

---

# INFORME PROYECTO

## Diseño e implementación de herramientas de cálculo para sistemas de energías renovables

Inscrita en el Registro de Fundaciones el 1 de diciembre de 2010 con el número 280047. CIF 684028800.



## Antecedentes

**El aumento del número de instalaciones conectadas a la red eléctrica plantea un importante reto de cara a su correcta integración en el sistema eléctrico:** conocer la energía que estos sistemas van a producir. Esto es importante tanto para grandes instalaciones como para pequeñas instalaciones hechas en viviendas.

En el caso de las instalaciones grandes, **conocer con antelación la energía que van a producir es necesario para asegurar su correcta integración en la red eléctrica.** Para este tipo de instalaciones, el mercado eléctrico español dejó de ser un sistema centralizado para pasar a ser un sistema competitivo, en el que los distintos agentes que operan deben enviar al Operador del Sistema, con una antelación de un día, la predicción de lo que van a producir sus instalaciones; en el caso de que estas predicciones sean incorrectas, la normativa prevé penalizaciones que dependen del error en la predicción. Por ello, la disponibilidad de modelos que permitan conocer con mayor precisión la producción de un sistema fotovoltaico, basados en una mejor predicción de la radiación solar que van a recibir, ayudará a los agentes del mercado eléctrico a una mejor integración de estos sistemas en la red eléctrica.

En el caso de instalaciones en viviendas y pequeñas instalaciones comerciales, conocer cuál será su producción puede ayudar a conseguir una optimización del autoconsumo y, como consecuencia, ayudar a mejorar su rentabilidad. En el mercado fotovoltaico, cada vez están teniendo más importancia estas instalaciones que se realizan en viviendas o edificios, integradas en la ciudad. En las mismas, la demanda de electricidad es cubierta por la producción fotovoltaica siempre que es posible. Además, el excedente de esta producción es vertido a la red. En los últimos años, y gracias al crecimiento que está produciéndose de este tipo de instalaciones, se ha comenzado a hablar de viviendas autosuficientes y viviendas de energía cero. Una vivienda o un edificio de energía cero (conocidas como ZEB, Zero Energy Building) es un concepto que se utiliza en edificios con un balance energético entre la generación y el consumo de energía cercano a cero o, incluso, nulo o positivo en un año típico, (NREL, 2006), (NREL, 2010). El desarrollo masivo de este tipo de viviendas podría mitigar problemas

económicos y medioambientales, tales como las emisiones de CO<sub>2</sub> y la dependencia de fuentes de energía fósiles.

Para conseguir el **objetivo de viviendas ZEB**, la tecnología fotovoltaica puede desempeñar un papel destacado, ya que es una de las mejores posicionadas a fin de aumentar la autosuficiencia energética de las viviendas. Además, hay que tener en cuenta que, en el momento actual, para esta tecnología, la paridad con la red en el segmento residencial es una realidad en muchos enclaves del mundo, (Bloomberg Finance, 2015), como puede ser España, (Creara Energy Experts, 2015). Es por ello que el autoconsumo fotovoltaico se ha convertido en los últimos años en la principal herramienta para fomentar la generación distribuida y contribuir así a la reducción del estrés de las líneas de distribución eléctrica, (Luthander et al., 2015). Como consecuencia, hay un interés creciente por generar energía mediante instalaciones fotovoltaicas dentro de las redes interiores de consumo, para poder reducir la factura eléctrica (lo que se conoce como instalaciones de autoconsumo). La gran mayoría de las instalaciones fotovoltaicas vierten la energía que producen a la red eléctrica sin tener en cuenta ningún otro factor como los perfiles locales de consumo y de generación, el coste, la eficiencia energética, etc. (IEA, 2013).

En las instalaciones de autoconsumo hay un desfase entre los consumos y la producción fotovoltaica, lo que hace que gran parte de la energía producida se inyecte en la red eléctrica. Sería deseable que, en la medida de lo posible, esta energía fuera utilizada para satisfacer las demandas de la propia vivienda. Para ello, es fundamental **disponer de sistemas de gestión de la demanda que permitan adaptar el perfil** de la potencia demandada al perfil de la potencia generada por la instalación fotovoltaica. A ello puede contribuir, de manera fundamental, poder conocer la previsión de la producción energética del sistema fotovoltaico.

El análisis y modelizado de los sistemas fotovoltaicos permitirá determinar los distintos escenarios que definen las condiciones de optimización de este tipo de sistemas. Esta optimización dependerá, por una parte, de cuál es la disponibilidad energética (condiciones meteorológicas) en el emplazamiento de la instalación, del funcionamiento del sistema fotovoltaico y de cómo son las cargas de la vivienda (optimización energética) en el caso de autoconsumo y, por otra, de cuál es la legislación aplicable (optimización económica). La optimización del autoconsumo requiere considerar distintas variables que

cambian a lo largo del periodo de funcionamiento de la instalación. Primero, porque la energía que generan estos sistemas depende de su recurso energético, la radiación solar, que tiene una variación diaria (sucesión día-noche), anual (estacionalidad) y estocástica (debida a la atenuación variable en la atmósfera) no fácilmente predecible. Segundo, porque los consumos de una vivienda también son variables. Y, por último, porque la legislación aplicable a la energía generada, ya sea para ser consumida directamente (autoconsumo) o para ser vertida a la red, también puede variar.

Por estos motivos, sería muy interesante disponer de modelos que, teniendo en cuenta las condiciones (a partir de predicciones) en las que funcionarán estas instalaciones (desde el punto de vista energético y económico), permitieran conseguir una gestión energética eficiente, a partir de una gestión inteligente de la demanda que optimice el autoconsumo.

Conocer la cantidad de energía que generará una instalación fotovoltaica conectada a la red es necesario tanto para asegurar una correcta integración de este tipo de instalaciones en el sistema eléctrico como para lograr mayores porcentajes de autoconsumo gracias a una gestión activa de la demanda.

Los problemas de predicción de la producción de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo y de gestión de la demanda, con el objetivo de optimizar el autoconsumo, pueden ser considerados como problemas de modelizado y simulación y ser abordados mediante modelos de minería de datos e inteligencia artificial, cuyo objetivo es aprender algo útil en el dominio en el que se utilizan. Una de las ventajas de estas técnicas es que tienen una gran capacidad de generalización y de manejo de diferentes tipos de datos.

El desarrollo de estrategias de gestión energética eficiente en la vivienda, principalmente mediante la gestión activa de la demanda, puede incrementar el autoconsumo.

La **disponibilidad de herramientas de fácil uso** puede ayudar a los usuarios de pequeñas instalaciones fotovoltaicas a conseguir una mejor gestión de su consumo de electricidad, de forma que sea más eficiente y responsable.

Por todo esto nos proponemos desarrollar herramientas que faciliten la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico y ayuden a optimizar el funcionamiento

de estas instalaciones.

Durante este año nos hemos centrado en conocer y estudiar los distintos modelos que permiten determinar la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologías, en función de parámetros meteorológicos que están normalmente disponibles en las agencias de meteorología, para después poder conocer la productividad energética de cualquier sistema fotovoltaico e integrar estas herramientas de predicción en la web del Observatorio.

## Modelos para la determinación de la temperatura de trabajo de módulos fotovoltaicos

### Metodología

En el presente trabajo se han estudiado distintos modelos de predicción de temperatura con escalas temporales diferentes: modelos instantáneos, horarios y diarios.

Para los modelos instantáneos, una vez recogidos todos los datos y filtrados, del total de los datos se han separado aleatoriamente un 30% de los mismos para el cálculo de los coeficientes de entrada de los distintos modelos analizados y propuestos. Con el 70% de los datos restantes se han validado esos modelos.

Se han propuesto modelos **horarios de predicción de temperatura de operación de módulos fotovoltaicos** a partir de los modelos instantáneos, utilizando el mismo tipo de modelos existentes que los usados para predecir la temperatura instantánea, pero con coeficientes adaptados para valores horarios de las variables.

Para proponer los modelos horarios, se han construido series horarias de las variables meteorológicas (irradiancia sobre el plano de módulos, temperatura ambiente, velocidad del viento y temperatura de módulos) y también series horarias de las variables eléctricas de los módulos ( $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ ). Para cada una de las variables, el valor horario se obtendrá como el valor medio de todas las medidas instantáneas registradas en esa hora, excepto para la irradiación horaria que será la integral de los valores de irradiancia registrados en ese intervalo de tiempo.

Una vez construidas todas las series horarias de cada una de las variables, se determinarán los coeficientes para cada uno de los modelos horarios.

Por último, **se han calculado valores diarios de temperatura para cada modelo analizado y propuesto**. El cálculo de los valores diarios de predicción de temperatura de cada uno de los modelos no requiere de nuevos coeficientes, pues se ha obtenido como el valor medio integrado de todas las medidas horarias calculadas para un día.

## Métricas utilizadas para validar los modelos

Para estudiar los distintos modelos y poder establecer comparaciones se ha utilizado una serie de parámetros estadísticos. Estos parámetros estadísticos son:

- ✚ Desviación media de la temperatura del módulo, definida por la expresión:

$$\circ \quad \overline{TD} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{predicha} - T_{medida})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n TD}{n} \quad (1.1)$$

- ✚ STD (STandard Deviation): Desviación estándar del parámetro anterior con un factor de cobertura igual a 1.

- ✚ Valor medio del error absoluto (MAE, Mean Absolute Error). El error absoluto medio nos da el promedio del valor absoluto de la diferencia entre las predicciones de temperatura realizada y el valor real que tiene la temperatura. Está definido por la expresión:

$$\circ \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |TD| \quad (1.2)$$

- ✚ El error relativo medio o error absoluto porcentual de la media (MAPE, Mean Absolute Percentage Error), definido por la expresión:

$$\circ \quad MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{TD}{T_{medida}} \right| \quad (1.3)$$

- ✚ El valor de  $R^2$  obtenido en el ajuste lineal de los valores medidos ( $T_{medida}$ ) y los valores predichos por cada modelo ( $T_{predicha}$ ).

Además de todos estos parámetros, se ha utilizado el **test de Kolmogorov-Smirnov** para determinar la similitud entre las funciones de distribución acumulada de dos muestras. Es un test no paramétrico que no pone ninguna restricción a la forma de las funciones de distribución, lo que permite que las muestras estudiadas tengan distribuciones distintas a la normal. En este trabajo se utiliza para analizar la similitud entre las funciones de distribución acumuladas de un conjunto de valores muestrales, que serán cada una de las temperaturas predichas por cada uno de los modelos, y una distribución teórica que es la temperatura medida.

## Descripción de los modelos analizados

En este trabajo se ha analizado el comportamiento en la predicción de temperatura de una serie de modelos implícitos y explícitos. Todos los modelos estudiados existentes previamente en la literatura trabajan con valores instantáneos de todos los parámetros y, por lo tanto, hacen una predicción del valor de la temperatura del módulo en un instante concreto. En la práctica, el dimensionado y la simulación del funcionamiento de los mismos se hace a partir de valores horarios (a veces incluso diarios) de los parámetros meteorológicos debido a que son datos normalmente disponibles para cualquier localidad, motivo por el que se ha decidido comprobar si los modelos existentes pueden ser válidos para predecir la temperatura de operación de los módulos utilizando valores medios horarios, por lo que se proponen nuevos modelos de cálculo de la temperatura horaria de operación de módulos.

### Los modelos analizados han sido los siguientes:

- ✚ Modelo de balance de energía de Mattei
- ✚ Modelo de Ross
- ✚ Modelo exponencial de King
- ✚ Modelo de Servant
- ✚ Modelo NOCT
- ✚ Modelo eléctrico de los laboratorios Sandia

Se exponen a continuación todos los modelos analizados y los propuestos.

### Modelo de balance de energía de Mattei

El efecto de la temperatura en el comportamiento de los módulos está considerado en muchos estudios sobre la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. **La temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos puede determinarse mediante un simple balance de energía.** De toda la energía solar que absorbe el módulo, una parte de la misma se convierte en energía eléctrica y otra se convierte en energía térmica. En este



sentido, Mattei et al. proponen un modelo que calcula la eficiencia de un módulo a partir de la expresión:

$$\eta = \eta_r [1 - \gamma(T_c - T_r) + \mu \log G_e] \quad (1.4)$$

donde  $\eta_r$  es el rendimiento de referencia del módulo a la temperatura de referencia—  $T_r = 25 \text{ °C}$  y a una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $G_e$  es la irradiancia eficaz y  $\gamma$  y  $\mu$  son, respectivamente, los coeficientes de pérdidas de potencia por temperatura y por irradiancia de los módulos fotovoltaicos. Los valores del coeficiente de temperatura,  $\gamma$ , y del coeficiente de la irradiancia solar,  $\mu$ , dependen de la tecnología del módulo. Mientras que  $\gamma$  es un parámetro determinante, algunos autores (Evans, 1981) afirman que, generalmente,  $\mu$  puede ser despreciado ( $\mu = 0$ ).

Para una irradiancia  $G$ , la parte que atraviesa el cristal es  $\tau G$ , donde  $\tau$  es la transmitancia del cristal, y la parte absorbida por las células fotovoltaicas es  $(c_\alpha \tau)G$  siendo  $c_\alpha$  el coeficiente de absorción de las células. Las pérdidas de energía son:

- ✚ la debida a la potencia eléctrica producida por las células fotovoltaicas,  $\eta_r G$ ,
- ✚ la correspondiente a la transmisión de calor del colector al ambiente,  $U_{PV} (T_m - T_{amb})$ , donde  $U_{PV}$  es el coeficiente de intercambio de calor del módulo que depende de la velocidad del viento.

En este modelo, el balance energético que tiene lugar en un módulo queda:

$$(c_\alpha \tau)G = \eta_r G + U_{PV} (T_m - T_{amb}) \quad (1.5)$$

Teniendo en cuenta las Ecuaciones (3.1) y (3.2), con  $\mu = 0$ , este autor obtiene que la temperatura de la célula, y por tanto la del módulo, es:

$$T_m = \frac{U_{PV} T_{amb} + G [(c_\alpha \tau) - \eta_r - \gamma \eta_r T_r]}{U_{PV} - \gamma \eta_r G} \quad (1.6)$$

$U_{PV}$  corresponde a la superficie total de módulo y depende de la velocidad del viento. Se calcula con la siguiente expresión:

$$U_{PV} = p + qW \quad (1.7)$$

siendo:

- ✚  $p$  y  $q$  dos coeficientes que definen el coeficiente de intercambio de calor del módulo, que se expresan en ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) y ( $\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) respectivamente.
- ✚  $W$  la velocidad del viento, en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Sustituyendo en la Ecuación (3.3) la expresión de  $U_{PV}$  dada por la Ecuación (3.4) obtenemos:

$$T_m = \frac{(p + qW)T_{amb} + G[(c_\alpha \tau) - \eta_r - \gamma\eta_r T_r]}{(p + qW) - \gamma\eta_r T_r} \quad (1.8)$$

donde:

- ✚  $p + qW = U_{PV}$  es el coeficiente de intercambio de calor del módulo dependiente de la velocidad del viento,
- ✚  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,
- ✚  $c_\alpha$  es el coeficiente de absorción de las células,
- ✚  $\tau$  es la transmitancia del cristal,
- ✚  $\eta_r$  es la eficiencia del módulo a la temperatura de referencia  $T_r = 25\text{ }^\circ\text{C}$  y a una irradiancia de  $1000\text{ W/m}^2$ ,
- ✚  $\gamma$  es el valor absoluto del coeficiente de variación de la potencia con la temperatura del módulo en  $\%/^\circ\text{C}$ .

En este trabajo también **se han propuesto modelos horarios a partir de los modelos instantáneos existentes**, para calcular la temperatura horaria del módulo usando datos horarios.

La expresión del modelo horario es similar a la dada para el modelo instantáneo y se define en la siguiente ecuación:

$$T_{m-h} = \frac{(p_h + q_h W_h)T_{amb-h} + H[(c_\alpha \tau)_h - \eta_r - \gamma\eta_r T_r]}{p_h + q_h W_h - \gamma\eta_r T_r} \quad (1.9)$$

donde  $H$  es la irradiación horaria, expresada en Wh, y los nuevos coeficientes empíricos a determinar son:

✚  $(c\alpha\tau)_h$  que sigue siendo adimensional,

✚  $p_h$  expresado en  $(\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ ,

✚  $q_h$  expresado en  $(\text{Wh}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ .

Cabe destacar que, para cada variable, **el valor horario es el valor medio de todas las medidas instantáneas registradas en esa hora**, excepto para la irradiación horaria que es la integral de los valores de irradiancia registrados en ese intervalo de tiempo, siendo ese el motivo por el cual las variables  $p_h$  y  $q_h$  tienen unidades diferentes a  $p$  y  $q$ .

### Modelo de Ross

Basándose en las propiedades térmicas del módulo en estado estacionario, Ross (1976) propone un modelo en el que la **diferencia entre la temperatura del módulo y la temperatura ambiente es directamente proporcional a la irradiancia**:

$$T_m = T_{amb} + k_R G \quad (1.10)$$

En esta expresión lineal, en la que no se tiene en cuenta la acción del viento, el coeficiente  $k_R$ , conocido como el coeficiente de Ross y que tiene por unidades  $^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ , expresa el incremento de la temperatura del módulo cuando se incrementa la irradiancia solar, y puede expresarse como:

$$k_R = \frac{\Delta(T_m - T_{amb})}{\Delta G} \quad (1.11)$$

Este coeficiente depende, entre otros factores, de la tecnología del módulo, forma y tamaño del mismo, encapsulamiento, ensamblaje y condiciones ambientales, como indican Nordmann y Clavadetscher (2003).

El modelo horario propuesto, basado en el modelo instantáneo de Ross, lo define la siguiente ecuación:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + k_{R-h} H \quad (1.12)$$

En el cálculo del coeficiente de Ross para valores horarios, hay que tener en cuenta que el valor de la temperatura ambiente en una hora determinada será el valor medio de todas las medidas y que la irradiación horaria,  $H$ , es la integral de los valores de irradiancia registrados en ese intervalo de tiempo considerado. Por este motivo, cabe destacar que el coeficiente de Ross tendrá unidades diferentes al propuesto para los modelos instantáneos, y éstas son  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Wh}^{-1}$ .

### Modelo exponencial de King

King et al. (1998) exponen que las condiciones estándar de medida de los módulos difieren de las condiciones reales de operación de los mismos, en especial la temperatura de operación de la célula de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que tan comúnmente se utiliza. Los autores indican que deben tenerse en cuenta las condiciones específicas de montaje en combinación con las condiciones específicas de funcionamiento para poder estimar la producción anual de un sistema fotovoltaico con mucha más precisión. Asimismo, indican que debe prestarse especial atención a la medida de la irradiancia solar (la sensibilidad del piranómetro usado y medir con particular atención el ángulo de incidencia), y tener en cuenta los coeficientes de pérdidas por temperatura (incluso proponen nuevos coeficientes). También hay que tener en cuenta la influencia de la variación del espectro solar a lo largo del día, y proponen métodos de compensación para un cálculo más preciso.

Los autores describen que la temperatura de operación del módulo está influida por la dirección del viento, la orientación y la configuración del montaje.

King et al. (2004), proponen un modelo empírico para **calcular la temperatura del módulo basándose en condiciones medioambientales locales** como irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. La temperatura del módulo puede calcularse como sigue:

$$T_m = T_{amb} + Ge^{m+nW} \quad (1.13)$$

donde  $G$  es la irradiancia solar incidente sobre la superficie del módulo y  $m$  y  $n$  son dos coeficientes determinados empíricamente:  $m$ , establece el límite superior de la temperatura del módulo a bajas velocidades de viento y alta irradiancia solar y  $n$  establece

el valor al cual la temperatura del módulo cae cuando aumenta la velocidad del viento. Las unidades del coeficiente  $n$  son  $s \cdot m^{-1}$ , mientras que  $m$  es adimensional.

La Ecuación (1.13), como indican Skoplaki y Palyvos (2009), es dimensionalmente inconsistente. Con objeto de eliminar la inconsistencia dimensional, se propone, para el modelo horario, una modificación de la ecuación propuesta por King. La ecuación propuesta es:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + \frac{T_0}{H_0} H \left( e^{m_h + n_h W_h} \right) \quad (1.14)$$

donde  $T_0$  y  $H_0$  son los valores de temperatura ambiente y de irradiación en condiciones estándar de medida, y  $m_h$  y  $n_h$  son ahora los coeficientes a determinar.

Si se hubiese aplicado la ecuación del modelo instantáneo de King, la expresión horaria obtenida sería la siguiente:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + H \left( e^{m_{K-h} + n_{K-h} W_h} \right) \quad (1.15)$$

donde  $m_{K-h}$  y  $n_{K-h}$  representan los valores de estos coeficientes en el modelo original de King.

Como el coeficiente  $n$  indica la influencia del viento, será el mismo en las Ecuaciones (1.14) y (1.15). Igualando estas ecuaciones, se llega a las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} n_{K-h} &= n_h \\ m_{K-h} &= m_h - \ln \frac{H_0}{T_0} = m_h - \ln 40 \end{aligned} \quad (1.16)$$

Es decir, el coeficiente  $m_h$  del modelo horario que se propone en este trabajo se diferencia del propuesto por King et al. ( $m_{K-h}$ ) en el logaritmo neperiano de 40 (que es igual a 3.69), y ambos son adimensionales. Las unidades para  $n_h$  y  $n_{K-h}$  son  $s \cdot m^{-1}$ .

## Modelo de Servant

Servant (1986) propone un modelo para determinar **la temperatura del módulo con tres parámetros meteorológicos**: la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), la velocidad del viento ( $W$ ) y la irradiancia ( $G$ ). El modelo se basa en un modelo simplificado de intercambio de calor entre el módulo fotovoltaico y el ambiente. La temperatura del módulo se calcula mediante la ecuación:

$$T_m = T_{amb} + d_s G (1 + e_s T_{amb}) (1 - f_s W) \quad (1.17)$$

donde el coeficiente  $d_s$  vendrá dado en  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ , el  $e_s$  en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  y el  $f_s$  en  $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Servant realiza el estudio para módulos de células monocristalinas con dos tipos de encapsulado diferentes: doble acristalamiento y doble polimetilmetacrilato (PMMA). Este autor expone **que la temperatura de trabajo de los módulos depende del tipo de encapsulado**, y calcula un valor para cada uno de ellos realizando un ajuste por mínimos cuadrados. Calcula los coeficientes en unas condiciones meteorológicas especiales y favorables para la obtención de los mismos: irradiancia comprendida entre  $300 \text{ W/m}^2$  y  $1000 \text{ W/m}^2$ , velocidad del viento entre  $0 \text{ m/s}$  y  $5 \text{ m/s}$  (medidos un minuto antes del resto de los datos), temperatura ambiente entre  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura de la célula entre  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $55^{\circ}\text{C}$ .

Servant calcula los valores de los coeficientes en dos pasos. En primer lugar calcula la influencia que tienen sobre la temperatura del módulo, la irradiancia (coeficiente  $d_s$ ), y la temperatura ambiente (coeficiente  $e_s$ ) para velocidades de viento inferiores a  $1 \text{ m/s}$ . En el segundo paso calcula la influencia del viento en el cálculo de la temperatura de los módulos con los datos cuyos valores de velocidad está entre  $1$  y  $5 \text{ m/s}$  (coeficiente  $f_s$ ).

El coeficiente  $f_s$  muestra claramente que **el tipo de material del encapsulado tiene una gran influencia en su valor** por el papel que juega éste en el intercambio de calor y en las pérdidas térmicas (la influencia del viento en la temperatura del módulo es mucho mayor en el módulo con doble cristal que en el módulo que utiliza doble polimetilmetacrilato como encapsulante).

Las limitaciones que presenta este modelo es que sólo está analizado para módulos con células monocristalinas y no para otras tecnologías, además del hecho de que está

realizado en unas condiciones de laboratorio que se alejan bastante de las condiciones de operación de los módulos a sol real.

El modelo horario propuesto a partir del modelo de Servant es el siguiente:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + d_{S-h} H (1 + e_{S-h} T_{amb-h}) (1 - f_{S-h} W_h) \quad (1.18)$$

en la que el coeficiente  $d_{S-h}$  tendrá unidades diferentes a las del correspondiente coeficiente  $d_S$  de los modelos instantáneos, las cuales son  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Wh}^{-1}$ .

### Modelo NOCT

La Temperatura de Operación Nominal de la Célula (NOCT, por sus siglas en inglés), definida en la norma IEC 61215 (2005) para módulos de silicio cristalino y en la norma IEC 61646 (2008) para módulos de lámina delgada, es la temperatura de equilibrio que alcanza el módulo en las siguientes condiciones: montado en una estructura abierta inclinada  $45^{\circ}$  respecto a la horizontal, a una irradiancia de  $800 \text{ W/m}^2$ , a temperatura ambiente de  $20^{\circ}\text{C}$  y una velocidad de viento de  $1 \text{ m/s}$ , estando el módulo en circuito abierto. Todas estas condiciones se alejan bastante de la operación de un módulo en condiciones de sol real, lo que justifica la gran inexactitud que se comete cuando se usa el modelo NOCT en el cálculo de la temperatura del módulo fuera de las condiciones indicadas en la norma. Este hecho se reconoce además en la citada norma, en la cual se indica que la temperatura real de operación estará afectada por la estructura de fijación, la irradiancia, la velocidad del viento y la temperatura ambiente, además de las reflexiones del cielo y suelo y de objetos cercanos, y que para estimaciones más precisas deben tenerse en cuenta todos estos factores.

Según la citada norma, **la temperatura del módulo va a depender de la temperatura ambiente y de la irradiancia que incide sobre la misma**. La ecuación que relaciona estos dos parámetros meteorológicos es:

$$T_m = T_{amb} + \frac{G}{800} (NOCT - 20) \quad (1.19)$$

Para calcular la temperatura del módulo se necesita la temperatura de operación nominal de la célula (*NOCT*), que viene dada en la hoja de características de los módulos fotovoltaicos proporcionados por los fabricantes, la temperatura ambiente y la irradiancia, no siendo necesario realizar ajuste alguno.

Por la sencillez de este modelo para el cálculo de la temperatura de trabajo de los módulos, se van a proponer dos nuevos modelos basados en él. En estos nuevos modelos se tendrá en cuenta la influencia de la velocidad del viento en el cálculo de la temperatura de los módulos.

Para calcular la temperatura del modelo horario *NOCT* se usará la temperatura ambiente horaria y la irradiación horaria. La expresión para calcularla será:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + \frac{H}{800} (NOCT - 20) \quad (1.20)$$


## Modelo eléctrico

King et al. (2004) exponen a lo largo de su artículo las **ecuaciones que definen el modelo usado por el Departamento de Tecnología Solar de los Laboratorios Sandia**. Estas ecuaciones sirven para analizar y modelar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos y se pueden usar para describir el comportamiento eléctrico de módulos fotovoltaicos individuales. Pueden ser escaladas para combinaciones de módulos en serie o en paralelo y también son de aplicación para células individuales.

En el cálculo de la tensión en circuito abierto, hay que tener en cuenta la influencia que tiene la temperatura del módulo. La ecuación que define el cálculo de la tensión en circuito abierto es:

$$V_{oc} = V_{oc}(STC) + \beta_{V_{oc}} (G_{ef}) \cdot (T_c - T_0) + N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(G_{ef}) \quad (1.21)$$

donde:

  $V_{oc}$  es la tensión en circuito abierto,



- ✚  $V_{oc} (STC)$  es la tensión en circuito abierto en condiciones estándar,
- ✚  $G_{ef}$  es la irradiancia efectiva,
- ✚  $\beta_{V_{oc}}(G_{ef})$  es el coeficiente de temperatura en circuito abierto, en función de la irradiancia efectiva,
- ✚  $T_c$  y  $T_0$  son respectivamente la temperatura de la célula (o del módulo) y la temperatura de referencia, normalmente 25 °C,
- ✚  $N_s$  es el número de células en serie que posee el módulo fotovoltaico,
- ✚  $\delta(T_c)$  es el voltaje térmico para la temperatura de la célula a la temperatura  $T_c$ .

El voltaje térmico para la temperatura de la célula  $T_c$  se calcula mediante la expresión:

$$\delta(T_c) = \frac{m_d \cdot k \cdot (T_c + 273.15)}{e} \quad (1.22)$$

donde:

- ✚  $m_d$  es el factor de idealidad del diodo (adimensional),
- ✚  $k$  es la constante de Boltzman, de valor  $1.38066 \text{ e}^{-23} \text{ J/K}$ ,
- ✚  $e$  es el valor absoluto de la carga del electrón, cuyo valor es  $1.60218 \text{ e}^{-19} \text{ C}$ .

Cuando el factor de idealidad del diodo se considera 1 y la célula se encuentra a la temperatura de referencia de 25 °C, el valor del voltaje térmico es de 26 mV.

King et al. (2004) indican que la dependencia del coeficiente de temperatura en circuito abierto con la irradiancia efectiva viene dada por la ecuación:

$$\beta_{V_{oc}}(G_{ef}) = \beta_{V_{oc}(STC)} + n_{\beta_{V_{oc}}} \cdot (1 - G_{ef}) \quad (1.23)$$

donde,  $\beta_{V_{oc}(STC)}$  es el coeficiente de temperatura del módulo a la tensión de circuito abierto y a la irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , y  $n_{\beta_{V_{oc}}}$  es el coeficiente que proporciona la dependencia de la irradiancia efectiva con el coeficiente de temperatura en circuito abierto. Normalmente se considera que  $n_{\beta_{V_{oc}}}$  es cero, con lo que se asume que  $\beta$  es constante e igual a  $\beta_{V_{oc}(STC)}$ .

Así pues, el que damos en llamar modelo eléctrico es el dado por la ecuación:

$$V_{oc} = V_{oc}(STC) + \beta(T_m - 25) + m_d \cdot N_s \frac{k(T_m + 273.15)}{e} \ln G_{ef} \quad (1.24)$$

donde todos los parámetros coinciden con lo anteriormente expuesto.

De entre las distintas expresiones que King et al. (2004) dan para la irradiancia efectiva, en el presente trabajo se han usado las dos expresiones siguientes:

En primer lugar, para comparar todos los modelos meteorológicos con el modelo eléctrico se ha usado la expresión indicada en la siguiente ecuación:

$$G_{ef} = \frac{G}{G_0(\text{STC})} \quad (1.25)$$

Se ha usado esta expresión porque usa la irradiancia medida en el plano del módulo al igual que todos los modelos meteorológicos estudiados. La irradiancia  $G_0$  (STC) es de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Este modelo será nombrado como modelo Eléctrico\_G a la hora de presentar todos los coeficientes de cálculo de temperatura de operación de módulo hallados y sus resultados de predicción.

En segundo lugar, para el otro modelo eléctrico estudiado, que será identificado con el nombre de Eléctrico\_Isc, se ha elegido la expresión:

$$G_{ef} = \frac{I_{sc}}{I_{sc}(\text{STC})} \quad (1.26)$$

Se ha elegido esta expresión debido a que con ella se elimina la influencia del espectro solar en la irradiancia efectiva.

La temperatura del módulo se ha calculado despejándola de la Ecuación (1.24). La ecuación resultante es:

$$T_m = \frac{V_{oc} - V_{oc}(\text{STC}) + 25\beta - \frac{273.15 m_d N_s k}{e} \ln G_{ef}}{\beta + \frac{m_d N_s k}{e} \ln G_{ef}} \quad (1.27)$$

Y mediante una regresión lineal múltiple, se han calculado la tensión a circuito abierto en condiciones STC ( $V_{oc}(\text{STC})$ ), que vendrá expresada en V, el coeficiente de temperatura en circuito abierto ( $\beta$ ), expresado en  $\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  y el coeficiente de idealidad del diodo ( $m_d$ ), que es adimensional.

El modelo horario propuesto es el siguiente:

$$T_{m-h} = \frac{V_{oc-h} - V_{oc-h}(\text{STC}) + 25\beta_h - \frac{273.15 m_{d-h} N_s k}{e} \ln H_{ef}}{\beta_h + \frac{m_{d-h} N_s k}{e} \ln H_{ef}} \quad (1.28)$$

donde  $V_{oc-h}$  es el valor medio horario de la tensión en circuito abierto y  $H_{ef}$  es la integral horaria de la irradiancia efectiva.

Los coeficientes del modelo horario son  $V_{oc-h}(\text{STC})$ ,  $\beta_h$  y  $m_{d-h}$ , cuyas unidades serán las mismas que las del modelo instantáneo.

## Nuevos modelos propuestos

A partir del modelo NOCT, se **proponen dos modelos nuevos** en los que se tiene en cuenta la influencia que la velocidad del viento tiene sobre la temperatura de operación de los módulos.

A continuación, se describen estos dos nuevos modelos.

### Modelo NOCT\_1p

En este modelo sólo se ha tenido en cuenta la influencia de la velocidad del viento. El modelo NOCT supone que la velocidad del viento siempre es de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Si el módulo está trabajando en condiciones reales, esto no se va a cumplir ya que estará expuesto a muchos valores diferentes de velocidad del viento. El modelo propuesto es el siguiente:

$$T_m = T_{amb} + \frac{G}{G_0}(NOCT - T_0) + a(W - W_1) \quad (1.29)$$

donde  $T_0$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y  $G_0$  ( $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) son los valores de temperatura ambiente y de irradiancia que aparecen en la definición de NOCT, y  $W_1$  la velocidad de referencia del viento que aparece entre las condiciones que se imponen para definir NOCT, es decir,  $W_1 = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $W$  es la velocidad del viento en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $a$  un coeficiente empírico, expresado en  $^\circ\text{C}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ .

La ecuación propuesta para predecir la temperatura del módulo cuando se utilizan valores horarios es:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + \frac{H}{H_0}(NOCT - T_0) + a_h(W_h - W_1) \quad (1.30)$$

donde  $H_0 = 800 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $W_1 = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $a_h$  es el coeficiente a determinar en  $^\circ\text{C}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Al igual que en el modelo instantáneo, este modelo coincide con el modelo NOCT horario cuando  $W_h = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## Modelo NOCT\_2p

Se ha propuesto un segundo modelo nuevo en el que, además de la velocidad del viento, se tiene en cuenta un **nuevo coeficiente que se ha añadido al modelo anterior**.

La ecuación propuesta es:

$$T_m = T_{amb} + b \left[ \frac{G}{G_0} (NOCT - T_0) \right] + c (W - W_1) \quad (1.31)$$

donde  $b$  es un coeficiente adimensional, y  $c$  tiene las mismas dimensiones y significado que en el modelo anterior.

El coeficiente  $b$  matiza el incremento de temperatura en el módulo debido a la irradiancia solar, ya que sólo una parte de la misma se emplea en incrementar la temperatura del módulo.

La ecuación propuesta para el modelo horario es:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + b_h \left[ \frac{H}{H_0} (NOCT - T_0) \right] + c_h (W_h - W_1) \quad (1.32)$$

donde  $b_h$  sigue siendo un coeficiente adimensional y  $c_h$  viene expresado en  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ .

## Resultados obtenidos con los nuevos modelos horarios

### Coefficientes para los modelos horarios

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes calculados para cada una de las tecnologías estudiadas y el valor de la  $R^2$  de cada uno de los ajustes. Todos los coeficientes se han hallado tras calcular las series horarias de todos los parámetros necesarios.

**Todos los valores de los coeficientes hallados son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%**, ya que según los ajustes realizados, el intervalo de confianza de cada uno de los coeficientes no contiene el 0, o el p-valor del ajuste presenta un valor menor de 0.05. Por ello no pueden ser eliminados de los modelos.

**Tabla 1. Coeficientes de los ajustes con valores horarios de las variables**

| Modelo        | Tecnología             | $d_{S-h}$ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Wh}^{-1}$ ) | $e_{S-h}$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )                                 | $f_{S-h}$ ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )   | $R^2$ (%) |
|---------------|------------------------|--|---|--|-----------|
| Servant       | CdTe                   | 0.031  | 0.001   | 0.085  | 97.6      |
|               | a-Si                   | 0.023  | 0.010   | 0.095  | 97.7      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 0.026  | 0.001   | 0.104  | 96.4      |
|               | mc-Si                  | 0.016  | 0.030   | 0.085  | 91.0      |
| Modelo        | Tecnología             | $k_{R-h}$ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Wh}^{-1}$ ) |   |  | $R^2$ (%) |
| ROSS          | CdTe                   | 0.026  |   |  | 92.3      |
|               | a-Si                   | 0.022  |   |  | 90.7      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 0.025  |   |  | 88.0      |
|               | mc-Si                  | 0.024  |   |  | 89.7      |
| Modelo        | Tecnología             | $m_h$ (adimensional)   | $n_h$ ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )                              | $m_{k-h}$ (adimensional)   | $R^2$ (%) |
| KING          | CdTe                   | 0.268  | -0.116  | -3.42  | 97.8      |
|               | a-Si                   | 0.175  | -0.131  | -3.51  | 97.3      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 0.292  | -0.141  | -3.40  | 95.8      |
|               | mc-Si                  | 0.211  | -0.115  | -3.48  | 95.5      |
| Modelo        | Tecnología             | $(\text{ca}\tau)_h$ (adimensional)                                     | $p_h$ ( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) | $q_h$ ( $\text{Wh} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) | $R^2$ (%) |
| MATTEI        | CdTe                   | 0.88   | 23.3  | 3.7  | 97.9      |
|               | a-Si                   | 0.80   | 24.3  | 4.2  | 97.1      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 0.88   | 23.5  | 4.3  | 95.4      |
|               | mc-Si                  | 0.88   | 23.4  | 3.9  | 95.7      |
| Modelo        | Tecnología             | $V_{oc-h}$ (STC)(V)  | $\beta_h$ ( $\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )                  | $m_{d-h}$ (adimensional)   | $R^2$ (%) |
| ELÉCTRICO_G   | CdTe                   | 88.0   | -0.253  | 1.36   | 92.1      |
|               | a-Si                   | 86.5   | -0.241  | 1.37   | 93.1      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 58.1   | -0.161  | 1.30   | 96.0      |
|               | mc-Si                  | 32.7   | -0.107  | 1.03   | 93.9      |
| Modelo        | Tecnología             | $V_{oc-h}$ (STC)(V)  | $\beta_h$ ( $\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )                  | $m_{d-h}$ (adimensional)   | $R^2$ (%) |
| ELÉCTRICO_Isc | CdTe                   | 88.0   | -0.258  | 1.36   | 93.2      |
|               | a-Si                   | 87.1   | -0.258  | 1.44   | 96.3      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 58.4   | -0.172  | 1.32   | 96.5      |
|               | mc-Si                  | 32.7   | -0.109  | 1.03   | 94.4      |
| Modelo        | Tecnología             | $a_h$ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )        |   |  | $R^2$ (%) |
| NOCT_1p       | CdTe                   | -2.31  |   |  | 94.6      |
|               | a-Si                   | -2.96  |   |  | 87.6      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | -2.47  |   |  | 94.4      |
|               | mc-Si                  | -3.11  |   |  | 78.9      |
| Modelo        | Tecnología             | $b_h$ (adimensional)   | $c_h$ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )       |  | $R^2$ (%) |
| NOCT_2p       | CdTe                   | 0.90   | -1.63   |  | 96.9      |
|               | a-Si                   | 0.81   | -1.71   |  | 96.8      |
|               | a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ | 0.94   | -2.08   |  | 95.1      |
|               | mc-Si                  | 0.79   | -1.52   |  | 94.5      |

Para los modelos horarios puede observarse que **los resultados mejoran en comparación con los modelos instantáneos**, ya que las  $R^2$  obtenidas para cada uno de los ajustes es mayor en todos los modelos y en todas las tecnologías estudiadas. La causa de esta notable mejoría estriba en el hecho de que, para situaciones instantáneas, la respuesta de los módulos con respecto a las variaciones de los parámetros meteorológicos no es inmediata debido a la inercia térmica de los módulos, lo que hace que el cálculo de los coeficientes mejore considerablemente cuando se tienen valores medios horarios en lugar de valores instantáneos.

Los valores obtenidos para cada uno de los coeficientes de los modelos estudiados concuerdan con los valores obtenidos para valores instantáneos, excepto para el modelo de King, porque la ecuación propuesta para el modelo de King para el modelo horario, es diferente de la usada para el modelo instantáneo. No obstante, en la Tabla 1 se ha añadido el valor,  $m_{K-h}$ , que tendría el parámetro si se hubiera aplicado el modelo de King original (es decir, sin resolver la inconsistencia dimensional del modelo original de King) y que, como ya se ha indicado anteriormente, difiere de él en el logaritmo neperiano de 40. Puede observarse en dicha tabla que los valores de  $m_{K-h}$  concuerdan con los hallados en el modelo instantáneo y son acordes con los propuestos por King et al. (2004).

Para el resto de modelos, los coeficientes hallados concuerdan con los hallados para los modelos instantáneos.



## Resultados para la predicción de temperatura con modelos horarios

Tras hallar todos los parámetros de entrada de los modelos horarios, el siguiente paso es **comprobar si los modelos instantáneos existentes pueden utilizarse como modelos horarios, y validarlos** con el 70% restante de la muestra de valores horarios. Para ello se ha calculado la temperatura horaria del módulo ( $T_{h-predicha}$ ) para cada uno de los modelos y se ha comparado con los valores experimentales ( $T_{h-medida}$ ). En este apartado se analizan los resultados obtenidos para cada una de las tecnologías estudiadas y para cada uno de los modelos estudiados.

Además de analizar y validar los modelos con datos horarios del año 2011, se ha estudiado el comportamiento de los modelos con los datos de los 31 días del año 2012, elegidos aleatoriamente, para estudiar los resultados con un año distinto al que se ha utilizado para construir los modelos.

En este apartado se presentan en primer lugar los resultados para cada una de las cuatro tecnologías estudiadas, analizando los resultados para cada uno de los modelos, y tras esto se realiza un análisis global de todos los resultados obtenidos, agrupando los resultados por modelos.

Previo al análisis de predicción de cada uno de los modelos para las distintas tecnologías de módulos, se presentan los histogramas de los valores horarios medios integrados de velocidad de viento, temperatura ambiente e irradiación horaria de los dos años estudiados.

**Datos horarios - Año 2011**

**Datos horarios – 31 días 2012**

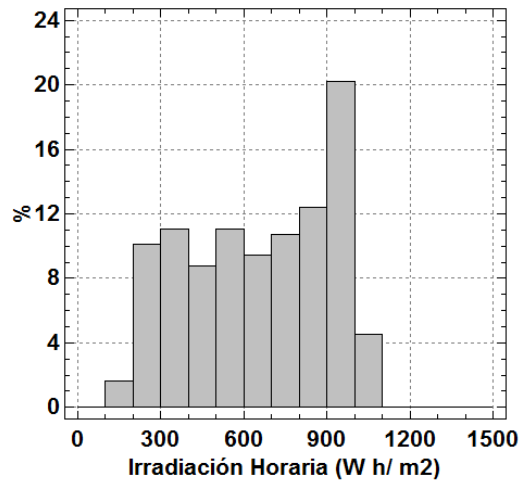
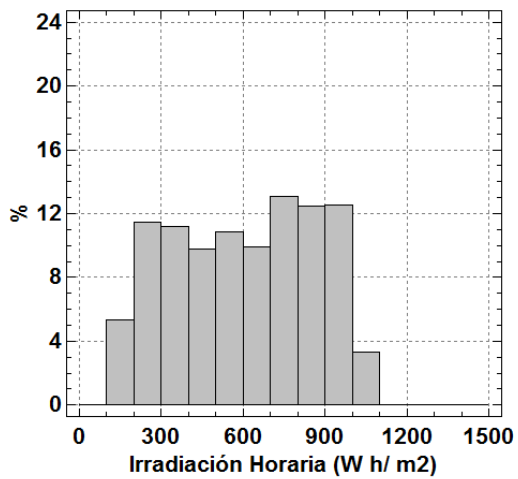
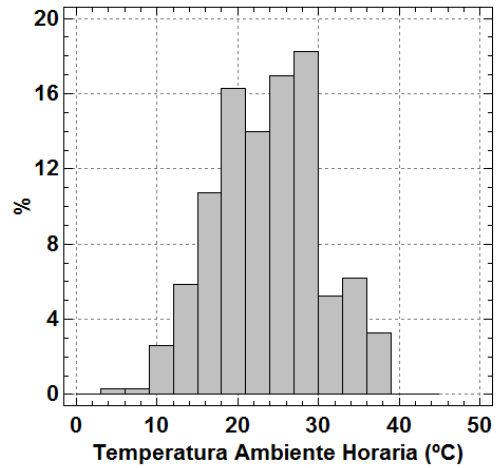
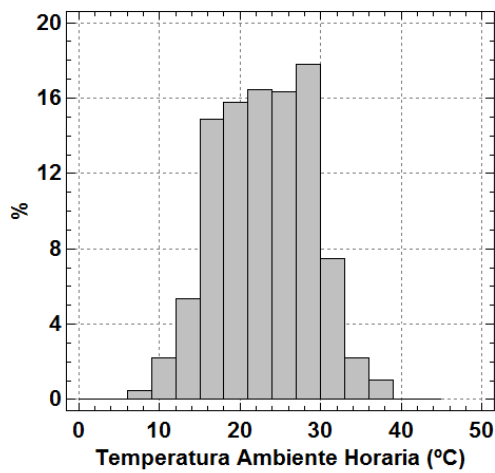
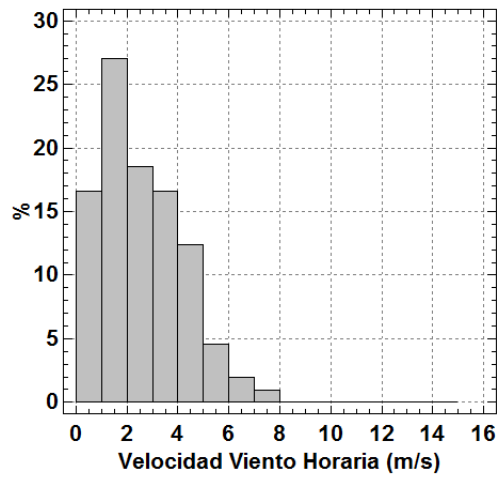
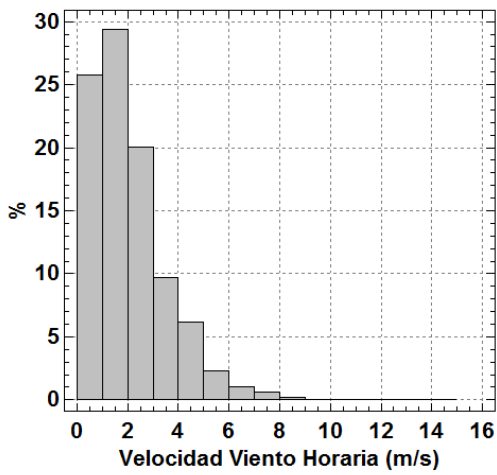


Figura 1. Valores horarios integrados de los datos registrados durante el periodo de medidas.  
Valores horarios integrados de 2011 y de los 31 días aleatorios de 2012.

Los valores medios de los valores horarios integrados de los datos registrados se muestran en la Tabla 2.

Tabla.2. Tabla de valores medios y desviación estándar de los valores horarios integrados de los datos registrados en el periodo de medida de los años 2011 y 2012.

|                          | <u>Año 2011</u> |     | <u>Año 2012</u> |     |
|--------------------------|-----------------|-----|-----------------|-----|
|                          | Valor medio     | STD | Valor medio     | STD |
| $W$ (m/s)                | 2.0             | 1.5 | 2.5             | 1.6 |
| $T_{amb}$ (°C)           | 23.0            | 5.8 | 23.8            | 6.5 |
| $H$ (Wh/m <sup>2</sup> ) | 600             | 260 | 655             | 260 |

Como ocurrió con los datos instantáneos, los valores horarios integrados calculados son superiores en el año 2012.

## Módulos de tecnología de telururo de cadmio

Los resultados obtenidos para el módulo de esta tecnología se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de telururo de cadmio.

| Tecnología    | Modelo      | $\overline{TD}$ | STD  | MAE  | MAPE | R <sup>2</sup> |
|---------------|-------------|-----------------|------|------|------|----------------|
|               |             | (°C)            | (°C) | (°C) | (%)  | (%)            |
| CdTe          | NOCT        | 3.40            | 3.4  | 3.8  | 10.5 | 91.2           |
|               | NOCT_1p     | 1.15            | 2.2  | 2.0  | 5.7  | 96.2           |
|               | NOCT_2p     | -0.03           | 1.8  | 1.4  | 3.9  | 97.1           |
|               | ROSS        | 0.06            | 3.0  | 2.2  | 6.2  | 92.1           |
|               | SERVANT     | 0.09            | 1.6  | 1.2  | 3.5  | 97.6           |
|               | KING        | 0.15            | 1.5  | 1.2  | 3.4  | 97.7           |
|               | MATTEI      | 0.18            | 1.5  | 1.2  | 3.4  | 97.9           |
|               | ELÉCTRICO_G | -0.08           | 2.0  | 1.5  | 4.3  | 98.7           |
| ELÉCTRICO_Isc | -0.08       | 1.8             | 1.4  | 4.2  | 97.2 |                |

Puede observarse, por una parte, que **la exactitud de los modelos meteorológicos está muy próxima a la de los modelos eléctricos** porque en esos modelos ya no influye la inercia térmica del módulo, y por otra, que la precisión de los modelos meteorológicos es igual e incluso superior a la de los modelos eléctricos, excepto para los modelos NOCT, NOCT\_1p y Ross. Esto no ocurría con los valores instantáneos, pues en ellos los modelos eléctricos eran los más exactos y precisos.

El aumento en la precisión que consiguen los modelos horarios con respecto a la que tenían los modelos instantáneos se aprecia analizando los valores obtenidos de la desviación estándar. Este aumento puede constatarse comparando los valores de la desviación estándar que presentaban los modelos en el estudio con valores instantáneos con los que presentan en el estudio con valores horarios.

Todos los modelos alcanzan una precisión superior a la que tenían cuando se calculaba la temperatura usando valores instantáneos. Este aumento no es tan acusado en los modelos de NOCT y Ross, que son modelos muy sencillos, ni en los modelos eléctricos, porque estos modelos ya tenían una precisión bastante alta en el cálculo con valores instantáneos.

La notable mejoría de los modelos horarios se refleja, por un lado, en el aumento de los valores del coeficiente de determinación de la regresión lineal entre la temperatura medida y la temperatura predicha por los modelos,  $R^2$ , y por otro, en una mayor agrupación de datos en torno a la recta de pendiente unidad.

Los **valores MAE y MAPE** también se han reducido notablemente cuando se realizan los cálculos con valores horarios.

Todos los modelos, excepto los modelos de Ross y el modelo NOCT, presentan un valor de  $R^2$  superior al 97% (en el caso del modelo NOCT\_1p está muy próxima a este valor). Esta relación estaba en torno al 90% para los mejores modelos instantáneos.

El valor de  $R^2$  de los modelos NOCT y Ross es del 84.8% y 86.7% respectivamente cuando se realizan los cálculos con los valores instantáneos y ahora, con valores horarios, es del 91.2% y 92.1% respectivamente. Los valores de la desviación estándar son de 4.6 °C y 4.0 °C con valores instantáneos y ha pasado a ser de 3.4 °C y 3.0 °C respectivamente con valores horarios. El aumento en la precisión de estos modelos está en torno a un 25%. Los modelos de Ross y NOCT no tienen en cuenta el efecto

refrigerante que produce la velocidad del viento sobre los módulos, y por este motivo son los modelos con los peores resultados, con los menores valores de  $R^2$  y los que presentan el porcentaje más bajo en cuanto al aumento de precisión de los modelos horarios con respecto a los instantáneos.

Los modelos que mejor predicen la temperatura para esta tecnología de módulo son el modelo de King y el de Mattei. Estos modelos presentan desviaciones medias de la temperatura muy bajas y muy parecidas (0.15 °C en el modelo de King y 0.18 °C en el modelo de Mattei), las menores desviaciones estándar de la desviación de la temperatura (1.5 °C en ambos modelos), los errores más bajos (1.2 °C de MAE y 3.4% de MAPE en ambos modelos) y los valores más altos de  $R^2$  (97.9% en ambos modelos). La precisión que alcanzan estos modelos cuando se realizan los cálculos de la temperatura del módulo usando los valores medios horarios de las variables es superior en un 55% respecto a la que se alcanzaba cuando se utilizaban valores instantáneos. Los valores de desviación estándar se han reducido desde 3.4 °C hasta 1.5 °C en ambos modelos. Los valores de MAE, comparándolos con los que se obtenían al realizar los cálculos con valores instantáneos, se han reducido a la mitad, de 2.4 °C a 1.2 °C y los de MAPE han pasado del 6.7% al 3.4%.

**El siguiente mejor modelo es el de Servant**, presentando valores muy similares a estos dos modelos, aunque el valor de los errores es una décima de punto más alto, 3.5%, y la  $R^2$  es menor. La precisión para este modelo ha aumentado en un 52%, pues los valores de desviación estándar, comparando los modelos instantáneos con los horarios, han disminuido desde 3.4 °C hasta 1.6 °C y además el valor de  $R^2$  ha aumentado desde un 90,6% hasta un 97.7%. Los valores MAE se han reducido a la mitad, de 2.4 °C a 1.2 °C, y los MAPE del 6.6% al 3.5%.

Los modelos NOCT\_2p y Eléctrico\_Isc, tienen resultados muy parecidos, siendo la predicción del modelo NOCT\_2p algo mejor que la del modelo eléctrico porque presenta una menor desviación media de temperatura y menor valor de MAPE que el modelo eléctrico, 3.9% frente al 4.2%. El aumento de precisión del nuevo modelo NOCT\_2p es superior al 48%, mientras que para el modelo eléctrico este aumento es solo de un 14%. Esto es debido a que la precisión que tenía este modelo en el cálculo con valores instantáneos era ya muy elevada. El modelo Eléctrico\_G obtiene peores resultados que el Eléctrico\_Isc, tal y como ocurría con valores instantáneos, aunque el

aumento de precisión para este modelo ha sido del 23%. La reducción de los valores de MAE y MAPE en los modelos eléctricos no es tan alta como en los demás modelos: para el Eléctrico\_G, pasan de 1.9 °C a 1.5 °C y de 5.9% a 4.3%, mientras que para el Eléctrico\_Isc, van de 1.6 °C a 1.4 °C y de 5% a 4.2%. En el modelo NOCT\_2p la disminución de los valores MAPE es una de las más altas, pasa de 7% a 3.9% y los MAE de 2.5 °C a 1.4 °C.

**El modelo NOCT\_1p no es uno de los mejores modelos para predecir la temperatura, pero si uno de los más sencillos**, tras los modelos NOCT y Ross. El aumento de precisión que consigue este modelo cuando se utilizan los datos horarios es bastante superior al de los otros dos modelos (es superior al 45%). Si se comparan los resultados instantáneos con los horarios, los valores de la  $R^2$  pasan desde un 87.7% hasta un 96.2% y el valor de la desviación estándar disminuye desde 4 °C hasta 2.2 °C en este modelo. Los errores se han reducido notablemente en este modelo también, los MAE pasan de 3.3 °C a 2.0 °C y los MAPE de 9.5% a 5.7%.

Al aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov se ha comprobado que todos los modelos tienen la misma distribución que la serie de la temperatura medida excepto los modelos NOCT y NOCT\_1p.

Los resultados de la aplicación del test se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo telururo de cadmio con valores horarios del año 2011.

| Tecnología | Modelo        | Estadístico DN estimado | p-valor  | Misma distribución |
|------------|---------------|-------------------------|----------|--------------------|
| CdTe       | NOCT          | 0.124                   | 0        | NO                 |
|            | NOCT_1p       | 0.063                   | 2.81E-04 | NO                 |
|            | NOCT_2p       | 0.017                   | 8.87E-01 | SÍ                 |
|            | ROSS          | 0.034                   | 1.52E-01 | SÍ                 |
|            | SERVANT       | 0.017                   | 9.20E-01 | SÍ                 |
|            | KING          | 0.022                   | 6.58E-01 | SÍ                 |
|            | MATTEI        | 0.023                   | 5.82E-01 | SÍ                 |
|            | ELÉCTRICO_G   | 0.017                   | 9.20E-01 | SÍ                 |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 0.017                   | 9.20E-01 | SÍ                 |

Recordemos que esta prueba se usa para determinar el grado de coincidencia entre los valores de la distribución de la temperatura medida y los valores de la distribución teórica (temperatura horaria calculada de cada uno de los modelos). Que el resultado muestre que las distribuciones no son diferentes indica que la diferencia entre ambas es pequeña y está dentro de los límites de los errores aleatorios. En los resultados de esta prueba con valores instantáneos de 2011, ninguna de las series tenía la misma distribución que la serie de la temperatura medida. Ahora, con los valores horarios integrados, estas diferencias entre la serie de la temperatura medida y la temperatura predicha por los modelos es mucho menor. Con los únicos modelos que no ocurre esto son con los modelos NOCT y NOCT\_1p.

En el análisis de resultados con valores horarios de 2011, también se han estudiado las gráficas de distribución de frecuencias de la diferencia de temperatura existente entre la temperatura del módulo y la temperatura predicha por cada uno de los modelos, para poder ver la agrupación de los resultados. Las gráficas se muestran en la Figura 2.a y la Figura 2.b; en ellas se muestra la distribución porcentual de esa diferencia de temperatura para el módulo de telururo de cadmio con los datos horarios del año 2011. En dichas figuras puede apreciarse que la agrupación de datos en torno a la diferencia de temperatura próxima a cero ha aumentado notablemente en algunos modelos. Para los modelos sencillos, en el caso del modelo NOCT, el máximo porcentaje con valores instantáneos era de un 28.2%, mientras que ahora con los valores horarios, ese porcentaje llega hasta un 31.7%. Para el modelo de Ross, el porcentaje era de un 48.7% y ahora es del 58.3%.

En los modelos de Servant, King y Mattei, el porcentaje era aproximadamente de un 57% y ha pasado a alcanzar valores superiores al 81%. Además en estos tres modelos puede comprobarse que predicen por exceso, pues el mayor porcentaje de la diferencia de temperatura medida y predicha es de valores negativos.

En el caso de los modelos propuestos, NOCT\_1p y NOCT\_2p, el porcentaje era del 38.0% y del 55.6% respectivamente y ha pasado a ser del 55.1% y del 78.4%. También puede comprobarse que la predicción del modelo NOCT\_1p es peor que la del modelo NOCT\_2p, ya que en este segundo modelo la mayor agrupación de valores está muy concentrada en torno a la diferencia de temperatura próxima a cero.

También se aprecia que el modelo NOCT\_1p predice por exceso.

En el caso de los modelos eléctricos, el porcentaje de valores con diferencias de temperatura próximo a cero se mantiene prácticamente igual que en los modelos instantáneos, pasando del 63.5% al 70.7% para el modelo Eléctrico\_G y del 69.0% al 74.6% para el Eléctrico\_Isc.

Como puede observarse, la predicción de temperatura con valores horarios mejora considerablemente los resultados de la predicción con valores instantáneos.

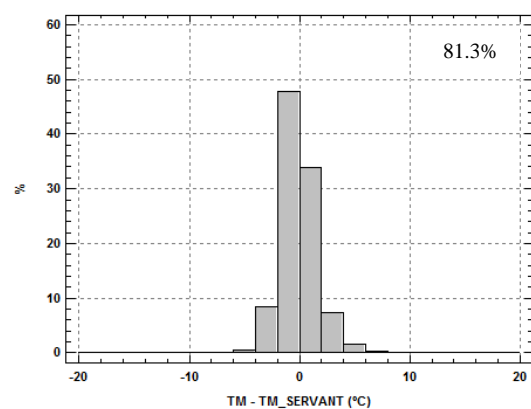
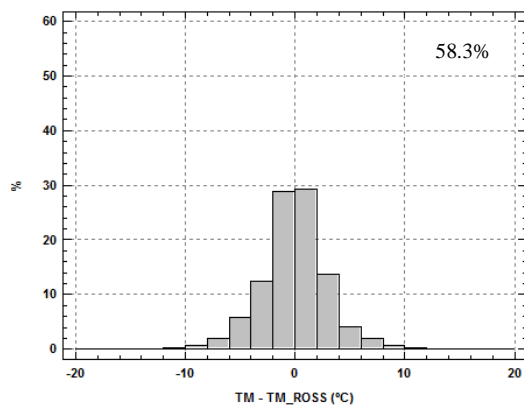
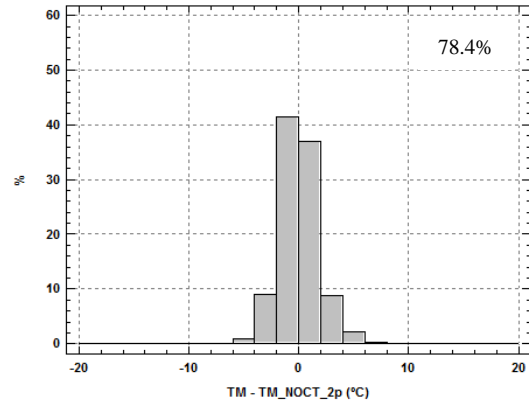
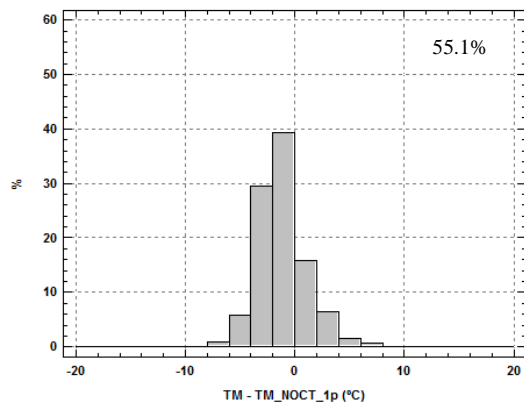
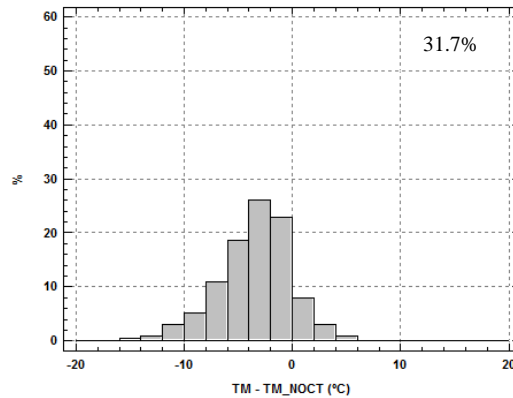




Figura 2.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de telururo de cadmio con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

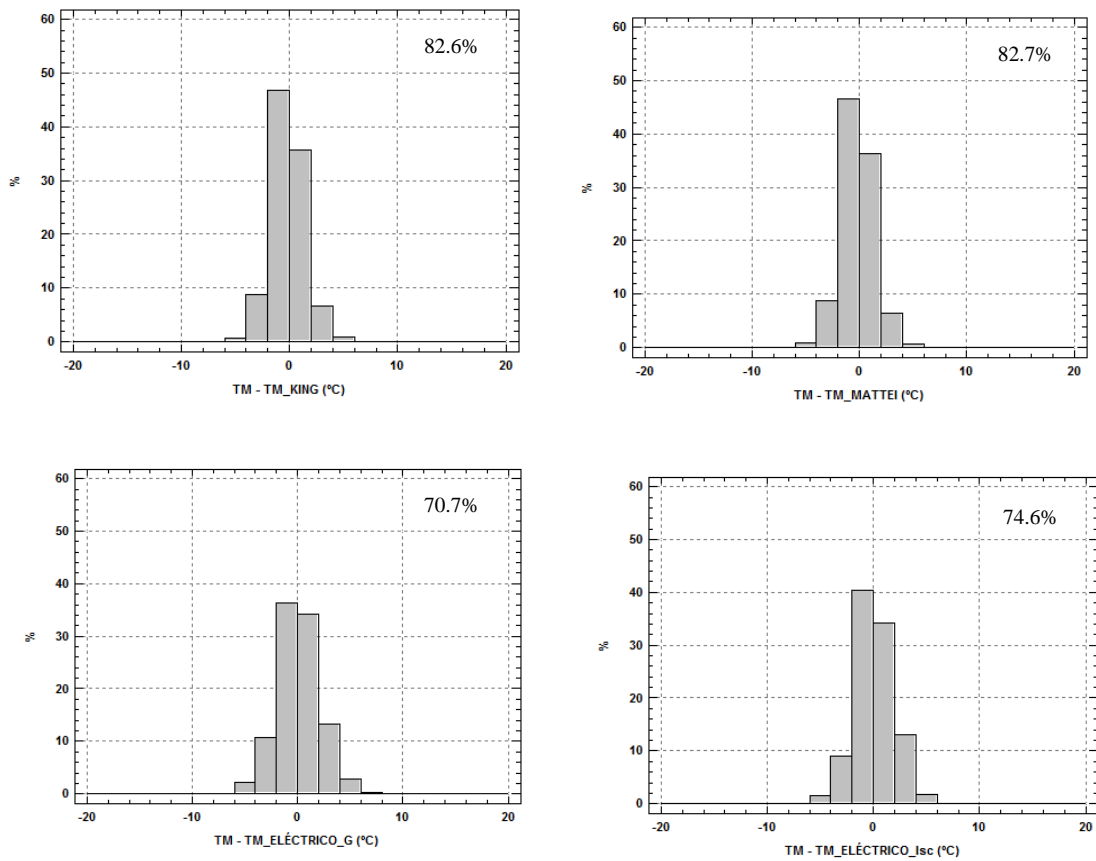


Figura 2.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de telururo de cadmio con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha de todos los modelos estudiados así como las de los modelos propuestos se muestran en la Figura 3.a y la Figura 3.b.

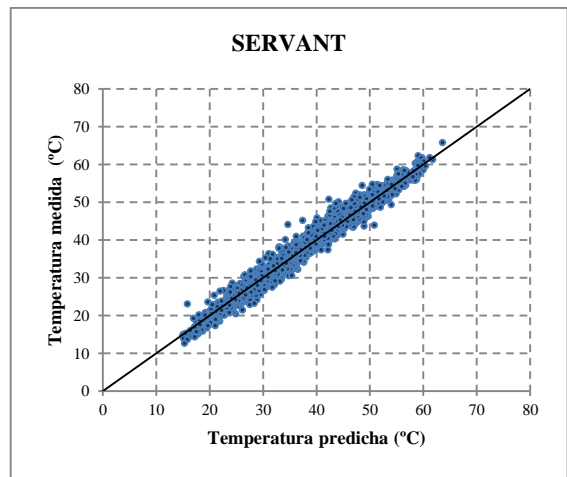
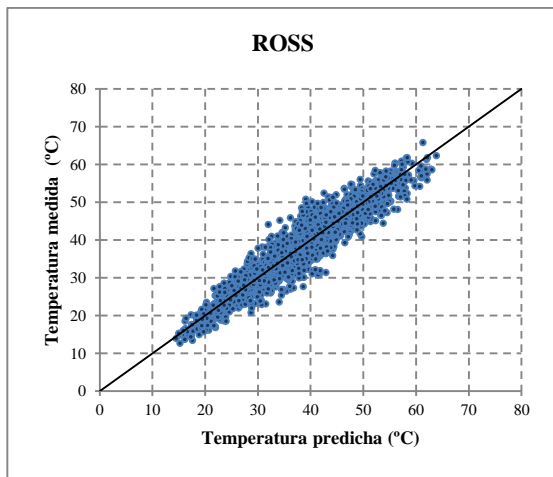
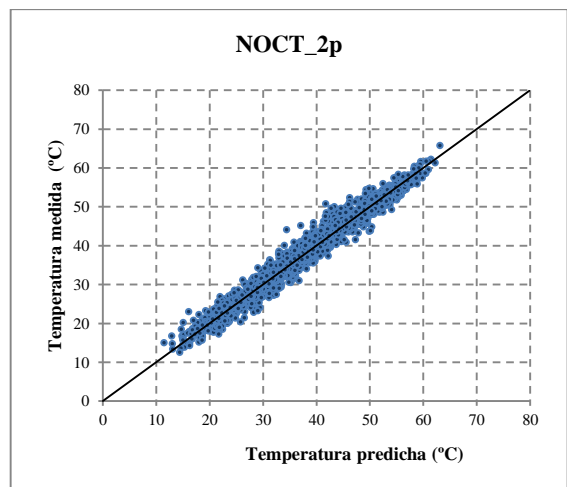
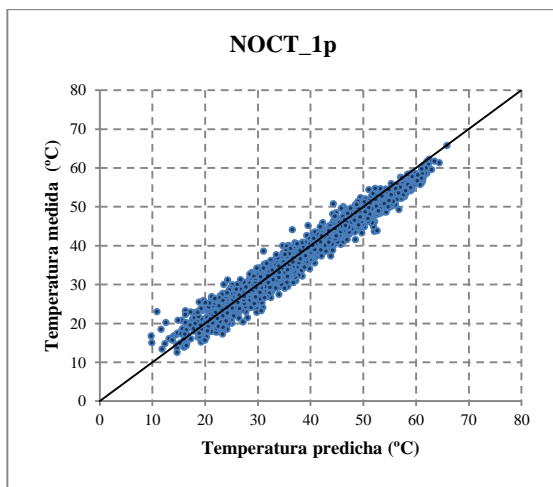
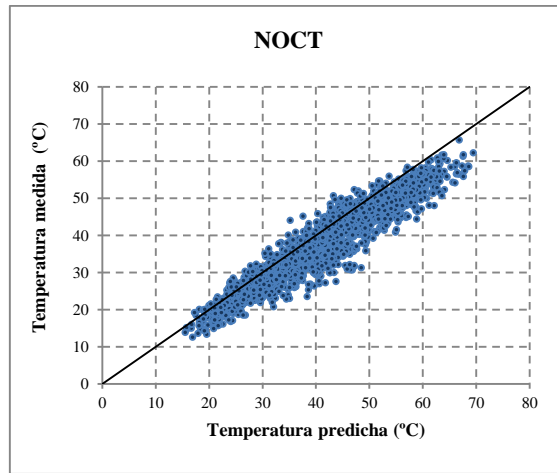


Figura 3.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2011.

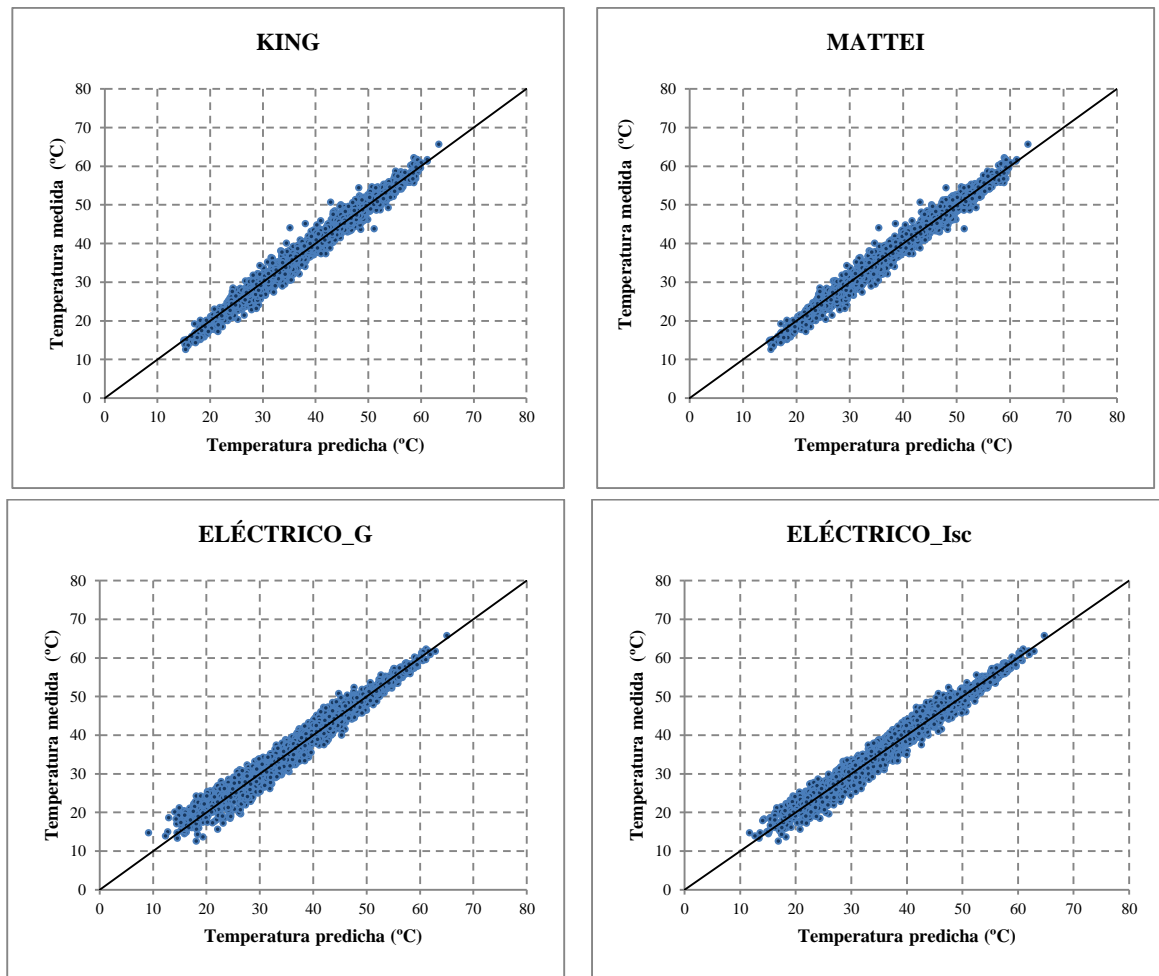


Figura 3.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2011.

Las gráficas muestran que **la agrupación de datos alrededor de la recta de pendiente unidad es mucho mejor que la que presentaban los modelos con datos instantáneos**. El principal motivo de esta notable mejoría es la inercia térmica que tienen los módulos cuando se calcula la temperatura de los mismos usando valores instantáneos, ya que ésta no tiene lugar cuando el cálculo de la temperatura se realiza con valores horarios.

La relación entre la temperatura medida y la temperatura predicha ha pasado de tener una  $R^2$  de un 90% en los modelos instantáneos a ser superior al 97% en prácticamente todos los modelos (NOCT\_2p, Servant, King, Mattei y los Eléctricos) y superior incluso a la que tiene el modelo Eléctrico\_Isc. El modelo Eléctrico\_G tiene el

mayor valor de  $R^2$  (98.7%; valor muy próximo a todos los demás modelos).

También se ha realizado el estudio con las series horarias construidas con los datos de los 31 días del año 2012. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de telururo de cadmio.

| Tecnología | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | $R^2$<br>(%) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| CdTe       | NOCT          | 4.21                    | 3.4         | 4.5         | 11.9        | 91.3         |
|            | NOCT_1p       | 0.53                    | 2.3         | 1.9         | 5.1         | 95.5         |
|            | NOCT_2p       | -0.39                   | 1.8         | 1.3         | 3.7         | 97.1         |
|            | ROSS          | 0.56                    | 3.0         | 2.4         | 6.5         | 92.0         |
|            | SERVANT       | -0.38                   | 1.7         | 1.3         | 3.5         | 97.5         |
|            | KING          | -0.38                   | 1.6         | 1.3         | 3.5         | 97.7         |
|            | MATTEI        | -0.35                   | 1.6         | 1.3         | 3.4         | 97.8         |
|            | ELÉCTRICO_G   | 0.90                    | 1.6         | 1.5         | 4.3         | 97.6         |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 0.90                    | 1.6         | 1.5         | 4.2         | 97.7         |

Es fácil apreciar que la predicción de cada uno de los modelos vuelve a tener el mismo comportamiento que con los datos del año 2011.

Excepto en los modelos más sencillos (NOCT, NOCT\_1p y Ross), la relación entre la temperatura predicha y medida tiene una  $R^2$  que está por encima del 97.0% en todos los modelos horarios meteorológicos; también en el modelo NOCT\_2p y en ambos modelos eléctricos. **Los resultados obtenidos en todos los modelos han mejorado considerablemente con respecto a los resultados obtenidos con los datos instantáneos.** El modelo propuesto NOCT\_1p realiza una predicción peor que el modelo de dos coeficientes pero mejora la predicción que realiza el modelo NOCT. Esta mejoría no es tan elevada en el modelo NOCT y en el modelo de Ross porque estos modelos no incorporan la velocidad del viento en sus ecuaciones, aunque si se comparan los resultados de la relación de temperatura medida y predicha del modelo NOCT usando datos instantáneos y usando datos horarios, se observa que la relación  $R^2$  también mejora en este modelo, pues pasa de ser de un 85.7% a un 91.2%. También ocurre lo mismo para el modelo de Ross, que pasa de un 87.5% a un 92.1%.

La precisión de cada uno de los modelos con los datos del año 2012 es prácticamente la misma que con los datos del año 2011, pues los valores de la desviación estándar son muy similares en los dos años.

Las gráficas de la relación temperatura medida frente a temperatura predicha para el módulo de esta tecnología para los datos del año 2012 se muestran en la Figura 4.a y la Figura 4.b. En ellas puede observarse que la agrupación alrededor de la recta de pendiente unidad es muy buena en todos los modelos y muy similar a la de los modelos eléctricos, y que es algo peor en los modelos sencillos como el modelo NOCT, Ross y NOCT\_1p.

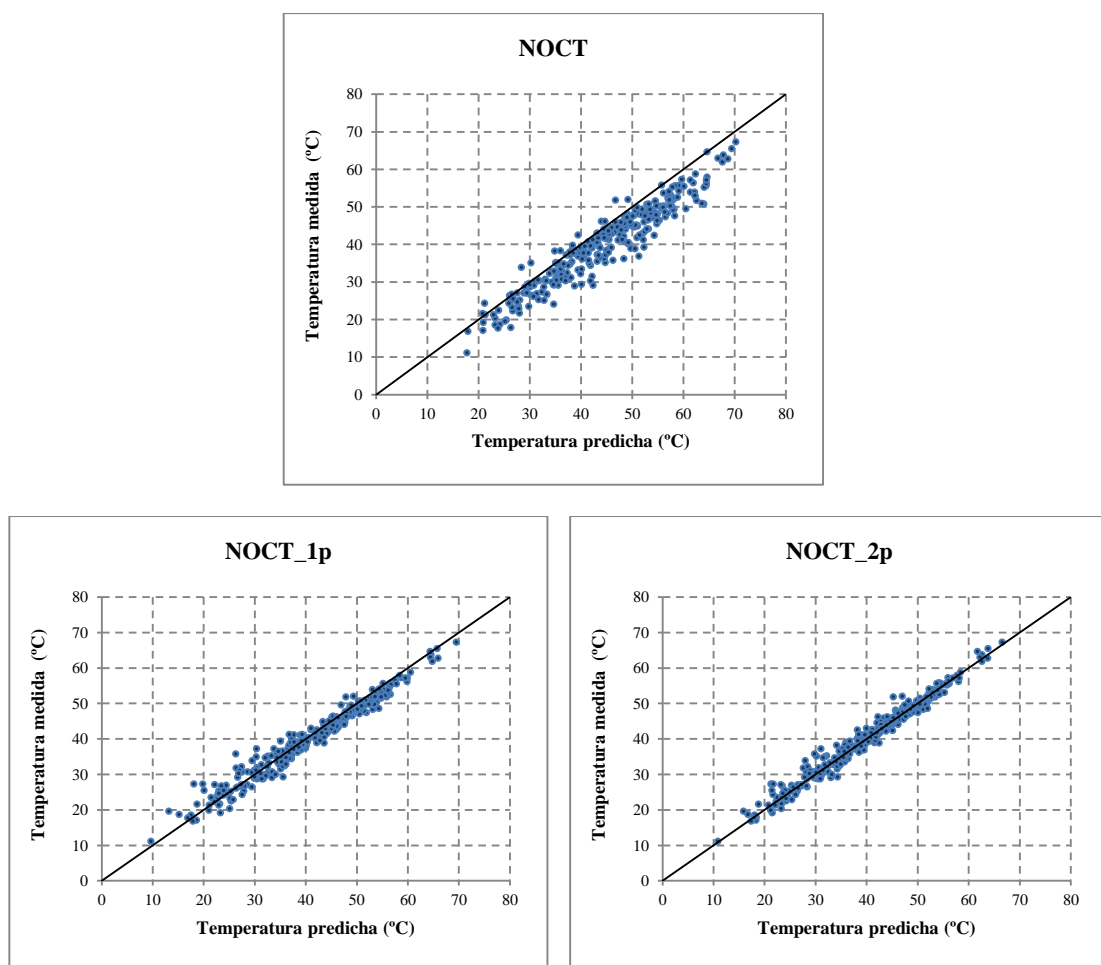


Figura 4.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2012.

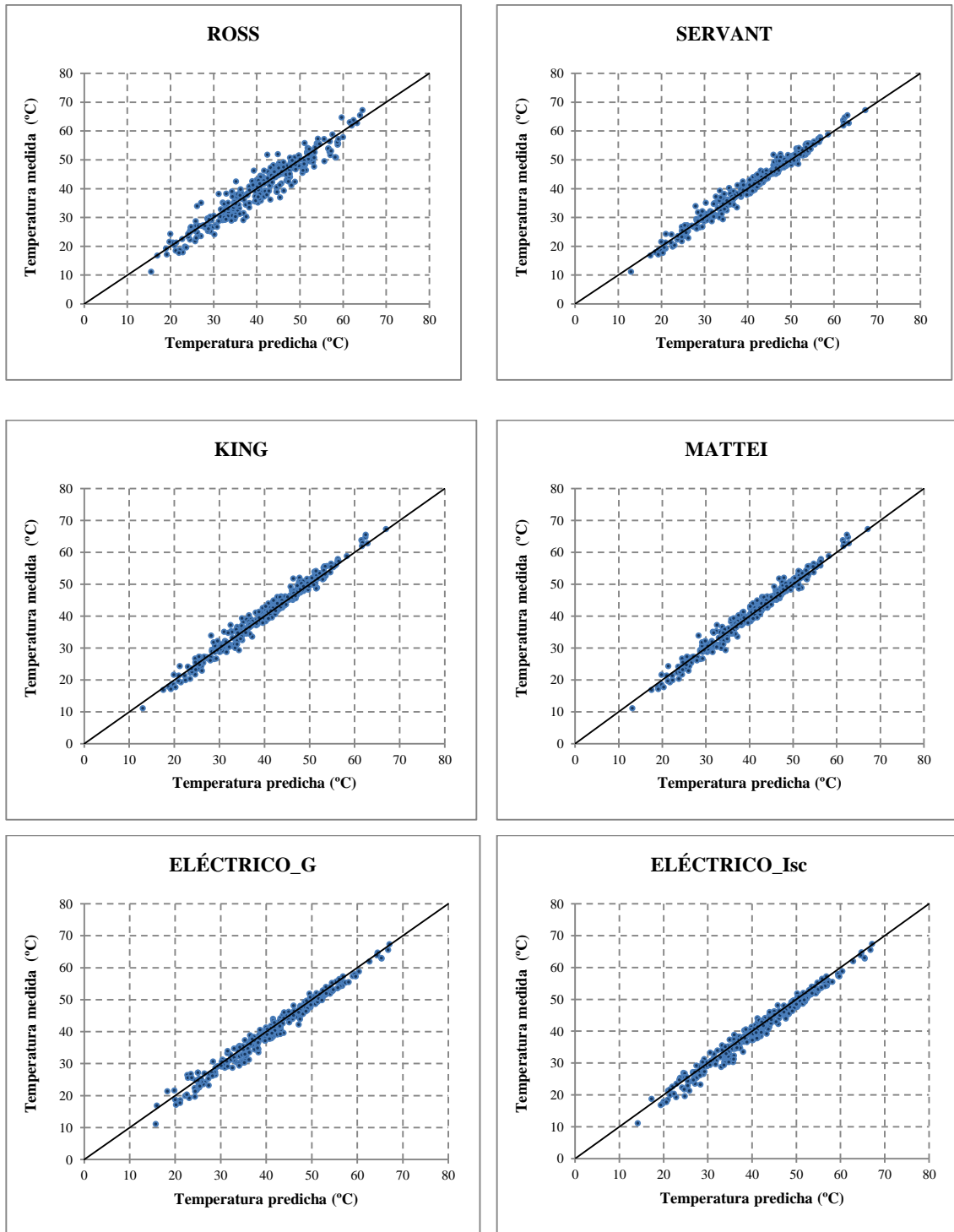


Figura 4.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2012.

En la Figura 5 se muestra el valor de las desviaciones de temperatura del módulo de tecnología telururo de cadmio, representado junto a los valores de la irradiación y el valor

medio de la velocidad del viento en cada hora con los datos de los 31 días aleatorios de 2012.

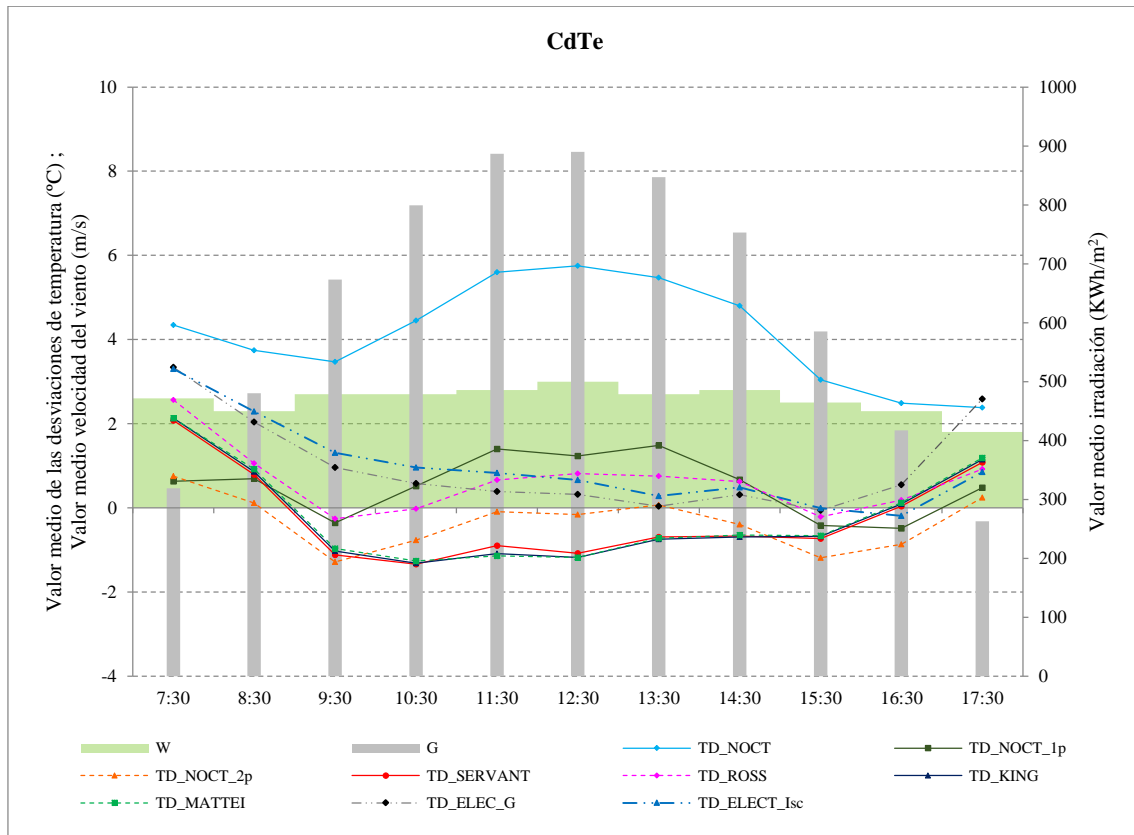


Figura 5. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología telururo de cadmio. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

En la gráfica puede observarse que el modelo NOCT es el que presenta el valor más alto de desviación de temperatura en todas las franjas horarias y el que tiene la mayor desviación de temperatura (alrededor de 6 °C) cuando el valor de la irradiación es alto. Esto es debido a que en este modelo no se tiene en cuenta la velocidad del viento y por tanto no se contempla el enfriamiento que se produce en el módulo por la acción de la velocidad del viento.

También puede observarse que el modelo propuesto NOCT\_2p predice la temperatura en condiciones de alta irradiación con bastante exactitud, pues el valor medio de las desviaciones de temperatura es prácticamente nulo en las horas centrales del día. En esta franja horaria, el modelo NOCT, el de Ross y el NOCT\_1p, predicen por exceso. Esto es

debido, como ya se ha explicado anteriormente, a que en los modelos NOCT y Ross no se tienen en cuenta la velocidad del viento, y en el caso del modelo propuesto NOCT\_1p, aunque sí se tiene en cuenta la velocidad del viento, cuando toma el valor de 1 m/s el modelo NOCT\_1p coincide con el modelo NOCT, pues el término debido a la velocidad del viento se anula.

**Los modelos de Mattei y Servant** realizan una predicción de temperatura por defecto en condiciones de alta irradiación. Lo demuestran los valores negativos de la desviación de temperatura que se muestran en la gráfica.

En las primeras horas del día, con los menores valores de irradiación, la predicción de temperatura de todos los modelos es por exceso. Ocurre también en las horas finales del día. En ambos casos, el modelo con el mayor error en la predicción es el modelo NOCT. Los modelos que mejor predicción realizan en estas condiciones y en esas franjas horarias son los dos modelos propuestos NOCT\_1p y NOCT\_2p.

### Módulos de tecnología de silicio amorfo

Los resultados de la predicción de temperatura de cada uno de los modelos estudiados y propuestos para el módulo de silicio amorfo se muestran en la Tabla 6.

Tabla.6. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de silicio amorfo.

| Tecnología | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | R <sup>2</sup><br>(%) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| a-Si       | NOCT          | 5.35                    | 3.8         | 5.4         | 15.7        | 88.5                  |
|            | NOCT_1p       | 2.59                    | 2.5         | 3.1         | 9.1         | 95.0                  |
|            | NOCT_2p       | 0.09                    | 1.9         | 1.5         | 4.5         | 96.7                  |
|            | ROSS          | -0.06                   | 3.2         | 2.5         | 7.2         | 90.3                  |
|            | SERVANT       | 0.16                    | 1.6         | 1.3         | 3.8         | 97.5                  |
|            | KING          | 0.25                    | 1.7         | 1.4         | 4.2         | 96.6                  |
|            | MATTEI        | 0.26                    | 1.8         | 1.5         | 4.5         | 96.9                  |
|            | ELÉCTRICO_G   | -0.53                   | 1.8         | 1.5         | 4.8         | 97.2                  |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 0.03                    | 1.3         | 1.0         | 3.0         | 98.5                  |



El modelo más exacto es el modelo Eléctrico\_Isc, pues presenta una desviación media de temperatura prácticamente nula. También es el modelo con la mayor precisión, ya que presenta el valor más bajo de la desviación estándar (1.3 °C) de todos. Además posee los menores valores MAE y MAPE, 1.0 °C y 3.0% respectivamente, y el valor de  $R^2$  más alto de todos los modelos (98.5%). Es lo mismo que ocurrió con los modelos instantáneos. El modelo Eléctrico\_G no es ahora el segundo mejor modelo ya que al no existir inercia térmica en los módulos, todos los modelos meteorológicos han mejorado considerablemente en la predicción de temperatura, superando incluso a la predicción que realiza el modelo Eléctrico\_G. Los valores de MAE y MAPE de ambos modelos, comparados con los que tenían en el cálculo con valores instantáneos, han disminuido poco, sólo unas centésimas.

De los modelos meteorológicos, los mejores modelos son el modelo de Servant y el de King, que presentan una  $R^2$  superior al 97%. Los valores MAE (1.3 °C y 1.4 °C respectivamente) y MAPE (3.8% y 4.2% respectivamente) también son los más bajos para estos dos modelos. Los valores MAE, con respecto a los obtenidos con valores instantáneos, han disminuido un punto en ambos modelos y los MAPE han bajado 2.8 puntos en el porcentaje. Estos modelos son los más precisos, pues presentan los valores de desviación estándar más bajos de todos los modelos meteorológicos.

Los valores del coeficiente de determinación de la regresión lineal entre la temperatura medida frente y la temperatura predicha,  $R^2$ , son más altos en los modelos horarios que en los instantáneos (estaban en torno a valores del 90% – 91% en los mejores modelos meteorológicos con valores instantáneos y ha pasado a estar en torno a valores del 96% – 97% en los modelos horarios).

La precisión que se alcanza a la hora de predecir la temperatura cuando se utilizan los modelos horarios es bastante más elevada que cuando se utilizan los instantáneos; lo demuestra el valor de la desviación estándar que se ha reducido notablemente, prácticamente a la mitad en muchos de los modelos atmosféricos. El modelo de Servant ha pasado de tener una desviación estándar de 3.1 °C a una de 1.6 °C y para el NOCT\_2p pasa de 3.3 °C a 1.9 °C; en el caso de Mattei y King la desviación estándar ha pasado de 3.2 °C para ambos modelos a 1.8 °C y 1.7 °C respectivamente. El modelo con el mayor aumento de precisión es el de Servant, con un incremento de un 48%. Para el resto de los modelos comentados el aumento de precisión está en torno a un 43%.

Los modelos de Mattei y el nuevo modelo propuesto NOCT\_2p, tienen resultados muy similares. Los valores de  $R^2$  en estos modelos son 96.9% y 96.7% respectivamente y tienen los mismos valores MAE y MAPE (1.5 °C y 4.5%). Los valores de MAE eran, con valores instantáneos, 2.4 °C y 2.5 °C y los MAPE 7.2% y 7.4% respectivamente. Se observa que disminuyen en una proporción muy similar. Las desviaciones estándar de estos modelos prácticamente coinciden en ambos modelos (1.8 °C y 1.9 °C respectivamente). El modelo NOCT\_2p es más exacto que el modelo de Mattei, pues la desviación de temperatura que presenta es prácticamente nula, 0.09 °C. Los resultados obtenidos por estos modelos están muy próximos a los de los mejores modelos comentados anteriormente.

Puede comprobarse, de nuevo, que las diferencias existentes entre el modelo Eléctrico\_Isc y los modelos meteorológicos se han reducido considerablemente, además de que el modelo propuesto NOCT\_2p alcanza una precisión muy elevada y similar a los modelos meteorológicos y de balance de energía de Mattei.

Para los modelos de NOCT y Ross la precisión no ha subido en la misma proporción. La desviación estándar pasa de ser de 4.8 °C a 3.8 °C para el modelo NOCT, y en el caso de Ross pasa de 3.9 °C a 3.2 °C, con lo que tan sólo hay un aumento de un 20% y un 17% respectivamente.

El modelo NOCT\_1p, aunque puede considerarse similar a los modelos citados en el párrafo anterior, presenta una mejoría en la precisión similar a la de los mejores modelos meteorológicos. La precisión alcanzada por este modelo mejora un 43% con respecto a la que tenía con valores instantáneos. Los valores de  $R^2$  de este modelo han aumentado desde un 86% que presentaba en el modelo instantáneo hasta un 95% en el modelo horario. Los valores de desviación estándar se han reducido desde 4.4 °C hasta 2.5 °C.

Al realizar el test de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones, se ha encontrado que los modelos NOCT\_2p, Servant y ambos modelos eléctricos tienen la misma distribución que la serie de temperaturas medidas. Los resultados de la aplicación del test se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio amorfo con valores horarios del año 2011.

| Tecnología | Modelo        | Estadístico DN estimado | p-valor  | Misma distribución |
|------------|---------------|-------------------------|----------|--------------------|
| a-Si       | NOCT          | 0.170                   | 0        | NO                 |
|            | NOCT_1p       | 0.102                   | 0        | NO                 |
|            | NOCT_2p       | 0.041                   | 5.34E-02 | SÍ                 |
|            | ROSS          | 0.043                   | 3.83E-02 | NO                 |
|            | SERVANT       | 0.035                   | 1.42E-01 | SÍ                 |
|            | KING          | 0.049                   | 9.63E-03 | NO                 |
|            | MATTEI        | 0.051                   | 7.13E-03 | NO                 |
|            | ELÉCTRICO_G   | 0.032                   | 1.99E-01 | SÍ                 |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 0.013                   | 0.991    | SÍ                 |

Las gráficas de distribución porcentual de la diferencia de temperatura existente entre la temperatura del módulo y la temperatura predicha por cada uno de los modelos se muestran en la Figura 6.a y la Figura 6.b. En estas gráficas se observa que los modelos sencillos NOCT y Ross son los que tienen más porcentaje de valores cuyas diferencias de temperatura predicha con respecto a la temperatura medida está más alejada de cero. En el caso del modelo NOCT, esta diferencia llega incluso hasta valores de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que demuestra que este modelo predice valores más altos que los registrados. Este hecho también ocurre en el modelo NOCT\_1p, donde la predicción es también por exceso y el porcentaje de valores con diferencia de temperatura próxima a cero es del 30.5%.

El modelo NOCT\_2p ha mejorado considerablemente con respecto al propuesto para modelos instantáneos. Ahora presenta un mayor porcentaje de valores próximos a cero (72.2%) mientras que con los valores instantáneos era tan solo del 51.3%.

Los modelos de Servant, King y Mattei presentan distribuciones muy similares y con un porcentaje de valores comprendido entre el 72% y 79%, siendo el modelo de Servant el que presenta el mayor porcentaje de todos. En estos modelos la predicción de temperatura es por exceso.

En el caso de los modelos eléctricos, puede comprobarse que **el modelo Eléctrico\_Isc es mucho más exacto que el Eléctrico\_G**, pues el porcentaje de valores de diferencia muy próxima a cero es del 89.0% en el primero mientras que en el segundo

es del 70.8%.

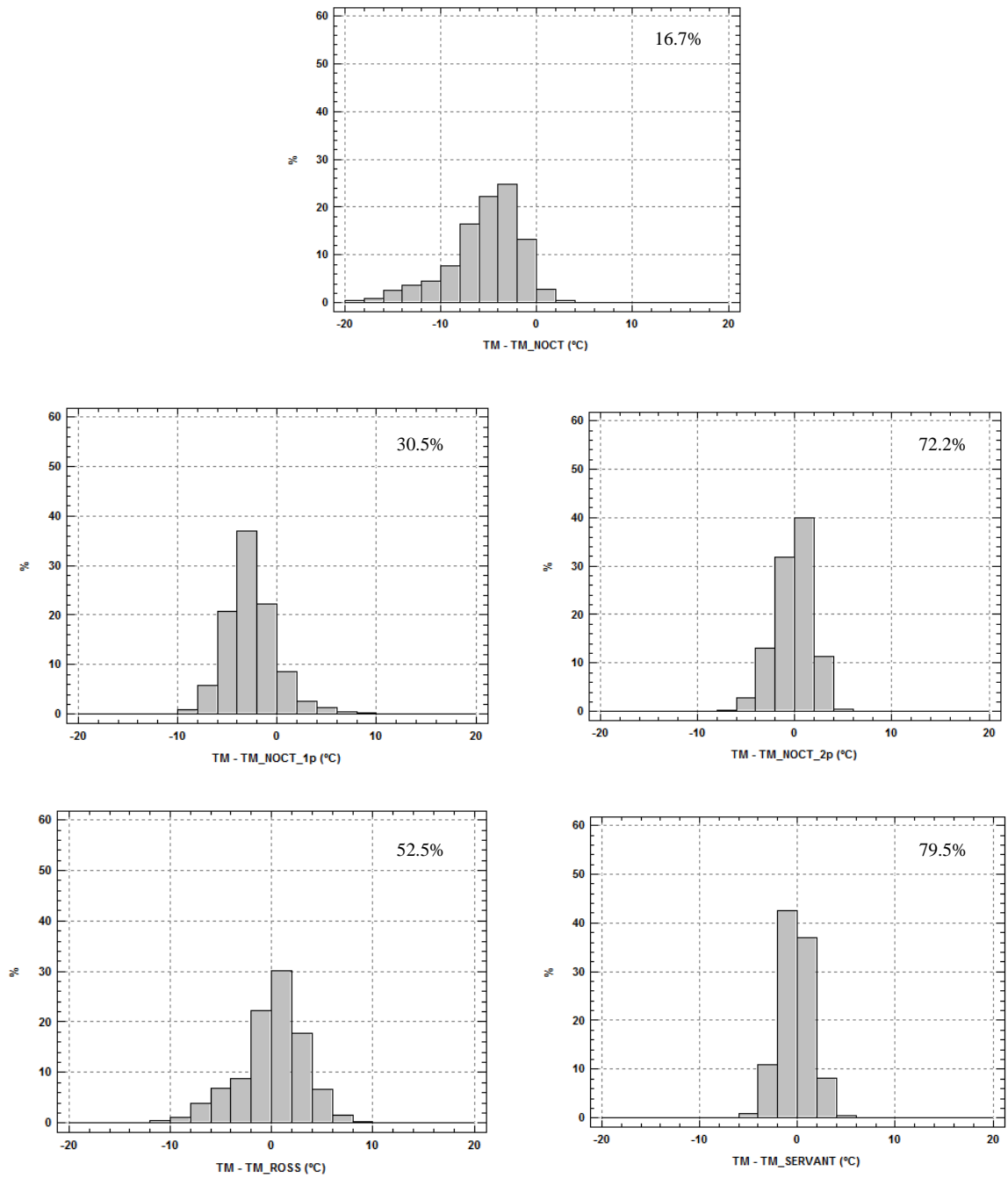


Figura 6.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

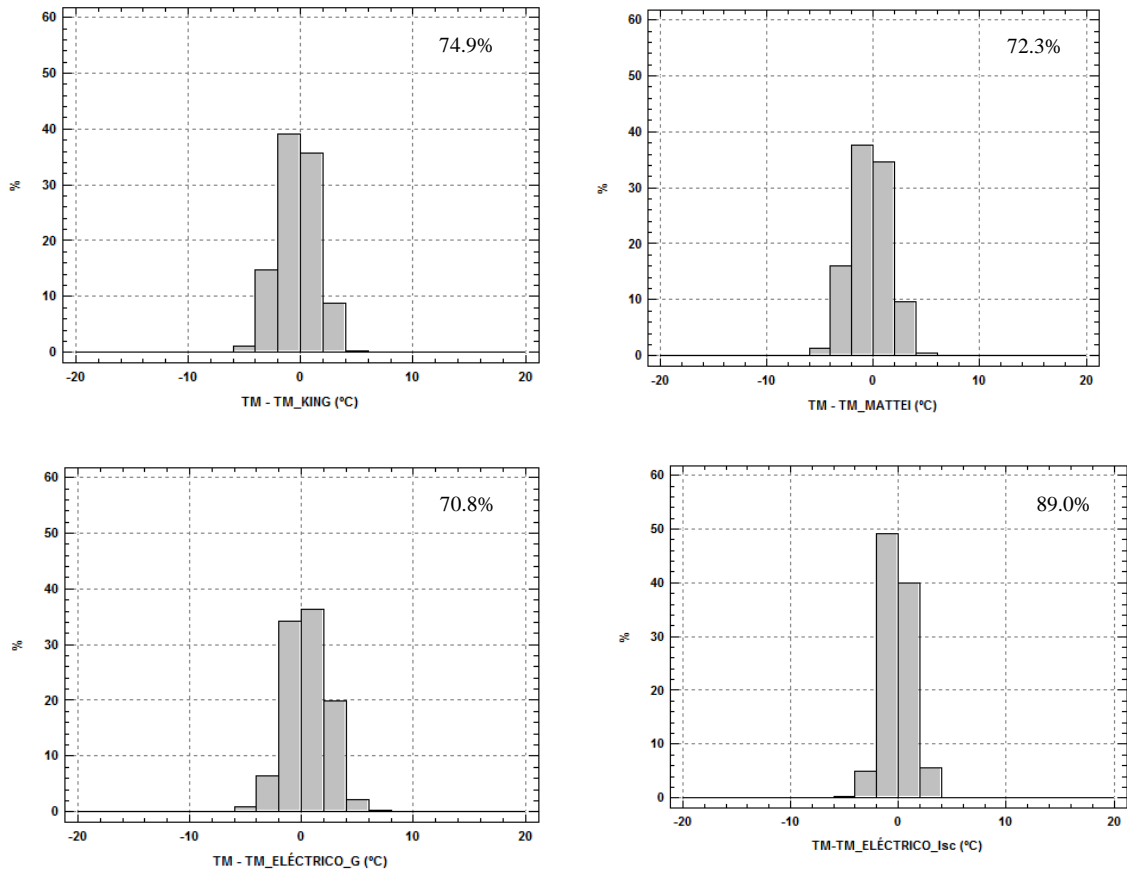


Figura 6.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha para todos los modelos se muestran en la Figura 7.a y la Figura 7.b.

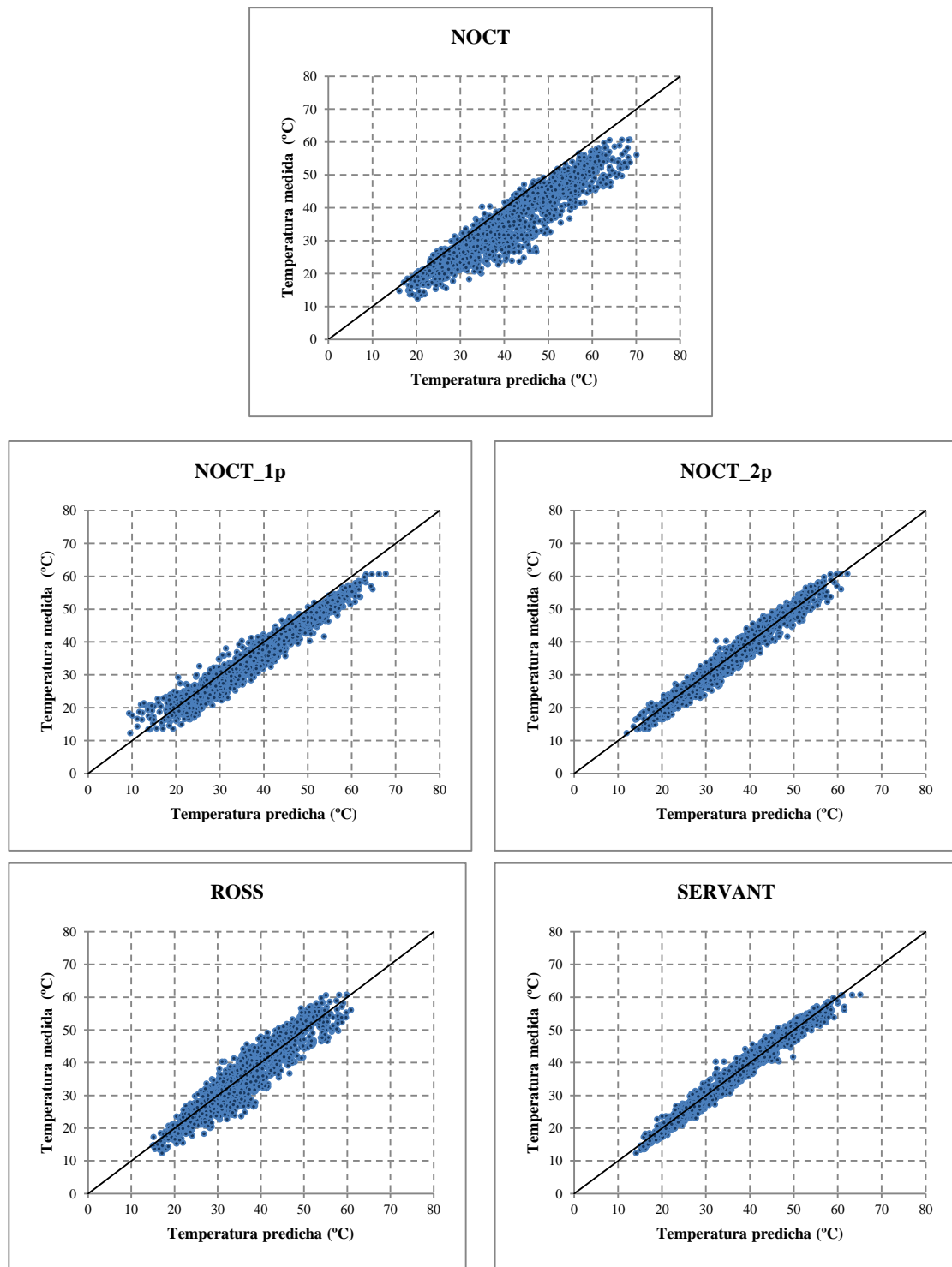


Figura 7.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2011.

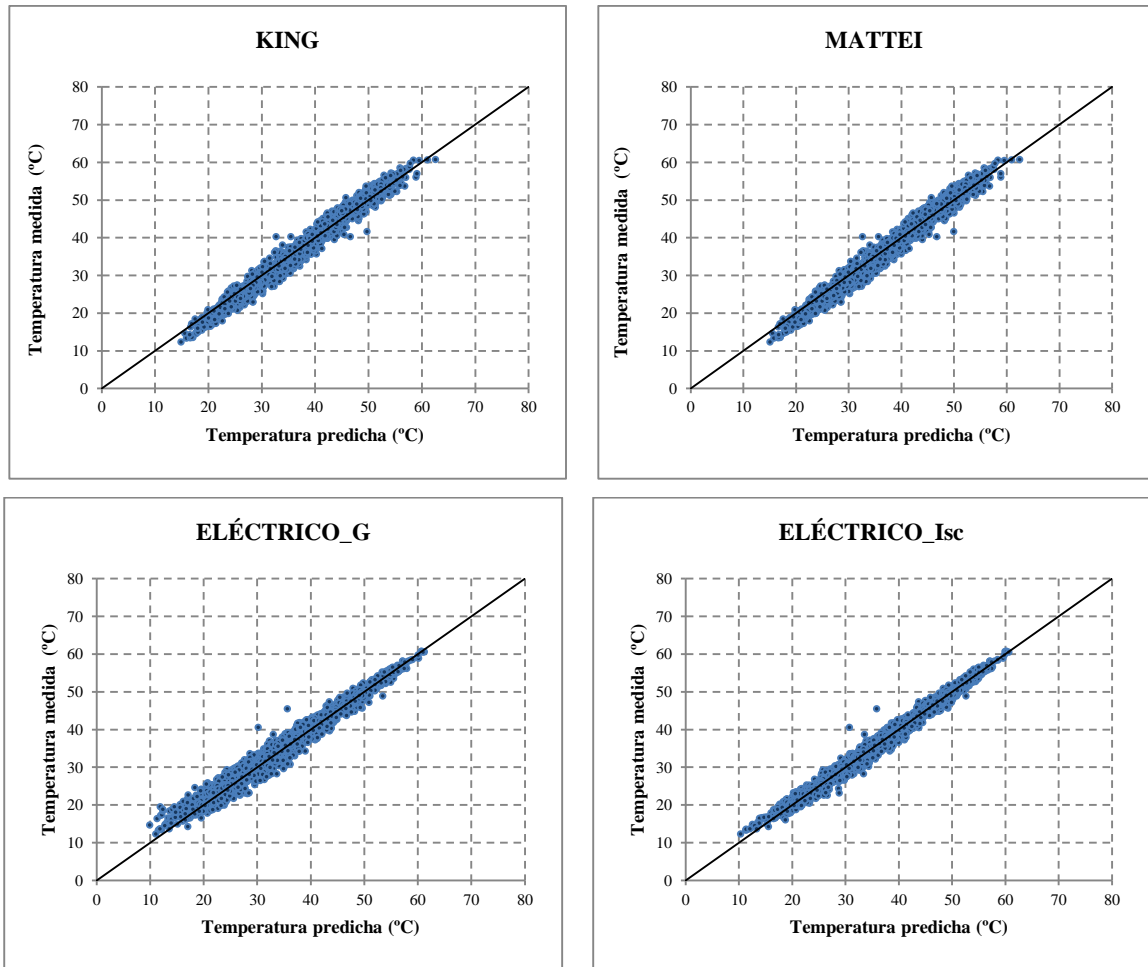


Figura 7.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2011.

Nuevamente puede observarse, que la relación entre la temperatura predicha y medida con los datos horarios ha mejorado considerablemente con respecto a la que se obtiene con los resultados instantáneos.

También se ha realizado el estudio con los datos del año 2012. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de silicio amorfo.

| Tecnología | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | R <sup>2</sup><br>(%) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| a-Si       | NOCT          | 6.74                    | 4.2         | 6.8         | 19.2        | 85.8                  |
|            | NOCT_1p       | 2.11                    | 2.7         | 3.0         | 8.3         | 94.1                  |
|            | NOCT_2p       | 0.07                    | 1.9         | 1.5         | 4.4         | 96.4                  |
|            | ROSS          | 0.83                    | 3.5         | 2.9         | 8.4         | 87.8                  |
|            | SERVANT       | 0.00                    | 1.8         | 1.4         | 3.9         | 96.9                  |
|            | KING          | 0.05                    | 1.7         | 1.4         | 4.0         | 97.3                  |
|            | MATTEI        | 0.12                    | 1.7         | 1.5         | 4.3         | 97.0                  |
|            | ELÉCTRICO_G   | 3.18                    | 1.5         | 3.2         | 9.2         | 97.9                  |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 3.10                    | 1.1         | 3.1         | 8.8         | 98.8                  |

Puede observarse que los modelos eléctricos presentan un error sistemático de unos 3 °C en la predicción de la temperatura. Ambos modelos predicen la temperatura por exceso. El valor elevado de la  $R^2$  nos indica que **el ajuste es muy bueno y que, si se restasen 3 °C a la predicción que realizan esos modelos, la desviación de temperatura sería prácticamente nula** y los valores MAE y MAPE también se reducirían considerablemente.

Este hecho ya ocurrió en la predicción de temperatura con modelos instantáneos y se justificó en dicho apartado. La causa más probable de este error sistemático podría estar en la degradación que presentan estos módulos, debido a los procesos de estabilización durante los dos primeros años de exposición a la radiación solar, y que implican descensos en los valores de algunos de sus parámetros eléctricos.

El comportamiento del resto de los modelos al predecir la temperatura con los datos del año 2012 es el mismo que tenían al predecir la temperatura con los datos del año 2011.

Las gráficas de temperatura medida frente a la temperatura predicha para el año 2012 se



muestran en la Figura 8.a y la Figura 8.b.

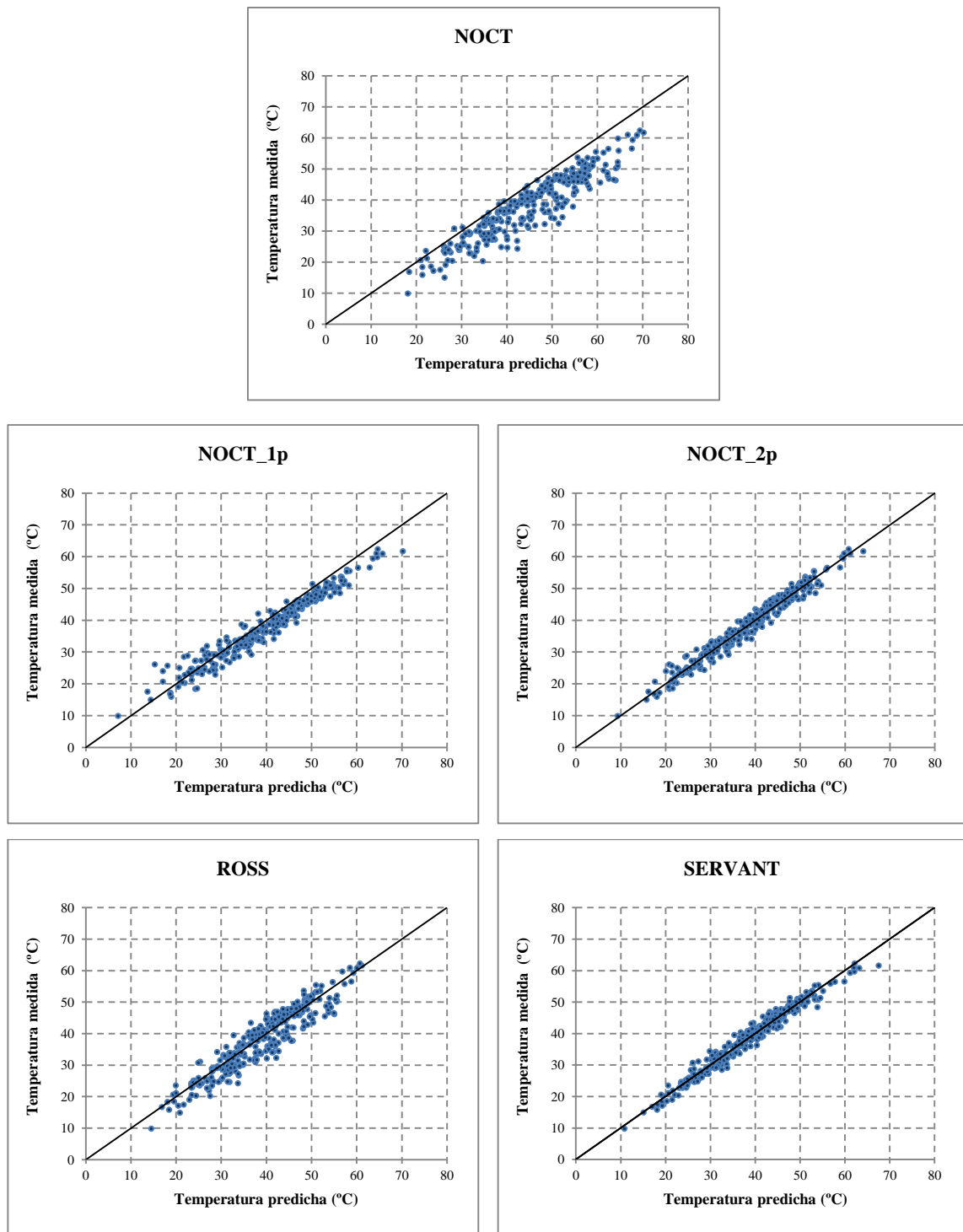


Figura 8.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2012.

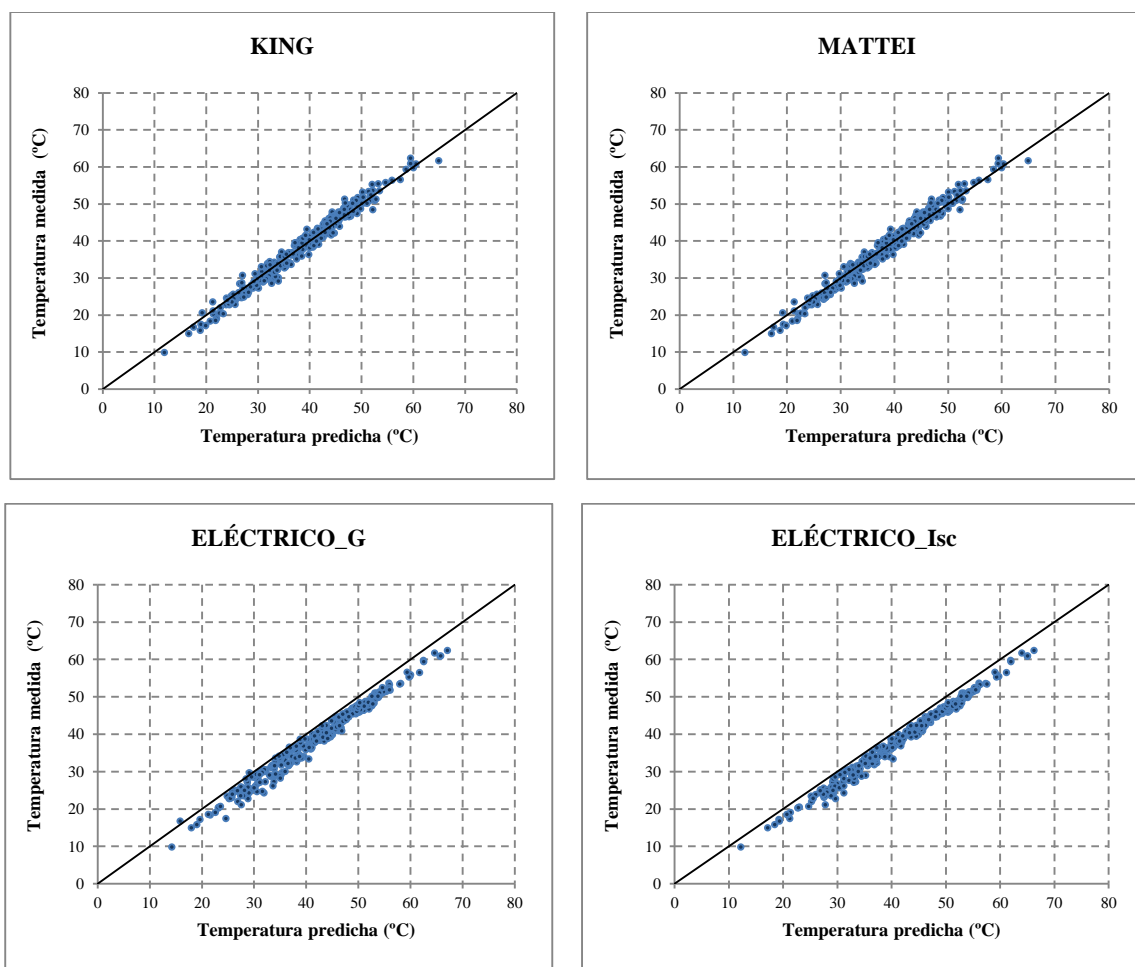


Figura 8.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2012.

Excepto para los modelos de Ross y NOCT, la relación lineal entre la temperatura medida y la temperatura predicha para todos los modelos es muy alta. En estos dos modelos podemos ver que hay una mayor dispersión de valores.

Puede comprobarse en las gráficas que la predicción de los modelos eléctricos es muy compacta, no es dispersa como en el caso del modelo NOCT o de Ross y puede apreciarse claramente el error sistemático de 3 °C comentado con anterioridad.

A continuación se analizan las desviaciones medias de la temperatura de los distintos modelos en las distintas franjas horarias, junto con la velocidad horaria de viento y la irradiación. La Figura 9 muestra el valor de las desviaciones medias de la temperatura

del módulo de tecnología silicio amorfo, representado junto a los valores de irradiación y de la velocidad del viento media en cada hora con los datos de los 31 días aleatorios de 2012.

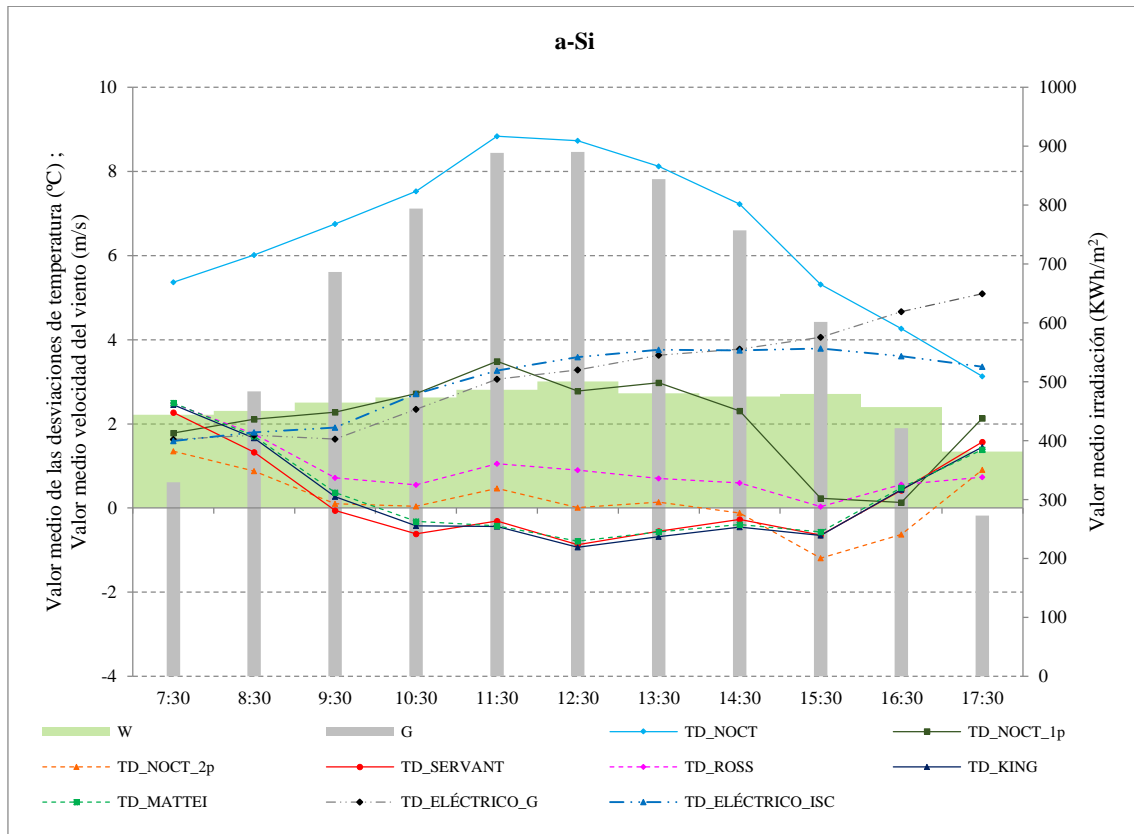


Figura.9. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología silicio amorfo. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

En esta tecnología vuelve a ser el modelo NOCT\_2p el modelo que mejor predicción realiza en las condiciones de alta irradiación, y prácticamente también en todas las franjas horarias del día comprendidas entre las 9:30 horas y las 14:30 horas, pues las desviaciones de temperatura de este modelo son prácticamente nulas en esas franjas horarias. Este modelo es el más exacto.

Los modelos de King, Mattei y Servant predicen la temperatura del módulo por defecto, mientras que los modelos de Ross, NOCT y NOCT\_1p predicen por exceso.

La inexactitud en la predicción del modelo NOCT en este tipo de tecnología es notablemente alta, llegando a ser superior a 8 grados respecto a la temperatura real del módulo en las horas de máxima irradiación.

Con respecto a los modelos eléctricos puede verse claramente el error de 3 °C por exceso en la predicción que realizan ambos modelos.

## Módulos de tecnología de silicio amorfo/microcristalino

Los resultados de la predicción de temperatura para esta tecnología de módulo se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino.

| Tecnología | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | R <sup>2</sup><br>(%) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| a-Si/μc-Si | NOCT          | 3.13                    | 4.0         | 3.6         | 10.8        | 87.7                  |
|            | NOCT_1p       | 0.73                    | 2.5         | 2.0         | 6.1         | 95.1                  |
|            | NOCT_2p       | 0.00                    | 2.4         | 1.9         | 5.7         | 95.4                  |
|            | ROSS          | 0.07                    | 3.8         | 2.9         | 8.2         | 88.3                  |
|            | SERVANT       | 0.20                    | 2.1         | 1.7         | 4.7         | 96.4                  |
|            | KING          | 0.25                    | 2.2         | 1.8         | 5.1         | 96.0                  |
|            | MATTEI        | 0.27                    | 2.3         | 1.9         | 5.5         | 95.6                  |
|            | ELÉCTRICO_G   | 0.04                    | 1.6         | 1.2         | 3.6         | 98.0                  |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 0.04                    | 1.4         | 1.1         | 3.1         | 98.5                  |

**Los modelos eléctricos son los más precisos de todos**, pues presenta los valores más bajos de la desviación estándar, 1.4 °C y 1.6 °C respectivamente para Eléctrico\_Isc y Eléctrico\_G, además de tener los menores valores MAE (1.1 °C y 1.2 °C) y MAPE (3.1% y 3.6%) de todos, así como el mayor valor de R<sup>2</sup> (98.0% y 98.5%). La predicción realizada por estos modelos es muy exacta, pues el valor medio de la desviación de temperatura es prácticamente nulo (0.04 °C en ambos). En el caso del modelo Eléctrico\_Isc, los resultados de la predicción de temperatura con valores horarios en esta tecnología de módulo son prácticamente los mismos que con valores instantáneos.

De los modelos meteorológicos, el mejor modelo es el de Servant. Es muy exacto

(0.2 °C de desviación de temperatura) y presenta el valor más bajo de desviación estándar (2.1 °C), la mayor  $R^2$  (96.4%), y los valores MAE y MAPE más bajos (1.7 °C y 4.7% respectivamente). La precisión de este modelo mejora notablemente cuando se realizan los cálculos con los modelos horarios con respecto a la que tenía el modelo con los valores instantáneos, ya que los valores de la desviación estándar disminuyen desde 3.6 °C hasta 2.1°C, lo que supone un aumento de la precisión de este modelo superior a un 41.5%. Este es el modelo que tiene el mayor aumento de precisión en esta tecnología. El valor de la  $R^2$  también mejora notablemente, pasa de un valor de 89.9% con valores instantáneos a un valor de 96.4% con valores medios horarios. Este modelo es el que más disminuye el valor de MAPE, pues pasa de 7.6% a 4.7%; los valores MAE han disminuido 1 °C.

Los modelos de King, Mattei, NOCT\_2p y NOCT\_1p presentan un valor de  $R^2$  superior al 95% con valores horarios, y en todos ellos es algo inferior al 90% en los modelos instantáneos. Los valores de la desviación estándar de estos modelos están comprendidos entre 2.2 °C y 2.5 °C. Comparando los resultados con los modelos instantáneos, el aumento de precisión de estos modelos está en torno a un 40% para todos ellos, excepto para el modelo NOCT de dos coeficientes que es algo inferior. En cuanto a los valores MAE, estos bajan prácticamente un grado en todos ellos y los MAPE bajan de 2.3 a 2.8 puntos en el porcentaje.

Cabe destacar que para esta tecnología de módulo, **los resultados que se obtienen para los modelos NOCT\_1p y NOCT\_2p son muy similares entre sí**. El valor de  $R^2$  es superior al 95% en ambos, y los valores MAE (1.9 °C y 2.0 °C respectivamente) y MAPE (5.7% y 6.1% respectivamente) son muy próximos en ambos modelos, hecho que también ocurre cuando se usan valores instantáneos. Las diferencias existentes entre las métricas de estos dos modelos son las menores de todas las tecnologías estudiadas.

Los modelos de Ross y NOCT, vuelven a ser los modelos con los peores resultados, con los valores más bajos de  $R^2$  de todos los modelos, con valores incluso inferiores al 90% (88.3% para Ross y 87.7% para NOCT) y las mayores desviaciones estándar (3.8 °C y 4.0 °C respectivamente). También presentan los valores más altos de los valores MAE (2.9 °C y 3.6 °C respectivamente) y MAPE (8.2% y 10.8% respectivamente).

El test de Kolmogorov-Smirnov nos indica que los modelos NOCT\_2p, Servant y los dos modelos eléctricos tienen la misma distribución que la serie de temperatura

medida.

Los resultados de la aplicación del test de K-S se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio amorfo/microcristalino con valores horarios del año 2011.**

| Tecnología       | Modelo        | Estadístico DN estimado | p-valor  | Misma distribución |
|------------------|---------------|-------------------------|----------|--------------------|
| a-Si/ $\mu$ c-Si | NOCT          | 0.119                   | 0        | NO                 |
|                  | NOCT_1p       | 0.051                   | 5.83E-03 | NO                 |
|                  | NOCT_2p       | 0.035                   | 1.39E-01 | SÍ                 |
|                  | ROSS          | 0.054                   | 3.10E-03 | NO                 |
|                  | SERVANT       | 0.034                   | 1.60E-01 | SÍ                 |
|                  | KING          | 0.046                   | 1.70E-02 | NO                 |
|                  | MATTEI        | 0.048                   | 1.17E-02 | NO                 |
|                  | ELÉCTRICO_G   | 0.022                   | 6.54E-01 | SÍ                 |
|                  | ELÉCTRICO_Isc | 0.016                   | 9.46E-01 | SÍ                 |

Las gráficas de la distribución porcentual de la diferencia de temperatura existente entre la temperatura del módulo y la temperatura predicha por cada uno de los modelos se muestran en la Figura 10.a y la Figura 10.b.

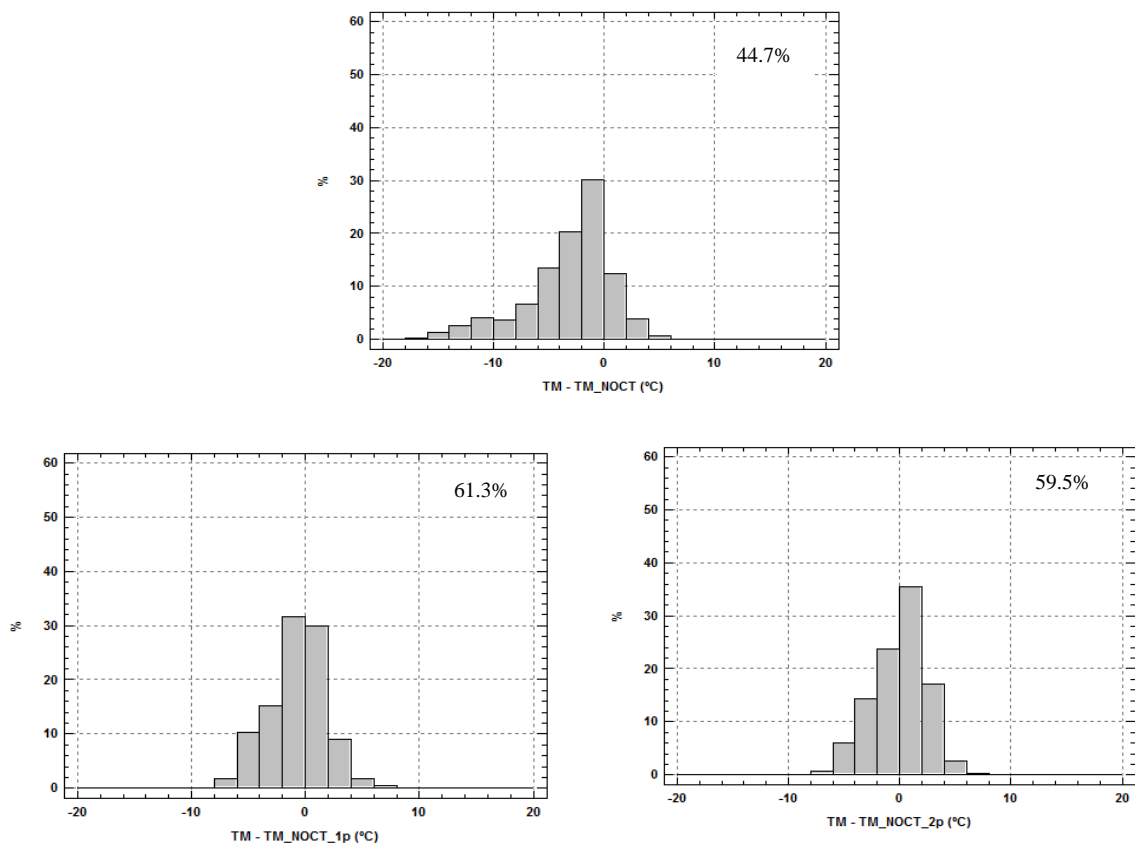


Figura 10.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores con diferencia menor de  $\pm 2$  °C.

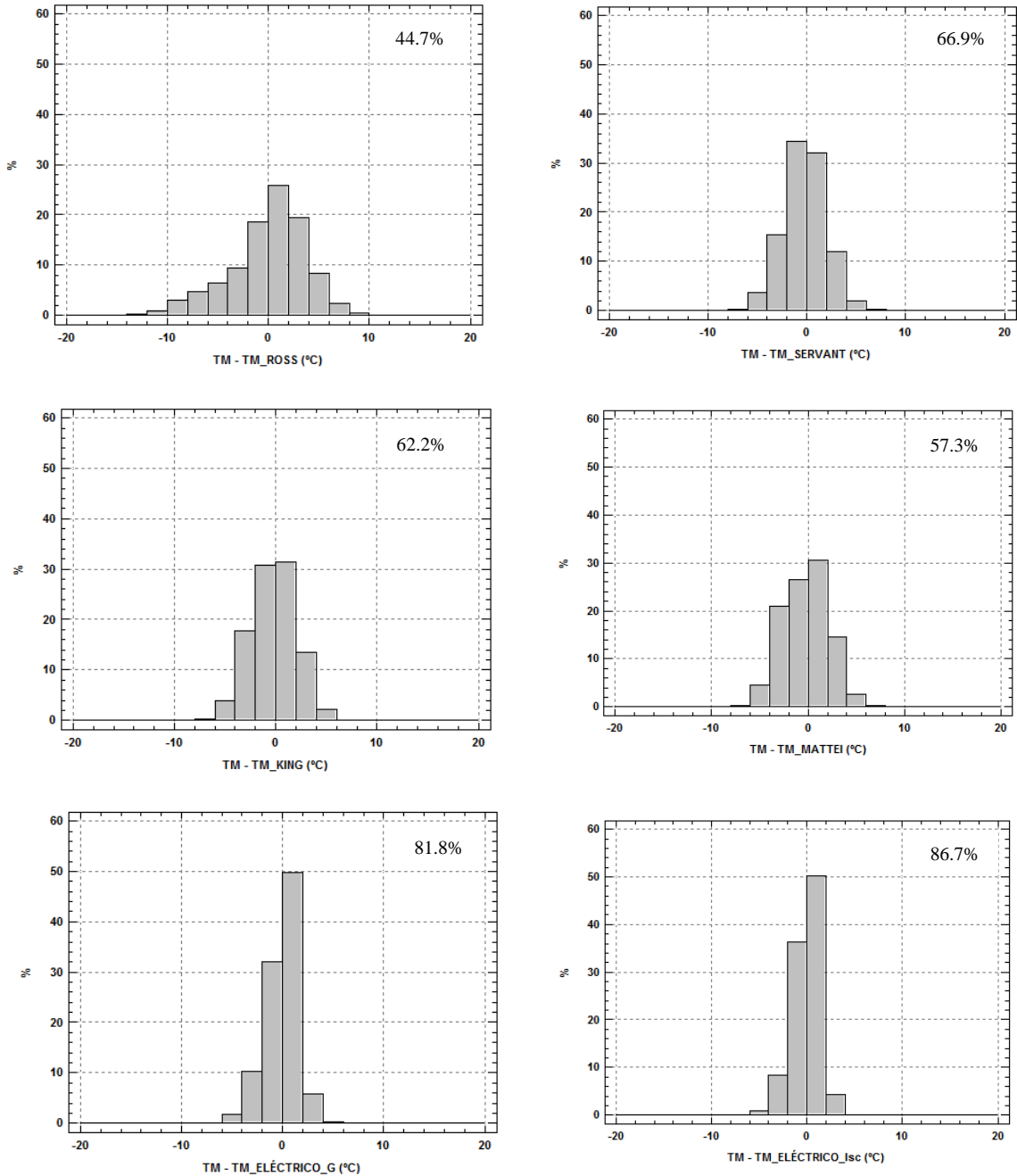


Figura 10.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

Este porcentaje de valores ha aumentado en diferentes proporciones. Para los modelos sencillos NOCT y Ross y el modelo Eléctrico\_G han aumentado tan sólo unos 7 puntos aproximadamente. Para los modelos NOCT\_1p, NOCT\_2p, Servant, King y Mattei los porcentajes han aumentado entre 15 (Mattei) y 22 puntos (NOCT\_1p), estando todos los porcentajes en torno a un 60%. En el caso del modelo Eléctrico\_Isc la distribución porcentual de la diferencia de temperatura es prácticamente la misma que en el modelo instantáneo.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha para todos los modelos se muestran en la Figura 11.a y la Figura 11.b.

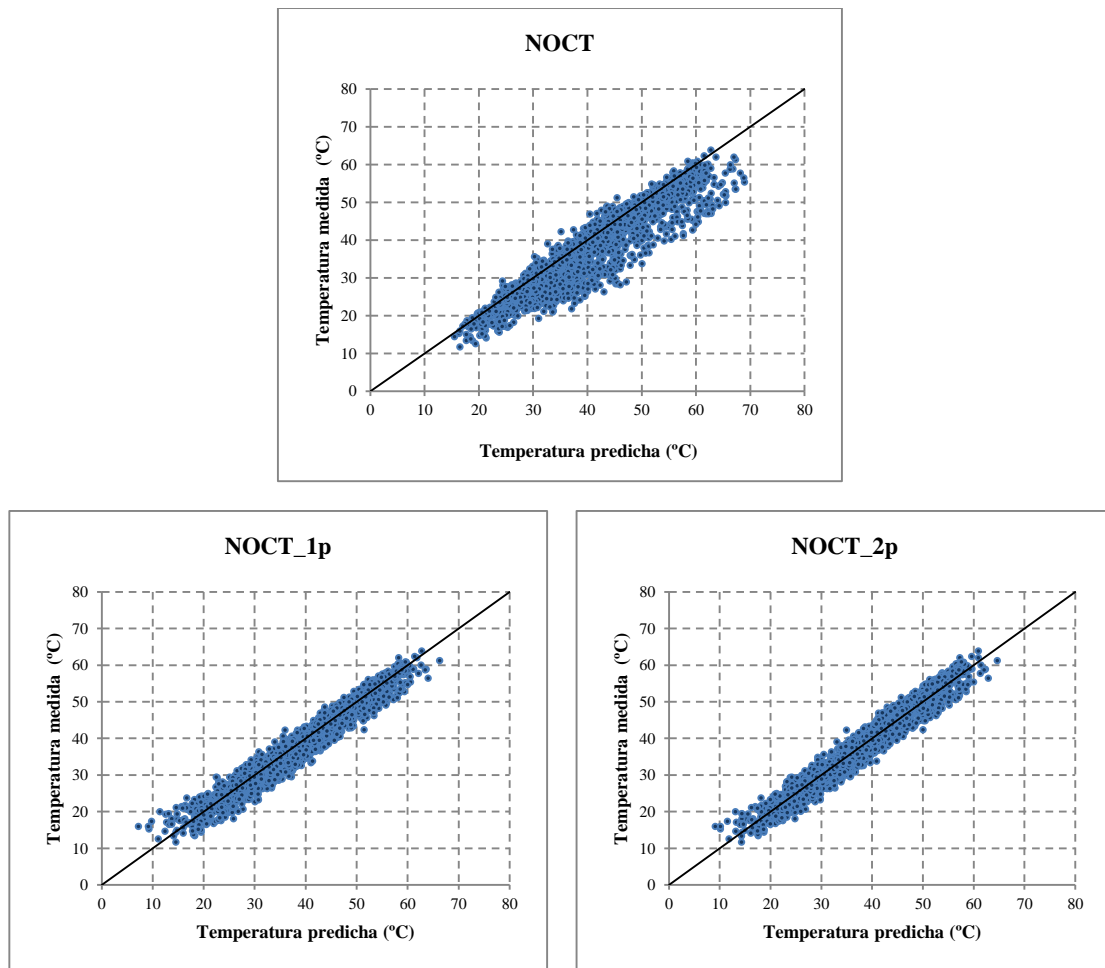


Figura 10.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2011.



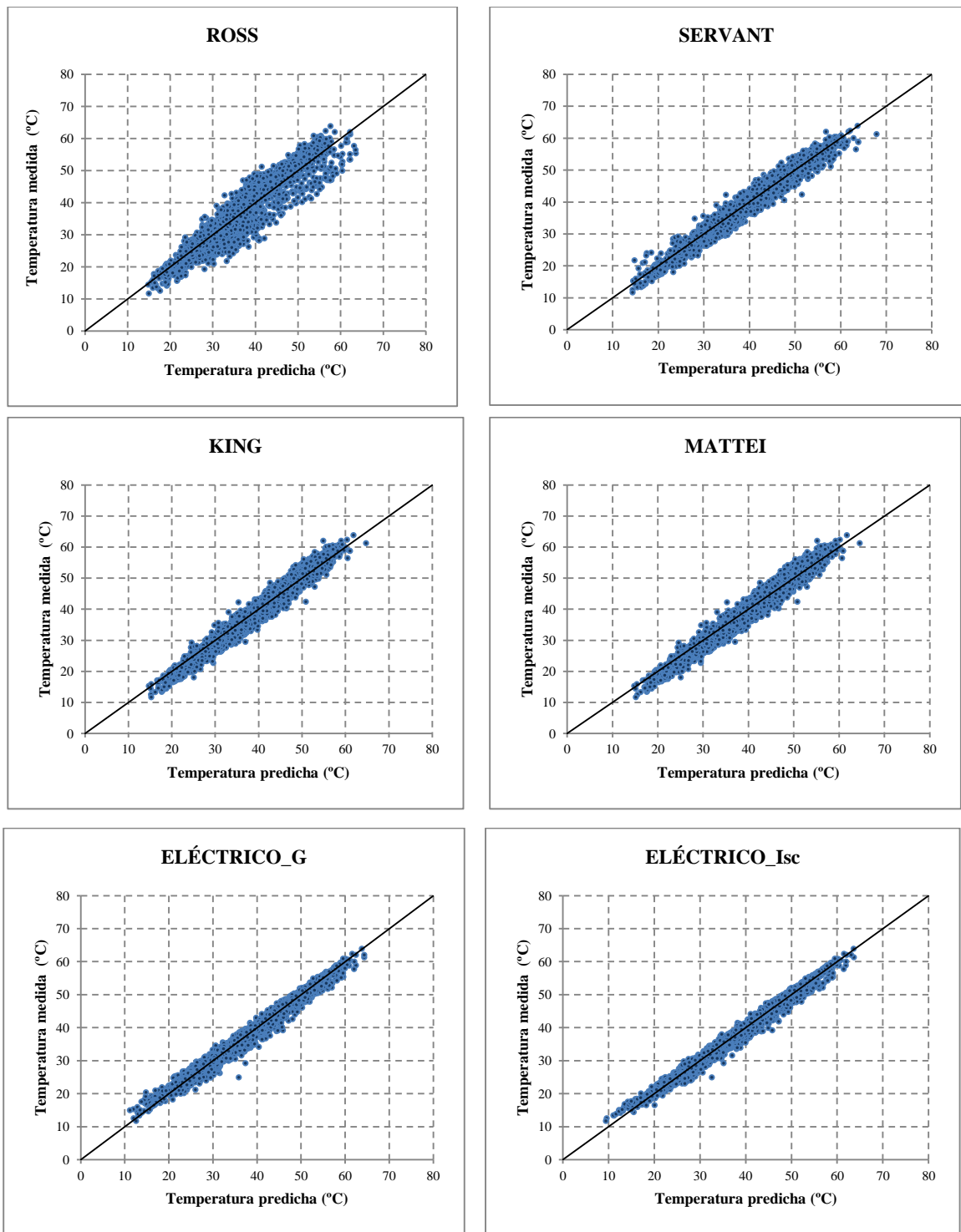


Figura 11.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2011.

Podemos ver en dichas gráficas que la relación lineal entre la temperatura predicha y la medida ha mejorado considerablemente en comparación con la que se obtenía con los modelos instantáneos. Ha pasado de estar próxima al 90% a ser superior al 95% en prácticamente todos los modelos meteorológicos, y en el caso del modelo de Servant, superior al 96%. También puede observarse, una vez más, que **los datos están muy agrupados en torno a la recta de pendiente unidad**, siendo los modelos NOCT y Ross los que peor agrupación presentan.

Los resultados obtenidos con los datos del año 2012 se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino.

| Tecnología       | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | R <sup>2</sup><br>(%) |
|------------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| a-Si/ $\mu$ c-Si | NOCT          | 4.56                    | 4.6         | 4.9         | 13.7        | 82.8                  |
|                  | NOCT_1p       | 0.78                    | 2.5         | 2.1         | 5.7         | 94.6                  |
|                  | NOCT_2p       | 0.17                    | 2.5         | 2.1         | 5.5         | 94.6                  |
|                  | ROSS          | 1.20                    | 4.4         | 3.7         | 10.0        | 83.7                  |
|                  | SERVANT       | 0.16                    | 2.2         | 1.7         | 4.5         | 95.9                  |
|                  | KING          | 0.20                    | 2.1         | 1.8         | 4.7         | 96.0                  |
|                  | MATTEI        | 0.31                    | 2.3         | 2.0         | 5.3         | 95.4                  |
|                  | ELÉCTRICO_G   | 1.62                    | 1.5         | 1.8         | 4.9         | 98.0                  |
|                  | ELÉCTRICO_Isc | 1.55                    | 1.4         | 1.6         | 4.5         | 98.2                  |

El estudio realizado con los datos del año 2012 muestra resultados coherentes con los que se obtuvieron con los datos del año 2011, ya que son muy similares.

De los modelos meteorológicos, los resultados de los modelos King, Servant y Mattei están muy próximos entre sí. Y los modelos NOCT\_1p y NOCT\_2p, vuelven a tener resultados muy similares entre sí, como ocurrió con los datos de 2011.

Los modelos eléctricos presentan un error sistemático de 1.5 °C en la predicción de temperatura con los datos del segundo año y esto, que también ocurrió con los datos instantáneos, se justificó indicando que la causa más probable de este error sistemático podría estar en la degradación del módulo, que ocurre durante los dos primeros años de exposición a la luz solar y que se debe a que aún no se ha estabilizado. Esta degradación

se manifiesta con descensos en los valores de algunos de sus parámetros eléctricos.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha para todos los modelos se muestran en la Figura 12.a y la Figura 12.b.

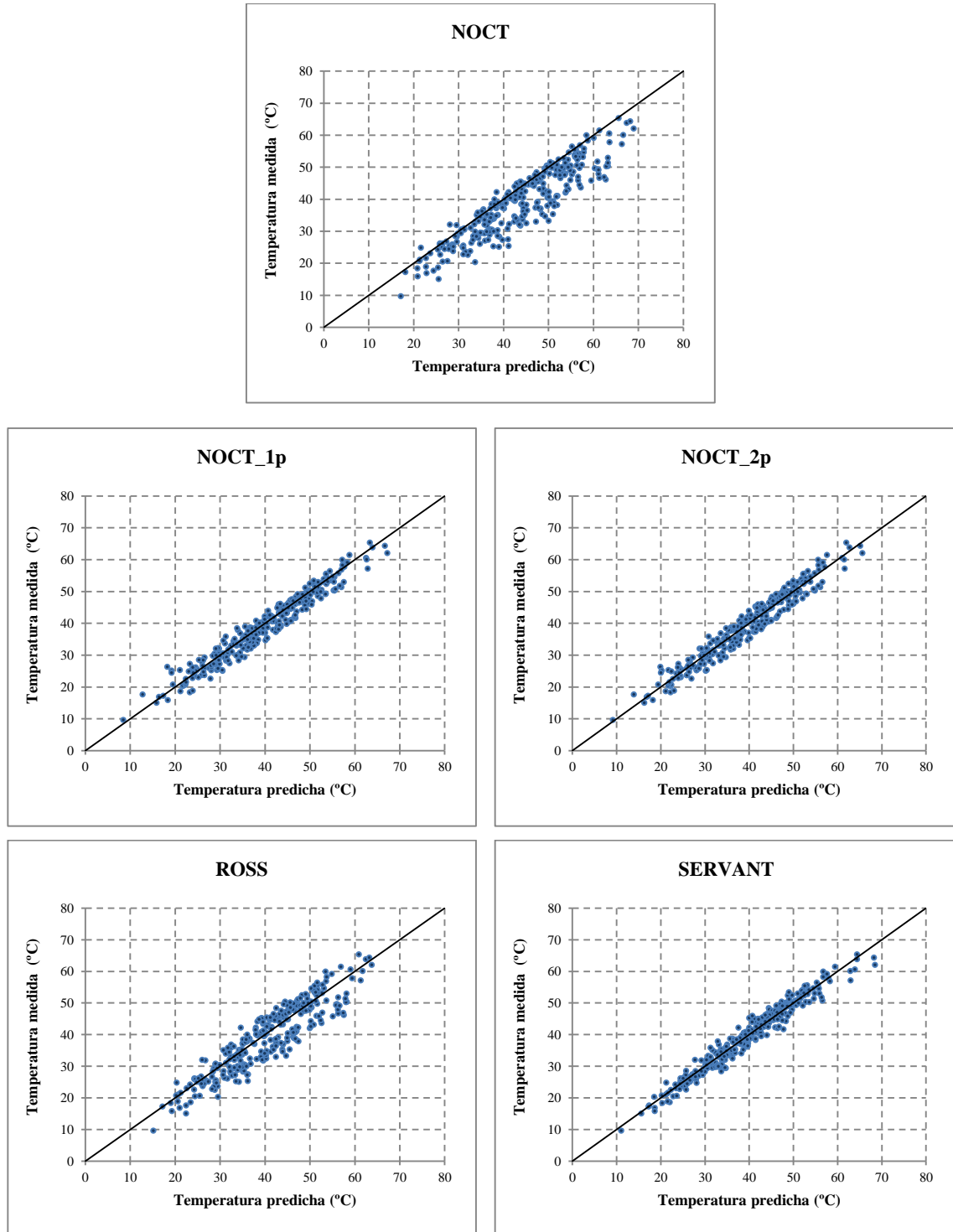


Figura 11.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2012.

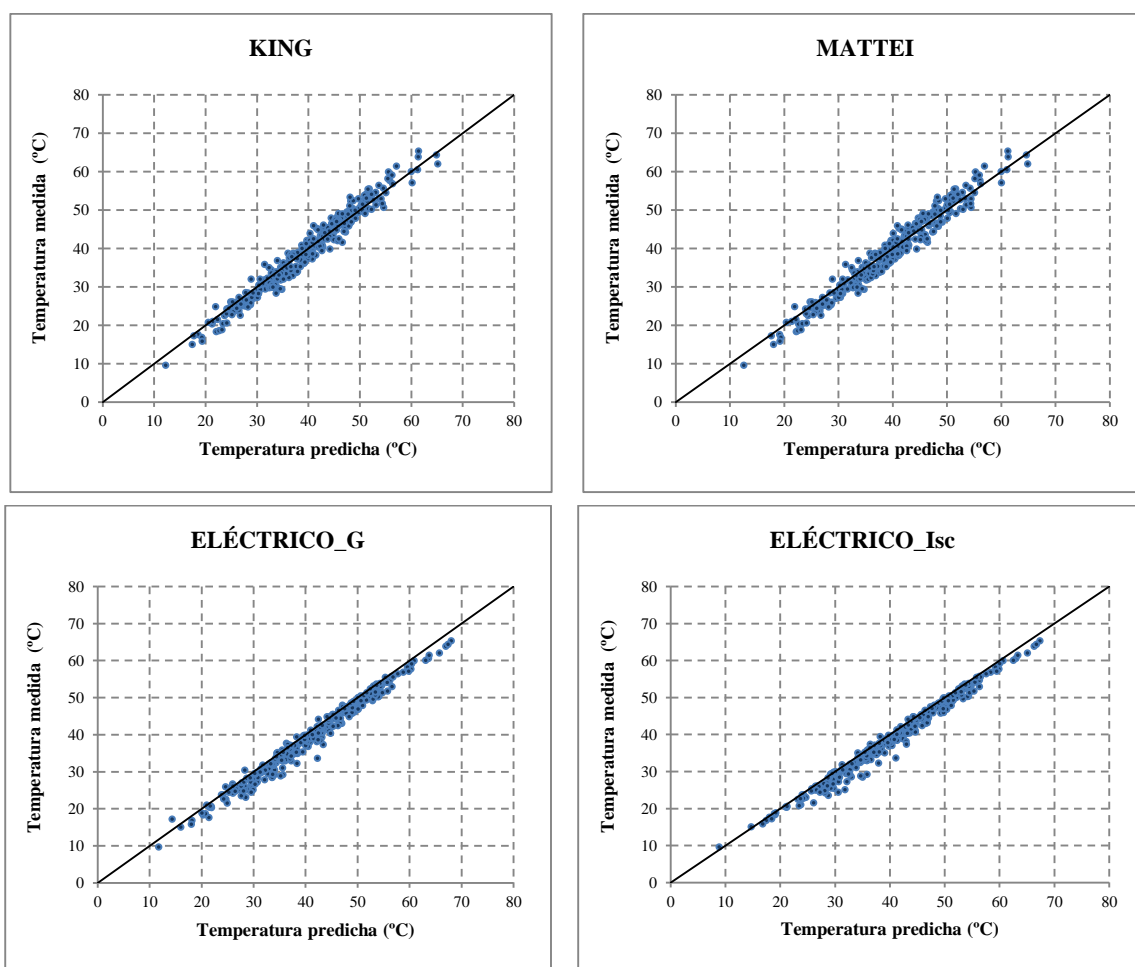


Figura 12.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2012.

Puede verse en dichas gráficas que, exceptuando los modelos de Ross y NOCT que presentan una mayor dispersión en los resultados obtenidos (como ocurría con los datos horarios del año 2011), el resto de modelos presentan valores de  $R^2$  muy elevados y que son similares a los obtenidos con los datos horarios del año 2011 y superiores a los que se obtenían con valores instantáneos (para los modelos instantáneos del año 2011 los valores de  $R^2$  son inferiores al 90% en los mejores modelos meteorológicos).

Para analizar las desviaciones de temperatura de los distintos modelos en las distintas franjas horarias de esta tecnología de módulo, se presenta en la Figura 13, el valor de las desviaciones medias de temperatura representado junto a los valores de la

irradiación y el valor medio de la velocidad del viento en cada hora con los datos de los 31 días aleatorios de 2012.

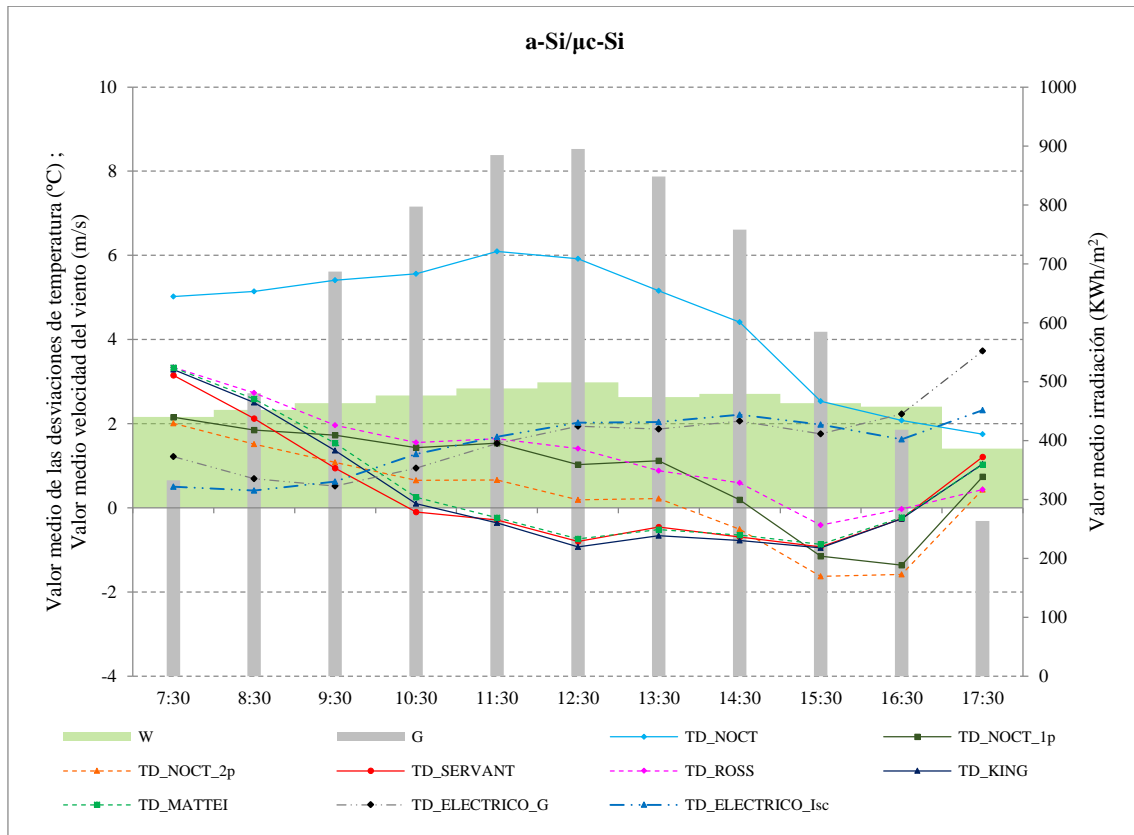


Figura 12. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología silicio amorfo/microcristalino. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

La desviación media de temperatura que tiene el modelo NOCT en este tipo de tecnología no es tan alto como en la anterior, aunque sigue siendo muy superior a la que presentan el resto de modelos.

En las primeras horas del día y con valores de irradiancia inferiores a 800 KWh/m<sup>2</sup>, todos los modelos predicen por exceso, siendo el modelo Eléctrico\_Isc el que realiza la predicción más exacta.

En las horas centrales del día, el modelo NOCT\_2p realiza la mejor predicción de todos los modelos, con una exactitud notable. En esta franja del día, este modelo presenta valores medios de la desviación de la temperatura más próximos a cero.

En las horas de mayor irradiación, los modelos de King, Servant y Mattei realizan la predicción de temperatura por defecto, mientras que el resto de modelos lo hacen por exceso.

### Módulo de tecnología de silicio multicristalino

Los resultados de la predicción para este módulo se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de silicio multicristalino.

| Tecnología | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | R <sup>2</sup><br>(%) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| mc-Si      | NOCT          | 5.72                    | 4.1         | 6.0         | 15.9        | 88.9                  |
|            | NOCT_1p       | 2.58                    | 3.5         | 3.7         | 10.0        | 91.0                  |
|            | NOCT_2p       | -0.17                   | 2.3         | 1.7         | 4.6         | 94.9                  |
|            | ROSS          | -0.07                   | 3.2         | 2.3         | 6.3         | 89.8                  |
|            | SERVANT       | -0.36                   | 3.0         | 2.3         | 5.9         | 91.0                  |
|            | KING          | 0.04                    | 2.1         | 1.6         | 4.4         | 95.6                  |
|            | MATTEI        | 0.05                    | 2.0         | 1.5         | 4.2         | 96.0                  |
|            | ELÉCTRICO_G   | -0.13                   | 2.1         | 1.1         | 3.0         | 98.9                  |
|            | ELÉCTRICO_Isc | -0.09                   | 2.0         | 1.0         | 2.7         | 98.9                  |

Los modelos eléctricos vuelven a presentar el mayor  $R^2$  de todos los modelos. Para este tipo de tecnología se obtiene un valor de 98.9% en ambos modelos, y es el valor más alto conseguido por ellos en todas las tecnologías estudiadas.

En esta tecnología, el modelo de Servant no obtiene tan buenos resultados como en otras tecnologías. Los modelos de Servant y NOCT\_1p solo llegan a alcanzar un valor de  $R^2$  del 91% (y con los valores instantáneos, era de 88.2% y 83.4% respectivamente), mientras que los mejores modelos meteorológicos para este tipo de tecnología, que son el de Mattei y el de King, alcanzan valores del 96.0% y del 95.7% respectivamente (en ambos era del 89.4% con valores instantáneos).

En el modelo propuesto NOCT\_2p, la  $R^2$  está muy próxima a los mejores modelos meteorológicos con un valor del 94.8% (y era del 88.7%). El valor MAE del nuevo

modelo NOCT\_2p, 1.7 °C, está muy próximo al que presentan los mejores modelos meteorológicos, Mattei y King (1.5 °C y 1.6 °C respectivamente).

Respecto al incremento en la precisión, los modelos con el mayor incremento son el modelo de King y Mattei, superior al 40%, pasando de una desviación estándar de 3.4 °C en los respectivos modelos instantáneos a 2.1 °C en los modelos horarios. Los modelos propuestos de uno y dos coeficientes consiguen un aumento de precisión similar, superior a un 28%, y los modelos NOCT, de Ross y Servant consiguen un aumento de precisión inferior al 20% (19.6%, 18% y 16.6% respectivamente). En el caso de los modelos eléctricos no hay incremento de precisión. Estos modelos ya tenían una precisión muy alta con valores instantáneos.

Los valores MAE de todos los modelos, con respecto a los valores obtenidos con valores instantáneos, no han disminuido tanto como en otras tecnologías, solo algunas décimas, y los MAPE han disminuido en la misma proporción.

El test de Kolmogorov-Smirnov indica que la serie de las temperaturas predichas por los modelos NOCT\_2p, King, Mattei y ambos modelos eléctricos tienen la misma distribución que la serie de las temperaturas medidas. Los resultados de la aplicación del test se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio multicristalino con valores horarios del año 2011.

| Tecnología | Modelo        | Estadístico DN estimado | p-valor  | Misma distribución |
|------------|---------------|-------------------------|----------|--------------------|
| mc-Si      | NOCT          | 0.213                   | 0        | NO                 |
|            | NOCT_1p       | 0.143                   | 0        | NO                 |
|            | NOCT_2p       | 0.031                   | 2.29E-01 | SÍ                 |
|            | ROSS          | 0.044                   | 2.63E-02 | NO                 |
|            | SERVANT       | 0.047                   | 1.27E-02 | NO                 |
|            | KING          | 0.021                   | 6.88E-01 | SÍ                 |
|            | MATTEI        | 0.021                   | 7.13E-01 | SÍ                 |
|            | ELÉCTRICO_G   | 0.020                   | 7.38E-01 | SÍ                 |
|            | ELÉCTRICO_Isc | 0.020                   | 7.62E-01 | SÍ                 |

Las gráficas de distribución de frecuencias de la diferencia de temperatura existente entre

la temperatura del módulo y la temperatura predicha por cada uno de los modelos se muestran en la Figura 14.a y la Figura 14.b.

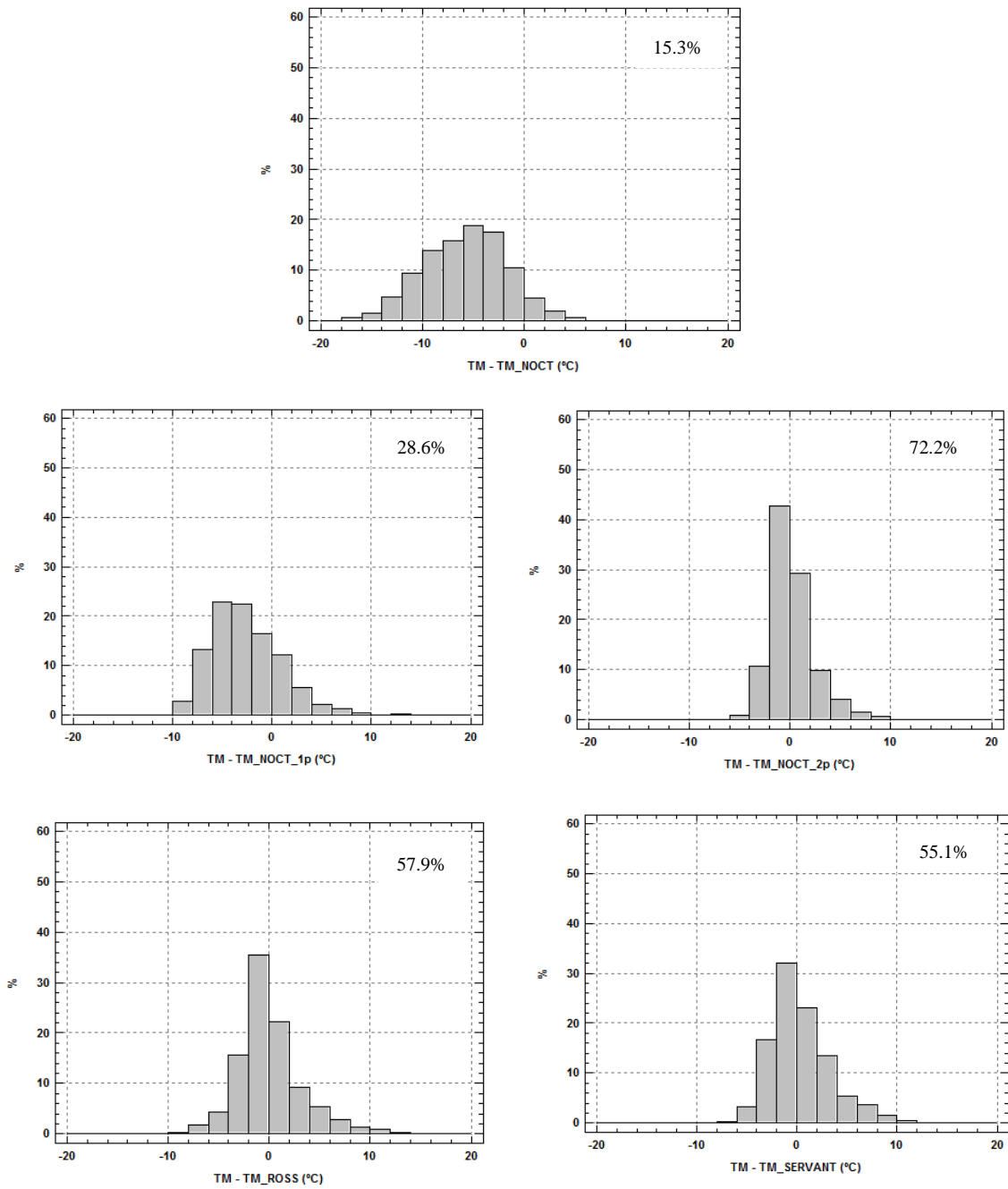


Figura 13.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.



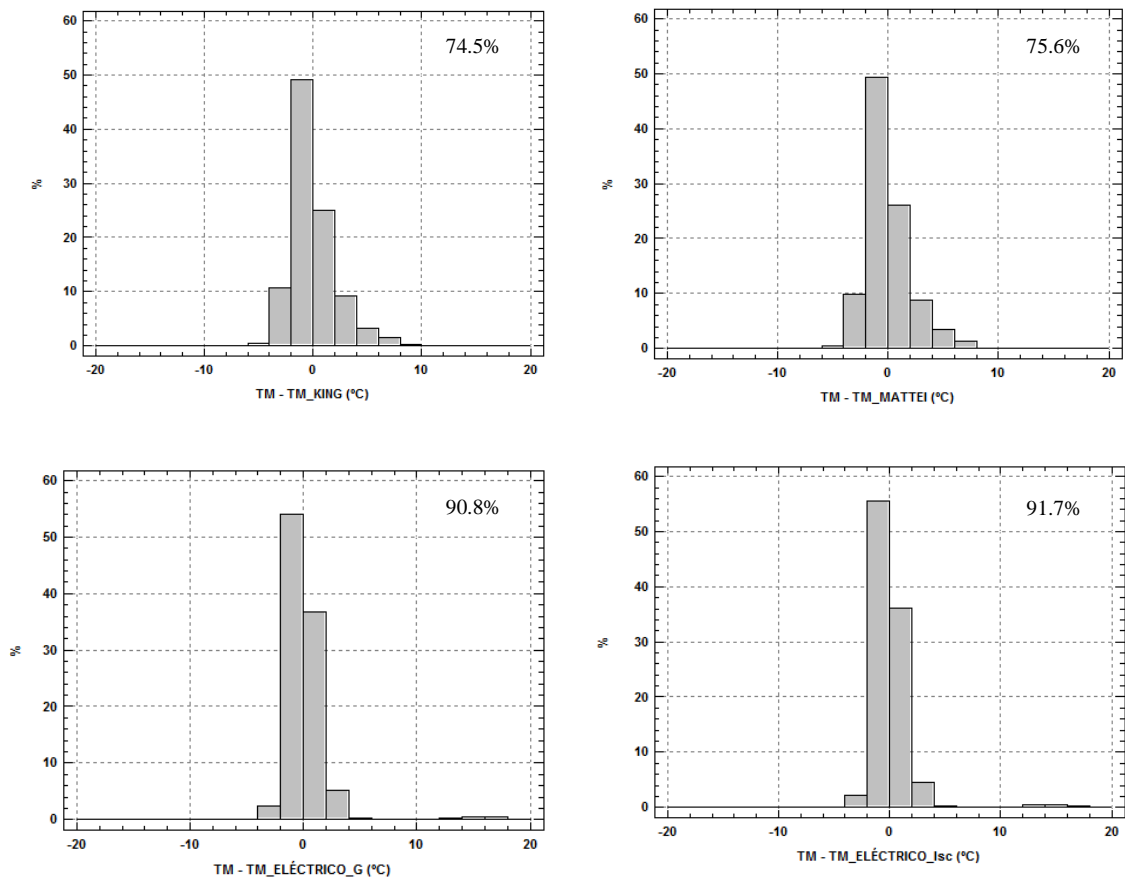


Figura 14.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que  $2^\circ\text{C}$ .

En las gráficas de la Figura 14.a y la Figura 14.b puede observarse que el porcentaje de valores con diferencia entre la temperatura medida y predicha próximos a cero en los modelos eléctricos es altísimo, prácticamente del 91% en ambos modelos, y además presentan prácticamente la misma distribución porcentual.

Los modelos de King y Mattei son los siguientes que presentan los mayores porcentajes de valores con la diferencia entre la temperatura medida y predicha próximos a cero, siendo del 75% aproximadamente en ambos modelos. Además, los dos modelos presentan también casi la misma distribución de frecuencias.

El modelo Propuesto NOCT\_2p es el siguiente modelo con mayor porcentaje de valores próximo a cero, siendo del 72.2%.

Del resto de modelos, el siguiente con el mayor porcentaje de valores con diferencia de temperatura próximo a cero es el modelo de Ross (57.9%). El modelo de Servant en esta tecnología presenta un porcentaje algo superior al 55%. Como ya se ha comentado, este modelo **no obtiene buenos resultados en esta tecnología, mientras que para el resto de tecnologías es casi siempre uno de los mejores.**

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha para todos los modelos con los datos horarios del año 2011 se muestran en la Figura 15.a y la Figura 15.b.

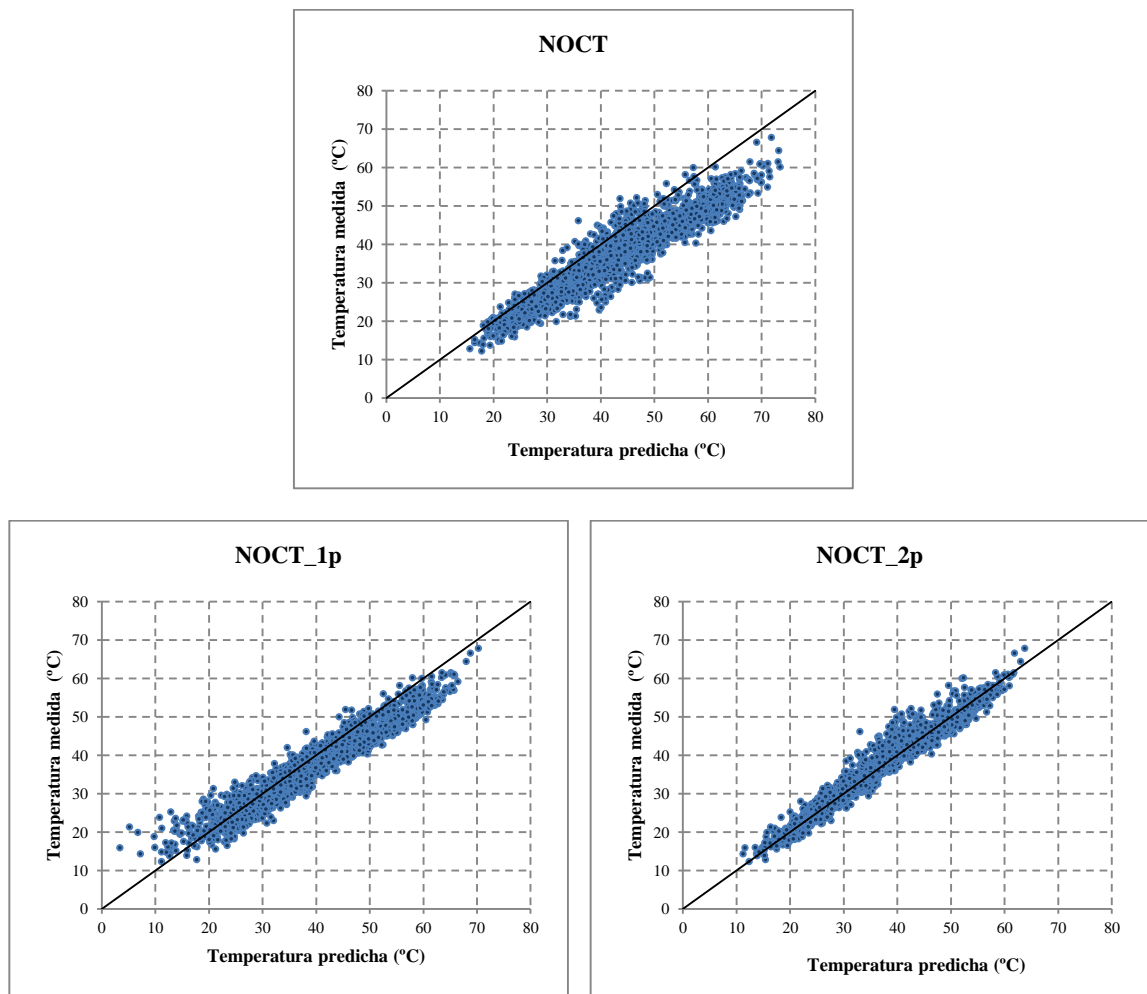


Figura 14.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2011.

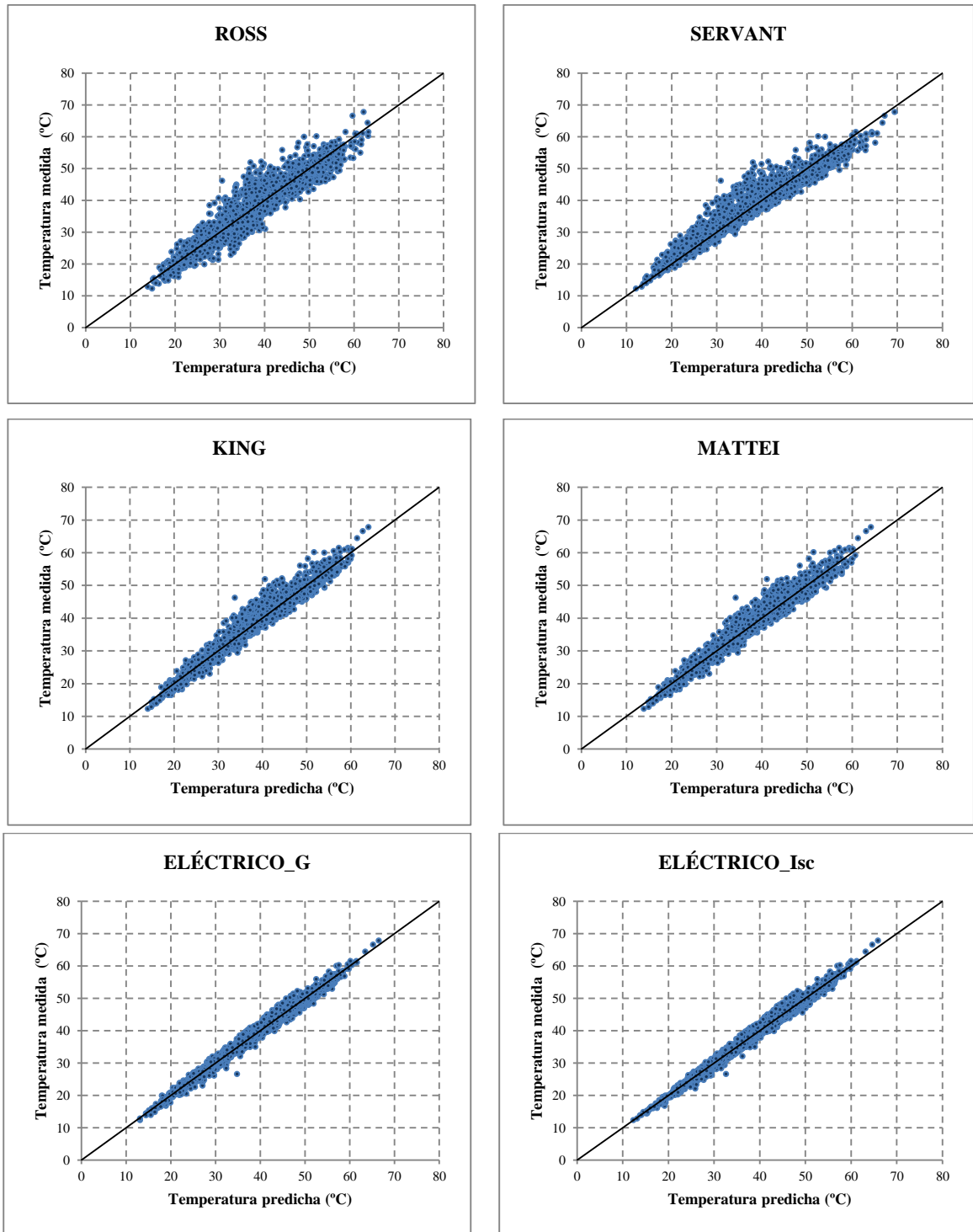


Figura 15.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2011.

El valor de  $R^2$  para los dos modelos eléctricos es prácticamente el mismo con valores instantáneos que con valores horarios (superior al 98% en ambos). Puede observarse en las gráficas que la agrupación de valores en torno a la recta de pendiente unidad de estos modelos es muy compacta. Sin embargo, para los modelos meteorológicos la  $R^2$  ha pasado de tener un valor algo superior al 89% para los modelos de Mattei y King instantáneos a tener un valor superior al 95.5% en los correspondientes modelos horarios. El nuevo modelo NOCT\_2p también ha mejorado desde un 88.7% hasta un 94.8%. El modelo de Servant ha pasado de tener un valor de  $R^2$  superior al 88% con datos instantáneos a tener un valor algo superior al 91% con datos horarios. El mayor incremento en el valor de  $R^2$  tiene lugar en el nuevo modelo NOCT\_1p, que ha pasado de ser de un 83.4% a un 91.0%.

Tras el análisis con los datos de 2011, se ha estudiado la predicción de temperatura de todos los modelos con los datos medios horarios de los 31 días aleatorios del año 2012. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de silicio multicristalino.

| Tecnología | Modelo        | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | $R^2$<br>(%) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| mc-Si      | NOCT          | 6.48                    | 4.0         | 6.7         | 17.7        | 87.2         |
|            | NOCT_1p       | 1.76                    | 3.1         | 3.0         | 8.0         | 91.4         |
|            | NOCT_2p       | -0.64                   | 2.0         | 1.5         | 3.9         | 95.5         |
|            | ROSS          | 0.23                    | 3.3         | 2.4         | 6.7         | 88.5         |
|            | SERVANT       | -0.98                   | 3.0         | 2.2         | 5.9         | 89.6         |
|            | KING          | -0.53                   | 1.9         | 1.5         | 3.9         | 96.0         |
|            | MATTEI        | -0.57                   | 1.9         | 1.5         | 3.9         | 96.1         |
|            | ELÉCTRICO_G   | -0.40                   | 1.3         | 1.0         | 2.8         | 98.3         |
|            | ELÉCTRICO_Isc | -0.38                   | 1.1         | 0.8         | 2.3         | 98.7         |

Los resultados obtenidos con los datos horarios de 2012 tienen el mismo comportamiento que los que se obtuvieron con los datos horarios de 2011. Los modelos eléctricos vuelven a presentar un valor de  $R^2$  superior al 98% y los mejores resultados de los modelos meteorológicos se obtienen con los modelos de Mattei y King. Los resultados obtenidos con el nuevo modelo NOCT\_2p están muy próximos a los conseguidos por

estos dos modelos. El modelo de Servant no obtiene buenos resultados para esta tecnología de módulos.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha por todos los modelos se muestran en la Figura 16.a y la Figura 16.b.

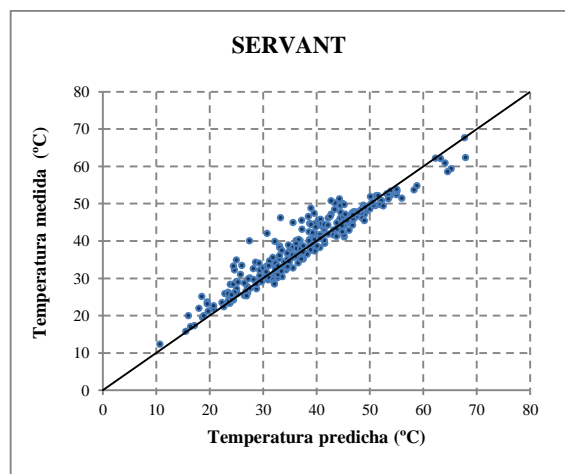
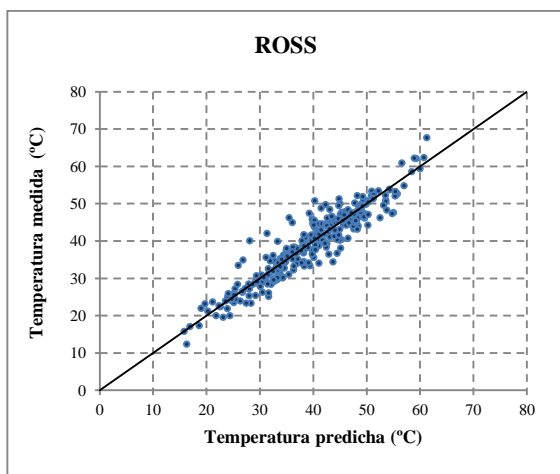
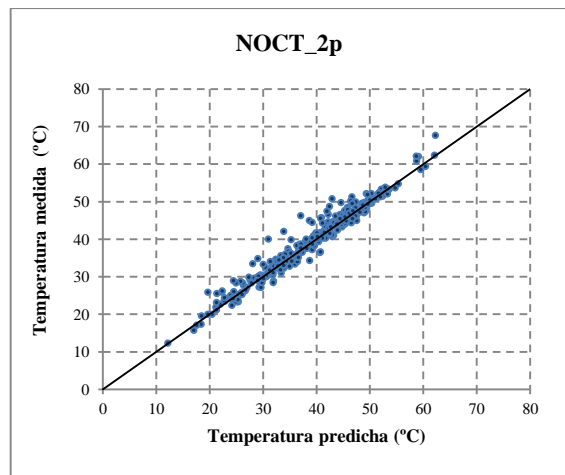
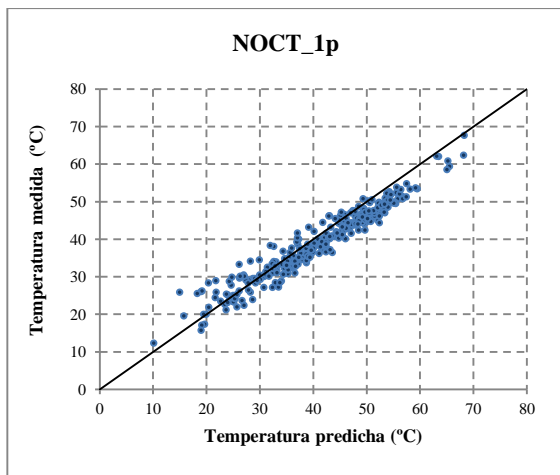
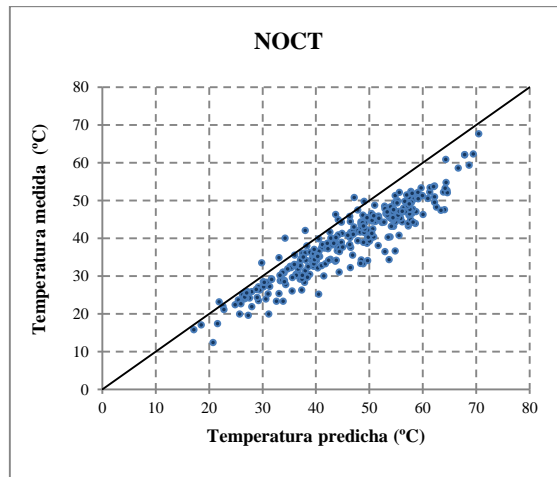


Figura 15.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2012.

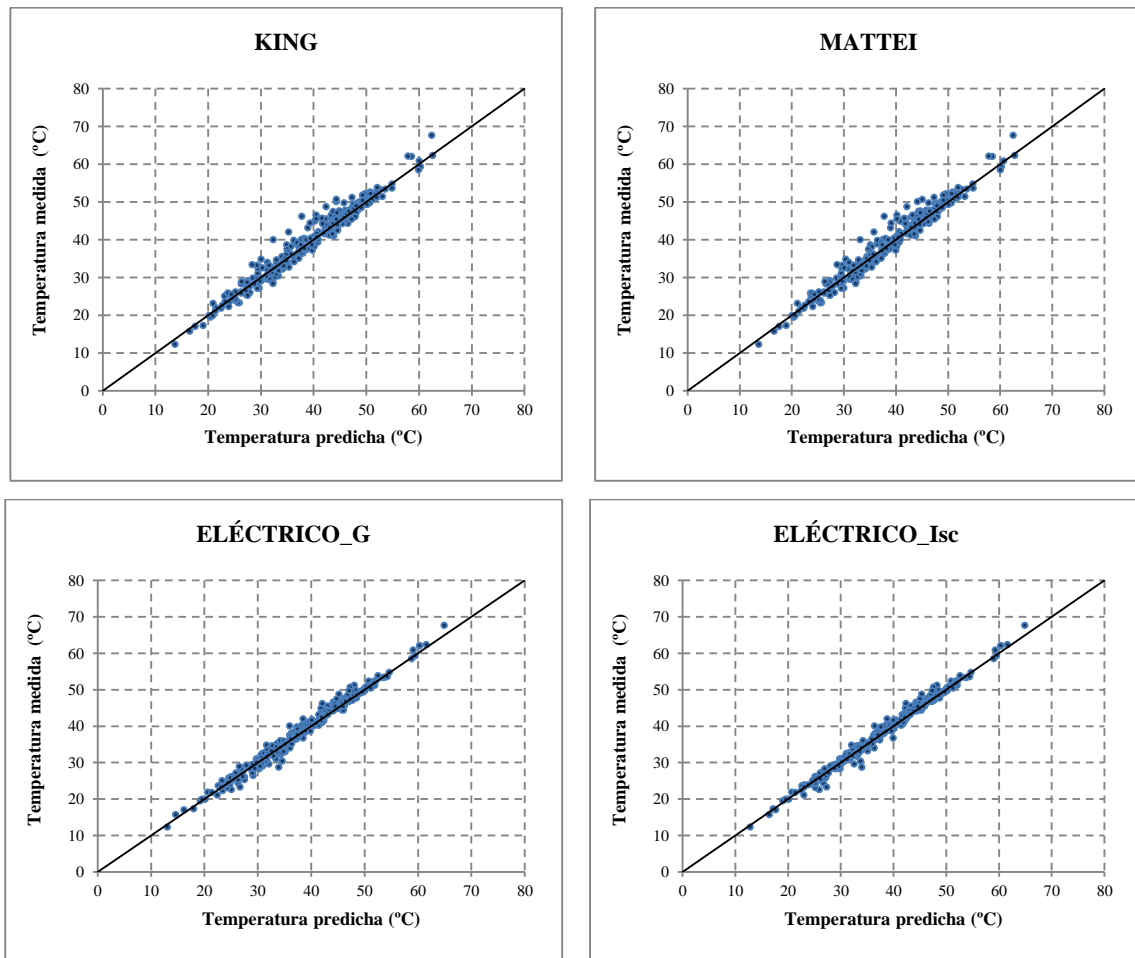


Figura 16.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2012.

En las gráficas de la Figura 16.a y la Figura 16.b puede observarse que los valores de los modelos eléctricos se encuentran muy agrupados en torno a la recta de pendiente unidad, que en el caso de los modelos de King, Mattei y NOCT\_2p esta agrupación de valores también es bastante buena, y que para el resto de modelos hay una mayor dispersión. En el caso del modelo de Servant puede observarse, de nuevo, que este modelo no obtiene buenos resultados.

Para analizar las desviaciones de temperatura de los distintos modelos, en las distintas franjas horarias, se muestra en la Figura 17 el valor de las desviaciones medias de temperatura del módulo de tecnología silicio multicristalino, junto a los valores de la

irradiación y los valores medios de la velocidad del viento en cada hora con los datos de los 31 días aleatorios de 2012.

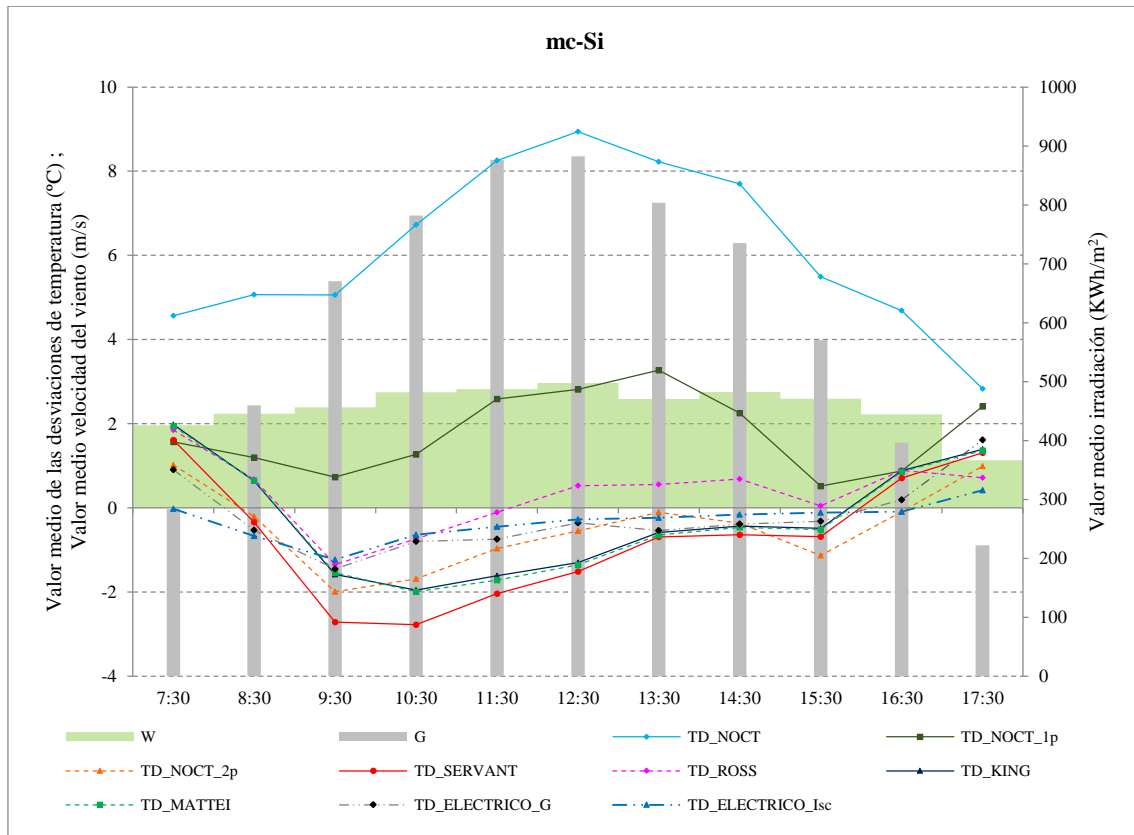


Figura 16. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología silicio multicristalino. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

En esta tecnología, prácticamente todos los modelos realizan una predicción por defecto en la mayor parte del día, excepto los modelos NOCT y NOCT\_1p, que predicen por exceso. El modelo NOCT predice la temperatura con una desviación media superior a 8 °C en las condiciones de máxima irradiación.

El modelo con las menores desviaciones medias de temperatura es el Eléctrico\_Isc, y el modelo Eléctrico\_G obtiene unos resultados muy similares prácticamente en todas las franjas horarias, excepto a primera y última hora del día, en las que este modelo obtiene peores resultados. Tras estos modelos, y con unas desviaciones inferiores a 1 °C en casi todas las franjas horarias, se encuentran los modelos de Ross y NOCT\_2p. El modelo de Ross predice una temperatura superior a la del módulo

en la mayor parte del día, mientras que el modelo NOCT\_2p realiza una predicción por defecto en todas las franjas horarias.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que el modelo propuesto NOCT\_2p predice la temperatura horaria de esta tecnología de módulo con una precisión y exactitud razonablemente altas.

Vuelve a quedar patente a la vista de estas gráficas, que el modelo de Servant no obtiene buenos resultados, pues presenta las mayores desviaciones de temperatura en la mayor parte de las franjas horarias, tras los modelos NOCT y NOCT\_1p.

### **Análisis global de la validación con modelos horarios**

Los resultados obtenidos se presentan agrupados por modelos para poder analizarlos desde una perspectiva diferente y obtener nuevas conclusiones globales.

Todos los modelos horarios propuestos en este trabajo, aunque se han propuesto a partir de modelos instantáneos previos, son nuevos, ya que nunca se han utilizado en la literatura previa existente con esta escala temporal.

En este apartado se presentan también algunas gráficas comparativas de temperatura medida frente a temperatura predicha para algunos casos concretos.

También se van a presentar gráficas de las desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos separándolas por tecnología realizadas con los datos horarios de los 31 días del año 2012.

Al final de este apartado se van a presentar también las gráficas de la temperatura predicha por cada uno de los modelos a lo largo de un día completo, para cada una de las cuatro tecnologías de módulo estudiadas y también las gráficas de desviación de temperatura de cada uno de los modelos para ese día y con todas las tecnologías.

Los resultados obtenidos por cada uno de los modelos con las diferentes tecnologías de módulos estudiados se muestran en la Tabla 15.



Tabla 15. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011.

| Modelo        | Tecnología       | $\overline{TD}$<br>(°C) | STD<br>(°C) | MAE<br>(°C) | MAPE<br>(%) | R <sup>2</sup><br>(%) |
|---------------|------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| NOCT          | CdTe             | 3.40                    | 3.4         | 3.8         | 10.5        | 91.2                  |
|               | a-Si             | 5.35                    | 3.8         | 5.4         | 15.7        | 88.5                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 3.13                    | 4.0         | 3.6         | 10.8        | 87.7                  |
|               | mc-Si            | 5.72                    | 4.1         | 6.0         | 15.9        | 88.9                  |
| SERVANT       | CdTe             | 0.09                    | 1.6         | 1.2         | 3.5         | 97.6                  |
|               | a-Si             | 0.16                    | 1.6         | 1.3         | 3.8         | 97.5                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.20                    | 2.1         | 1.7         | 4.7         | 96.4                  |
|               | mc-Si            | -0.36                   | 3.0         | 2.3         | 5.9         | 91.0                  |
| ROSS          | CdTe             | 0.06                    | 3.0         | 2.2         | 6.2         | 92.1                  |
|               | a-Si             | -0.06                   | 3.2         | 2.5         | 7.2         | 90.3                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.07                    | 3.8         | 2.9         | 8.2         | 88.3                  |
|               | mc-Si            | -0.07                   | 3.2         | 2.3         | 6.3         | 89.8                  |
| KING          | CdTe             | 0.15                    | 1.5         | 1.2         | 3.4         | 97.7                  |
|               | a-Si             | 0.25                    | 1.7         | 1.4         | 4.2         | 96.6                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.25                    | 2.2         | 1.8         | 5.1         | 96.0                  |
|               | mc-Si            | 0.04                    | 2.1         | 1.6         | 4.4         | 95.6                  |
| MATTEI        | CdTe             | 0.18                    | 1.5         | 1.2         | 3.4         | 97.9                  |
|               | a-Si             | 0.26                    | 1.8         | 1.5         | 4.5         | 96.9                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.27                    | 2.3         | 1.9         | 5.5         | 95.6                  |
|               | mc-Si            | 0.05                    | 2.0         | 1.5         | 4.2         | 96.0                  |
| ELÉCTRICO_G   | CdTe             | -0.08                   | 2.0         | 1.5         | 4.3         | 98.7                  |
|               | a-Si             | -0.53                   | 1.8         | 1.5         | 4.8         | 97.2                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.04                    | 1.6         | 1.2         | 3.6         | 98.0                  |
|               | mc-Si            | -0.13                   | 2.1         | 1.1         | 3.0         | 98.9                  |
| ELÉCTRICO_Isc | CdTe             | -0.08                   | 1.8         | 1.4         | 4.2         | 97.2                  |
|               | a-Si             | 0.03                    | 1.3         | 1.0         | 3.0         | 98.5                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.04                    | 1.4         | 1.1         | 3.1         | 98.5                  |
|               | mc-Si            | -0.09                   | 2.0         | 1.0         | 2.7         | 98.9                  |
| NOCT_1p       | CdTe             | 1.15                    | 2.2         | 2.0         | 5.7         | 96.2                  |
|               | a-Si             | 2.59                    | 2.5         | 3.1         | 9.1         | 95.0                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.73                    | 2.5         | 2.0         | 6.1         | 95.1                  |
|               | mc-Si            | 2.58                    | 3.5         | 3.7         | 10.0        | 91.0                  |
| NOCT_2p       | CdTe             | -0.03                   | 1.8         | 1.4         | 3.9         | 97.1                  |
|               | a-Si             | 0.09                    | 1.9         | 1.5         | 4.5         | 96.7                  |
|               | a-Si/ $\mu$ c-Si | 0.00                    | 2.4         | 1.9         | 5.7         | 95.4                  |
|               | mc-Si            | -0.17                   | 2.3         | 1.7         | 4.6         | 94.9                  |

Los resultados obtenidos indican que para todos los modelos horarios propuestos, la precisión de la predicción ha mejorado respecto a la realizada con valores instantáneos para todos los modelos y en todas las tecnologías de módulos, junto con un aumento del valor de  $R^2$  cuando se compara la serie de datos medidos frente a los estimados.

Los valores medios de la desviación de la temperatura,  $\overline{TD}$ , no se modifican sustancialmente, lo que indica que la exactitud de la predicción con los modelos horarios es prácticamente la misma que con los modelos instantáneos. No ocurre así con la precisión de la predicción, ya que los valores de la desviación estándar han disminuido considerablemente. Los valores de MAE y MAPE disminuyen en todos los modelos estudiados en una proporción similar a la que lo ha hecho la desviación estándar.

La tecnología en la que más se incrementa la precisión de la predicción es la de telururo de cadmio (con aumentos de la precisión superiores al 25% en prácticamente todos los modelos, superiores al 45% en los modelos propuestos e incluso del 55% en Mattei, King y Servant) y la tecnología con el incremento menor es la de silicio multicristalino (tan sólo los modelos de King y Mattei alcanzan un incremento del 40%). El modelo de Servant es el modelo con los mejores resultados en cuanto a incremento de precisión en todas las tecnologías estudiadas, excepto en la de silicio multicristalino. Los modelos de King y Mattei también consiguen un gran incremento en la precisión y en todas las tecnologías. Para los modelos de Ross y NOCT esta mejora en la precisión sólo ha sido de un 20%. En los modelos eléctricos, el modelo Eléctrico\_G consigue un mayor aumento de precisión que el modelo Eléctrico\_Isc; una de las causas es porque el modelo Eléctrico\_Isc ya tenía una precisión muy alta con los modelos instantáneos, que es difícil de aumentar en proporciones tan altas como ha ocurrido en los modelos meteorológicos. **En ambos modelos, para la tecnología de silicio multicristalino no se ha producido incremento de precisión.** En cuanto a los modelos propuestos, NOCT\_1p presenta incrementos de precisión comprendidos entre el 28% y el 45% y en el NOCT\_2p entre el 34% y el 48%, siendo los valores más bajos para el módulo de silicio multicristalino y los más altos para el módulo de telururo de cadmio.

También se ha comprobado que los modelos horarios propuestos pueden ser utilizados para predecir los valores de temperatura del módulo. Para todos los módulos estudiados, el modelo NOCT horario predice temperaturas horarias muy superiores a las

reales. En las horas centrales del día, cuando se produce la máxima producción energética, esta diferencia puede ser incluso superior a 8 °C.

El modelo horario propuesto en este trabajo, NOCT\_2p, predice la temperatura horaria con valores muy próximos a la temperatura observada, con valores bajos de la desviación estándar para todos los módulos estudiados y en todas las horas del día. Los mejores resultados se obtienen para los módulos de lámina delgada.

Para que puedan compararse los resultados, y a modo de ejemplo, en la Figura 18 se muestran las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha del modelo NOCT\_2p para el módulo de CdTe, usando valores instantáneos (a la izquierda) y valores horarios (a la derecha). Estas gráficas son copia de las mostradas a lo largo del presente trabajo, cada una en su apartado correspondiente.

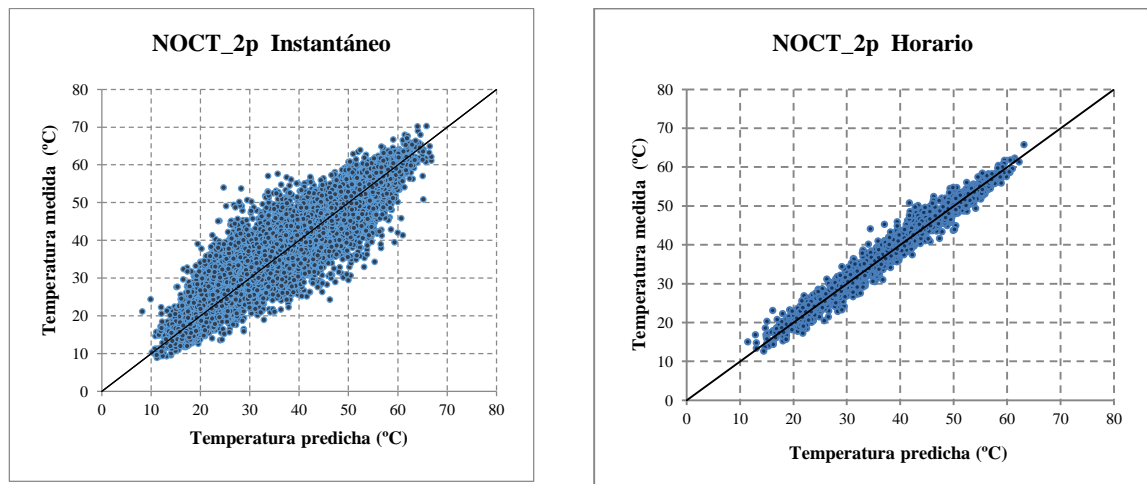


Figura 17. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por el modelo propuesto NOCT\_2p para el módulo de telururo de cadmio, usando valores instantáneos (a la izquierda) y valores medios horarios (a la derecha), en ambos con datos de 2011.

En la Figura 19 se representan estos resultados para el módulo de a-Si utilizando el modelo de King para valores instantáneos y el que se ha propuesto basado en este modelo pero para valores horarios.

Puede observarse cómo en los dos casos analizados, el modelo horario mejora sustancialmente la agrupación de los datos, lo que se traduce en un mayor coeficiente de correlación y en un menor error en la predicción de la temperatura del módulo. Con los demás módulos, los resultados son similares.

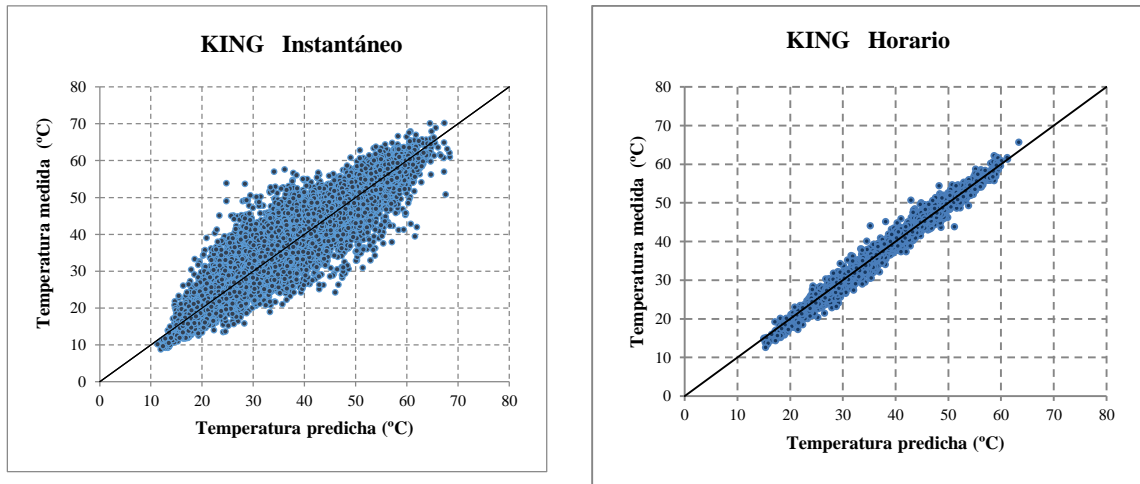


Figura 18. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por el modelo de King para el módulo de silicio amorfo, usando valores instantáneos (a la izquierda) y valores medios horarios (a la derecha), en ambos con datos de 2011.

Los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para cada modelo se presentan en la Tabla 16, agrupados por modelos. En la tabla se indica si la distribución de la temperatura predicha y la de cada uno de los modelos es igual o no.

Tabla 16. Tabla comparativa de la distribución de la serie de la temperatura medida y temperatura predicha por cada uno de los modelos. (Indicando si la distribución es igual o no)

|                  | ¿Igual distribución que la serie de temperatura medida? |         |         |      |         |      |        |             |               |
|------------------|---|---------|---------|------|---------|------|--------|-------------|---------------|
|                  | NOCT  | NOCT_1p | NOCT_2p | ROSS | SERVANT | KING | MATTEI | ELÉCTRICO_G | ELÉCTRICO_Isc |
| CdTe             | NO  | NO      | SÍ      | SÍ   | SÍ      | SÍ   | SÍ     | SÍ          | SÍ            |
| a-Si             | NO  | NO      | SÍ      | NO   | SÍ      | NO   | NO     | SÍ          | SÍ            |
| a-Si/ $\mu$ c-Si | NO  | NO      | SÍ      | NO   | SÍ      | NO   | NO     | SÍ          | SÍ            |
| mc-Si            | NO  | NO      | SÍ      | NO   | NO      | SÍ   | SÍ     | SÍ          | SÍ            |

En los modelos instantáneos, las series de las temperaturas predichas por todos los modelos era distinta de la serie de temperatura medida. Esto ocurría en todas las tecnologías de módulos y con todos los modelos de predicción, excepto para el modelo Eléctrico\_Isc que en las tecnologías de silicio amorfo y silicio amorfo y microcristalino, en los que sí tenía la misma distribución.

Con los modelos horarios esto cambia radicalmente. Los modelos horarios ganan en exactitud y precisión y esto hace que la serie de la temperatura predicha se aproxime

mucho más a la temperatura real que presenta el módulo. De hecho, en la Tabla 16 puede observarse que hay tres modelos cuya serie de temperatura predicha tienen la misma distribución que la temperatura medida, en todas las tecnologías de módulos estudiadas. **Estos modelos son los dos modelos eléctricos, que siempre destacan por ser los mejores modelos de predicción**, y el modelo propuesto NOCT\_2p. Con los modelos de King y Mattei las series presentan la misma distribución en dos tecnologías: telururo de cadmio y silicio multicristalino. Con el modelo de Servant y Ross las series tienen la misma distribución solo en una tecnología y con los modelos NOCT y NOCT\_1p las series nunca tienen la misma distribución. El modelo NOCT es muy impreciso, y el modelo NOCT\_1p, aunque mejora considerablemente los resultados del modelo NOCT, no presenta la misma distribución, y esto es debido a que este modelo cuando la velocidad de viento es de 1 m/s da la misma predicción que el modelo NOCT.

A la vista de los resultados, puede afirmarse que el modelo propuesto en este trabajo, NOCT\_2p, predice muy bien la temperatura media horaria de los módulos, con valores de  $\overline{TD}$  muy cercanas a 0 y desviaciones estándar del orden de 2 °C. Comparando estos resultados con los que se obtienen modificando los modelos propuestos previamente en la literatura, se puede afirmar que exceptuando el modelo de Ross, que no tiene en cuenta la velocidad del viento, todos los demás modelos ofrecen resultados similares.

Para comprobar la utilidad de los modelos horarios propuestos, se han estudiado las desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios del año 2012. Al ser la selección aleatoria, la muestra comprende días con diferentes condiciones meteorológicas y diferente duración del día. En la Figura 20 pueden verse los valores experimentales medios horarios de la irradiación, de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento con su correspondiente desviación estándar (con factor de cobertura igual a 1) de los 31 días seleccionados. Los altos valores de la desviación estándar indican que, efectivamente, las condiciones meteorológicas han sido muy diversas y que dentro de cada hora la muestra recoge valores bien distintos de estas variables.

A modo de ejemplo, y para analizar el comportamiento en la predicción de temperatura en las distintas franjas horarias de un día, se muestra la predicción de temperatura de los diferentes modelos propuestos para cada una de las cuatro tecnologías de módulos estudiadas.

Se ha seleccionado un día, el 26 de febrero de 2012, con velocidades de viento comprendidas entre 1 m/s y 8 m/s y valores de irradiancia altos y estables. En la Figura 20 se muestran los valores instantáneos de la irradiancia y de la velocidad del viento para el mencionado día.

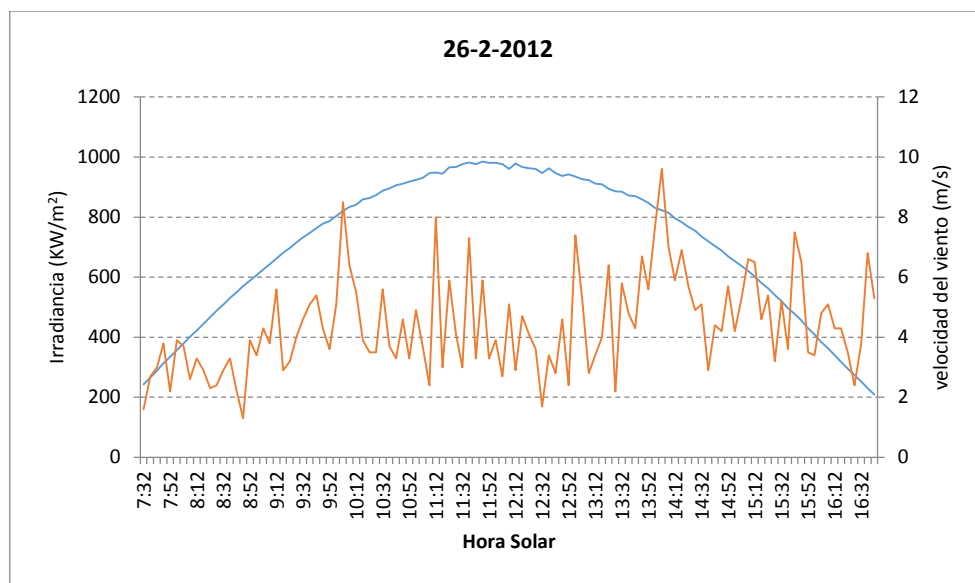


Figura 20. Gráfica de valores instantáneos de irradiancia y velocidad del viento para el día 26 de febrero de 2012.

En la Figura 21.a y la Figura 21.b se muestran las gráficas de la predicción horaria de temperatura de cada uno de los modelos propuestos junto a la temperatura medida, una para cada una de las tecnologías estudiadas. En la Figura 22 se representan gráficamente las desviaciones de las temperaturas horarias de cada uno de los modelos y en cada una de las tecnologías estudiadas, en ambos casos para el día 26 de febrero de 2012.

En las gráficas de la Figura 21.a y la Figura 21.b puede observarse que en las primeras horas del día, en condiciones de baja irradiancia (que precisamente en ese día coincide con los valores de la velocidad de viento más bajos de todo el día), todos los modelos predicen la temperatura por exceso, en todas las tecnologías excepto en la de silicio multicristalino. En todas las tecnologías, y también en esta franja horaria, los valores más bajos de las desviaciones medias de temperatura son los de los modelos

NOCT\_1p y NOCT\_2p, con valores positivos comprendidos entre 1 °C y 2 °C, excepto para el módulo de silicio multicristalino, en el que los valores están en el mismo rango siendo negativos además de no ser, para esta tecnología, los menores.

En todas las franjas horarias del día, los modelos NOCT y de Ross son los que realizan la peor predicción, que siempre es por exceso, porque estos modelos no incluyen la velocidad del viento y por lo tanto, no consideran el efecto refrigerante del mismo en la temperatura del módulo. En condiciones de máxima irradiación, la temperatura predicha por el modelo NOCT es muy superior a la temperatura real del módulo, y en el mejor de los casos es superior a 8 °C (módulo de telururo de cadmio). Para otras tecnologías es superior: ronda los 12 °C para las tecnologías de a-Si y a-Si/ $\mu$ c-Si y próximos a 15 °C en el caso del módulo de silicio multicristalino. Estas diferencias se reducen casi a la mitad en el modelo de Ross.

Para el módulo de telururo de cadmio, y quitando los modelos de Ross y NOCT ya analizados en el párrafo anterior, en las horas centrales del día, en condiciones de máxima irradiación y con velocidades medias de viento comprendidas entre 3 m/s y 6 m/s, todos los modelos predicen una temperatura inferior a la medida, excepto los modelos propuestos NOCT\_1p y NOCT\_2p que predicen una temperatura superior y muy próxima a la temperatura medida. Analizando la gráfica de desviaciones de temperatura de todos los modelos, podemos afirmar que el modelo NOCT\_2p realiza la predicción con los valores netos más bajos de todos los modelos y que lo hace con una precisión razonablemente alta. Este mismo hecho ocurre para el módulo de silicio multicristalino.

Para los módulos de silicio amorfo y silicio amorfo y microcristalino, todos los modelos predicen una temperatura superior a la del módulo en prácticamente todas las franjas horarias. El modelo de Servant es el que presenta mayor exactitud en la predicción, con los valores más bajos de la desviación media de la temperatura. Para las tecnologías de telururo de cadmio y silicio multicristalino el modelo más exacto es el NOCT\_2p.

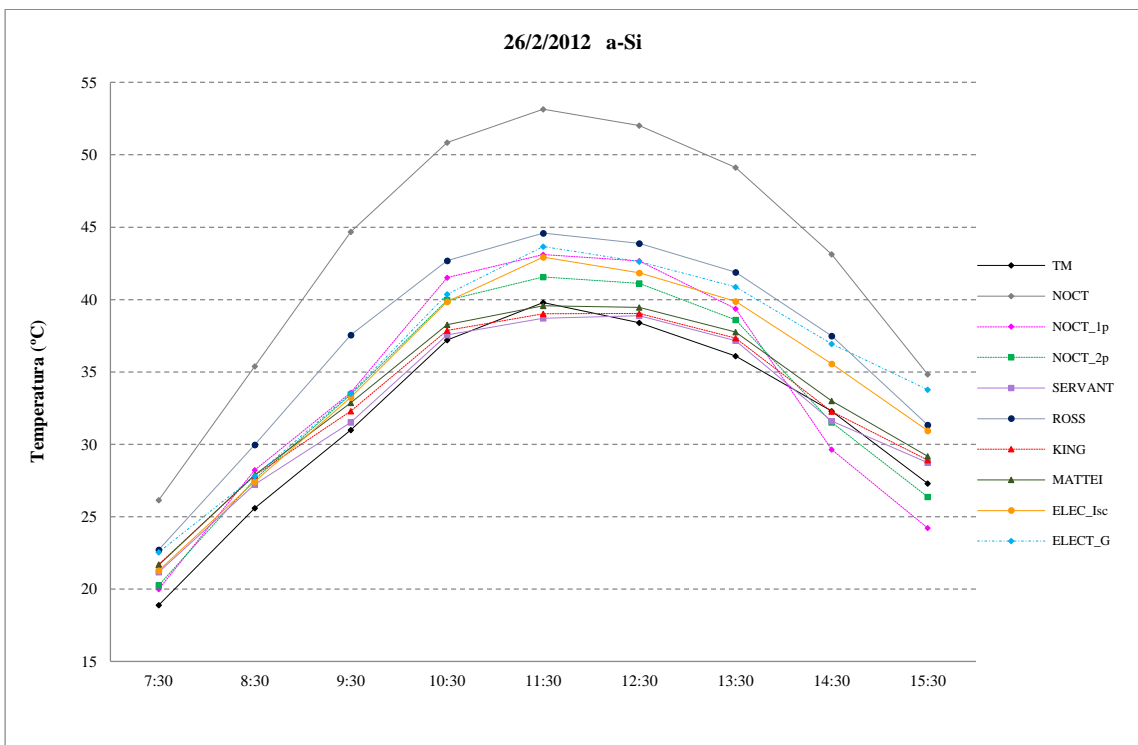
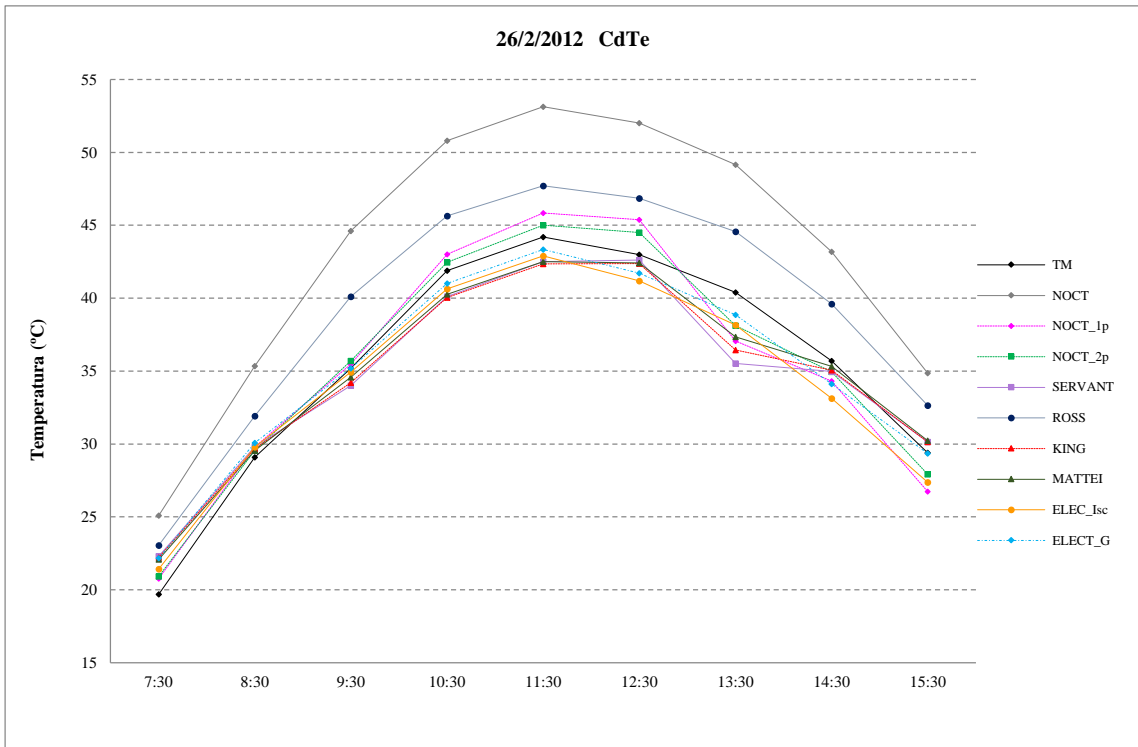


Figura 21.a. Gráficas de la temperatura medida y la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012, para los módulos de telururo de cadmio y silicio amorfo.



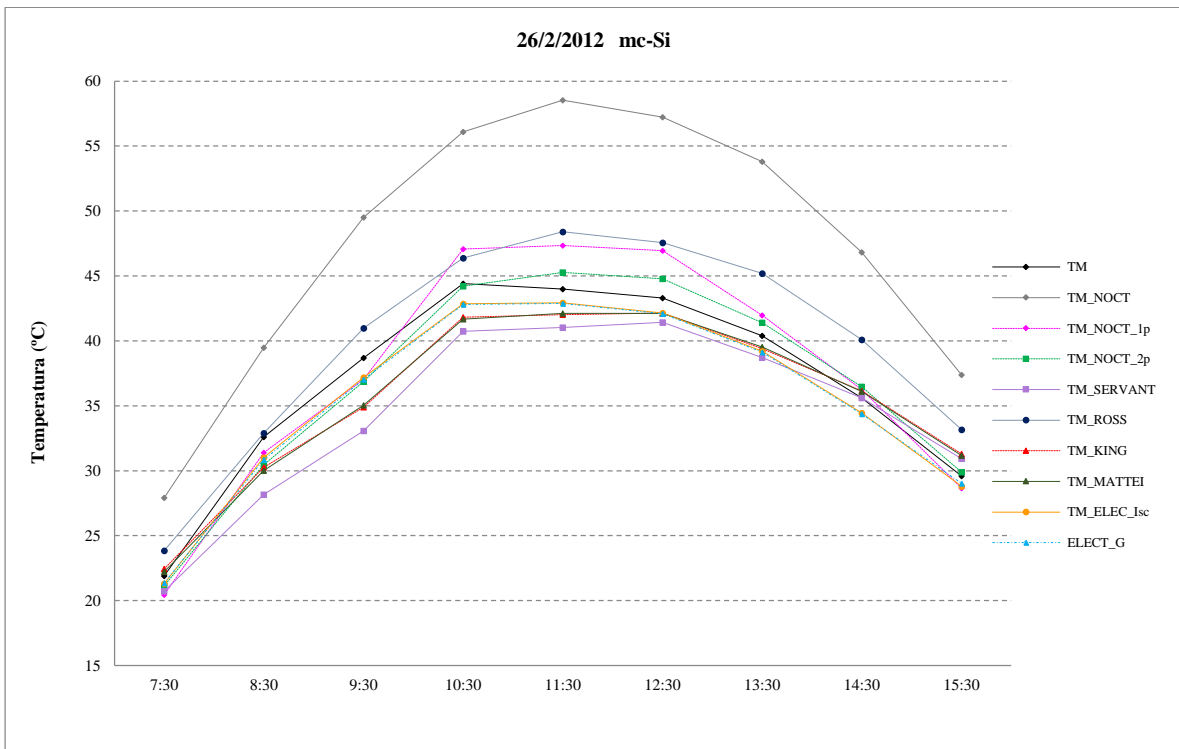
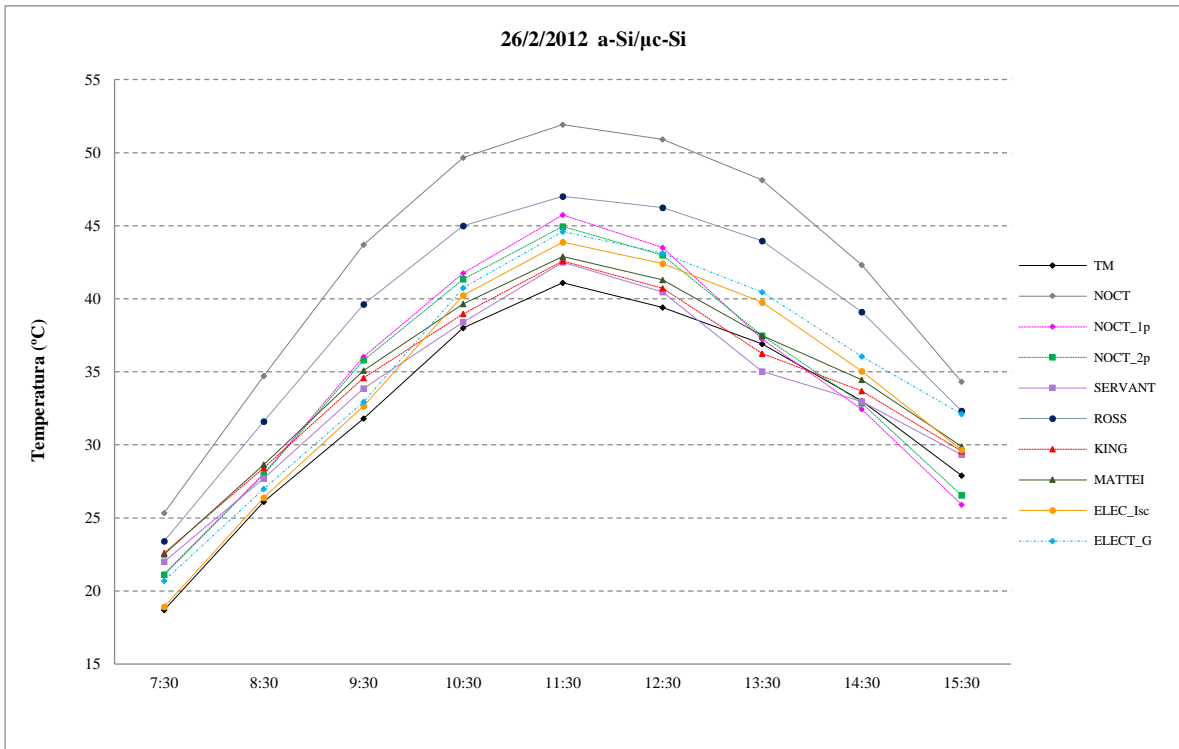


Figura 22.b. Gráficas de la temperatura medida y la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012, para los módulos de silicio amorfo/microcristalino y silicio multicristalino.

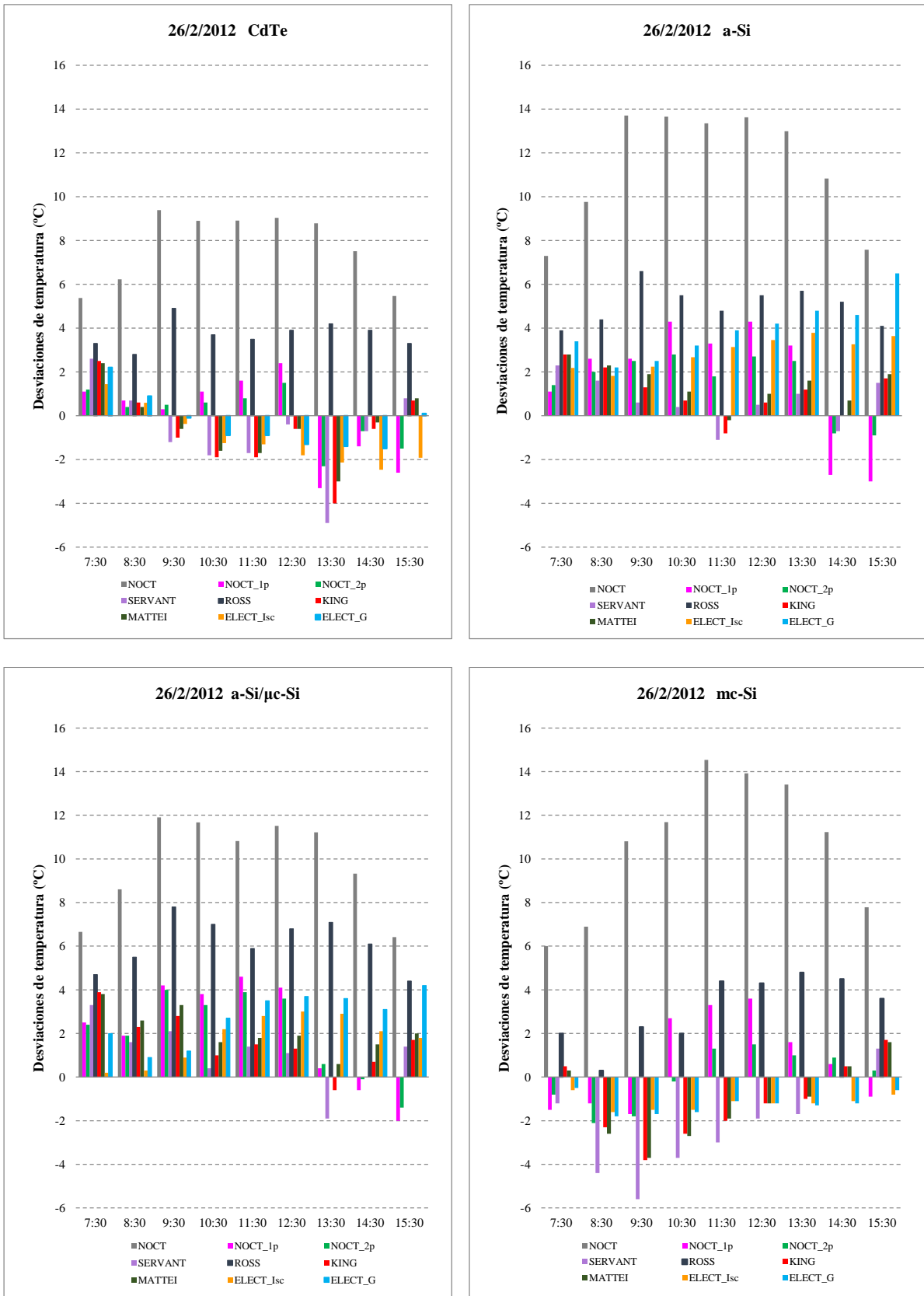


Figura 22. Gráficas de la desviación de temperatura de cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012.

## Conclusiones

El **objetivo** de este trabajo de investigación era estudiar si los modelos instantáneos existentes en la literatura se podrían aplicar a tecnologías diferentes de las utilizadas por sus respectivos autores, calculando los parámetros pertinentes para predecir la temperatura de trabajo de los diferentes módulos. A este respecto, las conclusiones son las siguientes:

- El estudio de los modelos instantáneos meteorológicos previos aplicados a módulos de diferentes tecnologías fotovoltaicas proporciona parámetros de ajuste comparables con los obtenidos por otros autores. Sin embargo, estos modelos predicen con poca fiabilidad la temperatura de trabajo de los módulos. Esto es debido a que todos estos modelos describen el comportamiento térmico del módulo bajo la suposición de que se encuentra en estado estacionario, lo que difícilmente ocurre en condiciones reales de funcionamiento ya que el módulo se encuentra expuesto a condiciones meteorológicas en continuo cambio y la influencia de algunas de ellas en su temperatura se manifiesta un cierto tiempo después de que dicha temperatura haya sido medida. Además, esta influencia es diferente según la tecnología del módulo.
- De entre los modelos meteorológicos analizados, el que presenta la peor exactitud, la peor precisión, los mayores errores (MAE y MAPE) y los peores coeficientes de determinación en la relación lineal entre los valores medidos y los predichos es el modelo NOCT, por lo que no debería ser usado para predecir la producción energética de los módulos. El resto de los modelos presentan resultados similares entre sí, con valores de MAPE entre 6.4% y 8.0% con excepción del modelo de Ross que presenta valores más altos de este error. Esto es debido a que este modelo no incluye como variable la velocidad del viento. Además, el test de Kolmogorov-Smirnov, aplicado con un nivel de confianza del 95%, indica que ninguna de las series de temperaturas instantáneas predichas por los distintos modelos meteorológicos aplicados a las distintas tecnologías, tiene la misma distribución de probabilidad que la serie de temperatura medida.

- Los modelos eléctricos presentan resultados mucho más exactos y precisos para todas las tecnologías estudiadas, con valores de MAPE entre 2.6% y 5.9%. La aplicación de estos modelos presenta como valor añadido adicional el cálculo del coeficiente de idealidad del diodo para cada tecnología. Sin embargo, la aplicación práctica de estos modelos es difícil, ya que necesita de valores reales de los parámetros eléctricos de los módulos cuando éstos están en funcionamiento.

En este trabajo se han propuesto dos nuevos modelos meteorológicos, basados ambos en el modelo NOCT, para predecir la temperatura instantánea de operación de módulos de distintas tecnologías trabajando a sol real. Aunque el modelo NOCT\_1p mejora bastante la exactitud de la predicción comparado con el modelo NOCT, no mejora los resultados obtenidos con los otros modelos meteorológicos analizados anteriormente. Con el segundo modelo propuesto, NOCT\_2p, es posible realizar la predicción de la temperatura del módulo con errores comparables a los obtenidos con modelos meteorológicos previos. Los mejores resultados en la predicción de temperatura con este modelo se obtienen para el módulo mc-Si. De nuevo, el test de Kolmogorov-Smirnov, aplicado con un nivel de confianza del 95%, indica que ninguna de las series de temperaturas instantáneas predichas por estos dos modelos tiene la misma distribución de probabilidad que la serie de temperatura medida.

Se han propuesto nuevos modelos horarios y se ha estudiado su validez. Estos modelos horarios propuestos mejoran los resultados obtenidos con los modelos instantáneos. Los valores de los MAE y MAPE disminuyen en todos los modelos estudiados en una proporción similar a la que lo ha hecho la desviación estándar.

Se ha comprobado que no es posible establecer la temperatura media diaria de los módulos a partir de valores medios diarios de las variables meteorológicas. Sin embargo, se ha comprobado que es posible calcular con precisión la temperatura media diaria de los módulos a partir de los resultados de los modelos horarios.

Las conclusiones obtenidas acerca de este aspecto son:

- La temperatura media diaria predicha presenta errores ligeramente menores que los que se obtienen con las predicciones realizadas con los valores horarios.

- Al construir los valores diarios por este procedimiento, la utilización de los modelos horarios NOCT y Ross son los que presentan los peores resultados. El modelo NOCT, por las razones ya expuestas a lo largo de esta tesis; y el modelo de Ross porque presenta errores mayores en los días con velocidades de viento importantes.
- El test de Kolmogorov-Smirnov, aplicado con un nivel de confianza del 95%, indica que las series de temperaturas diarias predichas por los modelos NOCT\_2p, Ross, King, Mattei y los dos modelos eléctricos tienen la misma distribución de probabilidad que las correspondientes series de temperaturas diarias registradas en todas las tecnologías.
- Las temperaturas diarias predichas por el modelo NOCT tienen distinta distribución de probabilidad que las correspondientes registradas en todas las tecnologías.

## Bibliografía

Akhmad K, Kitamura A, Yamamoto F, Okamoto H, Takakura H, Hamakawa Y., 1997. Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*; 46: 209–218. ISSN: 09270248; DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00003-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00003-2)

Akhmad, K., Okamoto, H., Yamamoto, F., Kitamura, A. Long-term performance modelling of amorphous silicon photovoltaic module. (1997) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 36 (2), pp. 629-632. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0031073516&partnerID=40&md5=8eb1041504bc61ce717d02b669e20cd6>

Alonso García M.C., Balenzategui J.L., Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations. *Renewable Energy* 29 (2004) 1997–2010. ISSN: 09601481; DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.03.010>

Alonso-Abella M., Chenlo F., Nofuentes G., Torres-Ramírez M., Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites, *Energy*, Volume 67, 1 April 2014, Pages 435-443, ISSN 0360-5442, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.024>

Andreev VM, Grilikhes VA, Rumyantsev VD., 1967. *Photovoltaic conversion of concentrated sunlight*. London: Wiley. ISBN: 0471967653

ASTM. 1999. Method for determining the nominal operating cell temperature (NOCT) of an array or module. E1036M, Annex A.1., p. 544 (withdrawn recently).

Bagnall D.M., Boreland M.B., Photovoltaic technologies, Energy Policy, Volume 36, Issue 12, December 2008, Pages 4390-4396, ISSN 0301-4215, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.070>

Baños R., Manzano-Agugliaro F., Montoya F.G., Gil C., Alcayde A., Gómez J., Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 4, May 2011, Pages 1753-1766, ISSN 1364-0321, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008>

Bharti, R.; Kuitche, J.; TamizhMani, M.G., "Nominal Operating Cell Temperature (NOCT): Effects of module size, loading and solar spectrum," Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE , vol., no., pp.001657,001662, 7-12 June 2009 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411408>

Boddaert S., Chervet F., Long-term experimental validation of NOCT method for PV integration under several conditions. In: Proceedings of 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference 2012. pp. 3946-50. DOI: [10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.1.21](http://dx.doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.1.21)

Buresch M., 1983. Photovoltaic Energy Systems. McGraw-Hill, New York.

Cañete C., Carretero J., Sidrach-de-Cardona M., Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions, Energy, Volume 65, 1 February 2014, Pages 295-302, ISSN 0360-5442, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.013>.

Del Cueto, JA., 2002. Comparison of energy production and performance from flat-plate photovoltaic module technologies deployed at fixed tilt. 29 th IEEE PV specialist conference, pp. 1523-1526. ISSN: 01608371; DOI:

<http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2002.1190901>

D'Orazio M., Di Perna C., Di Giuseppe E., Experimental operating cell temperature assessment of BIPV with different installation configurations on roofs under Mediterranean climate, Renewable Energy, Volume 68, August 2014, Pages 378-396, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.009>

El Chaar L., Lamont L.A., El Zein N., Review of photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 5, June 2011, Pages 2165-2175, ISSN 1364-0321, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.004>

EurObserv'ER – Photovoltaic Energy Barometer, abril de 2015 [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/observ/EurObservER-barojdpv13-Photovoltaic-Barometer-2015-EN.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/EurObservER-barojdpv13-Photovoltaic-Barometer-2015-EN.pdf)

Evans D.L., Simplified method for predicting photovoltaic array output, Solar Energy, Volume 27, Issue 6, 1981, Pages 555-560, ISSN 0038-092X. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90051-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(81)90051-7)

Faiman D. (2008), Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. Prog. Photovolt: Res. Appl., 16: 307–315. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.813>

Fouquet D., Policy instruments for renewable energy – From a European perspective, Renewable Energy, Volume 49, January 2013, Pages 15-18, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.075>



Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2015. Photovoltaics Report. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>

Fuentes M, Nofuentes G, Aguilera J, Talavera DL, Castro M., 2007. Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. Solar Energy 81: 1396–1408. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008>

Fuentes M. K., A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Arrays. Sandia National Laboratories 1985. Report: SAND85-0330. Available from: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/1985/850330.pdf>

Global market outlook for photovoltaics 2015-2019. European Photovoltaic Industry Association EPIA; 2015-2019; <http://resources.solarbusinesshub.com/images/reports/104.pdf>

Huld, T., Gracia Amillo, A. Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. Energies 2015, 8, 5159-5181. <http://dx.doi.org/10.3390/en8065159>

Ichida k., Fukushige S, Nakajima A., Minemoto T., Takakura H., Impact of environment factors on solar cell parameters of a-Si|| $\mu$ c-Si photovoltaic modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 93, Issues 6–7, June 2009, Pages 879-883, ISSN 0927-0248, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.011>

IEC 61215: 2005 (E) Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules –Design qualification and type approval.

IEC 61215: 2005. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval. International Electrotechnical Commission.

IEC 61646: 2008 Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval.

IEC 61646: 2008. Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval. International Electrotechnical Commission.

Ikisawa M, Nakano A, Igari S, Terashima H., 1998. Outdoor exposure tests of photovoltaic modules in Japan and overseas. *Renewable Energy* 14: 95–100. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00053-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00053-6)

Ishii, T., Takashima, T., Otani, K. Long-term performance degradation of various kinds of photovoltaic modules under moderate climatic conditions. (2011) *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19 (2), pp. 170-179. DOI: 10.1002/pip.1005. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79952180035&partnerID=40&md5=41e1615a4332dda712b3c890cd53e27c>

Jäger-Waldau A., Szabó M., Scarlat N., Monforti F., *Renewable electricity in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 8, October 2011, Pages 3703-3716, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.015>

Jahn U., Schweiger M., Herrmann W., Comparison of Different Thin-Film Technologies - Performance Characteristics Obtained from Laboratory and Field Tests. In.: *Proceedings of the 5th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2010, Valencia, Spain. <http://dx.doi.org/10.4229/25thEUPVSEC2010-4BO.10.2>

Jakubiec JA, Reinhart CF., 2013. A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. *Solar Energy* 93: 127–143. ISSN: 0038092X; DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.022>

Kaldellis J. K., Kapsali M., Kavadias K. A., Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece, *Renewable Energy*, Volume 66, June 2014, Pages 612-624, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.041>

Kamkird P., Ketjoy N., Rakwichian W., Sukchai S., Investigation on Temperature Coefficients of Three Types Photovoltaic Module Technologies under Thailand Operating Condition, *Procedia Engineering*, Volume 32, 2012, Pages 376-383, ISSN 1877-7058, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1282>

Katsumata N., Nakada Y., Minemoto T., Takakura H., Estimation of irradiance and outdoor performance of photovoltaic modules by meteorological data, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 95, Issue 1, January 2011, Pages 199-202, ISSN 0927-0248, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.01.019>

Kholid Akhmad, Akio Kitamura, Fumio Yamamoto, Hiroaki Okamoto, Hideyuki Takakura, Yoshihiro Hamakawa, Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystalline silicon PV modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 46, Issue 3, June 1997, Pages 209-218, ISSN 0927-0248, [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00003-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00003-2)

King D, Boyson W, Kratochvil J., 2004. Photovoltaic array performance model. Sandia National Laboratories. Report SAND2004-3535. Available from: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2004/043535.pdf>

King D., Kratochvil J., Boyson W., 2000, Stabilization and performance characteristics of commercial amorphous silicon PV modules. Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the 28<sup>th</sup> IEEE pp 1446-1449. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2000.916165>

King D.L., Kratochvil W.E., Bower W.I., 1998. Field Experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays. In.: Proceedings of the second world conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, pp. 1947-52. Vienna, Austria

KoehlM, Heck M, Wiesmeier S,Wirth J., 2011. Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. Solar Energy Materials and Solar Cells; 95: 1638–1646. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020>

Kuitche J, Oh J, Brunger A, Inoue T, Muller M, Bauerdick C, Althaus J, Kiehn S, Feng V, Therhaag U, Struwe R., 2011. One year NOCT round-robin testing per IEC 61215 Standard. Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference pp 2380–2385. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2011.6186429>

Lee C .W., Zhong J., Top down strategy for renewable energy investment: Conceptual framework and implementation, Renewable Energy, Volume 68, August 2014, Pages 761-773, ISSN 0960-1481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.015>

Martin N., Ruiz J.M., Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 70, Issue 1, 1 December 2001, Pages 25-38, ISSN 0927-0248, [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00408-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00408-6)

Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P., 2006. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy* 31, 553–567. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010>

Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M., Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 5, June 2012, Pages 2920-2925, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>

Minemoto T., Nagae S., Takakura H., Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 91, Issue 10, 15 June 2007, Pages 919-923, ISSN 0927-0248, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2007.02.012>

Muller, M.; Marion, B.; Rodriguez, J., "Evaluating the IEC 61215 Ed.3 NMOT procedure against the existing NOCT procedure with PV modules in a side-by-side configuration," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2012 38th IEEE , vol., pp.000697-000702, June2012. <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317705>

Nishioka K., Hatayama T., Uraoka Y., Fuyuki T., Hagihara R., Watanabe M., Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 75, Issues 3–4, 1 February 2003, Pages 665-671, ISSN 0927-0248, [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00148-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00148-4)

Nordmann T., Clavadetscher L., 2003. Understanding temperature effects on PV system performance. In: *Proceedings of the third world conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan. pp. 2243–6

Oh J., TamizhMani G., "BAPV modules: Installed-NOCT and temperature coefficients after 1-year exposure," Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE , doi: <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2011.6186083>

Panwar N.L., Kaushik S.C., Surendra Kothari, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1513-1524, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>

Parida B., Iniyar S., Goic R., A review of solar photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1625-1636, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>

Piliouguine M, Carretero J, Mora-López L, Sidrach-de-Cardona M., 2011. Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions. Prog Photovolt Res Appl; 19:591-602. ISSN: 10627995, E-ISSN: 1099159X; DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1073>

Poshtkouhi S, Palaniappan V, Fard M, Trescases O., 2012. A general approach for quantifying the benefit of distributed power electronics for fine grained MPPT in photovoltaic applications using 3-D modeling. Power Electronics, IEEE Transactions 27: 4656–4666. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2011.2173353>

Ross R. G., Interface design considerations for terrestrial solar cell modules. In: Proceedings of the 12th IEEE photovoltaic specialists conference, Baton Rouge, LA, November 15–18; 1976. p. 801–6

Rouholamini A., Pourgharibshahi H., Fadaeinedjad R. and Abdolzadeh M.; Temperature of a photovoltaic module under the influence of different environmental conditions – experimental investigation 2014. International Journal of Ambient Energy 2014. Taylor and Francis <http://dx.doi.org/10.1080/01430750.2014.952842>

Rummel S., Emery K., Field H., Moriarty T., Anderberg A., Dunlavy D, Ottoson L., 1998. PV cell and module performance measurement capabilities at NREL. Proceedings of the national centre for photovoltaics program review meeting; 462: 553–558. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.57923>

Schubert G., 2012. Modeling hourly electricity generation from PV and wind plants in Europe. 9th International Conference on the European Energy Market. EEM 2012: 1–7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EEM.2012.6254782>

Schwabe U, Jansson PM., 2009, Performance measurement of amorphous and monocrystalline silicon PV modules in Eastern U.S. Energy production versus ambient and module temperature pp 1636–1641. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IMTC.2009.5168717>

Schwingshackl C., Petitta M., Wagner J.E., Belluardo G., Moser D., Castelli M., Zebisch M., Tetzlaff A., Wind Effect on PV Module Temperature: Analysis of Different Techniques for an Accurate Estimation, Energy Procedia, Volume 40, 2013, Pages 77-86, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.010>

Servant, J., 1986, "Calculation of the cell temperature for photovoltaic modules from climatic data.", *Intersol 85* Pergamon Press, Montreal, Que, Can, Proceedings of the Ninth Biennial Congress of the International Solar Energy Society., pp. 1640.

Skoplaki E., Palyvos J.A., Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy* 34 (2008) 23–29

[doi:10.1016/j.renene.2008.04.009](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.009)

Skoplaki E., Boudouvis A.G., Palyvos J.A., A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 92, Issue 11, November 2008, Pages 1393-1402, ISSN 0927-0248, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.05.016>.

Staebler D.L. and Wronski C.R., “Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si”, *Appl. Phys. Lett.* 31, 292–294 (1977).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.328084>

Stultz J, Wen L., 1977. Thermal performance testing and analysis of photovoltaic modules in natural sunlight. DOE/JPL LSA task report 5101-31.

Thapar V, Agnihotri G, Sethi VK., 2012. Estimation of hourly temperature at a site and its impact on energy yield of a PV module. *International Journal of Green Energy* 2012; 9: 553–572. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2011.653919>

Tina GM., Abate R., 2008 Experimental verification of thermal behaviour of photovoltaic modules. *Proceedings of the 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Melecom*; 579-584, DOI:

<http://dx.doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618497>

Trinuruk P., Sorapipatana C., Chenvidhya ., Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 11, November 2009, Pages 2515-2523, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.027>



