

# Proyecto Fin de Carrera

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



# “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)”

## RESUMEN

La creciente demanda de energía, el agotamiento de los recursos fósiles y el alto impacto medioambiental que generan requiere sustituir el modelo actual por uno más sostenible y eficiente. Por ello se considera importante la investigación en el campo de la mejora de la eficiencia energética y la eficiencia en el consumo de materiales.

Actualmente, en la edificación, las placas fotovoltaicas integradas en edificios (BIPV según sus siglas en inglés, Building Integrated Photovoltaic) juegan un papel cada vez más relevante en el aprovechamiento de la Energía Solar. Sin embargo, los actuales diseños poseen ciertas limitaciones técnicas que reducen su eficiencia durante la operación. Se busca por tanto analizar soluciones tecnológicas innovadoras basadas en materiales de cambio de fase (PCM según sus siglas en inglés, Phase Change Materials), capaces de almacenar y ceder calor en un rango de temperatura determinado. Los PCM se están estableciendo recientemente como una de las alternativas más prometedoras para la reducción de estos consumos energéticos y de recursos.

En primer lugar, se presenta una introducción sobre la situación actual de las energías renovables, y más concretamente, de la energía fotovoltaica. El estado del arte y revisión teórica resumen los conceptos fundamentales de los PCM, las principales variables de comportamiento de las placas fotovoltaicas (PV según sus siglas en inglés, Photovoltaic) y una introducción a las BIPV. A continuación, en los distintos apartados que conforman el proyecto, se estudia la influencia de la incorporación del PCM en el aumento de la eficiencia de conversión eléctrica de las BIPV, la prevención de puntos calientes y el incremento del tiempo de vida de las mismas. En el análisis de parámetros de diseño se refleja la importancia de una buena selección de PCM y características del sistema fotovoltaico. Además, se llevará a cabo un estudio en distintas severidades climáticas profundizando sobre el control y regulación de la temperatura de operación de una BIPV, con y sin PCM, de manera que se aumente la producción de energía eléctrica en el sistema y la durabilidad de la instalación.

Pero no solo desde el punto de vista energético, sino evaluado de forma ambiental considerando todo su ciclo de vida. El interés específico de utilizar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se basa en la necesidad de conocer si los impactos ambientales ocasionados por la aplicación de los PCM son compensados por la reducción del impacto ambiental asociado a la disminución de recursos materiales consumidos para la fabricación de BIPV al prolongarse su vida útil. En el último apartado, se recogen resultados económicos para analizar la viabilidad del proyecto. Finalmente, se encuentran los anexos con amplia información detallada de los trabajos previos, caracterización e identificación de los sistemas estudiados, programación y resultados de los cálculos, numerosas representaciones gráficas, especificación del software, aplicaciones y métodos utilizados, listados y mapas de puntos de PCM, análisis completos de ciclo de vida y viabilidad económica, entre otros.



## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>5</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>6</b>
<b>Nomenclaturas</b> .....	<b>7</b>
<b>Abreviaturas</b> .....	<b>9</b>
<b>1- Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>2- Motivos y Objetivos del Proyecto</b> .....	<b>15</b>
Objetivos del proyecto .....	17
<b>3- Resumen del Estado del Arte y Revisión Teórica</b> .....	<b>19</b>
Materiales de cambio de fase: PCM .....	19
Placas Solares Fotovoltaicas .....	20
Aplicación de PCM en BIPV .....	22
<b>4- Caracterización del comportamiento de las variables de operación de BIPV con y sin PCM</b> .....	<b>23</b>
Localización geográfica - Severidades Climáticas .....	23
Condiciones atmosféricas .....	23
Identificación de las características de PV .....	23
Operación de BIPV sin PCM .....	23
Selección del material de cambio de fase .....	24
Operación de BIPV con PCM .....	25
Comparación del comportamiento de operación .....	26
Análisis de los parámetros críticos de diseño .....	26
Consideraciones .....	27
<b>5- Análisis del comportamiento de operación y Viabilidad en distintas SC</b> .....	<b>29</b>
Comportamiento de las variables de operación .....	29
Viabilidad en SC distintas .....	42
<b>6- Implicaciones Ambientales y Viabilidad Económica</b> .....	<b>45</b>
Tiempo de vida útil y degradación .....	45
Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV .....	46
Análisis económico .....	47
<b>7- Conclusiones</b> .....	<b>49</b>
<b>8- Futuras perspectivas</b> .....	<b>51</b>

<b>Bibliografía..</b> .....	<b>53</b>
Artículos y libros de referencia.....	53
Páginas Web.....	57
Otros.....	57
<b>Anexos .....</b>	<b>59</b>
Tabla de Contenido de Anexos.....	61
Índice de Figuras de Anexos.....	63
Índice de Tablas de Anexos.....	64
<b>A Anexo:</b> Estado del Arte .....	65
<b>B Anexo:</b> Localización geográfica y Variables climatológicas.....	77
<b>C Anexo:</b> Caracterización de PV y PCM.....	79
<b>D Anexo:</b> Comportamiento de operación BIPV con y sin PCM.....	95
<b>E Anexo:</b> Implicaciones Ambientales y Viabilidad Económica .....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Porcentajes de potencia instalada y generación eléctrica en España para el año 2014. Fuente: REE.....	11
Figura 1-2. Generación mundial de potencia fotovoltaica [MW] desde el año 2000 hasta 2010. Fuente: EPIA.....	12
Figura 1-3. Edificio con BIPV, presentada por Team Sweden en el Solar Decathlon China 2013 .....	13
Figura 2-1. Bases para el crecimiento de la energía fotovoltaica .....	15
Figura 2-2. Motivaciones del proyecto.....	16
Figura 3-1. Clasificación esquemática de los PCM.....	19
Figura 3-2. Evolución temporal de los tipos de PV y el incremento en su eficiencia. Fuente: Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) .....	21
Figura 3-3. Tpv [°C] a lo largo del tiempo, para distintos valores de irradiación solar 500, 750 y 1000 [W/m <sup>2</sup> ]. (Hasan y col., 2010) .....	21
Figura 5-1. Tpv anuales SIN PCM en Zaragoza [°C].....	29
Figura 5-2. Eficiencias anuales SIN PCM en Zaragoza $\eta_{PV}[\%]$ .....	30
Figura 5-3. Mapa de puntos de H [kJ/kg] de las alternativas de PCM para Zaragoza.....	31
Figura 5-4. Mapa de puntos de Tfusion [°C] de las alternativas de PCM para Zaragoza.....	31
Figura 5-5. Comportamiento de Tpv con y sin PCM, Tamb [°C], G [W/m <sup>2</sup> ] y v [m/s] durante una semana de Agosto en Zaragoza.....	33
Figura 5-6. Comportamiento de Tpv con y sin PCM, Tamb [°C], UI [W/m <sup>2</sup> *K] y v [m/s] durante una semana de Agosto en Zaragoza.....	34
Figura 5-7. Comportamiento de Tpv\pcm [°C] y Qacu [Julio] durante una semana de Agosto en Zaragoza.....	35
Figura 5-8. Comportamiento de Tpv con y sin PCM [°C], $\eta_{pv}$ con y sin PCM [%] durante 1 semana de Agosto en Zaragoza .....	35
Figura 5-9. Comportamiento de Tpv [°C] observada, basadas en modelo NOCT y en modelo SNL, v [m/s] y G [W/m <sup>2</sup> ] a lo largo del día [h] (Trinuruk, Sorapipatana, y Chenvidhya, 2009).....	36
Figura 5-10. Comportamiento de Tpv\pcm [°C], Tpv [°C] y G [W/m <sup>2</sup> ] a lo largo 2 días y variando el espesor de la placa de PCM (W [cm]). (Ho y col., 2013).....	37
Figura 5-11. Comportamiento de Tpv\pcm [°C], Tpv [°C] y G [W/m <sup>2</sup> ] a lo largo 3 días. (Huang, 2011).....	37
Figura 5-12. Temperaturas con y sin PCM para Agosto en Zaragoza. 100% PCM1 con Tfusion= 32°C.....	39
Figura 5-13. Temperaturas con y sin PCM para Agosto en Zaragoza. 100% PCM2 con Tfusion= 40°C.....	39
Figura 5-14. Temperaturas con y sin PCM para Agosto en Zaragoza. 50% PCM1 + 50%PCM2 .....	40
Figura 5-15. Comparación de temperaturas con y sin PCM para un día tipo de Junio en Zaragoza.....	41
Figura 5-16. Comparación de temperaturas con y sin PCM para un día tipo de Julio en Zaragoza .....	41

Figura 5-17. Comparación de temperaturas con y sin PCM para un día tipo de Agosto en Zaragoza.....	41
Figura 5-18. Comparación de temperaturas de las mejores combinaciones de parámetros críticos para el mes de Julio en Sevilla.....	43
Figura 5-19. Comparación de temperaturas con y sin PCM para el mes de Agosto en las localidades de Sevilla y Zaragoza.....	43
Figura 8-1. Mapa mundial del potencial PV anual para placas de Si cristalino. Fuente: (Dubey, Sarvaiya, y Seshadri, 2013).....	51

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 5-1. Propiedades de PCM orgánicos e inorgánicos.....	32
Tabla 5-2. PCM seleccionados para Zaragoza y sus propiedades termofísicas .....	32
Tabla 5-3. Parámetros críticos de diseño relativos a PCM .....	38
Tabla 6-1. Relación de RD en función de $T_{pv} - T_{pcm}$ , fijando $E_a$ en 1.1eV (1 sin PCM, 2 con PCM).....	45
Tabla 6-2. Indicadores y porcentajes relativos de cambio climático [kg CO <sub>2</sub> equivalente] de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM.....	46
Tabla 6-3. Datos de entrada, datos financieros y características de BIPV para el análisis económico .....	47
Tabla 6-4. Datos económicos (VAN, TIR y Payback) del sistema con y sin PCM .....	47



**NOMENCLATURAS**

$\alpha$	Absorbancia
$A$	Área de la placa fotovoltaica [ $\text{m}^2$ ]
$Q_{acu}$	Calor acumulado en un tiempo concreto [J]
$Q_s$	Calor almacenado en el sistema BIPV\PCM [J]
$Q_{lat}$	Calor latente [J]
$H$	Calor latente de fusión [kJ/kg]
$Q_{total}$	Calor máximo que el PCM puede acumular [J]
$Q_{sen}$	Calor sensible sólido y líquido [J]
$\beta_{ref}$	Coefficiente de temperaturas [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$U_L$	Coefficiente global de pérdidas del sistema [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]
$k$	Conductividad térmica [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]
$\rho_{PCM}$	Densidad del PCM [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\Delta T_{pv}$	Diferencia de temperatura $T_{PV} - T_{PV\backslash PCM}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\eta_{pv}$	Eficiencia de la placa fotovoltaica [%]
$\eta_{Tref}$	Eficiencia de la placa fotovoltaica a $T_{ref}$ y $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ [%]
$\eta_{pv\backslash pcm}$	Eficiencia del sistema PV\PCM [%]
$x$	Espesor del contenedor de PCM [m]
$FF$	Factor de llenado
$I_{pv}$	Intensidad de la placa solar [A]
$I_{cc}$	Intensidad en corto circuito [A]
$\Delta t$	Intervalo temporal [segundos]
$G$	Irradiación solar global incidente sobre la placa [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$m_{PCM}$	Masa del PCM [kg]
$P_{max}$	Potencia máxima o pico [W]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{fusion}$	Temperatura de fusión [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{PV}$	Temperatura de operación de la placa fotovoltaica [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{PV\backslash PCM}$	Temperatura de operación del sistema PV\PCM [°C]
$T_{noct}$	Temperatura de operación nominal [°C]
$T_{ref}$	Temperatura de referencia de la placa fotovoltaica [°C]
$\tau$	Transmitancia
$v$	Velocidad del viento [m/s]
$V_{pv}$	Voltaje de la placa solar [V]
$V_{oc}$	Voltaje en circuito abierto [V]
$Vol$	Volumen del contenedor con PCM [m <sup>3</sup> ]
$w$	Composición en masa

**ABREVIATURAS**

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
Al	Aluminio
BIPV	Placas fotovoltaicas integradas en edificios
CdTe	Telururo de cadmio
CIGS	Diseleniuro de galio, indio y cobre
CIRCE	Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos
CIS	Diseleniuro de indio con cobre
CM-SAF	Aplicación Satelital de Monitorización Climática
CTE	Código Técnico de Edificación
EES	Resolutor de Ecuaciones de Ingeniería
EPIA	Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica
GaAs	Arseniuro de Galio
GW	Gigavatios
IET	Instituto de Energía y Transporte
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPC	Índice de Precios al Consumidor
ISE	Sistemas de Energía Solar
J	Julio
JRC	Centro Común de Investigación
MEG	Generación de Excitación Múltiple
MEPCM	Materiales de Cambio de Fase Micro/Macro Encapsulados
MW	Megavatios
NASA	Agencia Espacial Norte Americana
NOCT	Temperatura de Operación Nominal
NREL	Laboratorio Nacional de Energía Renovable
OTA	Oficina de Evaluación Tecnológica
PCM	Materiales de Cambio de Fase
PV	Placas Fotovoltaicas o relativo a fotovoltaico

PVGIS-3	Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica
REE	Red Eléctrica de España
SC	Severidades Climáticas
SCI	Severidades Climáticas de Invierno
SCV	Severidades Climáticas de Verano
Si	Silicio
SNL	Laboratorios Sandia
SSPCM	Materiales de Cambio de Fase con Estabilizados
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
W	Vatios

## I- INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda energética ha aumentado significativamente como consecuencia del consumo de la misma en sectores como la industria, el transporte, la construcción, la generación eléctrica, y el aumento en la calidad de vida y necesidades humanas. El crecimiento de la población y el consumismo conlleva además el agotamiento de recursos naturales y materias primas. Durante años, los combustibles fósiles y la energía nuclear han sido las fuentes dominantes. Sin embargo, la creciente demanda, el agotamiento de los recursos fósiles y el alto impacto medioambiental que generan requiere sustituir el modelo actual por uno más sostenible. Junto a la sostenibilidad, el concepto de eficiencia en el consumo de materiales empieza a tener un papel muy relevante. Por un lado, considera la explotación de estos recursos; y por otro lado, controla la deposición de residuos una vez ha concluido su vida útil.

Las energías renovables deben tomar un papel más relevante en el futuro. Entre ellas, la energía solar podría tener un rol fiable y prometedor en muchos países. La superficie de la Tierra recibe una irradiación solar media que supera miles de veces la demanda global de energía. Esta energía solar puede ser transformada en electricidad mediante placas fotovoltaicas (PV, del inglés Photovoltaic), o bien aprovechar la energía térmica por medio de colectores. Según los datos de la Red Eléctrica de España (REE), en los inicios del 2014 los porcentajes de generación eléctrica eran los mostrados en la *Figura I-1*, donde la generación de energía fotovoltaica asciende a un 1.8% en nuestro país.

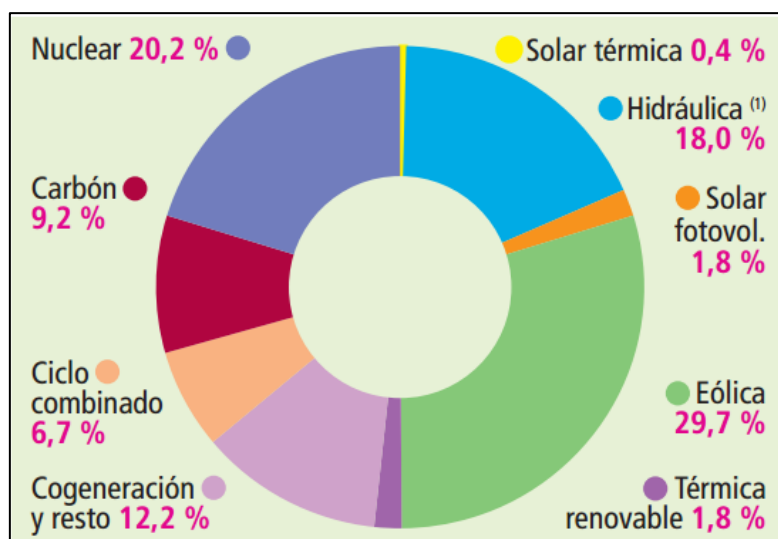


Figura I-1. Porcentajes de generación eléctrica en España para Enero del 2014. Fuente: REE

La Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA, del inglés European Photovoltaic Industry Association) publicó en el año 2011 un informe con la tendencia de la generación mundial de potencia fotovoltaica entre el año 2000 y el año 2010 (ver *Figura I-2*), donde se muestra un significativo aumento. En general, los datos revelan porcentajes de generación de potencia fotovoltaica con un incremento anual aproximado de 40% dentro del período de estudio. Por otro lado, una segunda publicación realizada por la misma asociación en colaboración con *Greenpeace* sobre generación eléctrica fotovoltaica mundial predice una producción PV de 345GW para el 2020 y de alrededor de tres veces más (1081 GW) para 2030.

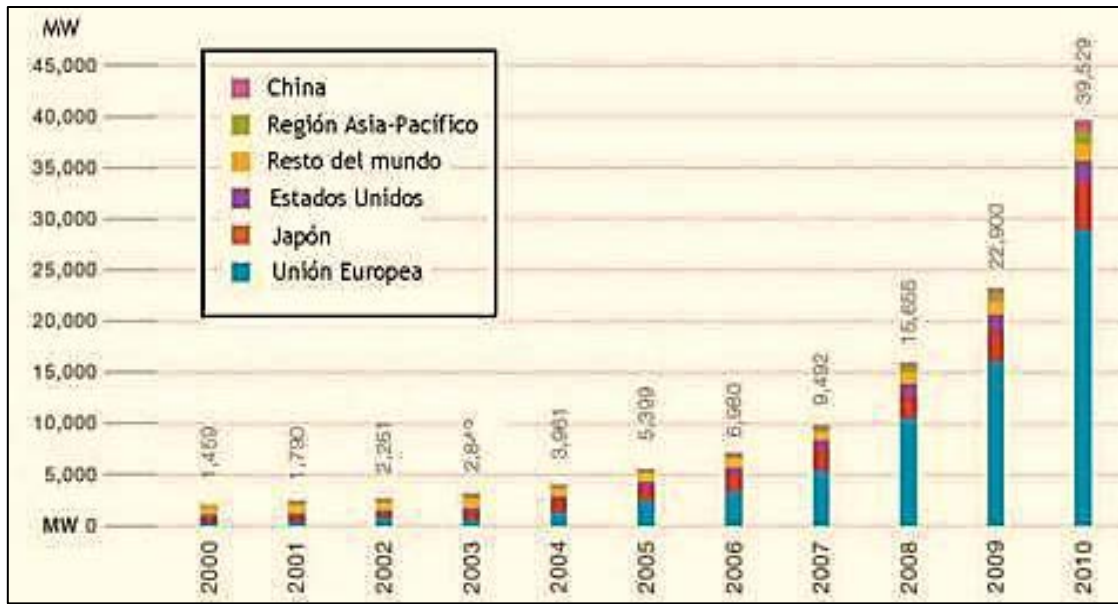


Figura I-2. Generación mundial de potencia fotovoltaica [MW] desde el año 2000 hasta 2010. Fuente: EPIA

No obstante, existe una diferencia importante entre los países productores de las placas fotovoltaicas y los países adelantados en la generación de energía eléctrica mediante esta tecnología (Tyagi y col., 2013). Los autores explican que China es el líder mundial en la producción de placas solares pero son los países europeos quienes están al frente de la generación de potencia fotovoltaica con valores próximos a 39GW en 2011. Concretamente, las instalaciones de Alemania, España y Francia generan 7.4GW, 3.9GW y 1.05GW, respectivamente.

Las crecientes tendencias tanto de generación como de producción reflejan un escenario prometedor que, sumado a la baja participación que todavía tienen las instalaciones fotovoltaicas actuales en la generación de electricidad mundial, demandan la generación de conocimientos que rompan barreras tecnológicas y no tecnológicas presentes en esta tecnología.

Sin embargo, actualmente en estas aplicaciones, tanto las limitaciones no tecnológicas (los altos costes de instalación y de distribución) como las técnicas aún son importantes. Estas últimas afectan al tiempo de vida, la producción y la eficiencia energética y ambiental de las PV. La eficiencia de conversión eléctrica de las placas más comercializadas se encuentra entre el 15 y el 17% (Tyagi y col., 2013), pero es un porcentaje aún demasiado bajo. Numerosas investigaciones se llevan a cabo para mejorar este rendimiento, como bien se recogen en la revisión del estado del arte publicada por Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes (2012), y es cuestión de tiempo y estudios que las placas solares vayan llegando a su eficiencia teórica. Muestra de ello ocurrió en Septiembre de 2013, cuando 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.

Otro grave problema que afecta a las PV son los puntos calientes. Un caso típico, es cuando una parte de la placa solar es expuesta a la sombra. Cuando la corriente excede la intensidad en cortocircuito ( $I_{cc}$ ) del módulo, los materiales ofrecen mucha

menos resistencia, dejando circular una mayor intensidad sobre ellos. Como consecuencia, todo el calor se debe disipar en una superficie pequeña, provocando un sobrecalentamiento local o punto caliente. Modelos experimentales como los desarrollados por *Solheim y col. (2013)* registraron temperaturas de 150°C, e incluso superaron los 200°C, en los casos estudiados por *Geisemeyer y col. (2013)*. A pesar de la existencia de dispositivos (como los diodos baipás) para controlar los puntos calientes, estas situaciones podrían aparecer si estos componentes fallan o si la zona con sombra no es suficiente para activar dichos diodos.

Una de las nuevas aplicaciones de las placas fotovoltaicas es su integración en edificios (BIPV, del inglés Building Integrated Photovoltaics), lo cual permite su introducción en el mundo de los materiales constructivos. No solo en cuanto a la generación eléctrica; gracias a la flexibilidad, la reducción de espesor y peso de las nuevas generaciones de PV se está impulsando fuertemente al sector BIPV. Hoy en día, no es de extrañar ver edificaciones con muros recubiertos de placas solares, formando parte de la fachada, ventanas o persianas. En este ejemplo de la *Figura 1-3*, las placas no solamente están integradas en el tejado, son el tejado.



**Figura 1-3. Edificio con BIPV, presentada por Team Sweden en el Solar Decathlon China 2013**

Bajo este marco, surge la idea de combinar una de las energías renovables, como es la solar fotovoltaica (concretamente BIPV), con materiales de cambio de fase (PCM, del inglés Phase Change Materials). Esta integración podría presentar mejoras con gran potencial como:

- ▶ Impulsar la energía solar en detrimento de las fósiles y nucleares
- ▶ Incrementar tiempo de vida útil evitando daños prematuros y degradación de las PV
- ▶ Reducir el consumo de recursos naturales limitados
- ▶ Mejorar del rendimiento de las PV
- ▶ Adaptación del sistema BIPV incorporando PCM dependiendo de la localización





## 2- MOTIVOS Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El desarrollo en la energía solar fotovoltaica es un hecho evidente. Si las predicciones se cumplen, el porcentaje de generación eléctrica fotovoltaica aumentará anualmente entre un 35 y 40%, según el reportaje de la EPIA anteriormente citado. *Jäger-Waldau (2006)* señala en su estudio las claves para mantener y aumentar este crecimiento. En la *Figura 2-1* se recogen las ideas principales.

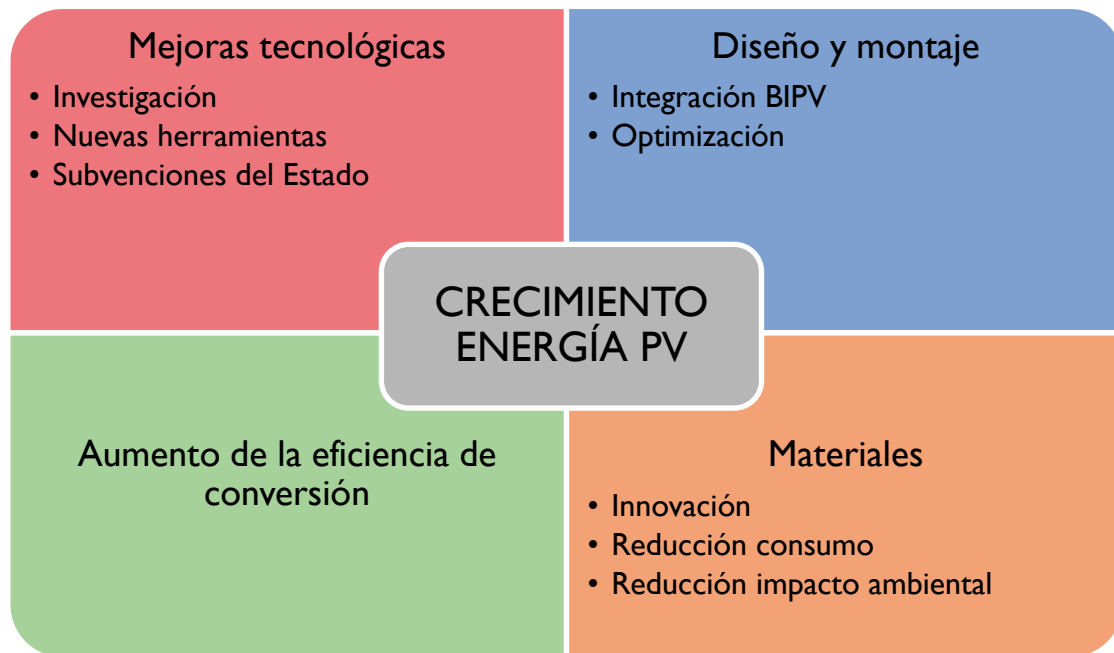


Figura 2-1. Bases para el crecimiento de la energía fotovoltaica

Como se ha expuesto antes, las barreras tecnológicas suponen un freno al crecimiento de la energía fotovoltaica. Es necesario continuar líneas de investigación así como comenzar otras nuevas en el campo de los materiales. Dada su categoría de energía renovable, se debe reducir al máximo el impacto ambiental, por ejemplo con materiales no nocivos y diseños de montaje que optimicen espacio y consumo (integración BIPV). Todas estas mejoras supondrán una reducción en el coste, impulsando su potencial en el mercado. Las motivaciones que han incentivado este proyecto siguen varias de estas líneas principales, con el objetivo de estimular y fomentar la energía fotovoltaica y reducir el impacto ambiental.

Son numerosas las técnicas a utilizar para regular térmicamente una instalación solar y evitar temperaturas de operación elevadas que afecten a la eficiencia energética. En la revisión de métodos de *Hasan y col. (2010)* se recogen las principales: circulación natural de aire, circulación forzada, refrigeración hidráulica, intercambiadores de calor por tuberías, enfriamiento termoeléctrico (Peltier) y regulación con PCM. El objeto de estudio se centrará en este último dadas sus ventajas: altos rendimientos de intercambio de calor con respecto a los sistemas de circulación de agua y aire, elevado poder de absorción por medio de calor latente, eliminación del calor en exceso a temperatura constante, no hay consumo de electricidad, intercambio de calor pasivo, muy bajos costes de mantenimiento (únicamente al renovarse el sistema) y además no se genera ruido durante su operación, importante si se integra en edificios.

La incipiente tendencia en la integración de placas fotovoltaicas en edificios es debida principalmente a su buena gestión de la energía en el edificio consiguiendo importantes ahorros energéticos y un beneficio ecológico y económico en el ciclo de vida de los edificios (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012). Sin embargo, sus actuales diseños poseen ciertas limitaciones técnicas que reducen su eficiencia durante su operación, como por ejemplo la pérdida de eficiencia en la conversión eléctrica producto del aumento de la temperatura, generación de puntos calientes que reducen el tiempo de vida de las mismas, falta de estudios específicos que aborden el comportamiento de las BIPV considerando distintas Severidades Climáticas (SC), etc.

La incorporación de nuevas tecnologías a las PV supone considerables inversiones económicas y limitaciones de localización y estructuras, así como retos tecnológicos que demandan estudios adicionales. Este proyecto busca por tanto analizar soluciones tecnológicas innovadoras, basadas en la incorporación de PCM, capaces de almacenar calor durante su cambio de fase en forma de calor latente. Se llevará a cabo un estudio en distintas SC profundizando sobre el control y regulación de la temperatura de operación de una BIPV, con y sin PCM, y cómo ésta reduce el aprovechamiento de la energía solar por parte de la placa y lleva a una posible degradación prematura, la cual incrementaría la ineficiencia de los recursos materiales consumidos. A modo resumen, la *Figura 2-2* presenta un diagrama con los aspectos a mejorar y cómo el sistema PCM/BIPV ayudaría a su consecución.

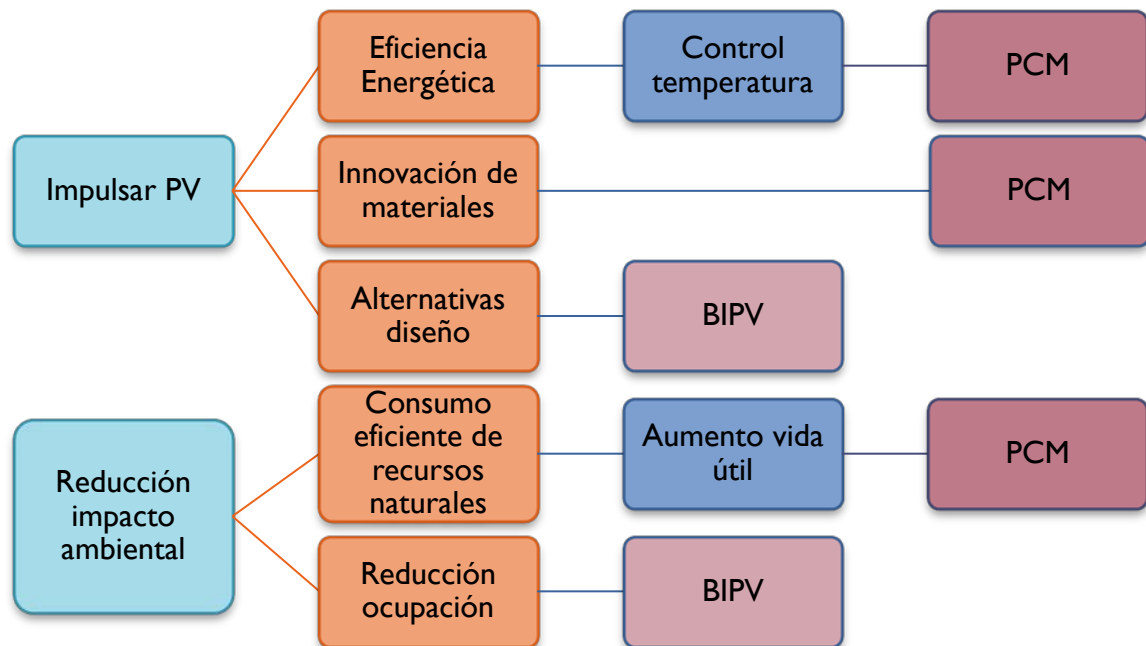


Figura 2-2. Motivaciones del proyecto

### Objetivos del proyecto

El proyecto, bajo el nombre de “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)”, se ha desarrollado dentro del grupo de Ecoeficiencia y Análisis Ambiental del área de Eficiencia Energética de la Fundación CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos), con el apoyo de la Universidad de Zaragoza. Los objetivos propuestos son:

- 1º) Realizar una revisión del estado del arte de los PCM que permita la correcta selección de los mismos en aplicaciones BIPV, en función de sus propiedades físicas y las condiciones climáticas del lugar de aplicación.
- 2º) Caracterización del comportamiento de las variables de operación (por ejemplo: rendimiento, temperatura...) de las placas BIPV con y sin PCM para SC distintas.
- 3º) Comparación del comportamiento de operación con estudios previos.
- 4º) Análisis de la influencia de los parámetros críticos de diseño relativos al uso de PCM en BIPV.
- 5º) Identificar los aspectos característicos del comportamiento de las variables de operación y los parámetros críticos para analizar la viabilidad de aplicación en SC distintas.
- 6º) Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV y viabilidad económica del proyecto.



### 3- RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE Y REVISIÓN TEÓRICA

En este apartado se ha elaborado un resumen con las nociones básicas de los PCM, las principales variables de comportamiento de las PV y una introducción a las BIPV. En el [Anexo A](#) se puede encontrar información adicional mucho más detallada, así como un Estado del Arte desde los inicios de la aplicación de PCM en PV hasta los últimos estudios y experiencias en control y regulación de su temperatura de operación ya en BIPV.

#### Materiales de cambio de fase: PCM

Un PCM es una sustancia con capacidad de almacenar y liberar calor latente, además de mantener una temperatura estable durante el proceso de absorción o disipación de calor ([Kelly, 2000](#); [Sharma S.D., 2005](#)). La lista de PCM es muy amplia, y para saber cuál es el adecuado, se establecen distintos criterios ([Abhat, 1983](#); [Sharma y col., 2009](#)), a destacar: temperatura de cambio de fase que se adapte al rango de operación deseado, alto calor latente de fusión, alta conductividad térmica, densidad moderada, estabilidad, alta disponibilidad, bajo impacto ambiental, coste moderado y evitar degradación, corrosión, toxicidad, subenfriamiento o variaciones de volumen. En los trabajos de [Memon \(2014\)](#), [Sharma y col. \(2009\)](#) y [Zalba y col. \(2003\)](#) se puede encontrar una descripción de cada tipo para resaltar las características de cada grupo. La [Figura 3-1](#) presenta su clasificación según la composición química.

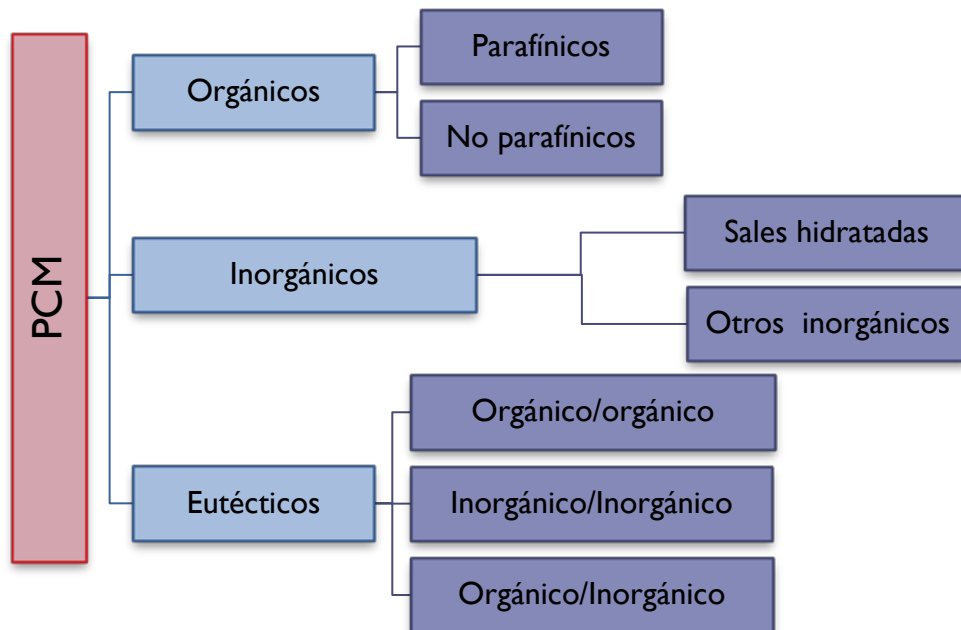


Figura 3-1. Clasificación esquemática de los PCM

#### ► 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), y que pueden 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. Tienen la ventaja de poseer altos calores latentes de fusión, pero baja conductividad térmica.

### ► **Inorgánicos**

Dentro de este grupo se distinguen las sales hidratadas, que destacan por su alta densidad volumétrica de almacenamiento, su alta conductividad térmica, abundante disponibilidad y coste económico. Por el contrario, tienen gran variación de volumen al cambiar de fase, y problemas como subenfriamiento antes de la cristalización y segregación. Dentro del otro subgrupo, se engloban los demás inorgánicos como el agua, pero la mayoría son metales. A pesar de su alta conducción térmica y elevados puntos de fusión, los metales son caros comparados con los otros PCM, y normalmente su alta densidad conlleva un exceso de peso no deseado.

### ► **Eutécticos**

Los eutécticos son la mezcla de dos o más compuestos orgánicos y/o orgánicos, abriendo las posibilidades de combinar las ventajas de ambos tipos. Desafortunadamente, el campo de investigación es reciente y no hay mucha información acerca de sus propiedades termofísicas.

Para la utilización de los PCM se suelen someter a un método de encapsulación, que 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 tamaño del recubrimiento: macroencapsulados, microencapsulados y nanoencapsulado. 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.

## **Placas Solares Fotovoltaicas**

Las placas fotovoltaicas poseen la capacidad de convertir la luz en electricidad (*Singh, 2013*). 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 consultar el libro escrito por *Goetzberger y Hoffmann (2005)*.

La eficiencia en las placas varía según el tipo; la *Figura 3-2* recoge la evolución temporal de los valores de eficiencia de conversión eléctrica. En las monocristalinas de silicio (Si) se llega hoy en día casi hasta el 25%, mientras que las policristalinas están 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 el telururo de cadmio (CdTe) y el diseleniuro de galio, indio y cobre (CIGS) los materiales que mejor relación coste-eficacia presentan. También se van introduciendo nuevos materiales, tales como partículas orgánicas o células sensibilizadas con colorante todavía tienen una baja eficiencia en torno al 11.4%, sin embargo son totalmente ecológicas. Actualmente, algunas placas solares multijuntura con semiconductores tipo III-V ya han demostrado valores muy próximos al 45%; mientras que el 50% sería una aproximación real y alcanzable, según el artículo de *Tyagi y col. (2013)*. Pero a corto plazo, las mejoras en la eficiencia y una reducción del precio de las placas solares comerciales sería lo que facilitaría su despegue en el mercado.

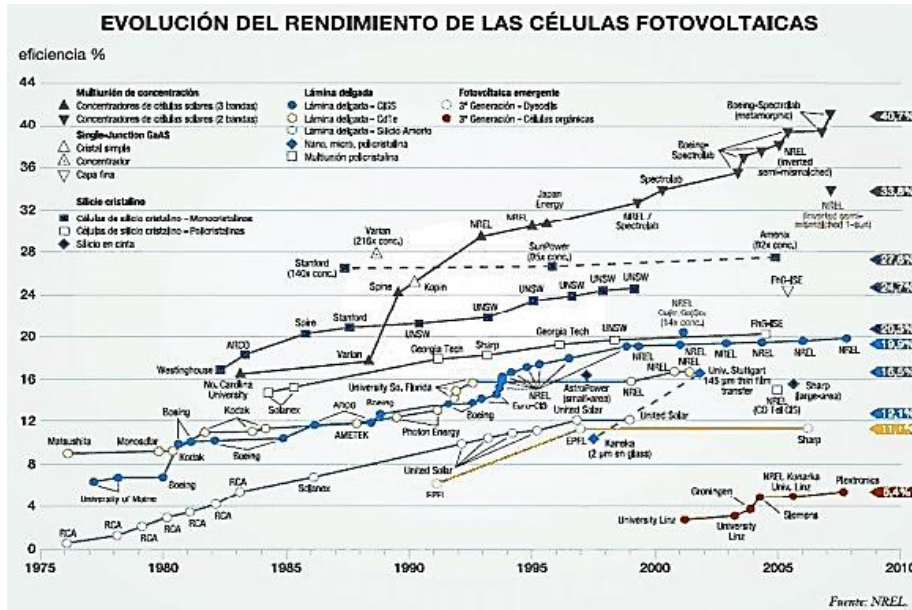


Figura 3-2. Evolución temporal de los tipos de PV y el incremento en su eficiencia. Fuente: Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL)

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 (temperatura del aire, humedad, viento...) y forma de montaje. Pero sobre todo, hay que destacar la proporcionalidad a la irradiación solar recibida, como se ve en la Figura 3-3.

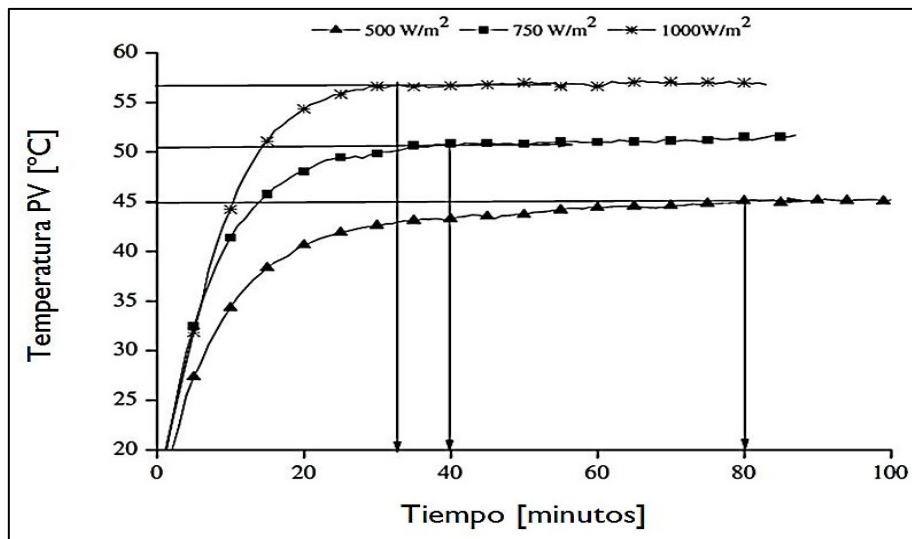


Figura 3-3.  $T_{pv}$  [°C] a lo largo del tiempo, para distintos valores de irradiación solar 500, 750 y 1000 [W/m²]. (Hasan y col., 2010)

► **Potencia P:**

La *Ecuación 3-1* permite saber cuál es la potencia de operación en cada momento como producto de la irradiación solar ( $G$ ), el área ( $A$ ) y la eficiencia de la PV ( $\eta_{pv}$ ). Es primordial la relación entre  $G$  y  $P$ . Sin embargo, el único término sobre el que podemos actuar para incrementarla es la eficiencia del módulo solar.

**Ecuación 3-1. Potencia P [W] directamente proporcional a la irradiación solar G [W/m<sup>2</sup>], al área A [m<sup>2</sup>] y eficiencia de la placa [%]**

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

► **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 solar. El proyecto se centra en estudiar cómo un aumento en  $T_{pv}$  sería perjudicial para la eficiencia. Se propone una ecuación lineal para la eficiencia eléctrica, *Ecuación 3-2*. Donde  $\beta_{ref}$  es el coeficiente de temperaturas y  $\eta_{Tref}$  la eficiencia de la PV a la temperatura de referencia  $T_{ref}$  y  $G=1000 \text{ W/m}^2$ , (*Evans y Florschuetz, 1978*).

**Ecuación 3-2. Eficiencia de la PV, por Evans Florschuetz (1978). Eficiencias [%], temperaturas [°C] y  $\beta_{ref}$  [°C<sup>-1</sup>]**

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

### **Aplicación de PCM en BIPV**

BIPV hace referencia a la combinación de diseño arquitectural que relaciona las placas fotovoltaicas y los elementos tradicionales de construcción. En el artículo publicado por *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). 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*). 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*). 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.



## 4- CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE BIPV CON Y SIN PCM

### Localización geográfica - Severidades Climáticas

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 (ver *Anexo B Localización geográfica - Severidades Climáticas Figura B-1 y Figura B-2*). Como se puede ver en apartados posteriores, a través de *Ecuación 4-2* y *Ecuación 4-3*, la temperatura  $T_{pv}$  es un valor que depende mayoritariamente de las condiciones ambientales como temperatura ambiente, velocidad del viento e irradiación solar, por tanto la localización y SC son un factor a tener en cuenta.

### Condiciones atmosféricas

Las condiciones climatológicas son tan importantes para la temperatura de trabajo de la PV como la localización. Dentro de la página web del JRC (del inglés Joint Research Centre), concretamente en el IET (Instituto de Energía y Transporte) se encuentra una aplicación que consta de un mapa interactivo que permite acceder a la base de datos climatológicos de una ubicación concreta. Dicha aplicación integra los sistemas de CM-SAF (del inglés, Climate Monitoring Satellite Application Facility) y PVGIS-3 (del inglés Photovoltaic Geographical Information System). Se utiliza ampliamente en la Unión Europea (validación especificada en *Anexo B Variables Climatológicas*).

### Identificación de las características de PV

Existen distintos tipos de placa en función de los materiales de fabricación y gran variedad de características (conductividad, eficiencia de conversión eléctrica de referencia, potencia máxima...). Entre ellas, la absorbancia y transmitancia son fundamentales para una buena captación de  $G$ , ya que influyen en el balance global de energía (*Ecuación 4-1*). Los factores principalmente influyentes en la temperatura de funcionamiento en una PV son los nombrados en la sección anterior *Placas Solares Fotovoltaicas*. Es precisamente esta temperatura de operación la que es deseable controlar, para evitar reducciones en la eficiencia de conversión eléctrica. Con la inclusión de los PCM se pretende prevenir que se alcancen temperaturas tan elevadas; ya que de este modo, es el material el que absorbe el exceso de calor por su capacidad calorífica.

### Operación de BIPV sin PCM

Para calcular la temperatura de operación de la placa fotovoltaica ( $T_{pv}$ ), varios modelos han sido propuestos y la mayoría de ellos incluyen la temperatura de operación nominal ( $T_{NOCT}$ ). Ésta es definida como la temperatura de la placa resultante de las mediciones en circuito abierto con  $G=0.8 \text{ kW/m}^2$ , una temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) de  $20^\circ\text{C}$  y una velocidad del viento ( $v$ ) de  $1 \text{ m/s}$  (*Alonso García y Balenzategui, 2004; Stultz, 1977*). El problema llega cuando al ver que en las restricciones de utilización de dicha expresión, por un lado, excluyen los sistemas integrados; y por otro, no consideran la influencia del viento.

En uno de sus estudios publicados, *Huang (2011)* propuso un balance global de energía por unidad de superficie dentro del sistema BIPV, *Ecuación 4-1*, donde  $\Delta t$  corresponde al intervalo temporal en que vienen proporcionados los datos,  $\eta_{PV}$  a la eficiencia de la PV sin PCM y  $U_L$  al coeficiente global de pérdidas.

**Ecuación 4-1. Balance global de energía por unidad de superficie para el sistema sin PCM. (Huang, 2011)**

$$\tau * \alpha * G * \Delta t = \eta_{PV} * G * \Delta t + U_L * (T_{pv} - T_{amb}) * \Delta t$$

$U_L$  engloba las pérdidas en el sistema por convección, conducción y radiación. Depende del tipo de placa, del montaje que se realice, del hueco entre la placa y el tejado, del aislamiento, y de los factores climatológicos; por tanto, variará en cada intervalo temporal y de una localización a otra. Para calcular su valor, se necesita otra expresión que obtenga primero la diferencia de temperaturas ( $T_{pv} - T_{amb}$ ), y así dejar  $U_L$  como incógnita.

La otra ecuación a considerar es la definida por *Trinuruk, Sorapipatana, y Chenvidhya (2009)*, cuya fórmula tiene en cuenta el efecto del viento y su consecuente poder de convección en la disipación del calor. Así pues, la diferencia ( $T_{pv} - T_{amb}$ ) viene dada por la siguiente *Ecuación 4-2*.

**Ecuación 4-2. Diferencia de temperatura de operación placa respecto al ambiente. Temperaturas [°C], G [W/m²K], v [m/s]. (Trinuruk, Sorapipatana, y Chenvidhya, 2009)**

$$T_{pv} - T_{amb} = G * e^{a+b*v}$$

Los coeficientes  $a$  y  $b$  son empíricos, dependen de los materiales que forman la PV y del tipo de montaje, y vienen especificados en un tabla elaborada por los *Laboratorios Sandia* (SNL, del inglés Sandia National Laboratory), en el *Anexo D Operación de BIPV sin PCM Tabla D-1*. Primero, se resuelven los valores para  $T_{pv}$ ; y una vez obtenidos estos datos ya se puede calcular  $U_L$  a partir de la *Ecuación 4-2*. El código del programa utilizado se puede encontrar en el *Anexo D Programa EES cálculo sin PCM para Zaragoza*.

### Selección del material de cambio de fase

Después de fijar la dirección hacia los PCM para regular el sistema BIPV, surge la necesidad de elaborar un listado, recogido en el *Anexo C Tablas PCM globales: Orgánicos, Inorgánicos y Eutécticos (Tabla C-1, Tabla C-2, Tabla C-3)*, que recopile de manera organizada los distintos tipos de materiales, así como otras características de relevancia. Varios estudios ayudaron a completar esta lista (*Kelly, 2000; Kenisarin, 2010; Kenisarin y Mahkamov, 2007; M. Gasanliev y Y. Gamataeva, 2000; Oró y col., 2012; Sharma y col., 2009; Sharma S.D., 2005; Zalba y col., 2003*). Dada la enorme cantidad de estos materiales que se pueden encontrar, los datos de búsqueda se acotarán para centrarse únicamente en aquellos con temperatura de cambio de fase entre unos pocos grados negativos (-3°C) hasta los 200°C. En ningún caso, las placas fotovoltaicas excederán esta temperatura en su funcionamiento normal.

A continuación, se debe seleccionar el PCM adecuado a partir de las listas señaladas anteriormente. A raíz de ellas, se crean unos gráficos, ver mapas de puntos en el *Anexo C (Figura C-1, Figura C-2, Figura C-3)*, donde los materiales quedan divididos por tipología (orgánicos, inorgánicos y eutécticos), y ordenados de menor a mayor temperatura de fusión  $T_{fusion}$  (°C). También se indica el calor latente de fusión  $H$  (kJ/kg) de los PCM.

Estos mapas de puntos, permiten de manera sencilla y visual, ver qué PCM se ajusta más a las necesidades impuestas. Se entra por el eje vertical con el valor de  $T_{fusion}$  deseado, y se seleccionan aquellos que tengan una temperatura de cambio de fase cercana a la elegida. Siguiendo verticalmente los PCM, se encuentran sus valores de  $H$  en la parte superior. El siguiente paso, consiste en seleccionar el PCM más adecuado entre las posibles alternativas, en función de sus características. Los primeros criterios son la  $T_{fusion}$  y  $H$ . Este último interesa que sea lo más alto posible, ya que está relacionado con la capacidad de absorber calor latente.

### Operación de BIPV con PCM

Posteriormente, se analiza cómo trabaja el sistema BIPV con la inclusión de un PCM, y los cambios que produce tanto en la temperatura de operación como en la eficiencia. Para ello, se hace un balance global de energía del nuevo sistema BIPVPCM, basado en las aportaciones realizadas por *Huang (2011)*. La expresión es similar a la *Ecuación 4-1*, pero en esta ocasión, el último término adicional corresponde a la energía calorífica almacenada por el sistema gracias a la incorporación del PCM, dando lugar a la *Ecuación 4-3*.

**Ecuación 4-3. Balance global de energía por unidad de superficie para el sistema con PCM. (Huang, 2011)**

$$\tau * \alpha * G * \Delta t = \eta_{pv/pcm} * G * \Delta t + U_L * (T_{pv/pcm} - T_{amb}) * \Delta t + Q_s$$

El calor almacenado por el PCM,  $Q_s$ , viene definido como el sumatorio del calor sensible y el calor latente, los cuales varían su valor dependiendo de las relaciones entre las temperaturas de ambiente, operación y fusión del PCM. El calor sensible,  $Q_{sen}$ , se diferencia según el estado del PCM, que será sólido cuando  $T_{pv}$  no supere  $T_{fusion}$ . Por otro lado, actúa como líquido si  $T_{pv}$  es mayor que  $T_{fusion}$  y si ha cambiado totalmente de fase. Sin embargo, la aportación de  $Q_{sen}$  es despreciable comparado con el calor latente  $Q_{lat}$ , debido principalmente a dos razones. La primera es por la escasa contribución de mejora al sistema, que en cualquier caso aumentaría el valor  $Q_s$  ayudando a regular favorablemente  $T_{pv}$ . En segundo lugar, se omite para simplificar el proceso de cálculo y su código de programación. De este modo,  $Q_s$  se equipara únicamente a  $Q_{lat}$ .

El calor latente vendrá dado por ecuaciones de conducción (*Ecuación 4-4*) y toma valores positivos cuando acumula energía y negativos cuando la disipa.. La conductividad térmica de la placa,  $k$ , se expresa en [W/(m\*K)]. El espesor,  $x$ , viene dado en [m]. El calor que se genera en la PV se transmite a través de la superficie o área de contacto al PCM,  $A$  [m<sup>2</sup>]. Estos últimos condicionarán indirectamente la cantidad de PCM a introducir en el sistema, es decir su masa,  $m_{PCM}$  [kg].

**Ecuación 4-4. Calor latente por conducción [Julios]. Temperaturas [°C], k [W/m\*K], A [m<sup>2</sup>], x[m],  $\Delta t$  [s]**

$$Q_{lat} = \frac{(T_{pv} - T_{fusion}) * k * A * \Delta t}{x}$$

En conclusión,  $Q_{lat}$  es la clave del sistema. La capacidad de almacenamiento de calor dará comienzo en cuanto  $T_{pv}$  y  $T_{fusion}$  se igualen. El material cambia de fase, utilizando toda la energía para ese proceso y reduciendo la diferencia entre  $T_{pv\backslash pcm}$  y  $T_{amb}$ . El sistema dejará de almacenar en dos casos, bien cuando haya acumulado todo el calor

posible,  $Q_{total}$  producto de la capacidad calorífica  $H$  y la masa del PCM  $m_{PCM}$ ; o bien cuando la temperatura caiga por debajo de  $T_{fusion}$ . En este último caso, dará comienzo el proceso inverso, y todo el calor acumulado  $Q_{acu}$  empezará a ser disipado. Durante esta fase,  $T_{pv\backslash pcm}$  será unos grados mayor que cuando trabajaba sin PCM,  $T_{pv}$ . A diferencia de lo que pueda parecer, no es un dato preocupante, ya que se produce cuando la placa apenas recibirá irradiación solar y la  $T_{amb}$  decrece progresivamente.

Las ecuaciones descritas anteriormente son las que gobiernan el sistema BIPV/PCM. El código del programa utilizado se puede encontrar en el [Anexo D Programa EES cálculo con PCM de distintos parámetros críticos](#). Para este segundo cálculo, se introduce como variables de entrada los datos climatológicos de la región,  $T_{amb}$  y  $G$ , junto con  $T_{pv}$  y  $U_L$ , que fueron los datos de salida del programa anterior, [Anexo D Programa EES cálculo sin PCM para Zaragoza](#). En este caso, los resultados que se obtienen corresponden a los valores de temperatura de operación  $T_{PV\backslash PCM}$  y la eficiencia  $\eta_{PV\backslash PCM}$  del nuevo sistema con PCM, así como  $Q_{lat}$  y  $Q_{acu}$ .

### Comparación del comportamiento de operación

Una vez obtenidos los primeros resultados, es recomendable analizar si los datos se asemejan a otros de trabajos y estudios previos similares. En este apartado se hará una comparación del comportamiento y las temperaturas de operación, así como las mejoras introducidas por la aplicación de PCM al sistema BIPV.

### Análisis de los parámetros críticos de diseño

Se distinguen 3 tipos de variables en el sistema a analizar:

- Variables climatológicas: datos de entrada. Son proporcionadas por estaciones meteorológicas, distintas en cada localización y son incontrolables por ser humano. Se considera la irradiación solar, temperatura ambiente y velocidad viento.
- Parámetros críticos del diseño del sistema BIPV/PCM: es la serie de características intrínsecas, por un lado, a la propia BIPV como pueden ser su conductividad térmica, área, absorbancia, transmitancia y eficiencia de referencia. Por otro lado, están los factores relativos al PCM y al diseño del sistema, como la temperatura de fusión y calor latente de fusión del PCM, espesor de la capa adherida a la placa y la composición en masa, en el caso de haber más de un PCM. Éstos últimos sí que son controlables, y de su elección dependerá el óptimo funcionamiento del sistema.
- Variables de comportamiento: datos de salida a partir de los anteriores y basadas en las ecuaciones descritas en el anterior apartado [Caracterización del comportamiento de las variables de operación de BIPV con y sin PCM](#). Las principales variables son la temperatura de operación de la PV, eficiencia de conversión energética, potencia eléctrica, coeficiente global de pérdidas, calor latente acumulado y ratio de degradación, etc.

Este apartado se centra en analizar, bajo unas variables climatológicas dadas, la relación existente entre los parámetros críticos y cómo actúan dentro del sistema BIPV/PCM, es decir, su influencia sobre las variables de comportamiento.

### Consideraciones

Los cálculos anteriores se han desarrollado bajo las siguientes consideraciones:

- El coeficiente Trinuruk (*Tabla D-1*) depende del tipo montaje. Elección para una estructura de PV: Vidrio/Célula/Polímero con hueco de ventilación abierto.
- La ecuación Trinuruk (*Ecuación 4-2*) es para una localización específica. Se necesitaría optimizar los coeficientes  $a$  y  $b$  según la ubicación para reducir el error de cálculo de  $T_{pv}$ .
- Para la representación gráfica, acorde a lo observado en otras publicaciones, se considera la eficiencia de conversión eléctrica constante en el último valor de referencia cuando la irradiación solar es nula.
- El calor sensible es considerado despreciable en cálculos de  $T_{pv/pcm}$  por su escasa aportación.
- Los datos climatológicos proporcionados por la aplicación PVGIS-3 son promedios de medias mensuales tomados durante diez años. La irradiación solar sigue una distribución simétrica a lo largo de las horas de luz.
- Los valores de  $T_{amb}$  y  $v$  reales de cada día elegido del 2013 para Zaragoza son próximos a un día tipo medio de ese mismo mes.



## 5- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE OPERACIÓN Y VIABILIDAD EN DISTINTAS SC

### Comportamiento de las variables de operación

#### ► Localización geográfica

En primer lugar, la decisión es la de ubicar el estudio en Zaragoza (España), dada la accesibilidad de datos, historiales y facilidad para un posible desarrollo experimental. Sus coordenadas quedan identificadas en el [Anexo B Localización geográfica - Severidades Climáticas](#). Zaragoza corresponde a una D3 de las SC españolas, es decir, los inviernos son bastante fríos y los veranos cálidos y áridos.

#### ► Condiciones atmosféricas

En el caso de Zaragoza, los datos correspondientes al año 2013 de temperatura ambiente y velocidad del viento se obtuvieron de la estación meteorológica propia de la Fundación CIRCE.

La orientación viene definida por el ángulo acimutal y la inclinación de la placa, determinantes en la captación de la irradiación solar. Concretamente, el valor óptimo para un año en Zaragoza será fijado en  $36^\circ$  de inclinación y  $-2^\circ$  de acimutal, proporcionados por la aplicación PVGIS-3, así como los valores diarios de radiación solar global. El intervalo temporal de toma de datos es de 15 minutos.

#### ► Identificación de las características de PV

En el [Anexo C Identificación de las características de PV](#) quedan definidas las principales propiedades físicas y características de la PV.

#### ► Operación de BIPV sin PCM

En las siguientes gráficas, [Figura 5-1](#) y [Figura 5-2](#), se presentan los datos anuales de operación sin PCM, obtenidos en Zaragoza, para temperatura de operación y eficiencia de conversión energética. Se puede apreciar que los valores máximos de  $T_{pv}$  se corresponden con los valores mínimos de  $\eta_{pv}$ .

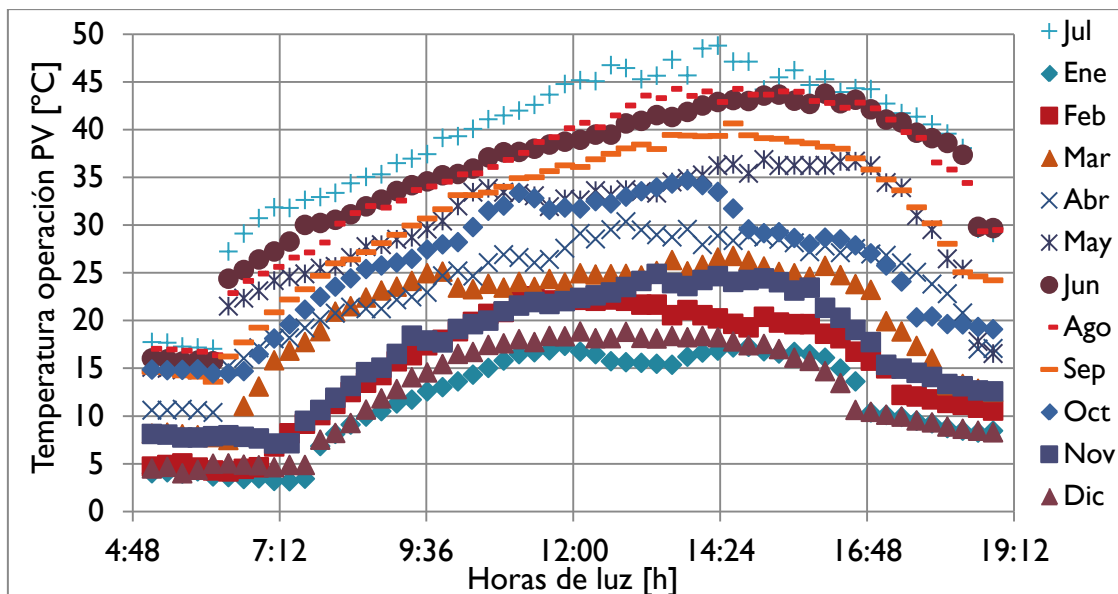


Figura 5-1.  $T_{pv}$  anuales SIN PCM en Zaragoza [°C]

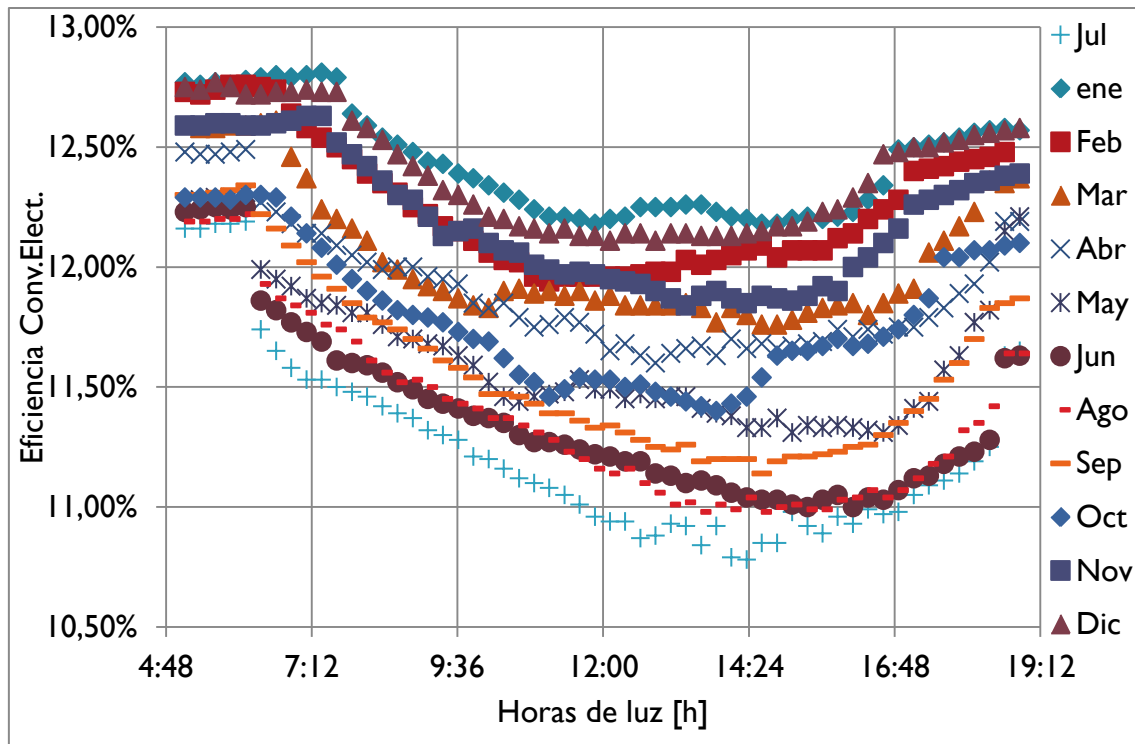


Figura 5-2. Eficiencias anuales SIN PCM en Zaragoza  $\eta_{PV}$  [%]

Analizando los resultados, cabe destacar que es para el mes de Julio cuando se alcanza la temperatura más alta,  $T_{pv} = 48.78^{\circ}\text{C}$  y corresponde a la mínima eficiencia de conversión de 10.58%. Los otros meses de verano, Junio y Agosto, también alcanzan elevadas temperaturas. Mientras que en invierno, los valores máximos de  $T_{pv}$  se encuentran en el intervalo de 15 a  $25^{\circ}\text{C}$  y los valores mínimos de  $\eta_{PV}$  superan el 11.84%.

La selección de PCM debe centrarse en los meses en que las temperaturas son más altas, ya que son potencialmente peligrosas y reducen la eficiencia de conversión eléctrica. Así pues, se define el rango temperatura de cambio de fase para el PCM desde  $30^{\circ}\text{C}$  hasta los  $40^{\circ}\text{C}$ . Si se elige una temperatura mayor, el número de meses en los que el PCM tiene influencia se reduce a los 3 meses de verano. En conclusión, con esa elección la aplicación del sistema BIPV/PCM actuará durante 6 meses, de Mayo a Octubre, y cambia de fase en un punto que evita alcanzar temperaturas excesivamente elevadas.

#### ► Selección del material de cambio de fase

Después de haber definido el rango de temperaturas con las que interesa trabajar, se estudian los distintos PCM a utilizar. Los siguientes mapas de puntos, (Figura 5-3 y Figura 5-4), son la representación gráfica del Anexo C Tablas de alternativas PCM para Zaragoza (Tabla C-4 y Tabla C-5). Permiten una clara visualización de las posibles opciones de PCM para Zaragoza, y señalan además las características principales, como son  $H$  y  $T_{fusion}$ .



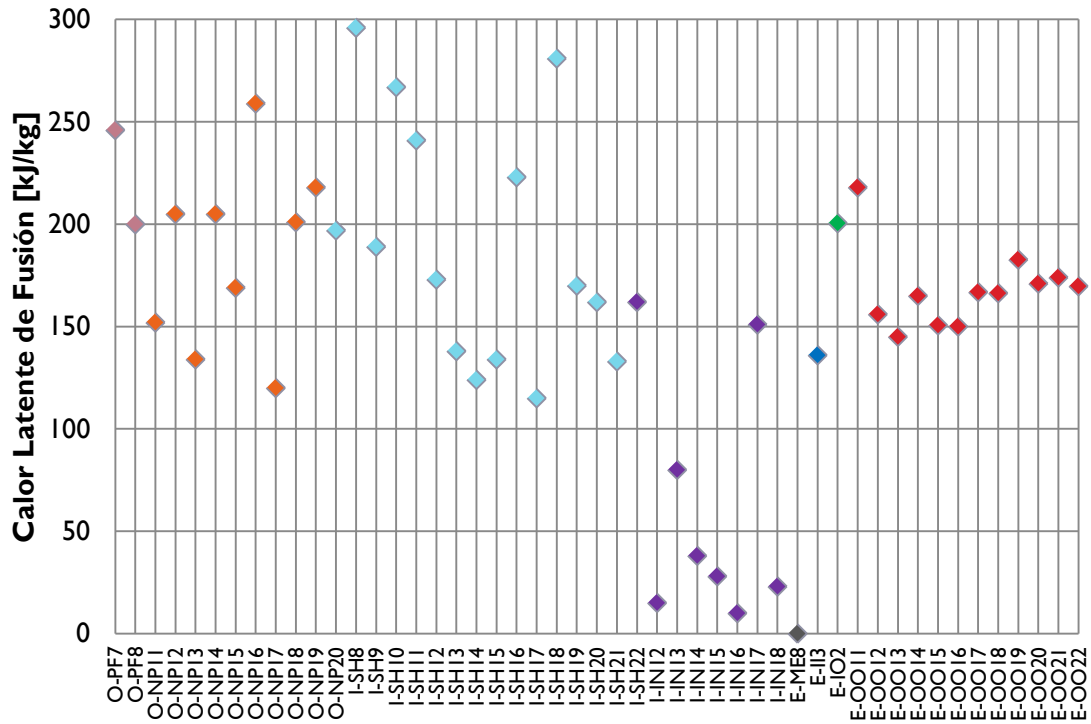


Figura 5-3. Mapa de puntos de H [kJ/kg] de las alternativas de PCM para Zaragoza

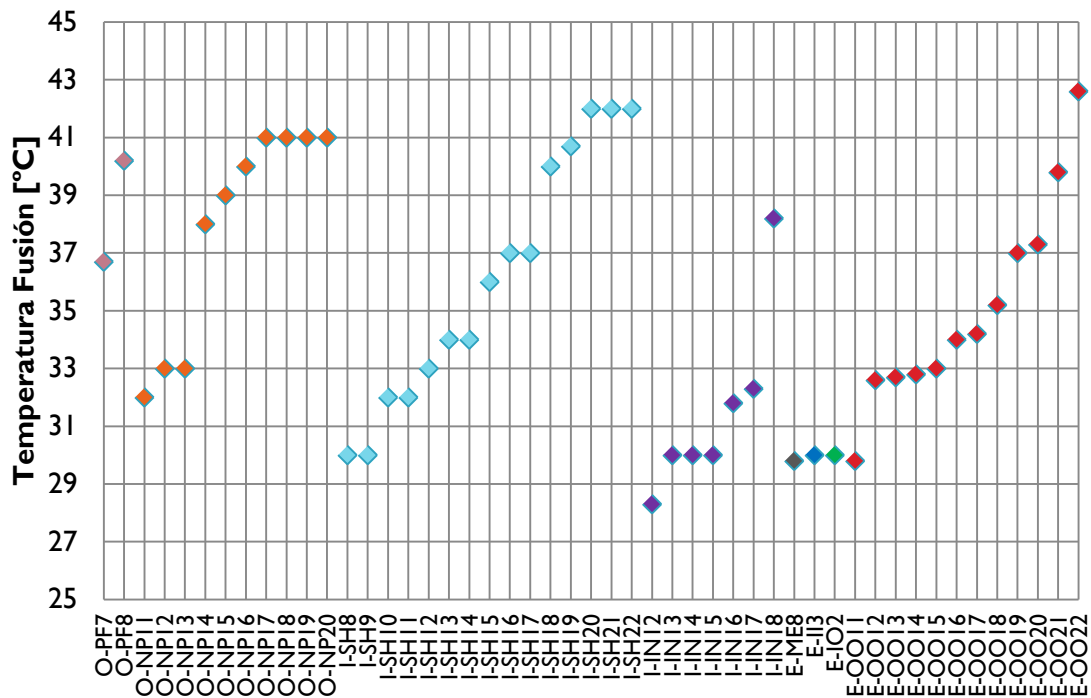


Figura 5-4. Mapa de puntos de Tfusion [°C] de las alternativas de PCM para Zaragoza

Estas opciones se verán reducidas conforme se apliquen nuevos criterios. El primero es que tengan un  $H$  lo más elevado posible, preferiblemente superando los 200 kJ/kg. Además, los correspondientes al grupo de los eutécticos y mezclas quedan descartados, dado que su investigación es aún reciente y muchas de sus características se desconocen. Esta dificultad también se encuentra en otros compuestos cuyas propiedades termofísicas no se encuentran claramente definidas.

Tabla 5-1. Propiedades de PCM orgánicos e inorgánicos

CRITERIO	ORG	INORG
Alta conductividad térmica		
No inflamables		
Abundancia y Disponibilidad		
Densidad		
Estabilidad Química		
Inerte		
Mínima variación de volumen al cambiar de fase		
Sin subenfriamiento		
No degradación, ni corrosión		

La anterior *Tabla 5-1*, indica en verde las características positivas y en rojo las negativas de cada grupo de PCM. A primera vista, las características de los PCM orgánicos son más favorables que los inorgánicos. De hecho, actualmente su utilización como almacenamiento de energía térmica es la más numerosa, especialmente en el caso de las parafinas. Sin embargo, los PCM inorgánicos pueden solucionar muchas de sus características negativas gracias a las técnicas de microencapsulación, entre ellas acelerar la nucleación con su consecuente reducción de subenfriamiento, y evitar degradación, corrosión y segregación de fase. Por tanto, se consiguen grandes mejoras en su estabilidad, extendiendo su vida útil durante más ciclos y mejorando su compatibilidad con otros materiales (*Huang y col., 2013*).

Aplicando los anteriores criterios, se reducen a dos las opciones para cada  $T_{fusión}$ . Para el rango próximo a 30°C, la parafina n-Octadecano y la sal hidratada con un 44%  $Na_2SO_4$  y un 56%  $H_2O$ . Por otra parte, para 40°C se elegirá entre el orgánico no parafínico Caprylone y la sal hidratada  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ . Los criterios finales que decantarán la elección se basan en el impacto ambiental que generen y por razones económicas. Las sales hidratadas poseen los valores más altos de  $H$ , los cuales proporcionan gran capacidad para almacenar calor. Por contra, los compuestos parafínicos han aumentado su coste últimamente, debido a la subida del precio del petróleo. Así pues, se utilizará el compuesto inorgánico,  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ , también denominada sal de Glauber, cuyo uso está muy extendido gracias a su alta disponibilidad y tener uno de los precios más bajos del mercado. Para el rango más elevado de temperaturas, es conveniente elegir otra sal hidratada,  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ , así se asegura una buena compatibilidad entre ambos compuestos, y además, sus características de conductividad, densidad y calores específicos son muy similares.

Por estas razones, descartados los orgánicos, la *Tabla 5-2* presenta la elección final con las sales hidratadas y sus propiedades termofísicas, relevantes para cálculos posteriores.

Tabla 5-2. PCM seleccionados para Zaragoza y sus propiedades termofísicas

PCM: Sal Hidratada	Cód.	T fusión [C°]	H [kJ/kg]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] (s/l)	Referencia
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	I-SH18	40	280	1522/1442	(Mehling Harald, 2008)
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	I-SH11	32	251	1460/1330	(Sathiyamoorthy S., 2012)

### ► Operación de BIPV con PCM

En este apartado, se presentan los resultados de las variables más representativas, tanto climatológicas como propias del funcionamiento y operación de las BIPV. La simulación muestra el comportamiento durante una semana, del 12 al 18 de Agosto de 2013 en la localidad de Zaragoza.

En la *Figura 5-5*, se han representado los valores de temperatura de operación con y sin PCM, así como la irradiación solar y la velocidad del viento. Los cálculos están basados en las ecuaciones anteriormente descritas, y permiten conocer el comportamiento de los parámetros del sistema y la estrecha relación existente entre ellos. La irradiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente condicionan la temperatura de operación de la placa, pero en el sistema BIPV/PCM, la influencia del PCM es la que caracteriza la curva. Como se observa, se consigue controlar el exceso de calor, reduciendo  $T_{pv}$  al acumular  $Q_{lat}$ , evitando puntos calientes y limitando los picos de temperatura (entre 5 y 8°C durante el rango más elevado de  $G$ ). Posteriormente, se disipa  $Q_{acu}$  durante la solidificación del PCM, haciendo que  $T_{pv\backslash pcm}$  se mantenga por encima de  $T_{pv}$ , es decir, la PV se enfría de forma más lenta. Este proceso sucede durante las horas de  $G$ ,  $T_{amb}$  y  $v$  más bajas, sin comprometer la degradación y buen funcionamiento de la BIPV. En aquellos casos que se disipe la totalidad del  $Q_{acu}$ ,  $T_{pv\backslash pcm}$  descenderá rápidamente hasta alcanzar los valores de  $T_{amb}$  y volver a iniciar el ciclo al día siguiente.

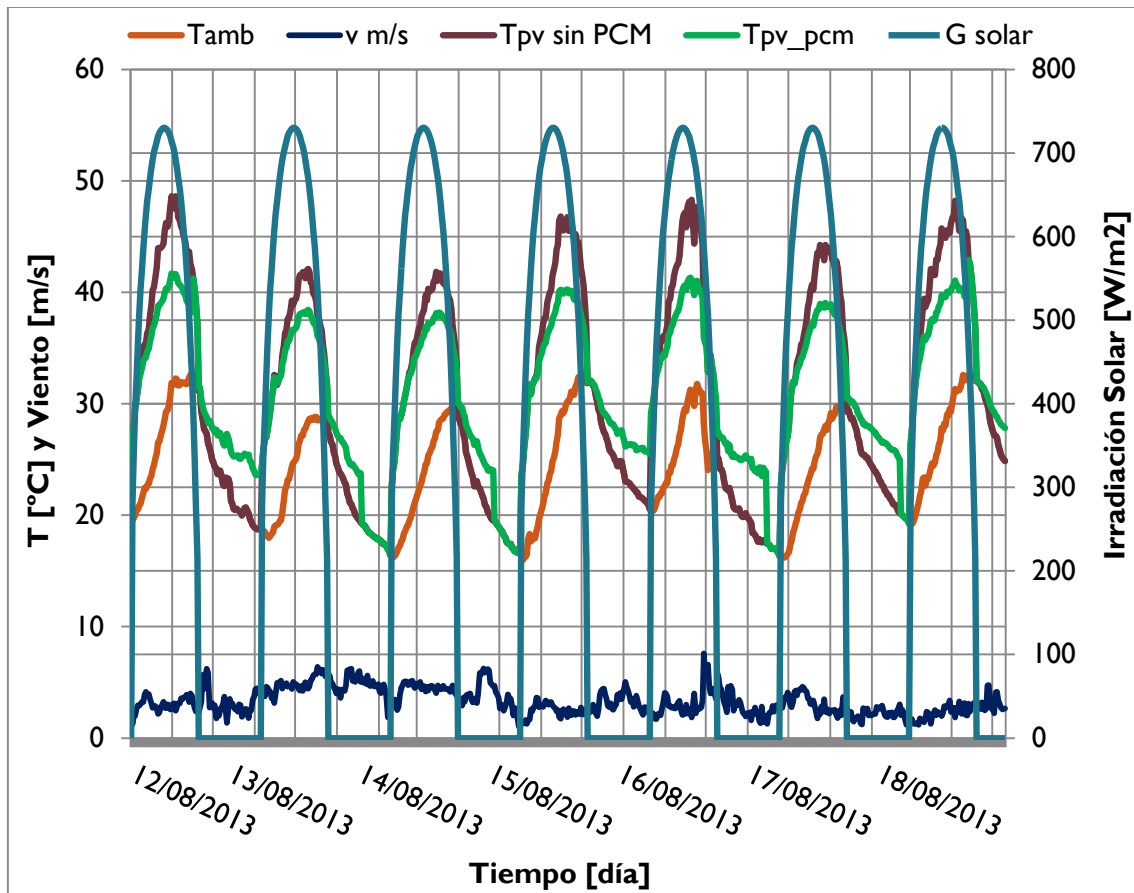
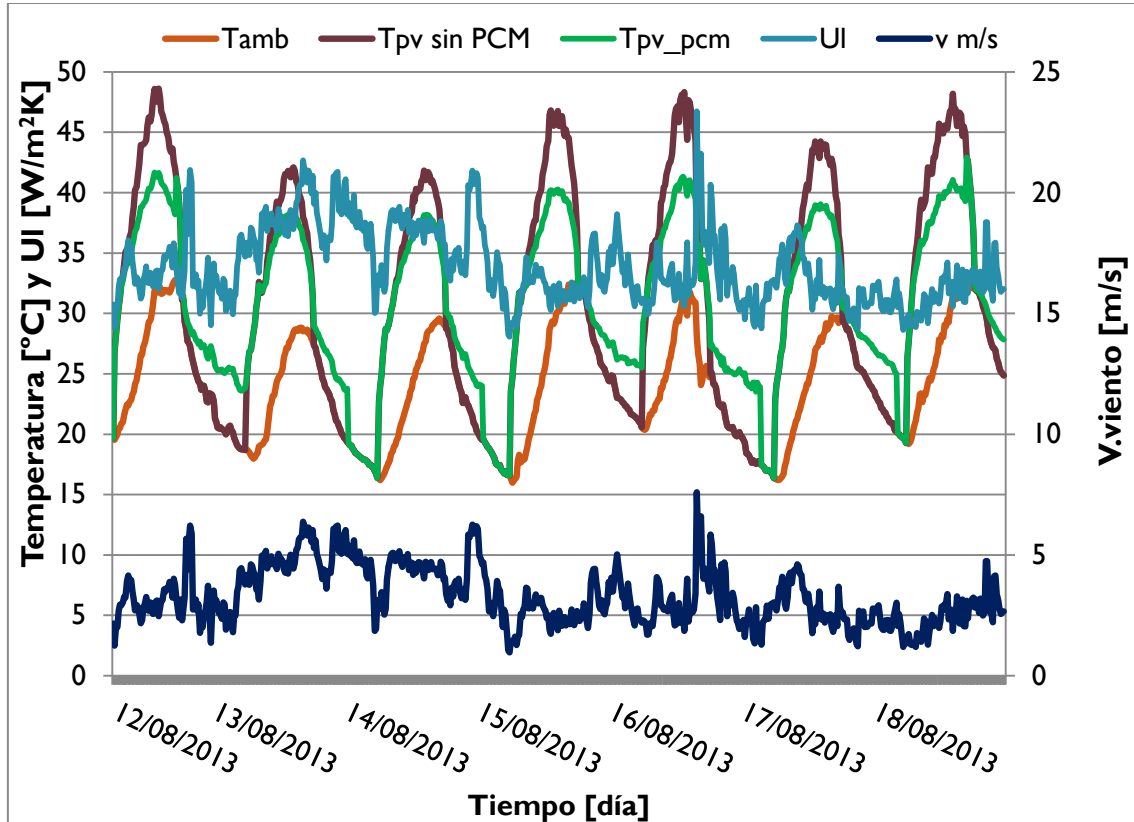


Figura 5-5. Comportamiento de Tpv con y sin PCM, Tamb [°C], G [W/m²] y v [m/s] durante una semana de Agosto en Zaragoza

La [Figura 5-6](#) resalta la relación entre la velocidad del viento y el coeficiente global de pérdidas de la placa. Según las ecuaciones de convección, cuanto mayor es  $v$ , mayor será el valor de  $U_L$ . De hecho, se aprecia cierta similitud en las curvas de estos dos parámetros. Sin embargo, la dependencia no sigue siempre la misma proporción. Esto es debido a que su valor se despeja de la [Ecuación 4-1](#), tras haber calculado  $T_{pv}$  de la [Ecuación 4-2](#), que es experimental; por tanto, el efecto incluye las pérdidas adicionales de conducción y radiación.



**Figura 5-6.** Comportamiento de  $T_{pv}$  con y sin PCM,  $T_{amb}$  [°C],  $U_I$  [W/m<sup>2</sup>\*K] y  $v$  [m/s] durante una semana de Agosto en Zaragoza

También cabe destacar la influencia de  $U_L$  y, por consiguiente, de  $v$  sobre  $T_{pv\backslash pcm}$ . Se aprecia cuando  $T_{pv\backslash pcm}$  se mantiene por encima de  $T_{pv}$ , a causa de la disipación del  $Q_{lat}$  acumulado, la pendiente de bajada es diferente a lo largo de cada día de la semana. El segundo y tercer día tienen más inclinación porque la velocidad media del viento durante esos días es mayor, ayudando a la ventilación por convección.

Siguiendo el anterior razonamiento, es interesante analizar las diferencias entre el quinto y sexto día. A pesar de que  $Q_{acu}$  en el quinto día es considerablemente más elevado que durante el sexto (ver posterior [Figura 5-7](#)),  $T_{pv\backslash pcm}$  sigue la trayectoria de  $T_{amb}$  antes, es decir,  $Q_{acu}$  se disipa en menos tiempo. Esto se explica porque la velocidad media del viento, y consecuentemente  $U_L$ , es significativamente mayor que en el sexto día.

La [Figura 5-7](#) es la representación de  $Q_{acu}$ , como sumatorio de  $Q_{lat}$  a cada intervalo temporal, y de  $T_{pv\backslash pcm}$ . Se aprecia que no todos los días se acumula la misma cantidad de calor latente. Como muestra la [Ecuación 4-4](#), los días en que la diferencia de temperaturas  $T_{pv} - T_{fusion}$  sea mayor, se acumulará más  $Q_{lat}$ . En estas ocasiones en

que  $Q_{acu}$  es tan elevado, no hay tiempo de disiparlo por completo antes de que empiece el siguiente día (ver que  $Q_{acu}$  no llega a 0 tras el primer y el cuarto día). Cuando  $Q_{acu}$  es menor,  $T_{pv\backslash pcm}$  sigue el comportamiento de  $T_{pv}$  una vez se ha disipado todo el calor, como ocurre en el resto de los días. Además en estos casos, la velocidad del viento es alta, con lo que ayuda a que este proceso de disipación sea más rápido.

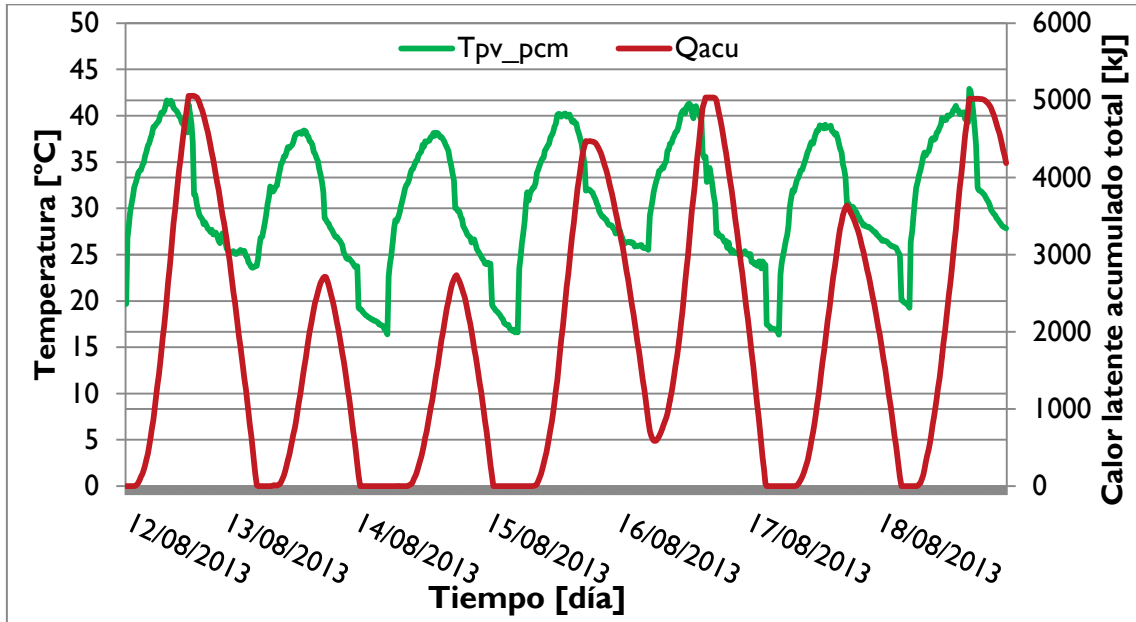


Figura 5-7. Comportamiento de  $T_{pv\backslash pcm}$  [°C] y  $Q_{acu}$  [kJ/día] durante una semana de Agosto en Zaragoza.

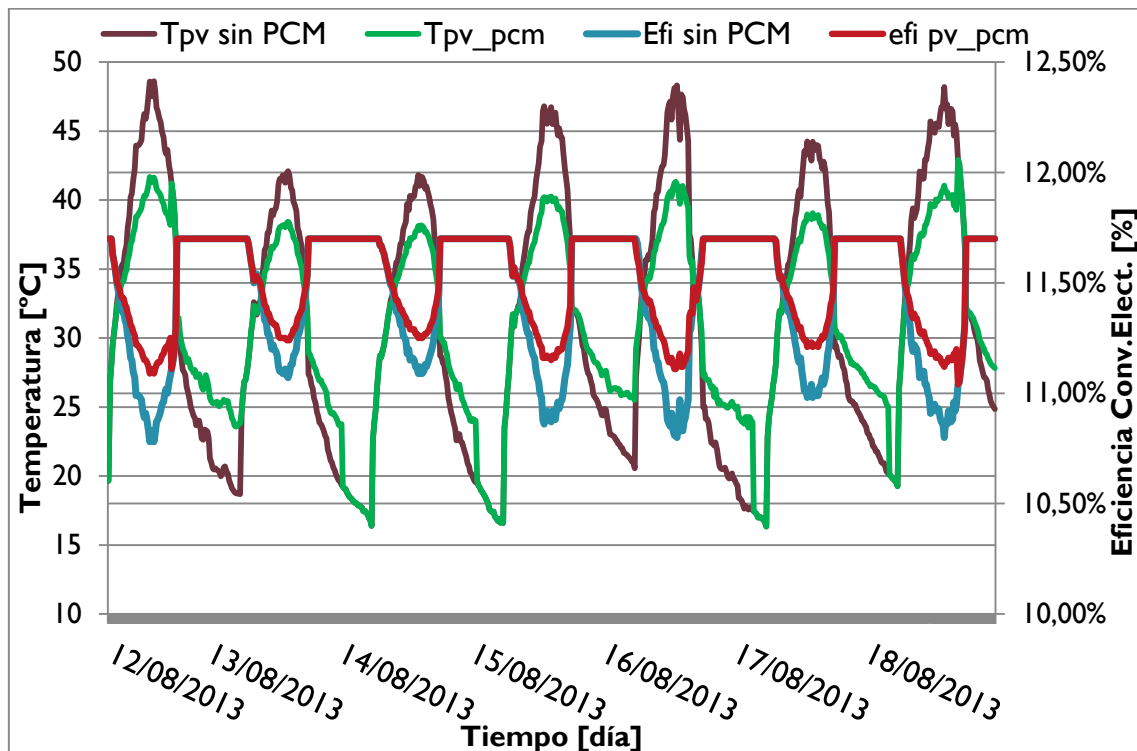
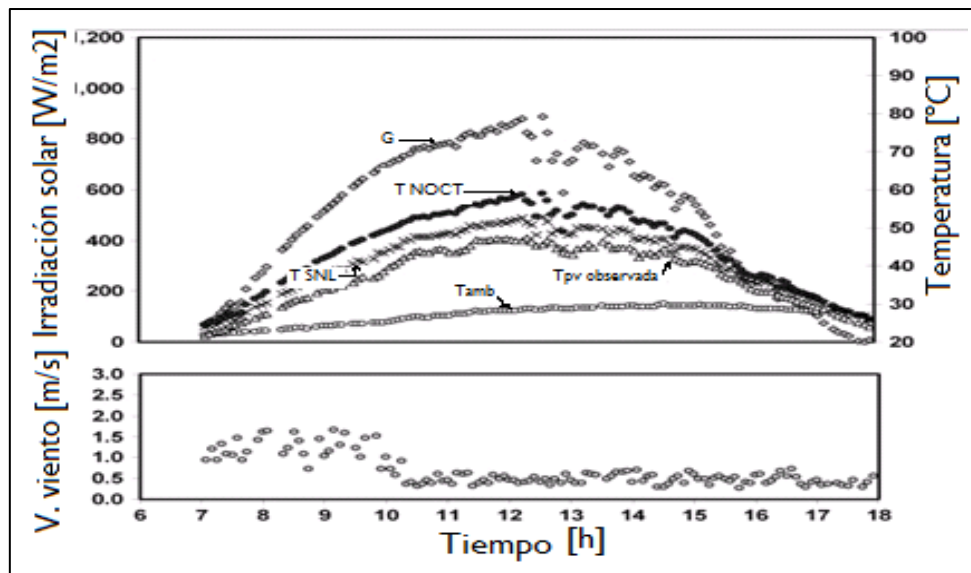


Figura 5-8. Comportamiento de  $T_{pv}$  con y sin PCM [°C],  $\eta_{pv}$  con y sin PCM [%] durante una semana de Agosto en Zaragoza.

Por último, con la *Figura 5-8*, se representa la relación entre temperatura de operación y eficiencia de conversión eléctrica. Como ya se explicó en el apartado anterior *Placas Solares Fotovoltaicas* y la *Ecuación 3-2*, un aumento de  $T_{pv}$  o  $T_{pv\backslash pcm}$  es perjudicial para  $\eta_{pv}$  y  $\eta_{pv\backslash pcm}$ , respectivamente. En los momentos en que  $T_{pv\backslash pcm}$  es reducida por el efecto del PCM, la eficiencia del sistema BIPV/PCM (roja) ve mejorados sus valores, llegando hasta un 3% respecto al caso de referencia sin PCM (azul).

#### ► Comparación del comportamiento de operación

En este caso, distintos artículos han servido de referencia para comprobar que las soluciones son lógicas y se encuentran en rangos razonables. Primeramente, la *Ecuación 4-2* utilizada para el desarrollo de este proyecto pertenece al artículo de *Trinuruk, Sorapipatana, y Chenvidhya (2009)*, donde se encuentran gráficas que simulan  $T_{pv}$ , *Figura 5-9*. Durante el invierno en Bangkok (Diciembre-Marzo) comprenden el rango de 20 a 32°C, que asemejándolo a la localidad de Zaragoza corresponden aproximadamente a los meses de Mayo a Julio. Por un lado, en Bangkok, los resultados obtenidos según el modelo SNL, la PV alcanza  $T_{pv}$  máximas de hasta 53°C, mientras que las máximas, obtenidas en el *Figura 5-1. Tpv anuales SIN PCM en Zaragoza* varían de 44 a 47°C. El hecho de que sean superiores se debe a que la irradiación máxima en la Tailandia (900 W/m<sup>2</sup>) es mayor que en Zaragoza (800 W/m<sup>2</sup>) y la velocidad del viento menor.



**Figura 5-9.** Comportamiento de  $T_{pv}$  [°C] observada, basadas en modelo NOCT y en modelo SNL, v [m/s] y G [W/m<sup>2</sup>] a lo largo del día [h] (Trinuruk, Sorapipatana, y Chenvidhya, 2009)

Otros estudios experimentales realizados en el verano de 2010 en Palermo dan muestra de que los resultados de  $T_{pv}$  coinciden con los obtenidos en el cálculo, entre 20 y 50°C, (*Ciulla y col., 2012; Lo Brano y col., 2013*). Los propios autores califican de satisfactoria la disminución de temperatura una vez incluida en el sistema PV/PCM (parafina macroencapsulada). En las gráficas se puede apreciar una reducción, antes de llegar a la capacidad de almacenamiento máximo del PCM, de 3-4°C.

Adicionalmente, *Ho y col. (2013)* resumió en su artículo el comportamiento de variables de operación de BIPV ubicadas en Taiwán con una capa de materiales de cambio de fase microencapsulados (MEPCM, del inglés Micro-Encapsulated Phase Change Materials), cuya  $T_{fusión}$  ronda los 30°C. Los datos climatológicos de temperatura ambiental e irradiación solar vuelven a ser similares a las condiciones

climáticas de Zaragoza durante los meses de verano ( $T_{amb} = 20 - 32^{\circ}\text{C}$  y  $G_{max} = 750 \text{ W/m}^2$ ), como se aprecia en la *Figura 5-10*. Los valores correspondientes a la diferencia ( $\Delta T_{pv} = T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$ ) alcanzan un máximo de  $7^{\circ}\text{C}$ , cuando la máxima en Julio en Zaragoza fue de  $7.49^{\circ}\text{C}$ . Además, el valor medio de esta diferencia de temperaturas es parecido en ambos casos, alrededor de los  $4^{\circ}\text{C}$ .

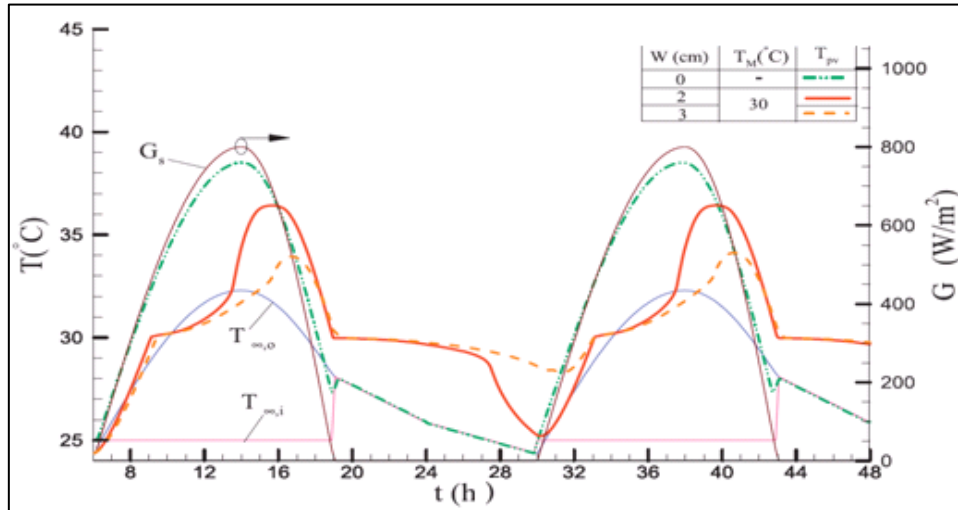


Figura 5-10. Comportamiento de  $T_{pv\backslash pcm}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_{pv}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] y  $G$  [ $\text{W/m}^2$ ] a lo largo 2 días y variando el espesor de la placa de PCM ( $W$  [ $\text{cm}$ ]). (Ho y col., 2013)

Por último, señalar los favorables resultados en el sistema PV/PCM de *Huang (2011)*, visibles en la *Figura 5-11*. En un período donde  $T_{pv}$  alcanzó valores de más de  $50^{\circ}\text{C}$ , se consiguió disminuir hasta alcanzar valores máximos de  $T_{pv\backslash pcm} = 30^{\circ}\text{C}$ , es decir una diferencia de hasta  $20^{\circ}\text{C}$ , dato que implicaría importantes mejoras en potencia, eficiencia, reducción en riesgos de degradación, etc. En el análisis de estos buenos resultados, hay que tener en cuenta que el sistema que presenta es uno de los más avanzados y con parámetros críticos optimizados, tanto como a nivel de selección del PCM, su punto de fusión, la estructura mallada del contenedor metálico y espesor.

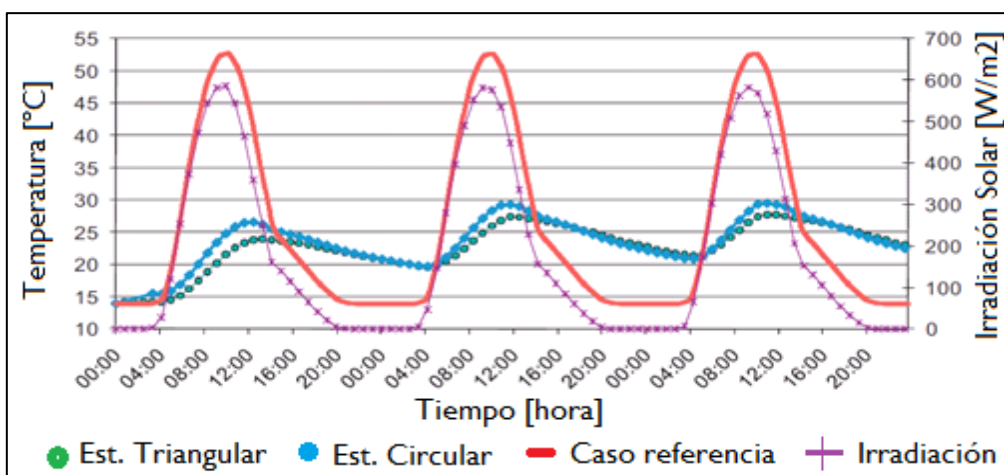


Figura 5-11. Comportamiento de  $T_{pv\backslash pcm}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_{pv}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] y  $G$  [ $\text{W/m}^2$ ] a lo largo 3 días. (Huang, 2011)

Queda comprobado así que los resultados son consistentes, ya que las tendencias descritas anteriormente coinciden con las obtenidas en el proceso de *Operación de BIPV sin PCM* y *Operación de BIPV con PCM*.



► **Análisis de los parámetros críticos de diseño**

A continuación, se procede a un análisis sobre la influencia de los parámetros críticos de diseño relativos al uso de PCM en BIPV. Los elegidos son el espesor ( $x$ ) de la capa de PCM, la  $T_{fusion}$  y los porcentajes de composición en masa ( $w$ ) del o de los PCM seleccionados. Tras realizar este análisis, se proponen los valores que mejor responden para esta SC. Se han realizado los cálculos correspondientes a todas las combinaciones posibles al variar los parámetros críticos de diseño aquí mencionados:

- Severidad Climática: Zaragoza
- Variables relativas a la elección de PCM en *Tabla 5-3*:
  - PCM1= Sal hidratada  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
  - PCM2= Sal hidratada  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$

**Tabla 5-3. 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 <math>T_{fusion} = 32^{\circ}C</math></li> <li>• PCM2 con <math>T_{fusion} = 40^{\circ}C</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>x = 1cm</math></li> <li>• <math>x = 1.5cm</math></li> <li>• <math>x = 2cm</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100% PCM1</li> <li>• 100% PCM2</li> <li>• 50% PCM1 + 50% PCM2</li> </ul>

El código del programa utilizado se puede encontrar en el *Anexo D Programa EES cálculo con PCM de distintos parámetros críticos*. A partir de él, se han generado tablas y gráficas para cada mes del año de la ciudad de Zaragoza con las principales variables del sistema BIPV/PCM (*Anexo D Gráficos mensuales de Zaragoza para análisis de parámetros críticos, Figura D-1*). El procedimiento a seguir es introducir las propiedades termofísicas del PCM elegido, según sea el porcentaje de  $w$  pertinente en cada uno de los tres casos. Se calculan tanto  $T_{pv\backslash pcm}$  como  $\eta_{pv/pcm}$  a partir de la *Ecuación 4-3* y *Ecuación 4-1*, respectivamente. El mismo cálculo se realizará para los tres valores distintos de espesor de la capa de PCM,  $x$ . Las gráficas se pueden encontrar en el *Anexo D Gráficas comparativas de  $T_{pv}$  y  $T_{pv\backslash pcm}$ : alternativas Zaragoza según  $x$ , Figura D-2*. Hay que tener en cuenta que aquellos meses en los que no se alcancen  $T_{pv}$  mayores que  $T_{fusion}$ , no será necesario el cálculo dado que la influencia del PCM será nula,  $T_{pv\backslash pcm}$  y  $\eta_{pv/pcm}$  mantendrán por tanto los mismos valores que los obtenidos en *Operación de BIPV sin PCM*.

Las siguientes figuras representan la evolución de la regulación de  $T_{pv\backslash pcm}$  respecto  $T_{pv}$  sin PCM durante las horas de luz de un día tipo del mes de Agosto, fijando la composición en masa  $w$  y variando el espesor  $x$ .



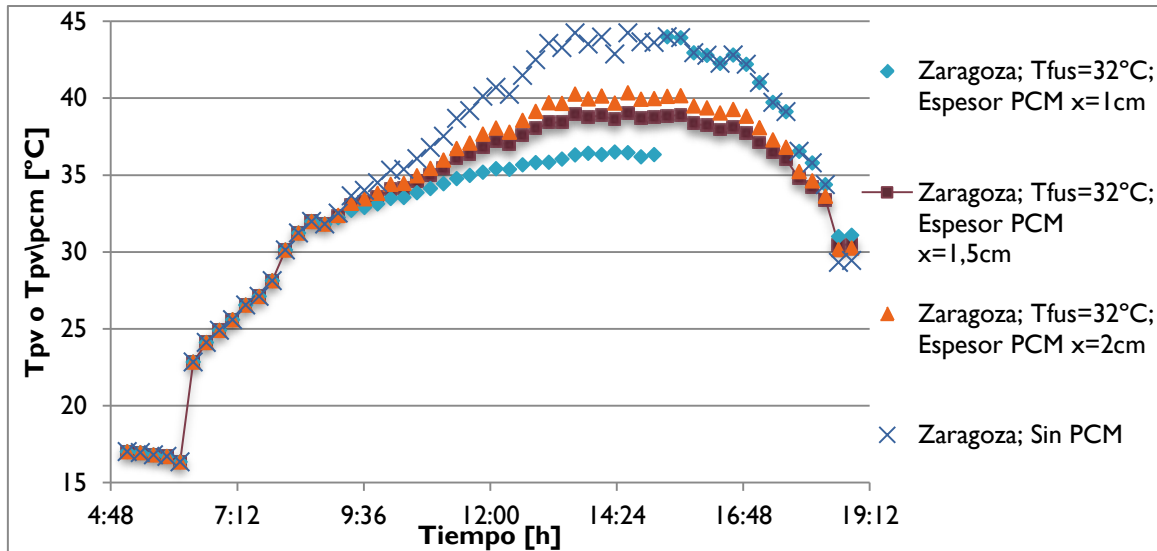


Figura 5-12. Temperaturas con y sin PCM para Agosto en Zaragoza. 100% PCMI con  $T_{fusión} = 32^{\circ}\text{C}$

En este caso, *Figura 5-12*, se observa que los espesores de 1.5 y 2cm trabajan bien durante todas las horas de luz, reduciendo la temperatura. Por el contrario, 1cm sería insuficiente para regular la temperatura a lo largo de todo el día, ya que llega un punto de saturación en el que no se puede acumular más calor latente, la fase del PCM es totalmente líquida, y  $T_{pv\backslash pcm}$  sigue el mismo comportamiento que  $T_{pv}$ .

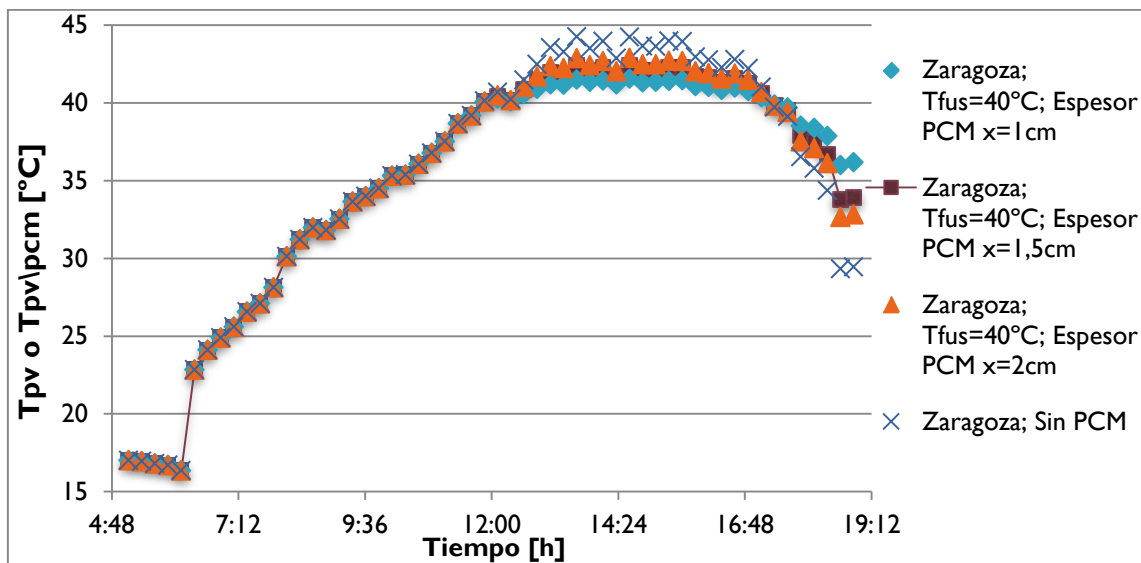


Figura 5-13. Temperaturas con y sin PCM para Agosto en Zaragoza. 100% PCM2 con  $T_{fusión} = 40^{\circ}\text{C}$

Para  $T_{fusión} = 40^{\circ}\text{C}$ , *Figura 5-13*, los tres espesores considerados controlan  $T_{pv\backslash pcm}$  sin que  $Q_{acu}$  llegue a superar a  $Q_{total}$ . Sin embargo, el diferencial de temperatura es reducido,  $(T_{pv} - T_{pv\backslash pcm})$  no supera los  $2^{\circ}\text{C}$ .

En esta última *Figura 5-14*, es interesante ver cómo en el momento en que  $T_{pv}$  supera la  $T_{fusión}$  de ambos PCM, antes de llegar al máximo de la capacidad calorífica del de menor  $T_{fusión}$ , la regulación  $(T_{pv} - T_{pv\backslash pcm})$  que se consigue con la incorporación de la mezcla de dos PCM alcanza el valor máximo ( $\Delta T_{pv} = 43.55 - 33.47 = 10.08^{\circ}\text{C}$ ), debido a que ambos acumulan calor a la vez, y  $\Delta T_{pv}$  se incrementa favorablemente.

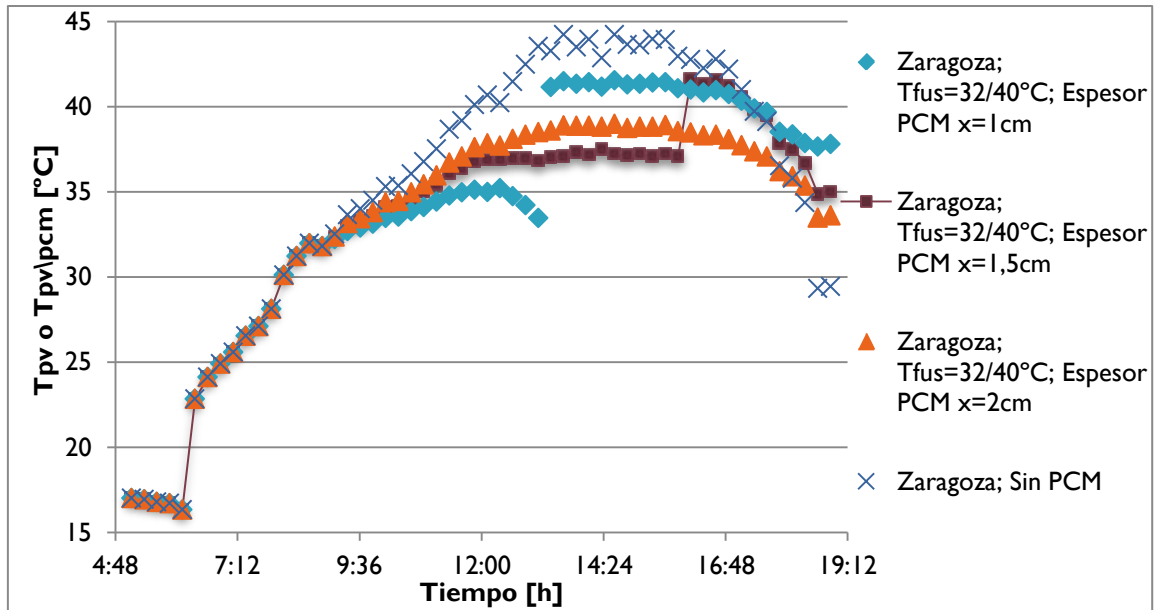


Figura 5-14. Temperaturas con y sin PCM para Agosto en Zaragoza. 50% PCM1 + 50%PCM2

En conclusión, no todas las combinaciones de parámetros críticos de diseño muestran una buena regulación de temperatura. Y entre las que sí lo hacen, hay notables diferencias en la magnitud de ese control. Es conveniente tener en cuenta factores como el número de meses en los que el sistema BIPV/PCM tiene influencia y la amplitud del rango de diferencia  $T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$ . A continuación, se presentan las combinaciones para que la incorporación de un PCM a la BIPV mantuviese su efecto durante todas las horas de luz, es decir, que el calor acumulado por el PCM no sobrepase rápidamente su capacidad de almacenamiento ( $Q_{acu} < Q_{total}$ ).

- 100% PCM1 con  $T_{fusion} = 32^{\circ}\text{C}$  de Mayo a Octubre. Espesores  $x = 1.5$  y  $2\text{ cm}$
- 100% PCM2 con  $T_{fusion} = 40^{\circ}\text{C}$  de Junio a Agosto. Espesor  $x = 1\text{ cm}$
- 50% PCM1 + 50% PCM2 de Mayo a Octubre. Espesor  $x = 2\text{ cm}$

Incluir únicamente 100% PCM2 con  $T_{fusion} = 40^{\circ}\text{C}$  logra reducir la temperatura durante los 3 meses de verano, que es donde se alcanzan los valores más altos para  $T_{pv}$ , incluso con  $1\text{ cm}$  de espesor. Por el contrario, la diferencia de  $T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$  es menor que en los otros casos, pues no supera los  $3^{\circ}\text{C}$  en el mejor de los casos. Por otra parte, se evalúa el comportamiento según espesores para 100% PCM1 con  $T_{fusion} = 32^{\circ}\text{C}$ . Exceptuando el caso de  $x = 1\text{ cm}$ , para los otros dos espesores se observa una buena regulación de la temperatura, en la que cabe destacar que a mayor espesor menor será la amplitud del rango de diferencia de temperaturas, por la ley de conducción de calor [Ecuación 4-4](#), ya que la relación es inversamente proporcional a  $x$ .

En las sucesivas figuras ([Figura 5-15](#), [Figura 5-16](#) y [Figura 5-17](#)) han sido representados los 3 meses con temperaturas más intensas, y que requerirían la máxima regulación de  $T_{pv}$ , para los casos en que los parámetros muestran los mejores comportamientos:

- 100% PCM1 con  $T_{fusion} = 32^{\circ}\text{C}$ . Espesor  $x = 1.5\text{ cm}$
- 50% PCM1 + 50% PCM2 con  $T_{fusion} = 32$  y  $40^{\circ}\text{C}$ . Espesor  $x = 2\text{ cm}$

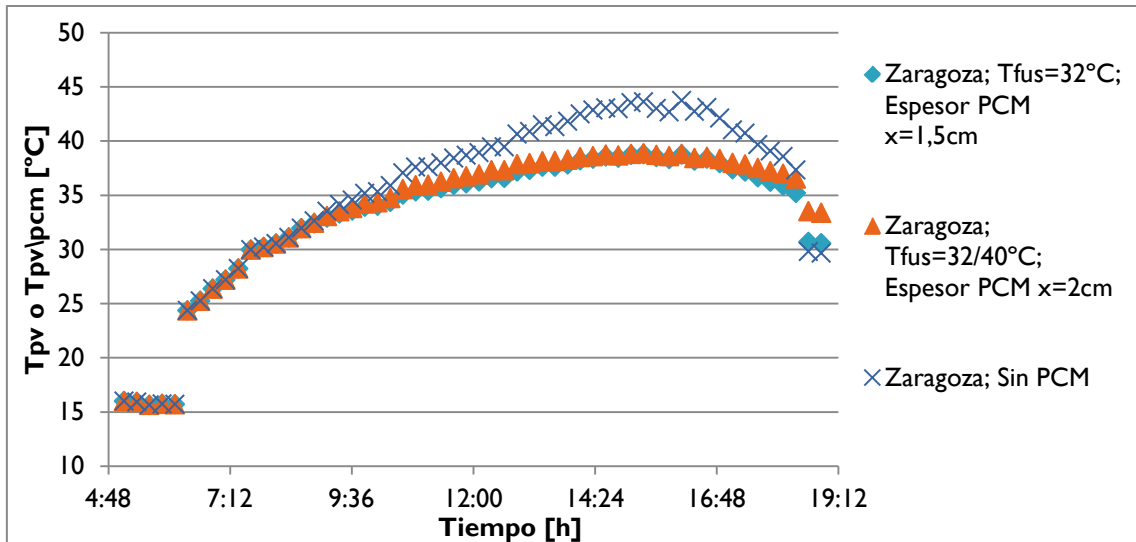


Figura 5-15. Comparación de temperaturas con y sin PCM para un día tipo de Junio en Zaragoza

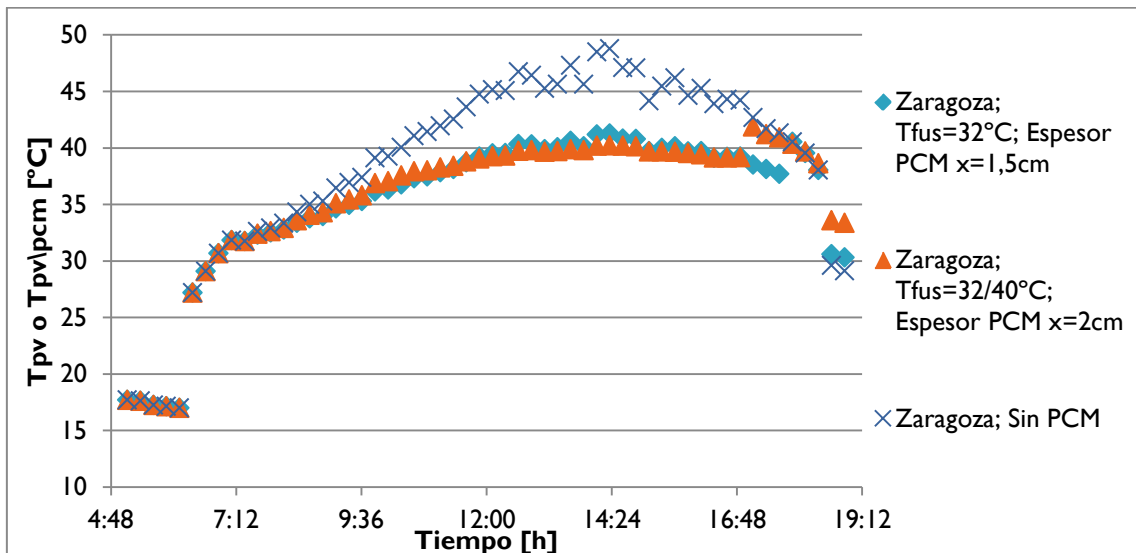


Figura 5-16. Comparación de temperaturas con y sin PCM para un día tipo de Julio en Zaragoza

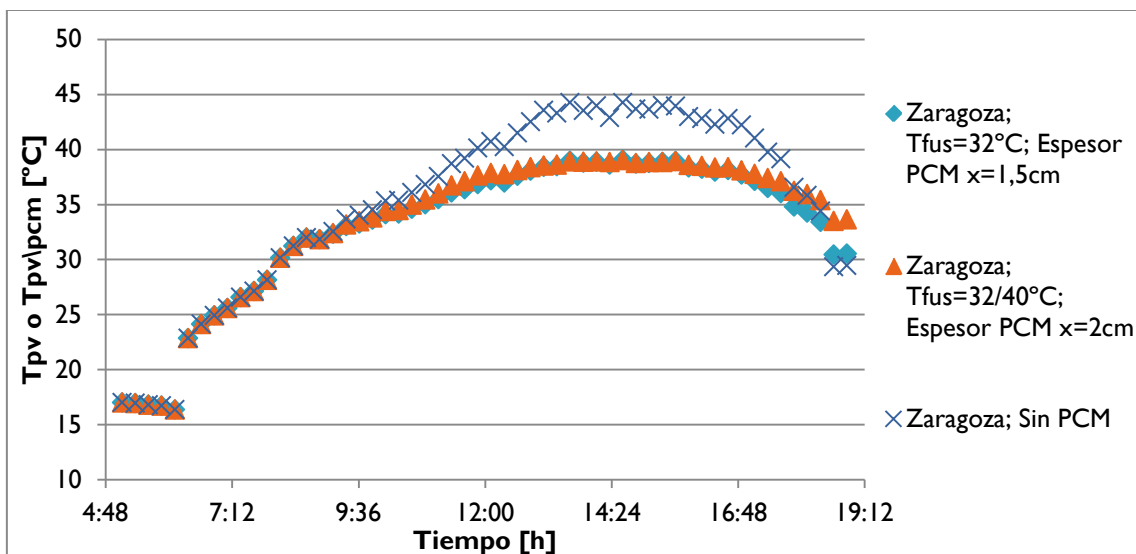


Figura 5-17. Comparación de temperaturas con y sin PCM para un día tipo de Agosto en Zaragoza

Se puede apreciar que la sal Glauber (PCM1) con  $x=1.5\text{cm}$  mejora sensiblemente las prestaciones, superando los valores obtenidos con la mezcla durante todos los meses en los que actúa, tanto en temperatura como en eficiencia ( $\eta$  es similar pues depende estrechamente de la  $T_{pv}$ , según la [Ecuación 3-2](#)). Además, es más sencillo utilizar un solo compuesto PCM en vez de la combinación de dos. La cantidad de masa de PCM a utilizar (considerando  $A=1\text{m}^2$ ), en el caso de la mezcla al 50% y 2cm de espesor, es  $m_{PCM}=29.45\text{kg}$ ; mientras que para el PCM1 con 1.5 cm de espesor  $m_{PCM}$  sería un tercio menor (19.95kg), que consecuentemente reduciría peso, volumen del contenedor ( $Vol$ ) y coste económico.

### Viabilidad en SC distintas

Esta parte hace referencia a la viabilidad del sistema BIPV/PCM en SC distintas. Además, se analizarán las similitudes y diferencias de los comportamientos de las variables más destacables.

Tras analizar el comportamiento de variables en Zaragoza, se ha realizado la misma sucesión de pasos y proceso de cálculos para una nueva localidad. En este caso la ciudad elegida ha sido Sevilla (coordenadas en [Anexo D Datos geográficos y climatológicos de nueva SC: Sevilla](#)), principalmente por su potencial fotovoltaico y porque se trata SC correspondiente a un B4, distinta a Zaragoza (D3), con inviernos más suaves y veranos muy cálidos y secos. Como la disponibilidad de variables climatológicas es más difícil, en esta ocasión se trabaja con medias mensuales tomadas durante 10 años y una velocidad del viento igual a 1m/s. Esto permitirá observar la influencia que tiene el viento, modificando  $U_L$ , sobre  $T_{pv}$ . Mientras que en Zaragoza variaba en un amplio y cambiante rango (27-54  $\text{W/m}^2\text{K}$ ), en Sevilla al considerar  $v=1\text{m/s}$  se mantiene constante entre 28 y 29  $\text{W/m}^2\text{K}$  a lo largo de todo el año.

En el [Anexo D Gráficas de temperatura y eficiencia para nueva SC: Sevilla](#) se presentan las  $T_{pv}$  y  $\eta$  anuales para Sevilla ([Figura D-4](#) y [Figura D-5](#)). 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  $\eta_{pv}$  de 10.51%. A pesar de que la temperatura ambiente es similar, son valores más altos que en Zaragoza, principalmente porque la irradiación 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, se encuentran en el intervalo de 25 a  $30^\circ\text{C}$ .

Los PCM serán los mismos que para Zaragoza con las combinaciones de parámetros críticos presentes en la [Tabla 5-3](#). La [Figura 5-18](#) muestra las tres opciones que mejor regulan la temperatura durante el mes de Julio. 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  $T_{pv\backslash pcm}$ , aún regulado con una reducción de  $7^\circ\text{C}$ , 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. En el [Anexo D Viabilidad en SC distintas](#) se pueden encontrar las gráficas desde Junio a Septiembre ([Figura D-6](#)).

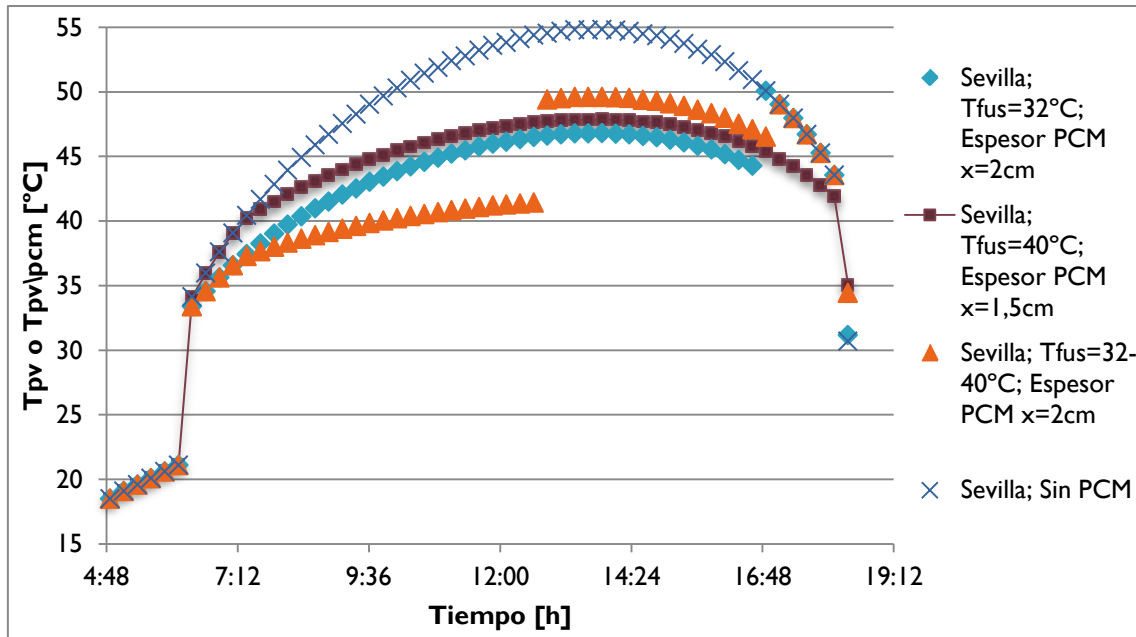


Figura 5-18. Comparación de temperaturas de las mejores combinaciones de parámetros críticos para el mes de Julio en Sevilla

Se han realizado los cálculos presentes en *Operación de BIPV con PCM* para Sevilla, y se aprecian notorias diferencias con la SC de Zaragoza. En la *Figura 5-19*, representa las temperaturas con y sin PCM (100% sal Glauber,  $T_{fusión}=32^{\circ}\text{C}$  y  $x=1.5\text{cm}$ ) para el mes de Agosto en ambas localidades. Anteriormente, se ha indicado que para Zaragoza muestra buena regulación de  $T_{pv}$ . Sin embargo, se aprecia que para el caso de Sevilla no trabaja de la misma manera (línea azul). A pesar de conseguir una mayor diferencia  $T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$ , hasta  $10^{\circ}\text{C}$  al mediodía (en Zaragoza era  $7.5^{\circ}\text{C}$ ), el PCM alcanzaría su máxima capacidad de almacenamiento en Sevilla y volvería a aumentar  $T_{pv}$  hasta temperaturas ( $54^{\circ}\text{C}$ ) que podrían comprometer la vida útil de la placa si se mantuvieran de continuo.

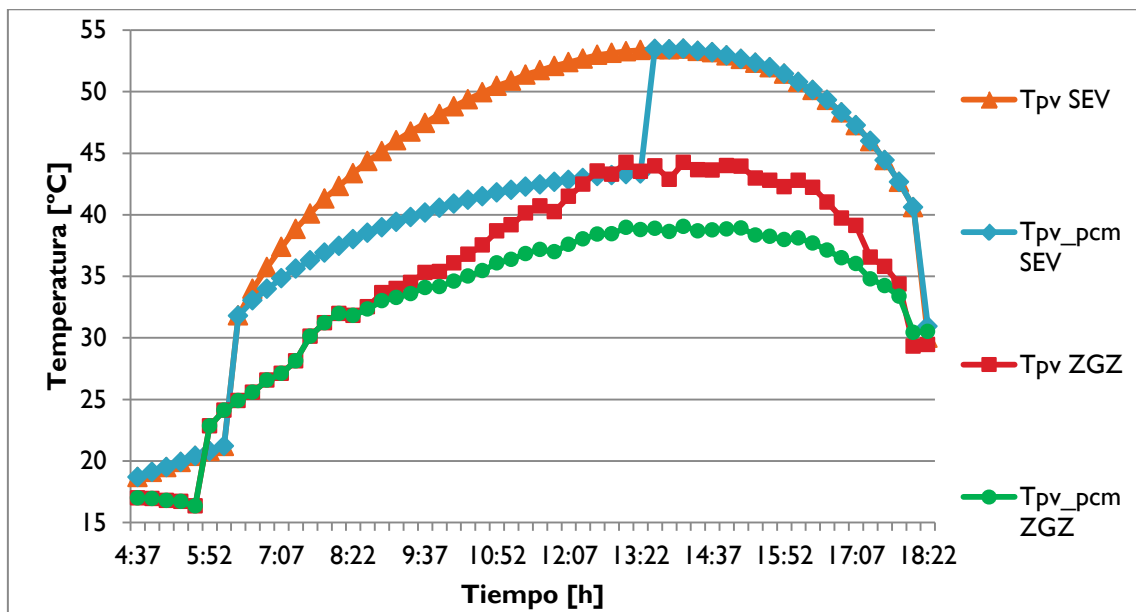


Figura 5-19. Comparación de temperaturas con y sin PCM para el mes de Agosto en las localidades de Sevilla y Zaragoza

En conclusión, las diferentes condiciones climatológicas generan altas temperaturas que obligan a una nueva selección a conciencia de los parámetros críticos para conseguir un correcto comportamiento, ya que aquellos que funcionan bien en una ubicación no tienen por qué ser suficientes al aplicarlos a otra. Para la viabilidad en diferentes SC se debe volver a seguir cada paso del proceso expuesto en la sección de *Caracterización del comportamiento de las variables de operación de BIPV con y sin PCM* con la intención de encontrar el diseño que optimice la regulación de  $T_{pv}$ .

## 6- IMPLICACIONES AMBIENTALES Y VIABILIDAD ECONÓMICA

### Tiempo de vida útil y degradación

Previamente, se ha demostrado que la inclusión de una capa de PCM a la BIPV, puede aumentar su rendimiento. En este apartado se enfoca la atención en la vida útil de los distintos elementos del sistema BIPV/PCM, así como en la influencia que tiene el PCM sobre la degradación y cómo ésta afecta a la vida útil de la placa.

En la revisión de la literatura, más extensa del *Anexo E Tiempo de vida útil y degradación*, se expone que el tiempo de vida útil de una PV que garantice el 80% de su potencia inicial es de unos 25 años (*Sharma y Chandel, 2013; Vázquez y Rey-Stolle, 2008*). Sin embargo, existen varios modos de degradación que surgen durante el período de operación de la PV, a destacar la corrosión y la decoloración (*Ndiaye y col., 2013*). 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*); por tanto, es de gran importancia el control y regulación de  $T_{pv}$ . En el siguiente estudio, *Sharma y Chandel (2013)* señalan la proporcionalidad inversa del tiempo de vida útil,  $t_L$ , con el ratio de degradación de la PV,  $R_D$ .

La fórmula de Arrhenius rige  $R_D$  por 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 6-1*, donde  $R$  es la constante de Boltzman,  $Ea$  es la energía de activación que se puede estimar en función del material, ya que depende de la cubierta de la PV, si es un polímero suele tomar valores a 1.1 eV (*Kurtz y col., 2009*).

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

#### Ecuación 6-1. Ecuación de Arrhenius para dos temperaturas para caracterizar la relación entre $R_D$

A continuación se realiza un análisis de sensibilidad de  $R_D$  en función de la reducción de  $T_{pv}$  que se consigue con la incorporación de PCM. Este diferencial no es constante a lo largo de los meses, ni siquiera a lo largo del mismo día. Por ejemplo, en Zaragoza, esta diferencia ( $T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$ ) varía de unos pocos grados hasta un máximo de 7-8°C en el mejor de los casos. Para analizar el comportamiento general, se toman tres valores dentro de ese rango: 1, 2.5 y 5°C. En el *Anexo E Tiempo de vida útil y degradación, Tabla E-1* están desarrollados los cálculos de la *Tabla 6-1*, basados en la *Ecuación 6-1*, para distintas temperaturas y  $Ea$ . La relación entre  $R_D$  será posteriormente utilizada tanto en el *Análisis económico* como en el *Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV*.

Tabla 6-1. Relación de  $R_D$  en función de  $T_{pv} - T_{pcm}$ , fijando  $Ea$  en 1.1eV (1 sin PCM, 2 con PCM)

$T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$ ( $T_1 - T_2$ )	R (k.Bolt) [eV/K]	$Ea$ [eV]	$R_{D2} / R_{D1}$	$t_{L2}/t_{L1}$
1	0,000086173	1,1	<b>0,88</b>	<b>1.13</b>
2.5	0,000086173	1,1	<b>0,72</b>	<b>1.39</b>
5	0,000086173	1,1	<b>0,52</b>	<b>1.92</b>

Como se observa, cuanto mayor sea la reducción de temperaturas que se consigue con la incorporación del PCM, el ratio entre  $R_D$  será menor. Por ejemplo, una PV operando a 5°C menos que otra vería consecuentemente prolongada su vida útil casi el doble de años.

Por último, el tiempo de vida de los PCM vendrá definido por la cantidad de ciclos térmicos que pueda mantener su estabilidad. Según el siguiente informe (IEA-ETSAP and IRENA, 2013), su vida útil es de 10 a 30 años o más dependiendo de las condiciones de temperatura y operación. Así pues, se supone 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

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 completo (desde su extracción hasta el fin su vida).

Se ha llevado a cabo un ACV completo siguiendo la estructura representada en el Anexo E Figura E-1, el cual está íntegramente disponible en el Anexo E Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV. El software utilizado para su desarrollo es SimaPro a partir del método RECIPE, que incluye varios indicadores de impacto ambiental como el agotamiento de los recursos, el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono, la toxicidad o el uso del suelo, etc. Sin embargo, al tratarse de un análisis simplificado se centrará la atención en el análisis del cambio climático, cuyo indicador es la huella de carbono – [kg CO<sub>2</sub> equivalente], relacionada con las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. La Tabla 6-2 presenta los resultados de la comparativa de la huella de carbono para los dos estados a evaluar: Estado 1: PV sin PCM y Estado 2: PV con PCM.

Tabla 6-2. Indicadores y porcentajes relativos de cambio climático [kg CO<sub>2</sub> equivalente] de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM

	$R_{D1}/R_{D2} = 0.88$		$R_{D1}/R_{D2} = 0.72$		$R_{D1}/R_{D2} = 0.52$	
	Estado 1	Estado 2	Estado 1	Estado 2	Estado 1	Estado 2
<b>kg CO<sub>2</sub> equivalente</b>	145.95	142.15	145.95	116.3	145.95	84
<b>Porcentaje relativo</b>	100%	97.4%	100%	79.7%	100%	57.5%

A la vista de los resultados del ACV completo (disponibles en Anexo E Tabla E-4) queda patente que el Estado 2 reduce o iguala en el peor de los casos, el impacto ambiental en todas las categorías consideradas. Cabe destacar que cuando la  $T_{pv}$  se reduce 5°C,  $R_{D1}/R_{D2} = 0.52$ , el sistema del Estado 2 (BIPV/PCM) supone una reducción de más del 50% respecto al Estado 1 (sin PCM) para todas las clases de impacto ambiental que evalúa el método RECIPE, ver gráfico en Anexo E Figura E-2.



En el último caso considerado, las emisiones son solo un 57.5% en relación al Estado 1. Disminuir un total de 64 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por m<sup>2</sup> de PV instalado, durante esos 25 años en los que operaría una PV convencional, podría suponer un gran potencial de beneficio ambiental, sobre todo si se considera el área total mundial que actualmente hay instalada y las tendencias previstas de aumentar esa extensión (como se expuso en la *Introducción*).

En conclusión, la reducción de impacto en las categorías ambientales analizadas, especialmente en la huella de carbono, queda patente para los tres casos considerados. Es más, el Estado 2 (con PCM), posee un  $R_D$  menor que en el caso sin PCM, consiguiendo alargar la vida de la PV unos años más. Por ejemplo, si una PV tiene una duración de 25 años operando, el sistema BIPV/PCM con  $R_{D1} / R_{D2} = 0.72$  tendrá un  $t_L$  de casi 35 años. La prolongación de  $t_L$  conlleva a una importante reducción en el consumo de recursos materiales y energéticos.

### Análisis económico

Los precios de los distintos elementos que compondrán el sistema BIPV\PCM, así como la electricidad se indican junto con sus referencias en el *Anexo E Precios*. Los datos de entrada (ingresos, gastos e inversión inicial), datos financieros y características de la BIPV considerados son los presentes en la *Tabla 6-3*.

Tabla 6-3. Datos de entrada, datos financieros y características de BIPV para el análisis económico

BIPV		DATOS FINANCIEROS	
<b>Ahorro energético</b>	227,78 kWh/m <sup>2</sup>	<i>Impuesto Sociedades</i>	24.3%
<b>Área BIPV</b>	4 m <sup>2</sup>	<i>IPC</i>	1.4%
<b>Potencia Pico instalada</b>	1 kW PV		
<b>Electricidad en 2013</b>	0,130485 €/kWh		
DATOS DE ENTRADA			
<b>Ingresos por ahorro energético (anual)</b>			475,55 €
<b>Inversión inicial:</b>	<i>Coste de PCM</i>		400,00 €
	<i>Coste de PV</i>		1.200,00 €
	<i>Coste contenedor Al</i>		48,00 €
	<i>Instalación PV</i>		2.000,00 €
<b>Gastos mantenimiento (anual)</b>			25,00 €

A continuación en la *Tabla 6-4*, se presentan los datos más representativos del análisis económico: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el tiempo de retorno (Payback), más detallados en el *Anexo E Tablas de VAN, TIR y Payback*.

Tabla 6-4. Datos económicos (VAN, TIR y Payback) del sistema con y sin PCM

	Inversión inicial	VAN	TIR	Payback	Vida útil
<b>PV sin PCM</b>	2000€	5770.1€	20.68%	3.78 años	25 años
<b>PV con PCM</b>					
<b>ΔT<sub>pv</sub>=-1°C</b>	2448€	6182.2€	17.42%	4.37 años	28 años
<b>ΔT<sub>pv</sub>=-2,5°C</b>	2448€	7843.2€	17.47%	3.94 años	35 años
<b>ΔT<sub>pv</sub>=-5°C</b>	2448€	11006.9€	17.48%	3.07 años	48 años

Estos datos de salida permiten comparar los cuatro escenarios considerados. El VAN obtenido por el 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, los TIR se reducen hasta el 17.42%, debido a que la inversión inicial asciende en 448€. Los valores del VAN aumentan conforme mayor es la reducción de temperatura: el beneficio cuando  $\Delta T_{pv} = 5^{\circ}\text{C}$  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 de 3.07 años). A su favor cabe decir que, si se consideran en relación al total de la vida útil de las placas, 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; sin PCM es un 15%), gracias a la positiva influencia que el PCM tiene en la prolongación de  $t_L$ .

## 7- CONCLUSIONES

Actualmente, la aplicación de PCM en BIPV es una línea reciente de trabajo que impulsa el sector fotovoltaico en distintas áreas de estudio: innovación de materiales, alternativas de diseño, aumento de eficiencia energética, eficiencia en consumo de recursos naturales y reducción de la ocupación.

Entre los resultados obtenidos, se muestra un total de 280 PCM (incluyendo orgánicos, inorgánicos y eutécticos) con una  $T_{fusion}$  entre -3 y 200°C. No obstante, para la aplicación de estos materiales en BIPV se debe considerar el rango de temperatura de operación como principal variable para la discriminación, la cual depende estrechamente de la SC de la región.

El comportamiento obtenido de distintas variables de operación (temperatura y eficiencia, principalmente) de un sistema BIPV con y sin PCM, considerando dos ciudades pertenecientes a distintas SC, muestran cómo las condiciones climatológicas afectan a las mismas y deben ser tomadas en cuenta para la correcta selección de los PCM. Por ejemplo, en Sevilla los valores máximos de  $T_{pv}$  alcanzados fueron más elevados que en Zaragoza (55°C frente a 47°C), en los casos estudiados sin la incorporación de PCM.

Por otro lado, se observó que la regulación y el control de  $T_{pv}$  ayudó a conseguir mayor eficiencia ( $\eta_{pv\backslash pcm}$  en Zaragoza se vio mejorada hasta casi un 3% respecto al sistema sin PCM). Además, se verificó la influencia de la velocidad del viento (mayor  $v$ , mayor  $U_L$ ) en la temperatura operación de las BIPV considerando a Zaragoza como caso de estudio. Al aumentar la disipación de calor por convección origina un favorable descenso de  $T_{pv}$ .

El análisis de los parámetros críticos del diseño ( $T_{fusion}$ ,  $x$  y  $w$ ) mostró que a mayor  $x$ , mayor es  $m_{PCM}$ ; lo que implica un aumento de la capacidad de almacenamiento máximo,  $Q_{total}$ . Una mayor extensión de  $A$ , genera más  $P$  y transfiere más calor al PCM. Con lo cual, se deben elegir adecuadamente los parámetros para evitar que  $Q_{acu}$  sobrepase el máximo.

La selección de PCM juega un rol importante dadas sus variadas propiedades termofísicas. Para las 3 distintas calculadas en Zaragoza (40, 32 y mezcla de 32\40°C),  $T_{pv\backslash pcm}$  se redujo hasta 3, 7.5 y 10°C, respectivamente.

Las combinaciones de parámetros de diseño, las características de la BIPV y la elección del PCM adecuado son decisivos para la optimización del funcionamiento de la BIPV, y dependen de la SC en la que se localice. Como ejemplo,  $T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$  para un mismo diseño y mismo PCM (100% sal Glauber,  $T_{fusión}=32°C$  y  $x=1.5cm$ ) fue de hasta 10°C en Sevilla y de 7.5°C en Zaragoza.

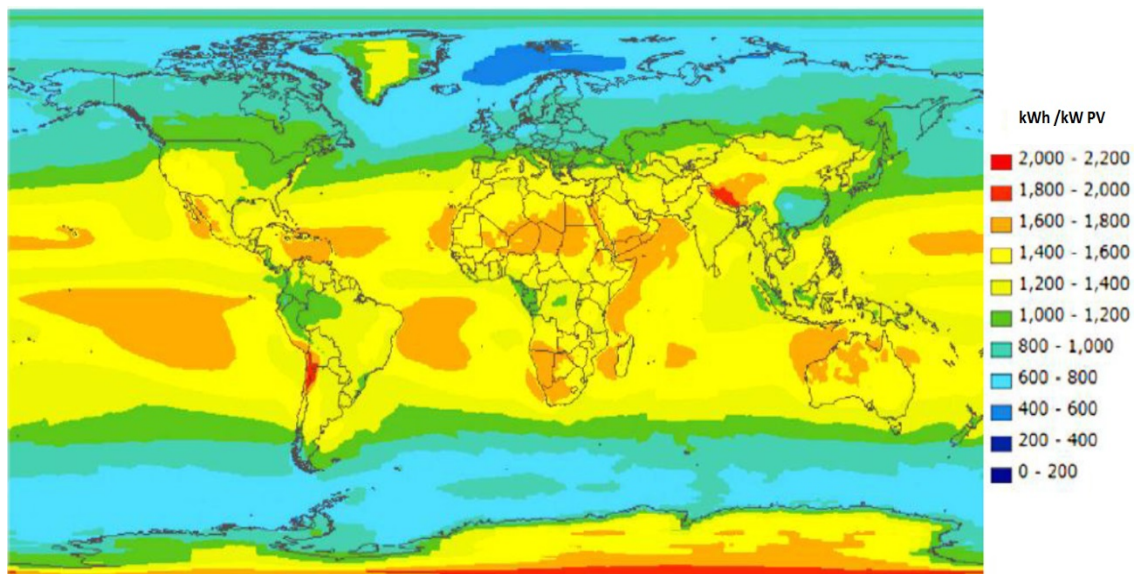
La disminución de  $T_{pv\backslash pcm}$  debida a la influencia del PCM evita la generación de puntos calientes y reduce la degradación prematura. Esto último tiene un importante papel en el ACV, ya que la prolongación de  $t_L$  (entre 28 y 48 años) conlleva a una significativa reducción en el consumo de recursos materiales y energéticos; así como la disminución de la huella de carbono (-64kgCO<sub>2</sub> equivalente/m<sup>2</sup> de PV instalado para  $\Delta T_{pv}=5°C$ ).

En cuanto al análisis económico, los VAN de todos los escenarios son positivos. El mayor TIR corresponde al sistema sin PCM (20.68%), situándose el resto en torno a un considerable 17.4%. En todos ellos, el tiempo de retorno gira en torno a 4 años, exceptuando el último escenario con PCM que lo mejora (3 años). Estos datos corroboran la viabilidad económica del proyecto, y la influencia en términos económicos de la incorporación del PCM.

## 8- FUTURAS PERSPECTIVAS

A pesar de los avances e investigaciones en los campos de PCM y BIPV, aún queda camino por recorrer. Se debe seguir buscando cómo aumentar tanto la conductividad térmica de los PCM como la eficiencia de las PV. Otra sección por explorar es la de los PCM eutécticos, ya que amplían el rango de  $T_{fusion}$  y la combinación de las propiedades. Por otro lado, la actual literatura de encapsulación de PCM es limitada aún, muchos parámetros pueden quedar bajo estudio (material, capas, tamaño, geometría). Otro paso adelante se conseguirá cuando los últimos estudios pasen de ser “únicamente” modelos teóricos a sistemas experimentales bajo condiciones reales.

Como se expuso en la *Introducción*, la energía solar podría tener un rol fiable y prometedor en muchos países. Por ello se debe considerar la SC, como es el caso de este proyecto. En general, aquellas regiones que poseen una irradiación solar más elevada tienen mayor potencial PV. Sin embargo, las áreas que combinan altas radiaciones y bajas temperaturas mayor energía PV podrían producir. Este es el caso del Himalaya y los Andes con un potencial PV cercano a los 2000 kWh/ kW PV (para placas de Si cristalino), como se aprecia en la siguiente *Figura 8-1*. En menor medida, pero también con gran potencial, destacan el centro de África y Australia.



**Figura 8-1.** Mapa mundial del potencial PV anual para placas de Si cristalino. Fuente: (Dubey, Sarvaiya, y Seshadri, 2013)

En luz de todo lo anterior, es indudable que la combinación de la energía solar fotovoltaica, su integración en edificios y la inserción de PCM podría resultar en una aprovechable sinergia. Por ejemplo, tendría gran aplicación en sistemas híbridos de energía solar fotovoltaica y térmica para edificios. Dada la baja eficiencia de conversión eléctrica, se produce calor residual, el cual podría ser aprovechado incorporando tubos de recuperación con fluido portador, como proponen *Tian y Zhao (2013)*. No sólo se conseguiría la generación de electricidad, sino que además proveería de energía calorífica y agua caliente sanitaria. Los PCM tendrían un rol crucial, por un lado, en la mejora de eficiencia de las PV; y por otro lado, incluyendo materiales microencapsulados dentro del fluido de la instalación térmica. Esto permitiría, en primer lugar, aprovechar la capacidad del calor latente de fusión para absorber y liberar energía en las distintas fases de la instalación; y en segundo lugar, no reducir la eficiencia de la PV y evitar su degradación debido a altas temperaturas.



## BIBLIOGRAFÍA

### Artículos y libros de referencia

Abhat, A. "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials." *Solar Energy* 30, no. 4 (1983): 313-332.

Agyenim, Francis, Philip Eames, y Mervyn Smyth. "Heat Transfer Enhancement in Medium Temperature Thermal Energy Storage System Using a Multitube Heat Transfer Array." *Renewable Energy* 35, no. 1 (2010): 198-207.

Agyenim, Francis, Neil Hewitt, Philip Eames, y Mervyn Smyth. "A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change Problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (Lhtess)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, no. 2 (2010): 615-628.

Alonso García, M. C., y J. L. Balenzategui. "Estimation of Photovoltaic Module Yearly Temperature and Performance Based on Nominal Operation Cell Temperature Calculations." *Renewable Energy* 29, no. 12 (2004): 1997-2010.

Biwole, Pascal Henry, Pierre Eclache, y Frederic Kuznik. "Phase-Change Materials to Improve Solar Panels Performance." *Energy and Buildings* 62, no. 0 (2013): 59-67.

Cai, Y., L. Song, Q. He, D. Yang, y Y. Hu. "Preparation, Thermal and Flammability Properties of a Novel Form-Stable Phase Change Materials Based on High Density Polyethylene/Poly(Ethylene-Co-Vinyl Acetate)/Organophilic Montmorillonite Nanocomposites/Paraffin Compounds." *Energy Conversion and Management* 49, no. 8 (2008): 2055-2062.

Ciulla, Giuseppina, Valerio Lo Brano, Maurizio Cellura, Vincenzo Franzitta, y Daniele Milone. "A Finite Difference Model of a Pv-Pcm System." *Energy Procedia* 30, no. 0 (2012): 198-206.

Du, Dengfeng, Jo Darkwa, y Georgios Kokogiannakis. "Thermal Management Systems for Photovoltaics (Pv) Installations: A Critical Review." *Solar Energy* 97, no. 0 (2013): 238-254.

Dubey, Swapnil, Jatin Narotam Sarvaiya, y Bharath Seshadri. "Temperature Dependent Photovoltaic (Pv) Efficiency and Its Effect on Pv Production in the World – a Review." *Energy Procedia* 33, no. 0 (2013): 311-321.

Emery, K., J. Burdick, Y. Caiyem, D. Dunlavy, H. Field, B. Kroposki, T. Moriarty, L. Ottoson, S. Rummel, T. Strand, y M. W. Wanlass. "Temperature Dependence of Photovoltaic Cells, Modules and Systems." In *Photovoltaic Specialists Conference, 1996., Conference Record of the Twenty Fifth IEEE*, 1275-1278, 1996.

Evans, DL, y LW Florschuetz. "Terrestrial Concentrating Photovoltaic Power System Studies." *Solar Energy* 20, no. 1 (1978): 37-43.

Farid, Mohammed M., Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, y Said Al-Hallaj. "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications." *Energy Conversion and Management* 45, no. 9-10 (2004): 1597-1615.

Geisemeyer, I., F. Fertig, W. Warta, S. Rein, y M. C. Schubert. "Prediction of Silicon Pv Module Temperature for Hot Spots and Worst Case Partial Shading Situations Using Spatially Resolved Lock-in Thermography." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, no. 0 (2013).

Goetzberger, Adolf, y Volker Uwe Hoffmann. *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Edited by Springer Series in Optical Sciences, 2005.

Goossens, Dirk, y Emmanuel Van Kerschaever. "Aeolian Dust Deposition on Photovoltaic Solar Cells: The Effects of Wind Velocity and Airborne Dust Concentration on Cell Performance." *Solar Energy* 66, no. 4 (1999): 277-289.

Hasan, A., S. J. McCormack, M. J. Huang, y B. Norton. "Evaluation of Phase Change Materials for Thermal Regulation Enhancement of Building Integrated Photovoltaics." *Solar Energy* 84, no. 9 (2010): 1601-1612.

Ho, C. J., Bor-Tyng Jou, Chi-Ming Lai, y Chao-Yang Huang. "Performance Assessment of a Bipv Integrated with a Layer of Water-Saturated Mepcm." *Energy and Buildings* 67, no. 0 (2013): 322-333.

Ho, C. J., A. O. Tanuwijava, y Chi-Ming Lai. "Thermal and Electrical Performance of a Bipv Integrated with a Microencapsulated Phase Change Material Layer." *Energy and Buildings* 50, no. 0 (2012): 331-338.

Huang, Jin, Tingyu Wang, Panpan Zhu, y Junbin Xiao. "Preparation, Characterization, and Thermal Properties of the Microencapsulation of a Hydrated Salt as Phase Change Energy Storage Materials." *Thermochimica Acta* 557, no. 0 (2013): 1-6.

Huang, M. J., P. C. Eames, y B. Norton. "Thermal Regulation of Building-Integrated Photovoltaics Using Phase Change Materials." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, no. 12-13 (2004): 2715-2733.

Huang, M. J., P. C. Eames, y B. Norton. "Phase Change Materials for Limiting Temperature Rise in Building Integrated Photovoltaics." *Solar Energy* 80, no. 9 (2006): 1121-1130.

Huang, Ming Jun. "The Effect of Using Two Pcms on the Thermal Regulation Performance of Bipv Systems." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95, no. 3 (2011): 957-963.

Huld, Thomas, Richard Müller, y Attilio Gambardella. "A New Solar Radiation Database for Estimating Pv Performance in Europe and Africa." *Solar Energy* 86, no. 6 (2012): 1803-1815.

IEA-ETSAP and IRENA. *Thermal Energy Storage. Technology Brief*. 2013.

Jamekhorshid, A., S. M. Sadrameli, y M. Farid. "A Review of Microencapsulation Methods of Phase Change Materials (Pcms) as a Thermal Energy Storage (Tes) Medium." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, no. 0 (2014): 531-542.

Jordan, D. C., y S. R. Kurtz. "Photovoltaic Degradation Rates—An Analytical Review." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21, no. 1 (2013): 12-29.

Kelly, Ruth. *Latent Heat Storage in Building Materials*. AMEC Design, 2000.

Kenisarin, Murat M. "High-Temperature Phase Change Materials for Thermal Energy Storage." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, no. 3 (2010): 955-970.

Kenisarin, Murat, y Khamid Mahkamov. "Solar Energy Storage Using Phase Change Materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, no. 9 (2007): 1913-1965.



Kosny, J., N. Shukla, y A. Fallahi. *Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates*. 2013, DOE/GO-102013-3692; Other: KNDJ-0-40345-00 United States 10.2172/1067934 Other: KNDJ-0-40345-00 Thu Mar 14 11:43:30 EDT 2013 NREL English.

Kurtz, S., K. Whitfield, D. Miller, J. Joyce, J. Wohlgemuth, M. Kempe, N. Dhere, N. Bosco, y T. Zgonena. "Evaluation of High-Temperature Exposure of Rack-Mounted Photovoltaic Modules." In *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, 002399-002404, 2009.

Lo Brano, Valerio, Giuseppina Ciulla, Antonio Piacentino, y Fabio Cardona. "On the Efficacy of PCM to Shave Peak Temperature of Crystalline Photovoltaic Panels: An Fdm Model and Field Validation." *Energies* 6, no. 12 (2013): 6188-6210.

M. Gasanaliyev, Abdulla, y Baryat Y. Gamataeva. "Heat-Accumulating Properties of Melts." *Russian Chemical Reviews* 69, no. 2 (2000): 179-186.

Maiti, Subarna, Sudhanya Banerjee, Kairavi Vyas, Pankaj Patel, y Pushpito K. Ghosh. "Self Regulation of Photovoltaic Module Temperature in V-Trough Using a Metal-Wax Composite Phase Change Matrix." *Solar Energy* 85, no. 9 (2011): 1805-1816.

Mehling Harald, Cabeza Luisa F. *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction into Basics and Applications*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

Memon, Shazim Ali. "Phase Change Materials Integrated in Building Walls: A State of the Art Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, no. 0 (2014): 870-906.

Ndiaye, Ababacar, Abdérafî Charki, Abdessamad Kobi, Cheikh M. F. Kébé, Pape A. Ndiaye, y Vincent Sambou. "Degradations of Silicon Photovoltaic Modules: A Literature Review." *Solar Energy* 96, no. 0 (2013): 140-151.

Oró, Eduard, Antoni Gil, Laia Miró, Gerard Peiró, Servando Álvarez, y Luisa F. Cabeza. "Thermal Energy Storage Implementation Using Phase Change Materials for Solar Cooling and Refrigeration Applications." *Energy Procedia* 30, no. 0 (2012): 947-956.

Parida, Bhubaneswari, S. Iniyar, y Ranko Goic. "A Review of Solar Photovoltaic Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, no. 3 (2011): 1625-1636.

Petter Jelle, Bjørn, Christer Brevik, y Hilde Drolsum Røkenes. "Building Integrated Photovoltaic Products: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 100, no. 0 (2012): 69-96.

Qiang Fu, Nan Tong. "A Strategy Research on Mppt Technique in Photovoltaic Power Generation System." *TELKOMNIKA - Indonesian Journal of Electrical Engineering* 11, (2013): 7627-7633.

Ross, R. G. "Pv Reliability Development Lessons from Jpl's Flat Plate Solar Array Project." *Photovoltaics, IEEE Journal of*, no. 1 (2014): 291-298.

Salunkhe, Pramod B., y Prashant S. Shembekar. "A Review on Effect of Phase Change Material Encapsulation on the Thermal Performance of a System." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 8 (2012): 5603-5616.

Sathiyamoorthy S., Elizabeth Caroline B., Gnana Jayanthi J. *Emerging Trends in Science, Engineering and Technology: Proceedings of International Conference, Incoset 2012*. India: Springer, 2012.

Saxena, Abhishek, y Varun Goel. "Solar Air Heaters with Thermal Heat Storages." *Chinese Journal of Engineering* 2013, (2013): 11.

Sharma, Atul, V. V. Tyagi, C. R. Chen, y D. Buddhi. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, no. 2 (2009): 318-345.

Sharma S.D., Sagara K. "Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review." *International Journal of Green Energy* 2, (2005): 1-56.

Sharma, Vikrant, y S. S. Chandel. "Performance and Degradation Analysis for Long Term Reliability of Solar Photovoltaic Systems: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, no. 0 (2013): 753-767.

Singh, G. K. "Solar Power Generation by Pv (Photovoltaic) Technology: A Review." *Energy* 53, no. 0 (2013): 1-13.

Skoplaki, E, y J. A. Palyvos. "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations." *Solar Energy* 83, no. 5 (2009): 614-624.

Solheim, Hans J., Hallvard G. Fjær, Einar A. Sørheim, y Sean Erik Foss. "Measurement and Simulation of Hot Spots in Solar Cells." *Energy Procedia* 38, no. 0 (2013): 183-189.

Sorloaica-Hickman, N., K. Davis, A. Leyte-Vidal, S. Kurtz, y D. Jordan. "Comparative Study of the Performance of Field-Aged Photovoltaic Modules Located in a Hot and Humid Environment." In *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, 002376-002381, 2012.

Stultz, J.W., and Wen, L.C. "Thermal Performance Testing and Analysis of Photovoltaic Modules in Natural Sunlight." 1977.

Tian, Y., y C. Y. Zhao. "A Review of Solar Collectors and Thermal Energy Storage in Solar Thermal Applications." *Applied Energy* 104, no. 0 (2013): 538-553.

Trinuruk, Piyatida, Chumnong Sorapipatana, y Dhirayut Chenvidhya. "Estimating Operating Cell Temperature of Bipv Modules in Thailand." *Renewable Energy* 34, no. 11 (2009): 2515-2523.

Tyagi, V. V., Nurul A. A. Rahim, N. A. Rahim, y Jeyraj A. L. Selvaraj. "Progress in Solar Pv Technology: Research and Achievement." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, no. 0 (2013): 443-461.

Vázquez, Manuel, y Ignacio Rey-Stolle. "Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16, no. 5 (2008): 419-433.

Zalba, Belén, José Ma Marín, Luisa F. Cabeza, y Harald Mehling. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications." *Applied Thermal Engineering* 23, no. 3 (2003): 251-283.

Zhao, Xudong, Xingxing Zhang, Saffa B. Riffat, y Yaxin Su. "Theoretical Study of the Performance of a Novel Pv/E Roof Module for Heat Pump Operation." *Energy Conversion and Management* 52, no. 1 (2011): 603-614.

Zondag, H. A. "Flat-Plate Pv-Thermal Collectors and Systems: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, no. 4 (2008): 891-959.

### Páginas Web

Aplicación Software de CM-SAF y PVGIS-3:

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

Buscador de artículos ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com/>

Catálogo de placas fotovoltaicas:

<http://www.tutiendasolar.es/Catalogo-placas-solares-placas-solares.html>

Compañía de venta e instalación de PV:

[https://autosolar.es/src/kit-aislada/sin-](https://autosolar.es/src/kit-aislada/sin-fabricante?custom_f_43[0]=456e74726520305720e280932033303057)

[fabricante?custom\\_f\\_43\[0\]=456e74726520305720e280932033303057](https://autosolar.es/src/kit-aislada/sin-fabricante?custom_f_43[0]=456e74726520305720e280932033303057)

[http://www.rssolar.com/oferta/folleto\\_rssolar.pdf](http://www.rssolar.com/oferta/folleto_rssolar.pdf)

Índice 2013 de Libertad Económica: <http://www.libertad.org/indice2013>

Informe de la EPIA "The solar photovoltaic electricity empowering the world 2011":

<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20r.pdf>

Informe de la evolución fotovoltaica de EUROSERVER (2012):

[http://www.euroserv-er.org/pdf/photovoltaic\\_2012.pdf](http://www.euroserv-er.org/pdf/photovoltaic_2012.pdf)

Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE):

<http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/pdfs-zu-presseinfos-englisch/2013/press-release-world-record-solar-cell-with-44-7-efficiency.pdf>

Instituto Nacional de Estadística, INE: <http://www.ine.es>

Localizador de coordenadas geográficas de la NASA:

[http://www.geografiainfo.es/nombres\\_geograficos/index.html](http://www.geografiainfo.es/nombres_geograficos/index.html)

Nota de prensa de la Red Eléctrica de España (REE): <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2014/01/la-demanda-de-energia-electrica-desciende-un-1-en-enero>

Precio para el aluminio secundario reciclado:

<http://www.lyrsa.es/index.php?ids=598>

Precio para la electricidad en 2013:

[https://www.endesaonline.com/ES/empresas/teguia/asesoramientotarifas/tarifa\\_electricidad\\_tur/tarifa\\_\\_electricidad\\_tur/index.asp](https://www.endesaonline.com/ES/empresas/teguia/asesoramientotarifas/tarifa_electricidad_tur/tarifa__electricidad_tur/index.asp)

### Otros

Distribución de SC en España: Documento Básico HE -Ahorro de Energía- del Código Técnico de Edificación (CTE).



# 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)”**



## **TABLA DE CONTENIDO DE ANEXOS**

<b>Índice de Figuras de Anexos.....</b>	<b>63</b>
<b>Índice de Tablas de Anexos.....</b>	<b>64</b>
<b>A Anexo: Estado del Arte.....</b>	<b>65</b>
Materiales para almacenamiento.....	65
Materiales de cambio de fase: PCM.....	66
Definición.....	66
Clasificación.....	66
Propiedades características.....	67
Encapsulación.....	68
Aplicaciones.....	68
Placas Solares Fotovoltaicas.....	68
Definición.....	68
Principio de funcionamiento.....	69
Tipos de placas.....	69
Generaciones de PV.....	71
Temperatura de operación, Eficiencia y Potencia Pico.....	71
Aplicación de PCM en BIPV.....	73
<b>B Anexo: Localización geográfica y Variables climatológicas.....</b>	<b>77</b>
Localización geográfica - Severidades Climáticas.....	77
Variables Climatológicas.....	78
<b>C Anexo: Caracterización de PV y PCM.....</b>	<b>79</b>
Identificación de las características de PV.....	79
Selección del material de cambio de fase.....	80
Tablas PCM globales: Orgánicos, Inorgánicos y Eutécticos.....	80
Mapas puntos PCM.....	90
Tablas de alternativas PCM para Zaragoza.....	93
<b>D Anexo: Comportamiento de operación BIPV con y sin PCM.....</b>	<b>95</b>
Operación de BIPV sin PCM.....	95
Programa EES cálculo sin PCM para Zaragoza.....	95
Operación de BIPV con PCM y Análisis de los parámetros críticos de diseño.....	96
Programa EES cálculo con PCM de distintos parámetros críticos.....	96
Gráficos mensuales de Zaragoza para análisis de parámetros críticos.....	102

Gráficas comparativas de Tpv de alternativas Zaragoza según espesor .....	112
Comparación de los mejores comportamientos de PCM en BIPV Zaragoza.....	115
Viabilidad en SC distintas.....	116
Datos geográficos y climatológicos de nueva SC: Sevilla.....	116
Gráficas de temperatura y eficiencia para nueva SC: Sevilla.....	116
<b>E Anexo: Implicaciones Ambientales y Viabilidad Económica.....</b>	<b>121</b>
Tiempo de vida útil y degradación.....	121
Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV .....	124
Análisis económico.....	129
Precios elementos.....	129
Tablas de VAN, TIR y Payback .....	130



## ÍNDICE DE FIGURAS DE ANEXOS

Figura A-1. Calor sensible y latente en la evolución temporal de la fase al aumentar temperatura .....	65
Figura A-2. Clasificación esquemática de los PCM.....	66
Figura A-3. Clasificación de las placas fotovoltaicas (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012).....	69
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 .....	70
Figura A-5. T <sub>pv</sub> [°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) .....	71
Figura A-6. Potencia Máxima y Voc en función de T <sub>pv</sub> , G= 1000W/m <sup>2</sup> constante. (Qiang Fu, 2013).....	72
Figura A-7. Diagrama esquemático de la transferencia de calor en el sistema BIPV/PCM (Huang, Eames, y Norton, 2004).....	74
Figura B-1. Zonas climáticas a partir de SV en España. Apéndice D del documento básico HE (CTE).....	77
Figura B-2. Mapa de España con las 12 Zonas Climáticas. Fuente: Construmatica.....	78
Figura C-1. Mapa de puntos para PCM Orgánicos. Representan su T <sub>fundición</sub> [°C] y H[kj/kg] .....	90
Figura C-2. Mapa de puntos para PCM Inorgánicos. Representan su T <sub>fundición</sub> [°C] y H[kj/kg] .....	91
Figura C-3. Mapa de puntos para PCM Eutécticos. Representan su T <sub>fundición</sub> [°C] y H[kj/kg] .....	92
Figura D-1. Comparación de T <sub>pv</sub> [°C] y η <sub>PV</sub> [%] con y sin PCM en función de T <sub>fundición</sub> para Zaragoza .....	111
Figura D-2. Comparación de T <sub>pv</sub> [°C] con y sin PCM en función del espesor x para Zaragoza .....	114
Figura D-3. Comparación de T <sub>pv</sub> [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Zaragoza.....	115
Figura D-4. T <sub>pv</sub> anuales SIN PCM en Sevilla [°C] .....	116
Figura D-5. Eficiencias anuales SIN PCM en Sevilla η <sub>PV</sub> [%] .....	117
Figura D-6. Comparación de temperaturas [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Sevilla .....	119
Figura E-1. Fases principales y estructura para la realización de un ACV.....	124
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 .....	128

## ÍNDICE DE TABLAS DE ANEXOS

Tabla C-1. PCM Orgánicos.....	80
Tabla C-2. PCM Inorgánicos .....	83
Tabla C-3. PCM Eutécticos.....	85
Tabla C-4. Alternativas para <b>Tfusion</b> en torno a los 30°C.....	93
Tabla C-5. Alternativas para <b>Tfusion</b> en torno a los 40°C.....	93
Tabla D-1. Coeficientes SNL (Trinuruk 2009).....	95
Tabla D-2. Parámetros críticos de diseño relativos a PCM.....	96
Tabla E-1. $R_D$ en función de $T_{pv}$ para dos valores de $E_a$ .....	122
Tabla E-2. Dimensiones y masa del contenedor metálico de aluminio para PCM.....	125
Tabla E-3. Porcentajes de masa del PCM.....	125
Tabla E-4. Indicadores criterios de impacto ambiental del método RECIPE para el ACV de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM.....	127
Tabla E-5. Ahorro Energético [ $kWh/m^2$ ] de cada mes del año.....	130
Tabla E-6. Datos de entrada para el análisis económico.....	130
Tabla E-7. Datos de salida para análisis económico.....	131
Tabla E-8. Relación tiempo de vida útil y tiempo de retorno.....	131

## A ANEXO: ESTADO DEL ARTE

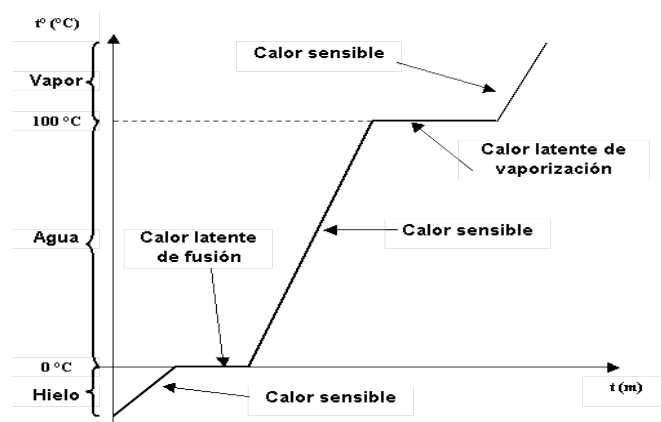
Para dar el primer paso, es necesaria una revisión del Estado del Arte y de la literatura. El análisis de publicaciones que engloben los temas a tratar permite obtener una idea inicial y general. Para ello, ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>) se erige como la fuente principal de recursos.

### 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  $[J/kg \cdot K]$ .
- ▶ 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,  $H [kJ/kg]$ .



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

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  $[0.2-0.5 W/m \cdot K]$ . 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).

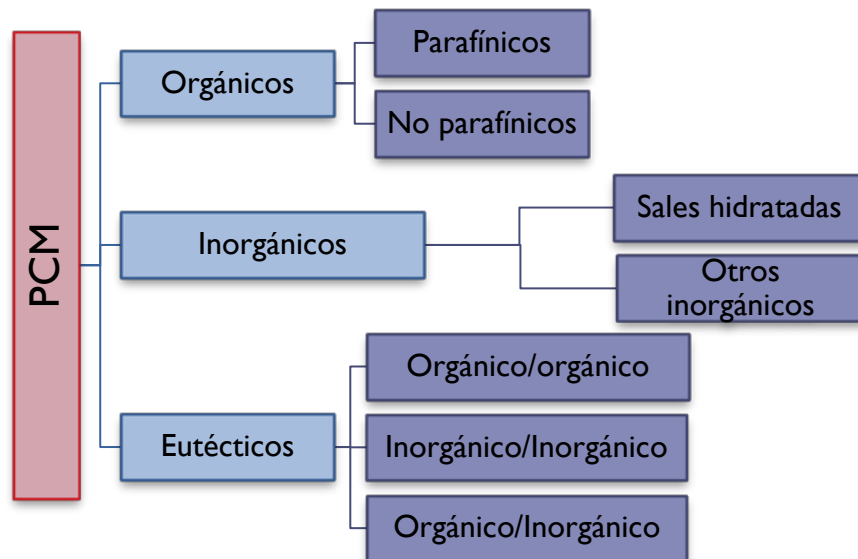


Figura A-2. Clasificación esquemática de los PCM

#### ► 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-alcános 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, ésteres... 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 subgrupo, 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 orgánicos, 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 debería 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 grande 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 descubrieran 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

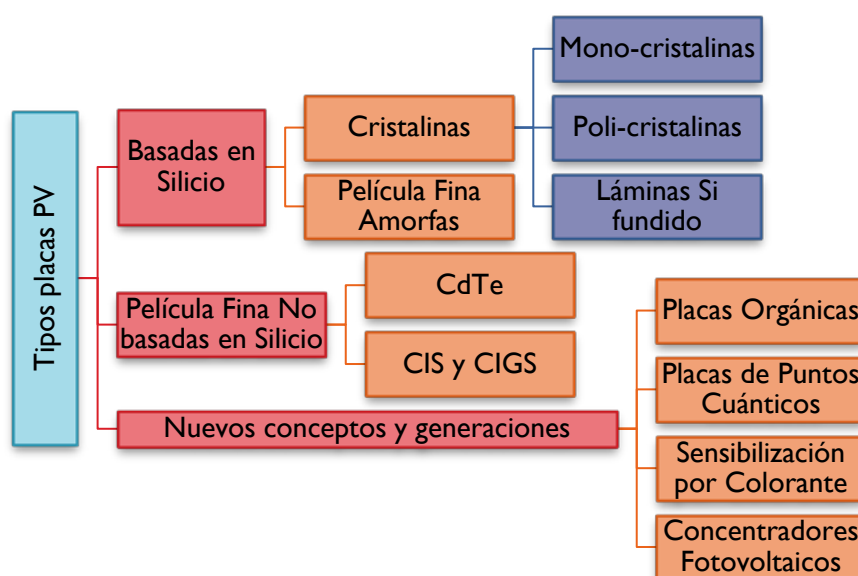
que necesario conseguir un porcentaje de conversión irradiación/electricidad lo más alto posible y disminuir las pérdidas de calor. Y es ahí donde se fija el enfoque de este proyecto, con la ayuda de los PCM. Para ampliar la información relativa a los paneles fotovoltaicos, su funcionamiento de generación 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, Iniyar, 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 una 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%.

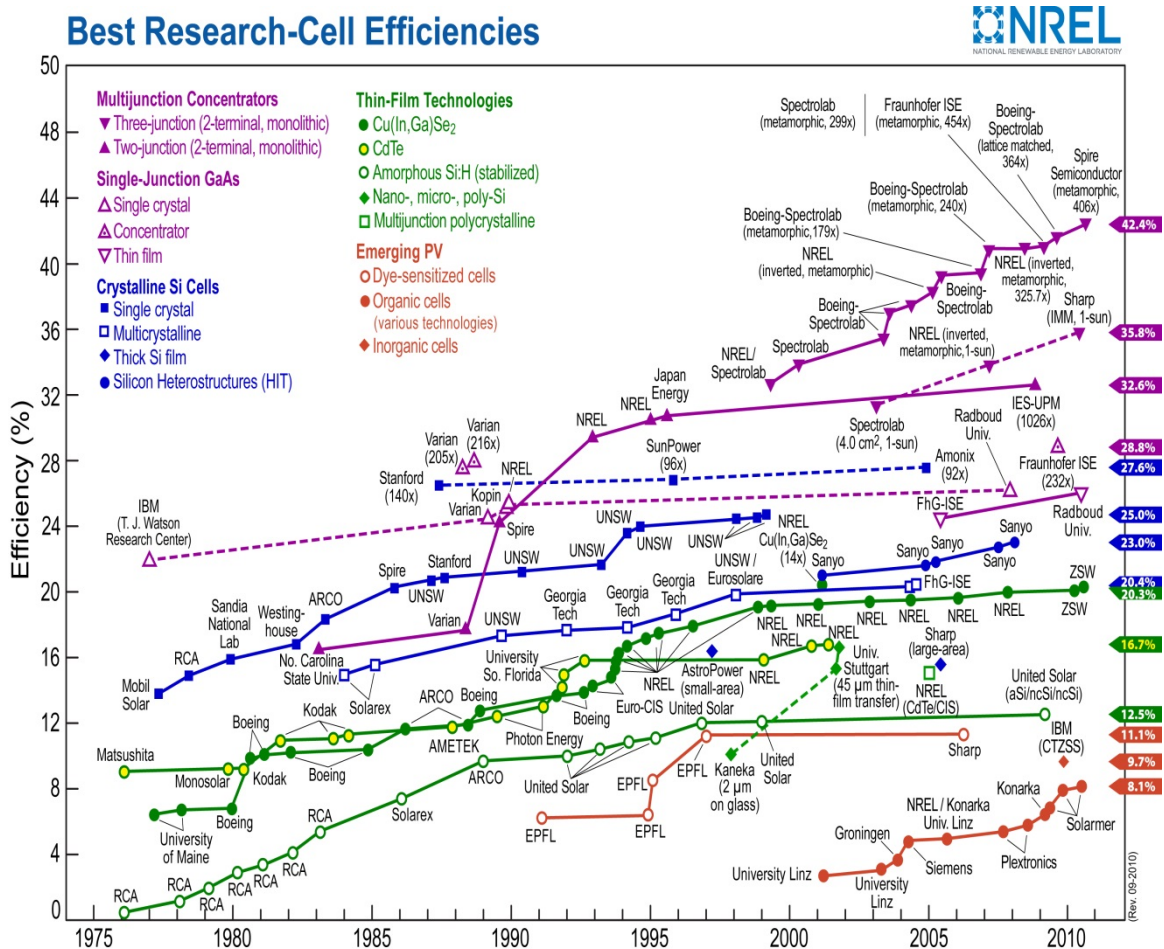


Figura A-4. Evolución temporal de los tipos de PV y el incremento en su eficiencia % (Petter Jelle, Breivik, y Drolsum Røkenes, 2012). Fuente: NREL



## 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, monocristalino 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 multispectral. 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 Palyos, 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:

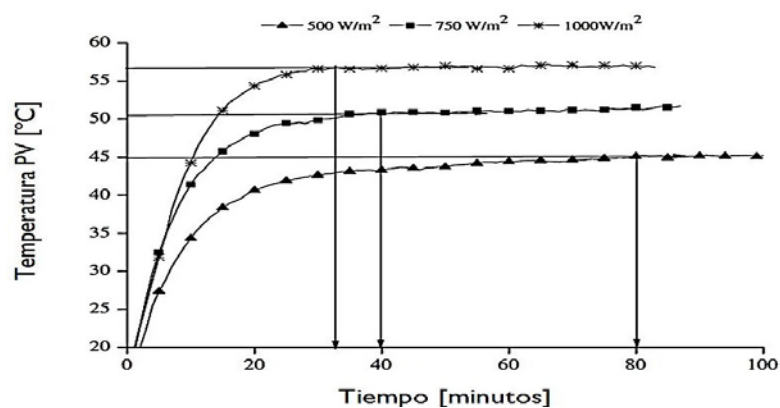


Figura A-5.  $T_{pv}$  [°C] a lo largo del tiempo, para distintos valores de irradiación  $G=500, 750$  y  $1000 \text{ W/m}^2$ . (Hasan y col., 2010)

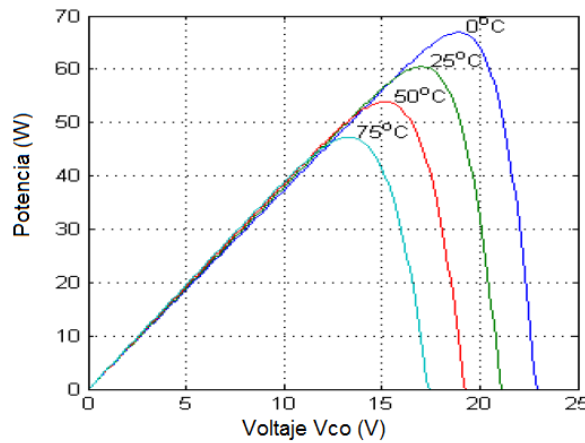
► **Potencia Pico:  $P_{max}$**

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  $T_{pv}$ ,  $G = 1000W/m^2$  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 placa.

**Ecuación A-2. Potencia  $P$  [W] directamente proporcional a la irradiación solar  $G$  [ $W/m^2$ ], al área  $A$  [ $m^2$ ] 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  $40^\circ C$ ,  $\eta_{pv}$  sufre una caída del 7.5% (*Biwole, Eclache, y Kuznik, 2013*). Y si la temperatura llegase a alcanzar los  $70^\circ C$ , la reducción sería tres veces mayor (22.5%).

Existen varias expresiones que relaciones  $T_{pv}$  y  $\eta_{pv}$ . Se propone una ecuación linear para la eficiencia eléctrica, *Ecuación A-3*. Donde  $\beta_{ref}$  es el coeficiente de temperaturas y  $\eta_{T_{ref}}$  la eficiencia de la PV a la temperatura de referencia  $T_{ref}$  e irradiación  $G=1000$   $W/m^2$ , (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>].**

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

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  $g/m^2$  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 muchas 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.

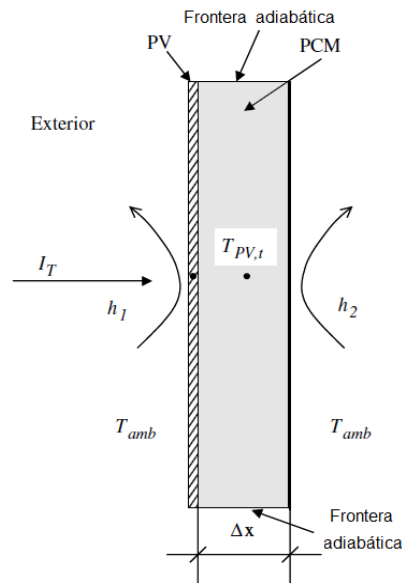


Figura A-7. Diagrama esquemático de la transferencia de calor en el sistema BIPV/PCM (Huang, Eames, y Norton, 2004)

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, Tanuwijava, 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<sup>2</sup>, 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° 38' 00" Norte    Decimal: 41.63
  - Longitud: 53° 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.

SC (verano)	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			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.

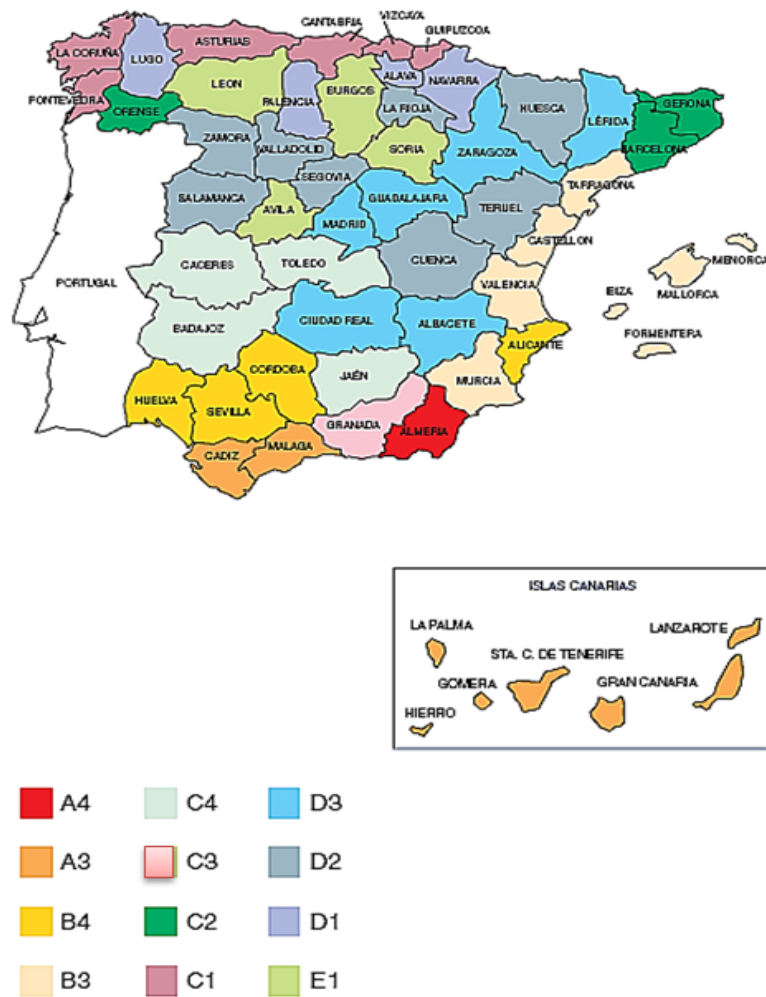


Figura B-2. Mapa de España con las 12 Zonas Climáticas. Fuente: Construmatica

### 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 (1ª 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  $1000 \text{ W/m}^2$  [%]:  $\eta_{T_{ref}} = 11.7\%^{**}$
- ▶ 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-1. PCM Orgánicos

ORGÁNICOS - Parafinas					
Nombre	Fórmula química	Cód.	T <sub>fusión</sub> (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 - Dotriacontane	C32H66	O-PF20	69,5	170	(Sharma y col., 2009)
n - Tritriacontane	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	CH3(CH2)6 COOH	O-NP1	16	148,5	(Sharma y col., 2009)
Acetic acid	CH3COOH	O-NP3	16,7	184	(Sharma y col., 2009)
Glycerin	C3H8O3	O-NP4	17,9	199	(Sharma y col., 2009)
Propyl palmitate	CH3(CH2)12 COOC3H7	O-NP5	19	186	(Kelly, 2000)
Butyl stearate	CH3(CH2)16 COO(CH2)3 CH3	O-NP6	19	140	(Kelly, 2000)
Polyethylene glycol 599	H(OC2H2)n OH	O-NP7	22,5	146	(Sharma y col., 2009)
Ethyl palmitate	CH3(CH2)14 4COOC2H5	O-NP8	23	122	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
1-dodecano	CH3(CH2)11 1OH	O-NP9	26	200	(Kelly, 2000)
d-Lactic acid	C3H6O3	O-NP10	26	184	(Sharma y col., 2009)
Capric acid	CH3(CH2)8C OOH	O-NP11	32	152	(Sharma y col., 2009)

Methyl palmitate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CO}_2\text{CH}_3$	O-NP12	33	205	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Ethyl stearate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOC}_2\text{H}_5$	O-NP13	33	134	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
1-tetradecanol	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{OH}$	O-NP14	38	205	(Kelly, 2000)
Methyl stearate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CO}_2\text{CH}_3$	O-NP15	39	169	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Caprylone	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}$	O-NP16	40	259	(Sharma y col., 2009)
Phenol	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	O-NP17	41	120	(Sharma y col., 2009)
Heptadecanone	$\text{C}_{15}\text{H}_{28}\text{O}_3$	O-NP18	41	201	(Sharma y col., 2009)
1-Cyclohexyloctadecane	$\text{C}_{24}\text{H}_{48}$	O-NP19	41	218	(Sharma y col., 2009)
4-Heptadecanone	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}$	O-NP20	41	197	(Sharma y col., 2009)
p-Toluidine	$\text{C}_7\text{H}_9\text{N}$	O-NP21	43,3	167	(Sharma y col., 2009)
Cyanamide	$\text{CH}_2\text{N}_2$	O-NP22	44	209	(Sharma y col., 2009)
Methyl isocyanate	$\text{C}_2\text{H}_3\text{NO}$	O-NP23	45	230	(Sharma y col., 2009)
Elaidic acid	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$	O-NP24	47	218	(Sharma y col., 2009)
3-Heptadecanone	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}$	O-NP25	48	218	(Sharma y col., 2009)
2-Heptadecanone	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}$	O-NP26	48	218	(Sharma y col., 2009)
Hydrocinnamic acid	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2$	O-NP27	48	118	(Sharma y col., 2009)
Lauric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	O-NP28	49	178	(Sharma y col., 2009)
Cetyl alcohol	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{OH}$	O-NP29	49,3	141	(Sharma y col., 2009)
$\alpha$ -Nephthylamine	$\text{C}_{10}\text{H}_9\text{N}$	O-NP30	50	93	(Sharma y col., 2009)
Camphene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	O-NP31	50	238	(Sharma y col., 2009)
O-Nitroaniline	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{NH}_2)(\text{NO}_2)$	O-NP32	50	93	(Sharma y col., 2009)
9-Heptadecanone	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}$	O-NP33	51	213	(Sharma y col., 2009)
Thymol	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$	O-NP34	51,5	115	(Sharma y col., 2009)
Methyl behenate	$\text{C}_{23}\text{H}_{46}\text{O}_2$	O-NP35	52	234	(Sharma y col., 2009)
Pentadecanoic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{COOH}$	O-NP36	52,5	178	(Sharma y col., 2009)
Diphenyl amine	$\text{C}_{12}\text{H}_{11}\text{N}$	O-NP37	52,9	107	(Sharma y col., 2009)
Myristic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	O-NP38	53	199	(Sharma y col., 2009)
p-Dichlorobenzene	$\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2$	O-NP39	53,1	121	(Sharma y col., 2009)
Oxolate	$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	O-NP40	54,3	178	(Sharma y col., 2009)
Hypophosphoric acid	$\text{H}_4\text{O}_6\text{P}_2$	O-NP41	55	213	(Sharma y col., 2009)
O-Xylene dichloride	$\text{C}_8\text{H}_8\text{Cl}_2$	O-NP42	55	121	(Sharma y col., 2009)

Tristearin	$(C_{17}H_{35}COO)_2$ $C_{3}H_5$	O-NP43	56	191	(Sharma y col., 2009)
$\beta$ -Chloroacetic acid	$C_2H_3ClO_2$	O-NP44	56	147	(Sharma y col., 2009)
Chloroacetic acid	$C_2H_3ClO_2$	O-NP45	56	130	(Sharma y col., 2009)
Nitro naphthalene	$C_{10}H_7NO_2$	O-NP46	56,7	103	(Sharma y col., 2009)
Trimyristin	$C_{45}H_{86}O_6$	O-NP47	57	207	(Sharma y col., 2009)
Palmitic acid	$CH_3(CH_2)_{14}COOH$	O-NP48	58	163	(Sharma y col., 2009)
Heptadecanoic acid	$CH_3(CH_2)_{15}COOH$	O-NP49	60,6	189	(Sharma y col., 2009)
$\alpha$ -Chloroacetic acid	$C_2H_3ClO_2$	O-NP50	61,2	130	(Sharma y col., 2009)
Bee wax	$C_{15}H_{31}COOC_{30}H_{61}$	O-NP51	61,8	177	(Sharma y col., 2009)
Glycolic acid	$C_2H_4O_3$	O-NP52	63	109	(Sharma y col., 2009)
p-Bromophenol	$C_6H_5BrO$	O-NP53	63,5	86	(Sharma y col., 2009)
Azobenzene	$C_{12}H_{10}N_2$	O-NP54	67,1	121	(Sharma y col., 2009)
Acrylic acid	$C_3H_4O_2$	O-NP55	68	115	(Sharma y col., 2009)
Stearic acid	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	O-NP56	69,4	199	(Sharma y col., 2009)
Dinitrotoluene (2,4)	$C_7H_6N_2O_4$	O-NP57	70	111	(Sharma y col., 2009)
Phenylacetic acid	$C_8H_8O_2$	O-NP58	76,7	102	(Sharma y col., 2009)
Thiosinamine	$C_4H_8N_2S$	O-NP59	77	140	(Sharma y col., 2009)
Bromocamphor	$C_{10}H_{15}BrO$	O-NP60	77	174	(Sharma y col., 2009)
Benzylamine	$C_6H_5CH_2NH_2$	O-NP61	78	174	(Sharma y col., 2009)
Durene	$C_6H_2(CH_3)_4$	O-NP62	79,3	156	(Sharma y col., 2009)
Acetamide	$CH_3CONH_2$	O-NP63	81	241	(Sharma y col., 2009)
Methyl bromobrenzoate	$C_8H_7BrO_2$	O-NP64	81	126	(Sharma y col., 2009)
Xilitol	$C_5H_{12}O_5$	O-NP65	94	263,3	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
$\alpha$ -Naphthol	$C_{10}H_7OH$	O-NP66	96	163	(Sharma y col., 2009)
D-sorbitol	$C_6H_{14}O_6$	O-NP67	97	185	(Kenisarin y Mahkamov, 2007)
Glutaric acid	$C_5H_8(COOH)_2$	O-NP68	97,5	156	(Sharma y col., 2009)
p-Xylene dichloride	$C_8H_8Cl_2$	O-NP69	100	138,7	(Sharma y col., 2009)
Methyl fumarate	$(CHCO_2NH_2)_2$	O-NP70	102	242	(Sharma y col., 2009)
Catechol	$C_6H_6O_2$	O-NP71	104,3	207	(Sharma y col., 2009)
Quinone	$C_6H_4O_2$	O-NP72	115	171	(Sharma y col., 2009)
Acetanilide	$C_8H_9NO$	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	(Kenisarín 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	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	O-NP79	159	199	(Oró y col., 2012)
Benzanilide	C <sub>13</sub> H <sub>11</sub> NO	O-NP80	161	162	(Oró y col., 2012)
D-mannitol	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	O-NP81	167	316,4	(Kenisarín y Mahkamov, 2007)
Hydroquinone	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	O-NP82	172,4	258	(Oró y col., 2012)
Potassium thiocyanate	KSCN	O-NP83	173	280	(Oró y col., 2012)
Galactitol	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub>	O-NP84	188	351,8	(Kenisarín y Mahkamov, 2007)

Tabla C-2. PCM Inorgánicos

INORGÁNICOS – Sales Hidratadas				
Fórmula química	Cód.	T <sub>fusión</sub> (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)
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	I-SH32	51	104	(Sharma y col., 2009)
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	I-SH33	55	68	(Sharma y col., 2009)
FeCl <sub>3</sub> · 2H <sub>2</sub> O	I-SH34	56	90	(Sharma y col., 2009)
Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH35	57	169	(Sharma y col., 2009)
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH36	58	151	(Sharma y col., 2009)
MgCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	I-SH37	58	178	(Sharma y col., 2009)
CH <sub>3</sub> COONa · 3H <sub>2</sub> O	I-SH38	58	265	(Sharma y col., 2009)
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH39	60,5	126	(Sharma y col., 2009)
NaAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 10H <sub>2</sub> O	I-SH40	61	181	(Sharma y col., 2009)
NaOH · H <sub>2</sub> O	I-SH41	64,3	273	(Sharma y col., 2009)
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH42	65	190	(Sharma y col., 2009)
LiCH <sub>3</sub> COO · 2H <sub>2</sub> O	I-SH43	70	150	(Sharma y col., 2009)
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O	I-SH44	72	155	(Sharma y col., 2009)
Ba(OH) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	I-SH45	78	265	(Sharma y col., 2009)
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 18H <sub>2</sub> O	I-SH46	88	-	(Zalba y col., 2003)
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	I-SH47	89	-	(Zalba y col., 2003)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH48	89,9	167	(Sharma y col., 2009)
KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	I-SH49	91	184	(Sharma y col., 2009)
(NH <sub>4</sub> )Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH50	95	269	(Zalba y col., 2003)
Na <sub>2</sub> S · 5/2 H <sub>2</sub> O	I-SH51	97,5	-	(Zalba y col., 2003)
CaBr <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	I-SH52	110	-	(Zalba y col., 2003)
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH53	112	-	(Zalba y col., 2003)
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	I-SH54	117	167	(Zalba y col., 2003)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	I-SH55	130	-	(Zalba y col., 2003)

**INORGÁNICOS – Metales y otros**

Fórmula química	Cód.	T <sub>fund</sub> (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
H <sub>2</sub> O	I-IN1	0	333	(Sharma S.D., 2005)
POCl <sub>3</sub>	I-IN2	1	85	(Sharma S.D., 2005)
D <sub>2</sub> O	I-IN3	3,7	318	(Sharma S.D., 2005)
SbCl <sub>5</sub>	I-IN4	4	33	(Sharma S.D., 2005)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	I-IN5	10,4	100	(Sharma S.D., 2005)
IC(β)	I-IN6	13,9	56	(Sharma S.D., 2005)
MOF6	I-IN7	17	50	(Sharma S.D., 2005)
SO <sub>3</sub> (α)	I-IN8	17	108	(Sharma S.D., 2005)
IC(α)	I-IN9	17,2	69	(Sharma S.D., 2005)
P <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	I-IN10	23,7	64	(Sharma S.D., 2005)
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	I-IN11	26	147	(Sharma S.D., 2005)

Cs	I-IN12	28,3	15	(Sharma S.D., 2005)
Ga	I-IN13	30	80	(Sharma S.D., 2005)
AsBr <sub>35</sub>	I-IN14	30	38	(Sharma S.D., 2005)
SnBr <sub>4</sub>	I-IN15	30	28	(Sharma S.D., 2005)
Bi <sub>3</sub>	I-IN16	31,8	10	(Sharma S.D., 2005)
SO <sub>3</sub> (β)	I-IN17	32,3	151	(Sharma S.D., 2005)
TiBr <sub>4</sub>	I-IN18	38,2	23	(Sharma S.D., 2005)
H <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	I-IN19	55	213	(Sharma S.D., 2005)
SO <sub>3</sub> (γ)	I-IN20	62,1	331	(Sharma S.D., 2005)
NaOH	I-IN21	64,3	228	(Zalba y col., 2003)
SbCl <sub>3</sub>	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.	T <sub>fundición</sub> (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
Ga-In-Zn	E-ME1	10,7	67,2	(M. Gasanaliyev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-In	E-ME2	15,7	69,7	(M. Gasanaliyev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-Sn-Zn	E-ME3	18,8	86,5	(M. Gasanaliyev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga 74-Sn-Cd	E-ME4	20,2	75,2	(M. Gasanaliyev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-Sn	E-ME5	20,55	81,9	(M. Gasanaliyev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga 93-Sn-Cd	E-ME6	24,6	85	(M. Gasanaliyev y Y. Gamataeva, 2000)
Ga-Zn	E-ME7	25	88,5	(M. Gasanaliyev 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.	T <sub>fundición</sub> (C°)	H (kJ/kg)	Referencia
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + CaBr <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	E-III	–3.0	26,6	(Sharma y col., 2009)
CaCl <sub>2</sub> + MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	E-II2	25	95	(Sharma y col., 2009)

Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O + Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	E-II3	30	136	(Sharma y col., 2009)	
AlCl <sub>3</sub> + BaCl <sub>2</sub> + NaCl	E-II4	50	168,5	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	E-II5	52	125,5	(Sharma y col., 2009)	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O [59-41]	E-II6	59	132,2	(Sharma y col., 2009)	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O [50-50]	E-II7	59,1	144	(Sharma y col., 2009)	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O	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-III10	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-III11	80,5	113	(Sharma y col., 2009)	
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub>	E-III12	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-III13	81,6	108	(Sharma y col., 2009)	
AlCl <sub>3</sub> + KCl + LiCl	E-III14	85	196	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)	
AlCl <sub>3</sub> + KCl + NaCl	E-III15	88	191	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)	
AlCl <sub>3</sub> + NaCl + TiCl <sub>3</sub>	E-III16	98	192	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)	
AlCl <sub>3</sub> + KCl + TiCl <sub>3</sub>	E-III17	100	184,2	(M. Gasanaliev y Y. Gamataeva, 2000)	
AlCl <sub>3</sub> + KCl + TiCl <sub>3</sub>	E-III18	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-III19	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)	
<b>EUTÉCTICOS – Inorgánicos/Orgánicos Eutécticos</b>					
Nombre	Fórmula Química	Cód.	T <sub>fusión</sub> (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)
Naphtalene + benzoic 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)
<b>EUTÉCTICOS – Parafínicos Eutécticos</b>					
Nombre	Cód.	T <sub>fusión</sub> (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.	T <sub>fusión</sub> (C°)	H (kJ/kg)	Referencia	
Butyl palmiate (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 (65.5 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 palmiate (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)
Triethyloethane + 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%)+ stearic acid (24.5 wt%)	E-OO19	37	182,7	(Kenisarin y Mahkamov, 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

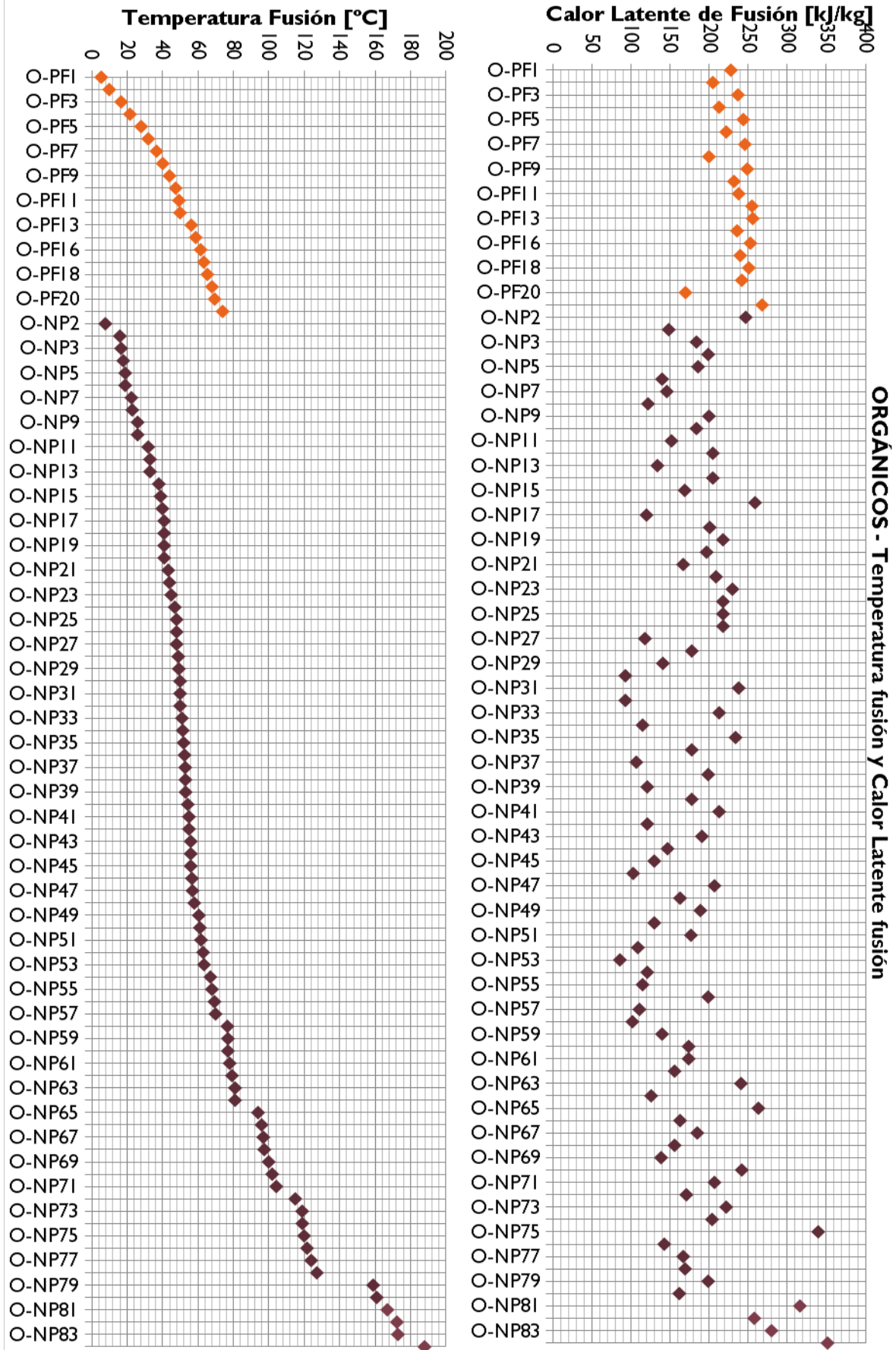


Figura C-1. Mapa de puntos para PCM Orgánicos. Representan su  $T_{\text{fusión}}$  [°C] y  $H$ [kJ/kg]

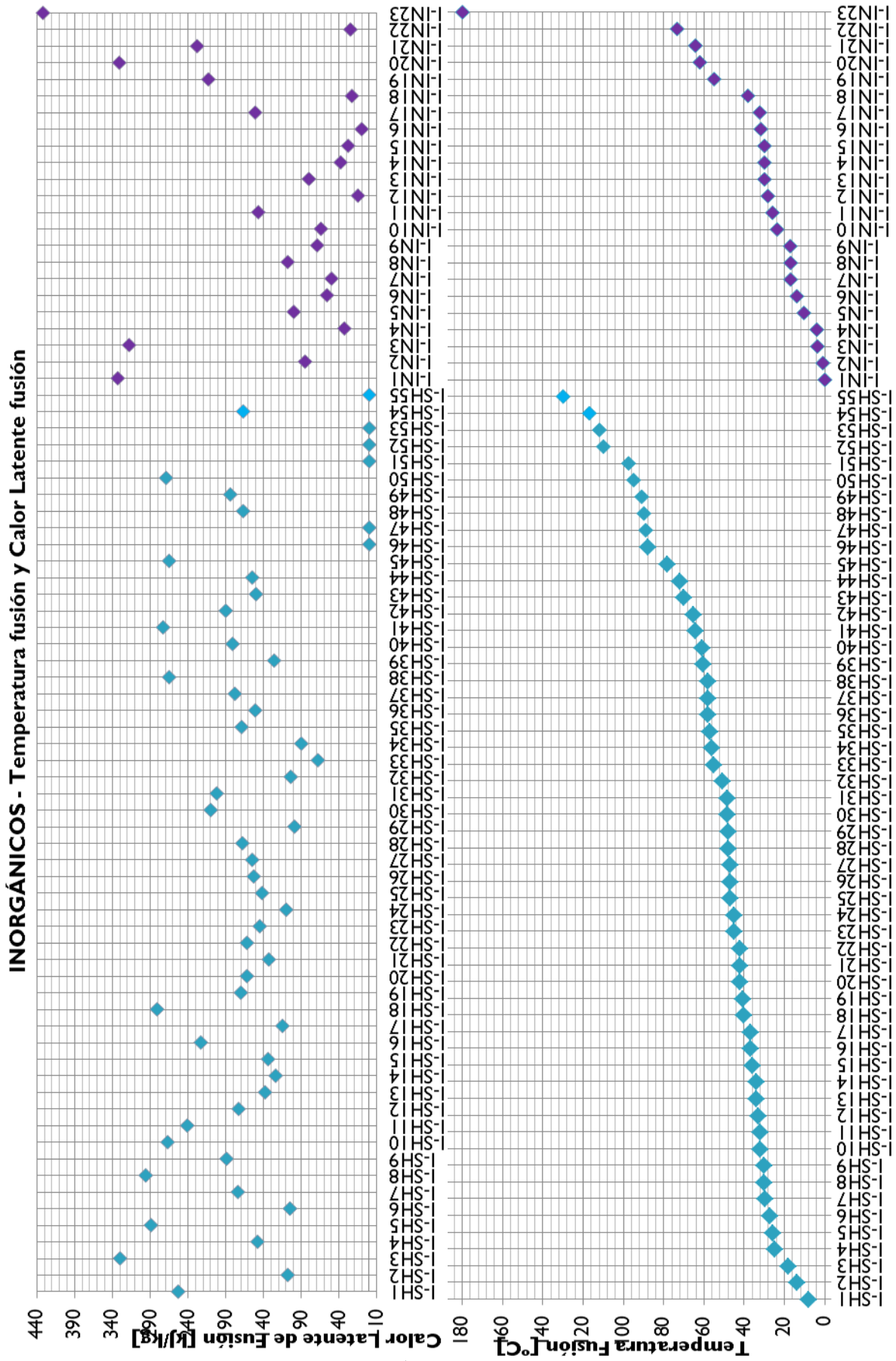
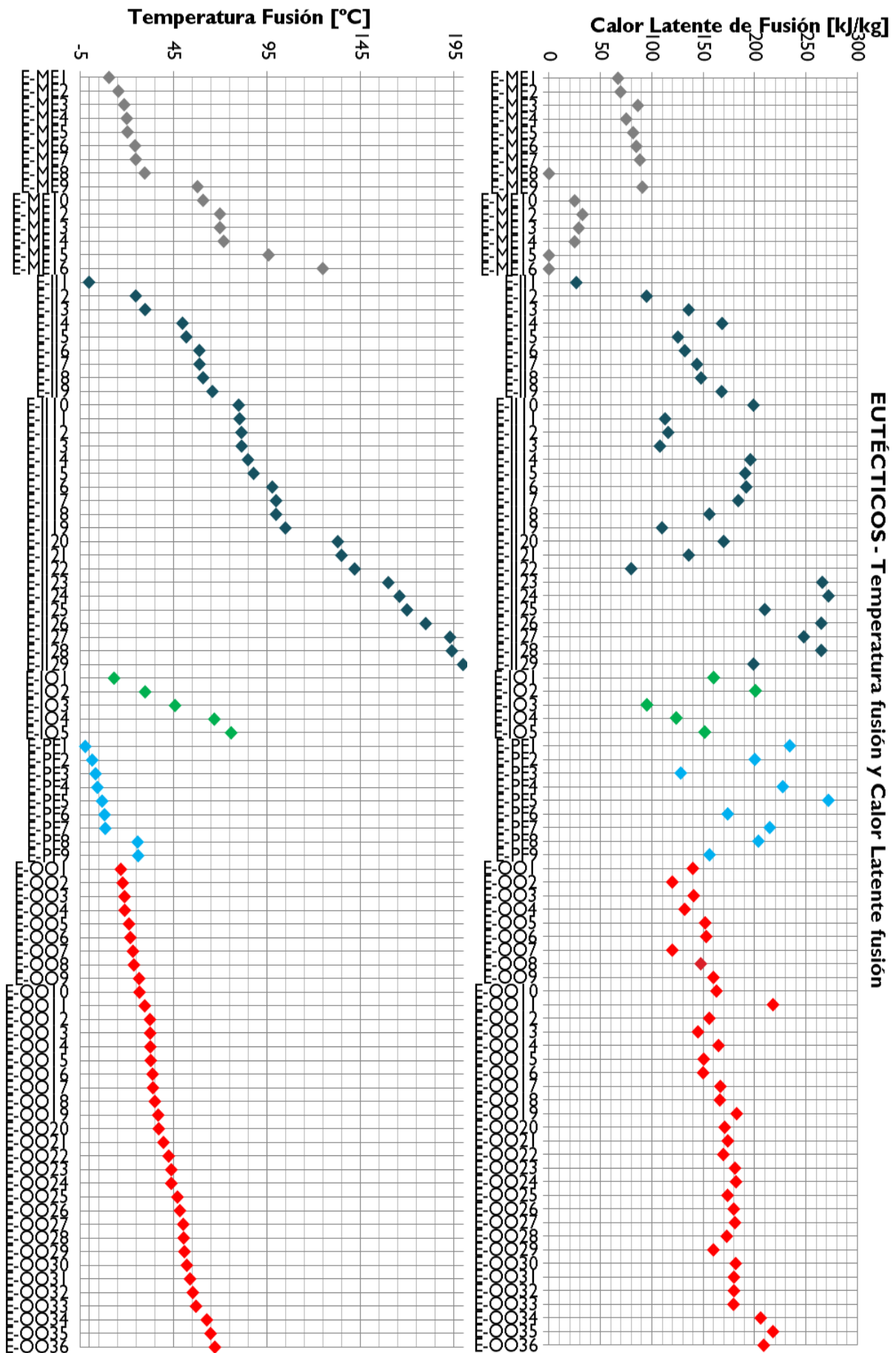


Figura C-2. Mapa de puntos para PCM Inorgánicos. Representan su T<sub>fusión</sub> [°C] y H[kJ/kg]



EUTÉCTICOS - Temperatura fusión y Calor Latente fusión

Figura C-3. Mapa de puntos para PCM Eutéticos. Representan su  $T_{\text{fusión}} [^{\circ}\text{C}]$  y  $H[\text{kJ/kg}]$

### 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  $T_{\text{fusión}}$  en torno a los 30°C y 40°C en Zaragoza:

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

Grupo y Subgrupo		Nombre	Fórmula química	Cod.	T fusión (C°)	H (kJ/kg)	
ORGÁNICOS	PARAFINAS	n - Octadecane	C18H38	O-PF5	28	244	
		n - Nonadecane	C19H40	O-PF6	32	222	
	NO PARAFÍNICOS	Capric acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	O-NP8	32	152	
INORGÁNICOS	SALES HIDRATADAS		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	
			Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	I-SH11	32	241	
	INORGÁNICOS		Cs		HNI12	28,3	15
			Ga		HNI13	30	80
			AsBr <sub>3</sub>		HNI14	30	38
			SnBr <sub>4</sub>		HNI15	30	28
		Bi <sub>3</sub>		HNI16	31,8	10	
EUTÉCTICOS y MEZCLAS	METÁLICOS EUT.	Gallium-gallium antimony		E-ME8	29,8	-	
	INORGÁNICOS EUT.		Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O + Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	E-I13	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	200,5	
	ORGÁNICOS EUT.	Triethyloethane + urea	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	E-OO11	29,8	218	

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

Grupo y Subgrupo		Nombre	Fórmula química	Cód.	T fusión (C°)	H (kJ/kg)
ORGÁNICOS	PARAFINAS	n - Heneicosane	C21H44	O-PF8	40,2	200
	NO PARAFÍNICOS	1-tetradecanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> OH	O-NP14	38	205
		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
		Caprylone	C15H30O	O-NP16	40	259
		Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	O-NP17	41	120
		Heptadecanone	C15H28O3	O-NP18	41	201
		1-Cyclohexylo octadecane	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>	O-NP19	41	218
		4-Heptadecanone	C17H34O	O-NP20	41	197
INORGÁNICOS	SALES HIDRATADAS		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>	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"

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

$$dif\_T = I\_t * \exp(a + b * v)$$

"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."

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

$$\tau = 0,91$$

$$\alpha = 0,95$$

"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

$T_{\text{fusion}}$	Espesor PCM ( $x$ )	Composición en masa ( $w$ )
<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCM1 con <math>T_{\text{fusion}} = 32^{\circ}\text{C}</math></li> <li>• PCM2 con <math>T_{\text{fusion}} = 40^{\circ}\text{C}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>x = 1\text{cm}</math></li> <li>• <math>x = 1.5\text{cm}</math></li> <li>• <math>x = 2\text{cm}</math></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_l; Q_lat; T_pv\pcm; eta_pv\pcm; dif_Tpv\pcm)
    
```

"Una vez obtenidas las  $T_{pv}$ , 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"

$T_{fusión} = T_{fusión}$  del PCM seleccionado "[°C]"

$\rho =$  Densidad del PCM seleccionado "Densidad [kg/m<sup>3</sup>]. 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 [m<sup>2</sup>]"

$m_{pcm} = Vol * \rho$  "masa del PCM [kg]"

$Vol = x * Area$  "Volumen PCM [m<sup>3</sup>]"

$k = 0,2$  "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"

$Q_{lat} =$  calor latente ( $T_{pv}$ ;  $T_{fusión}$ ;  $\Delta t$ ;  $k$ ;  $x$ ;  $Q_{acu}$ ;  $Q_{total}$ ;  $Area$ )

"La diferencia de  $T_{pv}$  con PCM respecto al ambiente, se define según la función"

$T_{pv\backslash pcm} = T_{amb} + l * ((\tau * \alpha - \eta_{pv\backslash pcm}) / U_l) * Area - (Q_{lat} / (U_l * \Delta t)) * Area$

$dif_{T_{pv\backslash pcm}} = T_{pv\backslash pcm} - T_{amb}$

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

"Características de la placa PV"

$\tau = 0,91$

$\alpha = 0,95$

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

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

"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;  $l_t[1..N]$ ;  $T_{amb}[1..N]$ ;  $T_{pv}[1..N]$ ;  $U_l[1..N]$ ;  $Q_{acu}[1..N]$ ;  $Q_{lat}[1..N]$ ;  $T_{pv\backslash pcm}[1..N]$ ;  $\eta_{pv\backslash pcm}[1..N]$ ;  $dif_{T_{pv\backslash pcm}}[1..N]$ )

"Inicializamos variables contador"

$i = 1$

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

$Q_{acu}[i] = 0$

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

REPEAT

"Llamada al subprograma de calculo T<sub>pcm</sub> para que obtener valores de salida"

CALL calculoT<sub>pcm</sub> (I\_t[i]; T\_amb[i]; T\_pv[i]; Q\_acu[i]; U\_l[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=n° 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 T<sub>pv</sub> y el coeficiente global de pérdidas U<sub>l</sub>:"

{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\_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<sub>pv</sub> es mayor que T<sub>fusion</sub>, absorbe calor latente hasta que llegue a Q<sub>total</sub>. 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_l; 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= 1 "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"

$T_{pv\backslash pcm} = T_{amb} + I_t * ((\tau * \alpha - \eta_{pv\backslash pcm}) / U_l) * Area - (Q_s / (U_l * \Delta t)) * Area$   
 $dif\_T_{pv\backslash pcm} = T_{pv\backslash pcm} - T_{amb}$   
 $\Delta t = 900$  "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"

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

"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 Tpcm"

"Programa principal con el bucle repeat"

PROCEDURE 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])

"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\_l[i]; Q\_acu1[i]; Q\_acu2[i]; Q\_lat1; Q\_lat2; Q\_s; T\_pv\pcm; eta\_pv\pcm; dif\_Tpv\pcm)

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

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

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

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

$Q_s[i] := Q_s$

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

$dif\_T_{pv\backslash pcm}[i] := dif\_T_{pv\backslash pcm}$

$Q_{acu1}[i+1] := Q_{acu1}[i] + Q_{lat1}$  "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=n° 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}

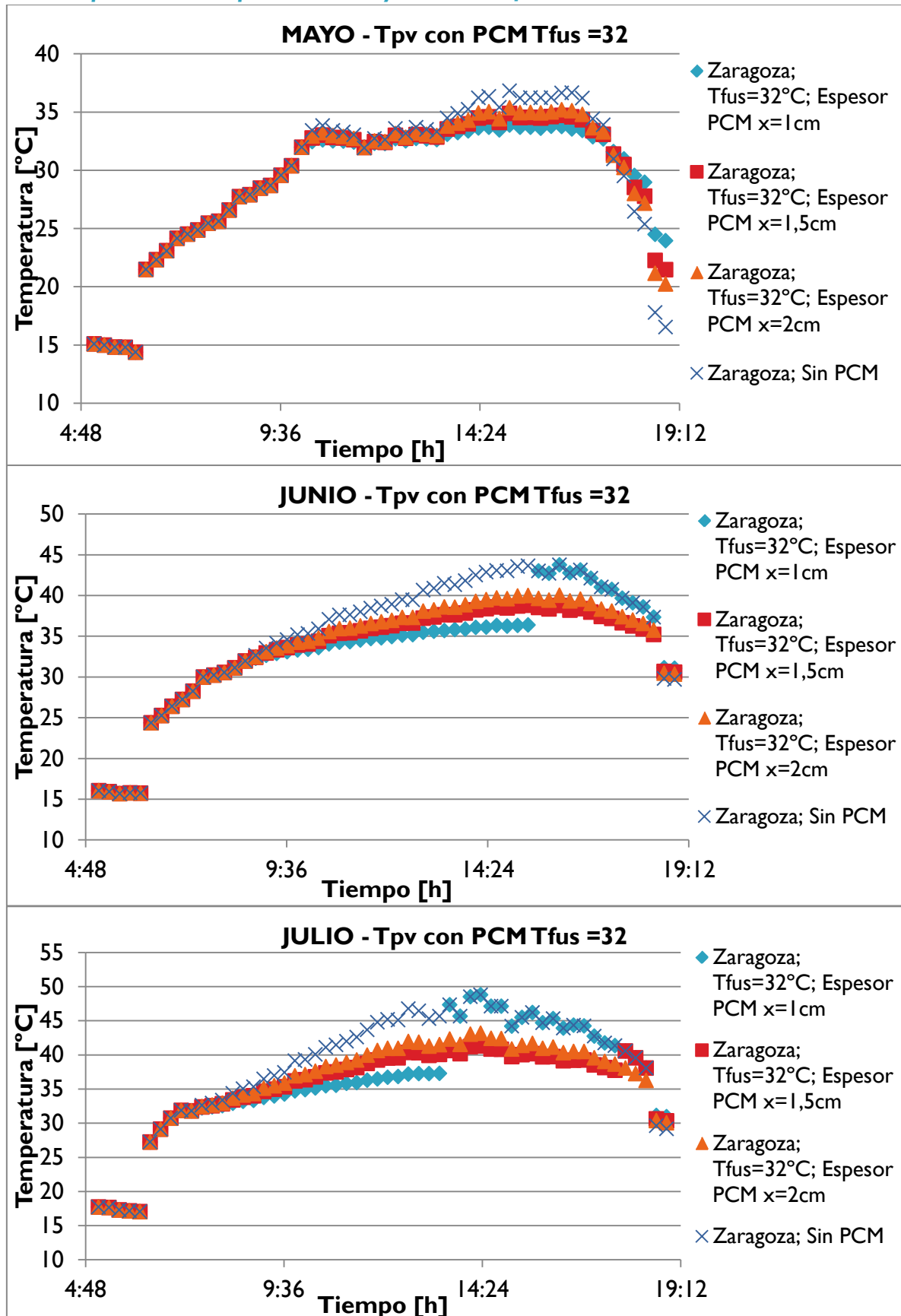
{Array U\_l}: U\_l[i]=valores de cada elemento  
{Array U\_l end}

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

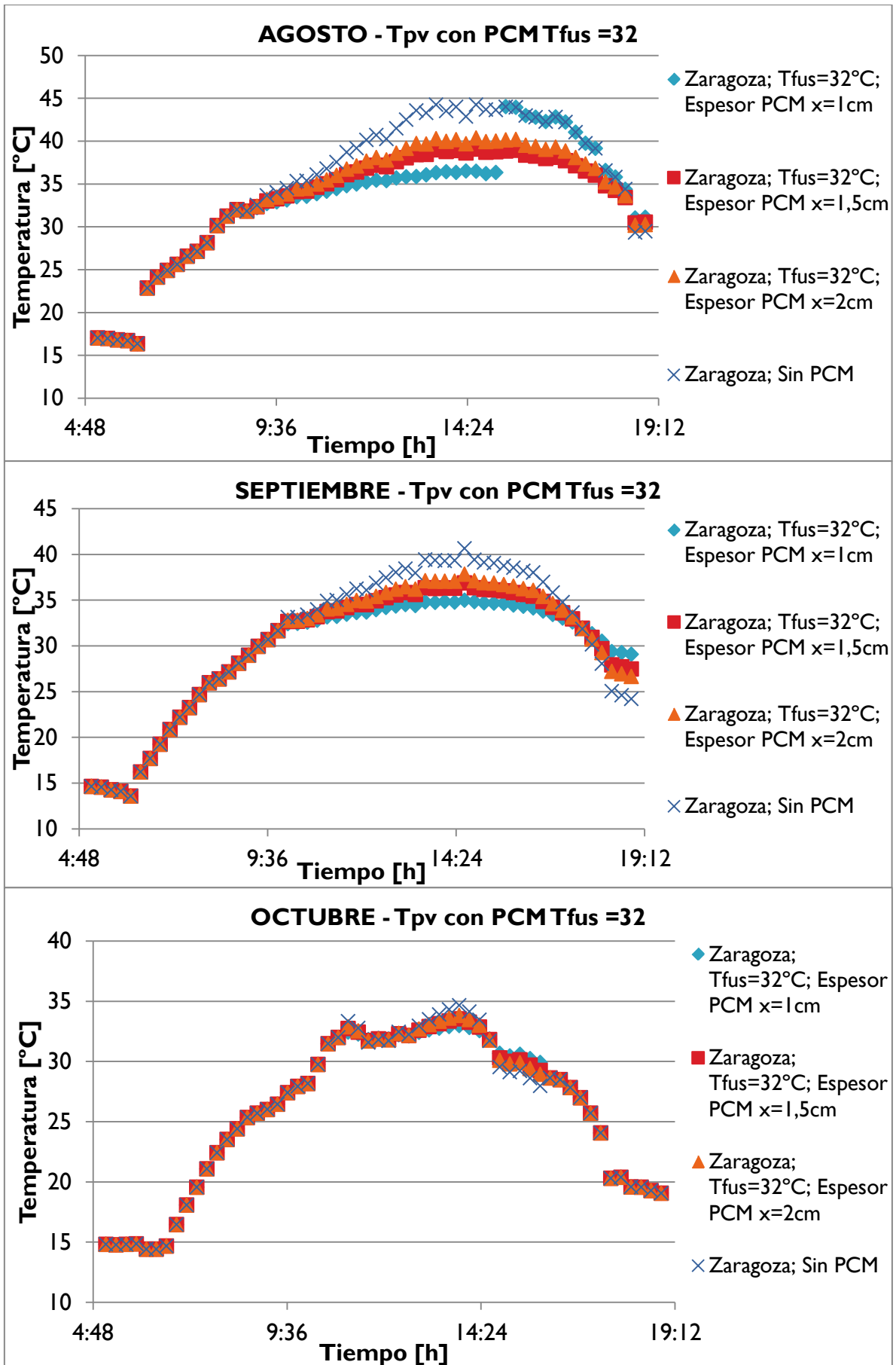
CALL principal (N; I\_t[1..N]; T\_amb[1..N]; T\_pv[1..N]; U\_l[1..N]; Q\_acu1[1..N];  
Q\_lat1[1..N]; Q\_acu2[1..N]; Q\_lat2[1..N]; Q\_s[1..N]; T\_pv\pcm[1..N]; eta\_pv\pcm[1..N];  
dif\_Tpv\pcm[1..N])

## Gráficos mensuales de Zaragoza para análisis de parámetros críticos

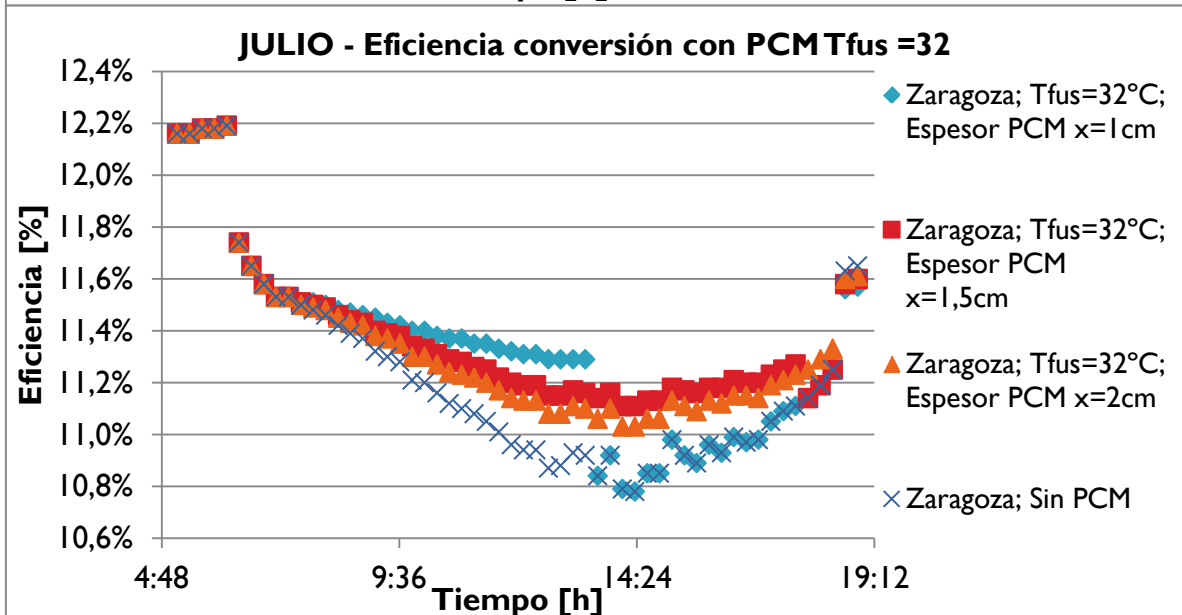
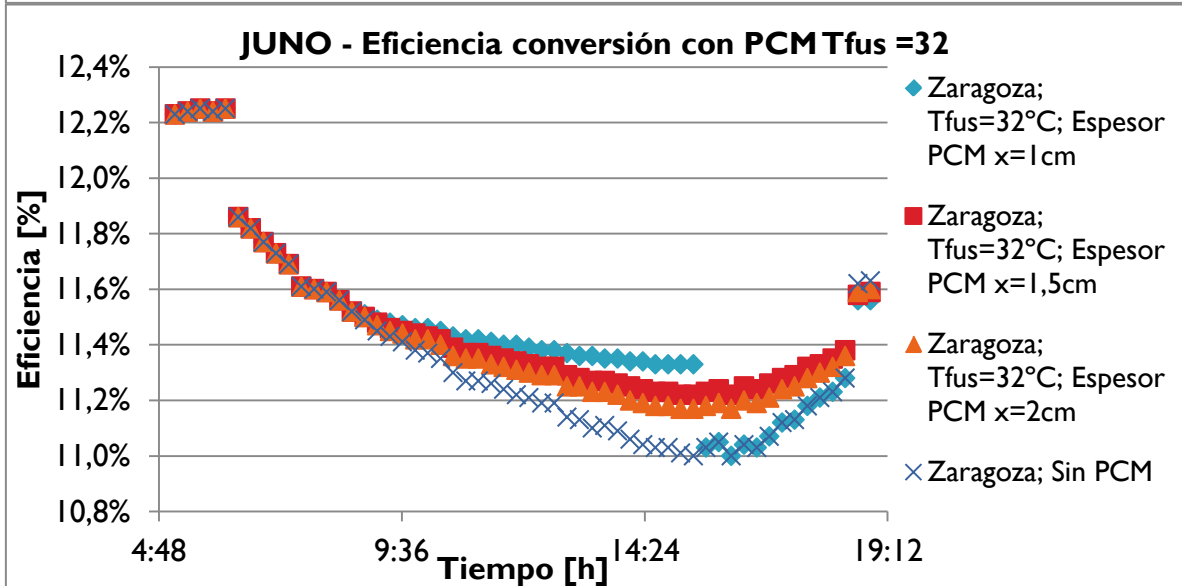
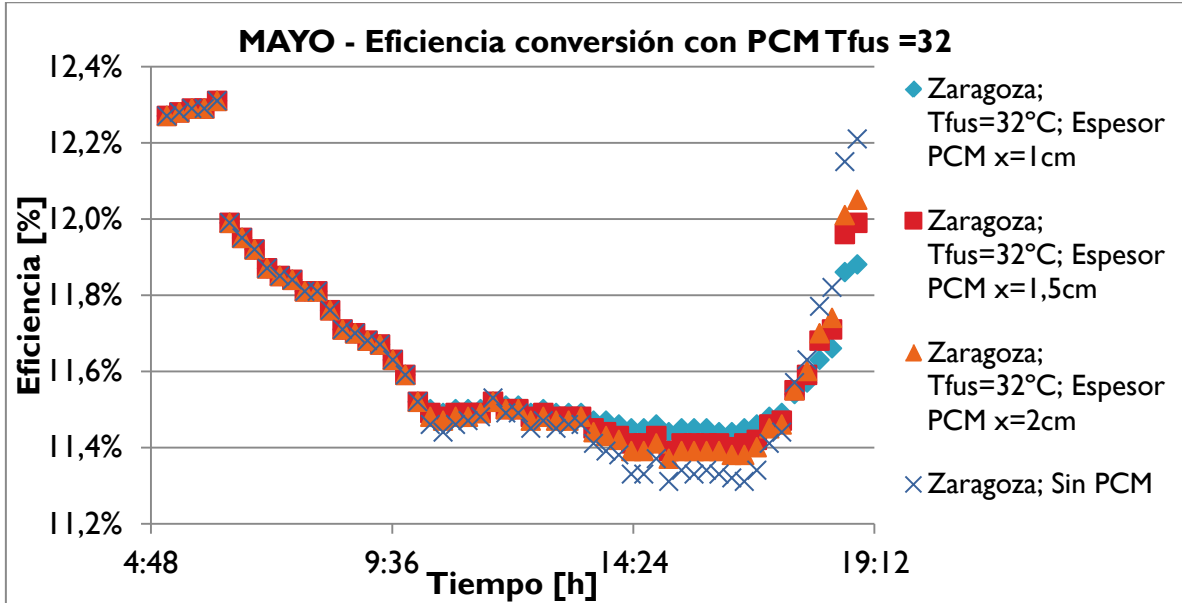
### ► Temperatura de operación con y sin PCM $T_{\text{fusion}}=32^{\circ}\text{C}$

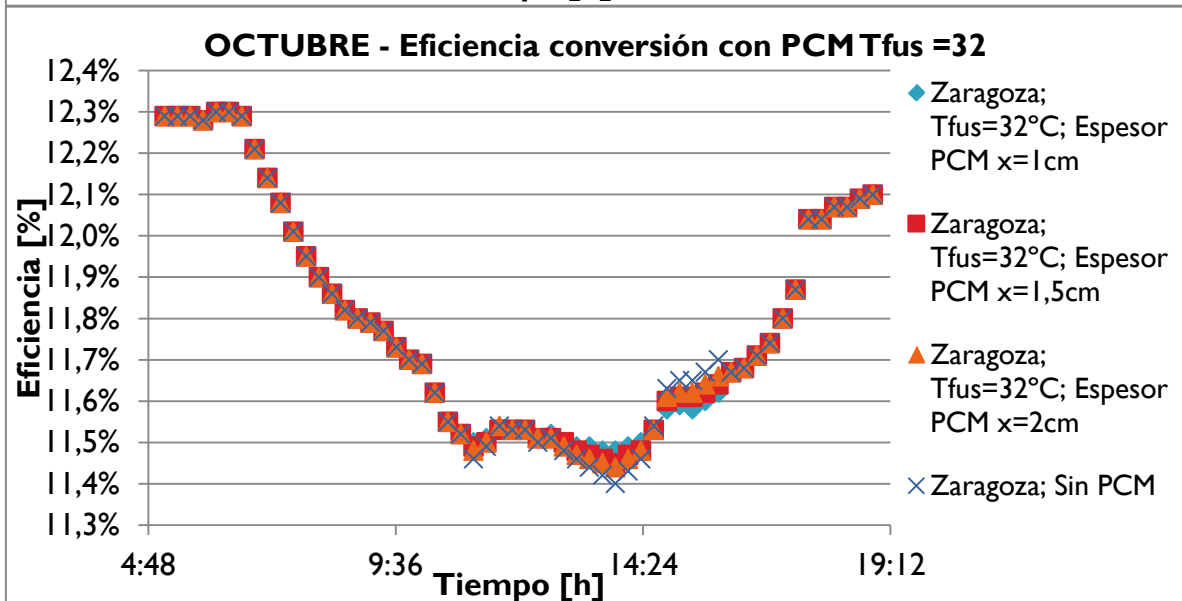
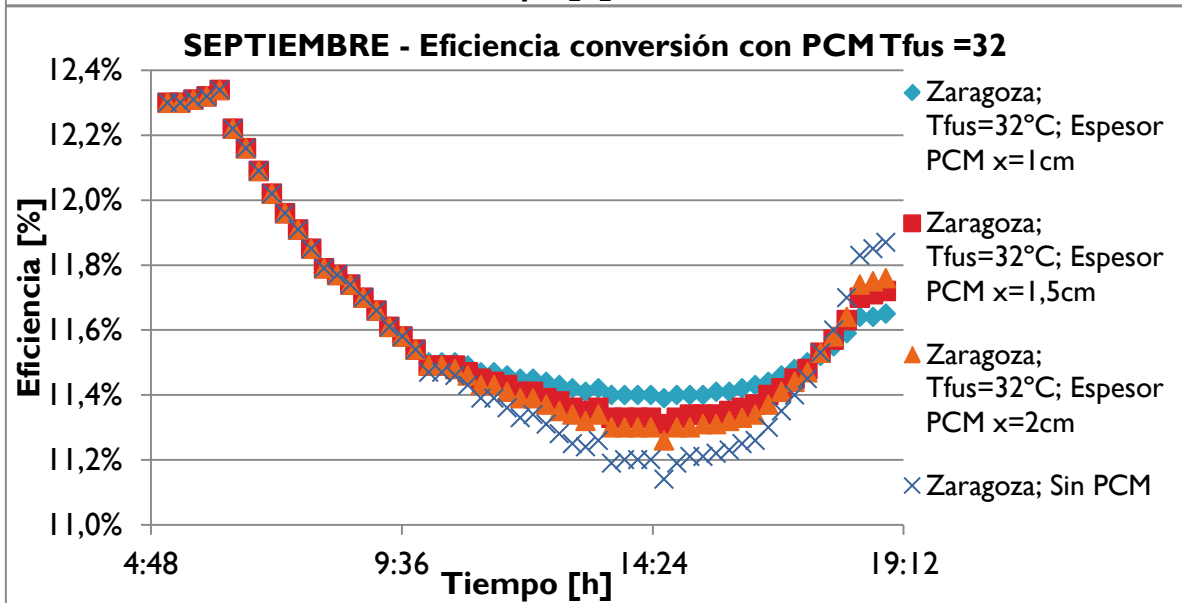
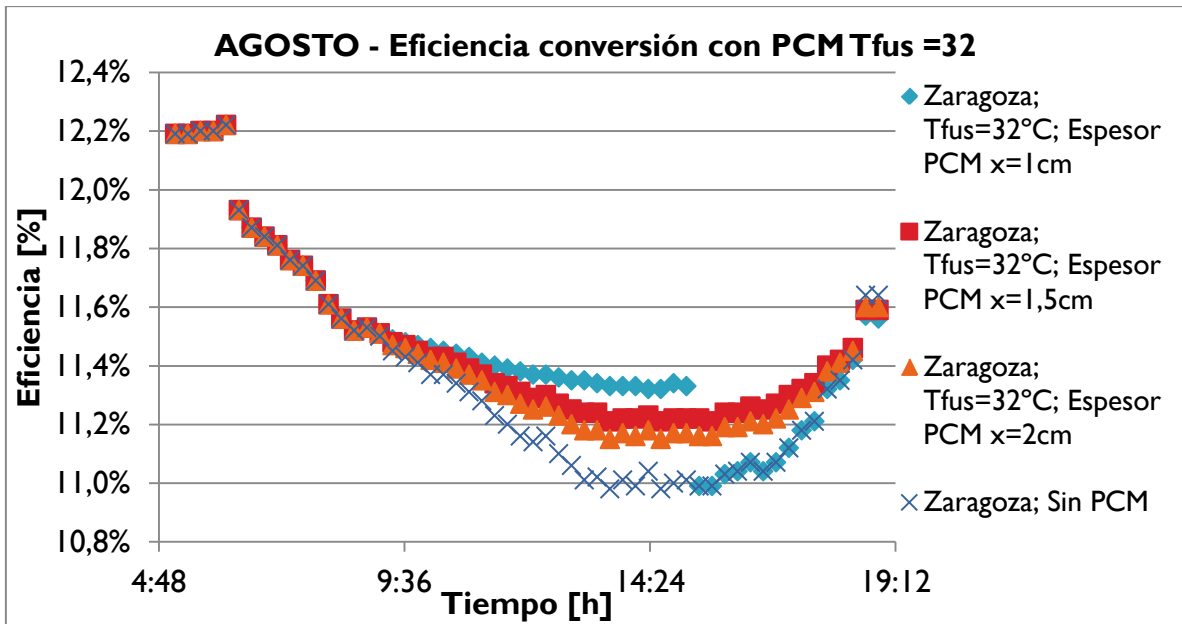




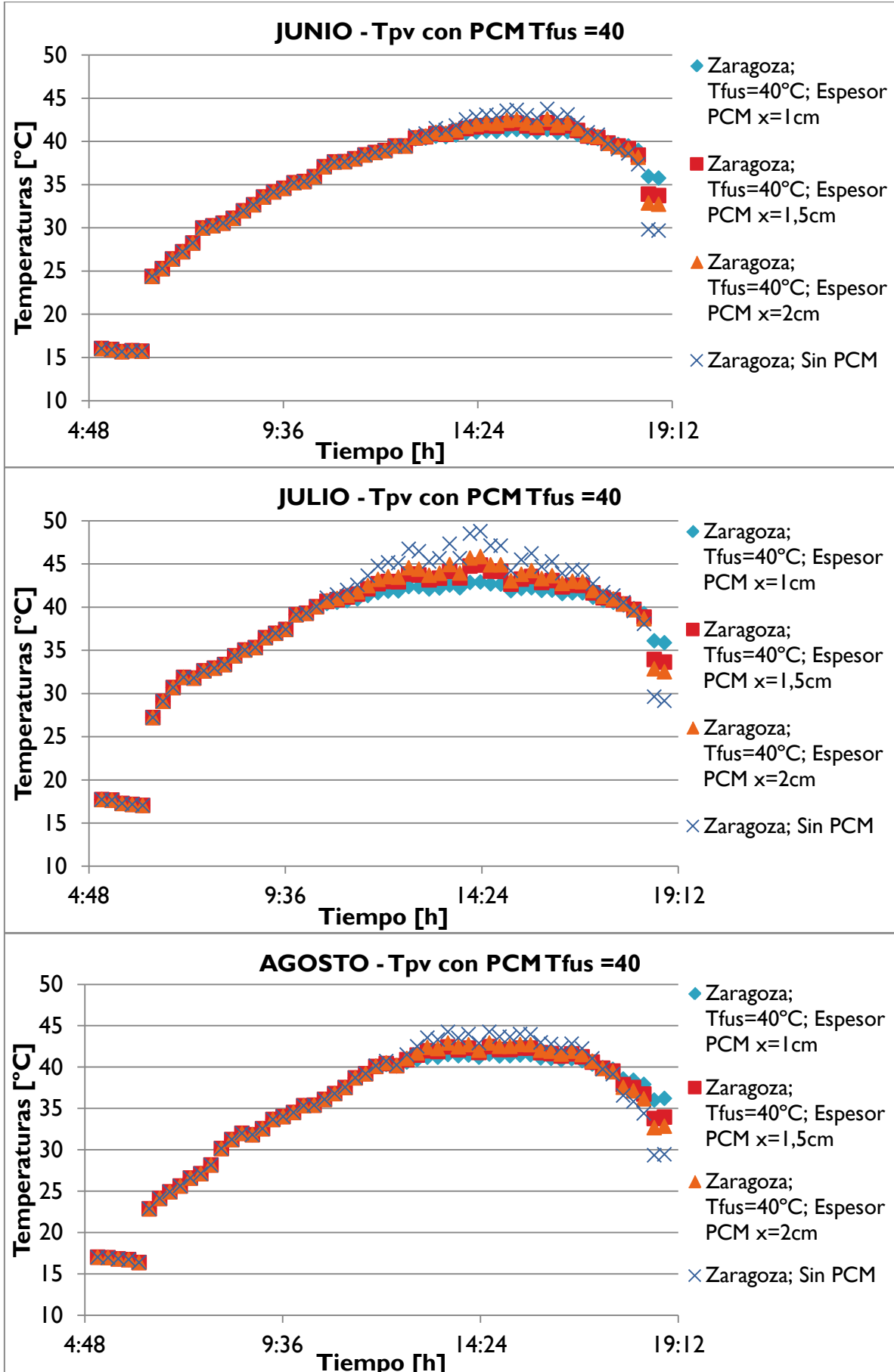


► Eficiencia de conversión con y sin PCM  $T_{fus}=32^{\circ}\text{C}$

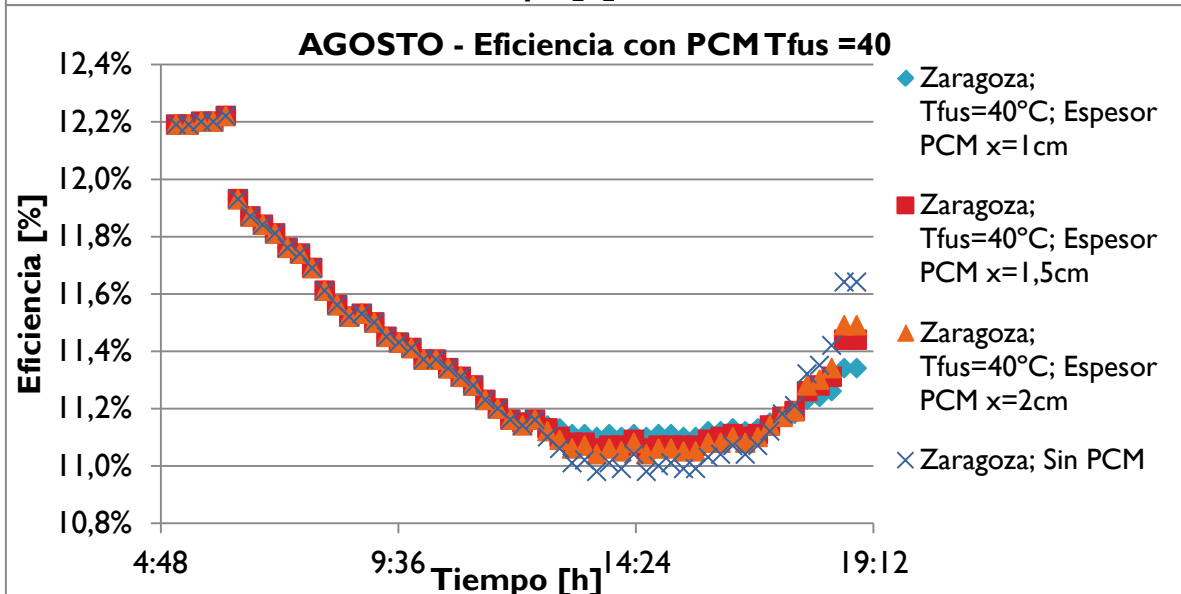
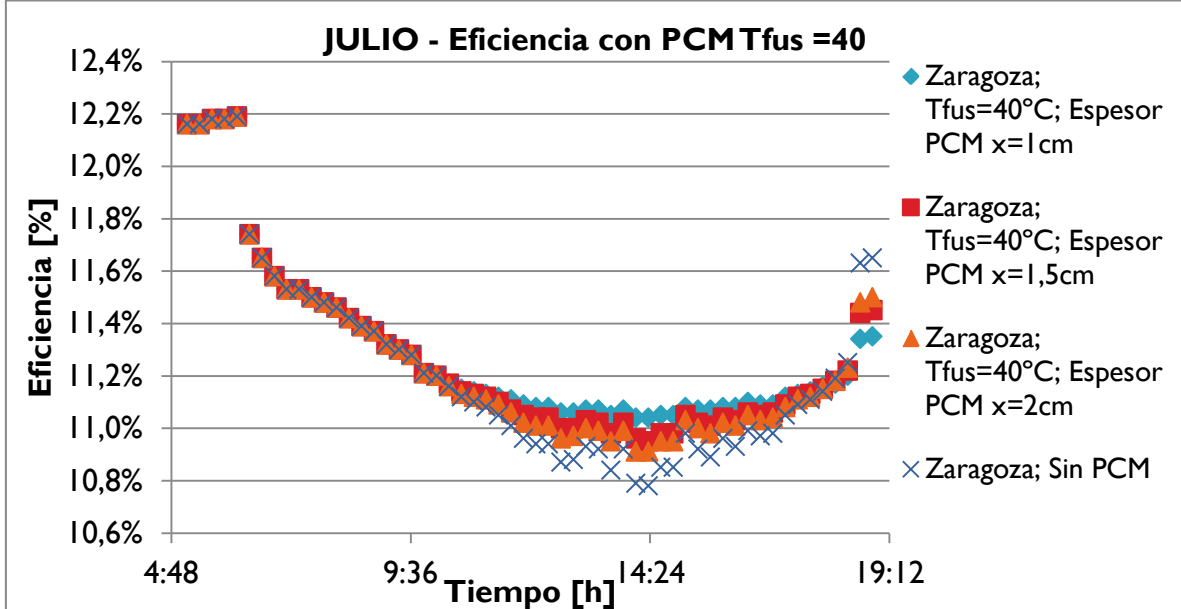
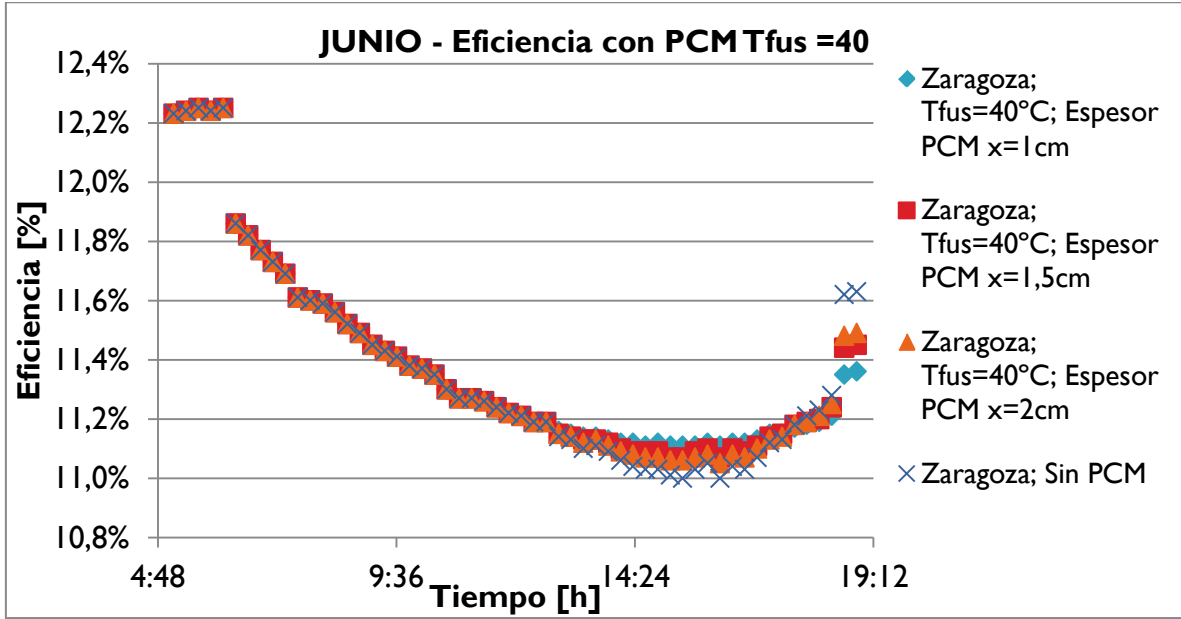




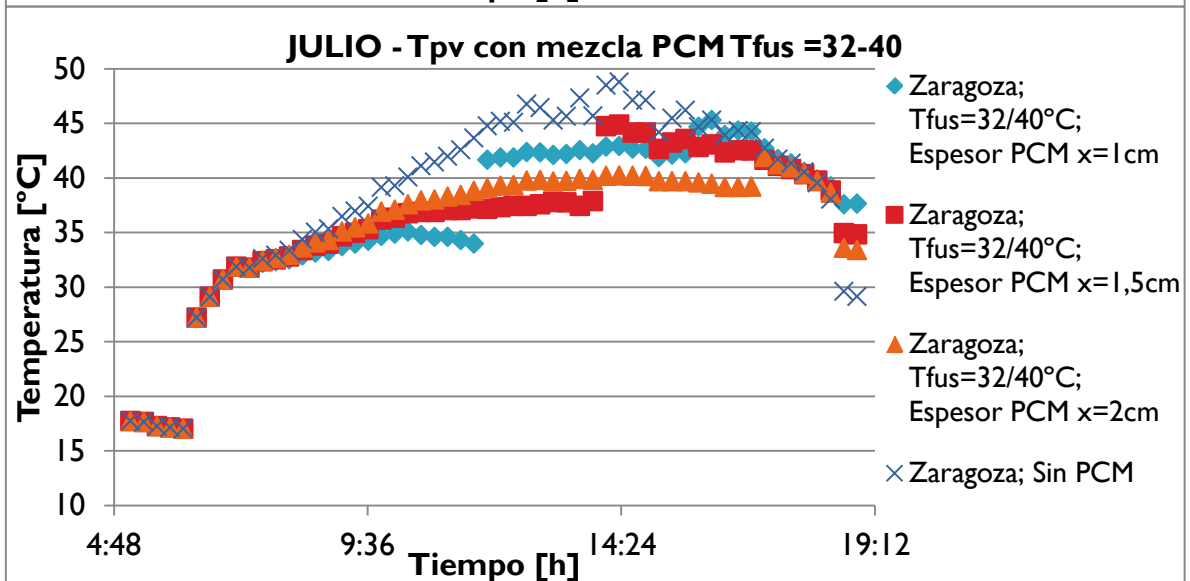
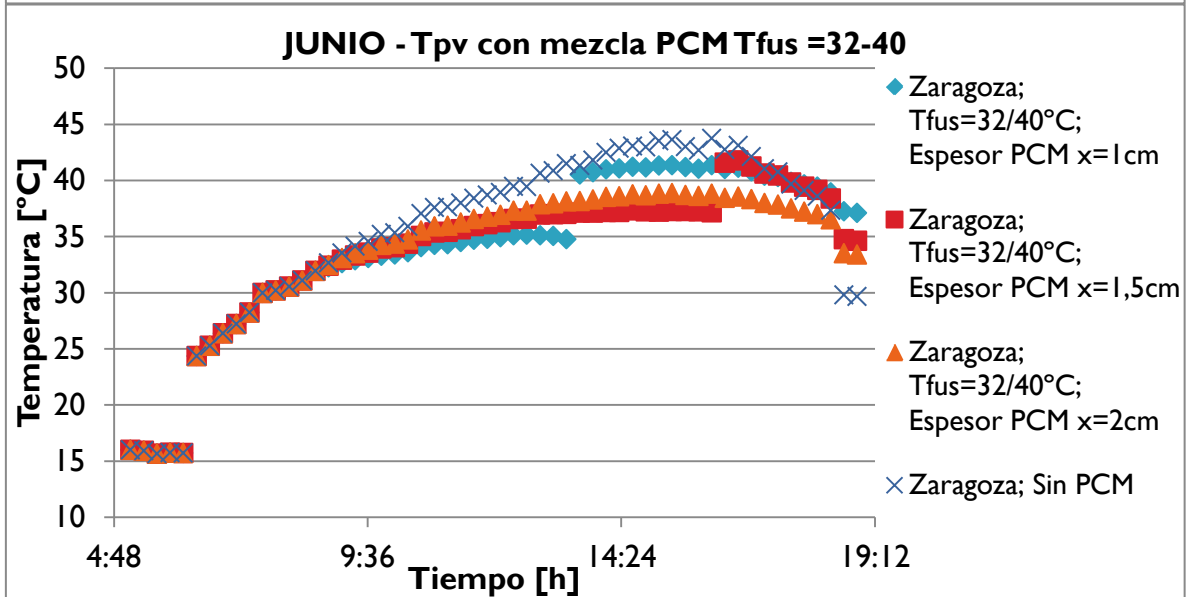
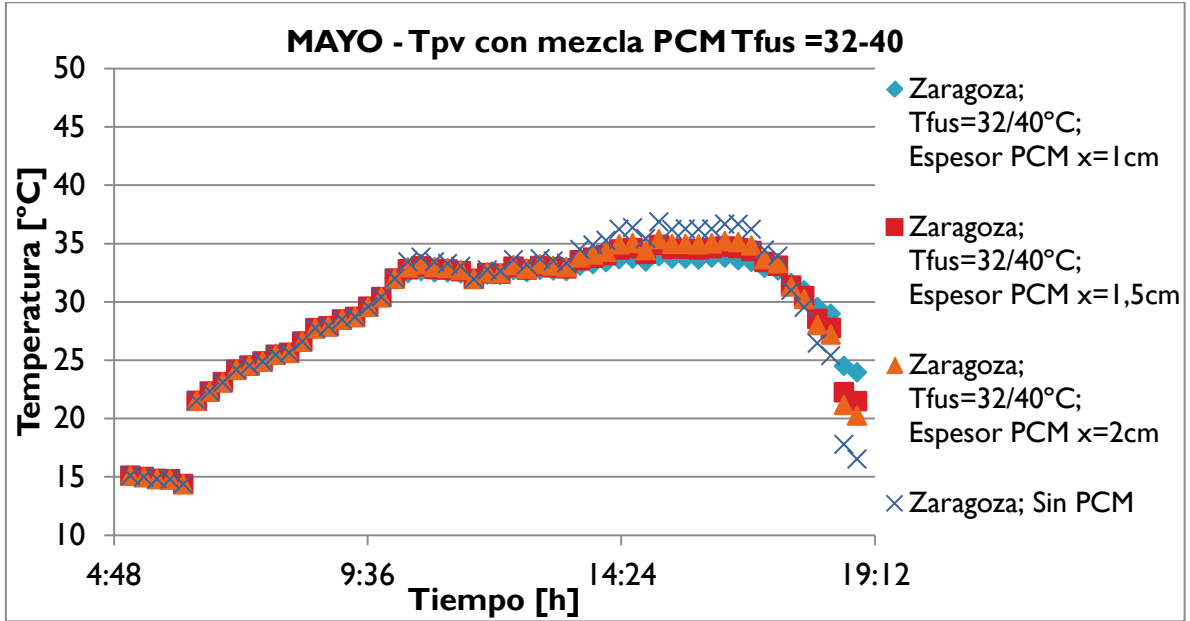
► Temperatura de operación con y sin PCM  $T_{\text{fusion}}=40^{\circ}\text{C}$

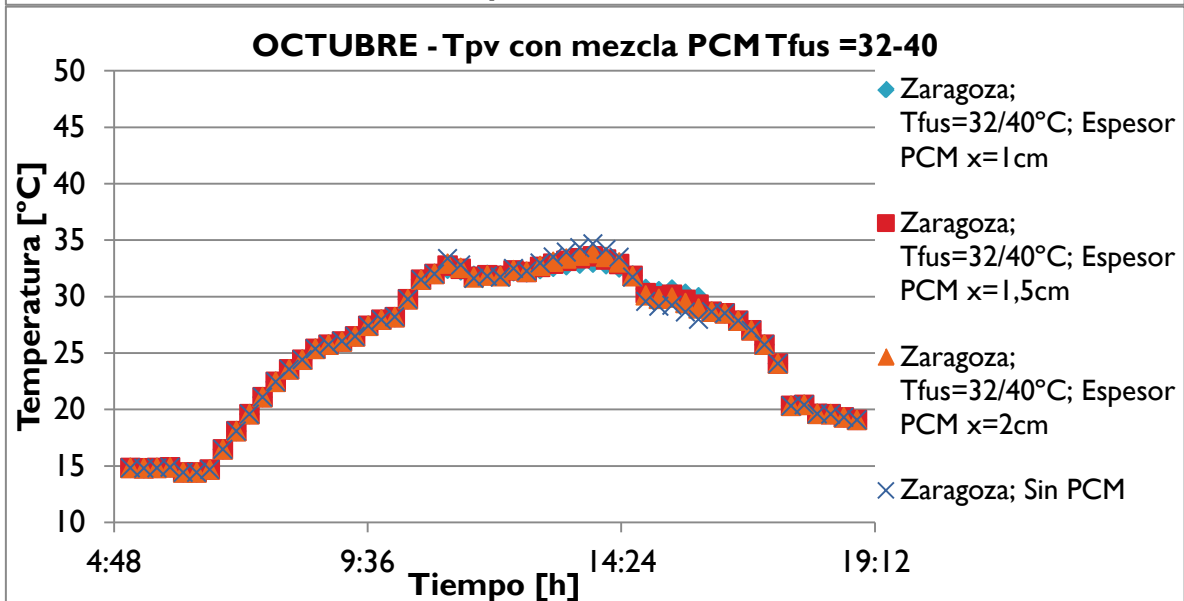
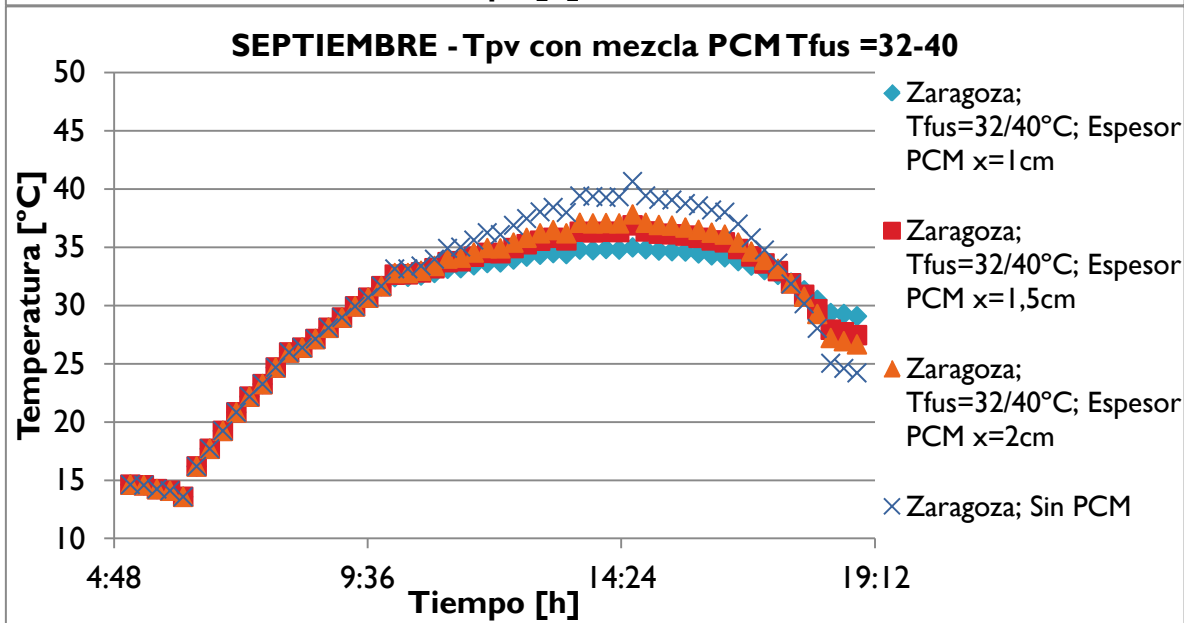
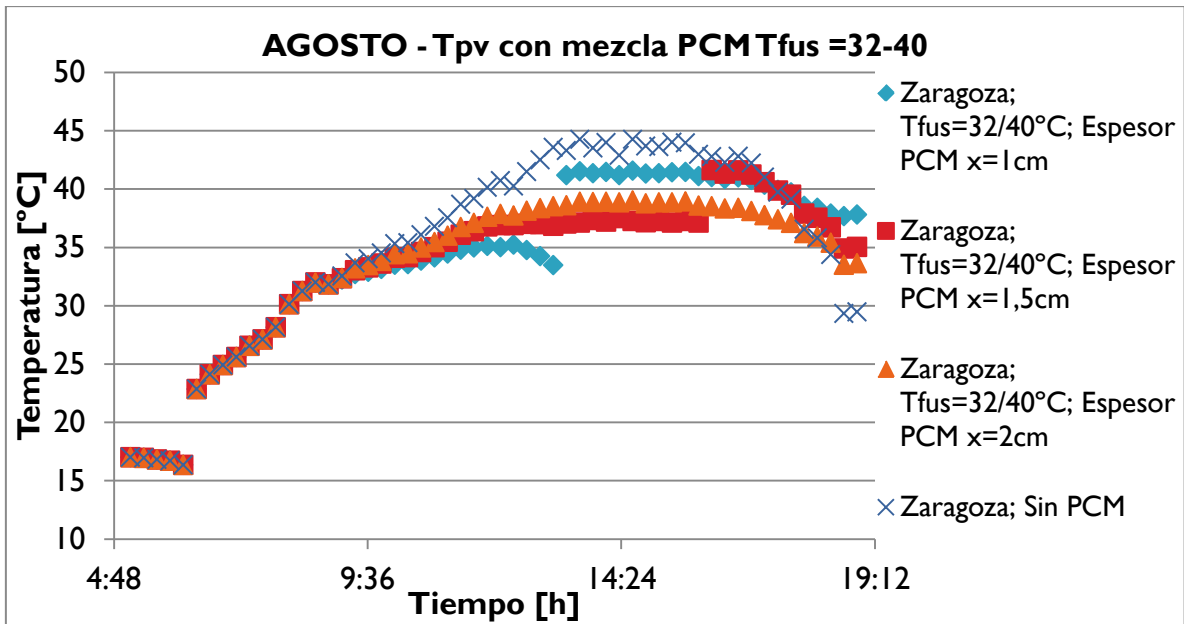


► Eficiencia de conversión con y sin PCM  $T_{fus}=40^{\circ}\text{C}$

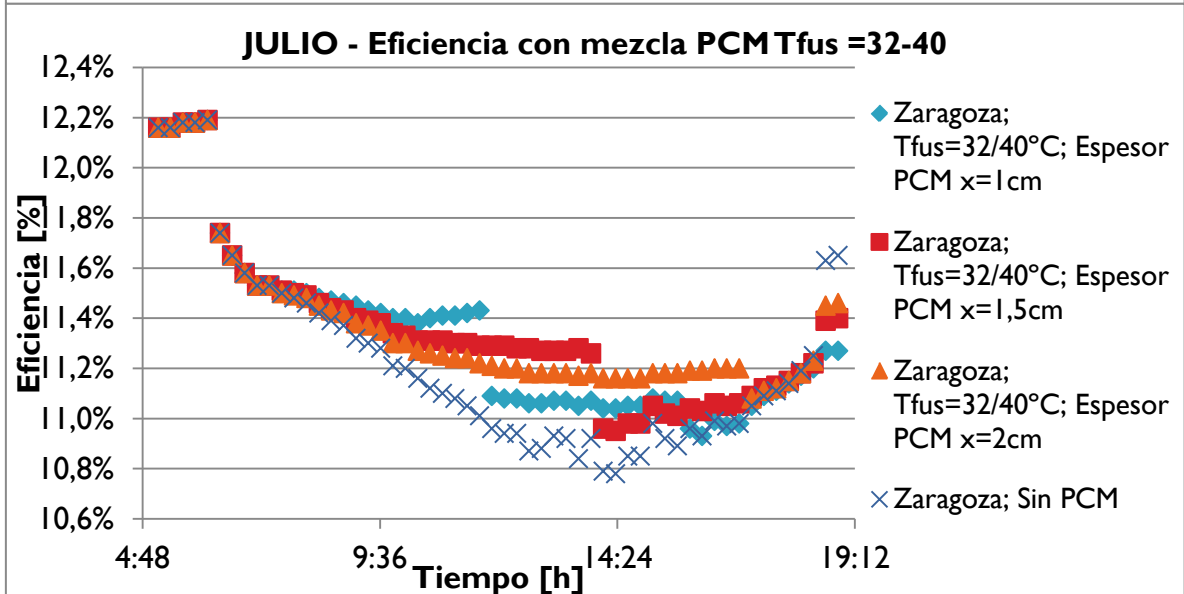
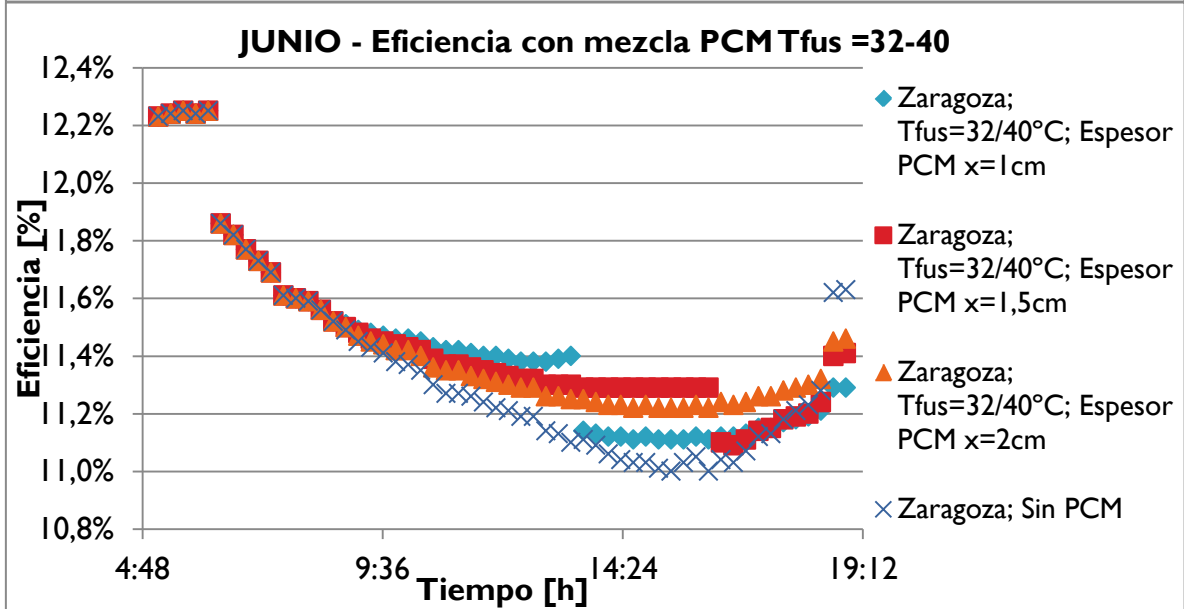
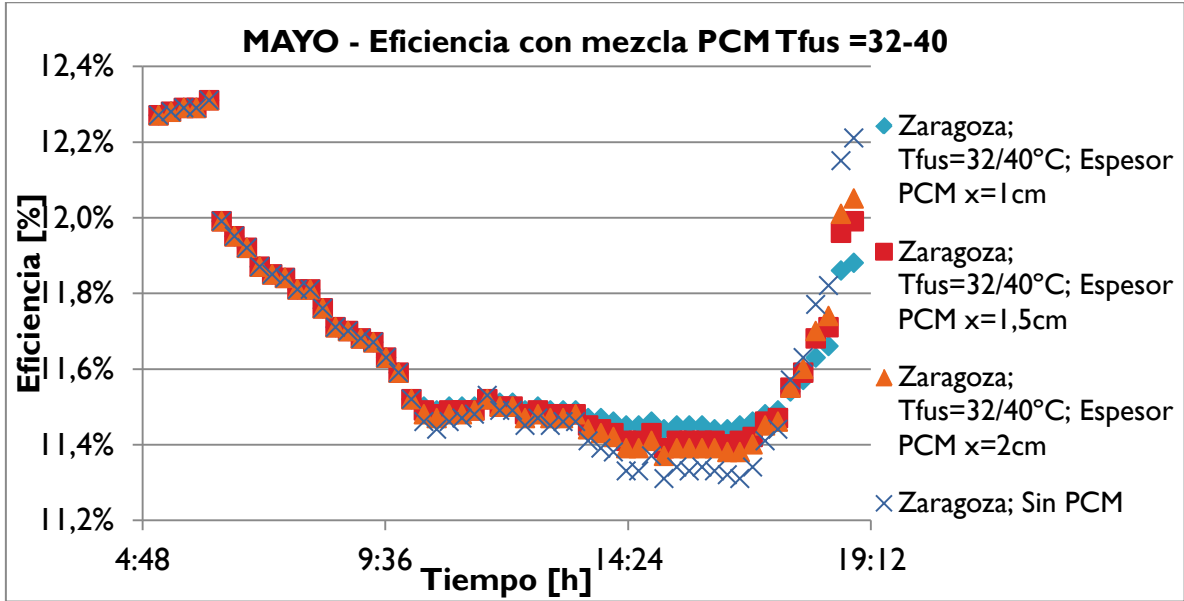


► **Temperatura de operación con y sin PCM  $T_{fus}=32/40^{\circ}C$**





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





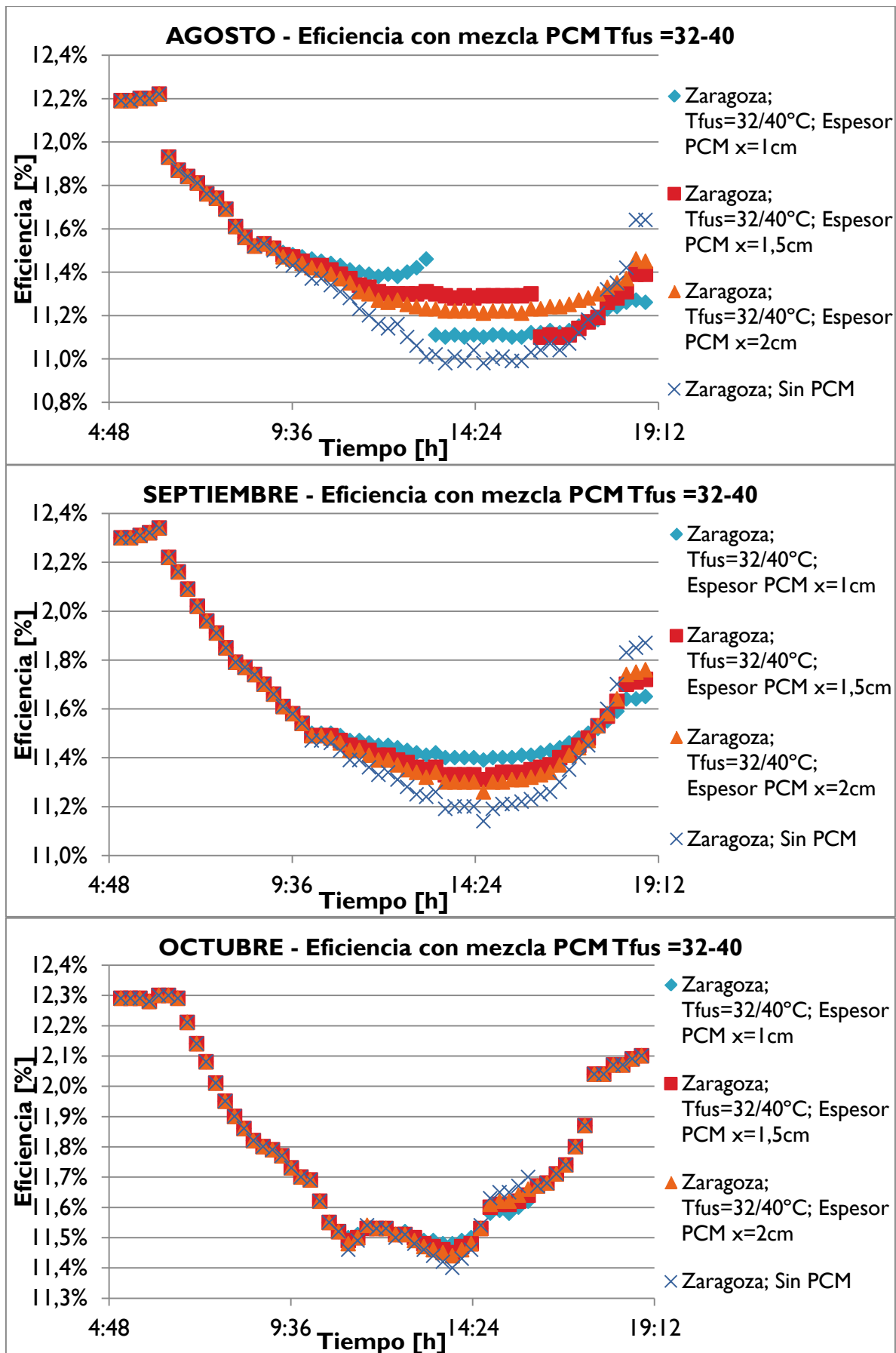
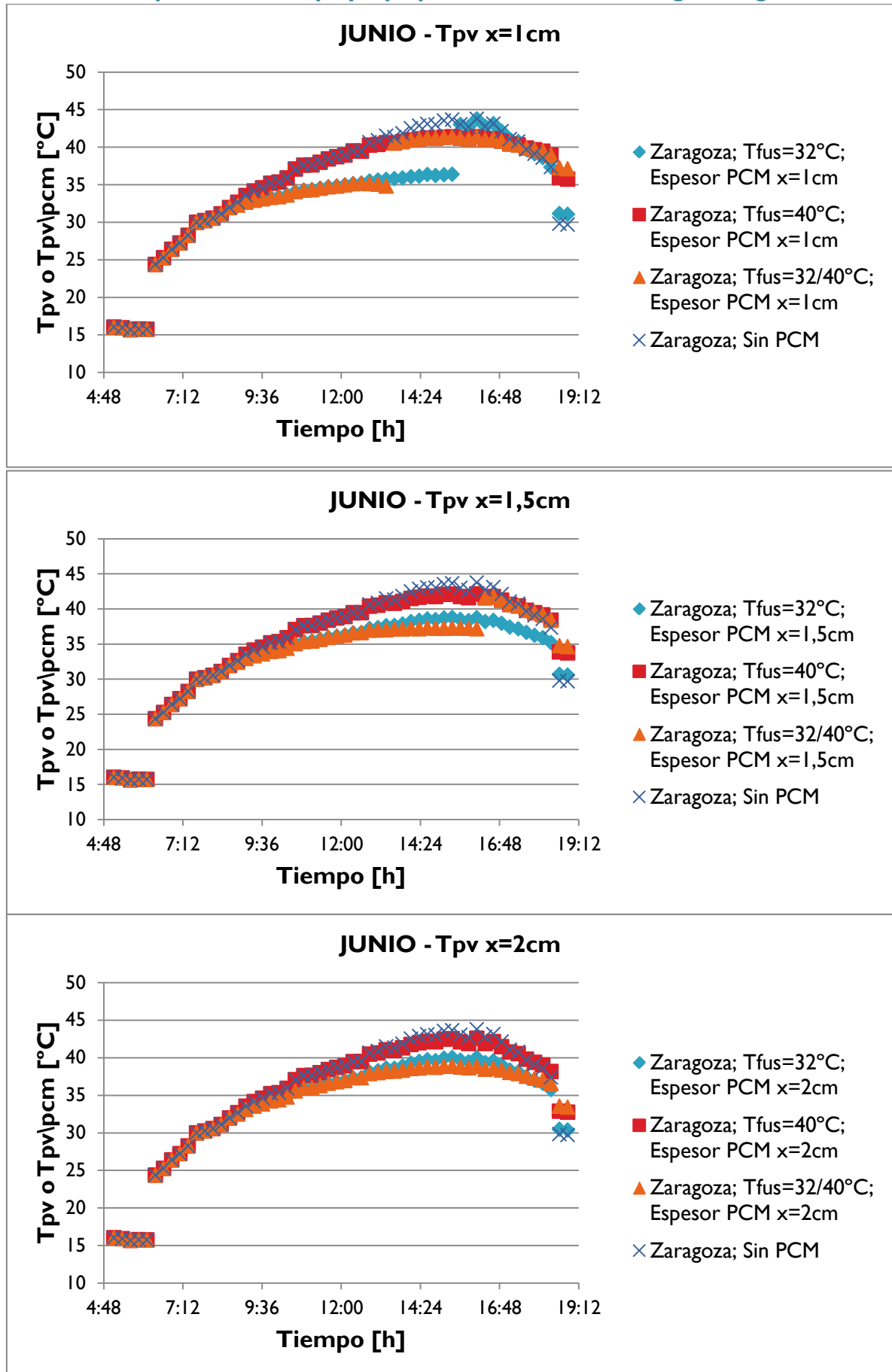
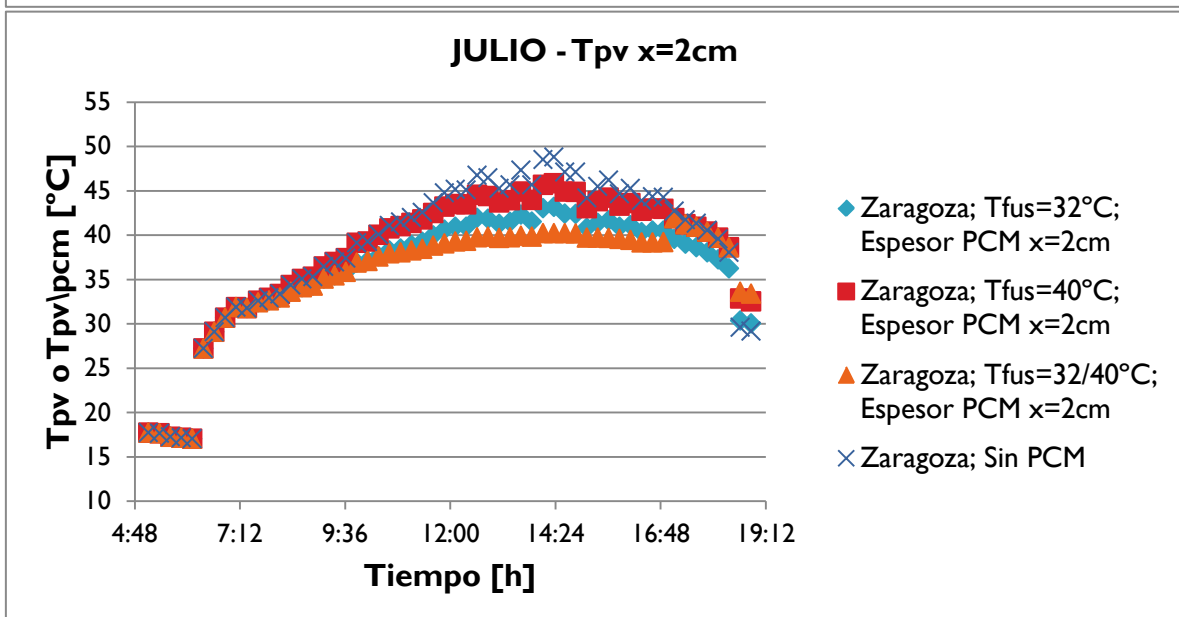
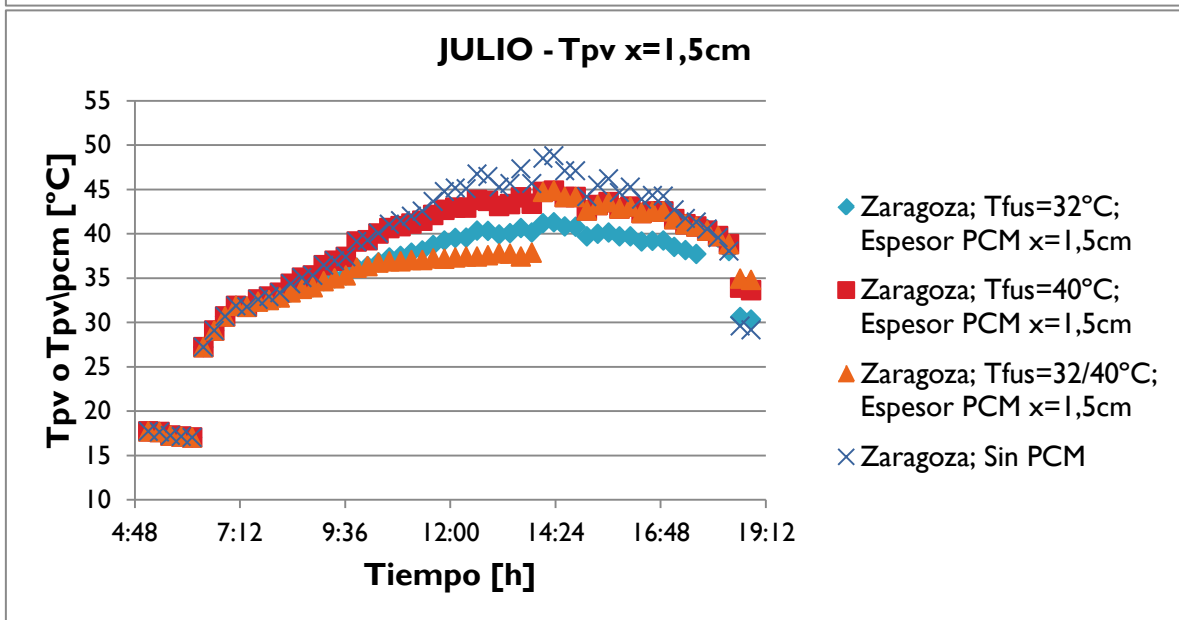
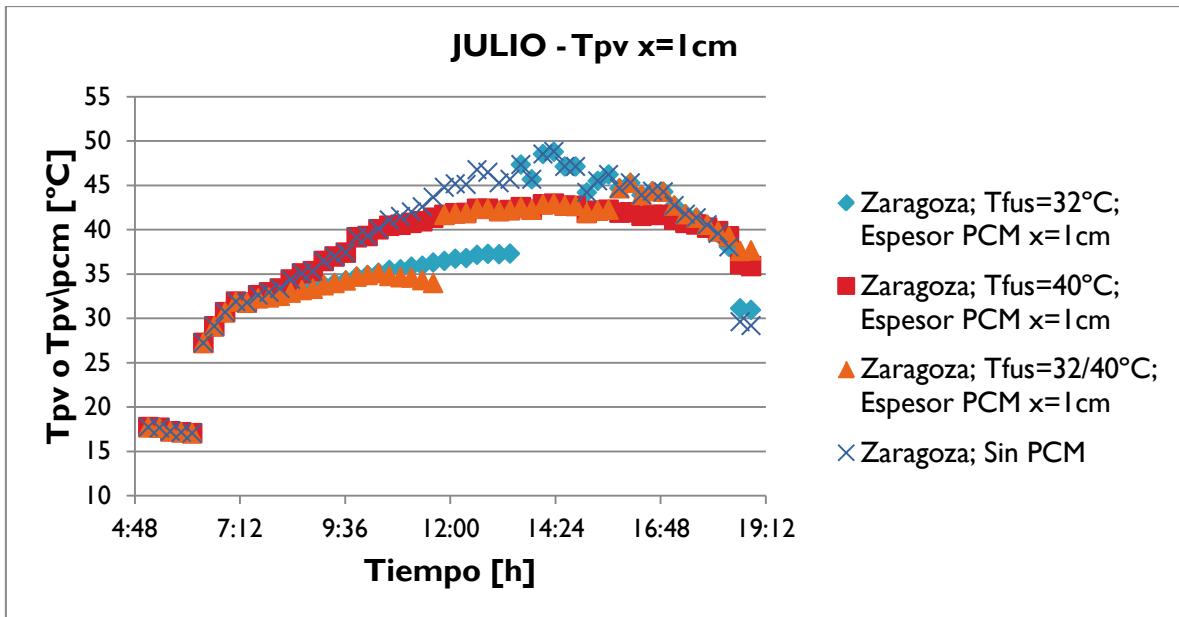


Figura D-I. Comparación de  $T_{pv}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] y  $\eta_{pv}$  [%] con y sin PCM en función de  $T_{fusion}$  para Zaragoza

Gráficas comparativas de  $T_{pv}$  y  $T_{pv}/pcm$ : alternativas Zaragoza según x





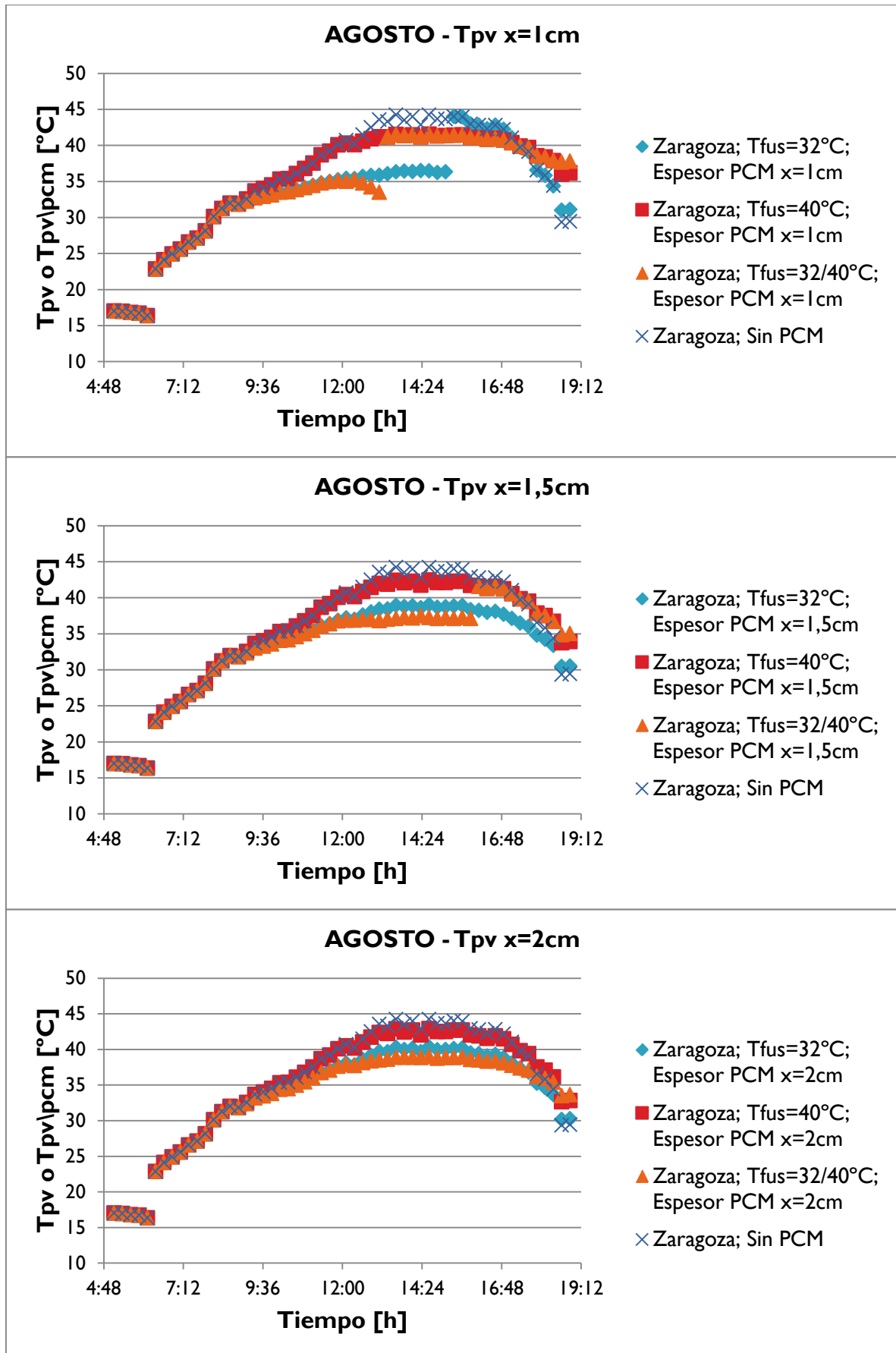


Figura D-2. Comparación de Tpv [°C] con y sin PCM en función del espesor x para Zaragoza

Comparación de los mejores comportamientos de PCM en BIPV Zaragoza

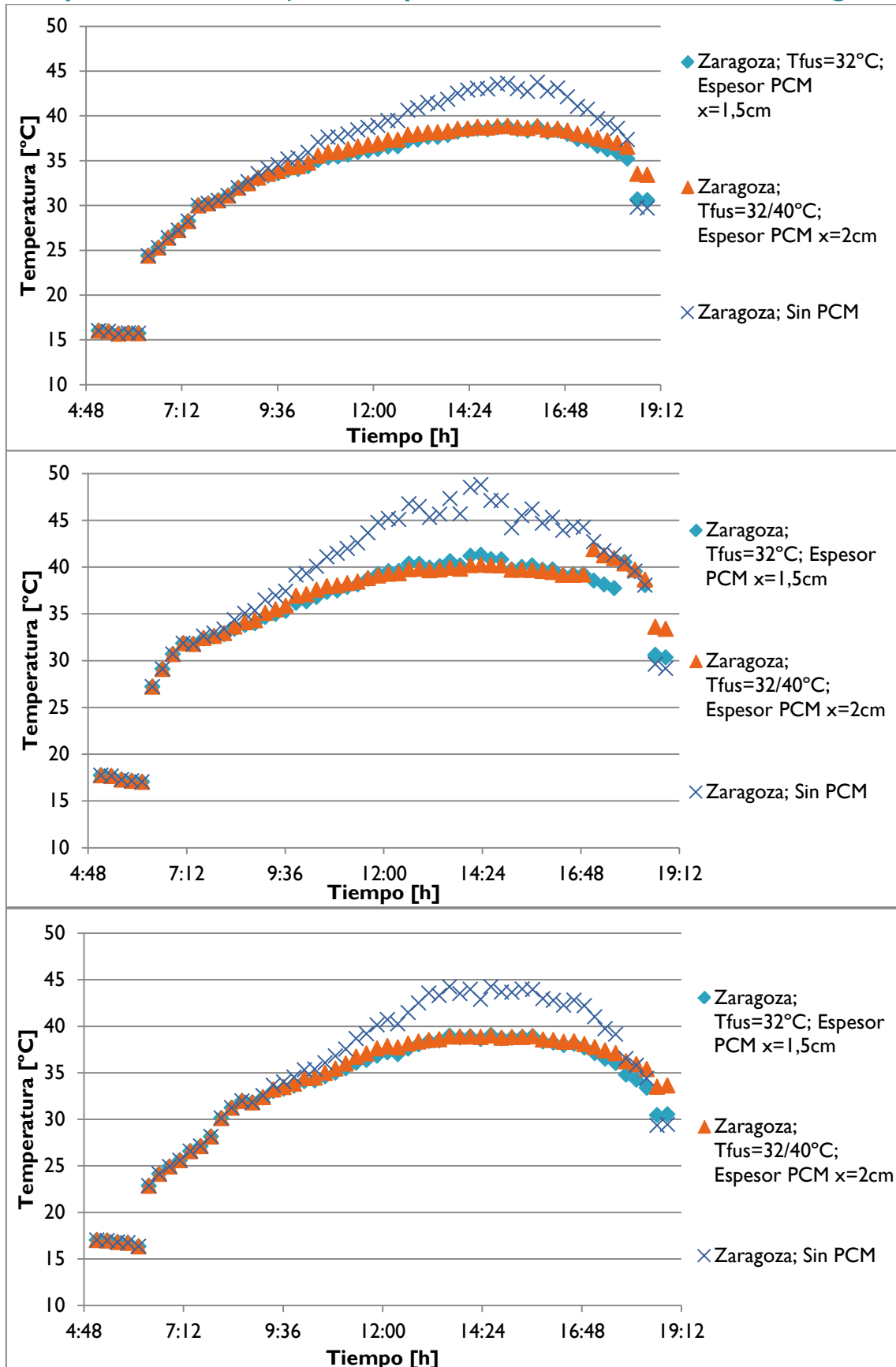


Figura D-3. Comparación de  $T_{pv}$  [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Zaragoza

## 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.

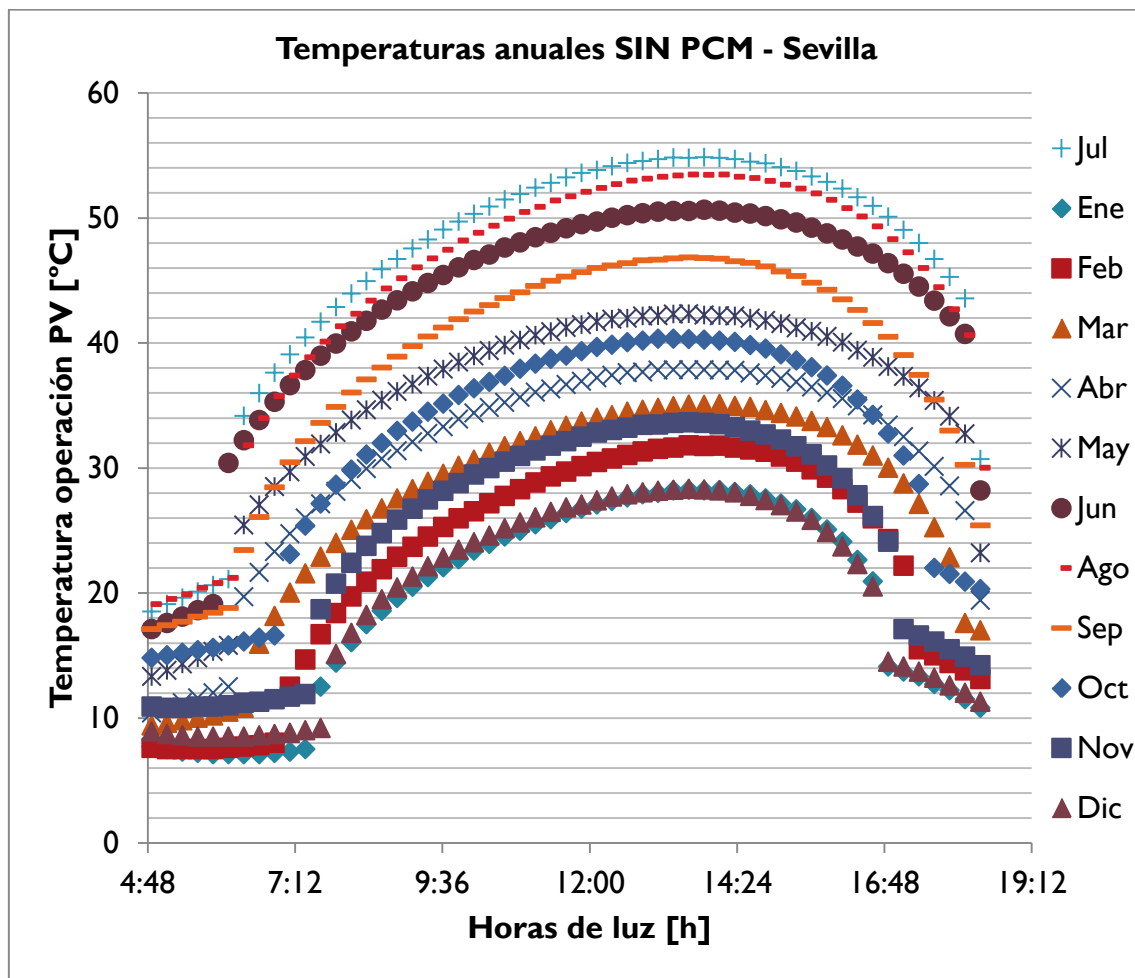


Figura D-4. Tpv anuales SIN PCM en Sevilla [°C]

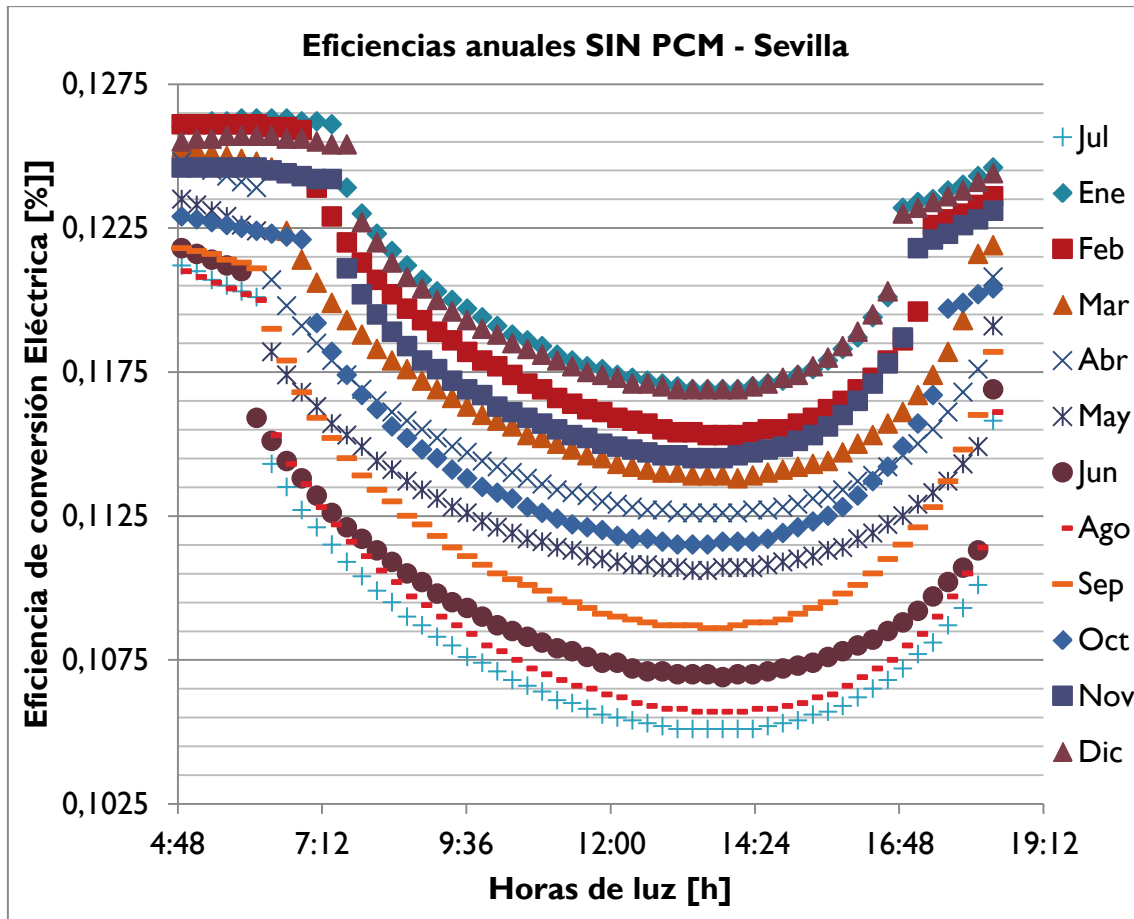
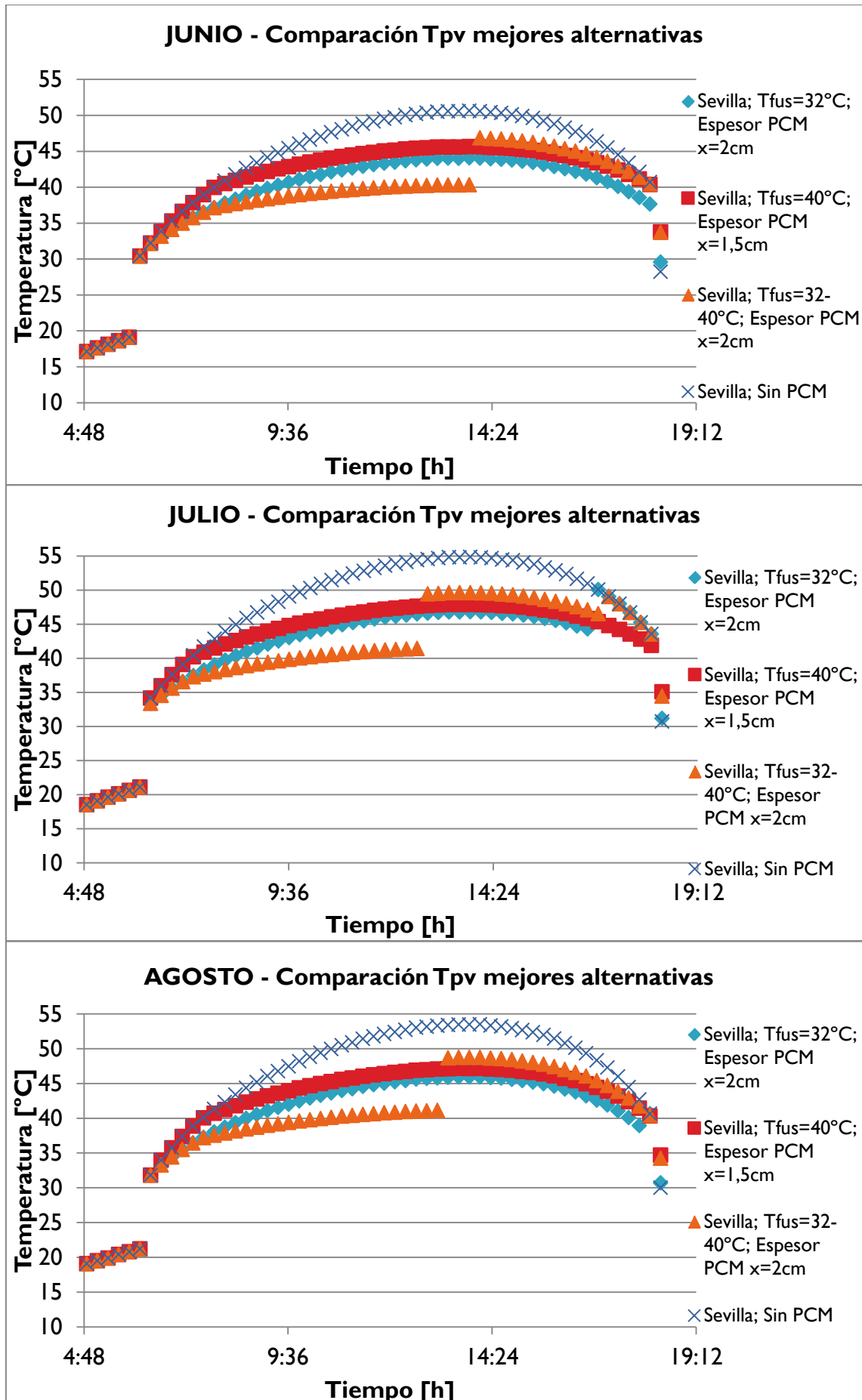


Figura D-5. Eficiencias anuales SIN PCM en Sevilla  $\eta_{pv}[\%]$

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  $850\text{W}/\text{m}^2$ ) 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  $30^{\circ}\text{C}$ .

Se han realizado el proceso de cálculo expuesto en *Caracterización del comportamiento de las variables de operación de BIPV con y sin PCM* 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 PCM1 y el PCM2 muestran comportamientos similares, a diferencia de que el primero consigue una mayor reducción  $T_{pv} - T_{pv\backslash pcm}$ . Por otro lado, la mezcla de los dos PCM es quien proporciona la máxima diferencia de hasta  $10^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, llega un momento en el que se produce un salto brusco en su  $T_{pv\backslash pcm}$ , elevando la temperatura por encima de las dos anteriores.





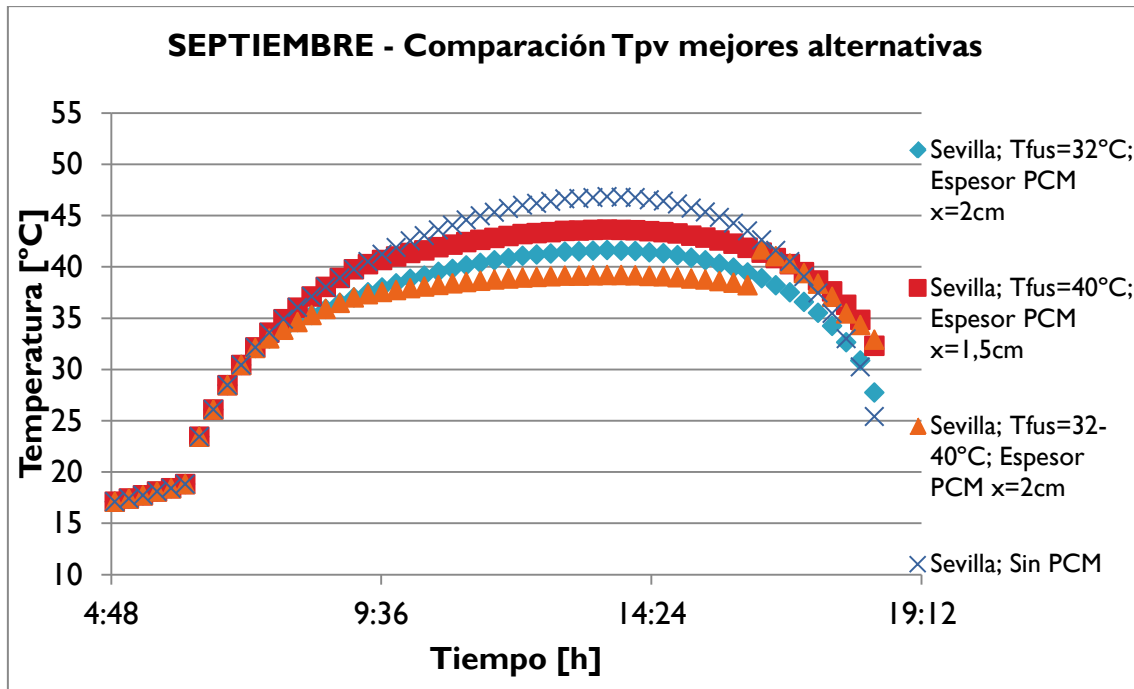


Figura D-6. Comparación de temperaturas [°C] con y sin PCM de las mejores alternativas para Sevilla

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  $T_{\text{fusión}}=40^\circ\text{C}$  y  $x=1.5\text{cm}$  sí que actuaría a lo largo de todo el día, sin embargo  $T_{pv\backslash pcm}$ , aún regulado con una reducción de  $7^\circ\text{C}$ , 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?tkev|search\\_for=boltzman](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tkev|search_for=boltzman)),  $E_a$  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  $E_a$  de 0.6 eV (Kurtz y col., 2009).

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

**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 Análisis simplificado de las implicaciones ambientales en términos de huella de carbono de la incorporación de PCM en BIPV y Análisis económico.

**Tabla E-1.  $R_D$  en función de  $T_{pv}$  para dos valores de  $E_a$**

T1 [°C]	T2 [°C]	T1 [K]	T2 [K]	R (k.Bolt) [eV/K]	$E_a$ [eV]	$\ln(R_{D1}/R_{D2})$	$R_{D1}/R_{D2}$	$R_{D2}/R_{D1}$
30	29	303	302	0,00008617	0,6	0,0760905	1,08	0,93
40	39	313	312	0,00008617	0,6	0,07129862	1,07	0,93
50	49	323	322	0,00008617	0,6	0,06694554	1,07	0,94
30	27,5	303	300,5	0,00008617	0,6	0,19117581	1,21	0,83
40	37,5	313	310,5	0,00008617	0,6	0,17910764	1,20	0,84
50	47,5	323	320,5	0,00008617	0,6	0,16814714	1,18	0,85
30	25	303	298	0,00008617	0,6	0,38555927	1,47	0,68
40	35	313	308	0,00008617	0,6	0,36112287	1,43	0,70
50	45	323	318	0,00008617	0,6	0,33893811	1,40	0,71

T1 [°C]	T2 [°C]	T1 [K]	T2 [K]	R (k.Bolt) [eV/K]	Ea [eV]	ln(Rd1/Rd2)	Rd1/Rd2	Rd2/Rd1
30	29	303	302	0,00008617	1,1	0,13949926	1,15	0,87
40	39	313	312	0,00008617	1,1	0,13071413	1,14	0,88
50	49	323	322	0,00008617	1,1	0,12273349	1,13	0,88
30	27,5	303	300,5	0,00008617	1,1	0,35048899	1,42	0,70
40	37,5	313	310,5	0,00008617	1,1	0,328364	1,39	0,72
50	47,5	323	320,5	0,00008617	1,1	0,30826976	1,36	0,73
30	25	303	298	0,00008617	1,1	0,70685866	2,03	0,49
40	35	313	308	0,00008617	1,1	0,66205859	1,94	0,52
50	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-ETSAP 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*.

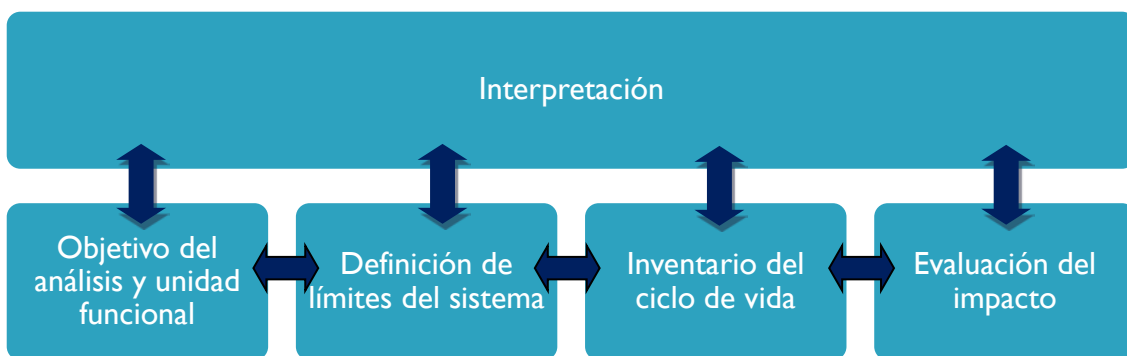


Figura E-1. Fases principales y estructura para la realización de un ACV

### ► 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 (GWPI100), 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.- *Análisis de los parámetros críticos de diseño* 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 (m3)
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/m3)=	2700		Masa Al (kg)=	<b>8,34</b>

**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%
<b>Masa (kg)</b>	20	<b>8,8</b>	<b>11,2</b>

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:  $300\text{km} \cdot 20\text{kg} = 6000\text{km} \cdot \text{kg}$
- 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:  $300\text{km} \cdot 48\text{kg} = 14400\text{km} \cdot \text{kg}$
- 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  $E_a$  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:  $R_{D1}/R_{D2} = 0.88$
- Caso B - Para una reducción de 2.5°C:  $R_{D1}/R_{D2} = 0.72$
- Caso C - Para una reducción de 5°C:  $R_{D1}/R_{D2} = 0.52$

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:

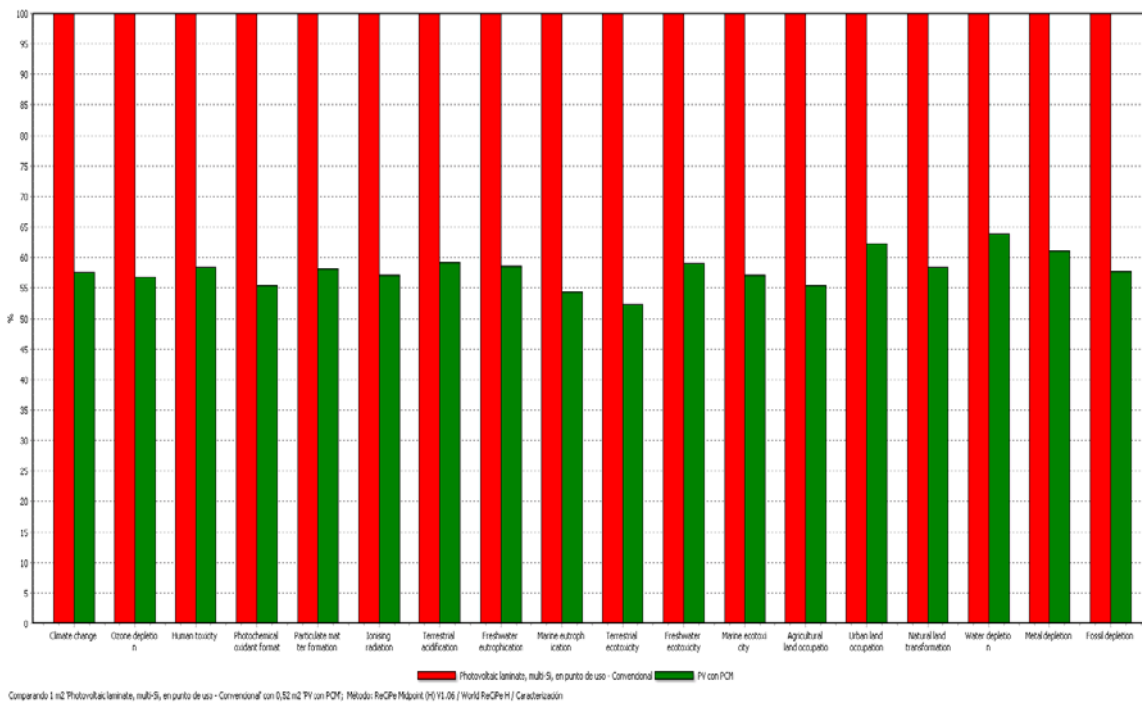
**Tabla E-4. Indicadores criterios de impacto ambiental del método RECIPE para el ACV de un sistema PV respecto a un sistema PV+PCM**

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 partículas</b>	kg P eq	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,04
<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 1,4-DB eq	0,48	0,43	0,48	0,35	0,48	0,25
<b>Ecotoxicidad marina</b>	kg 1,4-DB eq	1,24	1,24	1,24	1,01	1,24	0,73
<b>Radiación ionizante</b>	kg 1,4-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 RECIFE 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 *Materiales de cambio de fase: PCM*, 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
<b>G media</b> [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	3,7 8	3,1
<b>Eficiencia [%]</b>	11, 5	11,5	11,5	11, 5	11, 5	11, 5	11, 5	11, 5	11, 5	11, 5	11, 5	11, 5
<b>Nº días mes</b> [día/año]	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
<b>Ahorro Energético</b> [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, 04	11, 05

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/m2		
<b>Área BIPV</b>	4	m2		
<b>Potencia Pico</b>	0,25	kW PV/m2		
<b>Potencia Pico instalada</b>	1	kW PV		
Precio		Cantidad	Coste €	
<b>Aluminio segunda</b>	1,376	€/kg	8,34 kg	11,48
<b>PCM</b>	5	€/kg	20 kg	100
<b>PV</b>	300	€/ud	1ud	300
<b>Electricidad 2013</b>	0,130485	€/kWh	911,12 kWh	118,89
<b>Mantenimiento</b>	25	€/kW PV/año	1kW PV	25
<b>Instalación</b>	2000	€/kW PV	1kW PV	2000
<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 MATENIMIENTO (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>	<b>15.1</b>	<b>15.6</b>	<b>11.3</b>	<b>6.4</b>

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°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  $t_L$ .

