> + NaNO <sub>2</sub> + NaNO <sub>3</sub>	E-II22	142	80	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub> + KCl	E-II23	160	266	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + KCl	E-II24	166	272	(Kenisarin, 2010)
NaOH + KOH	E-II25	170	210	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + LiCl + NaNO <sub>3</sub>	E-II26	180	265	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub>	E-II27	193	248	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub>	E-II28	194	265	(Kenisarin, 2010)
LiNO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub> + Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	E-II29	200	199	(Kenisarin, 2010)

#### EUTÉCTICOS – Inorgánicos/Orgánicos Eutécticos

Nombre	Fórmula Química	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
Triethylolethane + water + urea	CH <sub>3</sub> C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	E-IO1	13,4	160	(Sharma y col., 2009)
Sodium Ethanoate + Urea	CH <sub>3</sub> COONa · 3H <sub>2</sub> O + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	E-IO2	30	200,5	(Sharma y col., 2009)
Urea + Nitrato de Amonio	NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	E-IO3	46	95	(Sharma y col., 2009)
Naphthalene + benz oic acid	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> + PhCOOH	E-IO4	67	123,4	(Sharma y col., 2009)
Urea + Bromuro de Amonio	NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> Br	E-IO5	76	151	(Sharma y col., 2009)

#### EUTÉCTICOS – Parafínicos Eutécticos

Nombre	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
Tetradecane+docosane	E-PF1	-2	234,33	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Tetradecane+geneicosane	E-PF2	1,7	200,28	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)

Pentadecane+heneicosane	E-PF3	3,5	128,25	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Tetradecane+octadecane	E-PF4	4,5	227,52	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Pentadecane+octadecane	E-PF5	7	271,93	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Octadecane+heneicosane	E-PF6	8,3	173,93	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Pentadecane+docosane	E-PF7	8,7	214,83	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Octadecane+docosane	E-PF8	26	203,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Tetradecane(91.67 mol%)+hexadecane (8.33 mol%)	E-PF9	26,3	156,2	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
<b>EUTÉCTICOS – Orgánicos Eutécticos</b>				
Composición	Cód.	Tfusión (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
Butyl palmitate (49 wt%)+butyl stearate (48 wt%)+other (3 wt%)	E-OO1	17	140	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Carpic acid+Lauric acid	E-OO2	18	120	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Carpic acid (655 mol%)+lauric acid (35 mol%)	E-OO3	19	140,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Carpic acid (61.5 wt%)+lauric acid (38.5 wt%)	E-OO4	19,1	132	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Carpic acid (73.5 wt%)+myristic acid (26.5 wt%)	E-OO5	21,4	152	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Carpic acid (75.2 wt%)+palmitic acid (24.8 wt%)	E-OO6	22,1	153	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Methyl palmitate (65–90 wt%)+methyl stearate (35–10 wt%)	E-OO7	23,5	120	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
myristic acid + Neodecanoic acid	E-OO8	24	147,7	(Sharma y col., 2009)
Carpic acid (86.6 wt%)+stearic acid (13.4 wt%)	E-OO9	26,8	160	(Sharma y col., 2009)
Acetamide + Urea	E-OO10	27	163	(Sharma y col., 2009)
Triethylolethane + urea	E-OO11	29,8	218	(Sharma y col., 2009)
Lauric acid (62.6 wt%)+myristic acid (37.4 wt%)	E-OO12	32,6	156	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid (80.0 wt%)+palmitic acid (20.0 wt%)	E-OO13	32,7	145	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid (64.0 wt%)+palmitic acid (36.0 wt%)	E-OO14	32,8	165	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid (77.0 wt%)+palmitic acid (23.0 wt%)	E-OO15	33	150,6	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid+stearic acid	E-OO16	34	150	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid (66.0 wt%)+myristic acid (34.0 wt%)	E-OO17	34,2	166,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid (69.0 wt%)+palmitic acid (31.0 wt%)	E-OO18	35,2	166,3	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Lauric acid (75.5 wt%)+	E-OO19	37	182,7	(Kenisarin y Mahkamov,

stearic acid (24.5 wt%)				2007)
Lauric acid (75.5 wt%)+ stearic acid (24.5 wt%)	E-OO20	37,3	171	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Myristic acid (51 wt%)+ Palmitic acid (49 wt%)	E-OO21	39,8	174	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Myristic acid (58 wt%)+ palmitic acid (42 wt%)	E-OO22	42,6	169,7	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Myristic acid (65.7 wt%)+ stearic acid (34.7 wt%)	E-OO23	44	181	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Myristic acid (64.0 wt%)+ stearic acid (36.0 wt%)	E-OO24	44	182	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
MA3PA2 (myristic acid+palmitic acid)	E-OO25	47,3	173,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
MA2SA (myristic acid+stearic acid)	E-OO26	48,6	179,8	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Palmitic acid (64.9 wt%)+ stearic acid (35.1 wt%)	E-OO27	50,4	181	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
PeASA (pentadecane acid+stearic acid)	E-OO28	50,6	173	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Palmitic acid+stearic acid	E-OO29	51	160	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Palmitic acid (64.2 wt%)+ stearic acid (35.8 wt%)	E-OO30	52,3	181,7	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Stearic acid (65 wt%)+ palmitic acid (27.5 wt%)+ other fatty acids (5.5 wt%)—emery 419	E-OO31	54	180	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Palmitic acid (50 wt%)+ stearic acid (45.5 wt%)+ other fatty acids (4.5 wt%)—emersol 131	E-OO32	55,5	180	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
PASA (palmitic acid+stearic acid)	E-OO33	57,2	179,6	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Stearic acid (83 wt%)+ palmitic acid (11 wt%)+ other fatty acids (6% wt%)—emersol 149	E-OO34	63	206	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Acetamide + Stearic Acid	E-OO35	65	218	(Sharma y col., 2009)
Stearic acid (95 wt%)+ palmitic acid (5 wt%)—emersol 152	E-OO36	67,3	209	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)

### Mapas puntos PCM

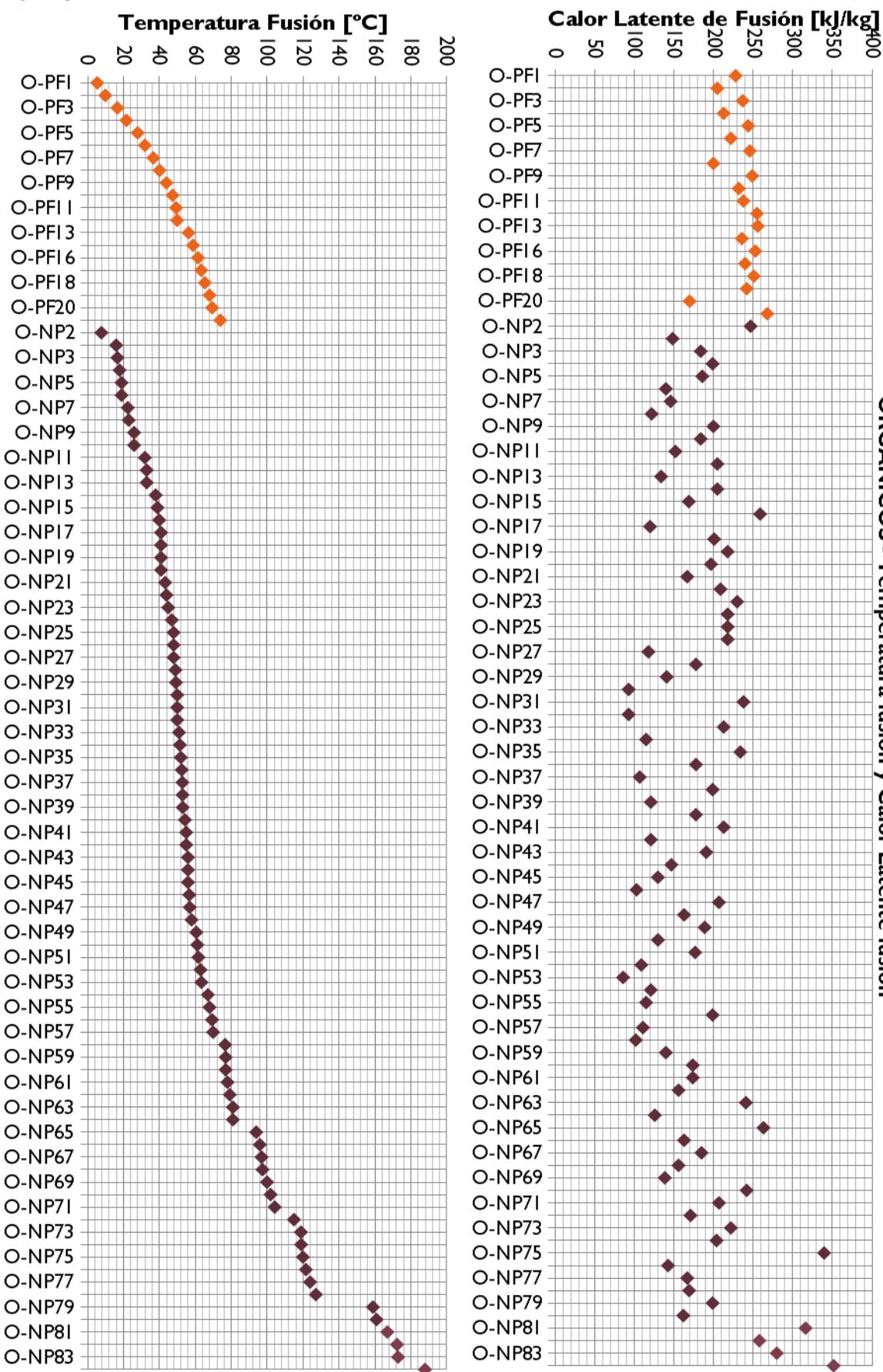


Figura C-1. Mapa de puntos para PCM Orgánicos. Representan su Tfusión [°C] y Hf [kJ/kg]

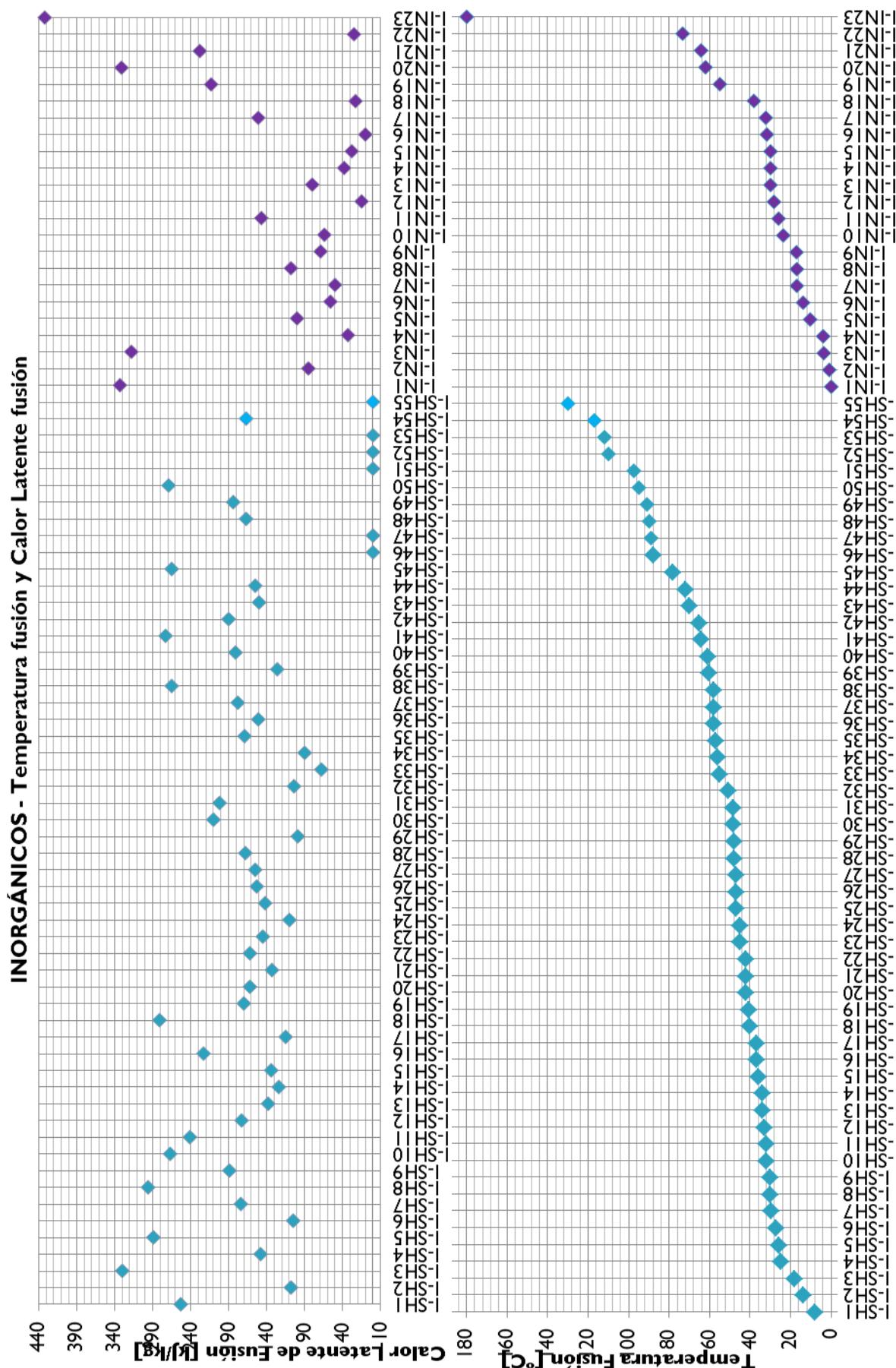


Figura C-2. Mapa de puntos para PCM Inorgánicos. Representan su T<sub>fusión</sub> [°C] y H[kJ/kg]

### EUTÉCTICOS - Temperatura fusión y Calor Latente fusión

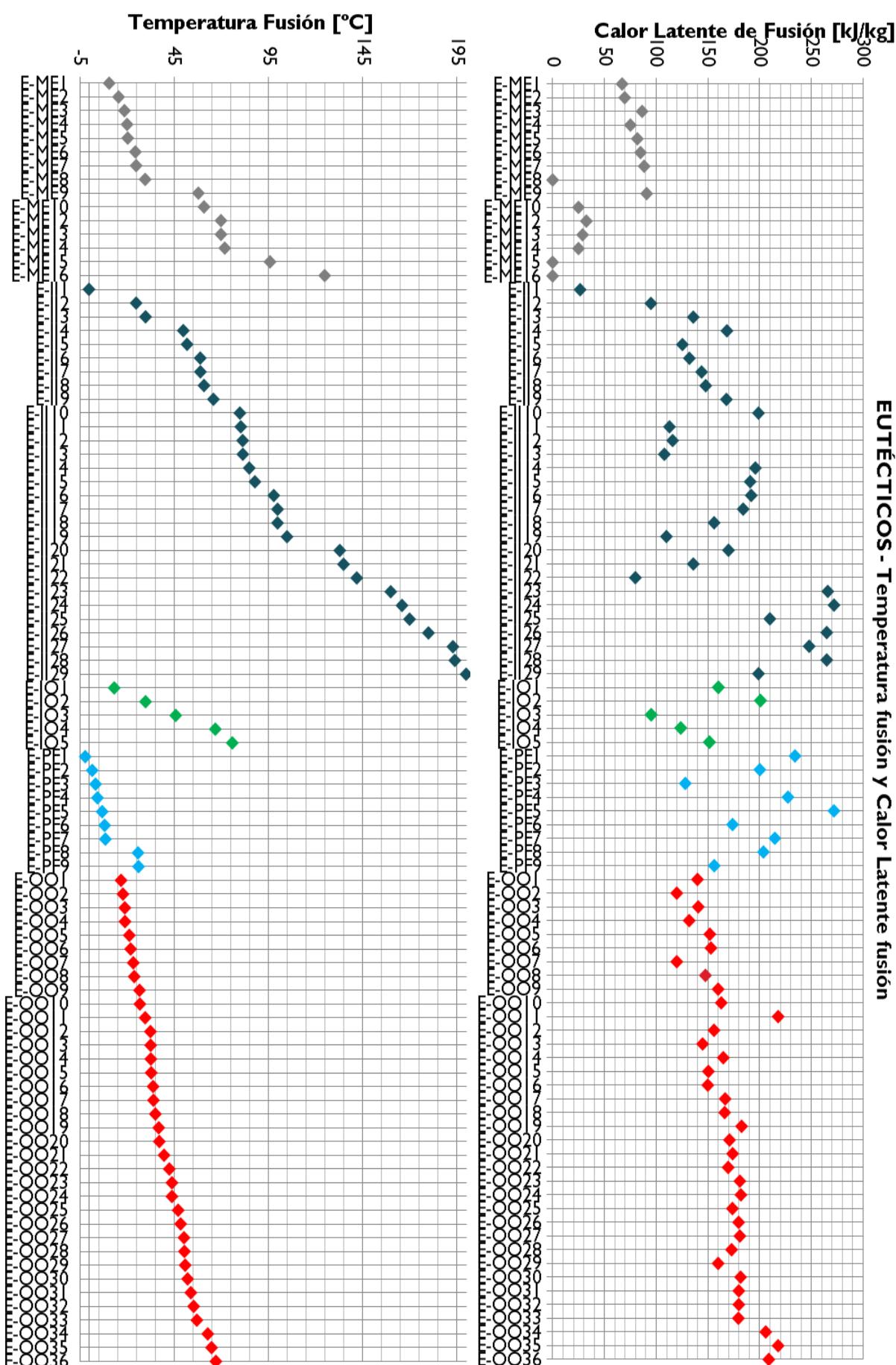


Figura C-3. Mapa de puntos para PCM Eutécticos. Representan su  $T_f$  fusión [°C] y  $H_f$  [kJ/kg]

### Tablas de alternativas PCM para Zaragoza

Después de haber definido el rango de temperaturas con las que interesa trabajar, se estudian los distintos PCM a utilizar. Las siguientes tablas (*Tabla C-4* y *Tabla C-5*) muestran las alternativas para  $T_{\text{fusion}}$  en torno a los 30°C y 40°C en Zaragoza:

**Tabla C-4. Alternativas para  $T_{\text{fusion}}$  en torno a los 30°C**

Grupo y Subgrupo		Nombre	Fórmula química	Cod.	$T_{\text{fusion}}$ (C°)	H (kJ/kg)
ORGÁNICOS	PARAFINAS	n - Octadecane	C18H38	O-PF5	28	244
		n - Nonadecane	C19H40	O-PF6	32	222
INORGÁNICOS	SALES HIDRATADAS	Capric acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	O-NP8	32	152
			CaCl <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH7	29,8	174
			LiNO <sub>3</sub> · 2H <sub>2</sub> O	I-SH8	30	296
			LiNO <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	I-SH9	30	189
			Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O	I-SH10	32	267
	INORGÁNICOS		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	I-SH11	32	241
		Cs		HN12	283	15
		Ga		HN13	30	80
		AsBr35		HN14	30	38
		SnBr4		HN15	30	28
EUTÉCTICOS y MEZCLAS	METÁLICOS EUT.	Gallium-gallium antimony		E-ME8	29,8	—
	INORGÁNICOS EUT.		Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O + Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	E-I3	30	136
	INORG/ORGÁNICOS EUT.	Sodium Ethanoate + Urea	CH <sub>3</sub> COONa · 3H <sub>2</sub> O + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	E-IO2	30	2005
	ORGÁNICOS EUT.	Triethylolethane + urea	CH <sub>3</sub> C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	E-OI1	29,8	218

**Tabla C-5. Alternativas para  $T_{\text{fusion}}$  en torno a los 40°C**

Grupo y Subgrupo		Nombre	Fórmula química	Cód.	$T_{\text{fusion}}$ (C°)	H (kJ/kg)
ORGÁNICOS	NO PARAFÍNICOS	n - Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	O-PF8	40,2	200
		1-tetradecanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> OH	O-NPI4	38	205
		Methyl stearate	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CO <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	O-NPI5	39	169
		Caprylone	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	O-NPI6	40	259
		Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	O-NPI7	41	120
		Heptadecanone	C <sub>15</sub> H <sub>28</sub> O <sub>3</sub>	O-NPI8	41	201
		1-Cyclohexyloctadecane	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>	O-NPI9	41	218
INORGÁNICOS	SALES HIDRATADAS	4-Heptadecanone	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O	O-NP20	41	197
			Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH18	40	281
			CoSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	I-SH19	40,7	170

		KF·2H <sub>2</sub> O	I-SH20	42	162
		MgI <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	I-SH21	42	133
		CaI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	I-SH22	42	162
	OTROS IN.	TiBr <sub>4</sub>	I-HN18	38.2	23
EUTÉCTICOS y MEZCLAS	ORGÁNICOS EUT.	Myristic acid (51 wt%)+Palmitic acid (49 wt%)	E-OO21	39.8	174
		Myristic acid (58 wt%)+palmitic acid (42 wt%)	E-OO22	42.6	169.7

## D ANEXO: COMPORTAMIENTO DE OPERACIÓN BIPV CON Y SIN PCM

### Operación de BIPV sin PCM

Tabla D-I. Coeficientes SNL (Trinuruk 2009)

Tipo de Módulo	Montaje	a	b
Vidrio/Célula/Vidrio	Abierto	-3,47	-0,0594
Vidrio/Célula/Vidrio	Cerrado en tejado	-2,98	-0,0471
Vidrio/Célula/Polímero	Abierto	-3,56	-0,075
Vidrio/Célula/Polímero	Aislado	-2,81	-0,0455
Polímero/Película fina/Acero	Abierto	-3,58	-0,113

### Programa EES cálculo sin PCM para Zaragoza

"Ecuación Trinuruk 2009: Fórmula con coeficientes del Laboratorio Sandia SNL

Tiene en cuenta el efecto del viento y su consecuente poder de convección en la disipación del calor"

$$T_{pv} - T_{amb} = \text{dif\_T}$$

$$\text{dif\_T} = I_t * \exp(a + b * v)$$

"Los coeficientes son empíricos y vienen especificados en un tabla. Dependen de los materiales que forman la placa solar y del tipo de montaje.

En nuestro caso hemos elegido un montaje abierto, y placa compuesta de vidrio/célula/polímero aislante"

$$a = -3,56$$

$$b = -0,075$$

"Ecuación de balance de energía global, referenciado por Huang 2011. Tiene en cuenta el coeficiente de pérdidas por convección, conducción y radiación, así como características específicas de cada placa como son la transmitancia y Absorbancia."

$$U_I = (\tau * \alpha - \eta_{pv}) / \exp(a + b * v)$$

$$\tau = 0,91$$

$$\alpha = 0,95$$

"La fórmula de la eficiencia de conversión eléctrica, la tomamos de la biografía de Evans Florschuetz 1978"

$$\eta_{pv} = \eta_{Tref} * (1 - \beta_{ref} * (T_{pv} - T_{ref}))$$

"Los valores para  $T_{ref}$ ,  $\beta_{ref}$  y  $\eta_{Tref}$  están tabulados. Escogemos un valor promedio para placas comerciales dada por OTA"

$$T_{ref} = 28$$

$$\beta_{ref} = 0,0038$$

$$\eta_{Tref} = 0,117$$

"Los valores de irradiación solar  $I_t$  vendrán dados por estimaciones meteorológicas PV-GIS. Mientras que la velocidad del viento y temperatura ambiente  $T_{amb}$  provienen de la estación meteorológica de CIRCE. Estos datos se dispondrán en una tabla paramétrica, ya que varían notablemente a lo largo de las distintas horas del día y del mes del año."

## Operación de BIPV con PCM y Análisis de los parámetros críticos de diseño

### Programa EES cálculo con PCM de distintos parámetros críticos

El proceso de resolución de cálculo anteriormente descrito ha sido llevado a cabo con el programa Resolutor de Ecuaciones de Ingeniería (EES, del inglés Engineering Equation Solver). Se ha implementado un código de programación, incluyendo las ecuaciones que rigen el sistema BIPV con y sin PCM, que mediante el uso de vectores, resolución de sistemas y procesos iterativos se obtienen tablas de resultados de temperatura de operación, eficiencia, coeficiente global de pérdidas y calor latente. Posteriormente, estos datos serán clasificados y analizados cuantitativamente. Las gráficas y los posteriores cálculos en Excel permitirán un análisis más exhaustivo de la influencia de los parámetros críticos de diseño relativos al uso de PCM en BIPV.

**Tabla D-2. Parámetros críticos de diseño relativos a PCM**

T_fusion	Espesor PCM (x)	Composición en masa (w)
<ul style="list-style-type: none"> <li>PCM1 con T_fusion= 32°C</li> <li>PCM2 con T_fusion= 40°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x = 1cm</li> <li>x = 1.5cm</li> <li>x = 2cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>100% PCM1</li> <li>100% PCM2</li> <li>50% PCM1 + 50% PCM2</li> </ul>

#### ► Para un único PCM:

```

FUNCTION calorlatente (T_pv; T_fusion; deltat; k; x; Q_acu; Q_total; Area)
"Calor latente. Positivo cuando el material lo absorbe, y negativo si lo disipa"
If (T_pv < T_fusion) and (Q_acu <= 0) then
Q_lat:= 0
Else
If (T_pv >= T_fusion) and (Q_acu < Q_total) then
Q_lat:= (T_pv - T_fusion)*k*deltat*Area/x "Cuando T_pv es mayor que T_fusion, absorbe
calor latente hasta que llegue a Qtotal. Valor positivo"
Else
If (T_pv >= T_fusion) and (Q_acu >= Q_total) then
Q_lat:= 0 "Se ha superado la capacidad de absorber"
Else
If (T_pv < T_fusion) and (Q_acu > 0) then
Q_lat:= (T_pv - T_fusion)*k*deltat*Area/x "Cuando T_pv es menor que T_fusion, es cuando
empieza el proceso inverso y disipa calor latente. Valor negativo"
Endif
Endif
Endif
Endif
calorlatente:= Q_lat
END

```

#### "Subprograma para realizar el calculo Tpcm"

```

SUBPROGRAM calculoTpcm (I_t; T_amb; T_pv; Q_acu; U_I; Q_lat; T_pv\pcm; eta_pv\pcm;
dif_Tpv\pcm)

```

"Una vez obtenidas las Tpv, elegimos un PCM cuyo punto de fusión entre en el rango de operación, para disminuir así el calentamiento de la placa. Aquí se especifican las características del PCM elegido"

T\_fusion= Tfusión del PCM seleccionado "[°C]"

ro = Densidad del PCM seleccionado "Densidad [kg/m3]. Como el PCM se encontrará en estado líquido y sólido escogemos la que sea menor para que no haya problemas de expansión de volumen"

H= Capacidad calor latente de fusión del PCM seleccionado "Calor latente o capacidad calorífica del PCM escogido en [J/kg]"

Q\_total=H\*m\_pcm "Calor latente total del PCM, capacidad de almacenar calor [J]"

x=Valor del espesor 0.01, 0.015 y 0.020 "Espesor de la capa de PCM adjunta a la placa BIPV en [m]"

Area= l "área de la placa [m2]"

m\_pcm= Vol\*ro "masa del PCM [kg]"

Vol=x\*Area "Volumen PCM [m3]"

k= 0,2 "Conductividad térmica de la placa, valor medio de referencia [W/mK]"

"Ahora se analiza el comportamiento que la inclusión del PCM en la placa PV y los cambios que produce tanto en la temperatura de operación PV, como en la eficiencia. Para ellos definimos nuevos parámetros pero se rigen prácticamente con las mismas fórmulas. Se puede añadir un término más a la ecuación del balance de energía global, que corresponde al efecto que tendría el PCM sobre la placa, disminuyendo esa diferencia de temperaturas"

Q\_lat= calorlatente (T\_pv; T\_fusion; deltat; k; x; Q\_acu; Q\_total; Area)

"La diferencia de Tpv con PCM respecto al ambiente, se define según la función"

T\_pv\pcm=T\_amb + l\_t\*((tau\*alpha - eta\_pv\pcm)/U\_l)\*Area - (Q\_lat/(U\_l\*deltat))\*Area

dif\_Tpv\pcm = T\_pv\pcm - T\_amb

deltat=900 "intervalo temporal en segundos, definido por los intervalos de 15min en los que hemos obtenido los datos climáticos"

"Características de la placa PV"

tau=0,91

alpha=0,95

"Eficiencia con la temperatura de la placa junto con PCM"

eta\_pv\pcm=eta\_Tref \* (1-beta\_ref\*(T\_pv\pcm-T\_ref))

"Los valores para T\_ref, beta\_ref y eta\_Tref están tabulados. Escogemos un valor promedio para placas comerciales dada por OTA"

T\_ref=28

beta\_ref= 0,0038

eta\_Tref=0,117

END "subprograma calculo"

"Programa principal con el bucle repeat"

PROCEDURE principal (N; l\_t[1..N]; T\_amb[1..N]; T\_pv[1..N]; U\_l[1..N]; Q\_acu[1..N]; Q\_lat[1..N]; T\_pv\pcm[1..N]; eta\_pv\pcm[1..N]; dif\_Tpv\pcm[1..N])

"Inicializamos variables contador"

i=1

"Calor acumulado en la primera iteración es nulo porque se ha liberado todo por la noche"

Q\_acu[1]=0

"Bucle para resolver cada fila del vector, acumulando iterativamente Q para las comparaciones"

REPEAT

"Llamada al subprograma de calculo Tpcm para que obtener valores de salida"

CALL calculoTpcm (I\_t[i]; T\_amb[i]; T\_pv[i]; Q\_acu[i]; U\_I[i]; Q\_lat; T\_pv\pcm; eta\_pv\pcm; dif\_Tpv\pcm)

"Asignación de valores a cada elemento de los vectores solución"

T\_pv\pcm[i]:=T\_pv\pcm

Q\_lat[i]:=Q\_lat

eta\_pv\pcm[i]:=eta\_pv\pcm

dif\_Tpv\pcm[i]:=dif\_Tpv\pcm

Q\_acu[i+1]:=Q\_acu[i] + Q\_lat "Acumulación de calor latente absorbido"

i:=i+1 "Incremento Contador de elemento vector"

UNTIL (i>N) "Limite de numero de elementos de cada vector"

END "Procedure principal"

"Número total de elementos vector"

N=nº datos por vector

"Definir vectores de entrada: Irradiación Solar y Temperatura Ambiente. Así como los obtenidos con el programa T sin PCM de temperatura de operación Tpv y el coeficiente global de pérdidas U\_I:"

{Array I\_t}: I\_t[i]=valores de cada elemento

{Array I\_t end}

{Array T\_amb}: T\_amb[i]=valores de cada elemento

{Array T\_amb end}

{Array T\_pv}: T\_pv[i]=valores de cada elemento

{Array T\_pv end}

{Array U\_I}: U\_I[i]=valores de cada elemento

{Array U\_I end}

"Llamada al programa de cálculo principal para que obtener valores de salida"

CALL principal (N; I\_t[1..N]; T\_amb[1..N]; T\_pv[1..N]; U\_I[1..N]; Q\_acu[1..N]; Q\_lat[1..N]; T\_pv\pcm[1..N]; eta\_pv\pcm[1..N]; dif\_Tpv\pcm[1..N])

#### ► **Para la mezcla de 2 PCM en el mismo contenedor metálico:**

FUNCTION calorlatente (T\_pv; T\_fusion; deltat; k; x; Q\_acu; Q\_total; Area)

"Calor latente. Positivo cuando el material lo absorbe, y negativo si lo disipa"

If (T\_pv < T\_fusion) and (Q\_acu <= 0) then

Q\_lat:= 0

Else

If (T\_pv >= T\_fusion) and (Q\_acu < Q\_total) then

Q\_lat:=(T\_pv - T\_fusion)\*k\*deltat\*Area/x "Cuando T\_pv es mayor que T\_fusion, absorbe calor latente hasta que llegue a Qtotal. Valor positivo"

Else

If (T\_pv >= T\_fusion) and (Q\_acu >= Q\_total) then

```
Q_lat:= 0 "Se ha superado la capacidad de absorber"
Else
If (T_pv < T_fusion) and (Q_acu > 0) then
Q_lat:= (T_pv - T_fusion)*k*deltat*Area/x "Cuando T_pv es menor que T_fusion, es cuando
empieza el proceso inverso y disipa calor latente. Valor negativo"
Endif
Endif
Endif
Endif
calorlatente:= Q_lat
END
```

"Subprograma para realizar el calculo Tpcm"

```
SUBPROGRAM calculoTpcm (I_t; T_amb; T_pv; U_I; Q_acu1; Q_acu2; Q_lat1; Q_lat2; Q_s;
T_pv\pcm; eta_pv\pcm; dif_Tpv\pcm)
```

"Una vez obtenidas las Tpv, elegimos un PCM cuyo punto de fusión entre en el rango de operación, para disminuir así el calentamiento de la placa. Dependiendo de las temperaturas obtenidas sin PCM, buscaremos un material con un punto de fusión que optimice durante el mayor tiempo posible y evite que se sobrecaliente en exceso. Aquí se especifican las características del PCM elegido para Zaragoza"

"Datos PCM 1"

```
T_fusion1=32 "[°C]"
ro1 =1330 "Densidad [kg/m3]"
H1=251000 "Calor latente o capacidad calorífica del PCM escogido en [J/kg]"
Q_total1=H1*m_pcm1 "Calor latente total del PCM, capacidad de almacenar calor [J]"
Vol1= m_pcm1/ro1 "Volumen PCM1 [m3] y masa del PCM1 en kg"
```

"Datos PCM2"

```
T_fusion2=40 "[°C]"
ro2 =1442 "Densidad [kg/m3]"
H2=280000 "Calor latente o capacidad calorífica del PCM escogido en [J/kg]"
Q_total2=H2*m_pcm2 "Calor latente total del PCM, capacidad de almacenar calor [J]"
Vol2= m_pcm2/ro2 "Volumen PCM2 [m3] y masa del PCM2 en kg"
```

Area= I "area total de placa [m2]"

x= 0,01 "espesor del contenedor de PCM, constante [m]"

Volumen=Area\*x "Volumen del contenedor de PCM [m3]"

Volumen=Vol1 + Vol2 "Volumen total también queda fijo al ser área y espesor constantes "

m\_total=m\_pcm1 + m\_pcm2

ro\_media= (ro1+ro2)/2

m\_pcm1 = m\_pcm2 "en la mezcla, repartimos el porcentaje en masa de los PCM al 50%"

"Ahora se analiza el comportamiento que la inclusión del PCM en la placa PV y los cambios que produce tanto en la temperatura de operación PV, como en la eficiencia. Para ellos definimos nuevos parámetros pero se rigen prácticamente con las mismas fórmulas. Se puede añadir un término más a la ecuación del balance de energía global, que corresponde al efecto que tendría los 2 PCM sobre la placa, disminuyendo esa diferencia de temperaturas"

Q\_lat1= calorlatente (T\_pv; T\_fusion1; deltat; k; x; Q\_acu1; Q\_total1; Area)

Q\_lat2= calorlatente (T\_pv; T\_fusion2; deltat; k; x; Q\_acu2; Q\_total2; Area)

Q\_s= Q\_lat1 + Q\_lat2

"La diferencia de Tpv con PCM respecto al ambiente, se define según la función"

$T_{pv}\backslash pcn = T_{amb} + I_t * ((\tau * \alpha - \eta_{pv}\backslash pcn) / U_I) * Area - (Q_s / (U_I * \Delta t)) * Area$   
 $\Delta T_{pv}\backslash pcn = T_{pv}\backslash pcn - T_{amb}$   
 $\Delta t = 900$  "intervalo temporal en segundos, definido por los intervalos de 15min en los que hemos obtenido los datos climáticos"

"Características de la placa PV"

$\tau = 0,91$  "Transmitancia"

$\alpha = 0,95$  "Absorbancia"

$k = 0,2$  "Conductividad térmica de la placa, valor medio de referencia"

"Eficiencia con la temperatura de la placa junto con PCM"

$\eta_{pv}\backslash pcn = \eta_{Tref} * (1 - \beta_{ref} * (T_{pv}\backslash pcn - T_{ref}))$

"Los valores para  $T_{ref}$ ,  $\beta_{ref}$  y  $\eta_{Tref}$  están tabulados. Escogemos un valor promedio para placas comerciales dada por OTA"

$T_{ref} = 28$

$\beta_{ref} = 0,0038$

$\eta_{Tref} = 0,117$

END "subprograma calculo Tpcm"

"Programa principal con el bucle repeat"

PROCEDURE principal (N;  $I_t[1..N]$ ;  $T_{amb}[1..N]$ ;  $T_{pv}[1..N]$ ;  $U_I[1..N]$ ;  $Q_{acu1}[1..N]$ ;  $Q_{lat1}[1..N]$ ;  $Q_{acu2}[1..N]$ ;  $Q_{lat2}[1..N]$ ;  $Q_s[1..N]$ ;  $T_{pv}\backslash pcn[1..N]$ ;  $\eta_{pv}\backslash pcn[1..N]$ ;  $\Delta T_{pv}\backslash pcn[1..N]$ )

"Inicializamos variables contador"

$i = 1$

"Calor acumulado en la primera iteración es nulo porque se ha liberado todo por la noche"

$Q_{acu1}[1] = 0$

$Q_{acu2}[1] = 0$

"Bucle para resolver cada fila del vector, acumulando iterativamente Q para las comparaciones"

REPEAT

"Llamada al subprograma de calculo Tpcm para que obtener valores de salida"

CALL calculoTpcm ( $I_t[i]$ ;  $T_{amb}[i]$ ;  $T_{pv}[i]$ ;  $U_I[i]$ ;  $Q_{acu1}[i]$ ;  $Q_{acu2}[i]$ ;  $Q_{lat1}$ ;  $Q_{lat2}$ ;  $Q_s$ ;  $T_{pv}\backslash pcn$ ;  $\eta_{pv}\backslash pcn$ ;  $\Delta T_{pv}\backslash pcn$ )

"Asignación de valores a cada elemento de los vectores solución"

$T_{pv}\backslash pcn[i] := T_{pv}\backslash pcn$

$Q_{lat1}[i] := Q_{lat1}$

$Q_{lat2}[i] := Q_{lat2}$

$Q_s[i] := Q_s$

$\eta_{pv}\backslash pcn[i] := \eta_{pv}\backslash pcn$

$\Delta T_{pv}\backslash pcn[i] := \Delta T_{pv}\backslash pcn$

$Q_{acu1}[i+1] := Q_{acu1}[i] + Q_{lat1}$  "Acumulación de calor latente absorbido por PCM1"

$Q_{acu2}[i+1] := Q_{acu2}[i] + Q_{lat2}$  "Acumulación de calor latente absorbido por PCM2"

$i := i + 1$  "Incremento Contador de elemento vector"

UNTIL ( $i > N$ ) "Limite de numero de elementos de cada vector"

END "Procedure principal"

"Número total de elementos vector"

N=nº datos por vector

"Definir vectores de entrada: Irradiación Solar y Temperatura Ambiente. Así como los obtenidos con el programa T sin PCM de temperatura de operación Tpv y el coeficiente global de pérdidas U\_l:"

{Array I\_t}: I\_t[i]=valores de cada elemento  
{Array I\_t end}

{Array T\_amb}: T\_amb[i]=valores de cada elemento  
{Array T\_amb end}

{Array T\_pv}: T\_pv[i]=valores de cada elemento  
{Array T\_pv end}

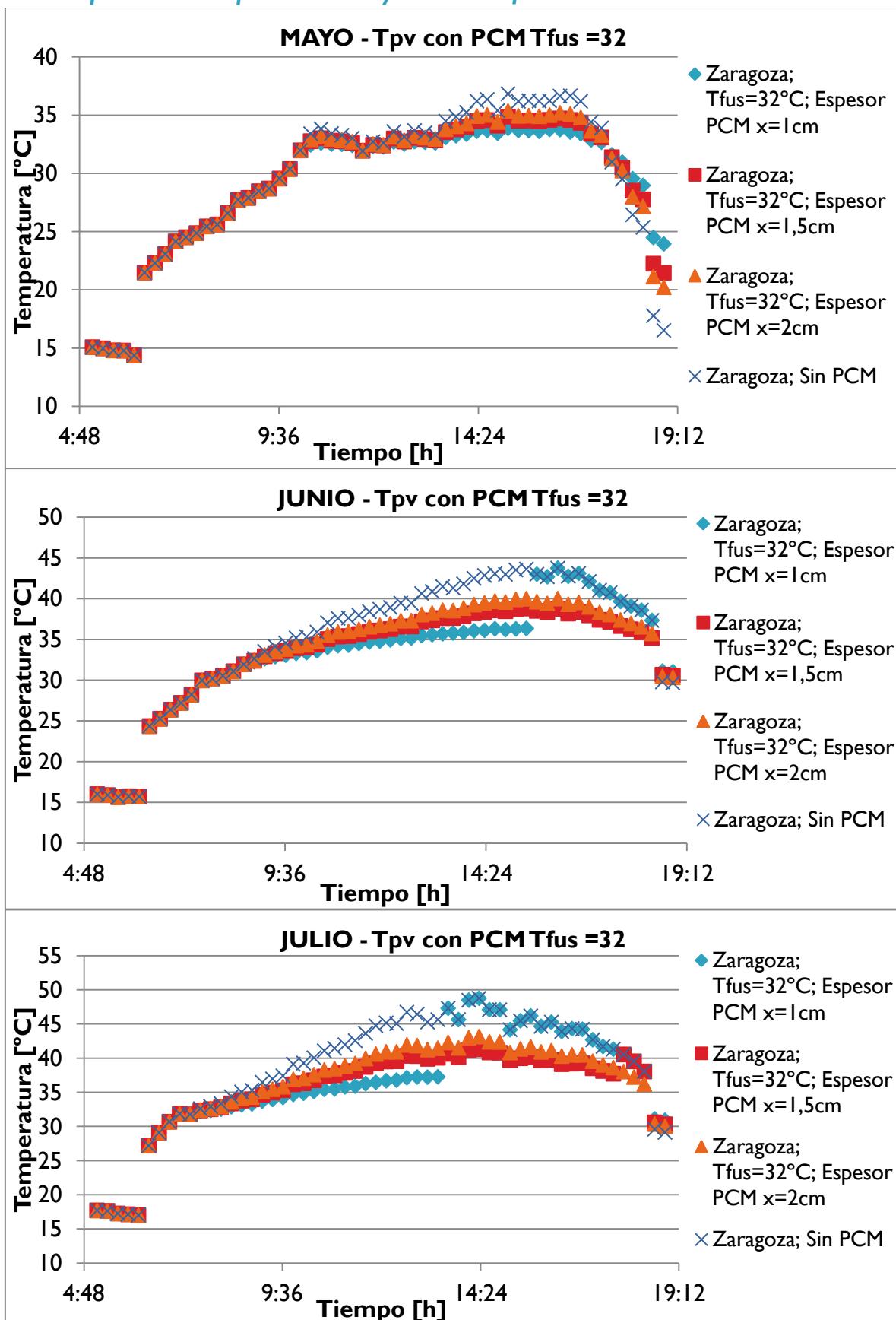
{Array U\_l}: U\_l[i]=valores de cada elemento  
{Array U\_l end}

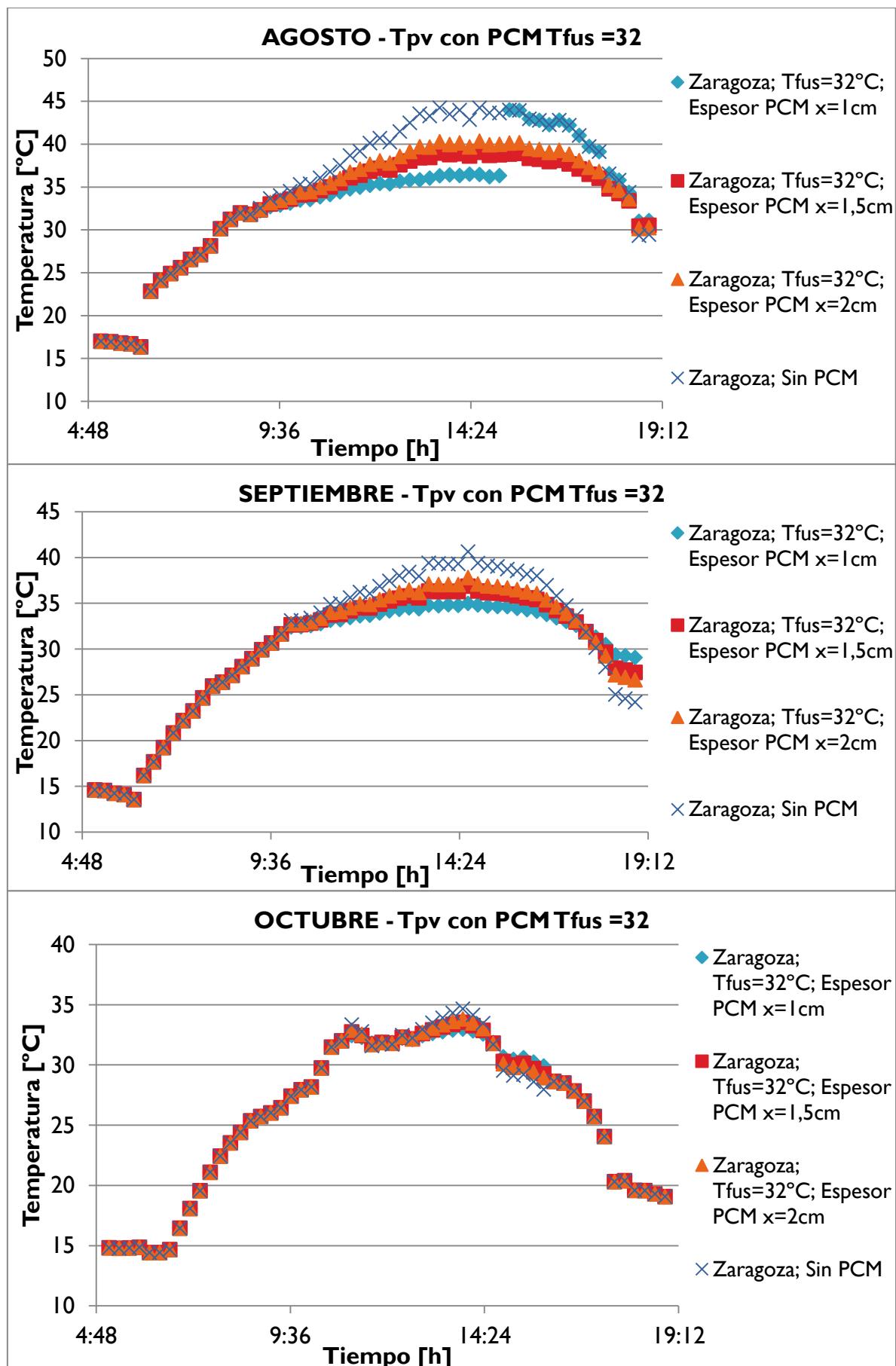
"Llamada al programa de cálculo principal para que obtener valores de salida"

CALL principal (N; I\_t[1..N]; T\_amb[1..N]; T\_pv[1..N]; U\_l[1..N]; Q\_acu1[1..N];  
Q\_lat1[1..N]; Q\_acu2[1..N]; Q\_lat2[1..N]; Q\_s[1..N]; T\_pv\pcm[1..N]; eta\_pv\pcm[1..N];  
dif\_Tpv\pcm[1..N])

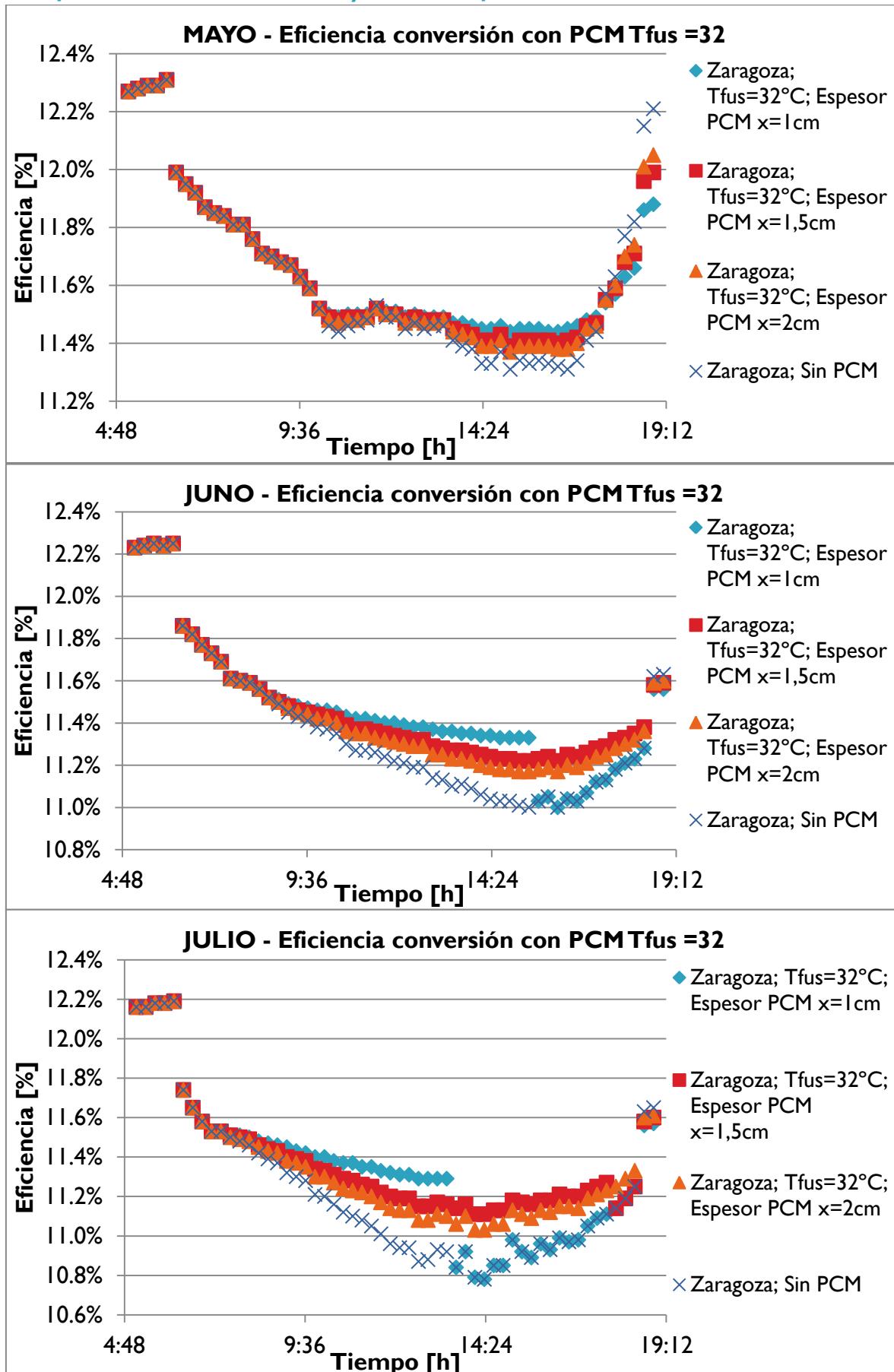
## Gráficos mensuales de Zaragoza para análisis de parámetros críticos

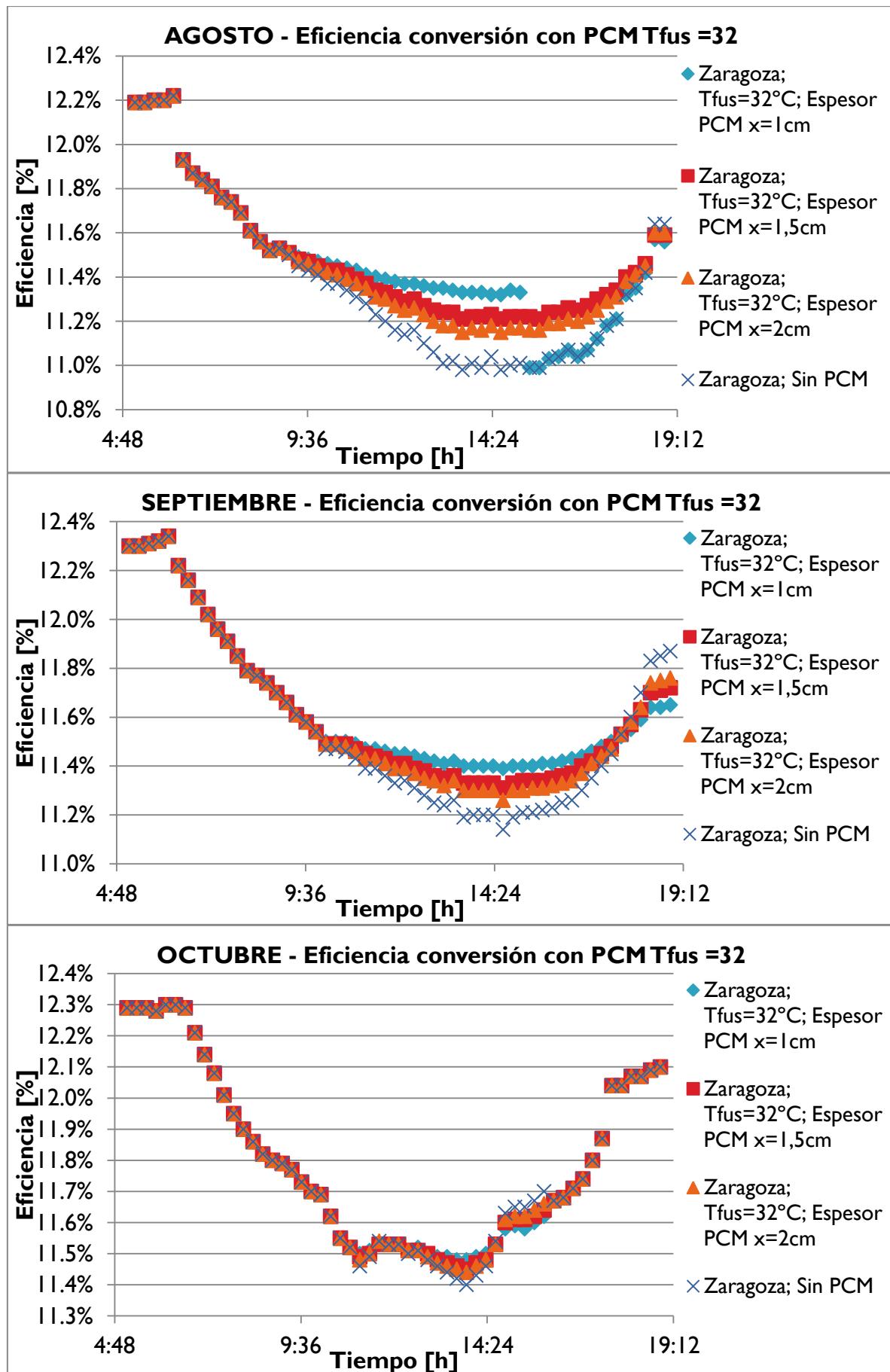
### ► Temperatura de operación con y sin PCM $T_{fusion}=32^{\circ}\text{C}$



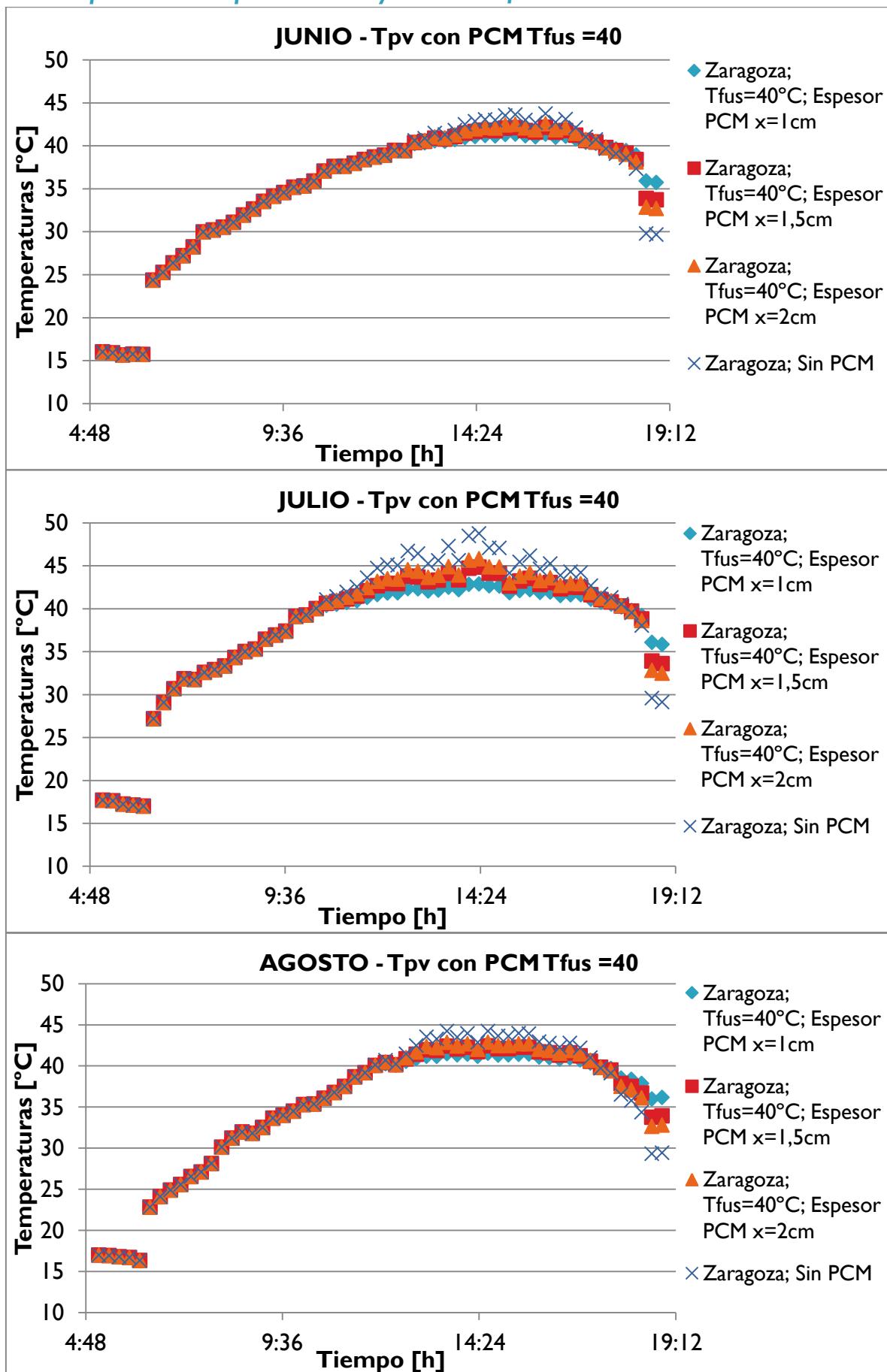


► Eficiencia de conversión con y sin PCM  $T_{fusion}=32^\circ\text{C}$

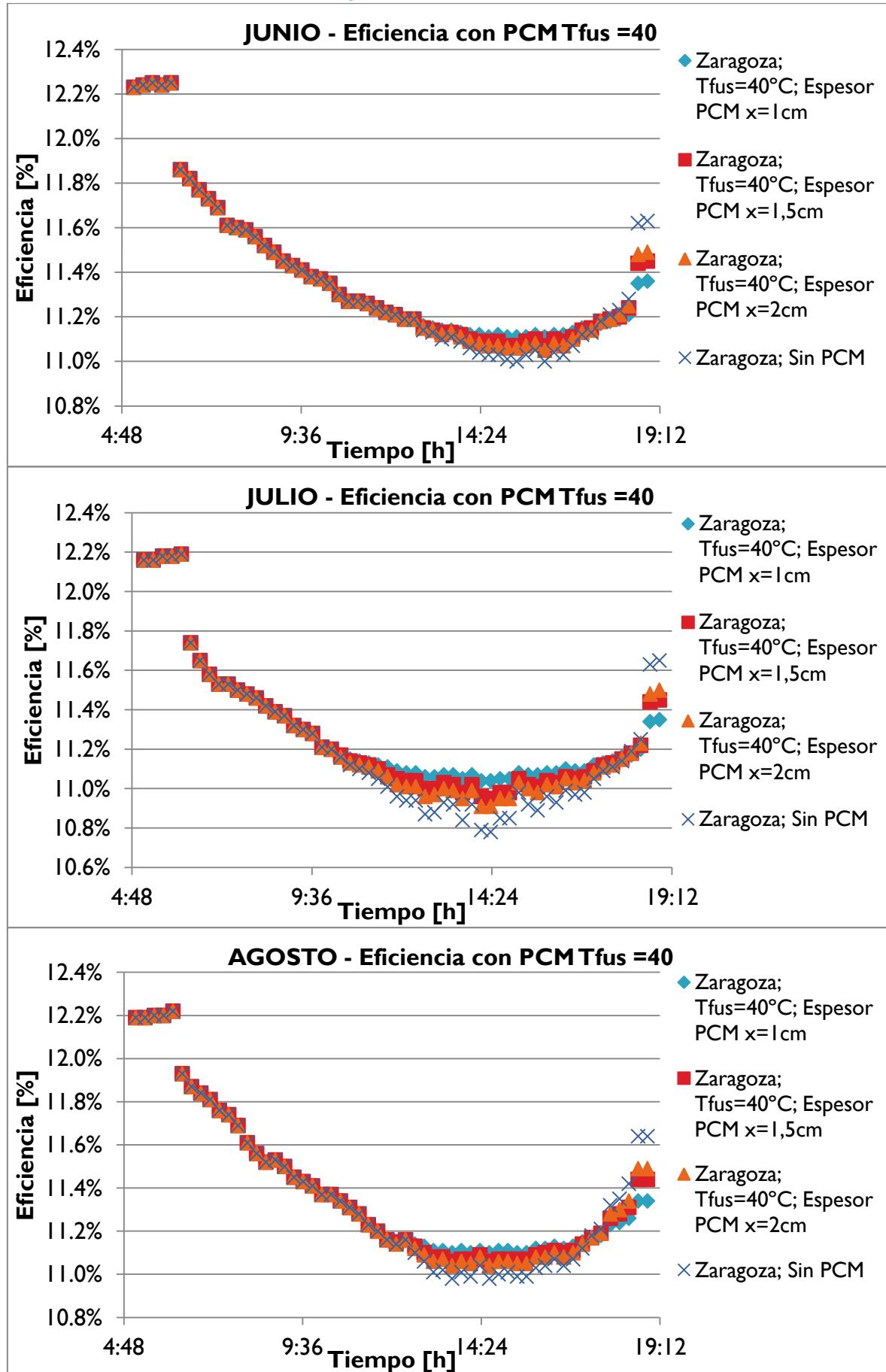




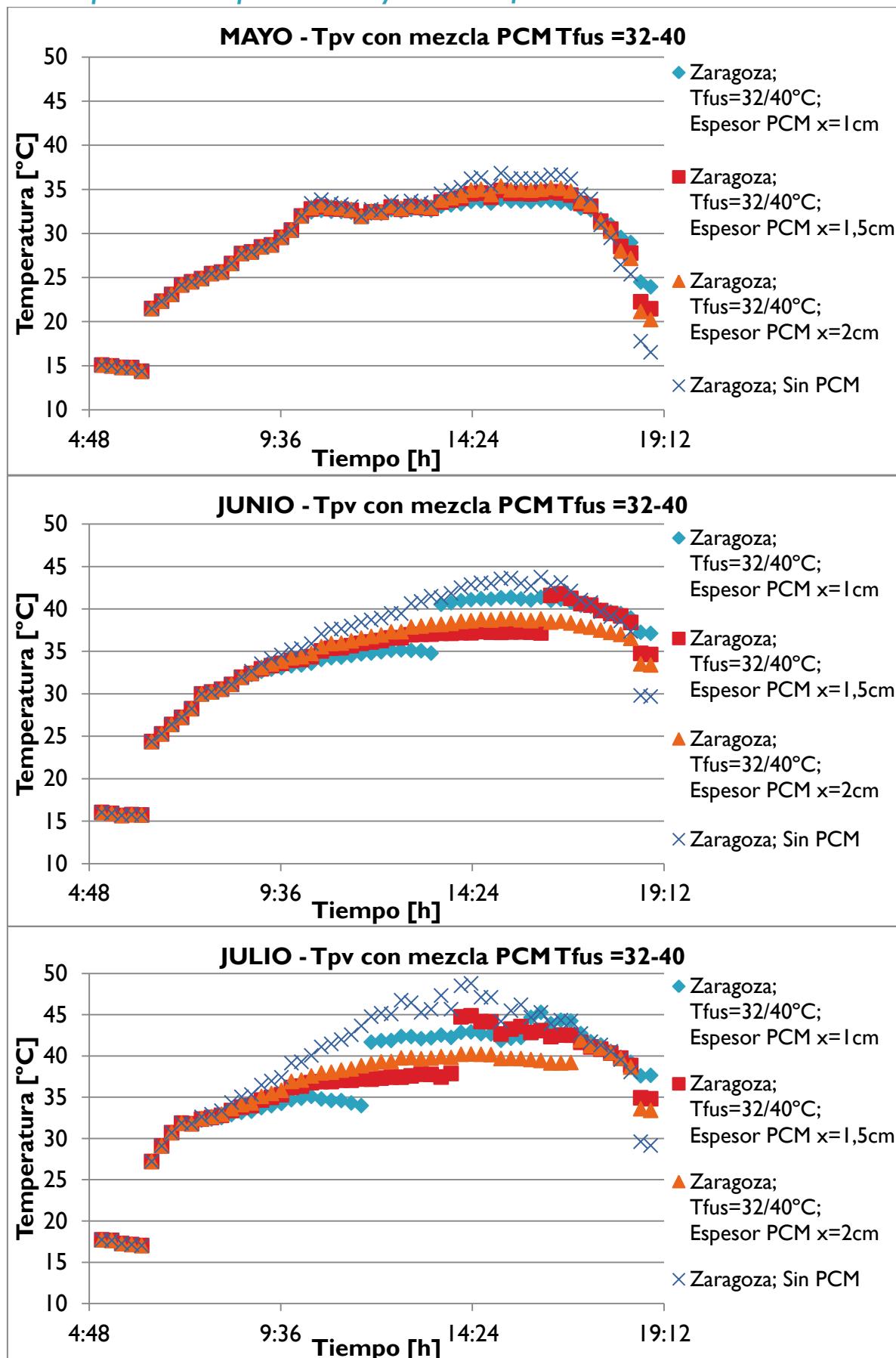
► Temperatura de operación con y sin PCM  $T_{fusion}=40^{\circ}\text{C}$

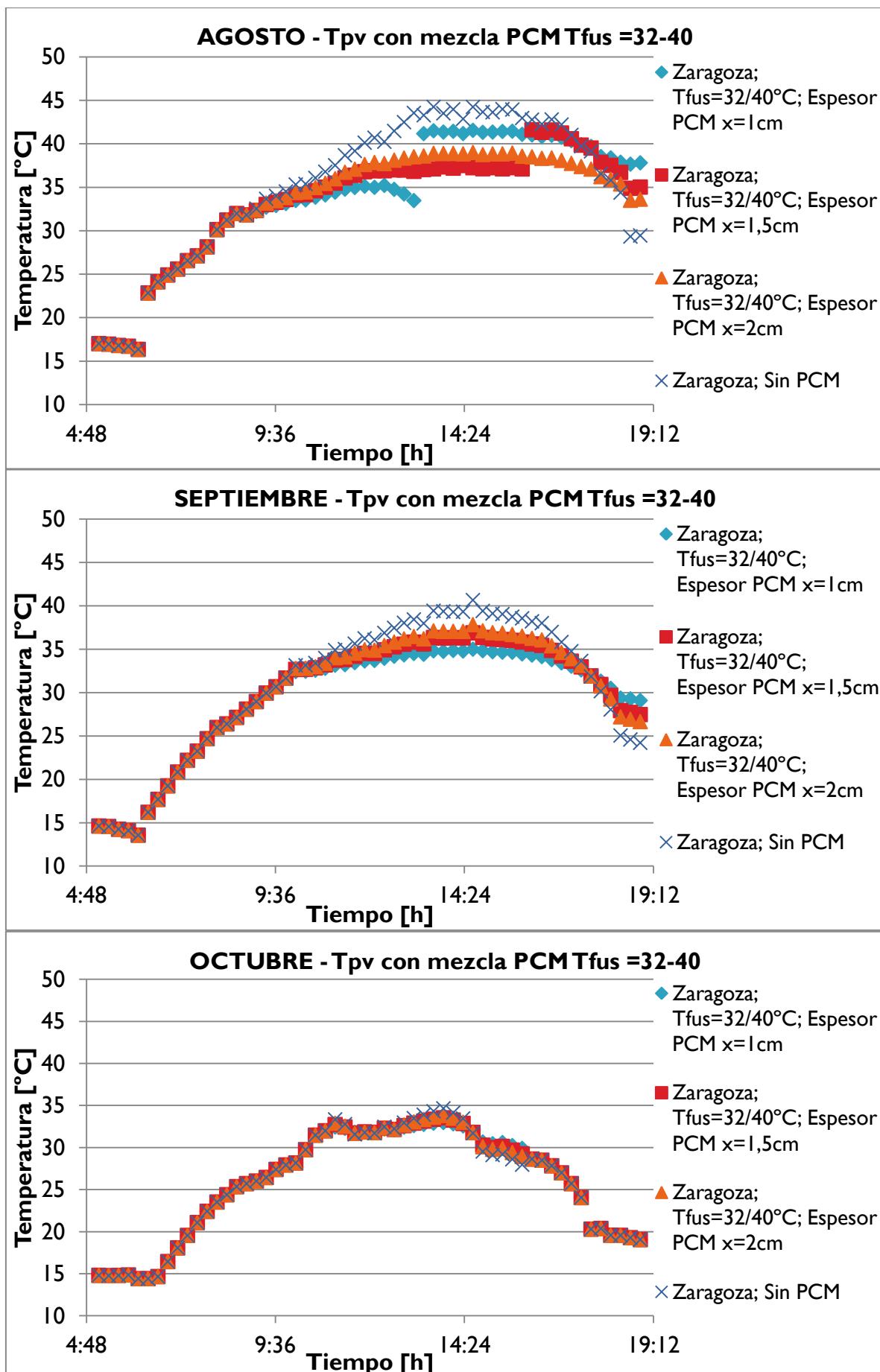


► Eficiencia de conversión con y sin PCM Tfus=40°C

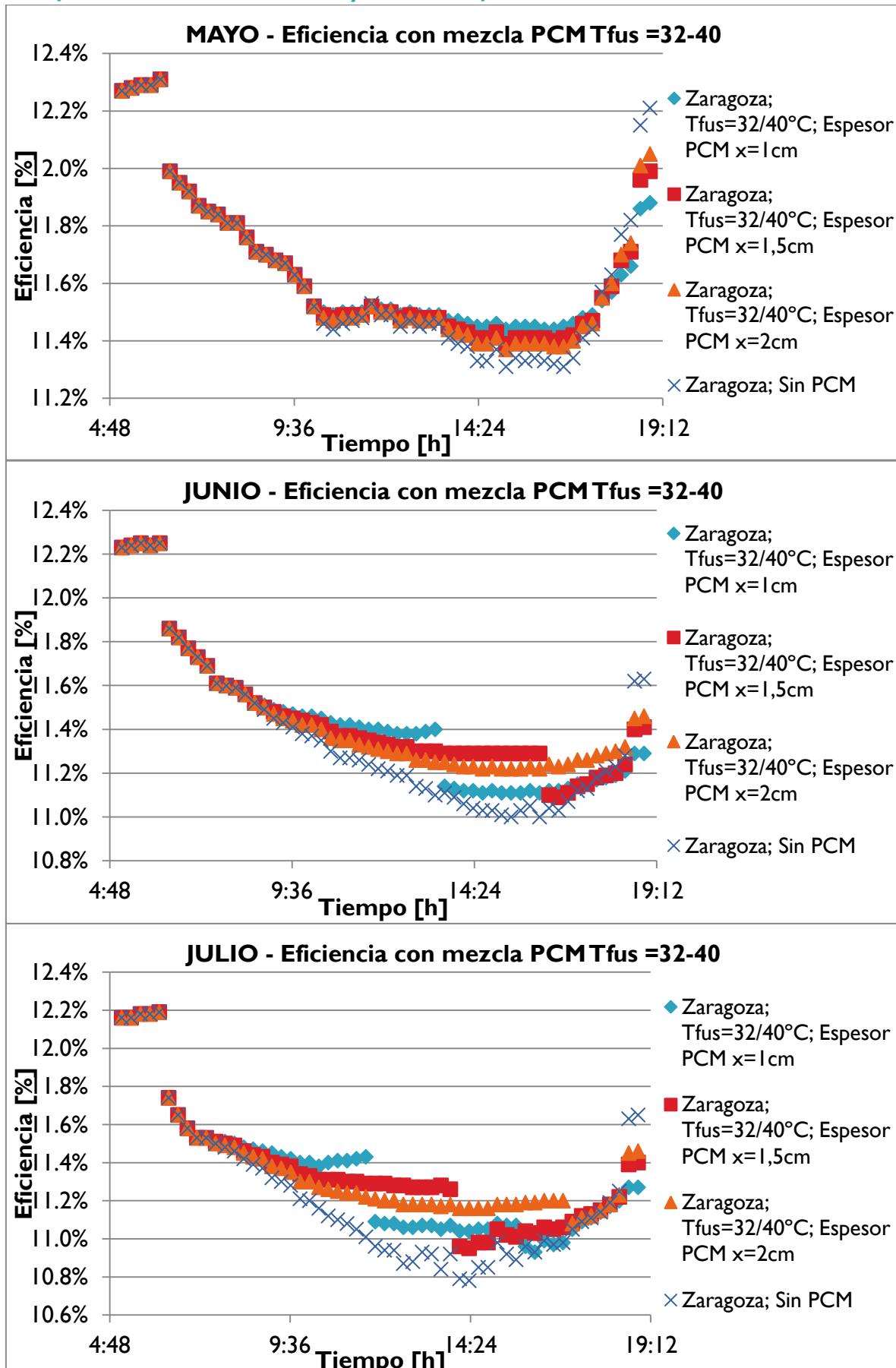


► Temperatura de operación con y sin PCM  $T_{fusion}=32\backslash 40^{\circ}\text{C}$





► Eficiencia de conversión con y sin PCM  $T_{fusion}=32/40^{\circ}\text{C}$



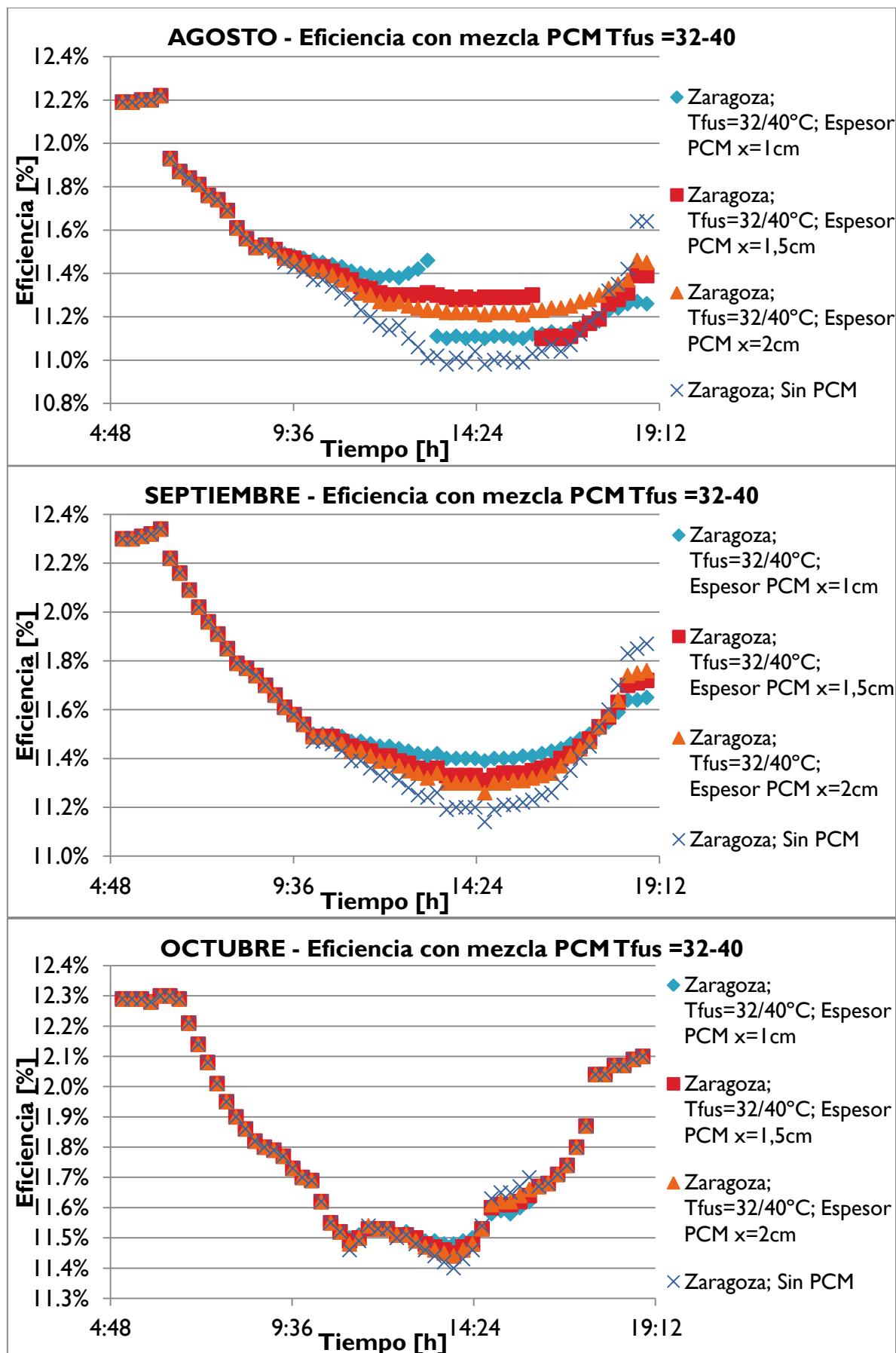
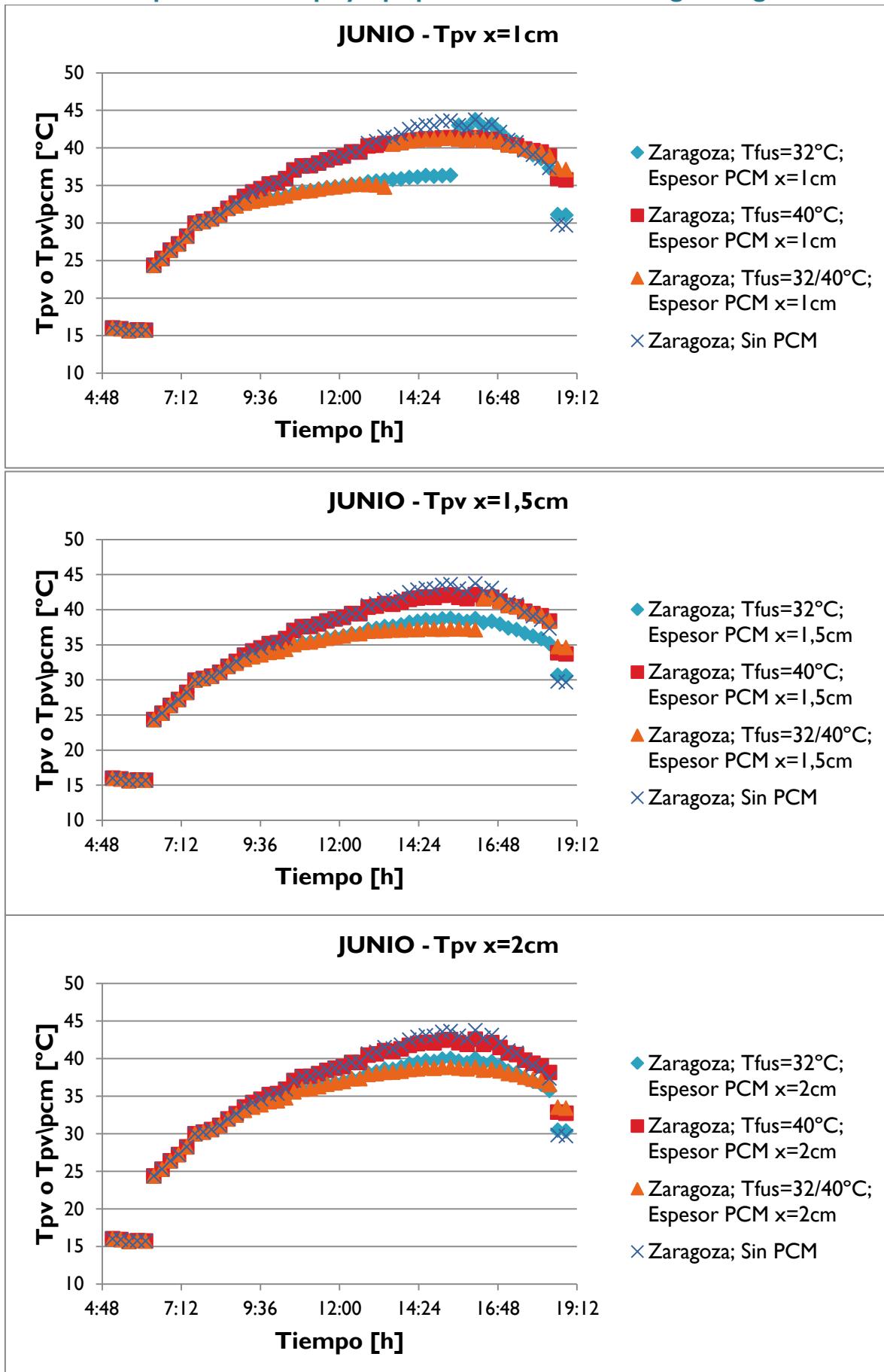
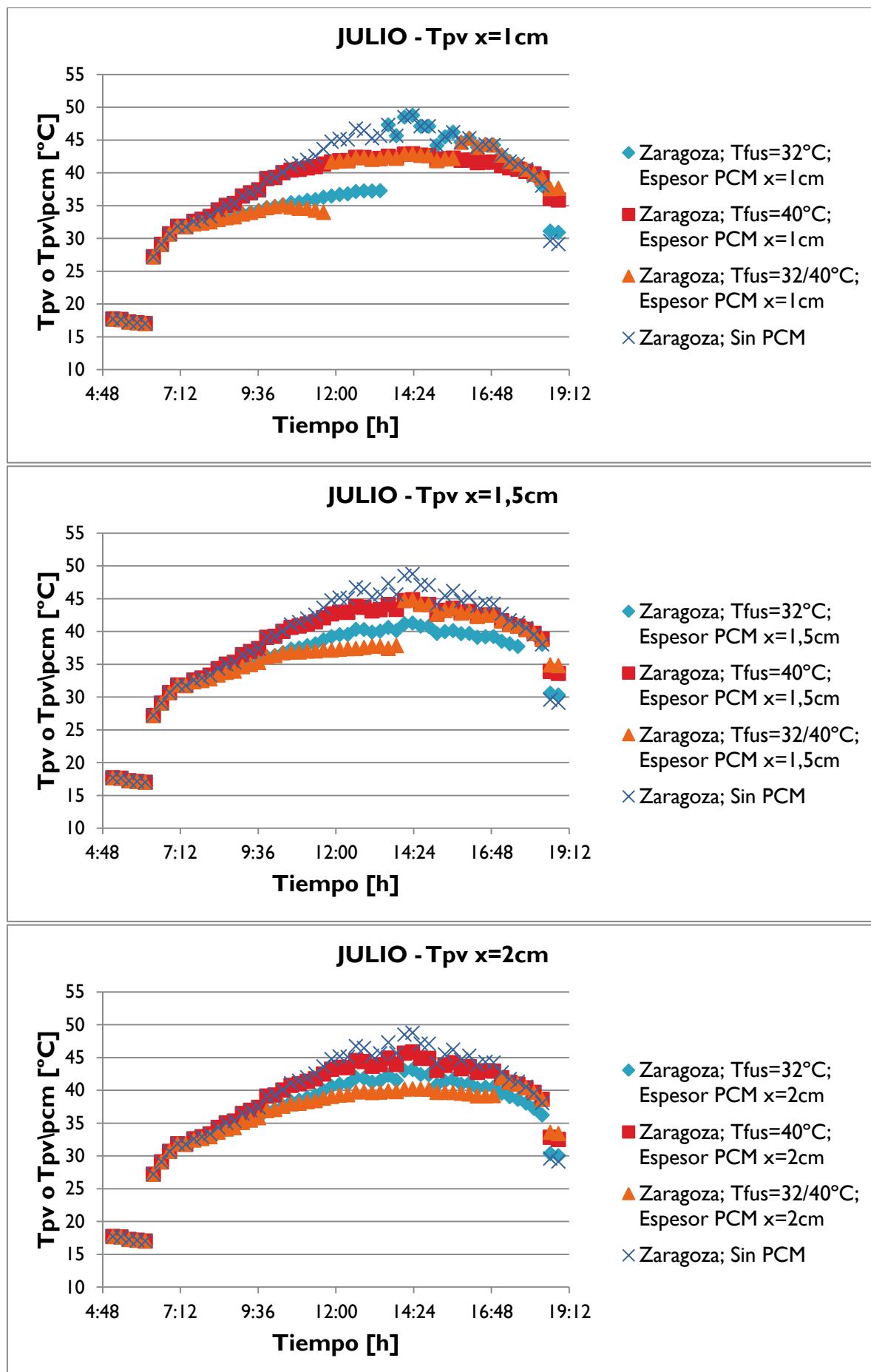
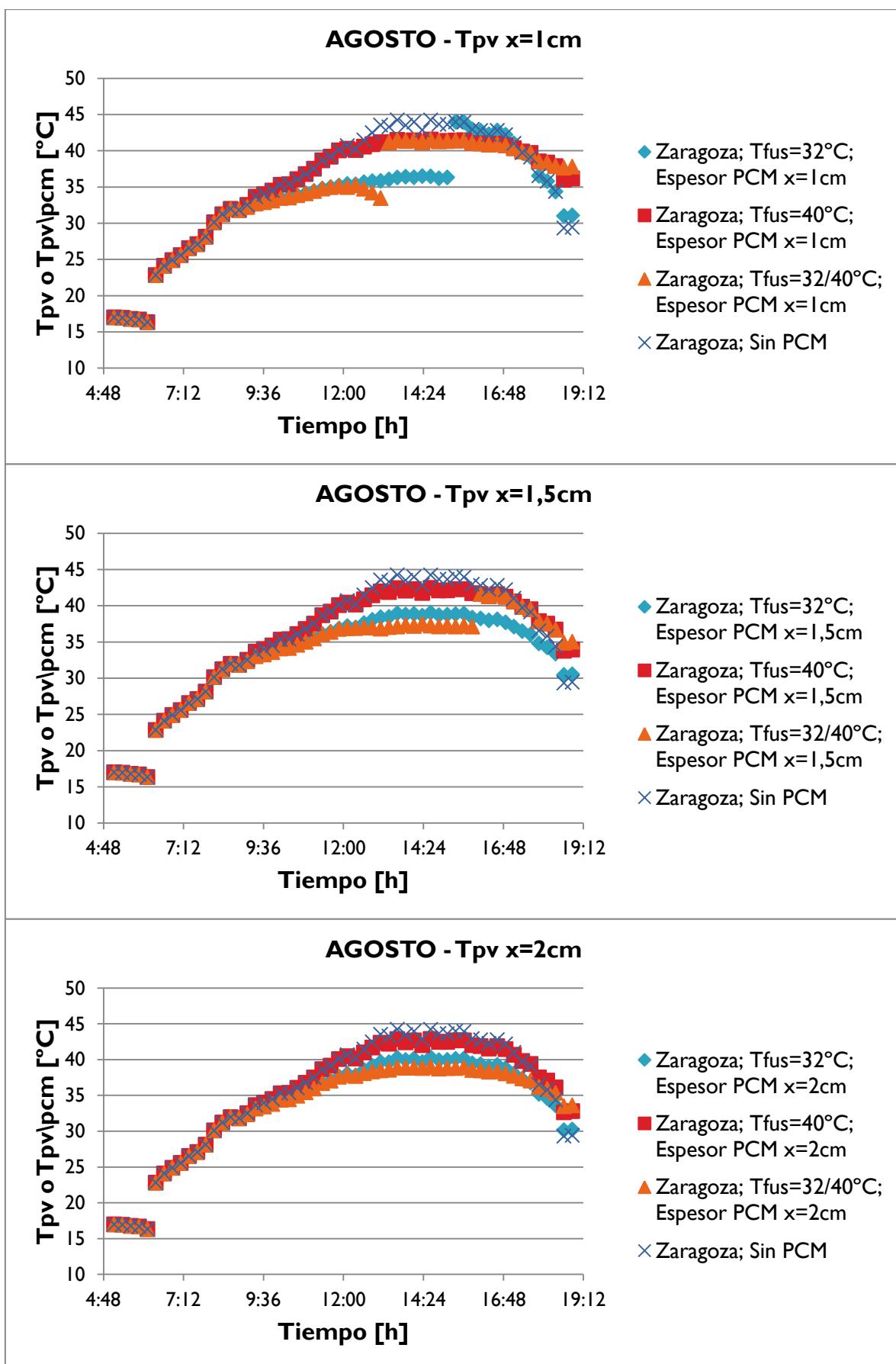


Figura D-1. Comparación de  $T_{pv}$  [°C] y  $\eta_{pv}$  [%] con y sin PCM en función de  $T_{fusion}$  para Zaragoza

**Gráficas comparativas de Tpv y Tpv\pcm: alternativas Zaragoza según x**





Figura D-2. Comparación de  $T_{pv}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] con y sin PCM en función del espesor  $x$  para Zaragoza

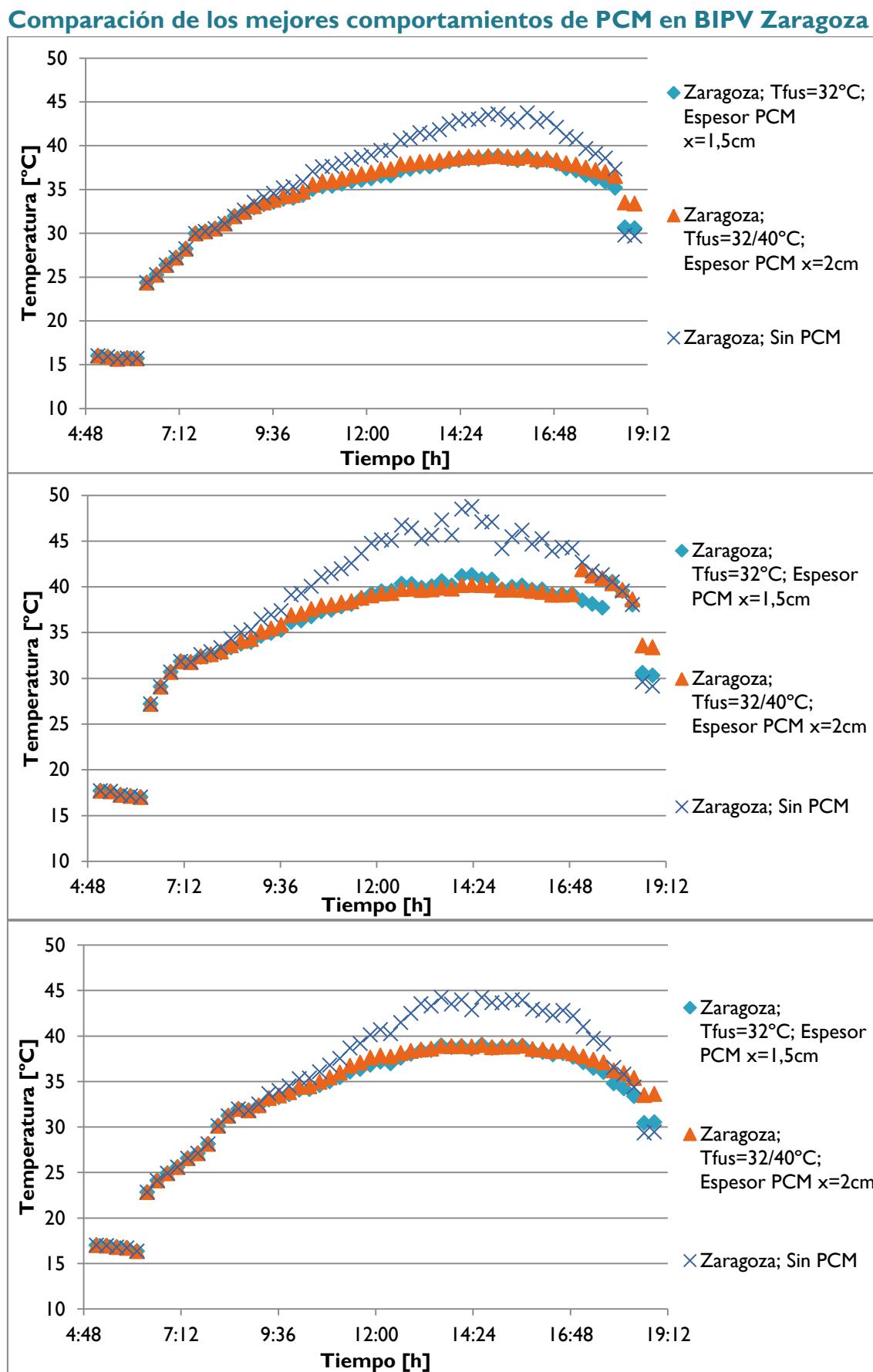


Figura D-3. Comparación de Tpv [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Zaragoza

## Viabilidad en SC distintas

### Datos geográficos y climatológicos de nueva SC: Sevilla

Coordenadas Sevilla:

- Latitud: 37° 22' 38" Norte Decimal: 37.377
- Longitud: 55° 59' 13" Oeste Decimal: -5.987

La orientación óptima de la PV para un año en Sevilla será fija en 34° de inclinación y -1° de acimutal, proporcionados por la aplicación PVGIS-3, así como los valores diarios de radiación solar global y temperatura ambiente. El intervalo temporal de la toma de datos es de 15 minutos. Las características técnicas de la placa serán consideradas las mismas que en el caso de Zaragoza.

### Gráficas de temperatura y eficiencia para nueva SC: Sevilla

En las siguientes gráficas se presentan los datos anuales de operación sin PCM, obtenidos en Sevilla, para temperatura de operación y eficiencia de conversión energética.

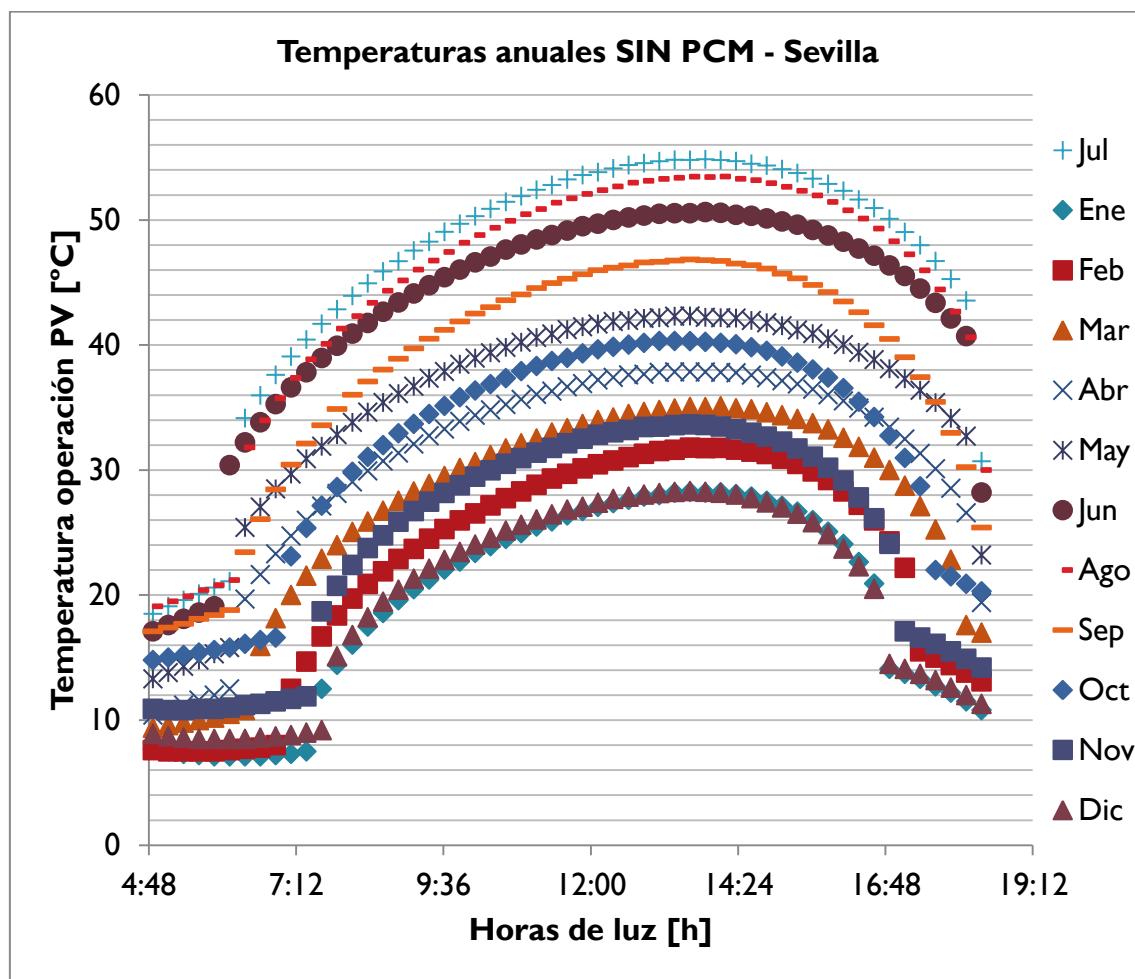


Figura D-4. Tpv anuales SIN PCM en Sevilla [°C]

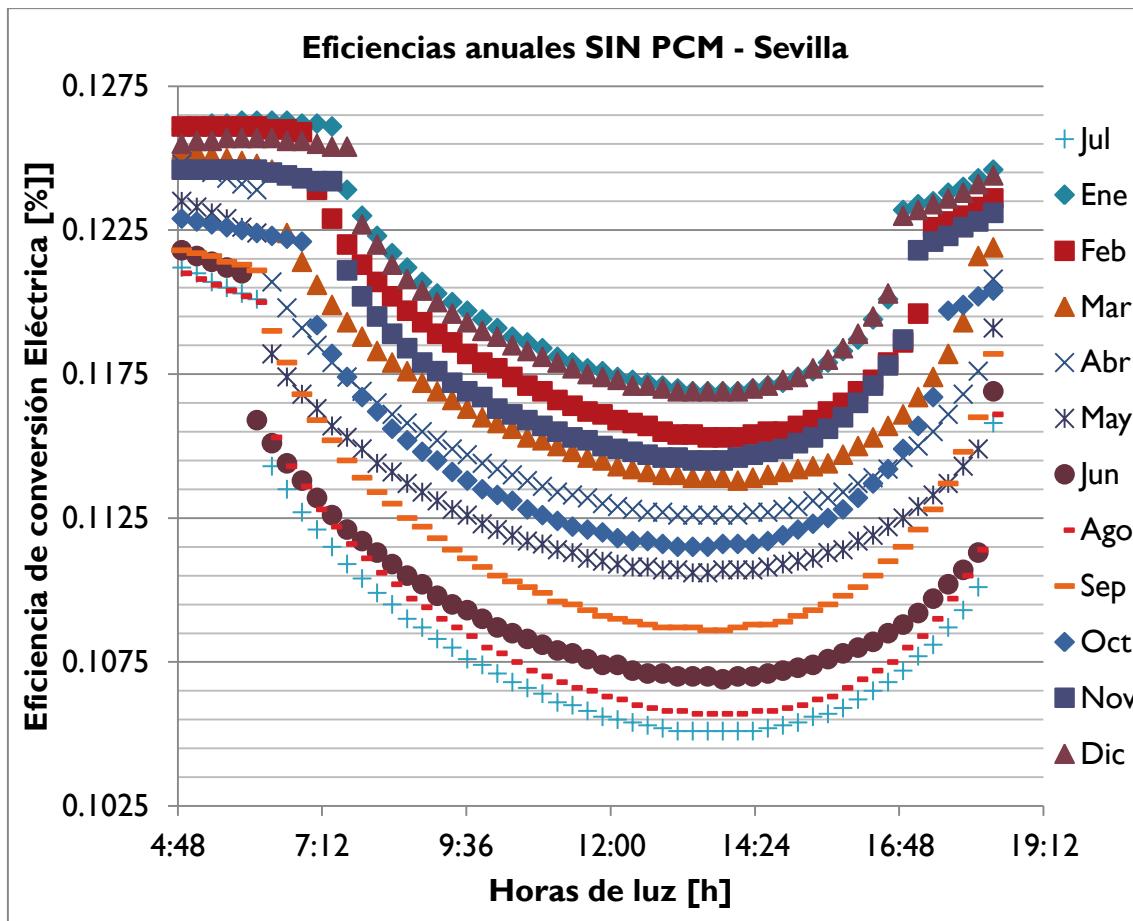
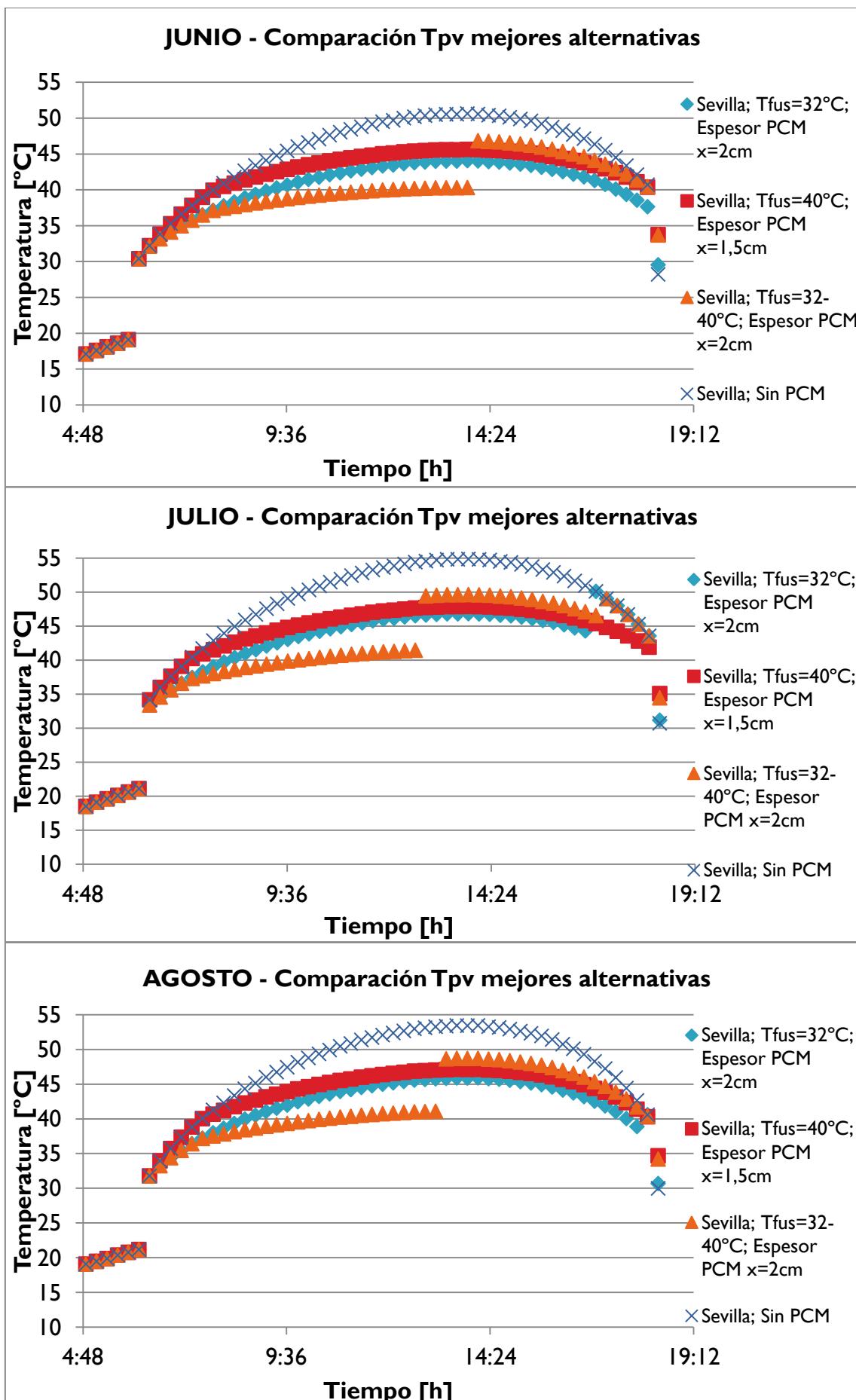


Figura D-5. Eficiencias anuales SIN PCM en Sevilla  $\eta_{PV} [\%]$

Cabe destacar que es para el mes de Julio cuando se alcanza la temperatura más alta,  $T_{pv} = 54.85^{\circ}\text{C}$  y corresponde a la mínima eficiencia de conversión de 10.51%. A pesar de que la temperatura ambiente es similar, son valores más altos que en Zaragoza, principalmente porque la radiación solar es mayor (su máximo se acerca a los  $850\text{W/m}^2$ ) y porque el viento no ventila por convección, ya que se ha supuesto un valor muy bajo. En Junio y Agosto, también alcanzan muy elevadas temperaturas. En los meses de invierno, los valores máximos de  $T_{pv}$  también son superiores a los de Zaragoza, se encuentran en el intervalo de 25 a 30°C.

Se han realizado el proceso de cálculo expuesto en **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para todas combinaciones de parámetros críticos calculadas para Sevilla, y se aprecian notorias diferencias con la SC de Zaragoza. Las figuras a continuación ([Figura D-6](#)) muestran el comportamiento de las tres opciones que mejor regulan la temperatura durante los meses de mayor irradiación solar. Para Junio, Agosto y Septiembre, estas tres opciones controlan  $T_{pv}$  a lo largo de todo el día. El PCMI y el PCM2 muestran comportamientos similares, a diferencia de que el primero consigue una mayor reducción  $T_{pv} - T_{pv|pcm}$ . Por otro lado, la mezcla de los dos PCM es quien proporciona la máxima diferencia de hasta 10°C; sin embargo, llega un momento en el que se produce un salto brusco en su  $T_{pv|pcm}$ , elevando la temperatura por encima de las dos anteriores.



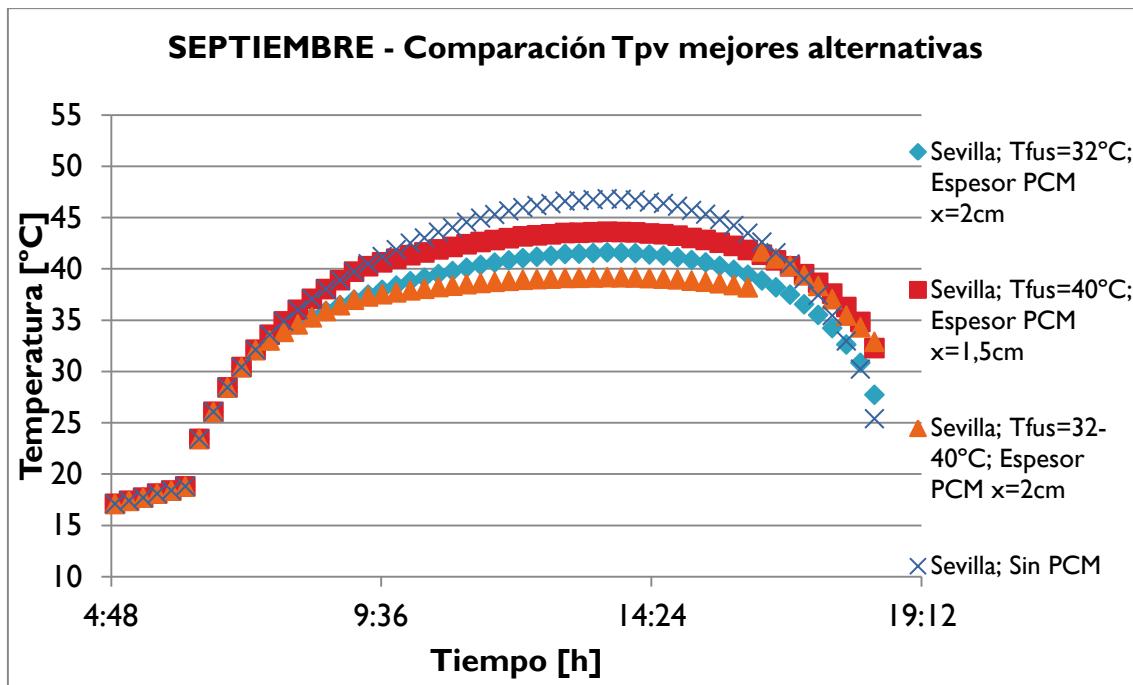


Figura D-6. Comparación de temperaturas [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Sevilla

Si analizamos en mes de Julio, que es el más crítico, tanto la sal Glauber como la mezcla de los dos PCM con  $x=2\text{cm}$  llegan al máximo calor acumulado y la capa de PCM dejaría de tener influencia sobre  $T_{pv}$ . Por otro lado, el PCM2 ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) con  $T_{fusión}=40^\circ\text{C}$  y  $x=1.5\text{cm}$  sí que actuaría a lo largo de todo el día, sin embargo  $T_{pv\backslash\text{pcm}}$ , aún regulado con una reducción de 7°C, alcanza valores demasiado elevados (hasta un máximo de  $47.88^\circ\text{C}$ ). Por tanto, se puede decir que ninguna de estas combinaciones analizadas sería suficiente para esta SC.



## **E ANEXO: IMPLICACIONES AMBIENTALES Y VIABILIDAD ECONÓMICA**

### **Tiempo de vida útil y degradación**

En este apartado se enfoca la atención en la vida útil de los distintos elementos del sistema PV/PCM, así como en la influencia que tiene el PCM sobre la degradación y cómo ésta afecta a la vida útil de la PV.

Desde el punto de vista del fabricante, el tiempo de vida útil es el período de tiempo que garantiza unos niveles de operación, por ejemplo la potencia obtenida del sistema PV, superiores a cierto límite respecto a su valor inicial,  $L_D$ , suele fijarse en el 80%, (*Ndiaye y col., 2013*). También puede quedar obsoleta debido a una avería, evento catastrófico, razones de seguridad. En la revisión de la literatura, funciones de fiabilidad exponen que en los primeros 10-12 años se puede garantizar el 90% de su potencia inicial, y que sería menor del 80% tras 25 años de operación (*Sharma y Chandel, 2013*; *Vázquez y Rey-Stolle, 2008*).

Diversos estudios llevados a cabo señalan varios modos de degradación que surgen con el paso de tiempo durante el período de operación de la PV. A destacar la corrosión y la decoloración como los factores predominantes (*Ndiaye y col., 2013*); pero la lista de posibles defectos es larga. En este estudio de *Sharma y Chandel (2013)*, cita una *Ecuación E-1* que relaciona linealmente el tiempo de vida útil,  $t_L$ , con el ratio de degradación de la PV,  $R_D$ . Además, una PV puede presentar las siguientes modalidades de degradación: rotura de las interconexiones, rotura de la propia placa, fallos en las uniones soldadas, fallos en la caja de conexiones eléctricas, circuitos abiertos que provocan arcos voltaicos, corrosión, delaminación, pérdida de adhesión y elasticidad, decoloración, puntos calientes, desviaciones en las líneas de gramilado, corrosión electroquímica por oxidación o fallos con el diodo baipás. El factor fundamental común a todos estos mecanismos de degradación son las altas temperaturas de operación, ya que aceleran los procesos físicos (*Kurtz y col., 2009*).

**Ecuación E-1. Tiempo de vida útil  $t_L$ , [años], en función del límite de degradación [%] y el ratio de degradación de la PV,  $R_D$  [%/año]. (Sharma y Chandel, 2013)**

$$t_L = \frac{100\% - L_D}{R_D}$$

Es conveniente tener en cuenta que a  $R_D$  se le deberían añadir unos porcentajes extra tanto en la desviación de la potencia máxima especificada en la ficha técnica (comúnmente en las actuales PV, 5%) como en la tolerancia de la medición (3%) (*Vázquez y Rey-Stolle, 2008*).

Numerosos han sido los estudios llevados a cabo para determinar  $R_D$ , (*Jordan y Kurtz, 2013; Kurtz y col., 2009; Sorloaica-Hickman y col., 2012; Vázquez y Rey-Stolle, 2008*), para situarlo en un valor de -0.5%/año en climas moderados y -0.7%/año si el clima es cálido y muy húmedo. El último autor citado, diferencia en su artículo las medianas de  $R_D$  según el tipo de placa. Por un lado, las placas de Si, caso calculado en este proyecto, se sitúa en -0.5%/año; y por otro lado, en las placas de película fina se observan ratios el doble de elevados (-1%/año).

La importancia del control y regulación de la temperatura de operación de la PV, queda por lo tanto patente dada la estrecha relación que mantiene con su propia

degradación. Para analizar cuantitativamente dicha relación, se tendrá en cuenta un llamativo dato publicado recientemente por Ross (2014), donde el autor señala que los mecanismos de degradación tiene una dependencia con la temperatura basada en la dependencia de Arrhenius, y el ratio de degradación,  $R_D$ , duplica su valor por cada incremento aproximado de 10°C en  $T_{pv}$ . Consecuentemente, una PV operando a 10°C más que otra vería reducida su vida útil a la mitad de años.

El ratio de degradación de una PV puede regirse por la fórmula de Arrhenius dada su dependencia con la temperatura de operación. Para calcular el efecto de la temperatura sobre la integridad de la placa se relaciona a partir de la *Ecuación E-2*. R es la constante de Boltzman con valor de 0,00008617 [eV/K] ([página web NIST](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tkey=search_for=boltzman): [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tkey=search\\_for=boltzman](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tkey=search_for=boltzman)), Ea es la energía de activación y no es conocida a priori; sin embargo se puede estimar en función del material. En este caso depende de la cubierta de la PV, si es un polímero suele tomar valores a 1.1 eV. También es corriente suponer una Ea de 0.6 eV (Kurtz y col., 2009).

$$\ln\left(\frac{R_{D1}}{R_{D2}}\right) = -\frac{Ea}{R} * \frac{T_2}{T_1}$$

#### **Ecuación E-2. Ecuación de Arrhenius para dos temperaturas para caracterizar la relación entre $R_D$**

En las siguientes tablas, se realiza un análisis de sensibilidad de  $R_D$  en función de la diferencia de  $T_{pv}$  que se consigue con la incorporación de PCM en la BIPV. Este diferencial no es constante a lo largo de los meses, ni siquiera a lo largo del mismo día, dadas las variaciones de las condiciones climatológicas. Por ejemplo, en Zaragoza, esta diferencia de temperatura varía de unos pocos grados hasta un máximo de 7-8°C en el mejor de los casos. Para analizar el comportamiento general a lo largo del tiempo, se toman estos tres distintos valores dentro de ese rango: 1, 2.5 y 5°C. Los cálculos se basan en la *Ecuación E-2. Ecuación de Arrhenius para dos temperaturas para caracterizar la relación entre  $R_D$* . El resultado permite conocer la relación entre los ratios de degradación dependiendo de la temperatura de operación de la placa. Estos datos serán posteriormente utilizados en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y

**Análisis económico.**

**Tabla E-I.  $R_d$  en función de  $T_{pv}$  para dos valores de  $E_a$**

$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_1$ [K]	$T_2$ [K]	$R$ (k.Bolt) [eV/K]	$E_a$ [eV]	$\ln(R_{d1}/R_{d2})$	$R_{d1}/R_{d2}$	$R_{d2}/R_{d1}$
<b>30</b>	29	303	302	0,00008617	0,6	0,0760905	1,08	0,93
<b>40</b>	39	313	312	0,00008617	0,6	0,07129862	1,07	0,93
<b>50</b>	49	323	322	0,00008617	0,6	0,06694554	1,07	0,94
<hr/>								
<b>30</b>	27,5	303	300,5	0,00008617	0,6	0,19117581	1,21	0,83
<b>40</b>	37,5	313	310,5	0,00008617	0,6	0,17910764	1,20	0,84
<b>50</b>	47,5	323	320,5	0,00008617	0,6	0,16814714	1,18	0,85
<hr/>								
<b>30</b>	25	303	298	0,00008617	0,6	0,38555927	1,47	0,68
<b>40</b>	35	313	308	0,00008617	0,6	0,36112287	1,43	0,70
<b>50</b>	45	323	318	0,00008617	0,6	0,33893811	1,40	0,71

$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$T_1$ [K]	$T_2$ [K]	$R$ (k.Bolt) [eV/K]	$E_a$ [eV]	$\ln(R_{d1}/R_{d2})$	$R_{d1}/R_{d2}$	$R_{d2}/R_{d1}$
<b>30</b>	29	303	302	0,00008617	1,1	0,13949926	1,15	0,87
<b>40</b>	39	313	312	0,00008617	1,1	0,13071413	1,14	0,88
<b>50</b>	49	323	322	0,00008617	1,1	0,12273349	1,13	0,88
<hr/>								
<b>30</b>	27,5	303	300,5	0,00008617	1,1	0,35048899	1,42	0,70
<b>40</b>	37,5	313	310,5	0,00008617	1,1	0,328364	1,39	0,72
<b>50</b>	47,5	323	320,5	0,00008617	1,1	0,30826976	1,36	0,73
<hr/>								
<b>30</b>	25	303	298	0,00008617	1,1	0,70685866	2,03	0,49
<b>40</b>	35	313	308	0,00008617	1,1	0,66205859	1,94	0,52
<b>50</b>	45	323	318	0,00008617	1,1	0,62138653	1,86	0,54

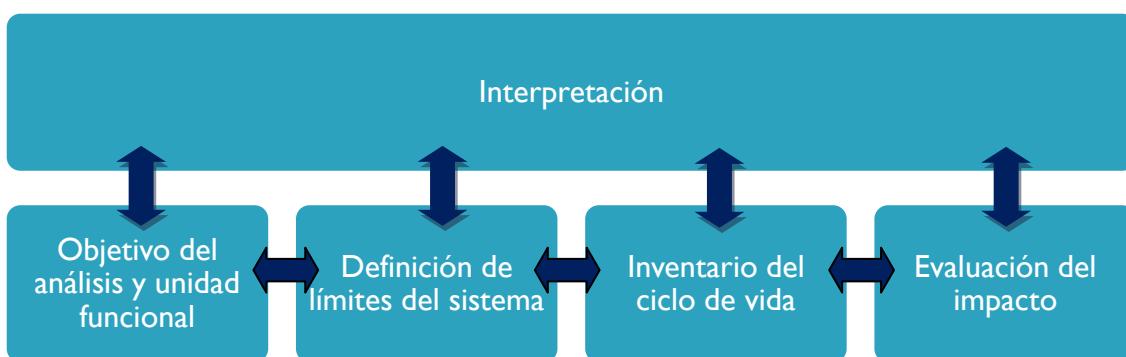
Por último, el tiempo de vida de los PCM vendrá definido por la cantidad de ciclos térmicos que pueda mantener su estabilidad. Las referencias no los determinan con gran precisión dada la inmensa cantidad de materiales, y numerosos estudios se siguen desarrollando para definir los ciclos de los distintos PCM. Según el siguiente informe ([IEA-ET SAP and IRENA, 2013](#)), la vida útil de los PCM es de 10 a 30 años o más dependiendo de las condiciones de temperatura y operación. Así pues, podemos suponer que bajo situaciones de funcionamiento normal, la vida útil del PCM y de la PV será la misma.

## Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV

### ► *Introducción y metodología*

Todos los productos, procesos o actividades económicas están relacionados directamente con el consumo de recursos y la emisión de contaminantes al medio ambiente. La SETAC, organización profesional sin fines de lucro dedicada al estudio, análisis y solución de problemas ambientales, define el análisis de ciclo de vida (ACV) como “un proceso objetivo para evaluar las cargas asociadas a un producto, proceso, o actividad a través de la identificación de la energía y materiales utilizados y los residuos evacuados al medio, y para evaluar e implementar oportunidades que puedan mejorar el medio ambiente”. El objetivo del ACV es cuantificar el potencial de distintos impactos ambientales de dichos productos, procesos o servicios desde el enfoque de su ciclo de vida “de la cuna a la tumba”. Dicho enfoque permite un análisis comparativo de las cargas ambientales que suponen y puede ayudar a orientar la gestión ambiental, por ejemplo en este caso, en el sector energético. Además, su uso está altamente recomendado por las políticas y regulaciones europeas, entre ellas el ‘Plan de Acción Europeo (ETAP) de consumo y producción industrial sostenible’.

La estandarización de la metodología viene regulada por las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. En ellas se detallan los requisitos para efectuar un ACV. Se especifica la estructura general, los principios y los requisitos que debe contemplar un estudio de ACV, así como el marco de referencia metodológico. Las fases principales y la estructura para su realización pueden verse en la *Figura E-1*.



**Figura E-1. Fases principales y estructura para la realización de un ACV**

### ► *Objetivo del análisis y unidad funcional*

En la primera consiste en la definición de la amplitud, profundidad y finalidad del estudio. En este proyecto, el modelo de ACV se va a desarrollar utilizando el programa informático SimaPro 7.3 y bases de datos de referencia internacional, entre otras Ecoinvent. El método de evaluación seleccionado es RECIPE, uno de los más recientes y actualizados (*Cai y col., 2008*), en su aproximación “midpoint”, es decir, define el impacto medioambiental a través de ciertos indicadores relacionados con el impacto sobre la salud humana, calidad de ecosistemas y consumo de recursos, entre otros: cambio climático, degradación de la capa de ozono, acidificación y eutrofización, toxicidad humana y en ecosistemas, radiación, ocupación del terreno, etc.

Como se ha indicado anteriormente, se enfocará la atención en el análisis del cambio climático, cuyo indicador es la huella de carbono – [kg CO<sub>2</sub> equivalente], que está relacionada con las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se expresa como Potencial de Calentamiento Global para un horizonte de 100 años (GWP100), en dióxido de carbono equivalente kg / kg de emisión. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global.

La unidad funcional está determinada por la función principal de los procesos productivos a comparar o analizar. Esta debe estar claramente definida, ser medible y representativa de todas las entradas y salidas. En este estudio, la unidad funcional vendrá representada por una unidad de placa fotovoltaica PV. Además, es necesario definir la unidad funcional temporal, representada por el tiempo de vida útil de la PV (25 años).

#### ► Descripción de los límites del sistema

Se va a comparar el ciclo de vida de dos escenarios distintos, en adelante estados:

El primero de ellos, Estado 1, está formado por una unidad de PV, perteneciente a la base de datos del programa (PV inclinada, policristalina de Si). SimaPro ya considera los procesos de fabricación aguas arriba, materias primas y fuentes de energía.

Mientras que el Estado 2 es la combinación de esta misma PV pero con la incorporación del módulo de PCM, correspondiente al seleccionado como óptimo (5.- ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. para Zaragoza). Este módulo se compone a su vez de un contenedor metálico de aluminio secundario reciclado (por su elevada conductividad térmica 205W/mK, que mejorará la transmisión de calor entre BIPV y PCM), cuyas dimensiones vienen especificadas en la *Tabla E-2*; y por otra parte, la masa de PCM según la composición de la *Tabla E-3*.

**Tabla E-2. Dimensiones y masa del contenedor metálico de aluminio para PCM**

Unidades	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
2	1	1	1,50E-03	3,00E-03
4	1	1,50E-02	1,50E-03	9,00E-05
		Total=	3,09E-03	
Densidad Al (kg/m <sup>3</sup> )=	2700	Masa Al (kg)=		8,34

**Tabla E-3. Porcentajes de masa del PCM**

PCM	Total	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
		44%	56%
Masa (kg)	20	8,8	11,2

Adicionalmente, se tienen en cuenta el transporte hasta el lugar de instalación: se considera un transporte por carretera, en un camión de tonelaje medio y una distancia 300km (esta distancia es una aproximación razonable en el escenario ficticio de que la PV tuviese que ser trasladada hasta Zaragoza, una distancia de 300km equivaldría a un traslado desde Madrid o Barcelona). La masa total a transportar de PV es de 20 kg en el Estado 1, y una masa total PV+PCM+contenedor Al de 48kg en el Estado 2.

Sin embargo, alguna de las fases del ciclo, como la instalación y colocación en obra, no se tendrá en cuenta ya que al realizar una comparativa entre ambas situaciones tomando como referencia el Estado 1, se consideran iguales para ambas.

La energía ahorrada por el uso de la BIPV con PCM se estimará como nula, compensando la energía que necesita la incorporación del módulo de PCM al sistema.

Por último, los límites del sistema también incluyen lo que sucede con los materiales al final de su vida útil. La disposición final de ambos estados se considera convencional en vertedero, como materia inerte.

#### ► ***Inventario del ciclo de vida***

A continuación se han de cuantificar los flujos de energía y de materiales, tanto de entrada como de salida del sistema, durante su vida útil.

#### Estado 1:

- PV inclinada, policristalina de Si: 20kg
- Transporte: 300km\* 20kg= 6000km\*kg
- Flujos de energía de entrada y salida: aproximadamente nulos
- Instalación y colocación en obra no considerados
- Disposición final en vertedero como materia inerte
- 

#### Estado 2:

- PV inclinada, policristalina de Si: 20kg
- Contenedor metálico de Al secundario: 8.34kg
- PCM: 8.8 kg de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y 11.2kg de  $\text{H}_2\text{O}$
- Transporte: 300km\* 48kg= 14400km\*kg
- Flujos de energía de entrada y salida: aproximadamente nulos
- Instalación y colocación en obra no considerados
- Disposición final en vertedero como materia inerte

Dado que los estados trabajan a distinta  $T_{pv}$ , la degradación de las placas no será la misma en ambos casos. Aquí es donde entra en juego la relación entre  $R_{D1}$  y  $R_{D2}$  presente en la [Tabla E-1](#). En este caso se toma una Ea de 1.1eV, es decir, considerando que la cubierta de la PV es un polímero. Estos ratios varían en función del diferencial de temperatura, así pues:

- Caso A - Para una reducción de 1°C:  $\frac{R_{D1}}{R_{D2}} = 0.88$
- Caso B - Para una reducción de 2.5°C:  $\frac{R_{D1}}{R_{D2}} = 0.72$
- Caso C - Para una reducción de 5°C:  $\frac{R_{D1}}{R_{D2}} = 0.52$

Es decir, por cada unidad de PV instalada del Estado 1, se necesitará únicamente una fracción de PV+PCM correspondiente al Estado 2. La vida útil de las placas se ve extendida al reducir su degradación debida a altas temperaturas. Por ejemplo, si una PV tiene una duración de 25 años operando, el sistema PV+PCM con  $R_{D1} / R_{D2} = 0.72$  tendrá un  $t_L$  de casi 35 años, según la [Ecuación E-1](#).

► **Criterios de corte**

Por último, con el fin de garantizar que todos los impactos ambientales pertinentes están representados en el estudio, se suponen los siguientes criterios de corte:

- Materiales: Flujos de menos del 1% de la masa acumulada de todas las entradas y salidas del modelo de ACV, dependiendo del tipo de flujo, se han excluido debido a su relevancia ambiental no es una preocupación. Sin embargo, se garantiza que la suma de los flujos de materiales ignorados no exceda de 5% de la masa, la energía o la relevancia ambiental.
- Energía: Flujos de menos del 1% de la energía acumulada de todas las entradas y salidas del modelo de ACV, dependiendo del tipo de flujo, están excluidos de este análisis. Su relevancia ambiental no es una preocupación.

► **Resultados**

Ahora se clasifican y evalúan los resultados del inventario, relacionándolos con efectos ambientales a través de un conjunto de categorías que varían en función del método elegido. Entre ellas se va a destacar fundamentalmente el cambio climático, por análisis de la huella de carbono [kg CO<sub>2</sub> equivalente], pero también se presentan otros indicadores como el agotamiento de los recursos, el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono, la toxicidad o el uso del suelo.

Aquí se presentan los resultados de la comparativa del análisis de ciclo de vida, con los indicadores para las distintas categorías de impacto ambiental incluidas en el método de evaluación RECIPE:

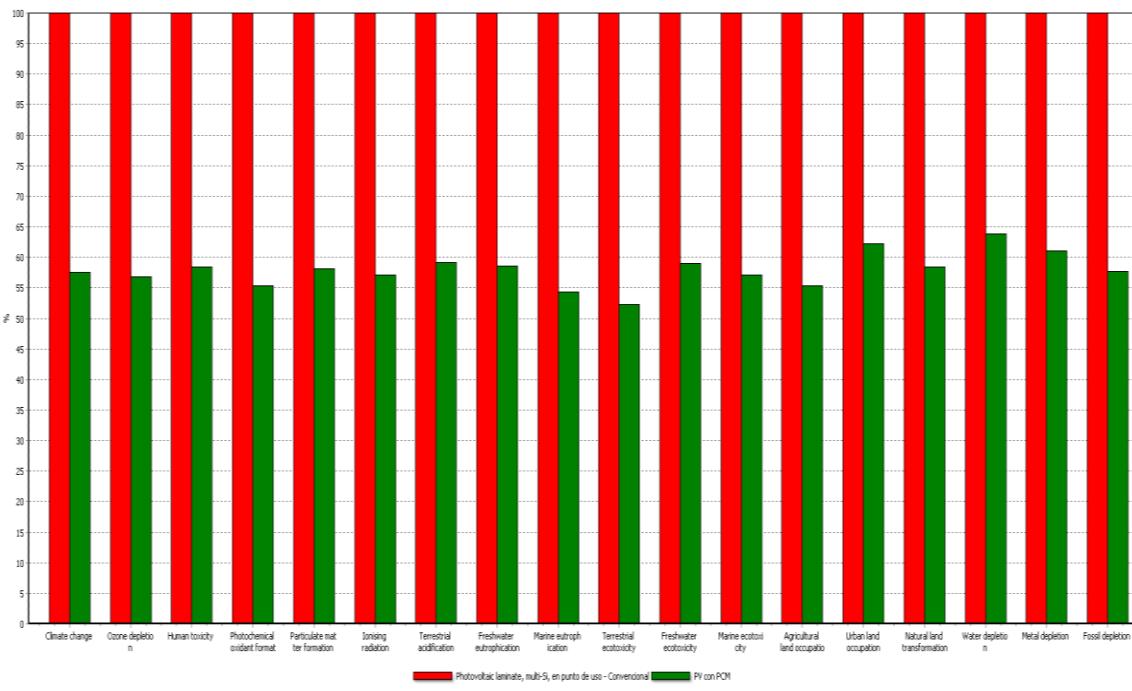
**Tabla E-4. Indicadores criterios de impacto ambiental del método RECIPE para el ACV de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM**

Categoría	Unidades	CASO A		CASO B		CASO C	
		Estado 1	Estado 2	Estado 1	Estado 2	Estado 1	Estado 2
<b>Cambio climático</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	145,95	142,15	145,95	116,31	145,95	84,00
<b>Degradación de la capa de ozono</b>	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Acidificación terrestre</b>	kg 1,4-DB eq	111,00	109,83	111,00	89,86	111,00	64,90
<b>Eutrofización del agua fresca</b>	kg NMVOC	0,59	0,55	0,59	0,45	0,59	0,33
<b>Eutrofización marina</b>	kg PM10 eq	0,19	0,18	0,19	0,15	0,19	0,11
<b>Toxicidad humana</b>	kg U235 eq	39,18	37,87	39,18	30,98	39,18	22,37
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	0,52	0,52	0,52	0,43	0,52	0,31
<b>Formación de</b>	kg P eq	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,04

partículas							
<b>Ecotoxicidad terrestre</b>	kg N eq	0,07	0,06	0,07	0,05	0,07	0,04
<b>Ecotoxicidad del agua fresca</b>	kg I,4-DB eq	0,48	0,43	0,48	0,35	0,48	0,25
<b>Ecotoxicidad marina</b>	kg I,4-DB eq	1,24	1,24	1,24	1,01	1,24	0,73
<b>Radiación ionizante</b>	kg I,4-DB eq	2,12	2,05	2,12	1,68	2,12	1,21
<b>Ocupación de terreno agrícola</b>	m2a	7,08	6,63	7,08	5,42	7,08	3,92
<b>Ocupación de terreno urbano</b>	m2a	0,83	0,87	0,83	0,71	0,83	0,52
<b>Transformación del terreno</b>	m2	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
<b>Agotamiento del agua</b>	m3	0,98	1,06	0,98	0,87	0,98	0,63

### ► Interpretación

A la vista de los resultados de la *Tabla E-4*, el Estado 2 reduce, o iguala en el peor de los casos, el impacto ambiental en todas las categorías consideradas. Destacar que en el caso C, cuando  $T_{pv}$  se reduce 5°C, el sistema del Estado 2 PV+PCM (color verde) supone una reducción de impacto cercana al 50% respecto al Estado 1 (*Figura E-2*):



**Figura E-2. Porcentajes relativos de los criterios de impacto ambiental del método RECIPE para el ACV de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM**

## Análisis económico

### Precios elementos

Según la reciente publicación de *Saxena y Goel (2013)*, el precio de los PCM para almacenamiento por calor latente se encuentra en un amplio rango, llegando hasta 334\$/kg los más caros. Como se ha expuesto anteriormente en el apartado teórico de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, hay diferencias dependiendo del tipo y su estructura. El siguiente artículo publicado por *Kosny, Shukla, y Fallahi (2013)*, presenta una revisión tanto de las características como de los actuales precios de los PCM. Se cita que, generalmente, el precio de la mayoría de PCM orgánicos se comercializa alrededor de 1.65–5.50\$/kg. El coste de las parafinas, por ejemplo octadecane, es de 1.52–1.87\$/kg. Si se desea microencapsular, asciende en un 45%–65%. El precio de convertir las parafinas a SSPCM no está muy bien definido, pero los pellets de PCM recubiertos con HDPE, cuya entalpía es aproximadamente 100kJ/kg, se encontrarían por 6.60–8.80\$/kg. Los ácidos oleico, palmítico y esteárico son ácidos grasos, compuestos orgánicos no parafínicos, tienen un coste menor a 2\$/kg. Los compuestos inorgánicos se diferencian entre sales hidratadas y metales. Estos últimos poseen los precios más elevados de todos los PCM; por el contrario, las sales hidratadas son las más baratas: entre 1.37 y 4.11\$/kg (*Mehling Harald, 2008*). La sal Glauber, utilizada en el proyecto, posee uno de los precios más bajos del mercado, así como el cloruro de calcio, cuyo coste es 0.13–0.20\$/kg. Empresas como PCMEnergy India produce unos paquetes para estabilizar las sales hidratadas (no son microencapsuladas) con un coste que va de 3.08 a 4.95\$/kg, con el empaquetamiento contribuyendo en un 20–35% sobre el precio final. También se afirma que, como comúnmente, el proceso de microencapsulación de un PCM puede llegar a encarecer el coste del producto final en más de un 50%.

Para realizar el análisis económico que se va a realizar se tomará un valor aproximado de 5 €/kg para la sal hidratada que se va a utilizar (sal Glauber 20kg). El precio las PV depende de sus características como potencia máxima o eficiencia, de los materiales de fabricación, del tipo de placa, de las dimensiones (área y módulos), etc. Como referencia se toma 300€, un valor comprendido en el rango que ofrece la siguiente página web (<http://www.tutiendasolar.es/Catalogo-placas-solares-placas-solares.html>) de una placa de 1m<sup>2</sup>, policristalina de Si, y con P<sub>max</sub>=250W. Para el aluminio secundario reciclado (8.34kg) la página (<http://www.lyrsa.es/index.php?ids=598>) indica un coste de 1375,9€/Tn.

El precio de la electricidad permitirá calcular el ahorro energético gracias a la instalación de un generador fotovoltaico. Para el año 2013, su coste sin discriminación horaria fue de 0,130485€/kWh.

Primero se define el escenario considerado para el sistema fotovoltaico. Se van a comparar unos indicadores económicos para 4 situaciones distintas. El precio de la instalación completa de una BIPV (inversor, regulador, cableado y conexiones, batería, paneles fotovoltaicos, mano de obra), tras consultar diversos informes y páginas de comerciales, tales como *EUROSERVER 2012*, se puede asegurar que ronda los 2000€/kW PV. Esta cantidad corresponde a la inversión inicial para la primera situación; mientras que para las demás, habrá que añadir el coste de la incorporación del PCM. En mantenimiento, inspección y control básico anual de la instalación asciende a 25€/kW PV anuales para todos los escenarios.

## Tablas de VAN, TIR y Payback

Con la ayuda de la aplicación PV-GIS 3 se sabe la radiación media recibida por la PV en su inclinación óptima durante cada mes del año. Se toma una eficiencia dentro del rango observado en los cálculos (11.5%). Para calcular el ahorro económico, se multiplicará por el ahorro energético anual obtenido (*Tabla E-5*) por el precio de la electricidad. Aunque existiría, no se va a considerar el aumento de potencia conseguida por los sistemas PV\PCM, ya que no es muy importante respecto al global.

**Tabla E-5. Ahorro Energético [kWh/m<sup>2</sup>] de cada mes del año**

	E	F	M	A	My	Jn	Jl	A	S	O	N	D
G media [kWh/(día·m <sup>2</sup> )]	3,3 2	4,73	5,71	6,1 3	6,3 6	6,7 6	7,2	6,8 6	6,2 6	4,8 8	3,78	3,1
Eficiencia [%]	11, 5	11,5	11,5	11, 5	11,5	11,5						
Nº días mes [día/año]	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Ahorro Energético [kWh/m <sup>2</sup> ]	11, 84	15,2 3	20,3 6	21, 15	22, 67	23, 32	25, 67	24, 46	21, 60	17, 40	13,0 4	11,0 5

Los datos de entrada (ingresos, gastos e inversión inicial) se calculan a partir de los valores correspondientes a las características de la BIPV, cantidades y precios presentes en la *Tabla E-6*:

**Tabla E-6. Datos de entrada para el análisis económico**

<b>BIPV</b>			
<b>Ahorro energético</b>			227,78 kW/m <sup>2</sup>
<b>Área BIPV</b>			4 m <sup>2</sup>
<b>Potencia Pico</b>			0,25 kW PV/m <sup>2</sup>
<b>Potencia Pico instalada</b>			1 kW PV
<b>Precio</b>		<b>Cantidad</b>	<b>Coste €</b>
<b>Aluminio segunda</b>		1,376 €/kg	8,34 kg
<b>PCM</b>		5 €/kg	20 kg
<b>PV</b>		300 €/ud	1ud
<b>Electricidad 2013</b>		0,130485 €/kWh	911,12 kWh
<b>Mantenimiento</b>		25 €/kWP V/año	1kW PV
<b>Instalación</b>		2000 €/kW PV	1kW PV
<b>DATOS DE ENTRADA</b>			
<b>INGRESOS POR AHORRO ENERGÉTICO (anual)</b>			475,55 €
<b>INVERSIÓN INICIAL</b>			
<b>COSTE DE PCM</b>			400,00 €
<b>COSTE DE PV</b>			1.200,00 €
<b>COSTE CONTENEDOR AI</b>			48,00 €
<b>INSTALACIÓN PV</b>			2.000,00 €
<b>GASTOS MANTENIMIENTO (anual)</b>			25,00 €

Los datos financieros generales tenidos en cuenta para el estudio son los impuestos de sociedades del 2013, que se sitúan en 24.3% (<http://www.libertad.org/indice2013>). Mientras que la variación media anual de los últimos años del índice de precios al

consumidor (IPC) se encuentra en torno al 1.4%, según el Instituto Nacional de Estadística, INE (<http://www.ine.es>).

En la *Tabla E-7*, se calcula el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el tiempo de retorno (Payback). La primera columna muestra una PV sin PCM, y las tres siguientes con PCM variando la reducción  $\Delta T_{pv}$  que éste genera: 1, 2.5 y 5°C.

**Tabla E-7. Datos de salida para análisis económico**

	Sin PCM	Con PCM $\Delta T_{pv}=1^{\circ}\text{C}$	Con PCM $\Delta T_{pv}=2.5^{\circ}\text{C}$	Con PCM $\Delta T_{pv}=5^{\circ}\text{C}$
<b>Inversión inicial [€]</b>	2000	2448	2448	2448
<b>Ingresos [€]</b>	475.75	475.75	475.75	475.75
<b>Gastos [€]</b>	25	25	25	25
<b>Vida útil [años]</b>	25	28	35	48
<b>Amortización</b>				
<b>Cantidad [€]</b>	80	87	70	51
<b>Interés %</b>	4	3.6	2.9	2.1
<b>VAN [€]</b>	5770.1	6182.2	7843.2	11006.9
<b>TIR %</b>	20.68	17.42	17.47	17.48
<b>Payback [años]</b>	3.78	4.37	3.94	3.07

Estos datos de salida permiten comparar los cuatro escenarios considerados. El ahorro originado por la instalación de un sistema fotovoltaico es de 227.78kW/m<sup>2</sup>, bajo la irradiación solar de una localidad como Zaragoza y las características de una palca como las consideradas ( $P_{\max}=250\text{W}$  y  $\eta_{pv}=11.5\%$ ). Si la superficie PV es de 4m<sup>2</sup>, supone unos ingresos anuales de 475.75€. Por el contrario, los gastos de mantenimiento son 25€ anuales. El VAN obtenido con este sistema sin PCM de 5770.1 € y su TIR de 20.68% generan un notable beneficio. Además, el tiempo de retorno no supera los 4 años, situándolo dentro de un límite aceptable.

Cuando se incorpora el PCM, el TIR se reduce hasta el 17.42%. Esto es debido a que la inversión inicial asciende 448€ más por la cantidad de PCM y el contenedor. Los valores del VAN y TIR ascienden acordes a la disminución  $\Delta T_{pv}$ : el beneficio cuando la diferencia es de 5°C es casi el doble (11006.9€). Respecto al tiempo de retorno se observa cierta similitud, pero son ligeramente superiores al caso de referencia sin PCM, exceptuando el último escenario (Payback=3.07años).

**Tabla E-8. Relación tiempo de vida útil y tiempo de retorno**

<b>Payback [años]</b>	3.78	4.37	3.94	3.07
<b>Relatividad %</b>	15.1	15.6	11.3	6.4

A su favor cabe decir que, si los años de payback se consideran en relación al total de la vida útil de las PV, los casos en que  $\Delta T_{pv}= 2.5$  y  $5^{\circ}\text{C}$  presentan una considerable mejoría (el tiempo de retorno es únicamente el 11.3 y 6.4% del total de vida útil, *Tabla E-8*), gracias a la positiva influencia que el PCM tiene en la prolongación de  $t_L$ .

