

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Optimización de la temperatura de cambio de fase en  
PCM para refrigeración de módulos fotovoltaicos en  
función de las condiciones climáticas.

Autor: Rocío Pérez Gallardo

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

**Dpto. de Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



# **Optimización de la temperatura de cambio de fase en PCM para refrigeración de módulos fotovoltaicos en función de las condiciones climáticas.**

Autor:

Rocío Pérez Gallardo

Tutor:

Isidoro Lillo Bravo

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Optimización de la temperatura de cambio de fase en PCM para refrigeración de módulos fotovoltaicos en función de las condiciones climáticas.

Autor: Rocío Pérez Gallardo

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*

El uso de materiales de cambio de fase para la refrigeración del panel fotovoltaico es uno de los métodos más estudiados actualmente.

El aumento de la temperatura de la célula reduce la eficiencia del panel y, por tanto, la producción de energía eléctrica, por lo que es necesario reducir la temperatura de la célula mediante un método de refrigeración. En este caso, se estudia la incorporación de una capa de material de cambio de fase al panel.

Este trabajo se centra en analizar la influencia de una de las hipótesis simplificativas utilizadas en el artículo que toma como referencia, el cual calcula la mejora que se produce en la producción eléctrica al utilizar refrigeración mediante materiales de cambio de fase respecto a no utilizar refrigeración, en distintas ciudades con distintos climas. Dicha hipótesis simplificada se basa en no tener en cuenta la nubosidad a la hora de calcular la temperatura a la que se encuentra el cielo (suponiendo esta temperatura como una función de la temperatura ambiente únicamente), la cual interviene en los intercambios energéticos del panel con el ambiente, y, por tanto, en la refrigeración del panel. De esta manera, este trabajo se basa en estudiar la influencia del resto de los parámetros en función de los cuales se puede expresar la temperatura del cielo en los intercambios energéticos del panel, y, por tanto, en la producción de energía eléctrica. Para ello, se lleva a cabo la optimización de la temperatura de cambio de fase del material que maximiza la energía eléctrica producida utilizando un modelo de cielo despejado, o y otro de cielo nublado, y se comparan los resultados obtenidos.

# Abstract

---

The use of phase change materials in the cooling of photovoltaic panels is one of the most studied methods currently.

The increase of the cell temperature reduces the efficiency of the panel and, therefore, decreases the production of electrical energy, for which it is necessary to reduce the temperature of the cell by means of a cooling method. In this case, the incorporation of a layer of phase change material to the panel is studied.

This work focuses on analysing the influence of one of the simplifying hypotheses used in the article taken as a reference, which calculates the improvement of electricity production when using cooling by phase change materials with respect to not using a cooling method, in different cities with different climates. This simplifying hypothesis is based on not considering the cloudiness when calculating the sky temperature (assuming this temperature as a function of the ambient temperature only), which takes part in the energy exchange of the panel with the environment, and therefore, in the cooling of the panel. Consequently, this work is based on studying the influence of the rest of the parameters that defines the sky temperature in the energy exchange of the panel, and therefore, in the production of electrical energy. For this, the optimization of the phase change temperature of the material that maximizes the electrical energy produced using a clear sky model, and another of cloudy sky, is carried out and the results obtained are compared.

<b>Resumen</b>	v
<b>Abstract</b>	vi
<b>Índice</b>	vii
<b>Índice de tablas</b>	ix
<b>Índice de figuras</b>	x
<b>Notación</b>	xii
1. Introducción	1
2. Objeto	3
3. Revisión bibliográfica	4
4. Tecnología fotovoltaica	6
4.1. La célula solar	6
4.2. Parámetros característicos	7
4.3. Influencia de la irradiancia	8
4.4. Influencia de la temperatura	9
5. Materiales de cambio de fase	10
5.1. Características deseables de los PCM	10
5.2. Proceso de cambio de fase	12
5.2.1. Almacenamiento de energía en forma de calor latente	12
5.2.2. Características del proceso	12
5.3. Clasificación de los materiales	13
5.3.1. PCM inorgánicos	14
5.3.1.1. Sales hidratadas	14
5.3.2. PCM orgánicos	15
5.3.2.1. Parafinas	15
5.3.2.2. Ácidos grasos	16
5.4. Aplicación fotovoltaica	17
6. Descripción del modelo PV-PCM	18
6.1. Montaje del conjunto PV-PCM	18
6.2. Selección del PCM	19
6.3. Propiedades térmicas	20
6.3.1. Panel fotovoltaico (PV)	20
6.3.2. Contenedor de aluminio	20

6.3.3. Capa de PCM	21
6.3.3.1. Método de la capacidad térmica efectiva	22
6.3.3.2. Método de la entalpía	23
6.4. Balance energético	25
6.4.1. Parámetros usados en el estudio	27
6.4.1.1. Modelo de cielo nublado	28
6.4.1.2. Modelo de referencia	28
6.5. Modelo numérico	29
6.6. Datos climáticos	29
6.6.1. Método hora a hora	30
6.7. Optimización	31
6.8. Resultados del modelo de referencia	31
7. Resultados	32
7.1. Estudio previo	32
7.1.1. Influencia de $K_o$ y $P_d$ sobre la $T_{\text{cielo}}$	32
7.1.2. Influencia de la nubosidad sobre la producción de potencia eléctrica	35
7.1.2.1. Influencia de la nubosidad sobre el intercambio radiativo	39
7.1.2.2. Evolución de la temperatura de las capas del panel	41
7.1.3. Conclusiones del estudio previo	44
7.2. Resultados obtenidos	46
8. Conclusiones	58
9. Líneas de investigación futuras	59
<b>Referencias</b>	60



# Índice de Tablas

---

Tabla 1: Ventajas e inconvenientes de las sales hidratadas	14
Tabla 2: Ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos	17
Tabla 3: Propiedades de las capas que forman el conjunto PC-PCM	21
Tabla 4: Propiedades térmicas del PCM	25
Tabla 5: Parámetros usados en el balance energético	27
Tabla 6: Localización geográfica de las ciudades estudiadas	29
Tabla 7: Temperaturas óptimas de cambio de fase mes a mes, utilizando el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF). Diferencia entre la mejora obtenida por REF y la obtenida por NUB.	51
Tabla 8: Temperaturas óptimas de cambio de fase mes a mes, utilizando el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF). Diferencia entre la mejora obtenida por REF y la obtenida por NUB	57

# Índice de Figuras

Figura 1: Estructura de la célula solar, diferenciando las capas que la componen	6
Figura 2: Circuito equivalente de la célula solar	7
Figura 3: Curva I-V de una célula solar	7
Figura 4: Curva I-V de una célula solar para diferentes valores de irradiancia	8
Figura 5: Curva I-V de una célula solar para diferentes valores de temperatura	9
Figura 6: Curva de estado del PCM e intercambio energético en cada estado	10
Figura 7: Clasificación de los materiales utilizados para almacenamiento térmico	13
Figura 8: Clasificación de los PCM según su temperatura de fusión y entalpía	13
Figura 9: Curvas de enfriamiento y calentamiento	14
Figura 10: Capas del sistema PV-PCM	19
Figura 11: Capacidades térmicas en el proceso de cambio de fase según el método de la entalpía (“Enthalpy”) y el de la capacidad térmica efectiva (“Eff”) para diferentes rangos de temperaturas (7°C y 2°C).	22
Figura 12: Evolución de la capacidad térmica en función de la temperatura en el método de la capacidad térmica efectiva [27]	22
Figura 13: Evolución de la entalpía en el método de la entalpía [27]	23
Figura 14: Diagrama que muestra los flujos entrantes y salientes del sistema PV-PCM. La línea negra gruesa representa el intercambio de calor por conducción entre las capas. Los números entre paréntesis indican el orden de las capas [5]	26
Figura 15: Superficie que representa la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ). Los diferentes colores representan los intervalos de temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).	33
Figura 16: Representación gráfica de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en función del coeficiente de claridad ( $K_o$ ). Cada curva de distinto color representa un valor constante de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ).	33
Figura 17: Representación gráfica de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ). Cada curva de distinto color representa un valor constante del coeficiente de claridad ( $K_o$ ).	33
Figura 18: Representación gráfica de la temperatura de Ilustración 3 cielo ( $T_{cielo}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) para una temperatura ambiente dada de -5°C.	34
Figura 19: Representación gráfica de la temperatura de cielo ( $T_{cielo}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) para una temperatura ambiente dada de 40°C	34
Figura 20: Representación gráfica de la potencia eléctrica instantánea obtenida en las cuatro situaciones estudiadas ( $P_{NUB1}$ , $P_{NUB2}$ , $P_{NUB3}$ , $P_{NUB3}$ ) y en la situación de referencia ( $P_{REF}$ ) en un periodo de 96h. Se representa la irradiancia dividida por 10 ( $I/10$ ).	36
Figura 21: Representación del decremento de potencia eléctrica que se da en las cuatro situaciones estudiadas respecto a la situación de referencia.	36
Figuras 22, 23, 24, 25: Representación gráfica de la variación de potencia eléctrica para cada situación (1, 2, 3 y 4) frente al valor del coeficiente de claridad ( $K_o$ )	37
Figura 26: Representación gráfica de la energía total producida durante 96h en las cuatro situaciones de estudio ( $E_{NUB1}$ , $E_{NUB2}$ , $E_{NUB3}$ , $E_{NUB4}$ ) y la situación de referencia ( $E_{REF}$ ), en Wh	38

- Figura 27: Representación gráfica del intercambio de calor radiativo que se produce en las cuatro situaciones de estudio ( $Q_{rad\_NUB1}$ ,  $Q_{rad\_NUB2}$ ,  $Q_{rad\_NUB3}$ ,  $Q_{rad\_NUB4}$ ), y en la situación de referencia ( $Q_{rad\_REF}$ ) frente al tiempo (h) 39
- Figura 28: Evolución de los parámetros que intervienen en el intercambio radiativo ( $T_{cielo}$ ,  $E_{cielo}$ ,  $T_{vidrio}$ ,  $E_{vidrio}$ ) en la situación de referencia y situación de estudio 1. Se representa además la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), el coeficiente de claridad ( $K_o$ ), y la presión parcial de vapor  $Pd/1000$  (mPa) 40
- Figura 29: Evolución de los parámetros que intervienen en el intercambio radiativo ( $T_{cielo}$ ,  $E_{cielo}$ ,  $T_{vidrio}$ ,  $E_{vidrio}$ ) en la situación de referencia y situación de estudio 4. Se representa además la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ), y la presión parcial de vapor  $Pd/1000$  (mPa) 40
- Figura 30: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la célula ( $T_{cel}$ ), tres capas de PCM:  $T_{pcm(1)}$ ,  $T_{pcm(20)}$ ,  $T_{pcm(40)}$ ; temperatura de cambio de fase ( $T_m=303K$ ), temperatura de la célula sin PCM ( $T_{cel\_sinpcm}$ ), y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) utilizando el modelo de cielo nublado. (NUB) 42
- Figura 31: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la célula ( $T_{cel}$ ), tres capas de PCM:  $T_{pcm(1)}$ ,  $T_{pcm(20)}$ ,  $T_{pcm(40)}$ ; temperatura de cambio de fase ( $T_m=303K$ ), temperatura de la célula sin PCM ( $T_{cel\_sinpcm}$ ), y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) utilizando el modelo de referencia. (REF) 42
- Figura 32: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la primera capa del PCM ( $T_{pcm1}$ ) y la última capa ( $T_{pcm40}$ ) en el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF). 44
- Figura 33: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la célula ( $T_{cel}$ ) el modelo de cielo nublado (NUB), el de referencia (REF), y el modelo sin PCM ( $T_{cel\_SINPCM}$ ). 44
- Figura 34: Optimización de la energía anual de salida en función de la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ) utilizando el modelo de referencia (REF) y el modelo de cielo nublado (NUB) 46
- Figura 35: Mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C 47
- Figura 36: Energía eléctrica producida y mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C, desde enero hasta diciembre. 50
- Figura 37: Optimización de la energía anual de salida en función de la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ) utilizando el modelo de referencia (REF) y el modelo de cielo nublado (NUB) 52
- Figura 38: Mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C 53
- Figura 39: Energía eléctrica producida y mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C, desde enero hasta diciembre. 56

# Notación

---

PCM	Phase Change Material
PV	Photovoltaic Panel
$T_m$	Temperatura de cambio de fase
$K_o$	Coeficiente de claridad
$C_{cover}$	Coeficiente de nubosidad
$T_l$	Temperatura liquidus
$T_s$	Temperatura solidus
$U$	Tensión
$R$	Resistencia
$G$	Conductancia
$C$	Capacidad calorífica total
$A$	Área
$z$	Espesor
$k$	Conductividad térmica
$\rho$	Densidad
$c_p$	Calor específico
$Q$	Calor
$T$	Temperatura
$h$	Entalpía
$L$	Calor latente
$f_m$	Factor de mejora de la conductancia del PCM
$l$	Número de capas del PCM
$\alpha$	Absortancia
$\varepsilon$	Emisividad
$\eta$	Rendimiento
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$h_c$	Coeficiente de transferencia de calor
$v_v$	Velocidad del viento
REF	Modelo de referencia
NUB	Modelo de cielo nublado
$G$	Radiación
$P_d$	Presión parcial de vapor
$I$	Irradiancia

# 1 INTRODUCCIÓN

---

La producción de electricidad a través de módulos fotovoltaicos es una de las tecnologías renovables económicamente viables en la actualidad. Sin embargo, la eficiencia del panel fotovoltaico es muy baja, de manera que sólo un 15-20% de la energía incidente es transformada en electricidad, mientras que el resto de la energía se transforma en calor. Este calor puede ser absorbido por la célula fotovoltaica, aumentando su temperatura de operación hasta en 40°C por encima de la temperatura ambiente [1], de manera que la eficiencia disminuye en un 0.4-0.65% por cada grado Celsius que ésta aumenta [2].

La eficiencia de conversión de energía solar de los paneles fotovoltaicos depende de tres factores: la radiación solar, el material de la célula fotovoltaica y la temperatura de operación de ésta [3]. Puesto que la disponibilidad de la radiación solar queda fuera de nuestro control, la búsqueda y mejora de los materiales fotovoltaicos y los métodos de regulación de la temperatura de operación de la célula se han convertido en el foco de numerosas investigaciones.

Entre los métodos de refrigeración del panel fotovoltaico estudiados, se distinguen los métodos activos y los pasivos. La refrigeración por circulación natural o forzada de aire o por agua son ejemplos de métodos activos. Éstos consiguen una disipación mayor del calor, sin embargo, presentan numerosas desventajas como su consumo energético, alto coste de mantenimiento y requerimiento de suministro de agua en lugares donde la energía solar tiene un gran potencial, pero el agua es escasa, como en los desiertos. Por otro lado, ejemplos de métodos pasivos son la refrigeración por tubo termosifón bifásico (TTB) o la refrigeración termoeléctrica por efecto Peltier, cuyos costes de operación son menores pero la tasa de disipación de calor es también menor [4]. Según la bibliografía estudiada, se tiende a una mayor inclinación por los métodos pasivos.

El ejemplo más destacado de método pasivo y por el cual se decantan numerosos estudios es la refrigeración del panel fotovoltaico mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCM). El sistema PV-PCM es una tecnología que integra paneles fotovoltaicos y capas de PCM en módulos individuales. El PCM posee la alta capacidad de almacenar energía en forma de calor latente mediante su cambio de estado, de manera que actúa como disipador de calor, absorbiendo el calor que se transfiere de una célula fotovoltaica y dando lugar a una evolución favorable de la temperatura del sistema PV-PCM.

Al contrario que los métodos tradicionales (refrigeración por aire o agua), la refrigeración con PCM resulta de gran interés ya que no necesita un mantenimiento continuo ni consumo eléctrico y obtiene altas tasas de disipación de calor. Sin embargo, presenta otros inconvenientes como el alto coste del material [4]. Los materiales PCM se clasifican según sus características, lo que permite elegir el material con las propiedades más adecuadas para el conjunto clima-PV, de manera que aumente la eficiencia y así la producción eléctrica.

Una extensa revisión bibliográfica muestra estudios basados en diferentes métodos numéricos y experimentales en función de las condiciones climáticas, utilizando distintos materiales PCM y durante periodos de tiempo que van desde horas hasta un año.

---

Dentro de los estudios durante periodos anuales, Christopher J. Smith, Piers M. Forster y Rolf Crook estudiaron la mejora de producción eléctrica de módulos fotovoltaicos con PCM integrado, realizando varias hipótesis simplificadoras [5].

En primer lugar, se estima la energía anual de salida del sistema con un método que replica el día medio de cada mes, utilizando valores medios de los datos climatológicos de entrada al sistema, lo que se conoce como el método del día medio. La hipótesis que se introduce al utilizar este método es que la temperatura inicial de todas las capas del sistema es igual a la temperatura ambiente, esto quiere decir que el ciclo del PCM se regenera completamente durante la noche, o, en otras palabras, que el PCM no acumula calor, sino que se carga y descarga completamente en el día.

En segundo lugar, al calcular el intercambio de calor radiativo con el cielo, se supone que la temperatura de cielo sólo depende de la temperatura ambiente, sin tener en cuenta otros factores como puede ser la nubosidad, y se supone que la emisividad del cielo es un valor constante.

La influencia de la primera hipótesis simplificadoras ha sido estudiada por Marta Mellado Cerpa en [6], introduciendo un método que utiliza valores reales de los datos meteorológicos hora a hora, concluyendo que el método del día medio da lugar a una sobrestimación de la potencia producida por no tener en cuenta la acumulación de calor del PCM de un día para otro.

Puesto que la temperatura de cielo no sólo depende de la temperatura ambiente, si no que se puede modelar en función tres factores: temperatura ambiente, nubosidad, y presión parcial del vapor [7], parece interesante estudiar la influencia de estos factores sobre la temperatura de cielo, y consecuentemente, sobre la producción de potencia eléctrica. Por tanto, la influencia de la segunda hipótesis simplificadoras es estudiada en este documento, el cual muestra la optimización de la temperatura de cambio de fase del material PCM que maximiza la producción de energía eléctrica anual, utilizando el método hora a hora validado por Marta Mellado Cerpa en [6], y teniendo en cuenta el efecto de la nubosidad sobre la temperatura de cielo y la emisividad, y consecuentemente, sobre el intercambio de calor radiativo con el cielo y la potencia eléctrica producida.

## 2 OBJETO

---

El objeto principal de este trabajo es estudiar la influencia de la hipótesis simplificadoras utilizada en el artículo de referencia [5] que establece la temperatura de cielo como una función únicamente dependiente de la temperatura ambiente y la emisividad del cielo como una constante. Por este motivo, el estudio de referencia no tiene en cuenta la nubosidad a la hora de calcular los intercambios radiativos del sistema PV-PCM con el cielo, por lo que no considera su efecto sobre el balance energético y consecuentemente, sobre el cálculo de la producción anual de energía eléctrica.

Por tanto, el objetivo se resume en analizar cómo afecta la nubosidad en la producción de energía eléctrica del sistema PV-PCM.

Para ello, se utiliza un modelo numérico que modela la temperatura de cielo y la emisividad del cielo en función de coeficientes que estiman el grado de nubosidad o claridad: coeficiente nubosidad,  $C_{cover}$ , y coeficiente de claridad,  $K_o$ , respectivamente. Estos coeficientes se calculan a partir de los valores de irradiancia global, difusa y extraterrestre, por lo que en este estudio se utiliza la hipótesis que establece el valor de los coeficientes de nubosidad y claridad durante la noche como un valor constante e igual al valor de dichos coeficientes en la última hora del día que aún recibe radiación solar, tal y como hacen Ursula Eicker y Antoine Dalibard en su estudio sobre enfriamiento radiativo nocturno [7].

Para poder estudiar numéricamente la influencia de la nubosidad en la producción eléctrica, se lleva a cabo la optimización de la energía producida anual en función de la temperatura de cambio de fase del PCM. Esta optimización, que permite conocer la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ) que maximiza la energía eléctrica producida, se lleva a cabo en la ciudad de Neuhardenberg en Alemania, y en la ciudad de Nzema, en Ghana, utilizando datos climáticos proporcionados por METEONORM, utilizando el modelo de referencia, que no incluye la nubosidad, y el modelo que sí la incluye, comparando los resultados obtenidos y analizando el origen de las posibles diferencias.

Dicha optimización se lleva a cabo variando la temperatura de cambio de fase de 0 a 50 °C y calculando la energía eléctrica anual producida a partir de un modelo numérico unidimensional validado.

Para poder observar todas las implicaciones de no tener en cuenta la nubosidad en el balance energético, se realiza un estudio previo a los resultados en el que se analizan cuatro situaciones distintas: cielo despejado durante el día y la noche, cielo despejado durante el día y nublado durante la noche, cielo nublado durante el día y despejado durante la noche, y cielo nublado durante el día y la noche). El objetivo de este estudio es ver cómo influye la modificación de la temperatura de cielo y la emisividad del cielo en el intercambio radiativo, y consecuentemente, en la energía eléctrica producida, analizando a su vez la evolución de la temperatura de las capas del panel durante un periodo de tiempo de 4 días del mes de marzo en Alemania, para determinar cómo afecta la variación de calor radiativo intercambiado en la recuperación del PCM y en la temperatura que alcanza la célula.

---

## 3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Los objetivos de este trabajo se han fijado una vez realizada una extensa revisión bibliográfica de estudios previos relacionados con el uso de materiales PCM en aplicaciones fotovoltaicas. Numerosos estudios centran su atención en la mejora de la producción eléctrica de paneles fotovoltaicos a través del uso de PCM como método de refrigeración.

A continuación, se detalla la información más relevante de algunos de los artículos estudiados.

El artículo [2] resulta de gran interés ya que presenta un estudio muy completo y detallado sobre el uso de materiales PCM para refrigeración de módulos fotovoltaicos y mejora de la eficiencia eléctrica. En él, se examina la influencia de las altas temperaturas en la producción de potencia del panel, y los resultados corroboran la importancia de usar un modelo efectivo de regulación térmica. Además, se realiza una extensa revisión de los aspectos más importantes de esta tecnología, como son la evolución del sistema, evaluación del funcionamiento, selección de materiales, mejora de la transmisión de calor, métodos numéricos, simulaciones y aplicaciones prácticas. Finalmente, concluye que el sistema PV-PCM podría no ser económicamente factible si sólo se busca la mejora de la eficiencia del panel.

Muchos de los artículos recientes se diferencian en el periodo de tiempo utilizado en el estudio del PCM, desde periodos de tiempo muy cortos, como horas o días, hasta periodos anuales, siendo este último caso el más común. En [8] se recoge la simulación de 120 minutos de enfriamiento (de líquido a sólido) de cinco tipos de PCM con el objetivo de establecer una relación cualitativa entre las propiedades termofísicas de PCM y la regulación de temperatura del panel fotovoltaico, obteniendo como resultado que ciertos materiales como las mezclas eutécticas de ácidos grasos son más adecuados que otros, como pueden ser las parafinas. En [9] se estudia el efecto del espesor del PCM para un periodo de tiempo de tres horas, y en [10] se estudia la evolución de temperaturas del sistema PV-PCM durante tres días promedio para diferentes grosores de las capas de PCM.

Artículos como [11] y [4] cuantifican la mejora de la producción eléctrica. En [11] se realiza un estudio numérico y experimental de un sistema PV-PCM, en el que se añade a un panel existente un material PCM concreto y se compara la temperatura de la célula con y sin PCM, y los datos obtenidos numéricamente y experimentalmente. Los resultados finales de la simulación muestran que la producción eléctrica de sistema aumenta en un 7,3% en un periodo de un año en una ciudad de Eslovenia debido a la integración del PCM.

En [4] se estudia un sistema PV-PCM en un clima extremadamente cálido (Emiratos Árabes Unidos), utilizando una parafina con el objetivo de cuantificar el ahorro energético. Para ello, se miden experimentalmente los efectos de la refrigeración durante un periodo anual y se utiliza un modelo numérico bidimensional que predice las fracciones de tiempo de solidificación y fusión del material en cada mes del año. Se optimiza la variable  $T_m$  (temperatura de cambio de fase), y se obtiene, al igual que muestran estudios previos, que la  $T_s$  (temperatura solidus, temperatura a la que empieza la solidificación del PCM una vez fundido todo el material) debe estar por encima de la temperatura media de la noche de verano para garantizar la solidificación del PCM, y la  $T_l$  (temperatura liquidus, temperatura a la que empieza a fundirse el PCM), debe estar por debajo de la temperatura media del panel en un día de invierno para garantizar la fusión completa del PCM ( $T_l < T_m < T_s$ ). Como resultado final, se concluye que el PCM refrigera menos en los meses pico de bajas y altas temperaturas, debido a la fusión y solidificación incompleta del material, respectivamente, y se obtiene una mejora de la producción eléctrica anual de un 5,9% gracias al uso de PCM.

El artículo [12] resulta interesante ya que en él se compara el efecto de la refrigeración por PCM en diferentes climas, comparando los efectos de dos materiales PCM (una sal hidratada y una mezcla eutéctica de ácidos



grasos). El experimento se lleva a cabo en el exterior, en dos ciudades con climas muy diferentes: Dublín, Irlanda, y Vehari, Pakistán. Se demuestra que ambos PCM producen una caída mayor de la temperatura en el clima cálido y estable de Vehari, que en clima variante y frío de Dublín.

Otro artículo que también muestra resultados similares en cuanto al efecto del PCM dependiendo del clima es el artículo [13] en el que se lleva a cabo una simulación para analizar la producción eléctrica anual cuando se realizan cambios en la dirección de la instalación del sistema PV-PCM, en la temperatura de cambio de fase  $T_m$ , y en el grosor del PCM, y se optimizan estos valores. Los resultados muestran que cuando la radiación solar es alta y la temperatura del aire es moderada, la potencia eléctrica obtenida aumenta hasta un 3% con el uso de PCM, sin embargo, durante el invierno, el efecto del PCM se ve reducido.

El documento [5] es el artículo que ha servido como base de este proyecto, y a partir del cual se ha obtenido el modelo numérico necesario para las simulaciones que se han llevado a cabo. En él, se realiza un análisis global para determinar la mejora de producción eléctrica de módulos fotovoltaicos con PCM integrado. La simulación utiliza un modelo de balance de energía unidimensional en el que los datos de temperatura ambiente, irradiación y velocidad del viento se obtienen de “ERA-Interim”. Además, se estudia el efecto de variar la temperatura de cambio de fase,  $T_m$ , de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , con el objeto de identificar la temperatura óptima en cada localización. Se obtiene, como era de esperar, que la refrigeración con PCM es más beneficiosa en regiones con alta radiación y clima poco variable. Cuando se utiliza la temperatura óptima de PCM, la producción anual de energía aumenta más de un 6% en lugares como México y África oriental, y más de un 5% en muchos lugares como América Central y del Sur, gran parte de África, Asia meridional, etc. En Europa, varía entre un 2% y un 5%. En general, se demuestra que temperaturas promedio altas se corresponden con temperaturas óptimas de fusión del PCM más altas, y que incluso cuando se utiliza una temperatura  $T_m$  por debajo de la óptima, se obtienen mejoras significativas.

Puesto que este estudio no tiene en cuenta ciertas condiciones climáticas a la hora de realizar la simulación, como es la nubosidad, se lleva a cabo una búsqueda en profundidad de artículos que tengan en cuenta la nubosidad en el intercambio de calor radiativo del panel con el cielo. De esta manera, se llega al artículo [7], en el que no se estudia la refrigeración por PCM, sino un nuevo sistema fotovoltaico-térmico para producir electricidad y energía de refrigeración, y propone un modelo numérico para cielos nublados, capaz de modelar la temperatura de cielo y la emisividad en función de la nubosidad, la temperatura ambiente y la presión parcial del vapor.

Sin embargo, como se verá más adelante, este modelo no es capaz predecir el efecto de la nubosidad por la noche, puesto que se basa en índices de claridad o nubosidad que se calculan mediante los valores de radiación global, radiación difusa, y radiación extraterrestre, resultando en un valor constante para la noche calculado a través de los datos de radiación del día anterior. Esto que introduce un nuevo problema: cómo afectaría la nubosidad por la noche en la refrigeración con PCM. Desafortunadamente, tras una búsqueda exhaustiva de artículos que pudieran tratar este caso, no se ha encontrado ningún modelo numérico capaz de analizar el efecto de la nubosidad en el intercambio radiativo con el cielo por la noche, por lo que este podría ser un buen tema para tratar en investigaciones futuras.

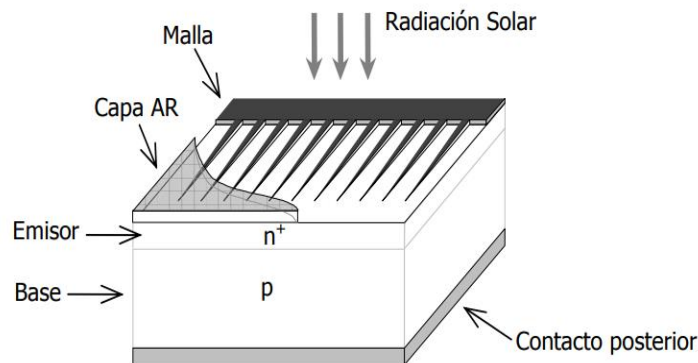
# 4 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

## 4.1 La célula solar.

La célula solar es un dispositivo electrónico de estado sólido capaz de convertir de forma directa la radiación solar en energía eléctrica. El proceso por el cual se realiza esta conversión se denomina efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico consiste en la conversión de la energía que transportan los fotones de luz, cuando inciden sobre materiales semiconductores, en energía eléctrica capaz de impulsar los electrones despididos a través de un circuito exterior, realizando un trabajo eléctrico útil. Para que los electrones pasen por este circuito exterior realizando un trabajo útil, es necesario atraparlos antes de que se vuelvan a recombinar en el semiconductor, para ello se introducen en el semiconductor elementos químicos (dopantes) que produzcan un exceso de electrones (semiconductor tipo N) o de huecos (semiconductor tipo P).

La estructura de la célula solar es:



**Figura 1:** Estructura de la célula solar, diferenciando las capas que la componen

- Una capa anti reflexiva (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial.
- Una malla de metalización, que debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo.
- Las capas activas de material semiconductor, es decir, las dos regiones que forman la unión p-n (denominadas emisor y base). Además del tipo y la calidad del semiconductor empleado, el espesor de las capas y la concentración de impurezas influyen en el rendimiento de la célula.
- El contacto metálico posterior, que se suele realizar metalizando toda la superficie cuando la célula no recibe luz por su parte posterior.

## 4.2 Parámetros característicos.

La representación más útil del comportamiento eléctrico de una célula solar la proporciona su curva característica, que contiene los posibles puntos de trabajo en intensidad y tensión para un determinado valor de la radiación incidente y la temperatura de la célula. La curva I-V de una célula solar se puede obtener a partir del circuito equivalente del dispositivo:

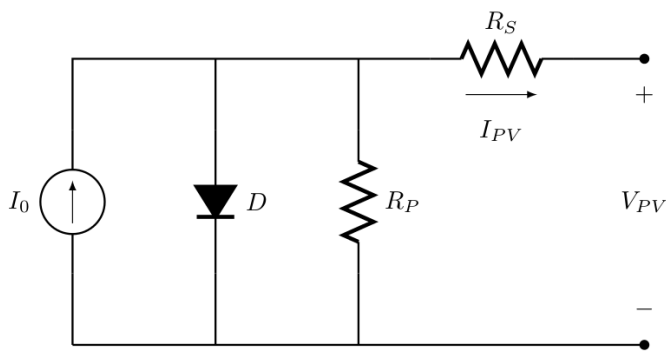


Figura 2: Circuito equivalente de la célula solar

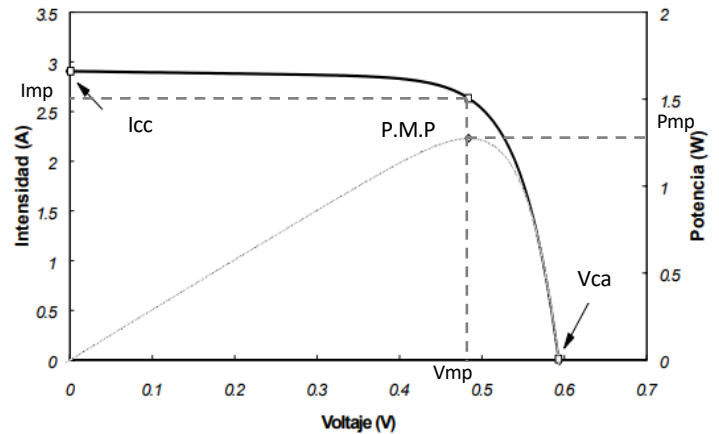


Figura 3: Curva I-V de una célula solar

La curva ideal de la célula se ve alterada por tres factores:

1. Factor de idealidad (m): toma valores entre 1 (ideal) y 2.
2. Resistencia en serie (Rs): representa la resistencia interna de la célula, se debe a la resistencia de los contactos y del propio material semiconductor.
3. Resistencia en paralelo (Rp): representa las fugas de corriente por imperfecciones en la unión p-n o defectos en la estructura cristalina.

La curva característica de una célula solar viene principalmente determinada por la posición de tres puntos:

1. Punto de máxima potencia, P.M.P.: es el punto de la curva en el que la célula produce la máxima cantidad de potencia. Le corresponde una intensidad  $I_{mp}$ , una tensión  $U_{mp}$  y un valor de potencia  $P_{mp}$ . Si la célula se expone a condiciones estándar, la máxima potencia alcanzada se denomina "potencia pico".
2. Intensidad de cortocircuito,  $I_{cc}$ : es la intensidad que genera la célula cuando la tensión a la que se la somete es nula. Suele tener un valor entre un 5% y un 15% mayor que la intensidad en el punto de máxima potencia,  $I_{mp}$ . Para células comerciales de silicio cristalino, el valor de la intensidad de cortocircuito varía entre 25 y 35 mA por  $cm^2$  de celda.
3. Tensión de circuito abierto,  $U_{ca}$ : es la tensión a la cual la célula no produce intensidad. Para células comerciales de silicio cristalino, de  $100\text{ cm}^2$ , en condiciones estándar, el valor de la tensión de circuito abierto es del orden de 0,5 a 0,6 V, y para células amorfas, de 0,60 a 0,9 V.

### 4.3 Influencia de la irradiancia.

La intensidad de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) de una célula fotovoltaica aumenta proporcionalmente con la irradiancia. Tomando como referencia el valor de la intensidad de cortocircuito para una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $I_{SC}$ , el valor de la intensidad de cortocircuito para otro nivel de irradiancia,  $E$ , viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{SC}(E) = \frac{E}{1000} \cdot I_{SC}$$

Para observar la influencia de la irradiancia sobre la curva característica de una célula solar, se mantiene la temperatura constante. La influencia de la irradiancia sobre la tensión de circuito abierto viene dada por la siguiente expresión:

$$U_{ca2} = U_{ca1} + \frac{mKT}{e} \cdot \ln \frac{E_2}{E_1}$$

Donde:

$U_{ca1}$  = Valor de la tensión de circuito abierto para  $E_1 = 1000 \text{ W/m}^2$

$U_{ca2}$  = Valor de la tensión de circuito abierto para un valor de irradiancia  $E_2$

En la siguiente gráfica, se muestra la variación de la curva característica I-V para diferentes valores de irradiancia, y a una temperatura constante. Se observa que al disminuir la irradiancia disminuye levemente la tensión de circuito abierto.

Consecuentemente, el rendimiento de la célula aumenta con la irradiancia si se mantiene constante la temperatura, ya que aumenta ligeramente  $U_{ca}$ , aumentando así la potencia máxima.

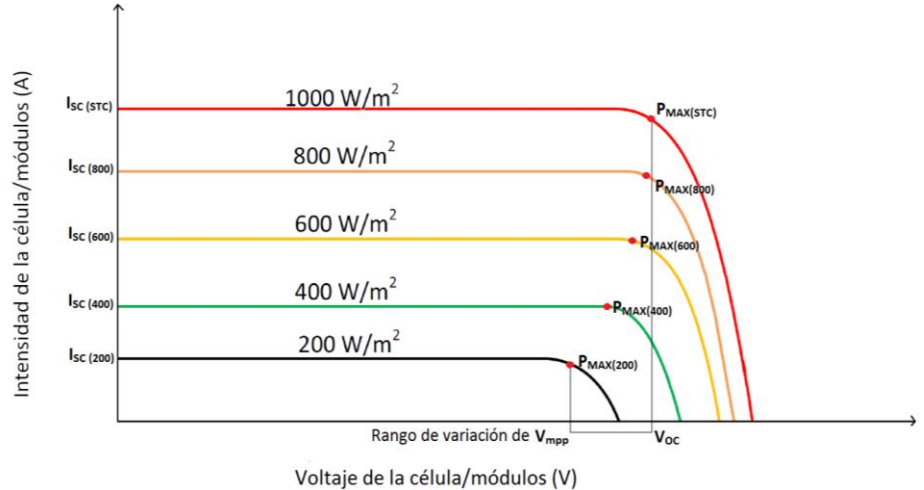
$$\eta = \frac{P_{MP}}{A \cdot E} \cdot 100$$

Donde:

$A$  = Área de la célula ( $\text{m}^2$ )

$E$  = Incidencia incidente ( $\text{W/m}^2$ )

$P_{MP}$  = Potencia máxima (W)



**Figura 4:** Curva I-V de una célula solar para diferentes valores de irradiancia

#### 4.4 Influencia de la temperatura.

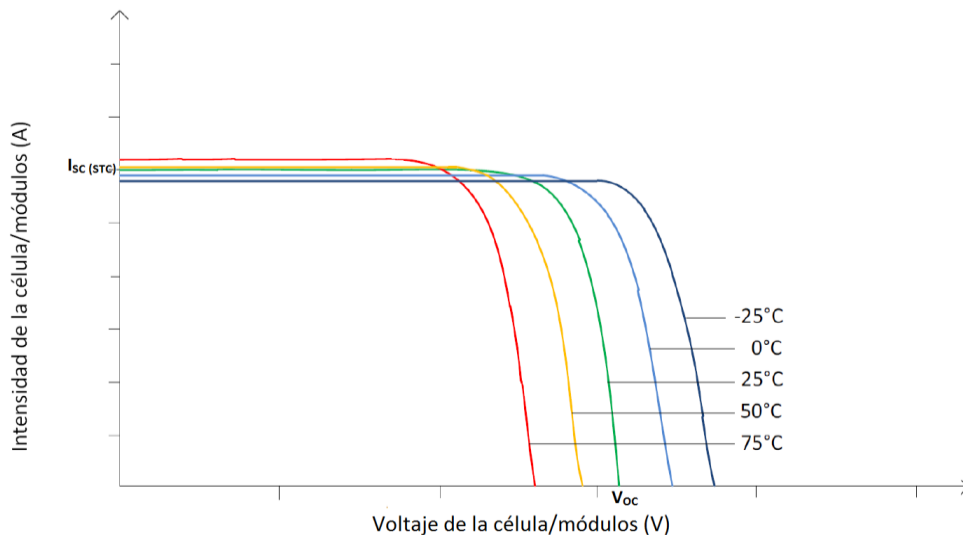
Si se supone que la irradiancia permanece constante, un aumento de la temperatura de la célula produce una disminución de la tensión de máxima potencia, sin que aumente prácticamente la intensidad en dicho punto. Como consecuencia, la potencia máxima que se puede alcanzar disminuye. Por el contrario, la intensidad de cortocircuito aumenta muy ligeramente al aumentar la temperatura de la célula. Este aumento se puede expresar a través del coeficiente  $\alpha$ , tomando como referencia el valor  $I_{SC}$  para una temperatura de la célula de  $25^\circ$ , mediante la siguiente ecuación:

$$I_{SC}(T) = I_{SC}(25^\circ C) + \alpha \cdot (T_c - 25^\circ C)$$

A su vez, la tensión de cortocircuito disminuye significativamente con el aumento de la temperatura de la célula. Esta disminución se expresa a través del coeficiente  $\beta$ , a través de la siguiente ecuación:

$$U_{ca}(T) = U_{ca}(25^\circ C) + \beta \cdot (T_c - 25^\circ C)$$

Para observar el efecto de la temperatura, se mantiene la irradiancia constante y se varía el valor de la temperatura. Como se puede observar en la gráfica, un aumento de la temperatura supone una disminución de la potencia máxima alcanzada, disminuyendo así el rendimiento de la célula. Para una célula de silicio cristalino, la eficiencia decrece del orden de un 0.4 a un 0.5% por cada grado que aumenta la temperatura.

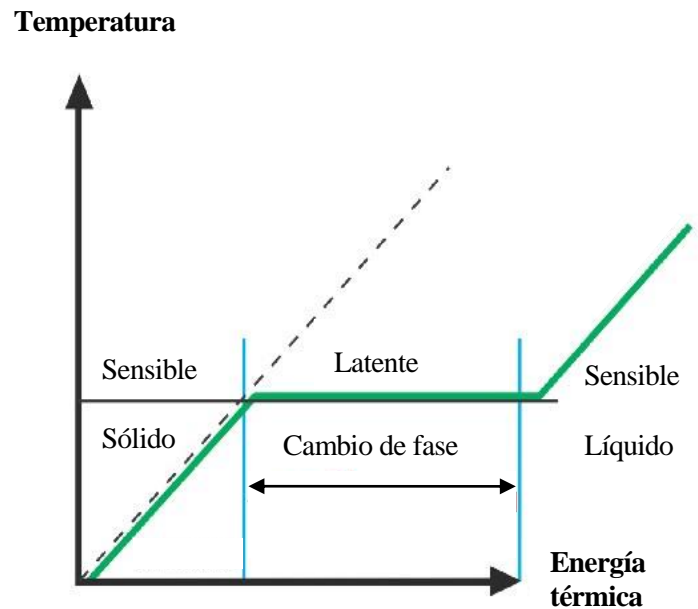


**Figura 5:** Curva I-V de una célula solar para diferentes valores de temperatura

# 5 MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La abreviatura que se utiliza para estos materiales, PCM, proviene de sus siglas en inglés (Phase Change Materials). Son materiales con la capacidad de almacenar energía mediante su cambio de estado, en forma de calor latente. Es decir, cuando estos materiales se someten al cambio de fase de sólido a líquido, absorben una cierta cantidad de calor (denominada calor latente), y el proceso puede tener lugar a temperatura constante para materiales isotérmicos, o con una variación muy estrecha de temperaturas. Cuando ocurre el proceso inverso (cambio de fase de líquido a sólido) se libera la energía almacenada de la misma forma. Fuera del proceso de cambio de estado el material se comporta de manera convencional, es decir, almacenando o liberando una cierta cantidad de energía en forma de calor sensible.

De aquí en adelante, la temperatura de fase será denominada con sus siglas en inglés  $T_m$  (melt).



**Figura 6:** Curva de estado del PCM e intercambio energético en cada estado.

## 5.1 Características deseables de los PCM.

A la hora de seleccionar el material de cambio de fase más apropiado para la aplicación deseada, es necesario conocer las propiedades que lo hacen adecuado para ello. Por esta razón, se muestran a continuación las propiedades deseables que se deberían utilizar como criterio de selección de materiales PCM para almacenamiento energético.

### Propiedades térmicas:

- La temperatura de cambio de fase debe ser adecuada a cada aplicación particular.
- Presentar una temperatura de fusión definida o, al menos, el cambio de fase debe producirse en un valor discreto (sustancia pura) o en un pequeño intervalo de temperaturas,
- Poseer una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible (calor específico) en estado sólido y líquido y elevada entalpía de cambio de fase, calor latente.
- Poseer una alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor. Puesto que esta propiedad es bastante difícil de satisfacer, se trabaja con materiales compuestos que, sin presentar una gran disminución de la capacidad de almacenamiento energético, presenten una mayor conductividad térmica. También se ha conseguido la mejora de la conductividad térmica a través de la adición de aletas metálicas (normalmente aletas de aluminio) en el interior del PCM.

### Propiedades físicas:

- La densidad del líquido y del sólido deben ser similares, y preferiblemente elevadas, para poder almacenar mayor cantidad de calor por unidad de volumen. La gran capacidad de almacenamiento energético en poca masa del material es una de las principales ventajas de estos materiales cuando se usan en aplicaciones fotovoltaicas.
- La variación de volumen en el cambio de fase debe ser baja, de lo contrario, se originarían problemas de dimensionado.

### Propiedades cinéticas:

- Evitar problemas de histéresis, subenfriamiento o retardo al inicio de la solidificación (como ocurre con los PCM inorgánicos), que se produce al no ceder el calor latente de un PCM pese a que su temperatura sea inferior al punto de congelación.
- Poseer suficiente tasa de cristalización (en los PCM inorgánicos se necesitan agentes nucleantes aditivos para que comience a solidificar la sustancia).

### Propiedades químicas:

- El proceso de cambio de fase debe ser totalmente reversible y sólo debe depender de la temperatura.
- Ser químicamente estables en el tiempo para evitar su descomposición y contaminación.
- No deben presentar segregación de fases.
- Presentar estabilidad química con el sistema PCM-PV, es decir, ser compatibles con los materiales de encapsulado y otros con los que estén en contacto, para evitar así la oxidación, descomposición térmica, hidrólisis, corrosión y otras reacciones.
- Deben ser no inflamables, no tóxicos y resistentes al fuego.

### Propiedades económicas:

- Estar disponible en grandes cantidades a bajo coste, para que sean viables técnica y económicamente.
- Tener un razonable ciclo de vida útil de acuerdo con su coste.

---

## 5.2 Proceso de cambio de fase.

### 5.2.1 Almacenamiento de energía en forma de calor latente.

Actualmente, el almacenamiento de energía es un tema sujeto a un continuo estudio e investigación debido a los grandes beneficios que presenta, especialmente en el mundo de las energías renovables por su intermitencia a la hora de producir energía. El objetivo principal de los sistemas de almacenamiento de energía es poder gestionar esta misma, es decir, almacenar la energía cuando está disponible o hay exceso para poder usarla cuando es escasa. Algunas tecnologías de almacenamiento de energía proporcionan almacenamiento a corto plazo, mientras que otras pueden durar mucho más tiempo.

La energía térmica se puede almacenar en forma de calor sensible, de calor latente, por procesos termoquímicos o por combinación de estos [14]. Aunque la forma más común de almacenamiento de energía térmica es por calor sensible, esta no es objeto de estudio en este trabajo, por lo que este apartado se centra en explicar sólo el almacenamiento de energía térmica por calor latente.

El almacenamiento por calor latente puede realizarse a través de los cambios de estado sólido-líquido, líquido-gas, sólido-gas y sólido-sólido [15,16]. Sin embargo, las formas de almacenamiento de energía térmica por calor latente que tienen más interés, a nivel práctico, son las que se realizan mediante cambio de estado sólido-líquido y sólido-sólido [16]. Aunque los cambios de estado sólido-gas y líquido-sólido tienen una mayor entalpía, presentan serios problemas de contención debido a sus grandes cambios de volumen al pasar de un estado a otro, lo que limita su potencial de utilización. [14]

En este caso la energía térmica es acumulada o liberada en los procesos reversibles de cambio de fase que tienen lugar en los materiales PCM. Los cambios de volumen que experimentan los materiales PCM durante su cambio de fase son lo suficientemente pequeños para ser manejables, además, se han desarrollado múltiples dispositivos de contención o encapsulado para dichos materiales, lo que hace factible su utilización en aplicaciones fotovoltaicas.

El almacenamiento por calor latente tiene como ventaja la posibilidad de almacenar grandes cantidades de energía térmica en un rango específico de temperaturas [14]. Además, al comparar el almacenamiento por calor sensible y latente, se encuentra en estudios previos que este último puede alcanzar densidades de almacenamiento de 5 a 10 veces mayores [16]. Una alta densidad de almacenamiento se traduce en una menor necesidad de volumen y de masa para obtener la misma energía equivalente.

### 5.2.2 Características del proceso.

Como se ha nombrado anteriormente, el proceso de cambio de fase de un material PCM presenta dos características que lo hacen muy interesantes para el almacenamiento de energía térmica:

1. La densidad energética de almacenamiento es elevada, es decir, el calor de cambio de fase por unidad de masa es elevado. Esta característica es importante ya que permite reducir la cantidad de material PCM necesario para absorber una cantidad de calor determinada.
2. El cambio de fase se produce a temperatura constante si se trata de un material puro e isotérmico, o entre un intervalo de temperaturas muy estrecho si el material no es puro o isotérmico.

Las ecuaciones que cuantifican la cantidad de calor latente o sensible, respectivamente, que almacena o libera un material durante su cambio de fase son:

$$Q_L = m \cdot \Delta h_{sl}$$

$$Q_S = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$



Donde:

$Q$ : Calor latente (L) o sensible (S) que almacena el material (kJ)

$m$ : Masa del material (kg)

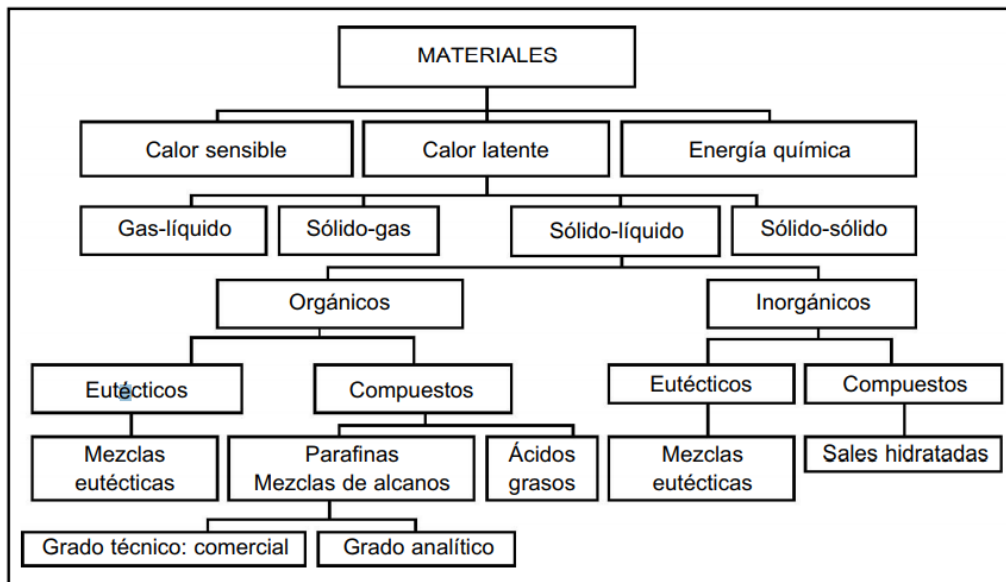
$\Delta h_{st}$ : Variación de entalpía implicada en el cambio de fase sólido-líquido (kJ/kg)

$c_p$ : Calor específico a presión constante (kJ/kg°C)

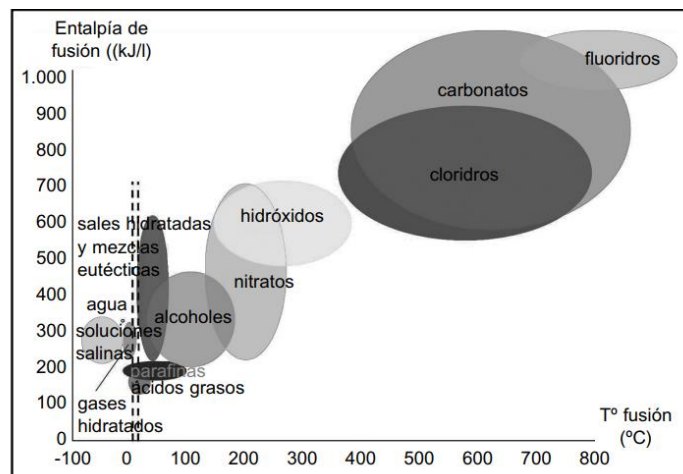
$\Delta T$ : Salto de temperatura que experimenta el material (°C)

### 5.3 Clasificación de los materiales.

Los materiales de cambio de fase pueden clasificarse según su origen en: orgánicos e inorgánicos, y estos a su vez, en compuestos y mezclas eutécticas. Las mezclas eutécticas son combinaciones estables de dos o más materiales de cambio de fase. La figura 7 muestra la clasificación de las sustancias utilizadas para almacenamiento térmico, y la figura 8 muestra los PCM según su entalpía y temperatura de fusión.



**Figura 7:** Clasificación de los materiales utilizados para almacenamiento térmico



**Figura 8:** Clasificación de los PCM según su temperatura de fusión y entalpía

### 5.3.1 PCM inorgánicos.

#### 5.3.1.1 Sales hidratadas.

Estos materiales fueron muy estudiados en las primeras etapas de investigación de PCM, por alta su capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de calor por unidad de volumen en comparación con las sustancias orgánicas (poseen un amplio rango de temperaturas de fusión, que va desde los 0°C a los 120°C), lo que los convierten en candidatos idóneos para sus múltiples aplicaciones en el ámbito del almacenamiento de energía solar. Además, estas sustancias tienen muchas otras excelentes características, como son su alta entalpía, buen comportamiento ante el fuego, alta disponibilidad y bajo coste. Es por ello, que desde el inicio de las investigaciones sobre

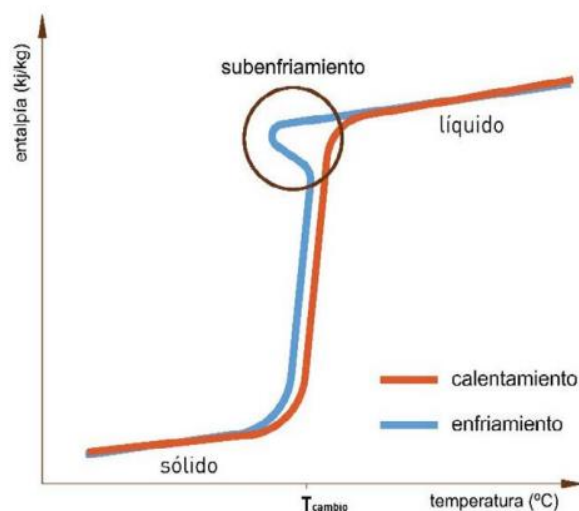
PCM, los hidratos de sal han sido una de las opciones más atractivas.

Sin embargo, estas sustancias presentan ciertos inconvenientes. Los problemas de estratificación junto a las pobres propiedades de aglutinación de los hidratos de sal provocan que se produzca un subenfriamiento antes de la solidificación. Este comportamiento se debe a que, puesto que la tasa de nucleación es muy baja a temperaturas cercanas a la de cambio de fase, la sustancia requiere ser subenfriada para continuar el proceso de solidificación. El fenómeno de subenfriamiento hace que parte de la energía almacenada se descargue a una temperatura menor que la de fusión, como muestra la figura 9. En la actualidad, los inconvenientes descritos anteriormente se solucionan, o minimizan, con la utilización de aditivos, espesantes y nucleantes. [14]

Las principales ventajas y desventajas se recogen en la siguiente tabla:

	Ventajas	Inconvenientes
<b>Térmicas</b>	Densidad de almacenamiento térmico elevada Conductividad térmica elevada Temperatura de cambio de fase claramente definida Amplio rango de temperaturas	Posible subenfriamiento Posibles problemas de estabilidad térmica Necesidad de utilización de aditivos para evitar una fusión incongruente (reducen su capacidad térmica)
<b>Encapsulamiento y practicidad</b>	Menor cambio de volumen	Se necesita encapsulado semipermeable Corrosivos con algunos metales
<b>Seguridad</b>	No inflamables	-
<b>Ambientales</b>	Menor impacto ambiental que las parafinas	-
<b>Coste</b>	Generalmente económicos Alta disponibilidad	-

**Tabla 1:** Ventajas e inconvenientes de las sales hidratadas



**Figura 9:** Curvas de enfriamiento y calentamiento

### 5.3.2 PCM orgánicos.

Los PCM orgánicos poseen unas características que los hacen muy útiles en su aplicación para almacenamiento de calor latente. Son más estables químicamente que las sustancias inorgánicas, funden y solidifican convenientemente sin necesidad de agentes nucleantes (sustancia química para crear núcleos y formar cristales dentro del polímero) y no sufren subenfriamiento o histéresis (cuando el PCM líquido se enfría por debajo del punto de solidificación. Esto ocurre por la formación de estructuras cristalinas durante un estado termodinámicamente metaestable, como sucede en los hidratos de sal). Aunque el coste inicial de un PCM orgánico es superior al de un inorgánico, su coste es competitivo. Sin embargo, estos materiales tienen otras desventajas. La más significativa es que son inflamables y que emiten gases nocivos durante su combustión. Dentro de los PCM orgánicos se pueden encontrar tres grupos de sustancias diferentes: parafinas, ácidos grasos, y mezclas orgánicas.

En este trabajo, el material de cambio de fase utilizado es una parafina, es por ello por lo que se procede a explicar en detalle las características de este tipo de material.

#### 5.3.2.1 Parafinas.

##### Estructura y obtención:

Las parafinas son hidrocarburos saturados que pueden ser cadenas simples (parafinas normales), o bien cadenas ramificadas (iso-parafinas). La fórmula general de las parafinas es:  $C_nH_{2n+2}$

Para el almacenamiento de energía térmica se suelen utilizar las parafinas normales ya que tienen una mayor entalpía de cambio de fase. La cera parafínica de grado comercial se obtiene de la destilación del petróleo, y no es una sustancia pura, sino una combinación de diferentes hidrocarburos.

##### Punto de fusión:

Su punto de fusión está directamente relacionado con el número de átomos de carbono dentro de la estructura del material. En general, cuanto mayor sea la longitud promedio de la cadena de hidrocarburos y por tanto su peso molecular, mayor será su temperatura de fusión. Esta característica facilita encontrar una parafina adecuada para la aplicación deseada (una temperatura de cambio de fase apropiada es fundamental a la hora de seleccionar el PCM).

##### Capacidad de almacenamiento de energía:

La acumulación de energía térmica con PCM se hace tanto de forma sensible como latente. La combinación de ambos es lo que determina la capacidad de almacenamiento del material.

En el caso de las parafinas, el calor específico es del orden de 2,1 kJ/kg°C y la entalpía de cambio de fase de 200 kJ/kg. La combinación de estos valores hace que las parafinas tengan una excelente capacidad para almacenar energía térmica.

##### Conductividad térmica:

En general la mayoría de los materiales orgánicos tienen una conductividad térmica muy baja, del orden de 0,2 W/m°C, y las parafinas no son una excepción. Esto que supone una desventaja ya que, aunque la parafina tenga una gran capacidad de almacenar energía, su capacidad de transmitirla es muy reducida.

Sin embargo, la conductividad térmica se puede mejorar de varias maneras. Esto se puede conseguir mediante el uso de aletas de metal unidas a la capa de aluminio para aumentar el área de superficie de contacto entre la placa y el PCM, insertando una malla metálica en el PCM, insertando partículas de alta conductividad térmica en el PCM, mediante la microencapsulación del PCM o con bandas de metal conductoras intercaladas dentro del PCM [17,18].

---

### Variación de volumen:

Todos los materiales varían su densidad, y por tanto su volumen, al cambiar de fase sólida a líquida. Para las parafinas esta variación es aproximadamente del 10%, esto puede ser problemático en ciertas aplicaciones y debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el equipo.

### Otras propiedades:

Existen otras propiedades que hacen adecuado el uso de parafinas como PCM:

- Buena estabilidad térmica: Las parafinas no pierden sus propiedades al estar sometidas a ciclos de carga y descarga térmica, ya que no existen reacciones químicas durante el proceso de almacenamiento de calor, ni en la propia parafina ni con el material que la contiene.
- Baja corrosión: Poseen poca afinidad química con otros materiales, por lo que los problemas de corrosión son prácticamente inexistentes.
- Bajo impacto ambiental: Las parafinas no son tóxicas y son reciclables.

Además, es necesario tener en cuenta los siguientes fenómenos dependiendo de la aplicación:

- Subenfriamiento: Proceso por el cual la solidificación se produce a menor temperatura que la fusión. Las parafinas presentan un bajo subenfriamiento.
- Sobrecalentamiento: Este proceso ocurre cuando, una vez producido el cambio de fase, continúa la aportación de energía al PCM, aumentando así la temperatura hasta llegar al sobrecalentamiento. Si se alcanzan temperaturas del orden del punto de ignición de la parafina (suele ser en torno a los 200°C), pueden ocasionarse graves daños en la instalación. Este es el mayor inconveniente de las parafinas.

### 5.3.2.2 Ácidos grasos.

Los ácidos grasos son sustancias químicamente estables, que poseen densidades de almacenamiento de energía térmica similares a las parafinas, y al igual que estas, su temperatura de fusión aumenta con la longitud de la molécula. Algunos ejemplos de ácidos grasos son el ácido palmítico, el ácido cáprico, el ácido caprílico y el láurico.

El grupo de ácidos grasos que está siendo cada vez más estudiado y utilizado, es el compuesto por los PCM de base biológica, o bio-PCM. Estos hidrocarburos hidrogenados presentan una gran estabilidad química, y al igual que otros ácidos grasos, su densidad de almacenamiento es similar a la de las parafinas [19].

Los bio-PCM se obtienen de grasas vegetales y animales, pueden ser fabricados de subproductos de la industria agrícola o alimentaria o de productores de biocombustibles. Destacan por ser sustancias no tóxicas, menos inflamables que las parafinas, de larga vida útil y fácilmente biodegradables.

En general, muestran excelentes características térmicas (punto de fusión y congelación). El rango de temperatura refrigeración es grande, y no se produce subenfriamiento, aunque en algunos casos se han detectado. Sin embargo, presentan un coste elevado.

La siguiente tabla resume las principales ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos:

	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>Térmicas</b>	Estabilidad térmica No tienden a degradarse	Calor latente y entalpía más bajos Menor conductividad térmica
<b>Encapsulamiento y practicidad</b>	Compatible con contenedores de metal Micro encapsulado disponible Parafinas: no corrosivos	Mayor cambio de volumen Ácidos grasos: algunos son algo corrosivos Ácidos grasos: algunos presentan un fuerte olor
<b>Seguridad</b>	Seguros y no reactivos No tóxicos Ácidos grasos: menos inflamables que parafinas	Parafinas: inflamables Parafinas: al arder, los humos y los gases podrían ser tóxicos
<b>Ambientales</b>	Bio-PCM: biodegradable en poco tiempo Bio-PCM: Se puede producir a partir de residuos o subproductos	Parafinas: mayor impacto ambiental en su ciclo de vida que las sales y los ácidos grasos Parafinas: degradación muy lenta
<b>Coste</b>	Alta disponibilidad Bio-PCM: menor precio cuando vienen de la industria agrícola o alimentaria Algunos son más caros	Podría ser necesario añadir aditivos retardadores de llama Parafinas: mayor coste que los hidratos de sal Parafinas: precio vinculado al precio del petróleo

**Tabla 2:** Ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos

## 5.4 Aplicación fotovoltaica.

Como se ha comentado anteriormente, la principal utilidad de los materiales PCM en aplicaciones fotovoltaicas es su capacidad de almacenar energía térmica para poder ser utilizados como método refrigerante del módulo fotovoltaico. Esto implica una reducción de los picos de temperatura que experimenta el módulo, y consecuentemente, un aumento de la eficiencia de este, tal y como se ha visto en el apartado de influencia de la temperatura en la curva característica de la célula solar (por cada °C que aumenta la temperatura, la potencia producida cae en un 0,5%).

---

# 6 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PV-PCM

---

## 6.1 Montaje del conjunto PV-PCM.

Un panel solar está formado por varias células iguales conectadas eléctricamente entre sí, en serie y/o en paralelo, de forma que la tensión y corriente suministrada por el panel se incrementa hasta ajustarse al valor deseado. La mayoría de los paneles solares se construyen asociando primero células en serie, hasta que se consigue el nivel de tensión deseado, y luego asociando en paralelo varias hileras de células para alcanzar el nivel de corriente deseado. Además, el panel cuenta con otros elementos a parte de las células solares, que hacen posible la adecuada protección del conjunto frente a los agentes externos, asegurando una rigidez suficiente, posibilitando la sujeción a las estructuras que lo soportan y permitiendo la conexión eléctrica.

El conjunto PV-PCM se realiza generalmente añadiendo a un panel fotovoltaico un contenedor de aluminio que contiene el material PCM.

El panel utilizado en este trabajo se basa en el modelo de Armstrong y Hurley [20], se denomina BP350U Solar y consta de seis capas:

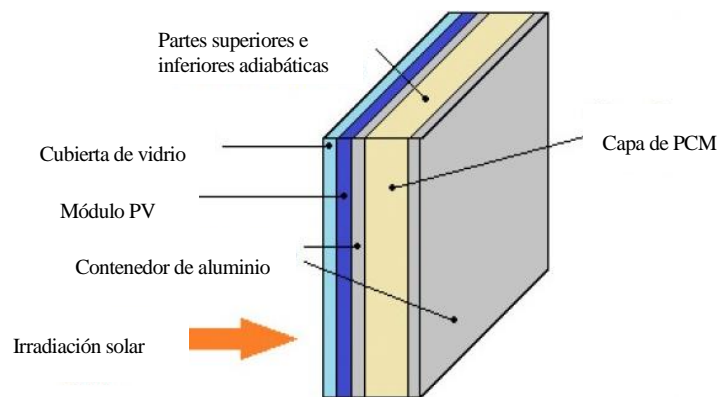
1. Cubierta de vidrio: la cubierta está fabricada con vidrio templado que debe facilitar al máximo la transmisión de la radiación solar. Se caracteriza por su resistencia mecánica, alta transmisividad y bajo contenido en hierro.
2. Recubrimiento antirreflectante (ARC): recubrimiento de nitruro de silicio, normalmente de tan solo nanómetros de grosor, que canaliza los fotones entrantes hacia las capas inferiores de las células.
3. Celdas fotovoltaicas (PV): células fotovoltaicas de silicio policristalino con un espesor de oblea de 225 mm.
4. Encapsulado (EVA): láminas finas y transparentes de EVA (Etil Vinil Acetato) que se funden para crear un sellado de resistencia a la humedad y aislamiento eléctrico. Es especialmente importante que no afecte al panel en su transparencia por la continua exposición al sol, buscándose además un índice de refracción similar al del vidrio protector para no alterar las condiciones de la radiación incidente.
5. Contacto metálico posterior: el contacto metálico completo se realiza en el reverso de las celdas fotovoltaicas mediante impresión serigráfica de una pasta de metal, en este caso el aluminio.
6. Capa de Tedlar: capa constituida de fluoruro de polivinilo (PVF). Es foto estable y proporciona aislamiento adicional y protección contra la humedad a las capas fotovoltaicas. Además, protege las células fotovoltaicas de los efectos degradantes de la radiación ultravioleta y sirve como aislante eléctrico.

### Contenedor de aluminio:

El panel fotovoltaico descrito se adjunta a una caja de aluminio que contiene el PCM siguiendo los métodos experimentales de Huang et al. [21].

El material seleccionado es el aluminio puesto que estudios demuestran que es más efectivo que una carcasa aislante. Para llegar a esta conclusión, en [22] se usó una superficie con un material absorbente solar que imita a una célula fotovoltaica con contenedores del PCM construido con materiales de diferentes conductividades: uno cuya conductividad es muy alta (aluminio) y en contraste, uno con una conductividad muy baja (Perspex). En las simulaciones, el rendimiento de la regulación térmica del sistema resultó depender de la masa térmica y de la conductividad térmica del PCM y del sistema PV-PCM. Esto se debe a que una alta conductividad de la carcasa permite una rápida evacuación del calor del panel al PCM, y una pérdida mayor con el ambiente.

La figura 10 muestra un esquema del montaje PV-PCM.



**Figura 10:** Capas del sistema PV-PCM

## 6.2 Selección del PCM.

La selección del material PCM es una tarea difícil ya que son muchos los factores que hay que tener en cuenta, como pueden ser unas características adecuadas o la disponibilidad en el mercado. Es por ello por lo que no existe un PCM que sea mejor en todos los aspectos, sino que un PCM particular puede poseer ciertas características deseadas y no poseer otras. Además, no se han encontrado suficientes estudios que comparen el rendimiento de diferentes PCM en regulación térmica para poder establecer qué material es el más adecuado.

En este estudio, se valora positivamente la disponibilidad en el mercado, siendo las parafinas las que mejor cumplen con este requisito. Además, la cera parafina resulta de gran interés en este caso, ya que permite ajustar su punto de fusión fácilmente debido a las longitudes de cadena variables de sus hidrocarburos constituyentes, como se ha explicado anteriormente.

De este modo, la búsqueda queda reducida a encontrar una parafina adecuada para el emplazamiento deseado, teniendo en cuenta que una temperatura de cambio de fase idónea es fundamental a la hora de seleccionar el PCM. Otra característica beneficiosa es que las parafinas se pueden micro encapsular, lo que hace posible que se puedan tratar como materiales homogéneos. Además, debido al pequeño diámetro, la relación entre área de superficie y volumen es muy alta, lo que hace que la baja conductividad térmica deje de ser un gran problema [4]. La alta capacidad de calor específico de la parafina, la estabilidad química y el bajo grado de subenfriamiento son ventajas que también se han tenido en cuenta.

## 6.3 Propiedades térmicas.

Una vez definidas las capas del sistema PV-PCM, es necesario caracterizarlas térmicamente, es decir, definir sus propiedades térmicas, para poder resolver el modelo unidimensional.

### 6.3.1 Panel fotovoltaico (PV).

En este apartado, se considera que la combinación de pequeñas masas térmicas mejora la estabilidad numérica del modelo, al evitar la división por números próximos a cero. Por esta razón y dada la pequeña capacidad calorífica de algunas capas, se decide que la capa 1 y 2 serán tratadas como una máscara térmica combinada, denominada capa de vidrio. De la misma manera, se define la capa celular como el conjunto de las capas 3, 4, 5 y 6.

Se trabaja con conductancias en lugar de resistencias térmicas, donde:

$$G = \frac{1}{R}$$

La capacidad calorífica total (J/K) de la capa de vidrio viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{vidrio} = A(\rho_1 c_{p1} z_1 + \rho_2 c_{p2} z_2)$$

Y la conductancia térmica (W/K) por:

$$G_{vidrio} = \frac{A}{\frac{z_1}{k_1} + \frac{z_2}{k_2}}$$

Donde A es el área de la célula y se considera  $A = 1\text{m}^2$  en este trabajo.

De la misma manera, se definen la capacidad calorífica total y la conductancia térmica de la capa celular como:

$$C_{célula} = A(\rho_3 c_{p3} z_3 + \rho_4 c_{p4} z_4 + \rho_5 c_{p5} z_5 + \rho_6 c_{p6} z_6)$$

$$G_{célula} = \frac{A}{\frac{z_3}{k_3} + \frac{z_4}{k_4} + \frac{z_5}{k_5} + \frac{z_6}{k_6}}$$

### 6.3.2 Contenedor de aluminio.

Para modelar la transferencia de calor del PV al PCM, se definen la capacidad calorífica y la conductancia térmica de la capa frontal de aluminio, ya que se supone que las partes laterales son adiabáticas, tal y como indica la figura 10. Esto se debe a que las pérdidas de calor a través de los lados de la caja de PCM son insignificantes en comparación con el frente y la parte posterior de la ésta.

Ambas capas, superior e inferior, tienen una capacidad calorífica y una conductancia térmica de:

$$C_{alu} = A(\rho_{alu} c_{p,alu} z_{alu})$$

$$G_{alu} = \frac{A}{\frac{z_{alu}}{k_{alu}}}$$

Donde  $z_{alu} = 5\text{mm}$ , tal y como se utiliza en el experimento de Huang et al. [21], comentado anteriormente. Los valores de  $\rho$ ,  $z$  y  $c_p$  vienen dados en la tabla 3.



La siguiente tabla muestra las propiedades de las capas que forman el conjunto PV-PCM [5]. Se ha supuesto que las propiedades de los materiales son independientes de la temperatura.

Capa	Número de la capa	$\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	$c_p \left( \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right)$	$k \left( \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right)$	$z \text{ (m)}$
<b>Recubrimiento de vidrio</b>	1	3000	500	1.8	0.003
<b>Recubrimiento antirreflejante</b>	2	2400	691	32	$1 \times 10^{-7}$
<b>Célula</b>	3	2330	677	148	$2.25 \times 10^{-4}$
<b>EVA</b>	4	960	2090	0.35	$5 \times 10^{-4}$
<b>Aluminio</b>	5	2700	900	237	$1 \times 10^{-5}$
<b>Tedlar</b>	6	1200	1250	0.2	$1 \times 10^{-4}$
<b>Aluminio</b>	Contenedor de PCM	2700	900	237	0.005

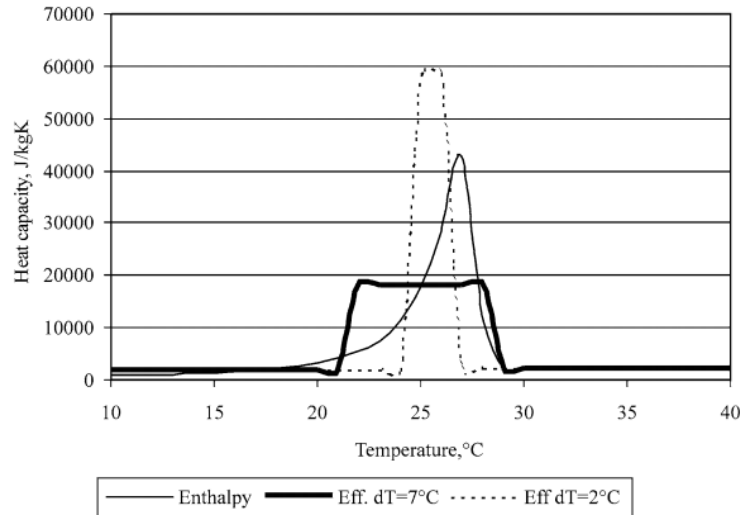
**Tabla 3:** Propiedades de las capas que forman el conjunto PC-PCM

### 6.3.3 Capa de PCM.

Idealmente, un PCM debería tener un pequeño coeficiente de expansión térmica, alta conductividad térmica, alto calor latente de fusión y una alta capacidad de calor específico [23]. En este caso, se supone que la expansión térmica del PCM es pequeña [24]. Puesto que los PCM disponibles comercialmente suelen tener bajos coeficientes de conductividad térmica, lo que limita la tasa de transferencia de calor, se utilizan técnicas para conseguir una mejora de esta, la cual se mide mediante el factor de mejora. En este estudio, se utiliza un factor de mejora de la transferencia de calor de 2.

El PCM tiene una baja conductividad térmica en comparación con los componentes del PV y el aluminio. Por tanto, se divide en 40 capas para modelar el gradiente de temperatura a través del PCM. En las regiones líquidas del PCM, el flujo se supone laminar, y la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción en lugar de por convección, una suposición que ha sido validada por otros modelos [25]. Esta suposición permite utilizar un modelo numérico unidimensional donde la temperatura del PCM es función de la profundidad únicamente.

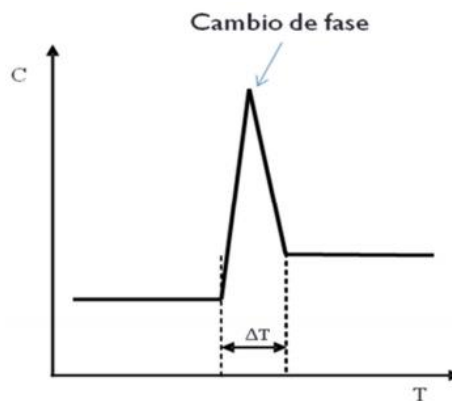
Como se ha explicado anteriormente, los PCM pueden ser isotérmicos o experimentar una variación de la temperatura de cambio de fase en un pequeño rango, como es el caso de las parafinas, debido a la longitud variable de las cadenas de hidrocarburos constituyentes. La cantidad de calor contenida en un PCM no isotérmico se puede modelar mediante dos métodos: el método de la entalpía o el método de la capacidad térmica efectiva. Estos dos métodos dan resultados numéricos muy semejantes, pero el método de la capacidad térmica efectiva requiere una definición previa del incremento de la temperatura durante el cambio de fase [26]. En este trabajo se utiliza el método de la entalpía.



**Figura 11:** Capacidades térmicas en el proceso de cambio de fase según el método de la entalpía (“Enthalpy”) y el de la capacidad térmica efectiva (“Eff”) para diferentes rangos de temperaturas (7°C y 2°C).

#### 6.3.3.1. Método de la capacidad térmica efectiva.

Este método considera que la capacidad térmica del material es variable con la temperatura, de manera que cuando el material se encuentra a la temperatura de cambio de fase, el calor específico del material aumenta hasta que la energía necesaria para que la temperatura varíe un  $\Delta T$  sea igual a la energía necesaria para que el material cambie de fase. Por tanto, se establece un rango en el cual el cambio de fase ocurre. Estrictamente, no se podría aplicar a sustancias puras, dado que en ellas el cambio de fase es a temperatura constante, sin embargo, el error cometido sería pequeño [27].

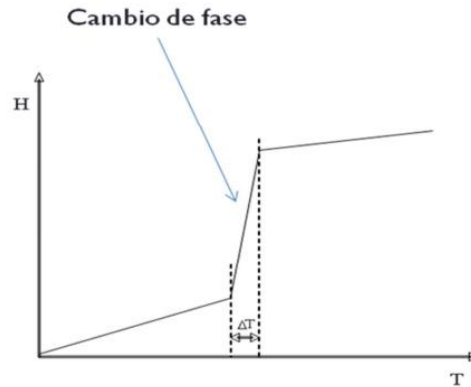


**Figura 12:** Evolución de la capacidad térmica en función de la temperatura en el método de la capacidad térmica efectiva [27]

En el método de la capacidad térmica efectiva se puede utilizar una sola ecuación para todo el dominio, pero sus parámetros serán dependientes de la temperatura [27].

### 6.3.3.2. Método de la entalpía.

Este método consiste en acumular la entalpía del material a medida que aumenta su temperatura. A la temperatura de cambio de fase se establece un incremento de entalpía igual al calor latente de cambio de fase. Por razones de continuidad en este caso también es necesario establecer un rango en el cual ocurre el cambio de fase [27].



**Figura 13:** Evolución de la entalpía en el método de la entalpía. [27]

El método de entalpía describe la cantidad total de energía del PCM como una función monótonamente creciente, continua e invertible de la temperatura. Tal y como muestra la literatura [26,28], la función de la entalpía del PCM,  $H(T)$ , puede describirse como una buena aproximación mediante un modelo de tangente hiperbólica. De esta manera, la función de la entalpía de la parafina es:

$$H(T_{PCM}) = 1/2 \left( C_{PCM_S} T_{PCM} (1 - \tanh(s(T_{PCM} - T_m))) + Q_{LIQ} (1 + \tanh(s(T_{PCM} - T_m))) \right. \\ \left. + C_{PCM_L} (T_{PCM} - T_m) (1 + \tanh(s(T_{PCM} - T_m))) \right)$$

Donde  $s$  es un factor de escala que describe la pendiente de la curva de la región de cambio de fase y está ligado a la naturaleza del material. Este factor vale  $\infty$  para PCM isotermos. Se define como:

$$s = \frac{1}{2 * \Delta T} \ln \left( \frac{Q_{LIQ} - C_{PCM_S} T_m + L - (C_{PCM_S} + C_{PCM_L}) \Delta T}{Q_{LIQ} - C_{PCM_S} T_m - L + (C_{PCM_S} + C_{PCM_L}) \Delta T} \right)$$

Donde  $\Delta T$  es la mitad del intervalo de la temperatura de cambio de fase ( $T_m - \Delta T$ ,  $T_m + \Delta T$ ) cuyo punto medio es la temperatura de cambio de fase,  $T_m$ , y  $L$  es el incremento de entalpía en la región de cambio de fase  $\Delta H = H_{final} - H_{inicial}$ . Al fijarse  $s$ , se fija el incremento de temperatura de cambio de fase del PCM. En este estudio se selecciona un valor de  $s=1$ .

El calor acumulado requerido para la fusión completa de la capa de PCM a la temperatura  $T_m$  se define como:

$$Q_{LIQ} = \frac{Az_{PCM}}{l} \left( \rho_{PCM_S} C_{PCM_S} T_m + \rho_{PCM_L} L \right)$$

Al igual que se han determinado las propiedades térmicas de las capas del panel fotovoltaico, es necesario conocer las capacidades térmicas y las conductancias de las capas de PCM.

La capacidad térmica efectiva se obtiene derivando la función de la entalpía  $H(T)$  respecto a la temperatura en cada capa [29].

$$C_{PCM_i} = dH/dT_{PCM_i}$$

De esta manera, las capacidades térmicas para cada capa de PCM en estado líquido y sólido, respectivamente, son:

$$C_{PCM_S} = A \cdot c_{p_{PCM_S}} \cdot \rho_{PCM_S} \frac{z_{PCM}}{l}$$

$$C_{PCM_L} = A \cdot c_{p_{PCM_L}} \cdot \rho_{PCM_L} \frac{z_{PCM}}{l}$$

Donde  $c_{p_{PCM_S}}$  y  $c_{p_{PCM_L}}$  son los calores específicos,  $\rho_{PCM_S}$  y  $\rho_{PCM_L}$  las densidades del estado sólido y líquido del PCM, y  $l$  es el número de capas.

Finalmente, la conductancia térmica de cada capa de PCM ( $i=1, \dots, 40$ ) viene dada por la proporción de PCM líquido y sólido en cada capa y se obtiene al igual que la función de la entalpía de manera que:

$$G_{PCM_i} = \frac{(G_{PCM_L} - G_{PCM_S})}{2} \left( 1 + \tanh \left( s(T_{PCM_i} - T_m) \right) \right) + G_{PCM_S}$$

$i=1, \dots, l.$

La conductancia térmica del PCM para el estado sólido y líquido de cada capa viene dada por:

$$G_{PCM_S} = \frac{A f_m k_{PCM_S}}{\frac{z_{PCM}}{l}}$$

$$G_{PCM_L} = \frac{A f_m k_{PCM_L}}{\frac{z_{PCM}}{l}}$$

Donde  $k_{PCM_S}$  y  $k_{PCM_L}$  son las conductividades del PCM en estado sólido y líquido.

Las propiedades térmicas del PCM usadas en este estudio vienen dadas en la tabla 4, y los respectivos valores de dichos parámetros.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad térmica específica del PCM, sólido	$c_{PCM_S}$	2900	$\frac{J}{kgK}$
Capacidad térmica específica del PCM, líquido	$c_{PCM_L}$	2100	$\frac{J}{kgK}$
Calor latente del PCM	L	$2.1 \times 10^5$	$\frac{J}{kg}$
Densidad del PCM, sólido	$\rho_{PCM_S}$	860	$\frac{kg}{m^3}$
Densidad del PCM, líquido	$\rho_{PCM_L}$	780	$\frac{kg}{m^3}$
Conductividad térmica del PCM, sólido	$k_{PCM_S}$	0.24	$\frac{W}{mK}$
Conductividad térmica del PCM, líquido	$k_{PCM_L}$	0.15	$\frac{W}{mK}$
Factor de mejora de la conductancia del PCM	$f_m$	2	
Capas de PCM	1	40	

Tabla 4: Propiedades térmicas del PCM

## 6.4 Balance energético

A continuación, se muestran los intercambios energéticos que tienen lugar entre el sistema PV-PCM y el entorno, y se representan en la figura 14.

$$q_f^{RAD,corta} = A\alpha_{vidrio}I$$

$$q_f^{RAD,larga} = A\sigma(\epsilon_{cielo}T_{cielo}^4 - \epsilon_{vidrio}T_{vidrio}^4)$$

$$q_f^{CONV} = Ah_c(T_{amb} - T_{vidrio})$$

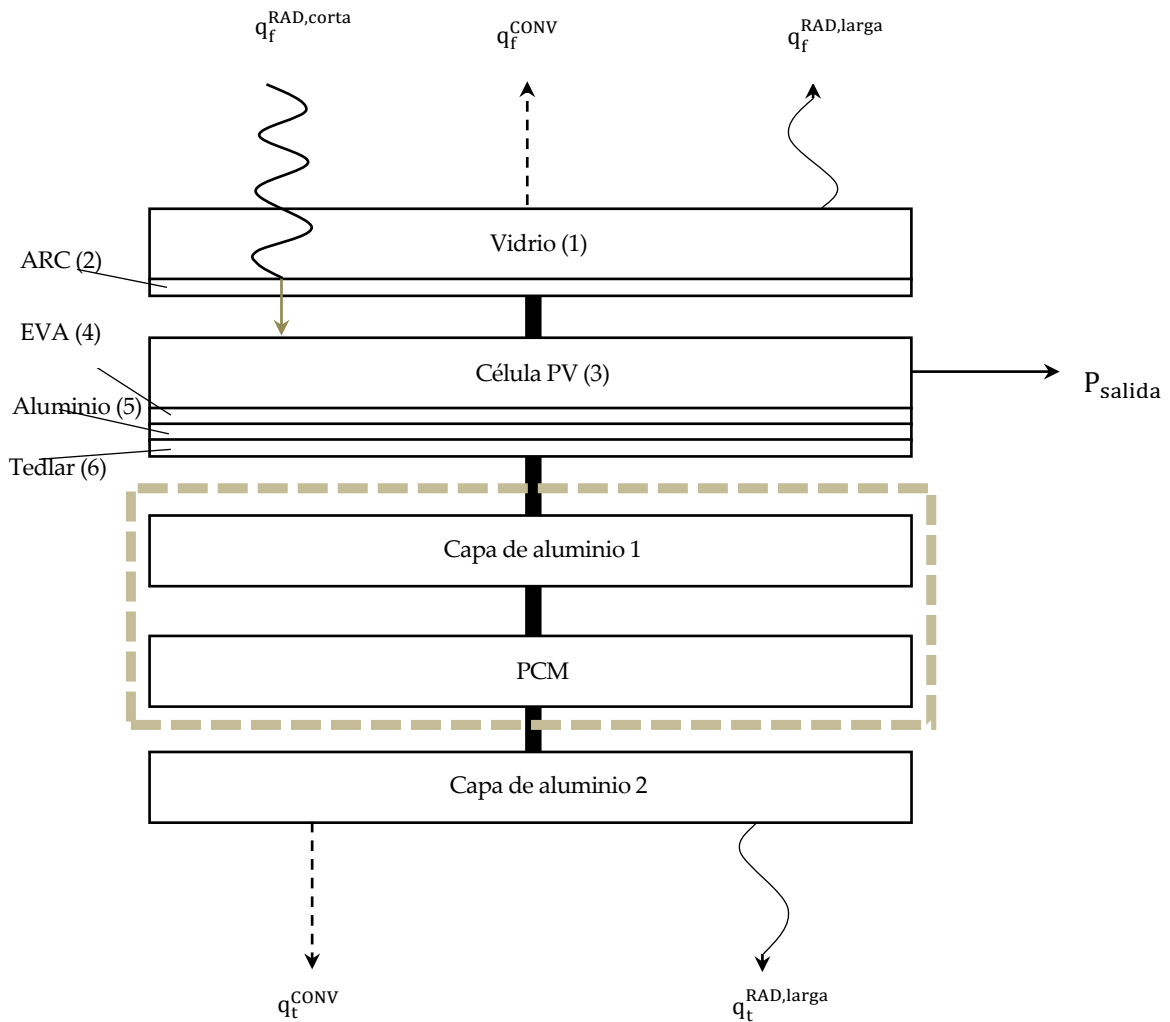
$$q_t^{RAD,larga} = A\sigma(\epsilon_{terreno}T_{terreno}^4 - \epsilon_{alu}T_{alu(2)}^4)$$

$$q_t^{CONV} = Ah_c(T_{amb} - T_{alu(2)})$$

$$P_{salida} = A\eta I$$

Donde:

- $q_f^{RAD,corta}$  es la radiación solar de onda corta de entrada al sistema, una vez se ha reflejado una fracción de esta en el vidrio.
- $q_f^{RAD,larga}$  es el intercambio energético radiativo de onda larga entre la placa frontal del panel y el entorno.
- $q_f^{CONV}$  es el calor intercambiado por convección entre la placa frontal y el ambiente.
- $q_t^{CONV}$  es el calor intercambiado por convección entre la placa trasera y el ambiente.
- $q_t^{RAD,larga}$  es el intercambio energético radiativo de onda larga entre la placa trasera del panel y el entorno.
- $P_{salida}$  es la potencia de salida del módulo fotovoltaico.



**Figura 14:** Diagrama que muestra los flujos entrantes y salientes del sistema PV-PCM. La línea negra gruesa representa el intercambio de calor por conducción entre las capas. Los números entre paréntesis indican el orden de las capas. [5]

#### 6.4.1 Parámetros usados en el estudio.

A continuación, se muestran en la tabla 5 los parámetros y sus respectivos valores que se usan en este estudio para simular el balance energético en el sistema PV-PCM.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Área del panel	A	1	m <sup>2</sup>
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$	$\frac{W}{m^2K}$
Absortancia del vidrio	$\alpha_{\text{vidrio}}$	0.05	-
Absortancia de la célula	$\alpha_{\text{cel}}$	0.9	-
Transmisividad del vidrio	$\tau_{\text{vidrio}}$	0.95	-
Emisividad del vidrio	$\varepsilon_{\text{vidrio}}$	0.95	-
Emisividad del terreno	$\varepsilon_{\text{terreno}}$	0.95	-
Emisividad de la capa trasera de aluminio	$\varepsilon_{\text{alu}}$	0.02	-

**Tabla 5:** Parámetros usados en el balance energético

En la cara de barlovento (superior) del panel fotovoltaico, la convección forzada debida al viento es dominante frente a la convección libre. Se utiliza una expresión para el coeficiente de transferencia de calor obtenida empíricamente por Loveday y Taki [33]:

$$h_c = 8,91 + 2v_v$$

Donde  $v_v$  es la velocidad del viento medida en m/s.

El rendimiento del panel fotovoltaico se calcula como una función dependiente de la temperatura de la célula y la irradiancia [34]:

$$\eta = \eta_{ref} \left( 1 - \beta(T_{cel} - 25) + \gamma \log_{10} \left( \frac{I}{1000} \right) \right)$$

Donde  $\beta$  indica la disminución de la eficiencia del panel respecto de la temperatura, y vale  $\beta = 0.0045K^{-1}$ , y  $\gamma$  mide la disminución de la eficiencia en condiciones de poca luz, y vale  $\gamma = 0.1$ . El rendimiento de referencia,  $\eta_{ref}$ , toma el valor de 15.6% para una temperatura de la célula de 25°C y un nivel de irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>.

#### 6.4.1.1. Modelo cielo nublado.

Para poder simular el balance energético del sistema PV-PCM, es necesario modelar los parámetros temperatura de cielo ( $T_{\text{cielo}}$ ) y emisividad del cielo ( $\varepsilon_{\text{cielo}}$ ), ya que estos no toman valores constantes, sino que dependen de las condiciones climáticas.

Ursula Eicker y Antoine Dalibard utilizan en su estudio [7] un modelo numérico capaz de simular la temperatura de cielo en función de tres parámetros: coeficiente de claridad, presión parcial del vapor, y temperatura ambiente, y la emisividad del cielo en función del coeficiente nubosidad.

El coeficiente de nubosidad,  $C_{\text{cover}}$ , fue introducido por Kasten and Czeplak [31] para determinar la fracción de cielo que se encuentra cubierta de nubes, y puede tomar valores entre 0 y 1. Se determina mediante los valores de radiación global ( $G$ ) y radiación difusa ( $G_d$ ):

$$C_{\text{cover}} = \left(1.4286 \frac{G_d}{G} - 0.3\right)^{0.5}$$

De esta manera, la emisividad del cielo viene dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{\text{cielo}} = \varepsilon_{\text{cielo,despejado}} + 0.8(1 - \varepsilon_{\text{cielo,despejado}})C_{\text{cover}}$$

El coeficiente de claridad,  $K_0$ , fue introducido por Aubinet [32], y representa la ratio entre la radiación global horizontal  $G_h$  y la radiación extraterrestre  $G_0$ :

$$K_0 = \frac{G_h}{G_0}$$

La temperatura de cielo se calcula por tanto como:

$$T_{\text{cielo}} = 94 + 12.6 \ln(p_d) - 13K_0 + 0.341T_{\text{amb}}$$

Donde  $p_d$  es la presión parcial de vapor:

$$p_d = p_v \cdot \varphi(T, p, x)$$

Esta se obtiene a partir de los valores de presión de vapor  $p_v$  y humedad relativa  $\varphi$ . La presión de vapor se obtiene de la siguiente manera:

$$p_v(T) = 1.6071 \cdot 10^{12} \cdot (T)^{0.2479} \cdot e^{\left(\frac{-5.8001 \cdot 10^3 - 7.7099 \cdot 10^{-3} \cdot (T)^2}{T}\right)}$$

#### 6.4.1.2. Modelo de referencia.

El modelo de referencia, utilizado por Marta Mellado Cerpa en [6] y por Christopher J. Smith et Al. en [5], se basa en una hipótesis simplificativa mediante la cual la temperatura de cielo sólo depende de la temperatura ambiente y la emisividad del cielo es un valor constante. Es el modelo con el que se van a comparar los resultados obtenidos.

$$T_{\text{cielo}} = 0,0552T_{\text{amb}}^{1,5}$$
$$\varepsilon_{\text{cielo}} = 0.95$$



## 6.5 Modelo numérico.

El balance energético del sistema PV-PCM se modela numéricamente con un sistema unidimensional de 44 ecuaciones diferenciales simultáneas no lineales. El cambio de temperatura en cada capa viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 C_{vidrio} \frac{dT_{vidrio}}{dt} &= q_f^{RAD,corta} + q_f^{RAD,larga} + q_f^{CONV} + G_{vidrio}(T_{cel} - T_{vidrio}) \\
 C_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} &= G_{cel}(T_{alu(1)} + T_{vidrio} - 2T_{cel}) + A\alpha_{cel}\tau_{vidrio}(1 - \alpha_{vidrio})I - P_{salida} \\
 C_{alu} \frac{dT_{alu(1)}}{dt} &= G_{alu}(T_{PCM_1} + T_{cel} - 2T_{alu(1)}) \\
 \frac{dT_{PCM(1)}}{dt} \left( \frac{dH}{dT_{PCM(1)}} \right) &= G_{PCM(1)}(T_{PCM(2)} + T_{alu(1)} - 2T_{PCM(1)}) \\
 \frac{dT_{PCM(i)}}{dt} \left( \frac{dH}{dT_{PCM(i)}} \right) &= G_{PCM(i)}(T_{PCM(i+1)} + T_{alu(i-1)} - 2T_{PCM(i)}) \quad i=2,\dots,39 \\
 \frac{dT_{PCM(40)}}{dt} \left( \frac{dH}{dT_{PCM(40)}} \right) &= G_{PCM(40)}(T_{alu(2)} + T_{PCM(39)} - 2T_{PCM(40)}) \\
 C_{alu} \frac{dT_{alu(2)}}{dt} &= G_{alu}(T_{PCM(40)} - T_{alu(2)}) + q_t^{RAD,larga} + q_t^{CONV}
 \end{aligned}$$

El sistema de ecuaciones se resuelve mediante el método de Euler, escogiendo un paso lo suficientemente pequeño (una décima de segundo) para garantizar la estabilidad y mantener el sistema sensible a los cambios de las condiciones climáticas.

## 6.6 Datos climáticos.

En este estudio se analizan 2 ciudades con diferentes condiciones climáticas. La tabla 6 muestra las respectivas ciudades, el país en el que se encuentran y las coordenadas geográficas.

CIUDAD	PAIS	LATITUD (°N)	LONGITUD*(°)	ALTITUD (m)
Nzema	Ghana	6,67	-1,68	237
Neuhardenberg	Alemania	52	14,2	28

(\*) Valores de longitud positivos hacia el este.

**Tabla 6:** Localización geográfica de las ciudades estudiadas

Con estas dos ciudades se intenta representar dos climas muy diferentes que se encuentran a nivel mundial. Las principales diferencias climáticas de dichas ciudades son: Nzema (Ghana) presenta un clima cálido y bastante constante en todo el año, con altos valores de irradiancia y temperatura, mientras que Neuhardenberg

(Alemania) presenta menor temperatura ambiente e irradiancia durante todo el año, más variante que Nzema.

Los datos climáticos son proporcionados por METEONOR, siendo estos datos valores medios para cada hora del año de las siguientes variables: temperatura ambiente (°C), irradiancia global, difusa y extraterrestre (W/m<sup>2</sup>), humedad relativa (%), y velocidad del viento (m/s). A partir de estos datos se obtiene el valor de temperatura de cielo (°C) y emisividad del cielo.

Estos datos son tratados utilizando el “método hora a hora”, implementado por Marta Mellado Cerpa en [6].

### 6.6.1 Método hora a hora.

Puesto que el modelo de balance de energía del sistema PV-PCM se resuelve mediante el método de Euler con un paso de décima de segundo, y los datos de entrada al sistema son hora a hora, se realiza una interpolación lineal de los datos proporcionados en cada hora para cada décima de segundo [6].

El número de intervalos a interpolar es:

$$\left( (T_a, I, v_v, T_c, \varepsilon_c)_{(j)}, (T_a, I, v_v, T_c, \varepsilon_c)_{(j+1)} \right)$$

$$\forall j = 1, \dots, 8759$$

Obteniéndose para cada décima de segundo de cada intervalo horario los parámetros de entrada al sistema de la siguiente forma:

$$\text{Irradiancia: } I_{ji} = \frac{I_{j+1} - I_j}{3600} \cdot 0,1 \cdot i + I_j$$

$$\text{Velocidad del viento: } v_{ji} = \frac{v_{j+1} - v_j}{3600} \cdot 0,1 \cdot i + v_j$$

$$\text{Temperatura ambiente: } T_{aji} = \frac{T_{aj+1} - T_{aj}}{3600} \cdot 0,1 \cdot i + T_{aj}$$

$$\text{Temperatura de cielo: } T_{cji} = \frac{T_{cj+1} - T_{cj}}{3600} \cdot 0,1 \cdot i + T_{cj}$$

$$\text{Emisividad del cielo: } \varepsilon_{cji} = \frac{\varepsilon_{cj+1} - \varepsilon_{cj}}{3600} \cdot 0,1 \cdot i + \varepsilon_{cj}$$

$$\forall i = 1, \dots, 36000$$

## 6.7 Optimización.

Para llevar a cabo la optimización de la temperatura de cambio de fase,  $T_m$ , objetivo principal de este estudio, se calcula la producción eléctrica anual variando la temperatura de cambio de fase desde  $0^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$ , manteniendo constante el espesor del PCM ( $0,05\text{m}$ ). Fijando  $z=0,05\text{m}$  se obtiene el número de capas, en este caso,  $l=40$ .

De esta manera, se consigue obtener la temperatura óptima que maximiza la producción de energía eléctrica, calculada de la siguiente manera:

$$E_h(\text{Wh}) = \left(\frac{h}{3600}\right) \sum_{i=1}^{36000} P_{\text{salida}_i}(\text{W}) = \left(\frac{h}{3600}\right) \sum_{i=1}^{36000} A\eta_i I_i$$
$$E_{\text{ANUAL}}(\text{kWh}) = \left(\frac{1}{1000}\right) \sum_{h=1}^{8760} E_h$$

En esta fórmula, se utiliza  $h=0,1\text{s}$ , el paso del método de Euler utilizado para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales.

## 6.8 Resultados del modelo de referencia.

Marta Mellado Cerpa en su Trabajo de fin de Grado, [6], estudia la influencia de una de las hipótesis simplificativas del estudio que ha servido como base para ambos trabajos, “Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling” [5]. Este estudio estima la energía anual de salida del sistema mediante el método del día medio, el cual replica el día medio de cada mes, utilizando valores medios de los datos climatológicos de entrada al sistema.

Marta Mellado Cerpa obtiene en su estudio que este método introduce una sobrestimación de la potencia producida debido a que no tiene en cuenta la acumulación de calor del PCM, sino que supone que el ciclo del PCM se regenera completamente durante la noche. Además, se produce una desviación de la temperatura óptima de cambio de fase, siendo esta mayor en los meses de mayor irradiancia, al utilizar el método hora a hora.

---

# 7 RESULTADOS

---

## 7.1 Estudio previo.

El objetivo de este apartado es explicar por qué puede ser necesario tener en cuenta el resto de las variables de las cuales depende la temperatura de cielo, y predecir cuánto puede llegar a variar la temperatura de cielo al introducir el modelo numérico que tiene en cuenta la nubosidad, y finalmente, la potencia eléctrica producida.

Para ello, se estudia en primer lugar la influencia del coeficiente de claridad ( $K_o$ ) y de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) sobre la temperatura de cielo, y se pretende ver si existe una relación entre la temperatura ambiente y las variables nombradas anteriormente, para así poder relajar la hipótesis que determina la temperatura de cielo como una función de la temperatura ambiente únicamente.

En segundo lugar, se pretende estudiar la influencia de la nubosidad en el intercambio radiativo y consecuentemente, en la potencia eléctrica producida. Para ello, se estudian cuatro periodos de tiempo que representan situaciones que combinan los posibles estados del cielo (despejado día y noche, despejado de día y nublado de noche, nublado de día y despejado de noche, y nublado de día y noche), analizando las variaciones de calor radiativo, potencia instantánea y energía eléctrica producida durante dichos periodos de tiempo.

A partir de ahora, se denominará al modelo de referencia como REF, y al modelo estudiado, puesto que su principal diferencia radica en la inclusión de la nubosidad, se le denominará NUB, para una clara comprensión de las gráficas y tablas presentadas.

### 7.1.1 Influencia de $K_o$ y $P_d$ sobre la Tcielo.

La ecuación matemática que introduce la temperatura de cielo ( $T_{cielo}$ ) en función de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) y la presión parcial ( $P_d$ ) es la siguiente:

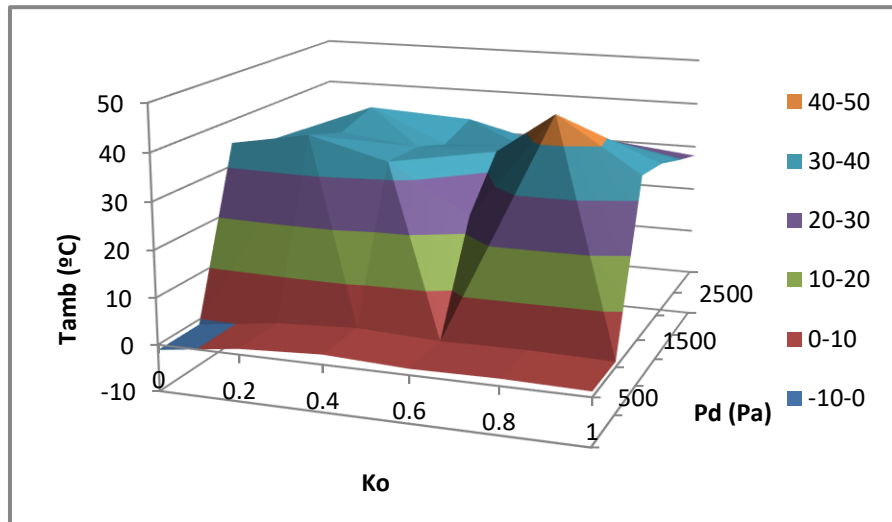
$$T_{cielo} = 94 + 12,6 \cdot \ln(p_d) - 13 \cdot K_o + 0,341 \cdot T_{amb}$$

A diferencia del modelo de referencia, donde la temperatura de cielo solo es función de la temperatura ambiente:

$$T_{cielo} = 0,0552 \cdot T_{amb}^{\frac{3}{2}}$$

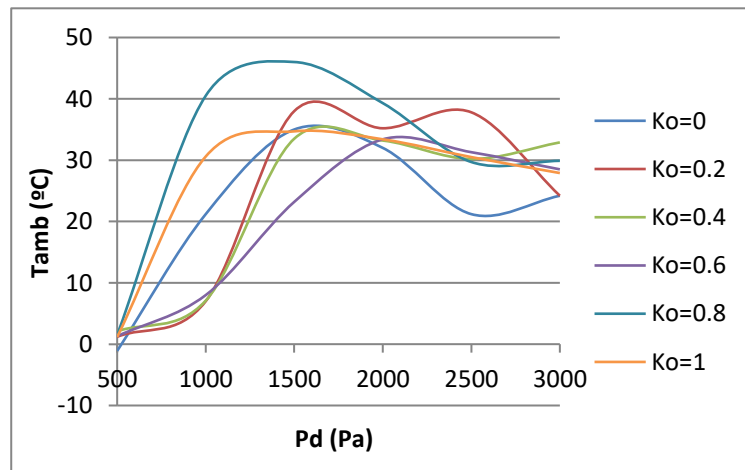
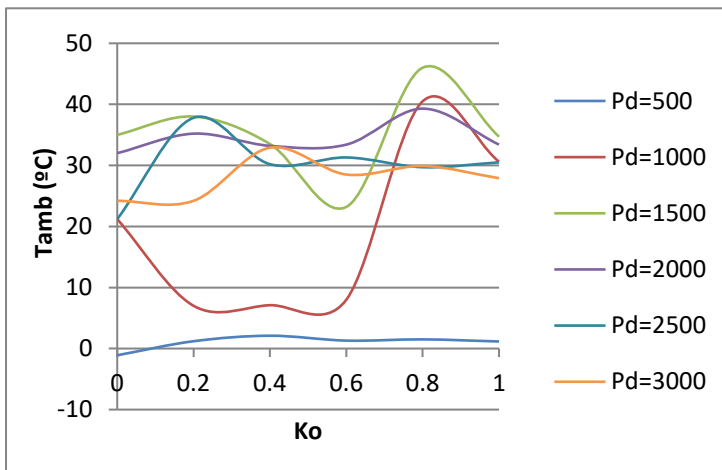
El análisis de influencia del coeficiente de claridad  $K_o$  y la presión parcial  $p_d$  son objeto de este apartado. El factor de claridad toma valores entre 0 y 1, siendo 0 sinónimo de cielos con alta nubosidad y 1 cielos despejados.

En primer lugar, se pretende ver si existe una relación entre la temperatura ambiente y los parámetros de coeficiente de claridad y presión parcial. Para ello, se toman datos ambientales reales de las cinco ciudades estudiadas y se representan en el siguiente gráfico. Se observa, como era de esperar, que existe una tendencia de aumento de la temperatura ambiente conforme aumenta la presión parcial, y que los valores máximos de temperatura ambiente se dan en días con altos coeficientes de claridad (despejados) y altas presiones parciales. Sin embargo, no se conoce la relación que exprese la temperatura ambiente en función de  $K_o$  y  $P_d$ , puesto que son parámetros independientes. Por tanto, la temperatura de cielo debería ser expresada en función de  $K_o$  y  $P_d$ , y no sólo en función de la temperatura ambiente.



**Figura 15:** Superficie que representa la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ). Los diferentes colores representan los intervalos de temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).

Los siguientes gráficos pretenden dar una visión más clara de la no existente relación entre la temperatura ambiente y los parámetros  $K_o$  y  $P_d$ .



**Figura 16:** Representación gráfica de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en función del coeficiente de claridad ( $K_o$ ). Cada curva de distinto color representa un valor constante de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ).

**Figura 17:** Representación gráfica de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ). Cada curva de distinto color representa un valor constante del coeficiente de claridad ( $K_o$ ).

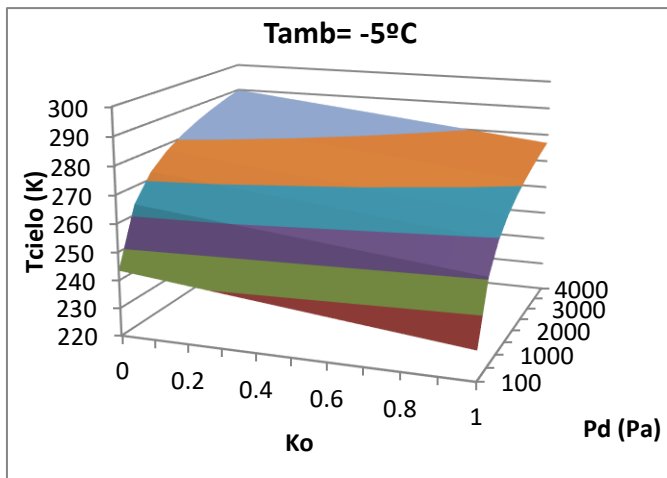
Como se puede observar, la temperatura de cielo depende de la nubosidad y la presión parcial. A continuación, se pretende estudiar el peso de dichos coeficientes en la temperatura de cielo, para estimar cuánto podrá variar esta al introducir dichos parámetros.

Recordando la expresión de la temperatura de cielo:

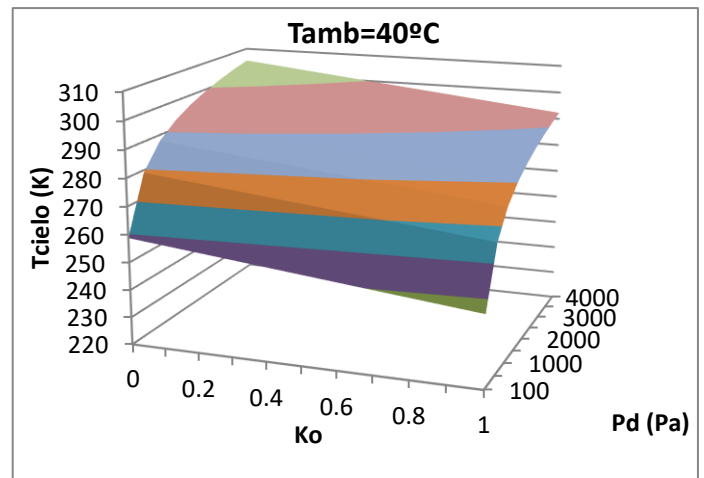
$$T_{cielo} = 94 + 12,6 \cdot \ln(p_d) - 13 \cdot K_o + 0,341 \cdot T_{amb}$$

Para ver el efecto de la nubosidad, se mantienen el resto de los parámetros constantes, y puesto que  $K_o$  toma valores entre 0 y 1, la temperatura de cielo podrá variar un máximo de 13°C. Sin embargo, también es dependiente de la presión parcial de vapor, y se observa en los datos climáticos de las distintas ciudades que esta puede variar entre 100 y hasta 3500 Pa, por lo que este término de la ecuación puede hacer que la temperatura de cielo varíe hasta 44.8 °C.

Los siguientes gráficos muestran la influencia de  $K_o$  y  $P_d$  en la temperatura de cielo, eligiendo dos valores constantes de temperatura ambiente muy diferentes, -5°C y 40°C. Se observa que, a menor coeficiente de claridad, y mayor presión parcial, mayor será la temperatura de cielo, y, por tanto, mayor será la diferencia con la temperatura de cielo calculada por el modelo de referencia. Sin embargo, se observa en los datos climáticos de las distintas ciudades, que es difícil encontrar días muy nublados ( $K_o$  cercano a 0) donde la presión parcial de vapor sea muy elevada, puesto que una presión parcial elevada se suele relacionar con climas de altas temperaturas, donde suele ser menos probable encontrar una gran proporción de días nublados. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que existan ciudades que presenten este tipo de clima, altas temperaturas y altas presiones parciales, y alto grado de nubosidad, donde sí sería muy conveniente tener en cuenta el efecto de ambos parámetros sobre la temperatura de cielo, pues esta puede variar bastante.



**Figura 18:** Representación gráfica de la temperatura de cielo ( $T_{cielo}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) para una temperatura ambiente dada de -5°C.



**Figura 19:** Representación gráfica de la temperatura de cielo ( $T_{cielo}$ ) en función de la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) para una temperatura ambiente dada de 40°C.

### 7.1.2 Influencia de la nubosidad sobre la producción de potencia eléctrica.

Este apartado tiene como objeto estudiar la influencia de la nubosidad, expresada mediante los coeficientes de claridad ( $K_o$ ) y nubosidad ( $C_{cover}$ ), sobre la potencia eléctrica producida. Puesto que el hecho de incluir un modelo de cielo nublado hace que tanto la temperatura de cielo como la emisividad del cielo se vean modificadas, y estas variables sólo aparecen expresamente en el intercambio radiativo con el cielo, resulta interesante ver la influencia de la nubosidad ( $K_o$ ,  $C_{cover}$ ) en el intercambio radiativo.

Recordando la expresión de la temperatura de cielo y la emisividad en el modelo de cielo nublado:

$$T_{cielo} = 94 + 12,6 \cdot \ln(p_d) - 13 \cdot K_o + 0,341 \cdot T_{amb}$$
$$\varepsilon_{cielo} = \varepsilon_{cielo,despejado} + 0.8(1 - \varepsilon_{cielo,despejado})C_{cover}$$

Estas variables afectan directamente al intercambio radiativo de la parte frontal del panel con el entorno según la siguiente expresión:

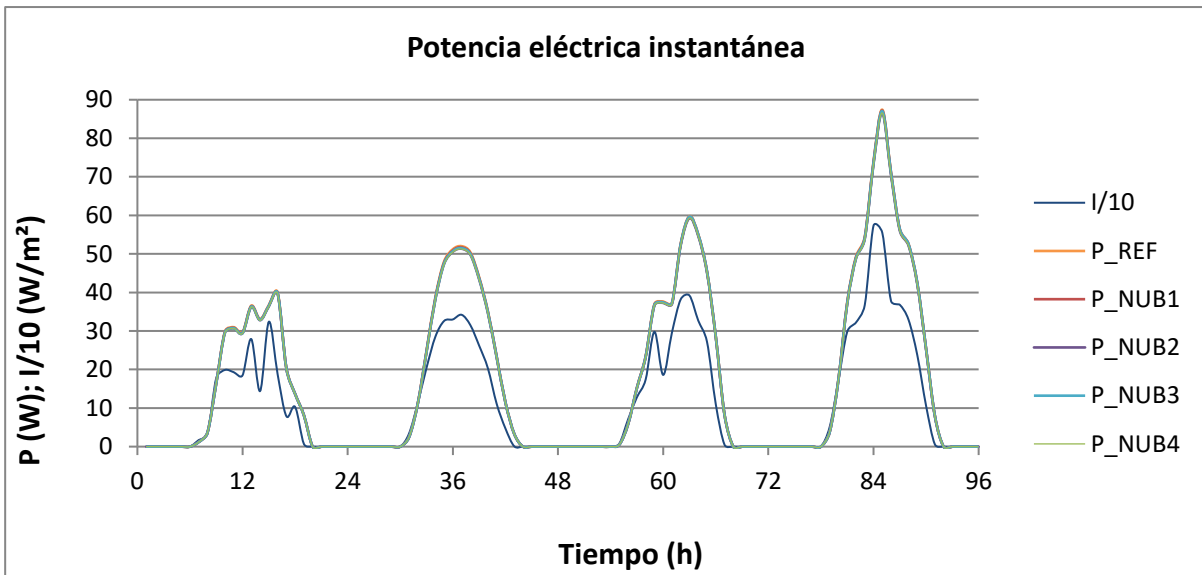
$$q_f^{RAD,larga} = A\sigma(\varepsilon_{cielo}T_{cielo}^4 - \varepsilon_{vidrio}T_{vidrio}^4)$$

Para cuantificar la influencia de la nubosidad sobre el intercambio radiativo y la potencia eléctrica, se simulan cuatro periodos de tiempo de cuatro días cada uno, que presentan las posibles combinaciones de estado del cielo: despejado de día y de noche, nublado de día y despejado de noche, despejado de día y nublado de noche, y nublado de día y de noche. Puesto que se trata de un estudio teórico, los datos climáticos no pertenecen a días reales, pero son similares a ciertos días que se pueden encontrar entre los datos climáticos de Neuhausen (Alemania). Para simplificar los resultados del análisis de las cuatro situaciones, se presentan los resultados en función del coeficiente de claridad ( $K_o$ ) únicamente, ya que el coeficiente de nubosidad ( $C_{cover}$ ) evoluciona con tendencia opuesta al coeficiente de claridad.

Las cuatro situaciones son:

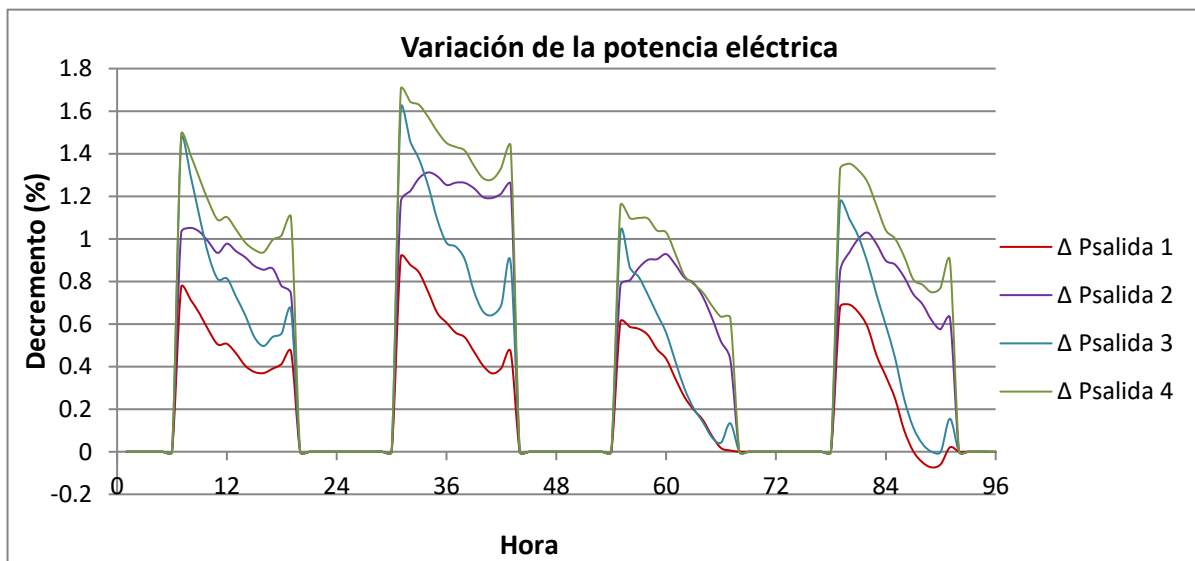
1. Día despejado ( $K_o \uparrow$ ) – Noche despejada ( $K_o \uparrow$ )
2. Día nublado ( $K_o \downarrow$ ) – Noche despejada ( $K_o \uparrow$ )
3. Día despejado ( $K_o \uparrow$ ) – Noche nublada ( $K_o \downarrow$ )
4. Día nublado ( $K_o \downarrow$ ) – Noche nublada ( $K_o \downarrow$ )

Se presenta a continuación los resultados obtenidos de potencia eléctrica producida instantánea en un periodo horario de 96 horas, para las cuatro situaciones explicadas anteriormente, y la situación de referencia, es decir, utilizando el modelo de referencia que no tiene en cuenta la nubosidad a la hora de calcular la temperatura de cielo. Posteriormente, se procederá a buscar una posible explicación de dichos resultados obtenidos.



**Figura 20:** Representación gráfica de la potencia eléctrica instantánea obtenida en las cuatro situaciones estudiadas ( $P_{NUB1}$ ,  $P_{NUB2}$ ,  $P_{NUB3}$ ,  $P_{NUB4}$ ) y en la situación de referencia ( $P_{REF}$ ) en un periodo de 96h. Se representa la irradiancia dividida por 10 ( $I/10$ ).

A simple vista, parece que los resultados no varían al modificar las condiciones de nubosidad respecto a la situación de referencia, por lo que se recurre a representar la diferencia en tanto por ciento, obteniendo casi en todo momento un decremento de la potencia eléctrica respecto a la situación de referencia, excepto en el intervalo horario de 84-96h en la situación 1, en la que se produce un incremento de la potencia eléctrica respecto a la situación de referencia. Esto se debe a que en este intervalo la presión de vapor es baja y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) es alto, y por tanto la temperatura de cielo calculada por el modelo de cielo nublada es menor que la del modelo de referencia. Este caso no suele ocurrir en la realidad, ya que coeficientes altos de claridad (días despejados) se suelen relacionar con presiones parciales de vapor altas.



**Figura 21:** Representación del decremento de potencia eléctrica que se da en las cuatro situaciones estudiadas respecto a la situación de referencia.



Se observa que los momentos en los que se produce un gran decremento de la producción de potencia eléctrica corresponden con las primeras horas de irradiancia las que los niveles de irradiancia son muy bajos, y la diferencia es menor durante las horas del día en las que la irradiancia alcanza mayores valores, por lo que la influencia sobre la energía eléctrica producida será menor ya que las horas de baja irradiancia son las que menos energía eléctrica aportan al cómputo final. Para entender la influencia de la nubosidad sobre la potencia eléctrica producida y buscar una posible relación, se representa la variación de potencia eléctrica producida en cada situación, frente al coeficiente de claridad ( $K_o$ ).

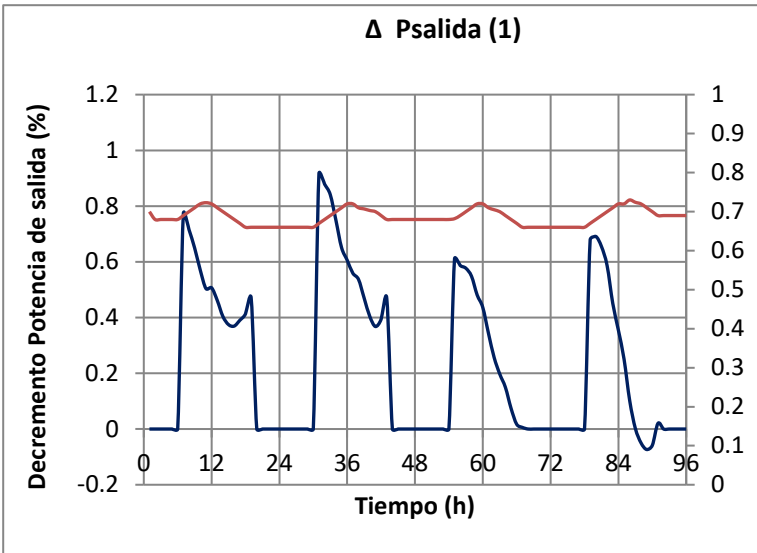


Figura 22

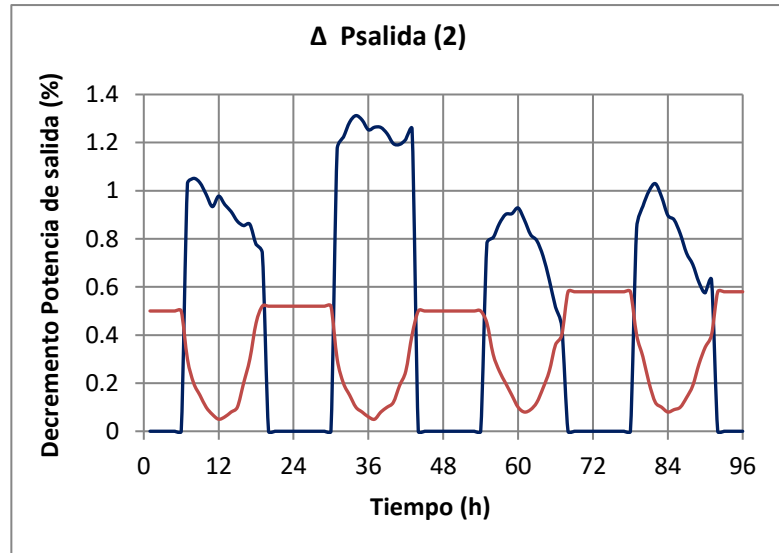


Figura 23

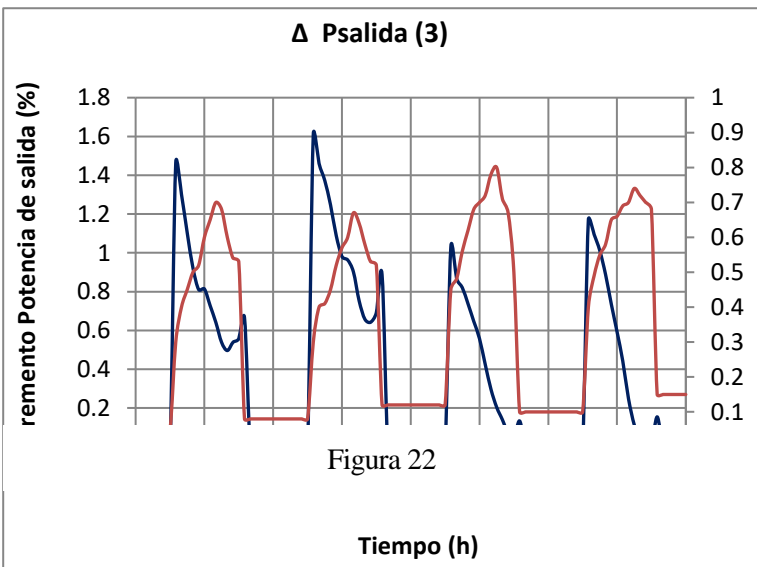


Figura 22

Tiempo (h)

Figura 24

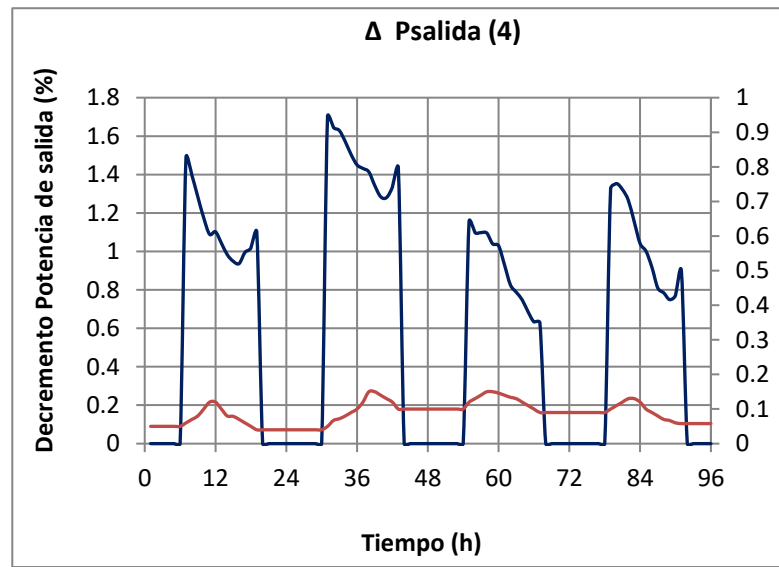
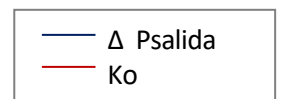


Figura 25

**Figuras 22, 23, 24, 25:** Representación gráfica de la variación de potencia eléctrica para cada situación (1, 2, 3 y 4) frente al valor del coeficiente de claridad ( $K_o$ )



Se observa que la variación de potencia eléctrica es mayor conforme decrece el coeficiente de claridad,  $K_o$ , es decir, conforme aumenta la nubosidad, y que suele alcanzar su máximo valor en las primeras y últimas horas de irradiancia del día. Además, el decremento de potencia producida es mayor en la situación 4 (cielo nublado día y noche), seguido de la situación 2 (cielo nublado de día, despejado de noche). Para cuantificar esta diferencia en términos de energía, se representa la energía total producida durante 96h en las cuatro situaciones y la situación de referencia, y se calcula la variación total de energía producida en cada caso.

La variación total de energía producida se calcula como:

$$\Delta\text{Energía} = \frac{\text{Energía}_{\text{NUB}} - \text{Energía}_{\text{REF}}}{\text{Energía}_{\text{REF}}} \cdot 100$$

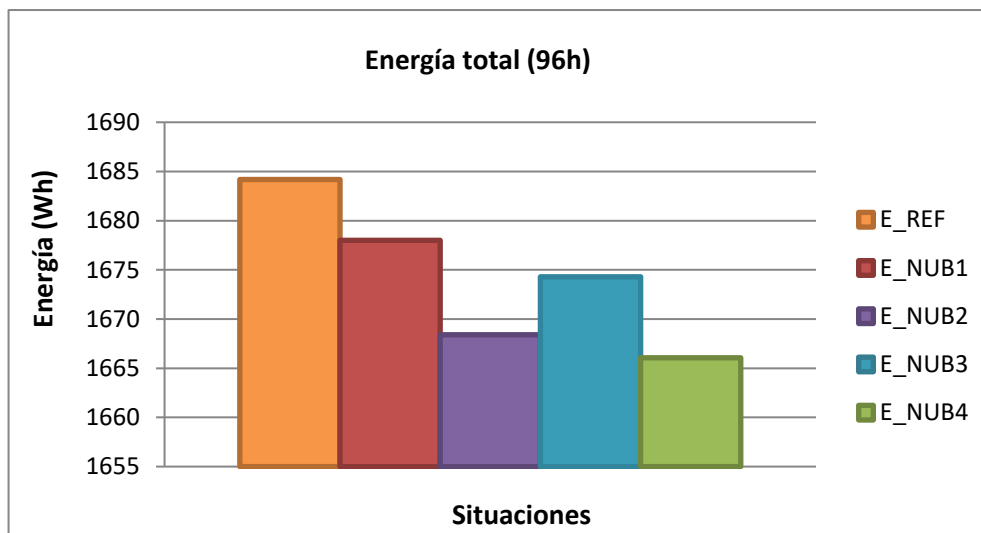
Se obtienen los siguientes resultados:

$$\Delta\text{Energía}_1 = -0.36796\%$$

$$\Delta\text{Energía}_2 = -0.93669\%$$

$$\Delta\text{Energía}_3 = -0.58717\%$$

$$\Delta\text{Energía}_4 = -1.07696\%$$



**Figura 26:** Representación gráfica de la energía total producida durante 96h en las cuatro situaciones de estudio (E\_NUB1, E\_NUB2, E\_NUB3, E\_NUB4) y la situación de referencia (E\_REF), en Wh.

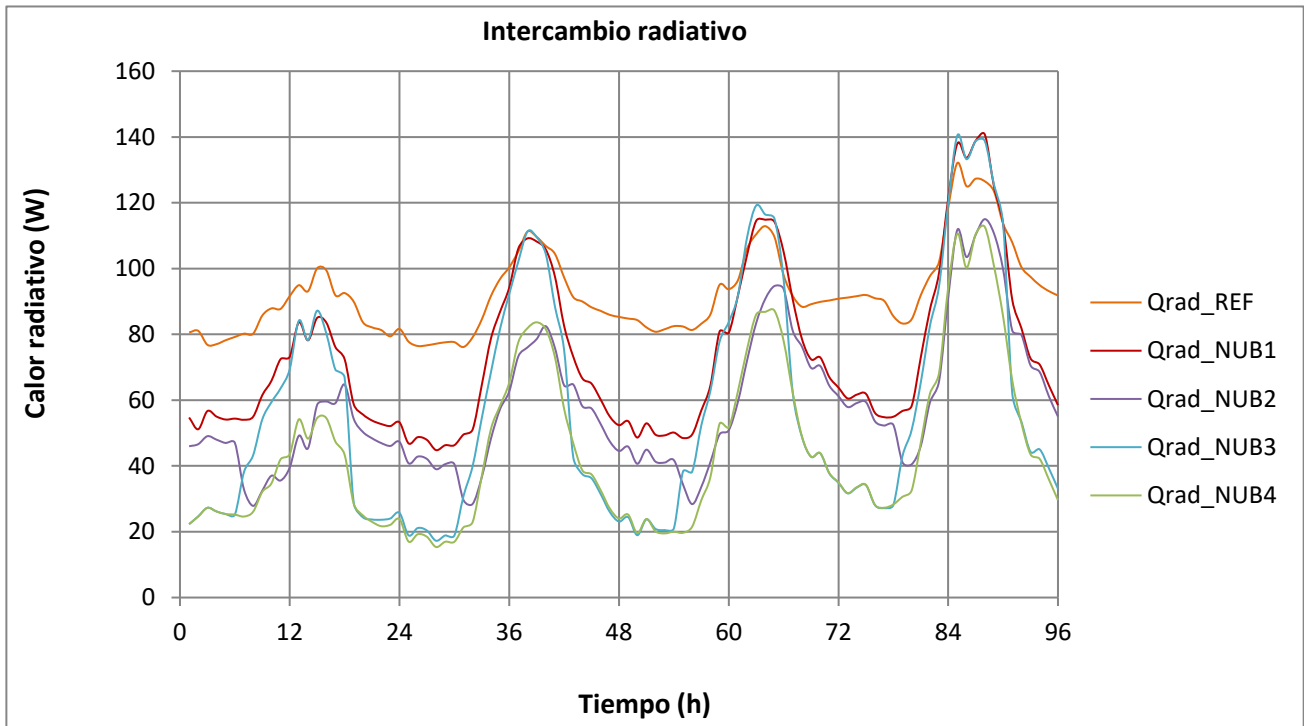
Se observa que la máxima variación de energía eléctrica producida tiene lugar en la situación 4, es decir, cielos nublados de día y de noche, seguida por la situación 2, cielos nublados de día y despejados de noche, como era de esperar. Las situaciones en las que el cielo se encuentra despejado durante el día son las que menos variación presentan, puesto que en dichas situaciones la temperatura de cielo y la emisividad varían menos respecto a la situación de referencia, en la que no se tiene en cuenta la nubosidad.

### 7.1.2.1. Influencia de la nubosidad sobre el intercambio radiativo.

Para poder dar una posible explicación a los resultados mostrados anteriormente, se estudia la influencia de modificar la temperatura de cielo y emisividad del cielo sobre el intercambio radiativo en las cuatro situaciones teóricas de estudio.

Recordando la expresión del intercambio radiativo:

$$q_f^{RAD,larga} = A\sigma(\varepsilon_{cielo}T_{cielo}^4 - \varepsilon_{vidrio}T_{vidrio}^4)$$

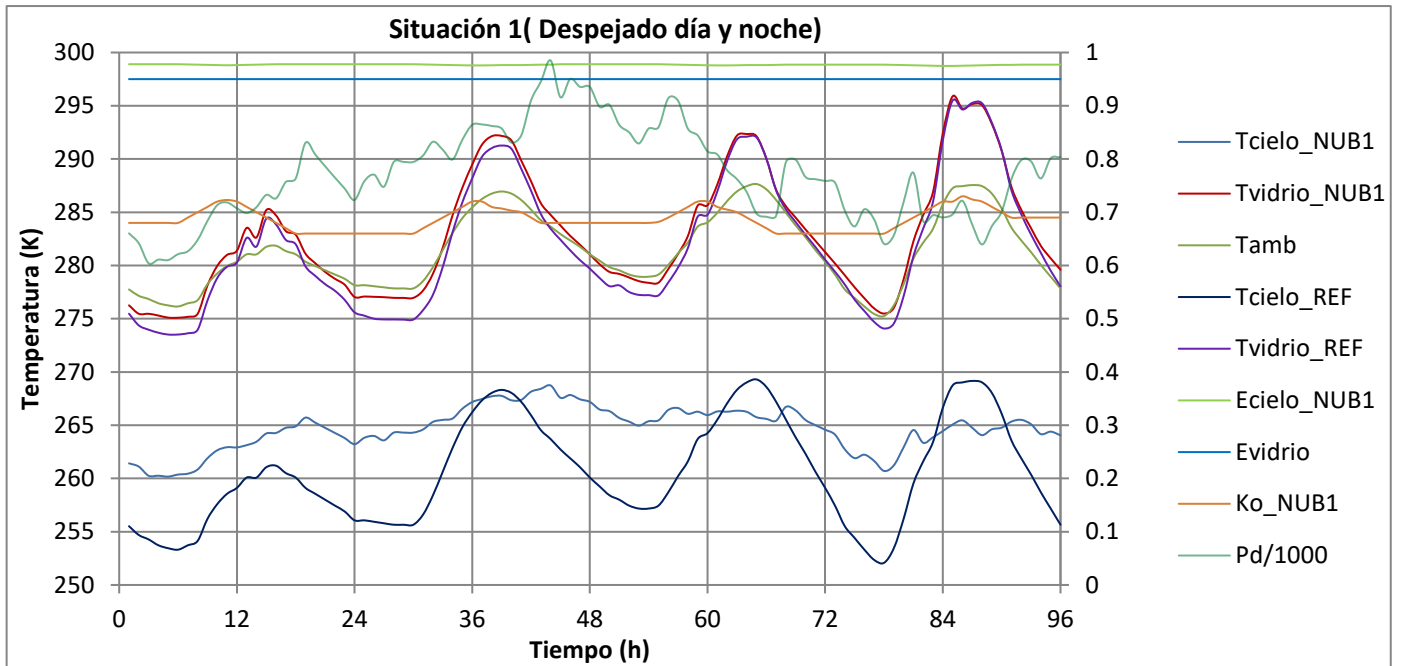


**Figura 27:** Representación gráfica del intercambio de calor radiativo que se produce en las cuatro situaciones de estudio (Qrad\_NUB1, Qrad\_NUB2, Qrad\_NUB3, Qrad\_NUB4), y en la situación de referencia (Qrad\_REF) frente al tiempo (h)

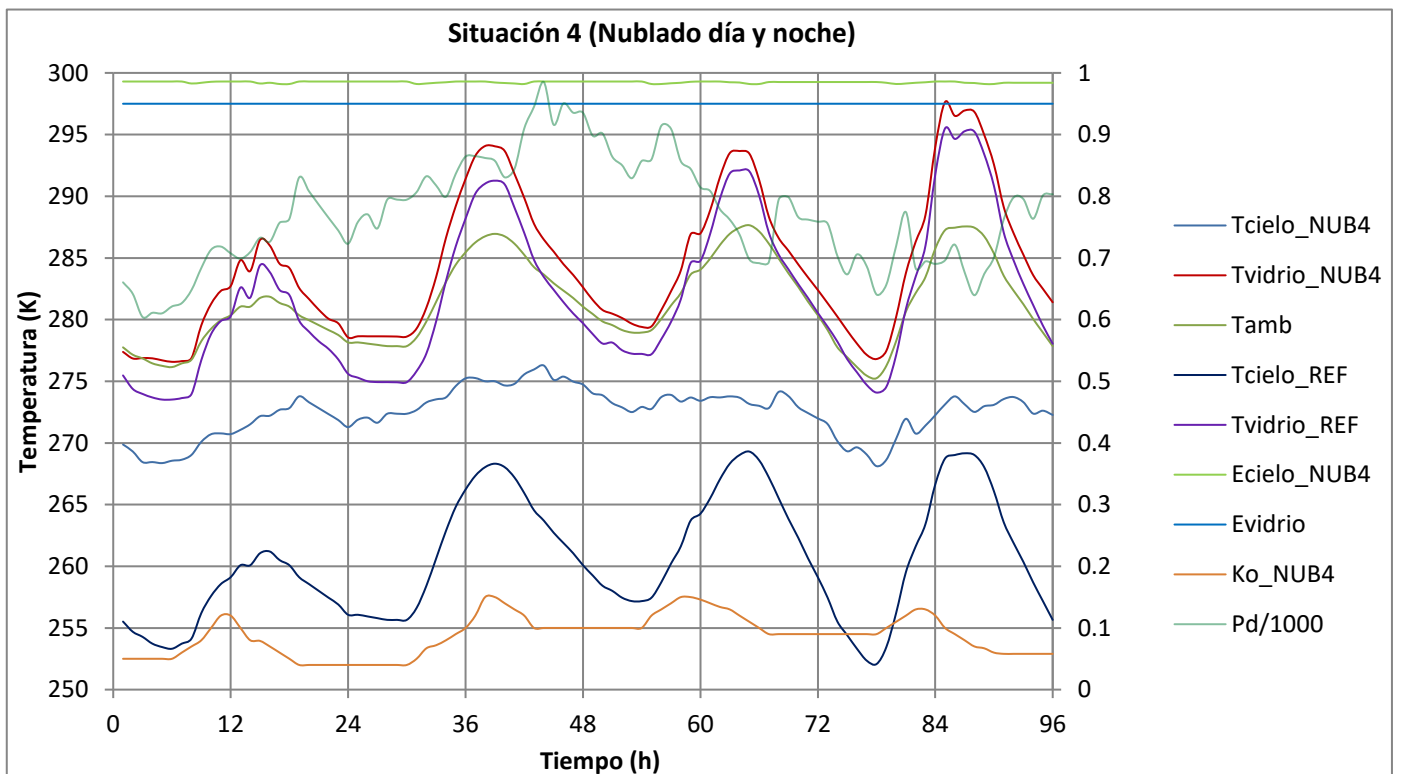
En primer lugar, se observa que en las situaciones 1 y 2, el intercambio radiativo llega a ser mayor que el intercambio radiativo calculado con el modelo de referencia en ciertos momentos durante el día en los que el coeficiente de claridad es elevado (cielos despejados) y la presión parcial de vapor es baja, situación que puede dar lugar a que la temperatura de cielo calculada con el modelo de cielo nublado (NUB) sea menor que la calculada con el modelo de referencia (REF). Como se ha comentado anteriormente, revisando los datos climatológicos de distintas ciudades, se observa que este tipo de días no suelen ser comunes, y que presiones parciales bajas suelen venir acompañadas de cielos nublados ( $K_o$  bajos).

En segundo lugar, se observa que, en todas las situaciones, la diferencia de intercambio radiativo respecto a la situación de referencia es mucho mayor durante la noche que durante el día. Esto se puede deber a que la diferencia de temperatura de cielo entre el modelo nublado y el de referencia sea mayor durante la noche que durante el día. Para dar una posible explicación al comportamiento de la curva de intercambio radiativo en las diferentes situaciones, se representa la evolución de los parámetros que intervienen en el intercambio radiativo: temperatura del vidrio, emisividad del vidrio, temperatura de cielo y emisividad del cielo, y a su vez, parámetros como la temperatura ambiente, el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) y la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) para ver el efecto de las condiciones climáticas sobre el intercambio de calor radiativo.

Se presentan únicamente las situaciones 1 y 4 ya que las conclusiones se pueden extrapolar al resto de situaciones, y se compara con la evolución de las temperaturas del sistema de referencia.



**Figura 28:** Evolución de los parámetros que intervienen en el intercambio radiativo ( $T_{\text{cielo}}$ ,  $E_{\text{cielo}}$ ,  $T_{\text{vidrio}}$ ,  $E_{\text{vidrio}}$ ) en la situación de referencia y situación de estudio 1. Se representa además la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ), el coeficiente de claridad ( $K_o$ ), y la presión parcial de vapor  $P_d/1000$  (mPa)



**Figura 29:** Evolución de los parámetros que intervienen en el intercambio radiativo ( $T_{\text{cielo}}$ ,  $E_{\text{cielo}}$ ,  $T_{\text{vidrio}}$ ,  $E_{\text{vidrio}}$ ) en la situación de referencia y situación de estudio 4. Se representa además la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) y el coeficiente de claridad ( $K_o$ ), y la presión parcial de vapor  $P_d/1000$  (mPa)

De las gráficas 28 y 29 se puede extraer la siguiente información:

En primer lugar, el comportamiento que presenta el intercambio radiativo durante la noche, de manera que asciende y desciende sucesivamente, se debe a que la temperatura de cielo experimenta una variación similar, con subidas y bajadas sucesivas, como consecuencia de que tanto la temperatura ambiente como la presión parcial de vapor varían, ya que el coeficiente de claridad ( $K_o$ ) se mantiene constante por la noche. Se observa que la temperatura ambiente sólo desciende o se mantienen constante durante la noche, lo que indica que el hecho de que la temperatura de cielo descienda y ascienda se debe únicamente a la variación de la presión parcial de vapor, la cual presenta subidas y bajadas sucesivamente. Del resto de variables que intervienen en el intercambio radiativo, la emisividad del vidrio es un valor constante, la del cielo varía muy poco, siendo constante por la noche, y la temperatura del vidrio sigue una tendencia similar a la temperatura ambiente, de manera que por la noche o desciende o se mantienen constante. Por tanto, el hecho de que durante la noche el calor radiativo presente subidas y bajadas, se deberá principalmente a que la presión parcial presenta un comportamiento similar.

En segundo lugar, se observa que el hecho de que el intercambio radiativo por la noche sea mucho menor que durante el día cuando se introduce el modelo de cielo nublado en comparación con el modelo de referencia se debe a que la diferencia de entre la temperatura de cielo del modelo de referencia y la del modelo nublado es mayor por la noche que durante el día, puesto que durante la noche disminuye más la temperatura de cielo por el modelo de referencia ya que sigue la curva de la temperatura ambiente, mientras que la temperatura de cielo del modelo nublado no sufre grandes variaciones entre el día y la noche.

En tercer lugar, se observa en la gráfica 28 (situación 1) que hay varios momentos durante el día en los que la temperatura de cielo calculada por el modelo de referencia es menor que la calculada por el modelo de cielo nublado, correspondiéndose dichos momentos con valores altos del coeficiente de claridad ( $K_o$ ) y bajos de presión parcial de vapor ( $P_a$ ).

Finalmente, se observa que la diferencia entre la temperatura de cielo del modelo de referencia y del modelo de cielo nublado es mucho mayor en la situación 4 (cielos nublados de noche y de día) debido a que el coeficiente de claridad es bajo durante todas las horas del día, lo que justifica que la diferencia entre el intercambio radiativo del modelo de referencia y el intercambio radiativo del modelo de cielo nublado sea mayor en comparación con el resto de situaciones, tal y como se observa en la gráfica 27.

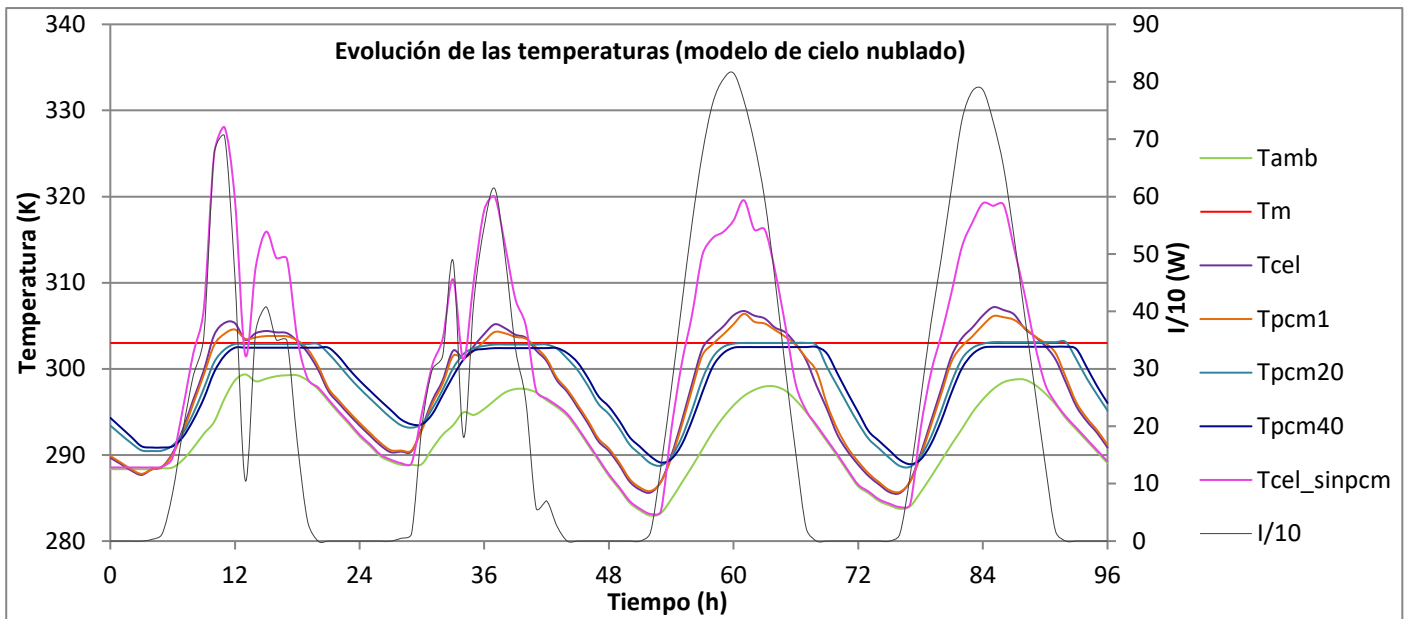
El hecho de que el intercambio radiativo sea mucho menor por la noche en cualquiera de las situaciones calculadas con el modelo de cielo nublado (NUB1, NUB2, NUB3, NUB4) que en la situación de referencia (REF) en la que no se tiene en cuenta la nubosidad, es de gran importancia ya que por la refrigeración nocturna del panel ocurre principalmente gracias al intercambio radiativo. Por tanto, un decremento del calor intercambiado podría significar una menor refrigeración del panel, y una menor recuperación del PCM.

Para observar en detalle el ciclo de regeneración del PCM y la refrigeración del panel gracias a la introducción de este material, parece interesante estudiar la evolución de la temperatura de las diferentes capas que forman el panel, obtenidas a partir los dos modelos estudiados (modelo de referencia, y modelo de cielo nublado).

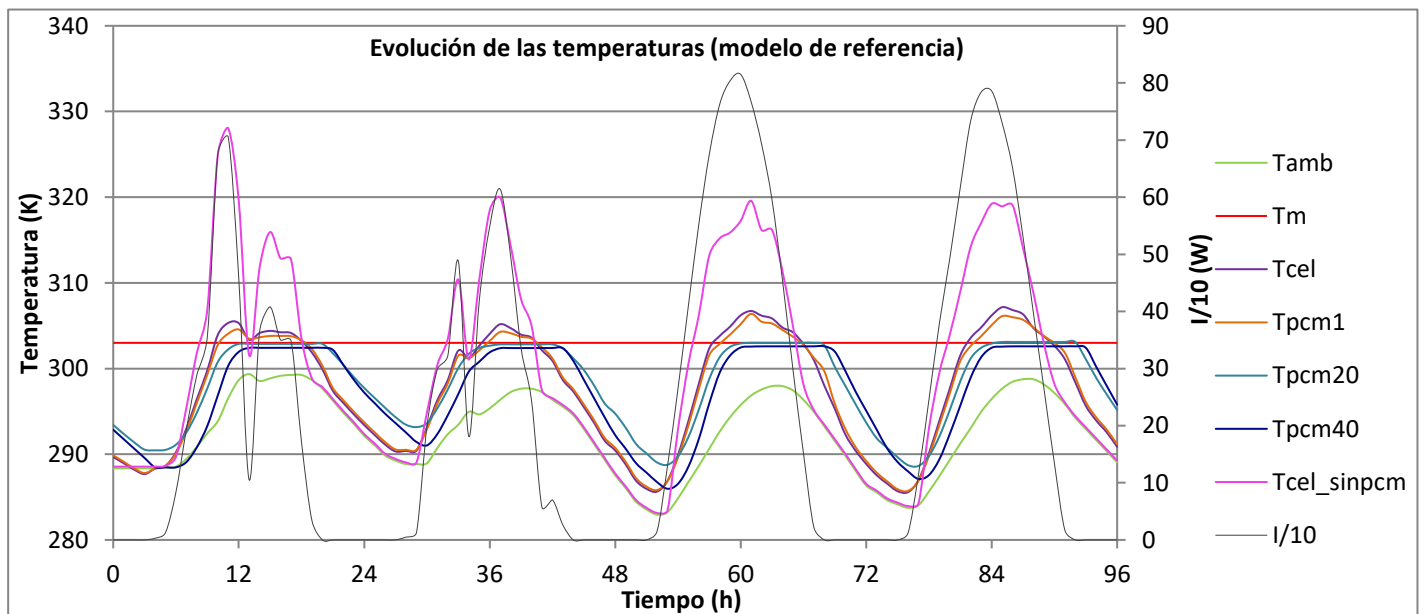
#### 7.1.2.2. Evolución de la temperatura de las capas del panel.

En este apartado, se analiza la evolución de las temperaturas de las capas que forman el sistema PV-PCM, eligiendo como capas más representativas la capa de células fotovoltaicas (PV), cuya temperatura se representa por  $T_{cel}$  (temperatura de la célula) y tres capas del PCM: la capa 1, que es la más cercana a la célula fotovoltaica, la capa 20, que se encuentra en el medio, y la 40, que es la última capa del PCM, y sus temperaturas se representan por  $T_{pcm1}$ ,  $T_{pcm20}$  y  $T_{pcm40}$ , respectivamente.

Para llevar a cabo el estudio, se ha elegido un periodo de 4 días consecutivos del mes de abril en Neuhausen (Alemania), tomando los datos climatológicos reales y calculando las correspondientes temperaturas, utilizando el modelo de cielo nublado y el de referencia. Junto con las temperaturas de las correspondientes capas de estudio, se representa la temperatura de cambio de fase del material PCM ( $T_m$ ), la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la irradiancia ( $I/10$ ), para un mejor entendimiento de la evolución de las temperaturas. Se representa, además, la temperatura de la célula si no se utilizara PCM ( $T_{cel\_sinpcm}$ ), para ver el efecto de refrigeración del PCM sobre el panel.



**Figura 30:** Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la célula ( $T_{cel}$ ), tres capas de PCM:  $T_{pcm(1)}$ ,  $T_{pcm(20)}$ ,  $T_{pcm(40)}$ ; temperatura de cambio de fase ( $T_m=303K$ ), temperatura de la célula sin PCM ( $T_{cel\_sinpcm}$ ), y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) utilizando el modelo de cielo nublado. (NUB)



**Figura 31:** Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la célula ( $T_{cel}$ ), tres capas de PCM:  $T_{pcm(1)}$ ,  $T_{pcm(20)}$ ,  $T_{pcm(40)}$ ; temperatura de cambio de fase ( $T_m=303K$ ), temperatura de la célula sin PCM ( $T_{cel\_sinpcm}$ ), y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) utilizando el modelo de referencia. (REF)

A simple vista, las temperaturas del conjunto de capas siguen una tendencia muy similar en ambos casos. La última capa del PCM se regenera por la noche, enfriándose y liberando parte de la energía almacenada, ya que como se ha explicado anteriormente, el PCM acumula calor de un día para otro, es decir, no se regenera completamente durante la noche.

En las horas de alta irradiancia, desde la última capa del PCM hasta la mitad, aproximadamente, el material se encuentra en estado de cambio de fase ( $T_{pcm20}$  y  $T_{pcm40}$  coinciden aproximadamente con la temperatura de cambio de fase,  $T_m$ ) por lo que el PCM está actuando como refrigerante, disminuyendo la temperatura que alcanza el panel, concretamente, la temperatura de la célula fotovoltaica ( $T_{cel}$ ), que se encuentra en dichas horas unos grados por encima de la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ). La temperatura de la célula es muy cercana a la temperatura de la primera capa del PCM ( $T_{pcm1}$ ), que se encuentra fundida a una temperatura mayor que la temperatura de cambio de fase, ya entre estas capas se produce la transferencia de calor de la célula al PCM. Se observa que, durante el día, la temperatura de la célula cuando se utiliza PCM es menor que cuando no se utiliza PCM, comprobándose así el efecto refrigerante del PCM, y reduciéndose considerablemente los picos de temperatura alcanzados.

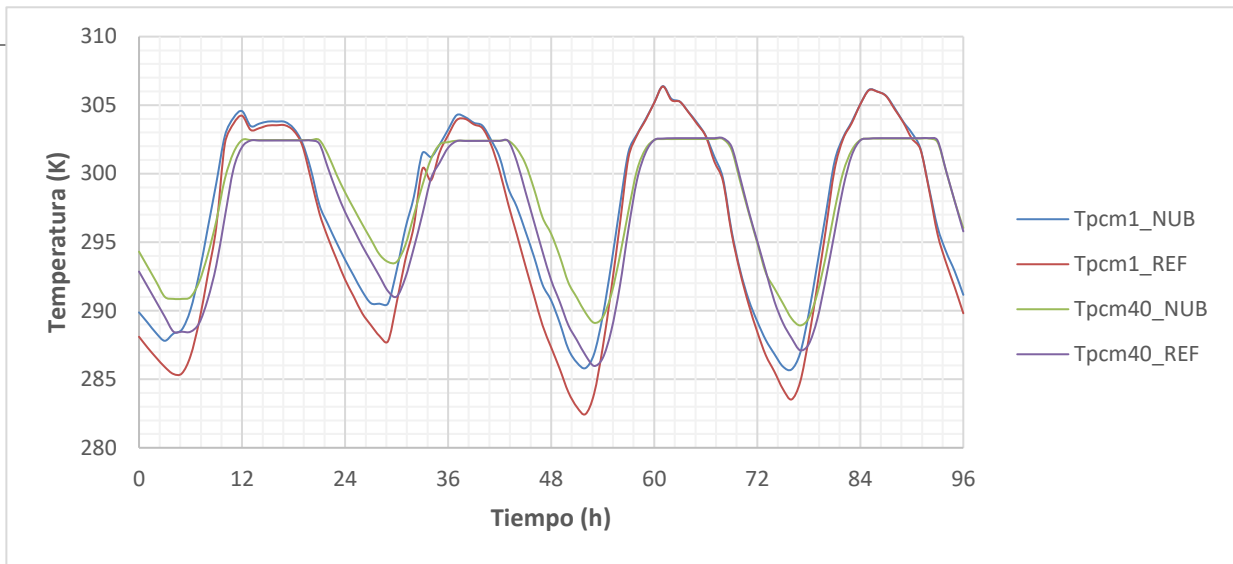
Durante la noche, el PCM se encuentra en estado sólido (por debajo de la temperatura de fusión,  $T_m$ ) tal y como se observa en la gráfica, este libera el calor contenido, enfriándose, y vuelve a absorber calor en las primeras horas de irradiancia, cambiando de estado, es decir, fundiéndose, en las horas de alta irradiancia.

La refrigeración del panel es sumamente importante ya que, como se ha explicado anteriormente, la temperatura de la célula afecta directamente al rendimiento del panel, y consecuentemente, a la potencia eléctrica producida.

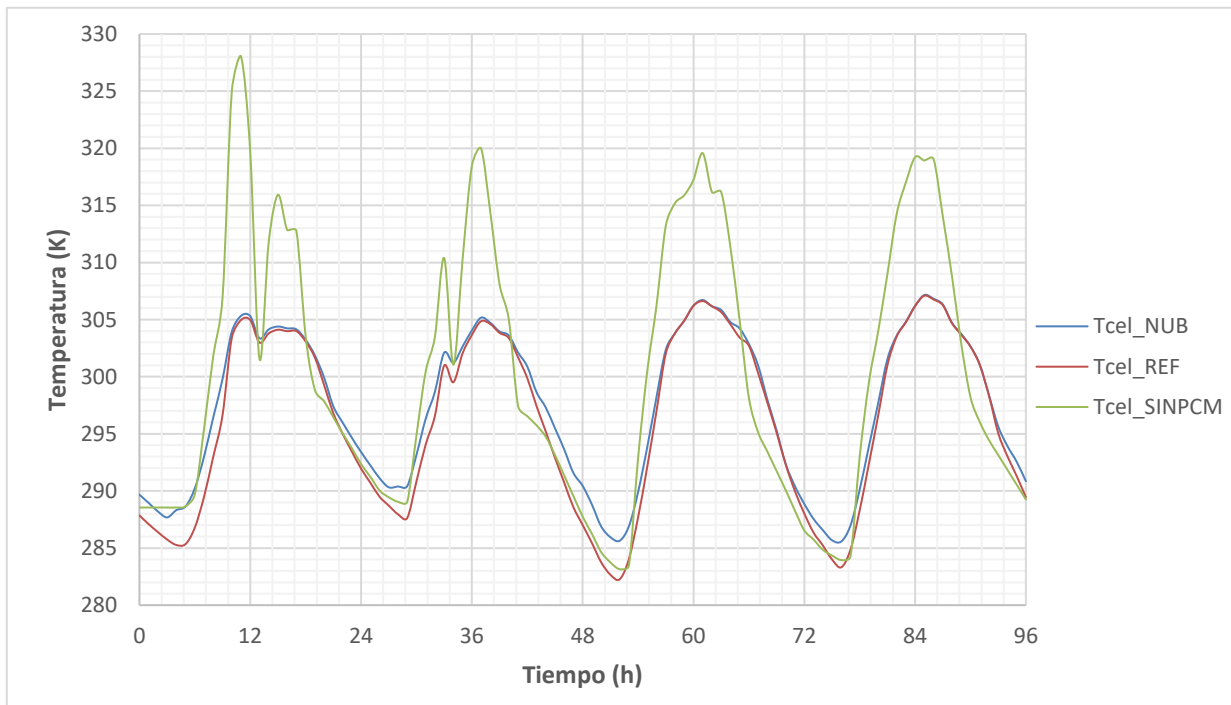
$$\eta = \eta_{ref} \left( 1 - \beta(T_{cel} - 298) + \gamma \log_{10} \left( \frac{I}{1000} \right) \right)$$

El intercambio energético por radiación es fundamental en la refrigeración nocturna del panel, y, por tanto, en la recuperación del PCM. El hecho de que el intercambio radiativo nocturno sea mucho menor en el caso del modelo de cielo nublado parece indicar que la refrigeración nocturna del panel podría ser menor, y el PCM podría liberar menos energía, empezando el ciclo del día siguiente a una temperatura mayor, y siendo por tanto capaz de absorber menos calor latente durante las horas de irradiancia máxima, afectando negativamente al rendimiento del panel.

Para comprobar dicha hipótesis, se recurre a presentar la temperatura de la célula y la del PCM, eligiendo la primera y última capa de PCM como capas representativas. Se representa por tanto por un lado la evolución de las temperaturas del PCM ( $T_{pcm1}$ ,  $T_{pcm40}$ ) en el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF), y, por otro lado, la diferencia entre la temperatura de la célula en ambos modelos.



**Figura 32:** Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la primera capa del PCM ( $T_{pcm1}$ ) y la última capa ( $T_{pcm40}$ ) en el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF).



**Figura 33:** Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la célula ( $T_{cel}$ ) en el modelo de cielo nublado (NUB), el de referencia (REF), y el modelo sin PCM ( $T_{cel\_SINPCM}$ ).

Se observa, que tal y como se esperaba, la temperatura de la célula calculada con el modelo de referencia desciende más por la noche, es decir, el panel se refrigera más si no se tiene en cuenta la nubosidad. De la misma manera, durante la noche, el PCM alcanza una temperatura menor en el modelo de referencia, es decir, se recupera mejor, por lo que comienza el ciclo a una menor temperatura, y es capaz de almacenar más energía durante el día, tal y como se muestra en la gráfica 33, donde se observa que la temperatura de la célula en el modelo de referencia es igual o menor que la temperatura de la célula en el modelo de cielo nublado en todo momento. Sin embargo, esta diferencia es mínima durante el día, alcanzando su valor máximo en las primeras horas del día, 3.5 K en este caso, y en las horas de máxima irradiancia, la diferencia es menor que 1 K.

De esta manera, al utilizar un modelo numérico para modelar la temperatura de cielo que no tiene en cuenta la nubosidad (REF) se sobreestima la capacidad de recuperación del PCM durante la noche, aunque no afecta de manera significativa a la energía eléctrica producida ya que, en horas de máxima irradiancia, en las que se aporta la mayor parte de energía en el cómputo final, la diferencia de la temperatura de la célula alcanzada por ambos métodos es menor que 1 K.



### 7.1.3 Conclusiones del estudio previo.

Las conclusiones que se pueden obtener tras haber realizado un estudio previo son:

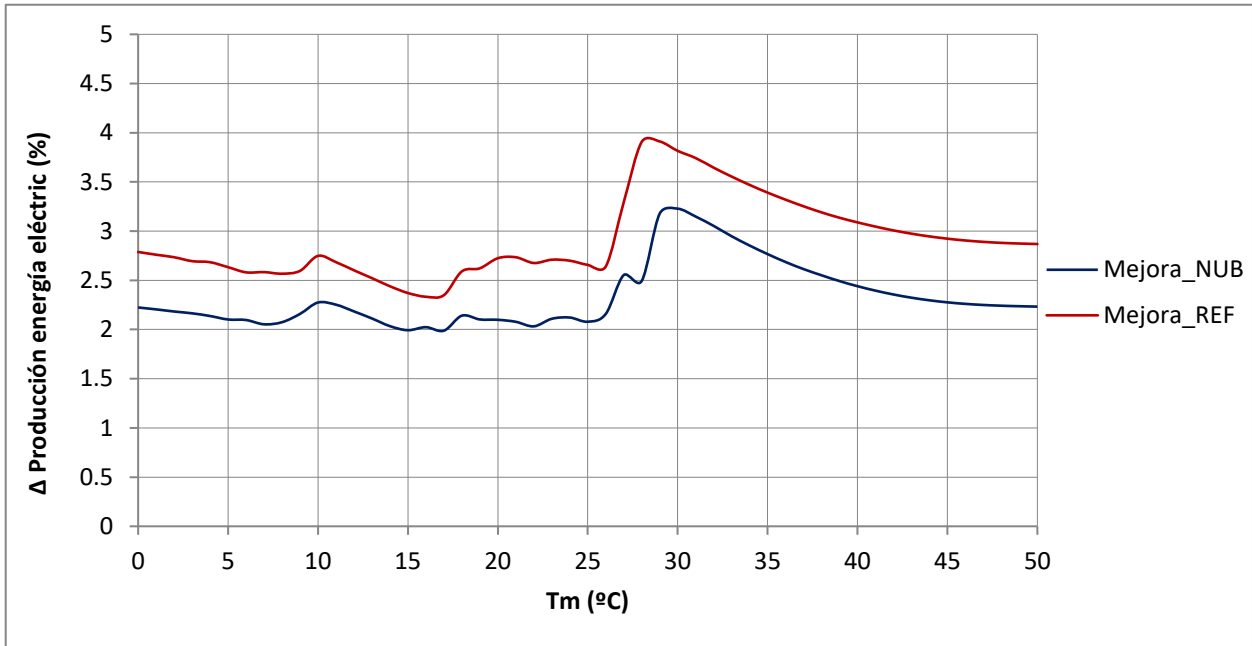
1. Parece conveniente expresar la temperatura de cielo en función del coeficiente de claridad ( $K_o$ ) y la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) puesto que no se ha encontrado ninguna relación entre dichas variables y la temperatura ambiente.
2. La temperatura de cielo será más alta, y, por tanto, existirá una diferencia mayor con la temperatura calculada mediante el modelo de referencia, en días muy nublados ( $K_o$  muy bajo) con altos valores de presión parcial de vapor ( $P_d$ ), aunque este tipo de días no suele ser muy frecuente.
3. La variación de potencia eléctrica está relacionada con el grado de nubosidad de manera que conforme  $K_o$  disminuye (cielos nublados), aumenta la disminución de potencia eléctrica respecto al modelo de referencia.
4. La condición de cielo nublado de día y de noche es la que produce una mayor disminución de la energía eléctrica de salida, puesto que la diferencia de calor radiativo intercambiado es mayor.
5. Al no tener en cuenta la nubosidad, se supone un mayor calor radiativo intercambiado, lo que implica una mayor refrigeración del panel durante la noche y una mejor recuperación del PCM. Al incluir el modelo de cielo nublado, la refrigeración del panel durante la noche es menor, y el PCM descarga menos energía, por lo que acumula calor de un día para otro. De esta manera, el PCM comienza el ciclo a una mayor temperatura, y es capaz de almacenar menos calor latente durante el día. Sin embargo, el principal efecto de la acumulación de calor se produce en las primeras horas de irradiancia, mientras que, en las horas de irradiancia máxima, la diferencia de temperatura de la célula en ambos métodos es mínima, por lo que no afecta de manera muy significativa a la producción de energía eléctrica puesto que las horas de máxima irradiancia tienen mayor peso en el aporte de energía que las horas de irradiancia mínima.
6. A partir de los resultados obtenidos, se puede esperar un decremento de la energía eléctrica producida entre 0 y 1.8 %.

## 7.2 Resultados obtenidos.

En este estudio se ha llevado a cabo una optimización de la producción de energía eléctrica en función de la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ) para dos ciudades con climas distintos, según el modelo de referencia (REF) y el modelo de cielo nublado (NUB), comparando ambos con la producción de energía eléctrica si no se utilizara PCM (SIN PCM).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las dos ciudades estudiadas.

### Neuhardenberg (Alemania)



**Figura 34:** Optimización de la energía anual de salida en función de la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ) utilizando el modelo de referencia (REF) y el modelo de cielo nublado (NUB)

Se observa que la curva de energía eléctrica de salida del sistema PV-PCM sigue la misma tendencia en el modelo de referencia (REF) y en el de cielo nublado (NUB). Como era de esperar tras haber realizado un estudio previo, la energía obtenida utilizando el modelo de cielo nublado es menor que aquella obtenida con el modelo de referencia, y la temperatura de cambio de fase que maximiza dicha energía es mayor.

En este caso, la temperatura óptima de cambio de fase es 30°C para el modelo de cielo nublado, y 29°C para el modelo de referencia, y la energía máxima alcanzada es un 0,657% menor que la que se alcanza con el modelo de referencia. Este resultado concuerda con los resultados obtenidos en el estudio previo.

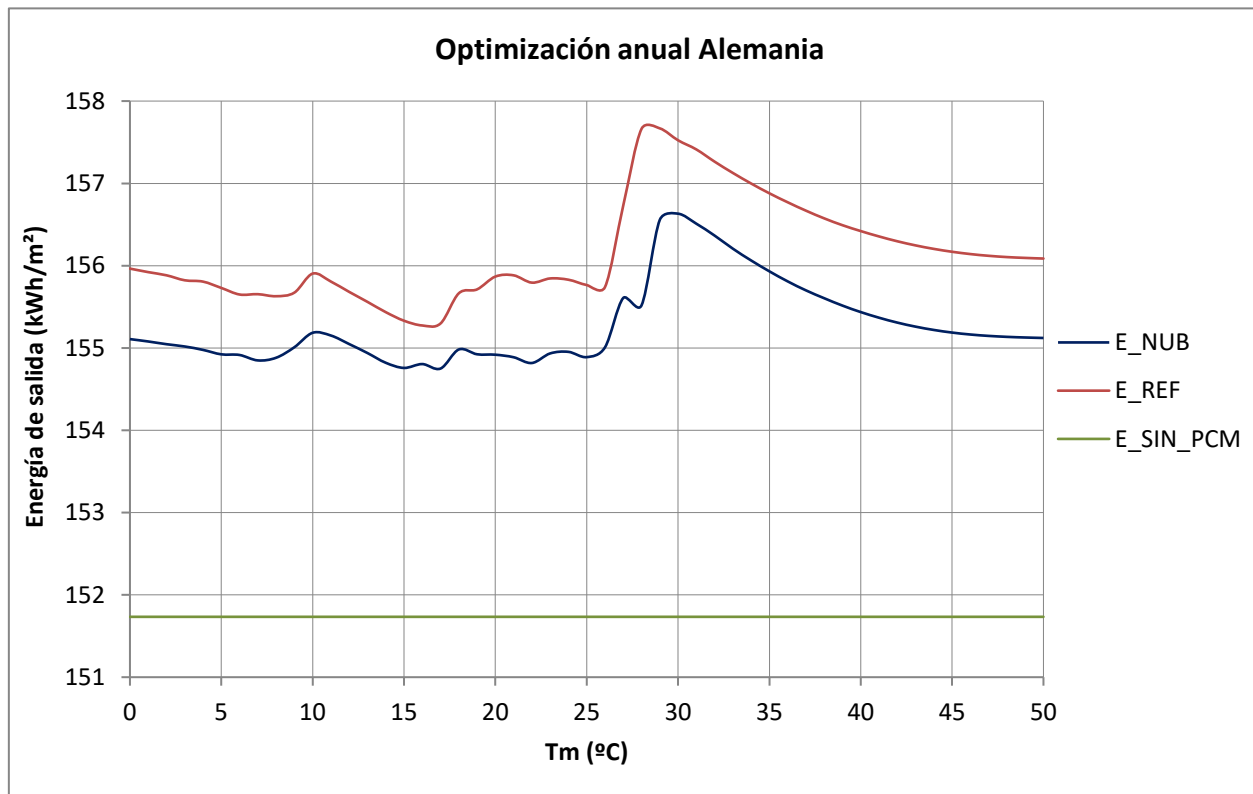
Se ha incorporado la producción de energía eléctrica si no se utilizara refrigeración del panel mediante material de cambio de fase (PCM), siendo esta curva una constante ya que la energía eléctrica en este caso es independiente de la temperatura de cambio de fase. Se observa, como era de esperar, que la incorporación del PCM supone un aumento de la energía eléctrica producida, se tenga en cuenta o no la nubosidad.

Para apreciar mejor el incremento de energía eléctrica, se cuantifica la mejora de producción eléctrica mediante cada método respecto al modelo sin PCM, utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta \text{Energía}_{\text{anual}}(\%) = \frac{\text{Energía}_{\text{NUB ó REF}} - \text{Energía}_{\text{SIN PCM}}}{\text{Energía}_{\text{SIN PCM}}} \cdot 100$$

Tal y como se esperaba una vez hecho un estudio previo, la energía de salida calculada con el modelo de referencia (REF) es mayor que la calculada con el modelo de cielo nublado (NUB), siendo esta constante cuando no se utiliza PCM ya que en este caso la energía de salida no depende de la temperatura de cambio de fase.

A continuación, se representa la mejora de producción eléctrica en tanto por ciento, para el rango de temperatura de cambio de fase de 0 a 50°C.

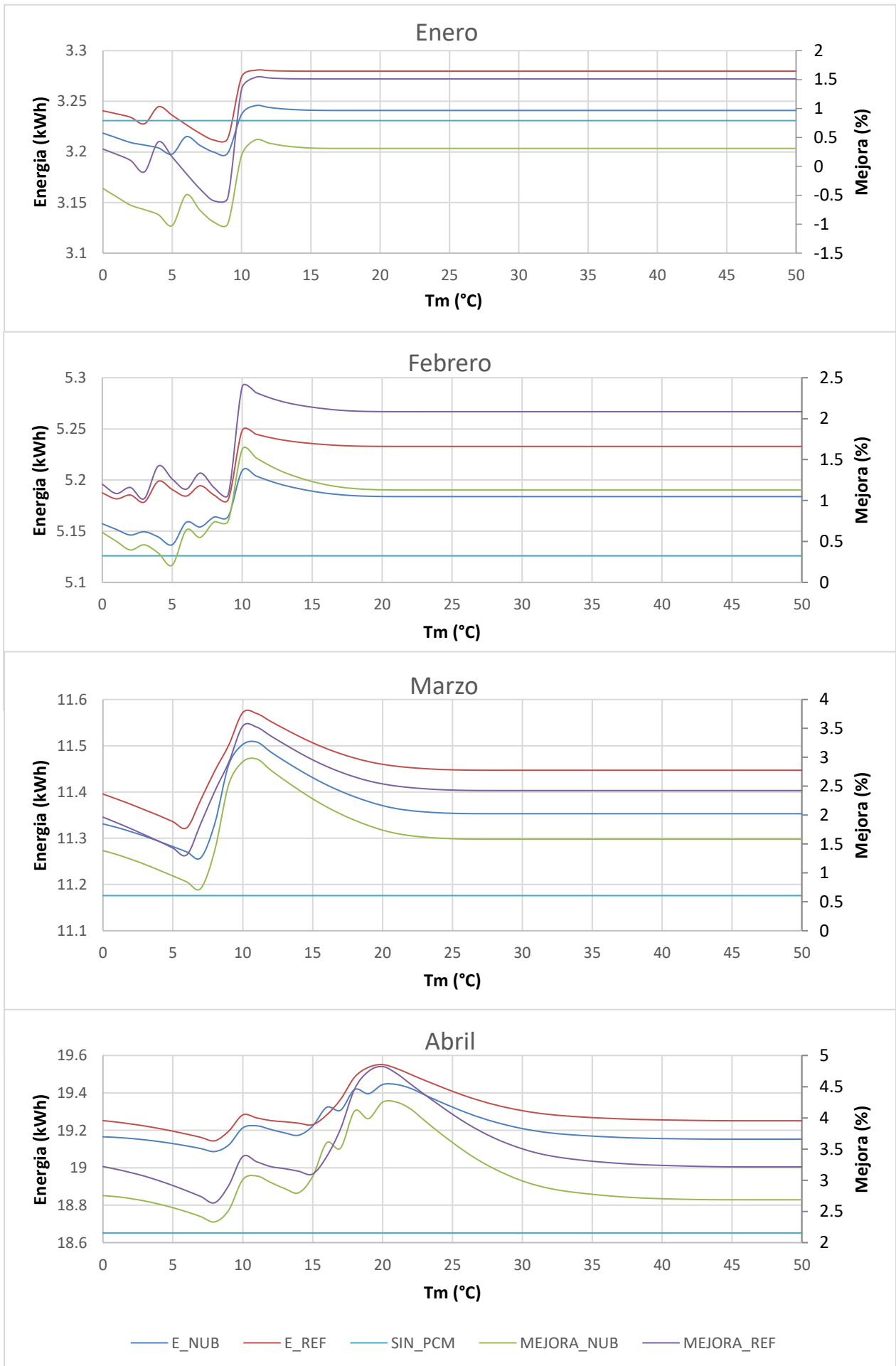


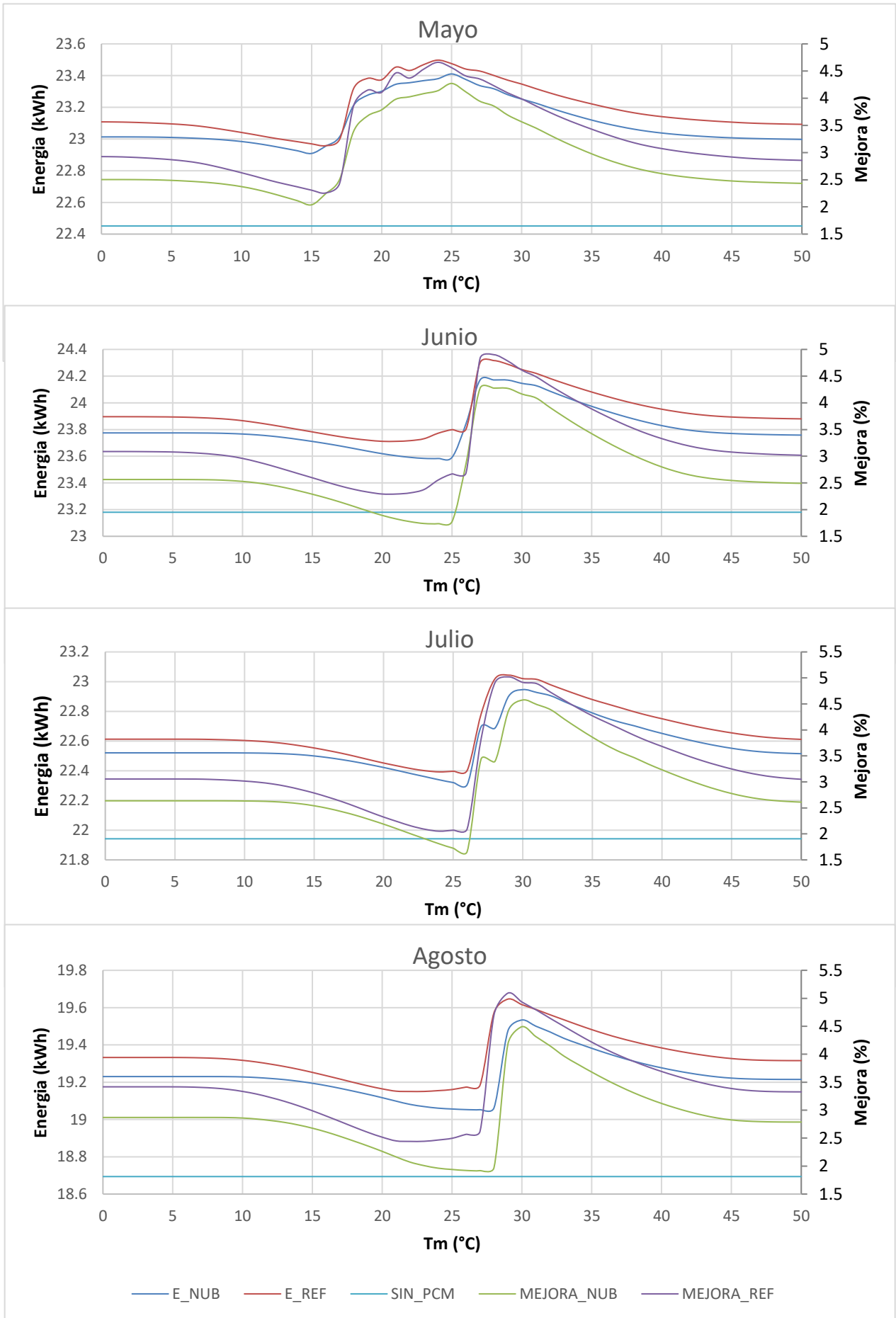
**Figura 35:** Mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C

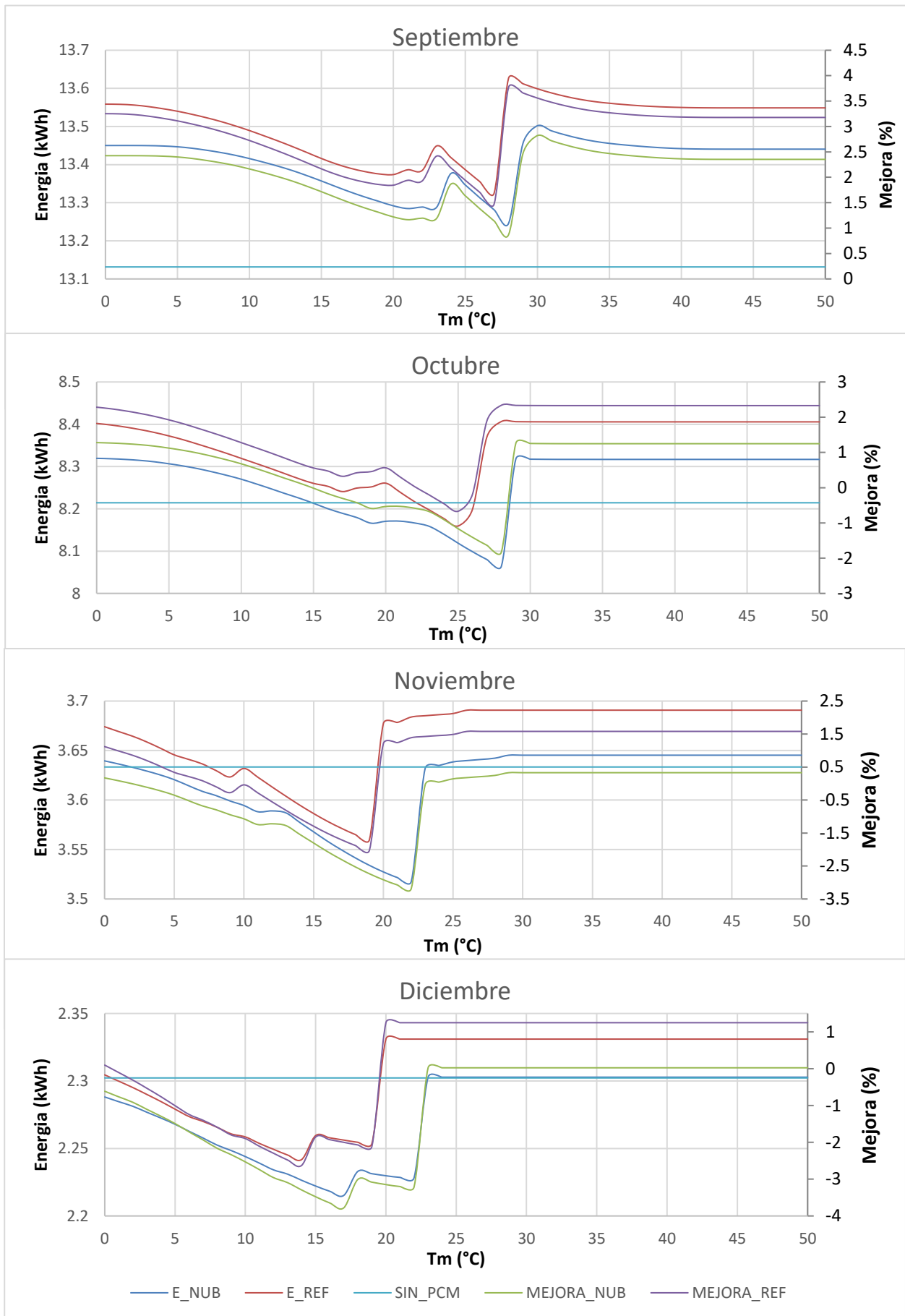
Se observa que el hecho de utilizar un modelo que no tiene en cuenta la nubosidad (REF) hace que se introduzca en los resultados una sobreestimación de la energía eléctrica anual producida, prediciendo una mejora de 3,91% respecto a no incorporar PCM, frente a una mejora de 3,23% obtenida al utilizar un modelo de cielo nublado, utilizando la temperatura óptima de cambio de fase en ambos casos. La sobreestimación de energía eléctrica anual producida para una temperatura de cambio de fase de 30°C en el caso del modelo de cielo nublado, y de 29°C en el caso del modelo de referencia, se cuantifica en un 0,68%.

Con el objeto de buscar una relación entre las condiciones climáticas y la variación de la energía eléctrica producida, parece interesante representar la optimización de la energía de salida en función de la temperatura de cambio de fase para los 12 meses del año, ya que cada mes presenta unas condiciones de irradiancia y temperatura distintas.

Por tanto, se representa a continuación la optimización en términos de energía eléctrica, acompañada de la mejora frente a no usar PCM, en porcentaje.







**Figura 36:** Energía eléctrica producida y mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C, desde enero hasta diciembre.

De esta serie de gráficos (figura 36) se extrae la siguiente información:

En los meses de baja irradiancia y temperatura, como son enero, octubre, noviembre y diciembre, la mejora de la producción eléctrica llega a ser negativa para temperaturas bajas de fusión del PCM ( $T_m$ ) ya que no se dan las condiciones climáticas para que el PCM cambie de estado y actúe como refrigerante. El resto de los meses, la utilización de PCM supone una mejora de la producción eléctrica para cualquier temperatura de fusión del PCM, siendo la temperatura óptima mayor cuanto mayor es la temperatura media ambiente de dicho mes.

El hecho de que la temperatura óptima anual sea  $30^\circ\text{C}$  en el modelo de cielo nublado y  $29^\circ\text{C}$  en el de referencia se debe a que la mayor producción eléctrica se produce en los meses de mayor irradiancia, en este caso, junio, julio, agosto y septiembre, en los que la temperatura óptima se encuentra entre los  $25$  y  $30^\circ\text{C}$ .

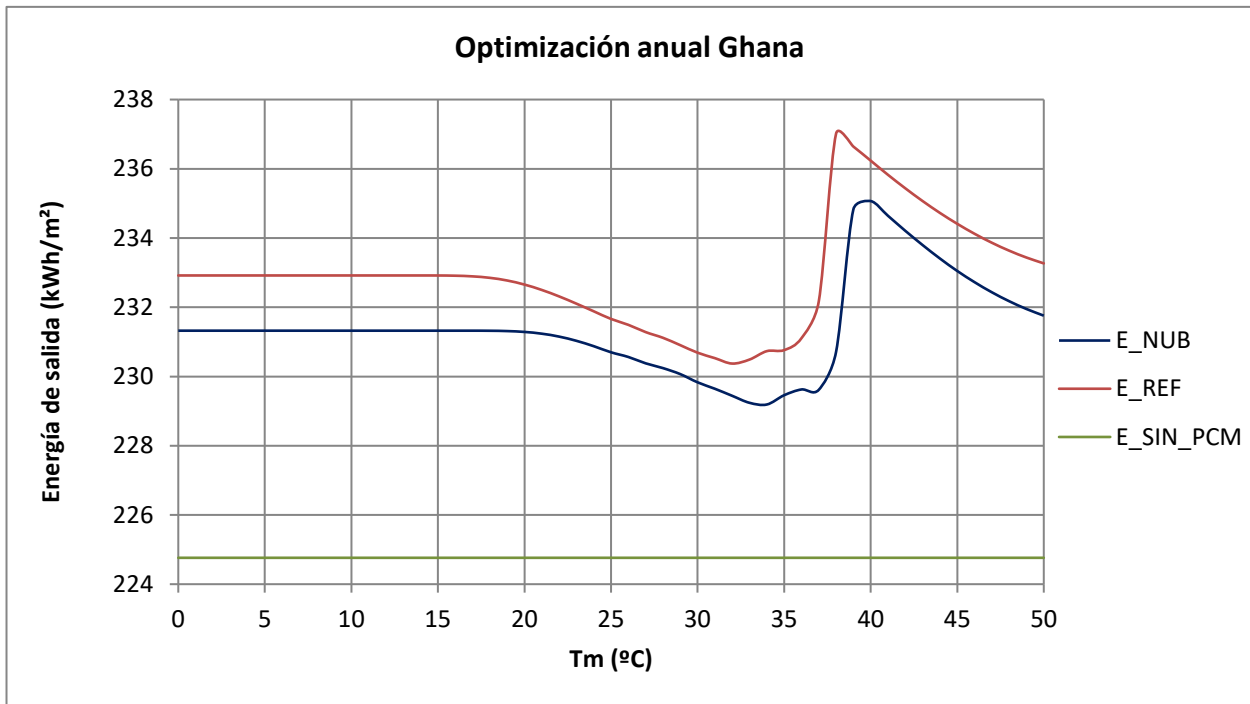
En todos los meses se produce una sobreestimación de la mejora para la temperatura óptima de cambio de fase, siendo esta más elevada en los meses de baja irradiancia, y más baja en los meses de alta irradiancia, obteniendo la mínima sobreestimación de mejora en julio, mes de máxima irradiancia y temperatura. Este hecho concuerda con lo estudiado previamente, ya que, en este caso, en los meses de alta irradiancia, los días tienen a ser más despejados, con altas presiones de vapor, por lo que la diferencia entre la temperatura de cielo calculada con el modelo de referencia y el de cielo nublado es menor, y, por tanto, la diferencia en la producción eléctrica es también menor.

A continuación, se muestran los valores de las temperaturas de cambio de fase óptimas mes a mes y la sobreestimación de la mejora eléctrica, es decir, la diferencia entre la mejora de la producción calculada con el modelo de referencia y el modelo de cielo nublado.

	$T_m$ (NUB) ( $^\circ\text{C}$ )	$T_m$ (REF) ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta$ Mejora
<b>Enero</b>	11	11	1.081 %
<b>Febrero</b>	10	10	0.765 %
<b>Marzo</b>	11	10	0.569 %
<b>Abril</b>	21	20	0.570 %
<b>Mayo</b>	25	24	0.389 %
<b>Junio</b>	28	28	0.630 %
<b>Julio</b>	30	29	0.444 %
<b>Agosto</b>	30	29	0.601 %
<b>Septiembre</b>	30	28	0.951 %
<b>Octubre</b>	29	28	1.078 %
<b>Noviembre</b>	29	26	1.252 %
<b>Diciembre</b>	23	20	1.225 %

**Tabla 7:** Temperaturas óptimas de cambio de fase mes a mes, utilizando el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF). Diferencia entre la mejora obtenida por REF y la obtenida por NUB.

## Nzema (Ghana)



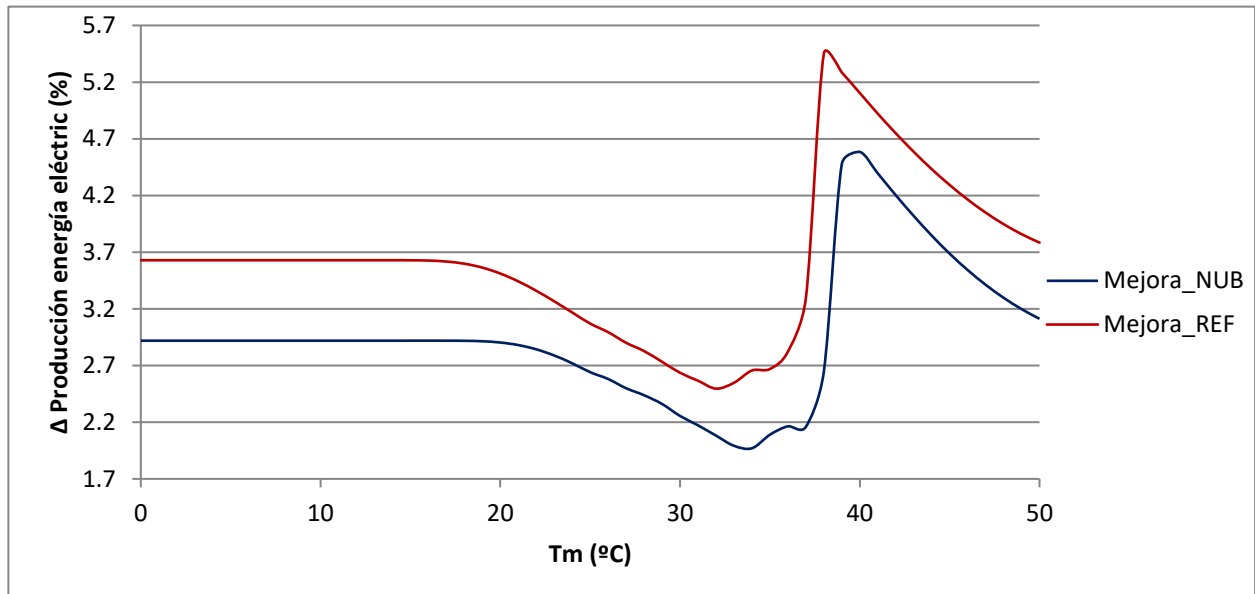
**Figura 37:** Optimización de la energía anual de salida en función de la temperatura de cambio de fase ( $T_m$ ) utilizando el modelo de referencia (REF) y el modelo de cielo nublado (NUB)

Se observa que la temperatura óptima de cambio de fase utilizando el modelo de cielo nublado (NUB) es 40°C, mientras que la temperatura óptima utilizando el modelo de referencia es 38°C. Al igual que ocurre en el caso de Alemania, la temperatura óptima obtenida por el modelo de referencia es menor que la que se obtiene con el modelo de cielo nublado, siendo la desviación de 2°C en Ghana, y 1°C en Alemania.

Se observa, además, que, en este caso, la salida tanto por el modelo de referencia como por el de cielo nublado, es constante, lo que significa que no se dan las condiciones climáticas necesarias para que el PCM cambie de estado y almacene energía, por lo que hasta 20°C aproximadamente, la curva no depende de la temperatura de cambio de fase. En este caso, se produce una mejora por el hecho de añadir masa térmica al sistema.



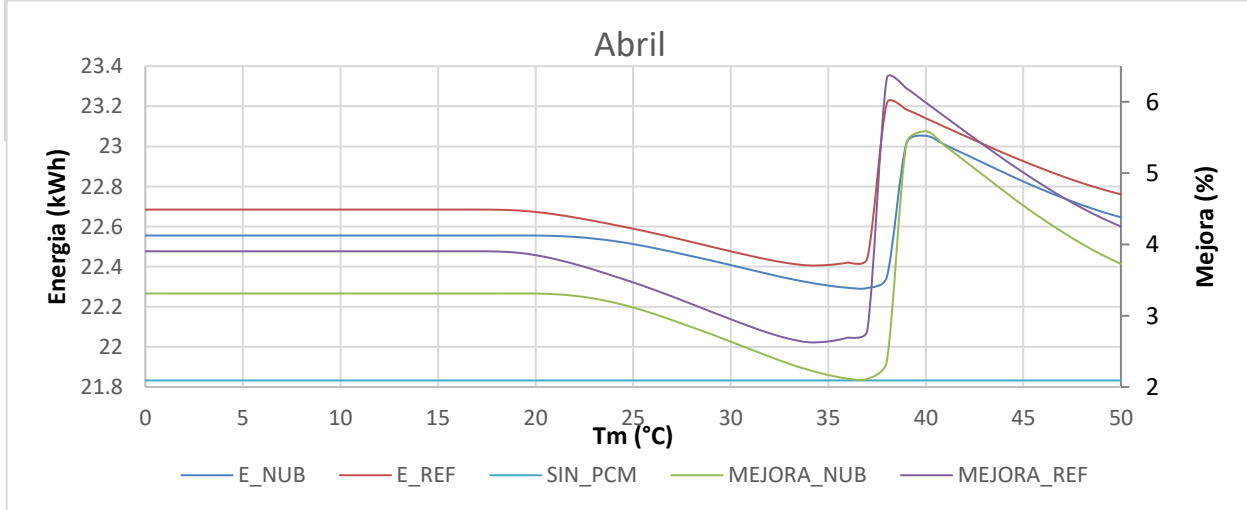
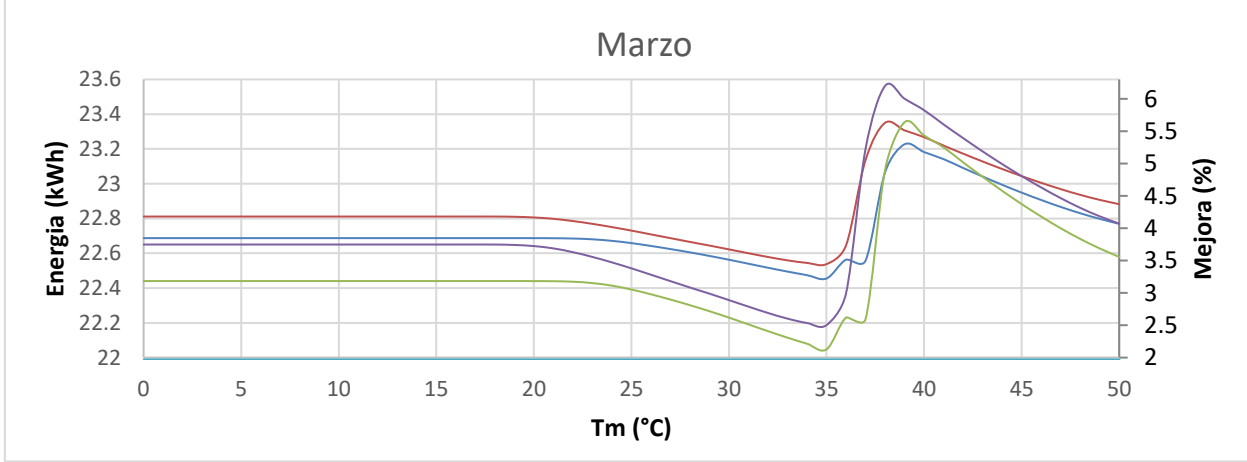
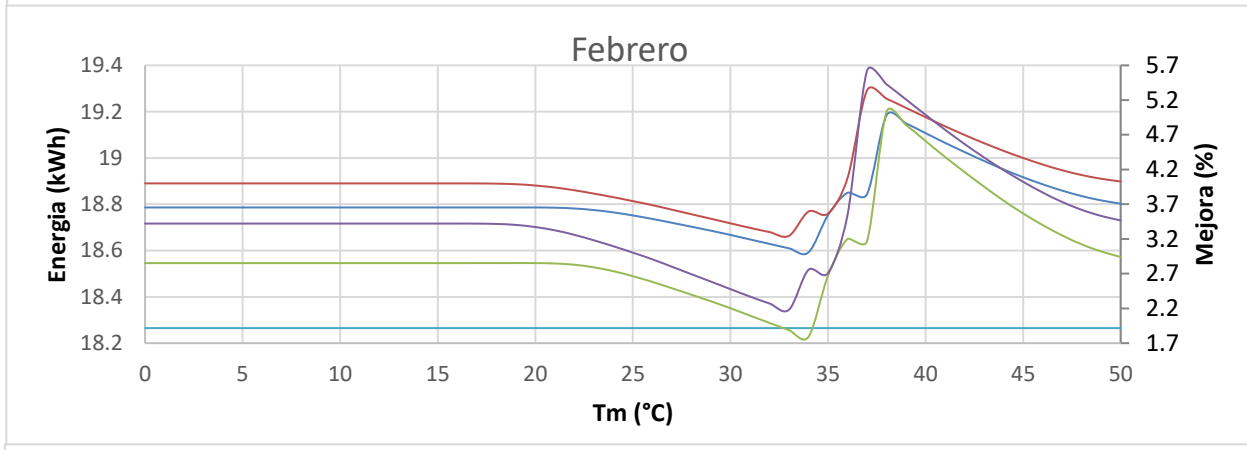
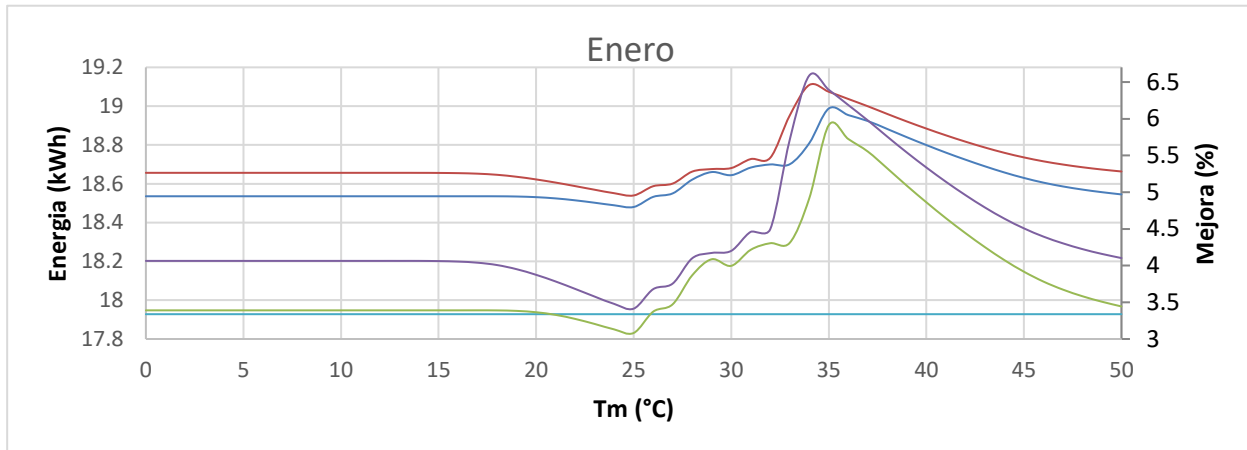
A continuación, se representa la estimación de la mejora de la producción eléctrica obtenida con la incorporación de PCM utilizando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto a no usar PCM.

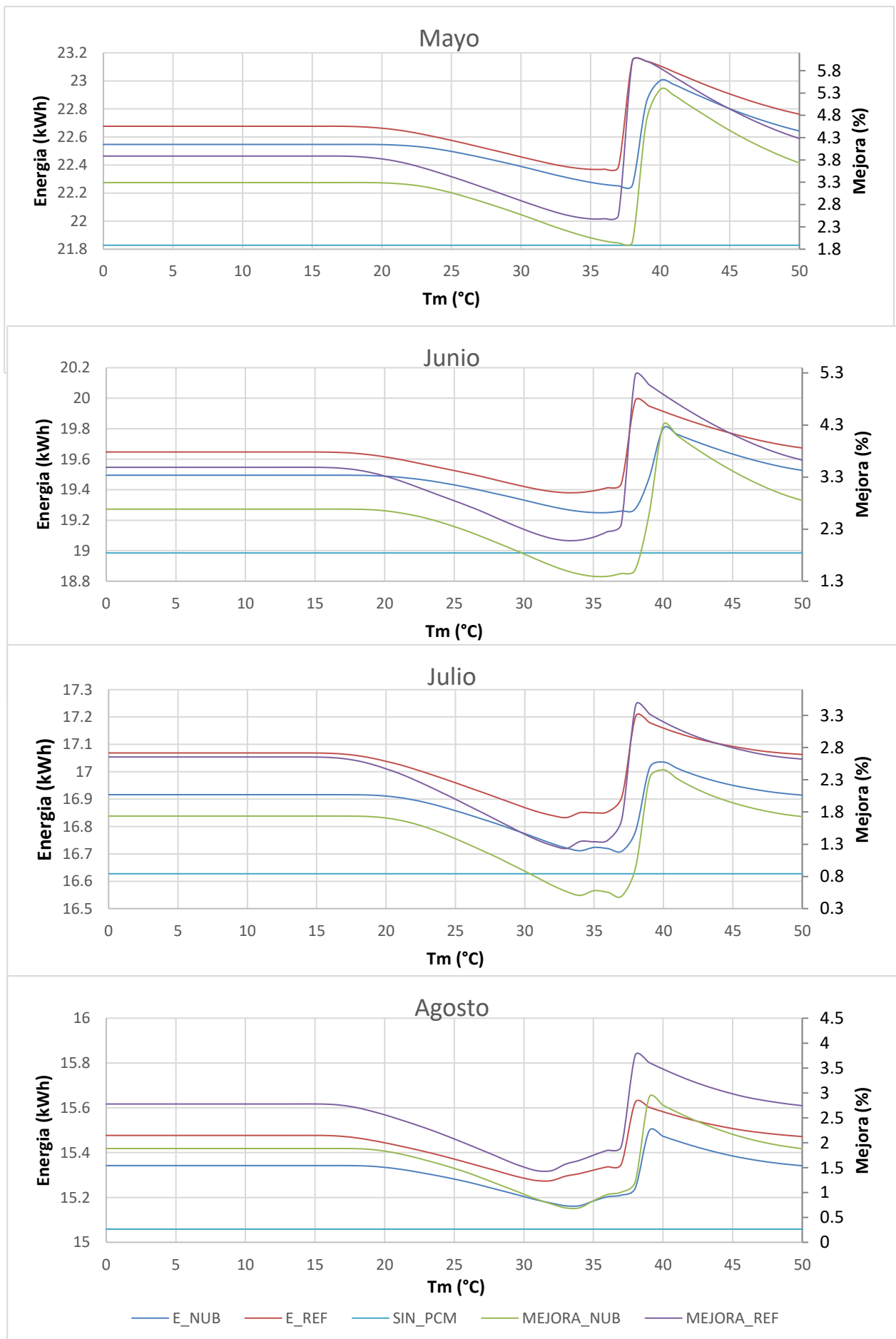


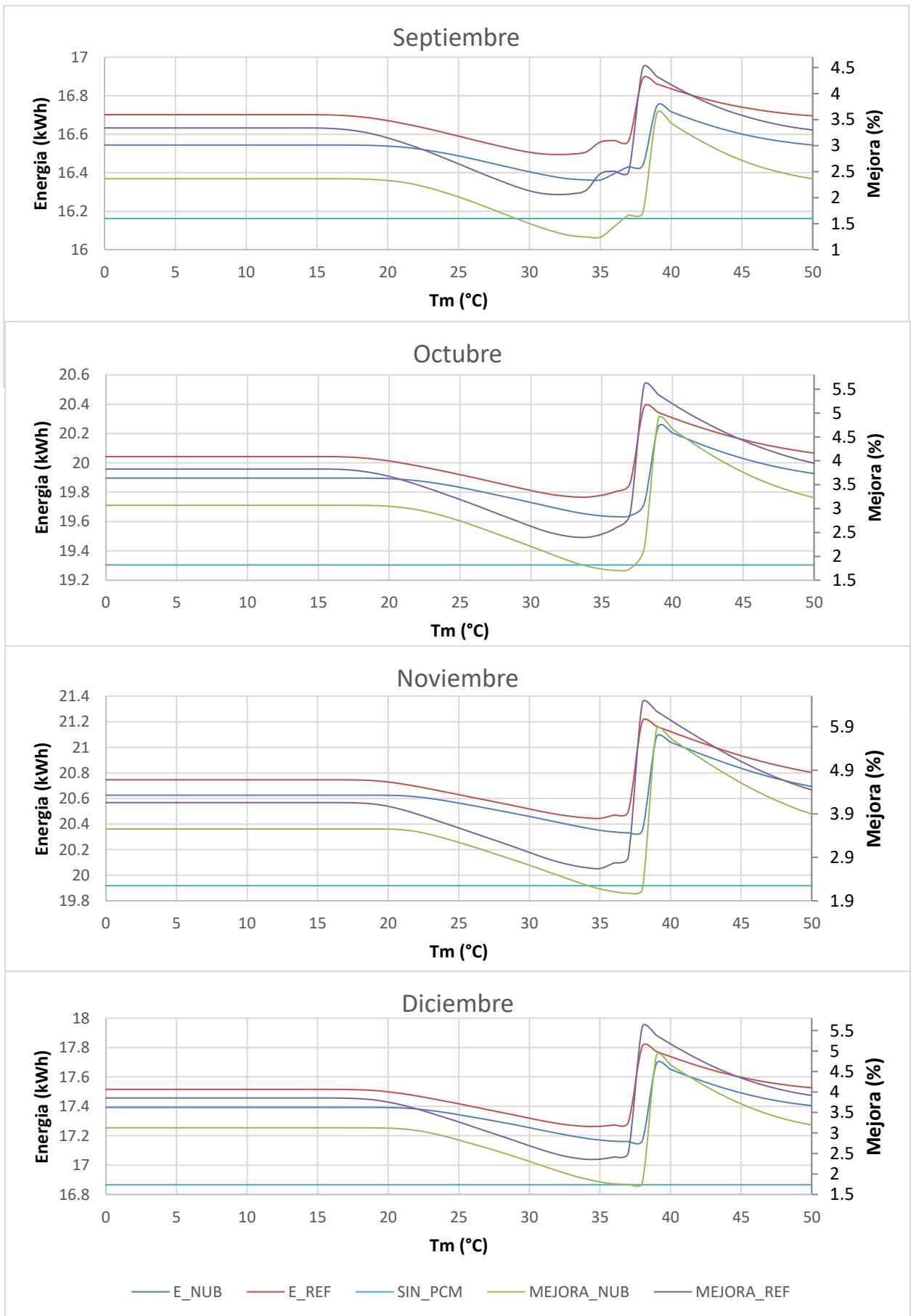
**Figura 38:** Mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C

Se observa que, en este caso, la estimación de la mejora con el método de referencia (REF) a la temperatura óptima de cambio de fase es de 5.45%, mientras que la estimación de la mejora con el modelo de cielo nublado (NUB) para la temperatura óptima es de 4.58%, siendo por tanto la sobreestimación de la mejora de un 0.96%, mayor en este caso que la sobreestimación obtenida en Alemania.

Con el objeto de relacionar la sobreestimación de la mejora de la producción eléctrica con las condiciones climáticas, se representa la energía producida y la estimación de la mejora para los 12 meses del año.







**Figura 39:** Energía eléctrica producida y mejora de la producción de energía eléctrica (%) usando el modelo de referencia (REF) y el de cielo nublado (NUB) respecto del modelo que no incorpora PCM (SIN PCM), para un rango de temperaturas de 0 a 50°C, desde enero hasta diciembre.

En este conjunto de gráficas (figura 39) se observa que, en este caso, la mejora de la producción eléctrica nunca llega a ser negativa, es decir, la producción eléctrica utilizando PCM supera para cada valor de  $T_m$  (temperatura de cambio de fase) a la producción sin usar PCM, ya que, en esta ciudad (Nzema, Ghana), las condiciones de irradiancia y temperatura nunca llegan a ser lo suficientemente bajas para que esto suceda, a diferencia de Neuhardenberg, Alemania.

A continuación, se muestra la temperatura óptima de cambio de fase mes a mes, junto a la sobreestimación de la mejora (diferencia entre la mejora obtenida con el modelo de referencia, y la obtenida con el modelo de cielo nublado).

	$T_m$ (NUB) (°C)	$T_m$ (REF) (°C)	$\Delta$ Mejora
<b>Enero</b>	35	34	0.676 %
<b>Febrero</b>	39	38	0.591 %
<b>Marzo</b>	39	38	0.560 %
<b>Abril</b>	40	38	0.739 %
<b>Mayo</b>	40	38	0.612 %
<b>Junio</b>	40	38	0.960 %
<b>Julio</b>	40	38	1.008 %
<b>Agosto</b>	39	38	0.842 %
<b>Septiembre</b>	39	38	0.875%
<b>Octubre</b>	39	39	0.506 %
<b>Noviembre</b>	39	38	0.617%
<b>Diciembre</b>	39	38	0.701%

**Tabla 8:** Temperaturas óptimas de cambio de fase mes a mes, utilizando el modelo de cielo nublado (NUB) y el de referencia (REF). Diferencia entre la mejora obtenida por REF y la obtenida por NUB

Tal y como sucede en Neuhardenberg, Alemania, la sobreestimación es mayor en los meses de baja irradiancia, que en esta ciudad son junio, julio, agosto y septiembre, y es menor en meses de alta irradiancia, como febrero, marzo y octubre. Aunque se trata de un clima poco variante, la temperatura ambiente es mayor en los meses de alta irradiancia, y menor en los meses de baja irradiancia, siendo la temperatura media bastante constante. Una vez más, se observa en los datos climatológicos, que los días de baja irradiancia y temperatura, son los días donde la presión de vapor tiende a ser menor y suele haber mayor nubosidad ( $K_o$  bajo), por lo que la diferencia entre la temperatura calculada con el modelo de cielo nublado y el de referencia es mayor, y, por tanto, la sobreestimación de la producción eléctrica es también mayor, tal y como se puede observar en la Tabla 8.

---

## 8 CONCLUSIONES

---

En este apartado se pretenden exponer las conclusiones principales obtenidas en este trabajo.

1. Parece conveniente expresar la temperatura de cielo en función del coeficiente de claridad ( $K_o$ ) y la presión parcial de vapor ( $P_d$ ) puesto que no se ha encontrado ninguna relación entre dichas variables y la temperatura ambiente.
2. La temperatura de cielo será más alta, y, por tanto, existirá una diferencia mayor entre esta y la temperatura calculada sin tener en cuenta la nubosidad, en días muy nublados ( $K_o$  muy bajo) con altos valores de presión parcial de vapor ( $P_d$ ), aunque este tipo de días no suele ser frecuente.
3. La variación de potencia eléctrica está relacionada con el grado de nubosidad de manera que conforme la nubosidad aumenta ( $K_o$  disminuye), aumenta la diferencia entre la potencia eléctrica calculada sin tener en cuenta la nubosidad, y la calculada considerando el efecto de la nubosidad, siendo esta última siempre menor.
4. Al no tener en cuenta la nubosidad, se supone un mayor calor radiativo intercambiado, lo que implica una mayor refrigeración del panel durante la noche y una mejor recuperación del PCM. Al incluir el modelo de cielo nublado, la refrigeración del panel durante la noche es menor, y el PCM descarga menos energía, por lo que acumula calor de un día para otro. De esta manera, el PCM comienza el ciclo a una mayor temperatura, y es capaz de almacenar menos calor latente durante el día. Sin embargo, el principal efecto de la acumulación de calor se produce en las primeras horas de irradiación, mientras que, en las horas de irradiación máxima, la diferencia de temperatura de la célula en ambos métodos es mínima, por lo que no afecta de manera muy significativa a la producción de energía eléctrica puesto que las horas de máxima irradiación tienen mayor peso en el aporte de energía que las horas de irradiación mínima.
5. Teóricamente, el hecho de introducir un modelo de cielo nublado supondría una disminución de la energía eléctrica producida entre un 0 y 1.8%, aunque en las ciudades estudiadas, esta disminución es de un 0.68% (Alemania) y un 0.96% (Ghana).
6. La sobreestimación de la mejora de la producción eléctrica respecto a no usar PCM es mayor en los meses de baja irradiación y temperatura, ya que, se comprueba en los datos climatológicos de ambas ciudades, que, en los meses de baja irradiación y temperatura, la presión de vapor suele ser menor y la nubosidad más elevada, causando un mayor aumento de la temperatura de cielo calculada teniendo en cuenta la nubosidad, respecto a la calculada sin tener en cuenta la nubosidad. En los meses de alta irradiación y temperatura, los días suelen ser más despejados, y, por tanto, la sobreestimación de la producción de energía eléctrica es menor.
7. La temperatura óptima de cambio de fase es mayor cuando se utiliza el modelo de cielo nublado, siendo esta diferencia de 1 y 2 °C en las ciudades estudiadas.
8. El hecho de utilizar una hipótesis simplificativa que no tiene en cuenta la nubosidad a la hora de calcular la temperatura del cielo provocará una mayor sobreestimación de la producción de energía eléctrica en un clima en el que abunden los días con bajo coeficiente de claridad  $K_o$  (cielos nublados) y altas presiones parciales de vapor  $P_d$ , aunque en este estudio, no se han encontrado días que presenten dichas características.

## 9 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

---

En este trabajo, se utiliza un modelo de cielo nublado que modela la nubosidad por la noche como un valor constante que depende de las condiciones de irradiancia de la última hora del día, tal y como hacen Ursula Eicker y Antoine Dalibard en su estudio sobre enfriamiento radiativo nocturno [7], siendo posible la introducción de un error en el cálculo del intercambio radiativo nocturno, y, por tanto, en el enfriamiento del panel y en la producción de energía eléctrica.

Por tanto, se propone como línea de investigación futura, encontrar un modelo numérico para calcular la temperatura de cielo que sea capaz de modelar la nubosidad por la noche, y utilizar este modelo para estudiar la mejora de la producción eléctrica al introducir PCM respecto a no utilizar refrigeración con PCM.

Puesto que solo se han estudiado dos ciudades y un único material PCM, otra línea de investigación sería introducir más ciudades con climas distintos, y utilizar distintos materiales PCM, utilizando el mismo modelo térmico empleado en este estudio, para comprobar con una mayor exactitud los resultados obtenidos.

Por último, se propone realizar una evaluación económica anual al introducir el método de refrigeración por PCM, en diferentes emplazamientos, para encontrar qué condiciones climáticas son más económicamente factibles a la hora de utilizar refrigeración por PCM.

---

# REFERENCIAS

---

- [1] A. Makki, S. Omer, H. Sabir, Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41 (2015) 658–684
- [2] T. Ma, H. Yang, Y. Zhang, L. Lu, X. Wang, Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: a review and outlook, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43 (2015) 1273–1284
- [3] Pascal Biwole<sup>1</sup>, Pierre Eclache, Frederic Kuznik. Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials. *World Renewable Energy Congress – Sweden* (2011)
- [4] Hasan A, Sarwar J, Alnoman H, Abdelbai S. Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. *Solar Energy* 146 (2017) 417–429
- [5] Smith CJ, Forster PM, Crook R. Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied Energy* 126 (2014) 21–28
- [6] Marta Mellado Cerpa. Mejora de la producción eléctrica anual de un panel fotovoltaico mediante materiales de cambio de fase. Trabajo fin de grado. Universidad de Sevilla (2018)
- [7] Ursula Eicker, Antoine Dalibard. Photovoltaic–thermal collectors for night radiative cooling of buildings. *Solar Energy* 85 (2011) 1322–1335
- [8] Hasan A, McCormack SJ, Huang MJ, Norton B. Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method. *Energy Convers. (2014a). Manage.* 81, 322–329
- [9] Indartono YS, Prakoso SD, Suwono A, Zaini IN, Fernaldi B. Simulation and Experimental Study on Effect of Phase Change Material Thickness to Reduce Temperature of Photovoltaic Panel. 7th International Conference on Cooling & Heating Technologies (ICCHT 2014). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 88 (2015) 012049.- 89 - Y S Indartono et al (2015). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 88 012049
- [10] Huang MJ, Eames PC, Norton B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 2715–2733
- [11] Rok Stropnik, Uroš Stritih. Increasing efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy* 97 (2016) 671–679
- [12] Hasan A, McCormack SJ, Huang MJ, Sarwar J., Norton B. Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. *Solar Energy* 115 (2015) 264–276
- [13] Jungwoo Park, Taeyeon Kim, Seung-Bok Leigh. Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions. *Solar Energy* 105 (2014) 561–574
- [14] Rodríguez Ubiñas, Edwin Israel. Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y translúcidas. Tesis Doctoral (2015). E.T.S Arquitectura (UPM)
- [15] H.Mehling, L.F. Cabeza. Heat and Cold storage with PCM, an up to date introduction into basics and applications, Springer. (2008)
- [16] S.D.Sharma. K. Sagara. Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, 2.1 (2005) 1-56



- [17] A. Abhat. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy* 30.4 (1983) 313-332
- [18] B.Zalba, J.M. Marín. L.F.Cabeza, H.Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23 (3) (2003) 51-83
- [19] J. Kosny, J. PCM-Enhanced Building Components: An application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Springer International Publishing. (2015)
- [20] Armstrong S, Hurley WG. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering* 30 (2010), 1488-1495
- [21] Huang MJ, Eames PC, Norton B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Sol Energy* 2006;80(9):1121–30
- [22] Hasan A, McCormack S, Huang M, Norton B. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Sol Energy* 2010;84:1601–12
- [23] Malvi CS, Dixon-Hardy DW, Crook R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. *Sol Energy* 2011;85(7):1440–6.
- [24] Lamberg P, Lehtiniemi R, Henell A. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *Int J Therm Sci* 2004;43(3):277–87
- [25] Hassan A. Phase change materials for thermal regulation of building integrated photovoltaics. Ph.D. thesis, Dublin Institute of Technology; 2010
- [26] Lamberg P, Lehtiniemi R, Henell A. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) 277–287
- [27] Cerezuela Parish A. Desarrollo de modelo simplificado y validación de las fachadas ventiladas con aletas de material de cambio de fase. Proyecto fin de máster. Universidad de Sevilla. (2012)
- [28] Zukowski M. Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 155–165
- [29] Bridgman PW. A complete collection of termodinamic formulas. *Phys Rev* 1914;3:273-81
- [30] Malvi CS, Dixon-Hardy DW, Crook R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. *Solar Energy* 2011;85(7):1440–6
- [31] Kasten, F., Czeplak, G., 1980. Solar and terrestrial dependent on the amount of the type of cloud. *Solar Energy* 24, 177–188.
- [32] Aubinet, M., 1994. Longwave sky radiation parametrizations. *Solar Energy* 53 (2), 147–154
- [33] Loveday DL, Taki AH. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade. *Int J Heat Mass Transfer* 1996;39(8):1729–42
- [34] Evans DL. Simplified method for predicting photovoltaic array output. *Sol Energy* 1981;27(6):555–60.