

Universidad de Málaga
Escuela Politécnica Superior



TESIS DOCTORAL

*Contribución al estudio de la temperatura de módulos FV de
diferentes tecnologías en condiciones de sol real*

Autora

Patricia Mora Segado

Directores

Dr. Jesús Eduardo Carretero Rubio

Dr. Mariano Sidrach de Cardona Ortín

Departamento de Física Aplicada II

Octubre de 2015



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: Patricia Mora Segado

 <http://orcid.org/0000-0001-7841-480X>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es



Departamento de Física aplicada II
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

El Dr. D. Jesús Eduardo Carretero Rubio, Profesor Titular de Universidad, y el Dr. D. Mariano Sidrach de Cardona Ortín, Catedrático de Universidad, pertenecientes al Departamento de Física Aplicada II adscrito a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Málaga,

Certifican que,

D^a Patricia Mora Segado, ha realizado en el Departamento de Física Aplicada II, bajo su dirección, el trabajo de investigación correspondiente a su tesis doctoral titulada:

Contribución al estudio de la temperatura de módulos FV de diferentes tecnologías en condiciones de sol real

Revisado el presente trabajo, estimamos que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo. Y para que conste a efectos de lo establecido en la legislación vigente, autorizamos la presentación de este trabajo en la Universidad de Málaga.

Málaga, 30 de octubre de 2015

Dr. Jesús Eduardo Carretero Rubio

Dr. Mariano Sidrach de Cardona Ortín

Universidad de Málaga

Escuela Politécnica Superior de Málaga



EPS

Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

TESIS DOCTORAL

*Contribución al estudio de la temperatura de módulos FV de
diferentes tecnologías en condiciones de sol real*

TRIBUNAL EVALUADOR:

Presidente: Pedro Bernaola Galván

Secretario: Emilio Ruíz Reina

Vocal 1: Jorge Aguilera Tejero

Vocal 2: Gustavo Nofuentes Garrido

Vocal 3: Lourdes Ramírez Santigosa

Suplente 1: Pedro Juan Carpena Sánchez

Suplente 2: Juan de la Casa Higuera

Málaga, Noviembre de 2015

Este trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado por la Junta de Andalucía
(proyectos P10-TIC-6441 y P11-RNM-7115)

El ignorante afirma, el sabio duda y reflexiona

Aristóteles (384 -322 AC)

Filósofo griego

Agradecimientos

Desarrollar una tesis doctoral es una ardua tarea que conlleva varios años de mucho esfuerzo y dedicación, y aún con ello no hubiese sido posible llevar a buen término esta tesis sin haber contado con la ayuda de muchas personas expertas en diferentes materias que me han ido asesorando y brindando su apoyo en diferentes etapas de su desarrollo. Quiero por tanto dedicar a todas ellas unas palabras de agradecimiento.

En primer lugar quiero agradecer al Dr. Mariano Sidrach de Cardona y al Dr. Jesús Eduardo Carretero Rubio la confianza que depositaron en mi para llevar a cabo este proyecto de investigación, por iluminarme el camino en el campo de la fotovoltaica, por todos sus esfuerzos, su comprensión, dedicación, paciencia, entusiasmo y por todo lo que me han transmitido y enseñado. Trabajar con ellos me ha enseñado mucho más de todo lo que se puede expresar con palabras. Ha sido un placer compartir tantas horas de labor para llegar a la etapa final de este trabajo.

En segundo lugar, quiero dedicar unas palabras de agradecimiento a Michel Piliouguine Rocha, por toda la ayuda prestada y por los sabios consejos que me ha dado durante el desarrollo de esta tesis.

Tampoco olvido a los miembros del laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga. Ellos me han orientado e ilustrado en materias en las que me estaba iniciando cuando empecé a desarrollar este proyecto de tesis doctoral.

Quiero agradecer a Llanos Mora López la confianza que ha depositado en mí, por contar conmigo e incluirme en sus proyectos de investigación, así como por aceptarme entre el grupo de expertos con los que cuenta habitualmente.

En mi ámbito familiar, mi esposo y mis hijos han vivido en primera persona todo el esfuerzo y dedicación que he puesto para llevar a cabo este proyecto. Ellos han sabido comprender siempre que ese esfuerzo merecería la pena cuando llegase al final y han sabido disculparme cuando en muchas ocasiones no he estado a la altura de sus expectativas y sus demandas. Por ello, Pepe, Daniel y Raquel, muchas gracias por vuestra comprensión y apoyo incondicional, por la ayuda que me habéis prestado para llegar al final del camino, en especial en esta última etapa.

Resumen

La energía solar fotovoltaica ha adquirido en los últimos años una presencia cada vez mayor en el mercado mundial de producción energética y, para que realmente sea una forma de producción energética competitiva, es importante abaratar costes y poder tener una estimación fiel de la energía que se puede producir en una instalación fotovoltaica antes de su localización, para así poder tomar decisiones sobre la ubicación y aplicación de las tecnologías más adecuadas.

Son varias las tecnologías presentes en el mercado fotovoltaico actual y de todas ellas, la de silicio policristalino es la que está más extendida, siendo sobre la que más se ha investigado y analizado su comportamiento. Actualmente existen nuevas tecnologías de módulos fotovoltaicos que están adquiriendo una cuota de mercado cada vez más significativa, entre las que destacan las de lámina delgada.

Para poder realizar una estimación de la energía que puede producir un módulo, es de vital importancia conocer la temperatura de operación del mismo. Por ese motivo, en este trabajo se analiza la aplicabilidad de modelos de predicción de temperatura de operación de módulos existentes en la literatura a las nuevas tecnologías, se proponen nuevos modelos de predicción de temperatura y se utilizan en escalas temporales diferentes para poder comprobar la eficacia de los mismos. El estudio se realiza con módulos trabajando en condiciones de sol real, pues es así como funcionarán las instalaciones fotovoltaicas de producción energética.

En este trabajo se ha comprobado que se obtienen mejores resultados en la predicción horaria de temperatura de operación de módulos que en la predicción de temperatura instantánea.

También se ha comprobado que uno de los modelos propuestos, el de dos coeficientes, consigue resultados similares a otros modelos existentes previamente en la literatura, pese a la sencillez de cálculo del mismo. La aplicación de este modelo propuesto para la predicción de la producción energética podría ser de gran ayuda para una estimación fiel previa a la instalación de una planta fotovoltaica. El hecho de que sea aplicable a nuevas tecnologías fotovoltaicas de lámina delgada como el telururo de cadmio, el silicio amorfo y el tándem silicio amorfo y microcristalino es un valor añadido.

Poder predecir con precisión la producción energética es lo que hará que la energía solar fotovoltaica se profile como una energía competitiva, y adquiera una posición dominante entre las energías renovables.

Índice

1. Introducción	1
1.1. La energía solar fotovoltaica en la actualidad	2
1.2. Revisión de las tecnologías fotovoltaicas	6
1.3. Elementos que influyen en la generación FV.	9
1.4. Estado del arte	15
1.5. Limitaciones del estado del arte y objetivos del trabajo desarrollado.	20
1.6. Estructura de la tesis	21
2. Metodología	23
2.1. Módulos fotovoltaicos utilizados.	24
2.2. Campaña de medidas. Registro y selección de los datos	26
2.3. Mediciones realizadas. Instrumentación	30
2.4. Metodología	33
2.5. Métricas utilizadas para validar los modelos	35
3. Descripción de los modelos analizados	37
3.1. Descripción de los modelos analizados	38
3.1.1. Modelo de balance de energía de Mattei	38
3.1.2. Modelo de Ross.	41
3.1.3. Modelo exponencial de King.	42
3.1.4. Modelo de Servant.	44
3.1.5. Modelo NOCT	45
3.1.6. Modelo eléctrico	46
3.2. Nuevos modelos propuestos.	50
3.2.1. Modelo NOCT_1p.	50
3.2.2. Modelo NOCT_2p.	51

4. Resultados obtenidos con los modelos instantáneos	53
4.1. Coeficientes obtenidos para los modelos instantáneos existentes	54
4.1.1. Modelo de balance de energía de Mattei	54
4.1.2. Modelo de Ross	55
4.1.3. Modelo exponencial de King	56
4.1.4. Modelo de Servant	57
4.1.5. Modelo eléctrico	58
4.2. Coeficientes obtenidos para los modelos instantáneos propuestos.	59
4.2.1. Modelo NOCT_1p	59
4.2.2. Modelo NOCT_2p	60
4.3. Análisis global de los coeficientes.	60
4.4. Resultados de la predicción de temperatura con modelos instantáneos	64
4.4.1. Módulo de tecnología de telururo de cadmio	66
4.4.2. Módulo de tecnología de silicio amorfo	78
4.4.3. Módulo de tecnología de silicio amorfo/microcristalino.	91
4.4.4. Módulo de tecnología de silicio multicristalino.	102
4.4.5. Análisis global de la validación con modelos instantáneos	111
5. Resultados obtenidos con los modelos horarios	117
5.1. Introducción	118
5.2. Coeficientes para los modelos horarios	118
5.3. Resultados de la predicción de temperatura con modelos horarios	121
5.3.1. Módulo de tecnología de telururo de cadmio	123
5.3.2. Módulo de tecnología de silicio amorfo.	136
5.3.3. Módulo de tecnología de silicio amorfo/microcristalino.	148
5.3.4. Módulo de tecnología de silicio multicristalino.	158
5.3.5. Análisis global de la validación con modelos horarios	168
5.4. Análisis de los valores medios diarios de la temperatura de los módulos . . .	185

5.4.1. Resultados obtenidos con los datos del año 2011	185
5.4.2. Resultados obtenidos con los datos del año 2012	198
6. Conclusiones y líneas futuras de investigación	211
6.1. Conclusiones	212
6.2. Líneas futuras de investigación	215
7. Bibliografía	217

Índice de figuras

I.1. Evolución de la capacidad fotovoltaica acumulada a nivel mundial. Datos de Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019	3
I.2. Evolución de la capacidad fotovoltaica anualmente instalada desde 2000 a 2014. Datos de Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019	4
I.3. Evolución de la capacidad fotovoltaica anual instalada hasta finales de 2014 en Europa. Datos de Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019.	5
I.4. Variación de la curva característica intensidad – tensión ($I-V$) de un módulo fotovoltaico al variar la irradiancia (módulo de tecnología mc-Si, PPMP=195 Wp, 54 células).	11
I.5. Variación de la curva característica potencia – tensión ($P-V$) de un módulo fotovoltaico al variar la irradiancia (módulo de tecnología mc-Si, PPMP=195 Wp, 54 células).	11
I.6. Variación de la curva característica intensidad – tensión ($I-V$) de un módulo fotovoltaico al variar la temperatura del módulo, bajo la exposición a una irradiancia solar constante de $700 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ (módulo de tecnología mc-Si, PPMP = 195 Wp, 54 células)	13
I.7. Variación de la curva característica potencia – tensión ($P-V$) de un módulo fotovoltaico al variar la temperatura del módulo, bajo la exposición a una irradiancia solar constante de $700 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ (módulo de tecnología mc-Si, PPMP = 195 Wp, 54 células)	13
II.1. Porcentaje de la producción fotovoltaica anual por tecnologías. Fuente: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2015	24
II.2. Porcentaje de la cuota de mercado de las distintas tecnologías de lámina delgada. Fuente: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2015	24

II.3. Interfaz gráfica del sistema de medidas implementado en el laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga. Imagen de algunos de los datos eléctricos registrados por el sistema.	27
II.4. Interfaz gráfica del sistema de medidas implementado en el laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga. Imagen de algunos de los datos meteorológicos registrados por el sistema.	27
II.5. Interfaz gráfica del sistema de medidas implementado en el laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga. Imagen de los datos registrados por el sistema para la curva <i>I-V</i>	30
IV.1. Distribución porcentual de los datos registrados durante el periodo de medidas. Valores instantáneos de 2011 y de los 31 días aleatorios de 2012	65
IV.2. 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 instantáneos del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C	70
IV.3. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores instantáneos de 2011	72
IV.4. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura del módulo para la tecnología de telururo de cadmio durante el periodo de medidas	75
IV.5. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores instantáneos de 2012	76
IV.6. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos instantáneos del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C	82

IV.7. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores instantáneos de 2011	84
IV.8. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura del módulo para la tecnología de silicio amorfo durante el periodo de medidas	87
IV.9. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores instantáneos de 2012	89
IV.10. 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 instantáneos del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C	94
IV.11. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores instantáneos de 2011	96
IV.12. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura del módulo para la tecnología de silicio amorfo/microcristalino durante el periodo de medidas.	98
IV.13. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de amorfo/microcristalino usando valores instantáneos de 2012	100
IV.14. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos instantáneos del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C	104
IV.15. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores instantáneos de 2011	106
IV.16. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura de módulo para la tecnología de silicio multicristalino durante el periodo de medidas.	108

IV.17. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores instantáneos de 2012	110
V.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 .	122
V.2. 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	128
V.3. 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	130
V.4. 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	133
V.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 .	135
V.6. 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	140
V.7. 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	142
V.8. 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	145

V.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. . . .	147
V.10. 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	150
V.11. 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.	152
V.12. 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.	155
V.13. 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	157
V.14. 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	160
V.15. 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.	162
V.16. 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.	165

V.17. 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	167
V.18. 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	171
V.19. 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	172
V.20. Valores experimentales medios horarios de la irradiación, de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento con su correspondiente desviación estándar de los 31 días seleccionados	174
V.21. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de telururo de cadmio	175
V.22. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de silicio amorfo	176
V.23. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de silicio amorfo/microcristalino	177
V.24. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de silicio multicristalino	178
V.25. Gráfica de valores instantáneos de irradiancia y velocidad del viento para el día 26 de febrero de 2012.	180

V.26. 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	182
V.27. Gráficas de la desviación de temperatura de cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012.	184
V.28. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios diarios de 2011.	188
V.29. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios diarios de 2011.	190
V.30. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios diarios de 2011	192
V.31. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios diarios de 2011.	194
V.32. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.	199
V.33. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT_1p y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	200
V.34. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT_2p y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	201
V.35. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de Ross y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	202

V.36. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de Servant y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	203
V.37. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de King y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	204
V.38. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de Mattei y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	205
V.39. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo Eléctrico_G y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	206
V.40. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo Eléctrico_Isc y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012	207

Índice de tablas

I.1. Mercado Fotovoltaico Europeo en 2014	6
II.1. Características eléctricas de los módulos utilizados	25
II.2. Valores medios diarios mensuales y anuales de la irradiación, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento y sus desviaciones estándar	29
II.3. Principales características de los sensores meteorológicos	32
IV.1. Valores de los coeficientes del modelo Mattei para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste	54
IV.2. Valores del coeficiente del modelo de Ross para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.	55
IV.3. Valores del coeficiente de Ross según diferentes autores	56
IV.4. Valores de los coeficientes del modelo exponencial de King para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste	56
IV.5. Coeficientes para predecir la temperatura de los módulos en función de la irradiancia, de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento. (Valores propuestos por King. et al.)	57
IV.6. Valores de los coeficientes de la ecuación del modelo de Servant para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.	57
IV.7. Coeficientes determinados por Servant.	57
IV.8. Valores de los parámetros usados para ajustar la ecuación del modelo eléctrico	58

IV.9. Valores de los coeficientes del modelo Eléctrico_G para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste	58
IV.10. Valores de los coeficientes del modelo Eléctrico_Isc para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste	59
IV.11. Valores del coeficiente a del modelo propuesto NOCT_1p para el cálculo de temperatura de operación del módulo usando valores instantáneos y R^2 del ajuste	59
IV.12. Valores de los coeficientes b y c del modelo propuesto NOCT_2p para el cálculo de la temperatura de operación del módulo usando valores instantáneos y R^2 del ajuste.	60
IV.13. Coeficientes de los ajustes con valores instantáneos de las variables	61
IV.14. Tabla de valores medios y desviación estándar de los datos registrados en el periodo de medida de los años 2011 y 2012.	66
IV.15. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de telururo de cadmio	66
IV.16. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de telururo de cadmio con valores instantáneos del año 2011	69
IV.17. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de telururo de cadmio	74
IV.18. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio amorfo	79
IV.19. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio amorfo con valores instantáneos del año 2011	80
IV.20. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de silicio amorfo	86

IV.21. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino	91
IV.22. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio amorfo/microcristalino con valores instantáneos del año 2011	93
IV.23. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino	98
IV.24. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio multicristalino	102
IV.25. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio multicristalino con valores instantáneos del año 2011	103
IV.26. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de silicio multicristalino	108
IV.27. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 . . .	112
V.1. Coeficientes de los ajustes con valores horarios de las variables	119
V.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	123
V.3. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de telururo de cadmio	123
V.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	126
V.5. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de telururo de cadmio	132

V.6. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de silicio amorfo	136
V.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	139
V.8. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de silicio amorfo	144
V.9. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino	148
V.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	150
V.11. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino	154
V.12. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 para el módulo de silicio multicristalino	158
V.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	159
V.14. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2012 para el módulo de silicio multicristalino	164
V.15. Tabla de resultados de predicción con valores medios horarios del año 2011 .	169
V.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)	172
V.17. Tabla de resultados de la comparación de los valores medios diarios de temperatura de 2011	186

V.18. Tabla de comparación de la distribución de la serie de la temperatura media diaria registrada y la de la temperatura media diaria calculada a partir de las horarias predichas por cada uno de los modelos, indicado si la distribución es igual o no 196

Nomenclatura

Lista de Acrónimos

a-Si: Silicio amorfo

a-Si / μ c-Si: Silicio amorfo/microcristalino

AM: Masa de aire (del inglés, Air Mass)

ASTM: Asociación americana para el ensayo de materiales (del inglés, American Society for Testing Materials)

CdTe: Teluro de cadmio

CEM o STC: Condiciones estándar de medida

CIGS: Diseleniuro de cobre e indio con galio incorporado (del inglés, Copper Indium Gallium Selenide)

CIS: Diseleniuro de cobre e indio (del inglés, Copper Indium Selenide)

DSSC: Células solares con Tinte Fotosensible (del inglés, Dye-Sensitized Solar Cells)

EPIA: Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (del inglés, European Photovoltaic Industry Association)

EVA: Encapsulante Etil Vinil Acetato

FV: Fotovoltaico-s/Fotovoltaica-s

IEC: Comisión Electrotécnica Internacional (del inglés, International Electrotechnical Commission)

INOCT: Temperatura de Operación Nominal de la Célula en distintas configuraciones de instalación (del inglés, Installed Nominal Operating Conditions Temperature)

K-S: Kolmogorov-Smirnov

MAE: Valor medio del error absoluto (Mean Absolute Error)

MAPE: Error absoluto medio porcentual (Mean Absolute Percentage Error)

mc-Si: Silicio multicristalino

NMOT: Temperatura de Operación Nominal del Módulo (del inglés, Nominal Module Operating Temperature)

NOCT: Temperatura de Operación Nominal de la Célula (del inglés, Nominal Operating Cell Temperature)

PMMA: Encapsulante polimetilmetacrilato

ROMT: Temperatura de Operación Nominal del Módulo en funcionamiento Real (del inglés, Realistic nOminal Module Temperature)

STD: Desviación estándar

TD: Desviación de la temperatura

Lista de símbolos y términos

a : Coeficiente del modelo propuesto NOCT_1p

a_h : Coeficiente del modelo horario NOCT_1p propuesto a partir del modelo instantáneo

α : Coeficiente de variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura

α_t : Conductividad térmica

b : Coeficiente del modelo propuesto NOCT_2p

b_h : Coeficiente del modelo horario NOCT_2p propuesto a partir del modelo instantáneo

β : Coeficiente de variación del voltaje de circuito abierto con la temperatura

β_h : Valor horario del coeficiente de variación del voltaje de circuito abierto con la temperatura

$\beta_{V_{oc}}(G_{ef})$: Coeficiente de temperatura en circuito abierto en función de la irradiancia efectiva

$\beta_{V_{oc}(STC)}$: Coeficiente de temperatura del módulo a la tensión de circuito abierto y a la irradiancia en condiciones estándar de medidas (1000 W/m²)

c : Coeficiente del modelo propuesto NOCT_2p

c_h : Coeficiente del modelo horario NOCT_2p propuesto a partir del modelo instantáneo

curva I-V: Curva tensión-corriente

c_α : Coeficiente de absorción de las células

$c_\alpha\tau$: Producto del coeficiente de absorción por la transmitancia

$(c_\alpha\tau)_h$: Valor horario del producto del coeficiente de absorción por la transmitancia

γ : Coeficiente de variación de la potencia máxima con la temperatura

d_S : Coeficiente del modelo de Servant

d_{S-h} : Coeficiente del modelo horario de Servant propuesto a partir del modelo instantáneo

$\delta(T_c)$: Voltaje térmico a la temperatura T_c

Δ : Incremento

e : Valor absoluto de la carga del electrón

e_s : Coeficiente del modelo de Servant

e_{s-h} : Coeficiente del modelo horario de Servant propuesto a partir del modelo instantáneo

f_s : Coeficiente del modelo de Servant

f_{s-h} : Coeficiente del modelo horario de Servant propuesto a partir del modelo instantáneo

G : Irradiancia

G_0 (STC): Irradiancia en condiciones estándar de medidas (1000 W/m²)

G_e : Irradiancia eficaz

G_{ef} : Irradiancia efectiva

η : Rendimiento

η_r : Rendimiento de referencia del módulo a la temperatura de referencia de 25 °C y a una irradiancia de 1000 W/m²

H : Irradiación horaria

H_0 : Irradiación horaria en condiciones estándar de medida

H_{ef} : Valor horario de la irradiación efectiva

I_{MAX} : Corriente en el punto de máxima potencia

I_{sc} (STC): Corriente de cortocircuito en condiciones estándar de medida

I_{sc} : Corriente de cortocircuito

k : Constante de Boltzman

k_R : Coeficiente de Ross

k_{R-h} : Coeficiente del modelo horario de Ross propuesto a partir del modelo instantáneo

k_{th} : Coeficiente de pérdidas térmicas

m : Coeficiente del modelo exponencial de King

m_h : Coeficiente del modelo horario de King propuesto a partir del modelo instantáneo

m_{K-h} : Coeficiente del modelo horario de King propuesto a partir del modelo instantáneo, equivalente al correspondiente en la ecuación del modelo instantáneo

m_d : Coeficiente de idealidad del diodo

m_{d-h} : Valor horario del coeficiente de idealidad del diodo

μ : Coeficiente de pérdidas por irradiancia

n : Coeficiente del modelo exponencial de King

n_h : Coeficiente del modelo horario de King propuesto a partir del modelo instantáneo

n_{K-h} : Coeficiente del modelo horario de King propuesto a partir del modelo instantáneo, equivalente al correspondiente en la ecuación del modelo instantáneo

$n_{\beta_{Voc}}$: Coeficiente de la dependencia de la irradiancia efectiva con el coeficiente de temperatura en circuito abierto

N_s : Número de células en serie del módulo fotovoltaico

p : Coeficiente del modelo de Mattei que define el coeficiente de intercambio de calor del módulo

p_h : Coeficiente del modelo horario de Mattei propuesto a partir del modelo instantáneo

P_{MAX} : Potencia en el punto de máxima potencia

q : Coeficiente del modelo de Mattei que define el coeficiente de intercambio de calor del módulo

q_h : Coeficiente del modelo horario de Mattei propuesto a partir del modelo instantáneo

T_0 : Temperatura ambiente en condiciones estándar de medida (25 °C)

T_{amb} : Temperatura ambiente

T_{amb-h} : Valor horario de la temperatura ambiente

T_c : Temperatura de la célula

$T_{h-medida}$: Temperatura horaria del módulo medida

$T_{h-predicha}$: Temperatura horaria del módulo predicha por cada uno de los modelos

T_m : Temperatura del módulo

T_{m-h} : Valor horario de la temperatura del módulo

T_{medida} : Temperatura medida

$T_{predicha}$: Temperatura predicha por un modelo

T_r : Temperatura de referencia del módulo (25 °C)

τ : Transmitancia

U_{pv} : Coeficiente convectivo de intercambio de calor

V_{MAX} : Tensión en el punto de máxima potencia

V_{oc} : Tensión de circuito abierto

V_{oc-h} : Valor horario de la tensión de circuito abierto

V_{oc} (STC): Tensión de circuito abierto en condiciones estándar de medida

V_{oc-h} (STC): Valor horario de la tensión de circuito abierto en condiciones estándar de medida

W : Velocidad del viento

W_1 : Velocidad de referencia del viento (1 m/s)

W_h : Valor horario de la velocidad de referencia del viento (1 m/s)

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se expone el estado actual de la energía solar fotovoltaica, realizando una revisión de las tecnologías fotovoltaicas para contextualizar el trabajo desarrollado.

Se lleva a cabo un repaso de los elementos que influyen en la producción energética de los módulos y del efecto de cada uno sobre la misma.

Además, se hace una revisión de los conocimientos existentes en la literatura sobre los modelos de predicción de la temperatura de operación de los módulos y las limitaciones que presentan.

Por último se indica cuáles son los objetivos y se presenta la estructura del trabajo desarrollado.

1.1. LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA ACTUALIDAD

El uso de fuentes energéticas no contaminantes se ha convertido en una de las prioridades a nivel mundial como consecuencia del cambio climático, que está asociado a los gases de efecto invernadero que generan las fuentes convencionales de energía de origen fósil, Panwar et al. (2010). Todos los países industrializados y emergentes dedican grandes recursos en la investigación para utilizar las fuentes de energía renovables de la forma más eficiente posible, Baños et al. (2011).

Las fuentes de energía renovable se caracterizan por ser inagotables y por presentar un reducido impacto ambiental. De entre todas las fuentes de energías renovables, la energía fotovoltaica es la tercera más importante en términos de capacidad global instalada, tras la energía hidroeléctrica y la eólica.

La energía solar fotovoltaica ha experimentado en los últimos años un fuerte crecimiento. Atendiendo a los datos del informe publicado por el Global Market Outlook for Solar Power / 2015-2019 de la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA), este crecimiento ha ido evolucionando de forma exponencial, presentando las siguientes cifras: a finales de 2009 la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial era de más de 23 GW; un año después alcanzó los 40.3 GW; a finales de 2011 los 70.5 GW; en 2012 llegó hasta los 100 GW; en 2013 fue de 138.9 GW; y en el pasado año llegó hasta 178 GW. Véase Figura I.1.

En la actualidad, la energía solar cubre más del 1% de la demanda de electricidad mundial, lo que equivale a un volumen de energía suficiente para cubrir las necesidades anuales de unos 58 millones de hogares europeos, o a la electricidad generada por 33 grandes centrales de carbón de 1 GW.

Europa ha sido líder de la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial, aunque en 2013 pierde su liderazgo tras más de una década con él, y continúa sin recuperarlo en 2014, en parte influido por las políticas de los gobiernos en las que los apoyos y los incentivos a las energías renovables no son una prioridad.

Hasta 2011 Europa contaba con el 74% de las instalaciones fotovoltaicas mundiales, en 2012 pasó a tener solo el 55% y en 2013 tan solo el 29%, año en el que el primer puesto fue ocupado por China, con una potencia fotovoltaica instalada de 11.8 GW, seguido de Japón con 6.9 GW y de EE. UU. con 4.8 GW (véase la Figura I.2). En 2014, los países líderes son China, con 10.6 GW de capacidad fotovoltaica instalada y Japón con 9.6 GW. Europa ocupa el tercer puesto en el ranking con unos 7 GW y EE. UU. con 6.5 GW le sigue muy de cerca. Aun así, en la Figura I.1, puede apreciarse que Europa juega un papel predominante con más de 88 GW instalados a final de 2014.

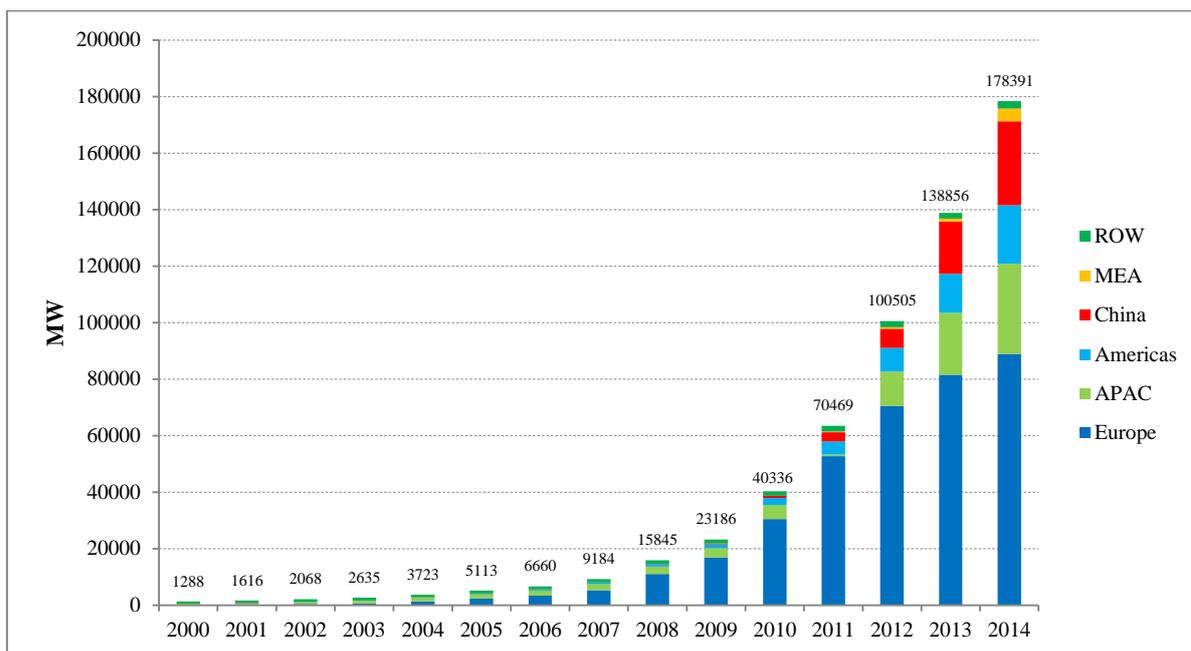


Figura I.1. Evolución de la capacidad fotovoltaica acumulada a nivel mundial.

(Leyenda: ROW = Rest of the world; MEA=Middle East and Africa; APAC=Asia Pacific)

Fuente: Elaboración propia con datos de Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019.

El crecimiento a nivel mundial de las instalaciones fotovoltaicas hará que esta tecnología de producción de electricidad se implante definitivamente como fuente de producción energética, Lee y Zhong (2014). Cálculos moderadamente optimistas indican que para el año 2020 se pueden alcanzar los 540 GW instalados a nivel mundial (EPIA 2015-19).

La Unión Europea ha creado un compromiso común de producir un 20% de toda la energía consumida mediante fuentes de energía renovables, a la vez que reduce un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2020, Fouquet (2013).

En Europa, la capacidad instalada ha estado dominada por Alemania, Italia y Francia. Hasta el año 2013 Alemania siempre había sido líder en este campo y en producción. En 2013, Alemania era el líder en producción con 3.3 GW, seguido por Reino Unido con 1.5 GW, Italia con 1.4 GW, Rumanía con 1.4 GW y Grecia con 1.04 GW. Pero, por primera vez, en 2014 el Reino Unido es líder en el desarrollo de energía solar en Europa, con 2.4 GW de capacidad instalada, seguido de Alemania, con 1.9 GW y Francia, con 927 MW.

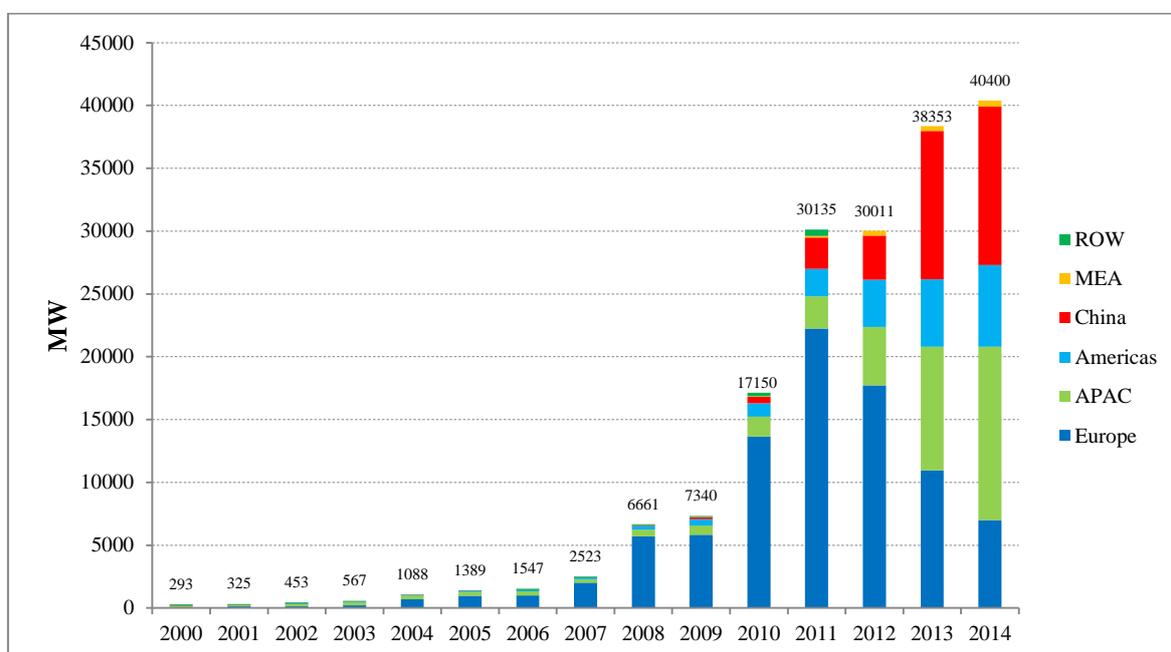


Figura I.2. Evolución de la capacidad fotovoltaica anualmente instalada desde 2000 a 2014.

(Leyenda: ROW = Rest of the world; MEA=Middle East and Africa; APAC=Asia Pacific)

Fuente: Elaboración propia con datos de Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019.

Según Jäger-Waldau et al. (2011), España tuvo una fuerte entrada en el 2008, año en el que junto a Alemania lideraba el mercado de producción (Figura I.3), pero no ha seguido creciendo al mismo ritmo, por lo que su puesto en el ranking de capacidad instalada ha descendido hasta el cuarto puesto en 2014 entre los países europeos, como

puede apreciarse en la Tabla I.1. En el ranking mundial, España sigue ocupando un puesto entre los diez primeros países con mayor capacidad fotovoltaica acumulada a finales de 2014, según publica EurObserv'ER – Photovoltaic Energy Barometer en abril de 2015.

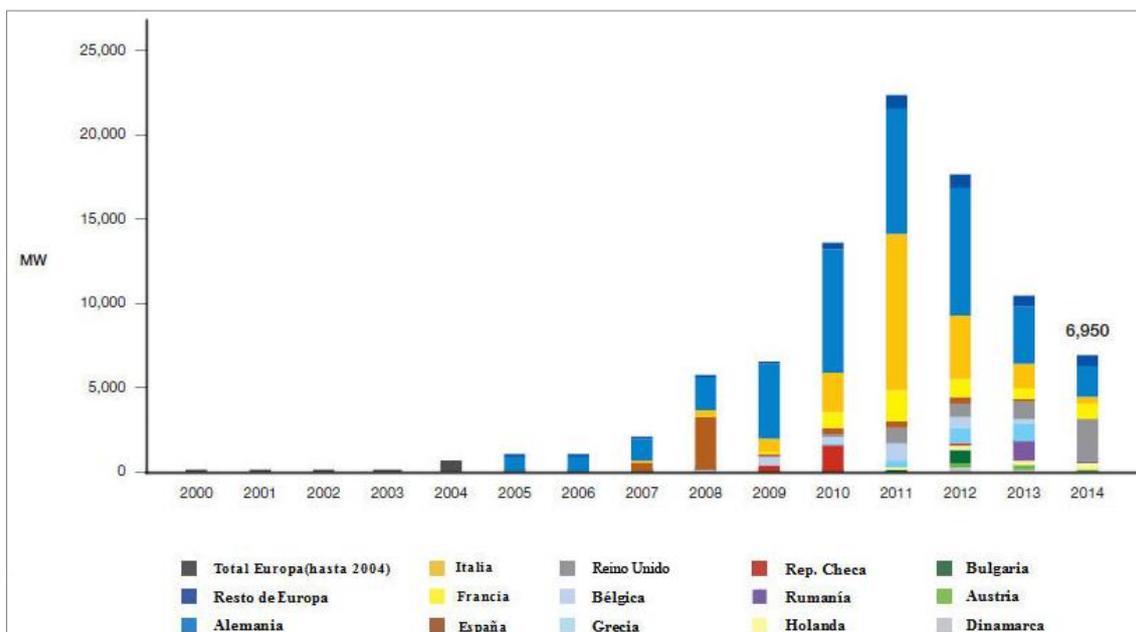


Figura I.3. Evolución de la capacidad fotovoltaica anual instalada hasta finales del 2014 en Europa.

Fuente: Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019.

Como resultado de esta tangible capacidad instalada, la energía fotovoltaica ha empezado a cubrir un porcentaje significativo de la demanda de electricidad en varios países europeos. En 2013 la energía solar fotovoltaica cubrió el 7.5% de la demanda eléctrica de Italia y Grecia, el 6.7% de la demanda en Alemania y el 3% de la demanda en España.

La mayoría de estos sistemas están conectados a la red eléctrica, que la utilizan para evacuar toda la energía generada.

Tabla I.1. Mercado Fotovoltaico Europeo en 2014.

Fuente: Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2019

	Capacidad Anual Instalada 2014 (MW DC)	Capacidad Acumulada 2014 (MW DC)
Alemania	1898	38235
Italia	385	18313
Francia	927	5632
España	22	5388
Reino Unido	2402	5230
Bélgica	65	3104
Grecia	17	2596
Republica Checa	2	2134
Rumania	72	1223
Suiza	320	1046
Holanda	400	1042
Bulgaria	2	1022
Austria	140	767
Dinamarca	47	608
Eslovaquia	0,4	524
Portugal	115	414
Turquía	40	58
Polonia	27	34
Croacia	13	33
Malta	0,4	23

1.2. REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS

Como se ha comentado en el apartado anterior, la conciencia por el cuidado del medio ambiente unida a la creciente demanda de energía, hace que las energías renovables tengan un gran futuro. Entre todas las energías renovables, la más abundante, inagotable y limpia es la energía solar. La potencia procedente del sol es aproximadamente de $1.8 \cdot 10^{18}$ MW, cantidad mucho mayor a toda la demandada, siendo la energía fotovoltaica la mejor forma de conversión directa de la energía procedente del sol en energía eléctrica. Por todo esto, la investigación en el campo de la tecnología fotovoltaica está muy extendida a nivel mundial. Son muchos los autores que publican artículos sobre nuevos avances en esta materia. Parida et al. (2011), hace una revisión

exhaustiva de la mayoría de las tecnologías fotovoltaicas, de su comportamiento y aplicaciones.

Según Bagnall y Boreland (2008), la tecnología fotovoltaica puede considerarse subdividida en tres generaciones. La primera generación está basada en obleas de silicio. La segunda generación ha sido desarrollada para abaratar costes y reducir el tiempo de retorno energético y está basada en dispositivos de lámina delgada. La tercera generación intenta conseguir grandes eficiencias por el mismo coste de producción que las anteriores generaciones.

La tecnología fotovoltaica tuvo su comienzo en 1839, cuando el físico Alexandre-Edmund Becquerel observó la corriente eléctrica que surgía cuando la luz producía ciertas reacciones químicas. En ese mismo siglo, en 1876, Adams y Day observaron el efecto fotovoltaico en el selenio. Pero hasta 1954, no se desarrolló la primera célula sólida de silicio, que en aquel entonces tenía tan solo un 6% de eficiencia. El primer uso que se dio a la tecnología fotovoltaica fue la puesta en órbita del satélite Vanguard 1 en 1958. Desde entonces, la investigación en el campo de la fotovoltaica siempre ha ido creciendo exponencialmente y con un objetivo común: conseguir el máximo rendimiento al menor coste posible (El Chaar et al., 2011).

La primera generación de la tecnología fotovoltaica está realizada con cristales de silicio. Esta generación lidera el 80% del mercado, por lo que constantemente se investiga y desarrolla para mejorar sus prestaciones y eficiencia. En esta generación encontramos células monocristalinas y multicristalinas. Los módulos monocristalinos son los más usados y están basados en la unión p-n. Para producirlos se usa el método de Czochralski. El proceso de fabricación es costoso y conlleva un gran consumo energético, por lo que el tiempo de retorno energético de los módulos de esta tecnología es elevado y una de las cuestiones más debatidas. La máxima eficiencia alcanzada por esta tecnología ha alcanzado valores del 23% en condiciones estándar de medida. Los esfuerzos de la industria fotovoltaica por reducir costes han conducido el desarrollo de esta industria hacia nuevas técnicas de cristalización y al desarrollo de células multicristalinas, las cuales tienen el inconveniente de tener una menor eficiencia que las monocristalinas (llegan a alcanzar tan solo un 15%), pero que están alcanzado mayores cuotas de mercado que las de silicio monocristalino.

La segunda generación es la de células de lámina delgada. Esta generación reduce costes y material y está basada en depositar finas capas de ciertos materiales (de varias micras de espesor) sobre bases-soporte de cristal, de acero inoxidable o de plástico (lo que permite conseguir módulos flexibles) y en general sobre materiales de bajo coste. Sin embargo, la eficiencia conseguida por las células de esta tecnología es inferior a la de las cristalinas. Esta tecnología se está abriendo camino en el mercado fotovoltaico de forma comercialmente bastante significativa, por lo que está siendo ampliamente estudiada. Según cálculos de la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica, esta tecnología alcanzará en 2020 el 33% de la producción mundial. Otra cuestión a tener en cuenta como valor añadido de estas tecnologías es que el tiempo de retorno energético es bastante menor que el de los módulos de silicio.

En esta generación encontramos tres clases de células de lámina delgada:

1.- Las primeras que fueron desarrolladas fueron las de silicio amorfo. Esta tecnología absorbe mejor el espectro visible que el infrarrojo, alcanzando una eficiencia en laboratorio de un 12%, pero se degrada rápidamente una vez que se expone a la luz solar, estabilizándose en valores comprendidos entre un 4% y un 8%. Esta reducción se debe al efecto de la degradación Staebler-Wronski, ya que como consecuencia de los cambios en las propiedades del silicio amorfo hidrogenado, un 20% de la eficiencia inicial se pierde durante las primeras horas de exposición a la luz natural. Las células tándem de silicio amorfo y de silicio microcristalino alcanzan mayor eficiencia (8-9%) que las de silicio amorfo, dependiendo de la estructura de la célula y del grosor de las capas. Esta primera clase de células de lámina delgada engloba células de silicio amorfo, células tándem de silicio amorfo y microcristalino y células de silicio amorfo de doble y triple unión entre otras.

2.- La segunda clase de células de lámina delgada son las de telururo de cadmio (CdTe). Estas células consiguen mayor eficiencia que las anteriores, llegando hasta un 15% y no sufren degradación inicial por la exposición a la luz. El proceso de fabricación es sencillo y económico y presenta los costes más bajos de las tecnologías fotovoltaicas comercializadas. El mayor problema que presenta esta tecnología es la alta toxicidad del cadmio (aunque esto no es preocupante mientras esté integrado en el encapsulado del módulo fotovoltaico) junto con la escasez del telurio en la naturaleza, lo que puede afectar al coste de los módulos, si bien las reservas de telurio son suficientes para soportar un fuerte incremento de producción sin problemas. Empresas como First Solar

han introducido programas de reciclaje para las instalaciones fuera de servicio para solventar el problema del reciclaje del telurio y a la vez proteger el medio ambiente frente a la toxicidad del cadmio. Esta tecnología es propensa a la degradación, en especial en condiciones de alto calor húmedo, por lo que necesita de un revestimiento adicional para protegerse de tales condiciones.

3.- Por último, la tercera clase de células de lámina delgada son las de diseleniuro cobre indio (CuInSe_2), comúnmente conocidas como CIS (siglas del inglés Copper Indium Selenide) o también CIGS (indio con galio incorporado). Estas células consiguen una mayor eficiencia (20% para las CIGS). El escollo en el desarrollo de esta tecnología es la carestía del indio y el alto coste de producción de los módulos, lo que la hace poco competitiva con respecto a las basadas en tecnología de silicio.

La tercera generación de células fotovoltaicas está en desarrollo o en una fase temprana de comercialización y comprende, entre otras, tecnología fotovoltaica de concentración, células orgánicas y células Gratzel, también llamadas de colorante o DSSC (Dye-sensitized Solar Cells).

1.3. ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA GENERACIÓN FV

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos proporcionan una serie de parámetros característicos de los mismos, entre los que se encuentra su eficiencia. Estos parámetros son calculados bajo condiciones estándar de medidas (STC) y normalmente son obtenidos con simuladores solares.

Frecuentemente se utilizan las condiciones estándar de medida (CEM o STC), que son 1000 W/m^2 de irradiancia, distribución espectral AM1.5, incidencia normal y temperatura de célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Como estas condiciones se alejan bastante de las condiciones reales de operación de los módulos, es común utilizar las condiciones nominales de operación, que se definen para módulos instalados a 45° de la horizontal sobre una estructura abierta bien ventilada, mirando al sur, con velocidad de viento de 1 m/s , irradiancia 800 W/m^2 y temperatura ambiente $20 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura de la célula en estas condiciones se denomina temperatura nominal de operación de la célula y se representa por NOCT.

Pero a partir de estos datos no es posible conocer con exactitud la energía que va a producir un módulo operando en condiciones de sol real, porque esto va a depender de las condiciones climáticas específicas del lugar y de la respuesta espectral de la tecnología de módulo usada, pues la eficiencia del módulo viene dada para unas condiciones ambientales determinadas y varía con las condiciones meteorológicas (Cañete et al., 2013).

La potencia de salida de un sistema fotovoltaico trabajando bajo condiciones reales de operación está influida por muchos factores ambientales. Los tres factores más decisivos en el rendimiento del módulo fotovoltaico son la irradiancia, la distribución del espectro solar y la temperatura del módulo (Katsumata et al., 2010).

La influencia del espectro solar ha sido ampliamente estudiada desde principio de los años 80 y son muchos los autores que han investigado sobre este hecho, algunos de los más recientes y consultados para desarrollar este trabajo son Alonso-Abella et al. (2014), Ichida et al. (2008) y Minemoto et al. (2007).

Según el estudio realizado por Huld et al. (2015) en varias localizaciones en Europa, Asia y Africa, el efecto de la distribución espectral es más acusado en unas tecnologías que en otras. La influencia del espectro solar es generalmente mayor en aquellas tecnologías que presentan un rango espectral estrecho, como las tecnologías de lámina delgada (CdTe). Los autores indican que los factores más determinantes en la eficiencia del módulo son la temperatura de operación del módulo y la irradiancia, aunque también exponen como punto de partida que hay otros factores externos que influyen en la productividad eléctrica del módulo. Uno de estos factores es la reflectancia de los materiales del encapsulado de los módulos, ya que la luz solar no llega directamente a la célula, sino que primero tiene que atravesar las capas frontales del módulo, en las que puede haber pérdidas adicionales por reflexión y absorción. También se producirán pérdidas por el ángulo de inclinación de los paneles (Martin et al., 2001). Otro factor influyente en la eficiencia del módulo es el espectro de la luz incidente y su distribución angular (este efecto se considera de segundo orden en los módulos de silicio cristalino pero pueden tener gran importancia en otros tipos de módulos, como por ejemplo los de concentración).

De entre los factores más influyentes en el rendimiento del módulo, la irradiancia es el factor más determinante en la producción eléctrica del mismo. En función del nivel de irradiancia, se generará más o menos corriente. Cuanto mayor es la irradiancia, mayor es la corriente (véase Figura I.4) y mayor será la potencia generada (Figura I.5).

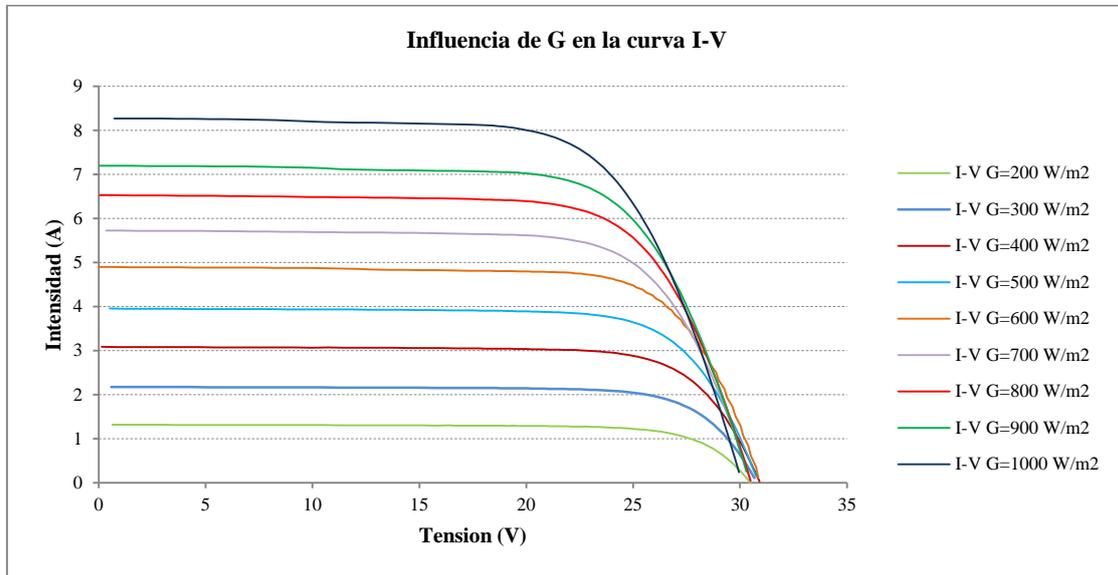


Figura I.4. Variación de la curva característica intensidad – tensión (I-V) de un módulo fotovoltaico al variar la irradiancia (módulo de tecnología mc-Si, $P_{PMP} = 195$ Wp, 54 células).

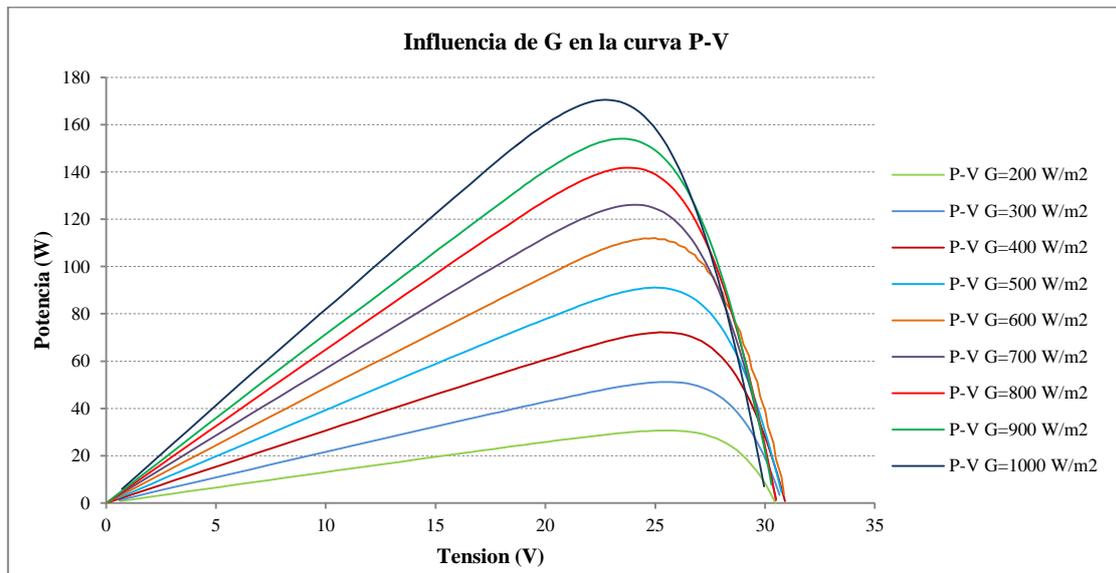


Figura I.5. Variación de la curva característica potencia – tensión (P-V) de un módulo fotovoltaico al variar la irradiancia (módulo de tecnología mc-Si, $P_{PMP} = 195$ Wp, 54 células).

En la Figura I.4 puede observarse que la corriente producida es directamente proporcional a la irradiancia recibida mientras que la tensión a circuito abierto V_{oc} sufre pocas variaciones con los cambios de la radiación solar. En la Figura I.5 se aprecia que la potencia aumenta también con el aumento de la irradiancia.

El efecto de la velocidad del viento en la producción energética de los módulos está analizado en el trabajo desarrollado por Mekhilef et al. (2012). Estos autores analizan también el efecto del polvo y de la humedad en la eficiencia energética de los módulos.

La temperatura del módulo varía con la velocidad del viento, pues éste actúa como refrigerante natural. Kaldellis et al. (2014) analizan el efecto del viento en la temperatura de operación de los módulos y encuentran que se pueden llegar a alcanzar diferencias entre la temperatura ambiente y la temperatura de módulo comprendidas entre 10 °C y 20 °C cuando la velocidad del viento es de 0 m/s.

A su vez, la temperatura de operación del módulo está influida por muchos factores, entre los que caben destacar, principalmente, la irradiancia, la temperatura ambiente y la velocidad del viento (Rouholamini et al., 2014).

En la Figura I.6 puede verse como influye la temperatura de operación del módulo en el rendimiento del mismo: si aumenta la temperatura se reduce el voltaje de circuito abierto, mientras que la corriente de cortocircuito solo aumenta muy levemente, por lo que el impacto de la temperatura de la célula (o la del módulo) es negativo, es decir, produce una disminución de potencia de salida entregada por el módulo FV, como puede observarse en la Figura I.7.

Muchos autores cuantifican las variaciones de I_{sc} y V_{oc} con el incremento de la temperatura del módulo. Así, Andreev et al. (1967) cifran en 0.1%/°C el aumento de I_{sc} y en 0.2 mV/°C el descenso de V_{oc} cuando la temperatura del módulo varía entre 20 y 100°C. Del Cueto (2002), estudia y cuantifica las pérdidas de eficiencia en módulos de distintas tecnologías debidas al efecto de la temperatura.

Así pues, la temperatura de operación de la célula tiene una gran importancia en el rendimiento eléctrico de los módulos. Por este motivo, conocer la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos es importante para poder evaluar las pérdidas por temperatura y poder predecir la energía que se producirá en un periodo de tiempo.

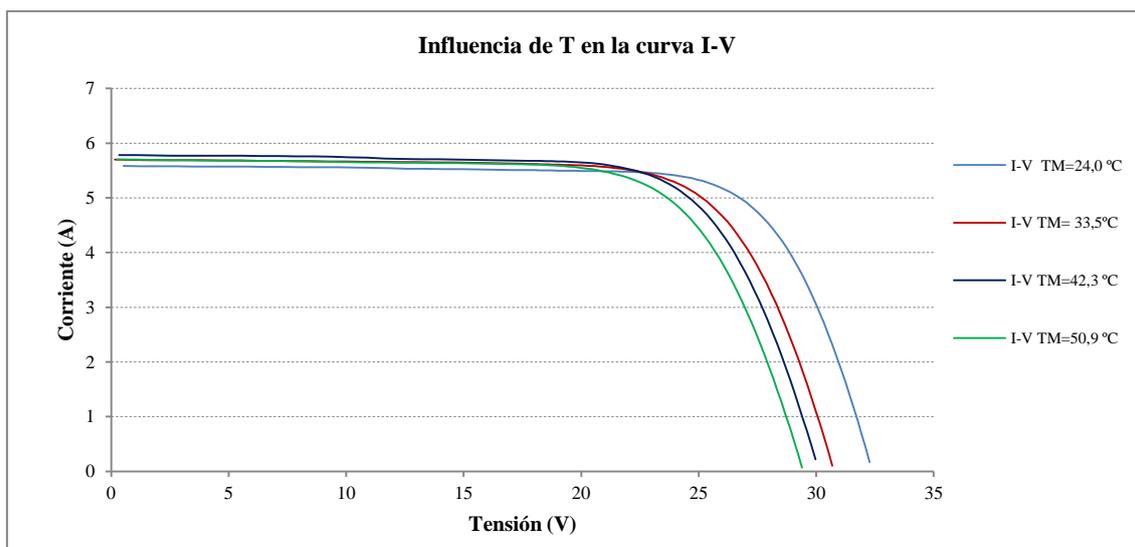


Figura I.6. Variación de la curva característica intensidad – tensión (I-V) de un módulo fotovoltaico al variar la temperatura del módulo, bajo la exposición a una irradiancia solar constante de $700 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ (módulo de tecnología mc-Si, $P_{PMP} = 195 \text{ Wp}$, 54 células).

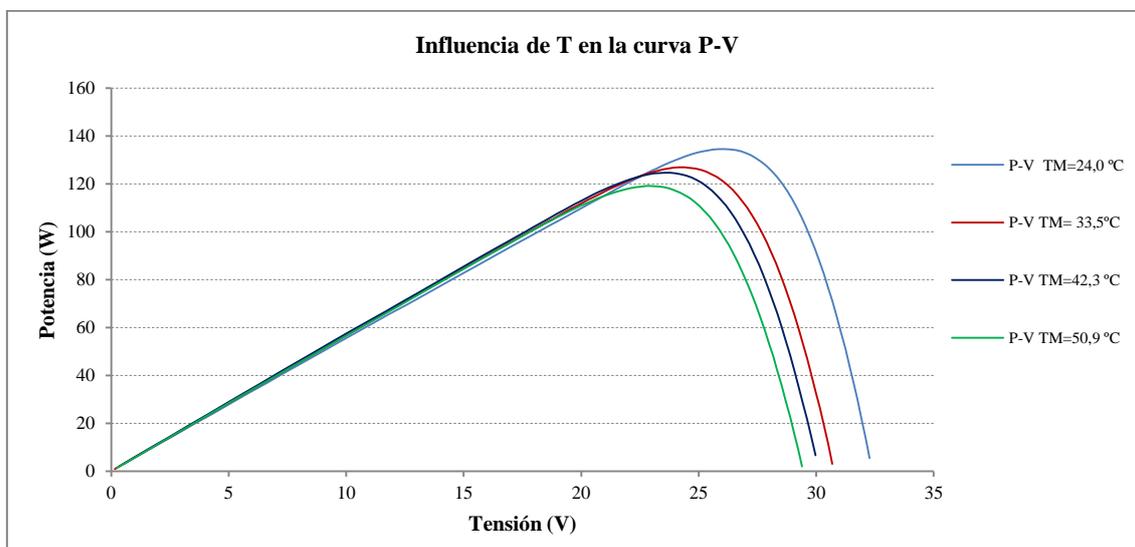


Figura I.7. Variación de la curva característica potencia – tensión (P-V) de un módulo fotovoltaico al variar la temperatura del módulo, bajo la exposición a una irradiancia solar constante de $700 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ (módulo de tecnología mc-Si, $P_{PMP} = 195 \text{ Wp}$, 54 células).

Las tecnologías fotovoltaicas que operan en condiciones de sol real en climas cálidos, presentan temperaturas de operación de módulos por encima de 25 °C (superiores al valor estándar definido en condiciones de laboratorio) por lo que se producen pérdidas en la producción energética. Cada módulo tiene unos coeficientes de pérdidas por temperatura característicos que son proporcionados en las hojas de características técnicas del mismo. Estos coeficientes son tres:

- 1.- La variación de corriente de cortocircuito con la temperatura, comúnmente representado con α . Este parámetro es normalmente positivo y próximo a cero, puesto que la intensidad de corriente de cortocircuito aumenta muy levemente cuando aumenta la temperatura.
- 2.- El coeficiente de variación del voltaje de circuito abierto con la temperatura, β . Este parámetro siempre es negativo, puesto que el voltaje disminuye cuando aumenta la temperatura.
- 3.- Y el coeficiente de variación de la potencia máxima con la temperatura, γ , que también es negativo porque la tensión disminuye mucho más de lo que aumenta la intensidad. En la hoja de características técnicas de los módulos, estos tres parámetros vienen expresados en porcentaje por unidad de temperatura (°C o K), por lo que para conocer esas pérdidas por temperatura hay que conocer previamente la temperatura de los módulos FV.

Por todo lo anteriormente expuesto, conocer la temperatura de trabajo de los módulos FV es muy importante, y depende de varios factores: la tecnología del módulo FV, las condiciones meteorológicas del lugar en que esté instalado el módulo, y su situación (estructura bien ventilada o integrado en alguna edificación).

En este sentido, Jahn et al. (2010) realizan un estudio comparativo de distintos módulos de lámina delgada y de silicio. Los autores calculan los coeficientes de temperatura de todos los módulos analizados y estudian la dependencia de estos coeficientes de temperatura con la irradiancia. Los autores concluyen que el rendimiento energético de los módulos está fuertemente influido por los coeficientes de temperatura de los módulos y por el comportamiento de los módulos cuando trabajan en condiciones de baja irradiancia.

Kamkird et al. (2011) estudian los valores de los coeficientes de temperatura de módulos de tres tecnologías diferentes (silicio policristalino, silicio amorfo y módulos de lámina delgada de silicio amorfo multi-unión) operando en condiciones reales de funcionamiento en climas cálidos y húmedos. Estudian y cuantifican los valores de los mismos y cuánto se alejan de las condiciones estándar de medida cuando operan bajo sol real. Los autores concluyen que las distintas tecnologías tienen resultados diferentes, siendo los módulos de silicio amorfo los que presentan mejor respuesta en términos de corriente, tensión y potencia generada y menores coeficientes de pérdidas bajo las condiciones climáticas de Tailandia.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Son muchos los autores que han propuesto ecuaciones para calcular la temperatura de trabajo de los módulos fotovoltaicos. Skoplaky and Palyvos (2009) realizan una exhaustiva revisión de los métodos propuestos en la literatura para determinarla. Los distintos modelos de cálculo de la temperatura pueden clasificarse en explícitos e implícitos.

Los modelos explícitos están basados en correlaciones experimentales que predicen la temperatura del módulo considerando la temperatura ambiente (T_{amb}), la irradiancia solar total (G) y la velocidad del viento (W).

Entre los modelos explícitos, el más básico y sencillo es el NOCT (las siglas vienen del inglés Nominal Operating Cell Temperature). Este método utiliza la temperatura NOCT de los módulos y ésta se encuentra disponible en las hojas de características técnicas de los módulos que proporcionan los fabricantes (Stultz y Wen, 1977; ASTM, 1999). Pero esta temperatura está definida en unas condiciones meteorológicas concretas (condiciones NOCT, descritas en el apartado anterior) que se alejan bastante de las condiciones reales. La temperatura NOCT se mide siguiendo el estándar definido en la Norma IEC 61215. Aunque se usa este valor como constante, puede estar influido por ciertos factores como el tamaño del módulo y la impedancia de carga, Bharti et al. (2009).

Otros autores, Kuitche et al. (2011), estudian el valor de la temperatura NOCT en módulos de silicio multicristalino (mc-Si), encontrando que el valor de NOCT no es constante y que varía de un mes a otro, de una estación a otra y que también cambia según la localización geográfica de los módulos.

Fuentes (1985), introduce el concepto de INOCT, Installed Nominal Operating Conditions Temperature, que debe calcularse de forma empírica. INOCT puede calcularse a partir de NOCT teniendo en cuenta la configuración adoptada para el montaje de los módulos. Más recientemente, por la importancia y mayor difusión que están tomando las instalaciones fotovoltaicas integradas en edificios, Oh y Tamizhmani (2011), estudian y cuantifican la temperatura INOCT en distintas configuraciones y con distintos tipos de módulos.

Es común usar el método NOCT para determinar la temperatura de un módulo para predecir la producción anual de energía, siendo un hecho que la mayoría de las hojas de características técnicas de módulos de los fabricantes la incluyen. Son muchos los autores que han estudiado ampliamente este método; algunos para definir el rendimiento anual de los módulos (Alonso y Balenzategui, 2004). Aunque el método NOCT puede ayudar a calcular el rendimiento anual del módulo sin demasiado error ($\pm 1.5\%$), no es válido para calcular la temperatura instantánea de éste, y sobre todo cuando los módulos se alejan de estas condiciones ideales de funcionamiento (por ejemplo, módulos integrados en fachadas de edificios).

Muchos autores, entre ellos Nishioka et al. (2003), han estudiado profundamente este hecho y lo han cuantificado: la producción anual de energía crece alrededor de un 1% cuando mejora el coeficiente de pérdidas por temperatura alrededor de $0.1\%/^{\circ}\text{C}$.

Boddaert et al. (2012) proponen un método de cálculo de la temperatura NOCT, pero teniendo en cuenta las pérdidas térmicas debidas al comportamiento de los módulos según la integración de los mismos en la edificación. El modo en el que los módulos están integrados en los edificios no puede ser obviado, pues influye en el balance térmico y, por tanto, también en la producción final de energía. Este autor propone un cálculo más exacto de la temperatura NOCT para obtener una mayor exactitud en la estimación de la producción anual de energía.

La temperatura NOCT puede calcularse teniendo en cuenta las pérdidas térmicas en el módulo debido a la conductividad térmica (α_t) y al rendimiento (η) de los módulos:

$$NOCT = 800 \frac{(\alpha_t - \eta)}{k_{th} + 20} \quad (1.1)$$

donde el coeficiente de pérdidas térmicas k_{th} se calcula a partir de:

$$k_{th}(T_m - T_{amb}) = G(\alpha_t - \eta) \quad (1.2)$$

siendo T_m la temperatura del módulo y T_{amb} la temperatura ambiente.

Puede observarse en este artículo que el coeficiente de pérdidas térmicas k_{th} tiene una fuerte variación según la integración de los módulos en la edificación: estructuras bien ventiladas, módulos montados en tejados de edificios, con cámara de ventilación posterior, sin cámara de ventilación...

Koehl et al. (2011) proponen un sencillo método de cálculo de la temperatura de los módulos que denominan ROMT (Realistic nOminal Module Temperature) basándose en los modelos de King y Faiman. Estudian la eficacia de los modelos con datos experimentales tomados en condiciones climáticas muy diferentes (trópicos, desierto-Negev y zonas de alta montaña-Alpes). Los factores que influyen en la temperatura de operación alcanzada por un módulo fotovoltaico son muy diversos: la tecnología fotovoltaica de sus células, las propiedades ópticas de los componentes de los módulos (tipos de células, vidrios, tipos de encapsulantes y Tedlar), la eficiencia de la célula y el intercambio de calor con el ambiente (dependiendo éste, a su vez, de condiciones atmosféricas y climáticas como la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la irradiancia y además, de la orientación e inclinación del módulo).

Muller et al (2011), realizan una evaluación de la Norma IEC 61215 edición 3. Los autores elaboran una comparativa del procedimiento NMOT (Nominal Module Operating Temperature) frente al NOCT. Aunque el procedimiento NMOT es menos restrictivo que el NOCT para calcular la temperatura NOCT de los módulos, los autores exponen en las conclusiones que los resultados del procedimiento no son concluyentes porque debe perfeccionarse.

Trinuruk et al. (2009), exponen que la temperatura del módulo es uno de los parámetros más importantes para poder estimar la producción eléctrica del mismo y que esta temperatura depende de parámetros tales como las propiedades térmicas de los materiales usados en los módulos y sus encapsulados, los tipos de células fotovoltaicas, la configuración de los módulos fotovoltaicos y las condiciones climáticas de la localización donde se encuentren ubicados los módulos. Los autores realizan un estudio comparativo de los modelos NOCT y el propuesto por los laboratorios Sandia (King et al., 2004), para poder estudiar la eficacia de ambos modelos en instalaciones integradas en edificios, en construcciones de edificios típicos de Tailandia (diferentes de los estudiados con anterioridad: ladrillos ligeros de cemento entre dos capas de mortero de cemento) y en climas tropicales como el de ese mismo país. Estos autores han comprobado que el modelo de los laboratorios Sandia ofrece más precisión que el modelo NOCT, y que este modelo presenta dos limitaciones importantes: considera que la temperatura del módulo en la cara posterior es aproximadamente la temperatura de la célula y además no tiene en cuenta la influencia de la velocidad del viento, que tiene una gran importancia en la refrigeración convectiva del módulo tanto en la cara anterior como posterior de éste.

Otro modelo que destaca por su sencillez es el modelo propuesto por Ross (1976). Este autor propone un modelo basado en las propiedades térmicas del módulo en el estado estacionario, en el que la diferencia entre la temperatura del módulo y la temperatura ambiente es directamente proporcional a la irradiancia.

King et al. (2004) dan un paso más, proponiendo un modelo basado también en las propiedades térmicas del módulo, pero teniendo en cuenta la influencia de la velocidad del viento sobre la temperatura del módulo. Así, proponen un modelo empírico para calcular la temperatura del módulo basado en las condiciones del entorno que le rodea, por lo que considera la irradiancia, la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

Faiman (2007) propone un modelo heurístico basado en las ecuaciones de Hottel-Whillier-Bliss para predecir la temperatura del módulo en función de la temperatura ambiente, la irradiancia y la velocidad del viento. El modelo requiere dos constantes calculadas mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

Servant (1985) propone otro modelo para calcular la temperatura del módulo que está basado en el intercambio de calor existente entre el módulo fotovoltaico y el ambiente.

Determina la temperatura del módulo sólo con parámetros meteorológicos: la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la irradiancia.

Los modelos implícitos se basan en el conocimiento de las propiedades térmicas del módulo y sus mecanismos de transferencia de calor. Para el cálculo de la temperatura del módulo se plantea un balance de energía en el mismo, a partir del cual es posible determinar su temperatura de operación instantánea. Este tipo de modelos predice la temperatura de trabajo del módulo suponiendo que éste se encuentra en condiciones estacionarias, cosa que no ocurre en condiciones reales de funcionamiento. Además, la temperatura del módulo depende tanto de los parámetros meteorológicos, que se encuentran en constante cambio, como de los procesos térmicos que ocurren en los distintos materiales que lo componen. De entre todos los modelos implícitos, uno de los métodos más conocidos es el propuesto por Mattei et al. (2006) y está basado en un simple balance de energía.

Mattei et al. plantean el cálculo de la temperatura de los módulos usando el coeficiente de variación de la potencia máxima con la temperatura (γ) y el rendimiento (η) del módulo, la temperatura ambiente y la irradiancia, introduciendo también un coeficiente convectivo de intercambio de calor (U_{pv}) dependiente del viento, y tienen en cuenta el coeficiente de absorción (c_a) y la transmitancia (τ) del módulo. Los autores estudian los distintos valores que se han aplicado para el coeficiente convectivo de intercambio de calor (U_{pv}) y para el producto entre el coeficiente de absorción y la transmitancia ($c_a\tau$) del módulo en toda la literatura publicada al respecto y proponen unos valores para cada uno de estos coeficientes.

Schwingshackl et al. (2013) focalizan su estudio en el análisis del efecto que tiene la velocidad del viento en el cálculo de temperatura de operación del módulo. Los autores comparan varios modelos de predicción de temperatura de operación de módulos y concluyen que considerar la velocidad del viento al estimar la temperatura de los módulos mejora significativamente la predicción.

La mayoría de los modelos de predicción de la temperatura de módulos descritos en la literatura trabajan con valores instantáneos de todos los parámetros, haciendo una predicción del valor de la temperatura del módulo para un instante concreto. Sin embargo, en la práctica, en muchos sistemas fotovoltaicos el dimensionado y la simulación del funcionamiento de los mismos se hacen a partir de valores horarios y, a

veces, con valores diarios debido a que son los datos meteorológicos normalmente disponibles para cualquier localidad. Por ejemplo, Jakubiec y Reinhart (2013) proponen un método para predecir aumentos en la electricidad obtenida de paneles utilizando datos horarios. Concluyen que el uso de datos de irradiación horaria tiene varias ventajas, ya que admite una mayor precisión geométrica. El método propuesto considera las reflexiones en el contexto urbano cercano y utiliza temperaturas predichas para calcular eficiencias horarias de módulos fotovoltaicos; Poshtkouhi et al. (2012) estiman el rendimiento energético de los módulos fotovoltaicos sobre una base horaria usando medidas de irradiancia y temperatura; Schubert (2012) calcula la generación de electricidad a partir de plantas solares fotovoltaicas basándose en datos horarios históricos de la radiación solar y temperatura ambiente; Thapar et al. (2012) analizan la influencia de la temperatura horaria en la producción de energía horaria de módulos fotovoltaicos; Schwabe y Jansson (2009) estiman el rendimiento de diferentes módulos fotovoltaicos utilizando valores horarios de la temperatura ambiente y del módulo.

1.5. LIMITACIONES DEL ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DESARROLLADO

Los modelos existentes en la literatura presentan varias limitaciones. La primera que cabe destacar es que están estudiados en condiciones de laboratorio, usando simuladores solares en la mayoría de los casos y sin estar expuestos a la variabilidad que presentan las condiciones atmosféricas reales, por lo que resulta interesante comprobar su validez bajo condiciones de sol real, expuestos a constantes cambios meteorológicos. Otra limitación que presentan muchos de ellos es que éstos calculan la temperatura de trabajo del módulo usando valores instantáneos de las variables, sin tener en cuenta que algunas variables tendrán efecto una vez pasado el instante que se considera, como, por ejemplo, la velocidad del viento. La velocidad del viento en un instante no enfría el módulo en ese mismo instante, ya que debe transcurrir un cierto tiempo hasta que éste alcance una temperatura estacionaria por acción del viento. La aplicación práctica de los modelos supone que el módulo se encuentra en estado estacionario, y esto difícilmente se cumple en condiciones reales de funcionamiento. Además, la temperatura del módulo depende

tanto de los parámetros meteorológicos, continuamente cambiantes, como de los procesos térmicos que ocurren en los distintos materiales que componen el módulo. La tercera limitación es que los modelos existentes han sido propuestos para unas tecnologías de módulos determinadas, por lo que no se pueden extrapolar, a priori, a todas las tecnologías de módulos.

Por todo lo anteriormente expuesto, se van a fijar una serie de objetivos en el desarrollo del presente trabajo. El primer objetivo es estudiar diversos modelos de predicción de temperatura de módulos existentes en la literatura anterior para ver si se pueden aplicar a tecnologías distintas de las propuestas por sus autores, adaptando los coeficientes para el cálculo de la temperatura a las tecnologías utilizadas en este trabajo.

El segundo objetivo es proponer nuevos modelos para predecir la temperatura de operación de módulos de diferentes tecnologías.

Por último, el tercer objetivo de este trabajo es analizar la posibilidad de predecir valores horarios y diarios de temperatura de operación de módulos fotovoltaicos utilizando el mismo tipo de modelos que se han propuesto para calcular la temperatura instantánea de operación de éstos, de forma que esos valores puedan ser usados como parámetros de entrada en los modelos de simulación de módulos y sistemas fotovoltaicos.

1.6. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis doctoral se ha estructurado en siete capítulos.

En el **Capítulo 1** se exponen las distintas tecnologías fotovoltaicas existentes y se estudia cómo está el mercado de la energía fotovoltaica en la actualidad y cuáles son las tecnologías más demandadas, para centrar la investigación realizada en dichas tecnologías. Asimismo, se analiza qué elementos tienen un papel determinante en la producción de la energía fotovoltaica. Por último, se hace una revisión del estado del arte y se fijan los objetivos de la tesis.

En el **Capítulo 2** se describe la metodología utilizada. Se describen los módulos seleccionados, el sistema experimental y la recogida y selección de los datos. Por último se describen las métricas utilizadas para el análisis y validación de los modelos.

En el **Capítulo 3** se describen los modelos utilizados. Se proponen dos nuevos modelos instantáneos para calcular la temperatura de operación de los módulos, así como nuevos modelos de cálculo de temperatura de operación de módulos en una escala temporal distinta a la utilizada previamente en la literatura existente.

En el **Capítulo 4** se muestran todos los resultados obtenidos para los modelos instantáneos, tanto los coeficientes de entrada de los modelos analizados y propuestos, como los resultados de la predicción de temperatura de operación de módulos de cada uno de los modelos.

En el **Capítulo 5** se exponen los resultados obtenidos para los modelos horarios. Se muestran tanto los coeficientes de entrada de cada uno de los modelos como los resultados de la predicción de temperatura horaria de operación de módulo. También se analizan los resultados de la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos.

En el **Capítulo 6** se detallan las conclusiones más importantes y los resultados más relevantes obtenidos de este trabajo, además de proponer las líneas futuras de investigación derivadas del mismo.

Por último, en el **Capítulo 7** se aporta toda la bibliografía consultada para el desarrollo de la presente tesis doctoral, que aparece indexada por orden alfabético.

Capítulo 2

Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada para realizar este trabajo. En primer lugar se describen las principales características de los módulos utilizados, tanto las eléctricas como las de diseño; se describe el sistema experimental utilizado, los parámetros registrados en las campañas de medidas así como el tratamiento posterior de los datos y los filtros aplicados hasta conseguir una base de datos homogénea con la que poder realizar este estudio. Por último, también se exponen los parámetros estadísticos que se usarán para comparar tanto los diferentes modelos como su aplicación a las diferentes tecnologías de módulos.

2.1. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZADOS

Las tecnologías de lámina delgada están adquiriendo una fuerte presencia en el mercado fotovoltaico, según informe presentado por el Instituto Fraunhofer para los Sistemas de Energía Solar, 2015.

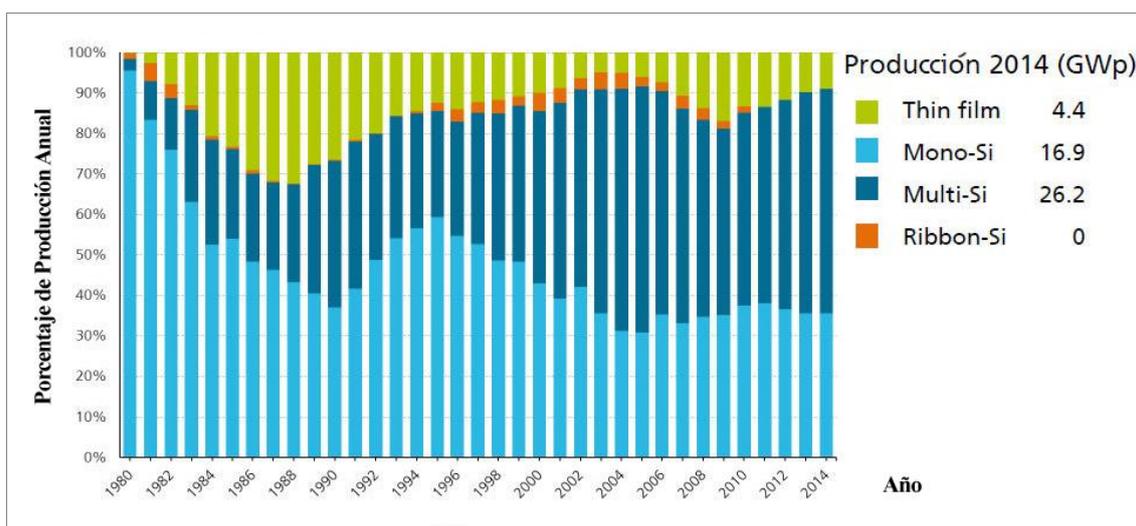


Figura II.1. Porcentaje de la producción fotovoltaica anual por tecnologías.

Fuente: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2015.

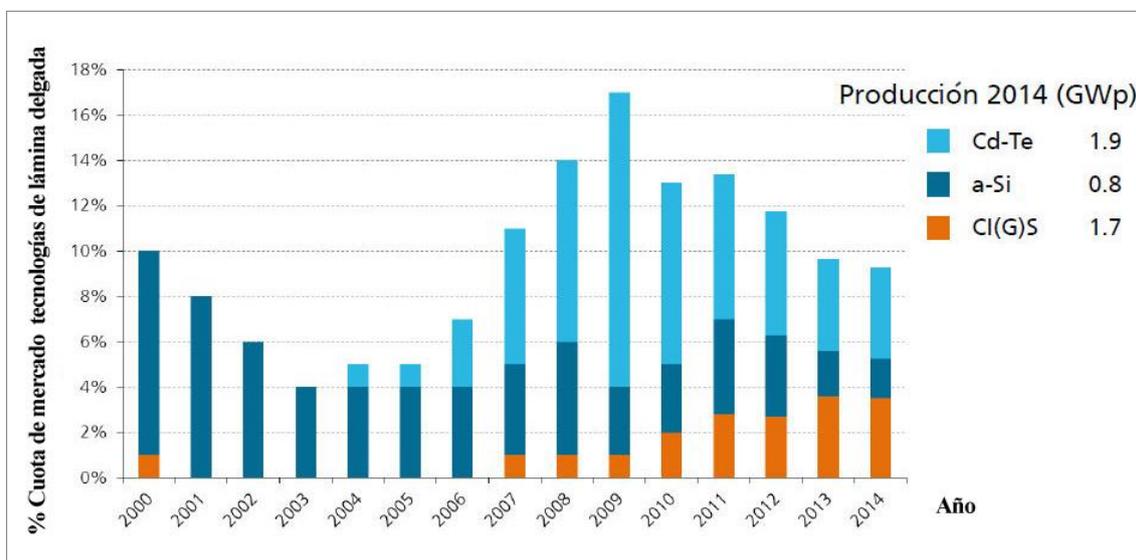


Figura II.2. Porcentaje de la cuota de mercado de las distintas tecnologías de lámina delgada.

Fuente: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2015.

Para este estudio se han seleccionado tres módulos de lámina delgada y uno de silicio multicristalino y se han expuesto todos bajo condiciones de sol real para realizar la campaña de medidas. Los módulos seleccionados son:

- Telururo de cadmio: CdTe
- Silicio amorfo: a-Si
- Silicio amorfo/microcristalino: a-Si / μ c-Si
- Silicio multicristalino: mc-Si

Se ha elegido un módulo de silicio multicristalino por varias razones: a) porque actualmente esta tecnología es la que tiene mayor cuota de mercado, b) porque es una de las tecnologías más estudiadas en toda la literatura existente, y c) para poder realizar comparaciones de resultados de éste con los módulos de lámina delgada.

Las principales características eléctricas de los módulos están recogidas de la hoja de características técnicas proporcionadas por los fabricantes. Dichos parámetros han sido medidos en laboratorio bajo condiciones estándar de medidas (a una irradiancia de 1000 W/m^2 , cuando el modulo está trabajando a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y espectro de irradiancia de AM de 1.5). Las características constructivas de los módulos junto con las características eléctricas se muestran en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Características eléctricas de los módulos utilizados.

	CdTe	a-Si	a-Si/μc-Si	mc-Si
I_{sc} (A)	1.19	1.19	3.35	8.27
V_{oc} (V)	89	92	59.2	32.5
P_{MAX} (W)	70	60	121	195
I_{MAX} (A)	1.04	0.9	2.69	7.5
V_{MAX} (V)	67.1	67	45	26
Area (m^2)	0.72	0.95	1.42	1.46
Eficiencia (%)	9.7	6.3	8.5	13.4
NOCT ($^\circ\text{C}$)	45	45	44	47
α ($\%/^\circ\text{C}$)	+0.04	+0.075	+0.07	+0.04
β ($\%/^\circ\text{C}$)	-0.25	-0.305	-0.30	-0.32
γ ($\%/^\circ\text{C}$)	-0.25	-0.23	-0.24	-0.35
Cubierta frontal	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio
Encapsulante	EVA	-	-	EVA
Cubierta posterior	Vidrio	Película de plástico	Plástico EVA	Película de plástico

2.2. CAMPAÑA DE MEDIDAS. REGISTRO Y SELECCIÓN DE LOS DATOS

Para la realización de todo el estudio desarrollado en esta tesis doctoral se ha llevado a cabo una campaña de recogida de datos. Antes de exponer la campaña de medidas realizada, se indicará la localización de los módulos fotovoltaicos empleados.

Los módulos se han instalado a la intemperie en la terraza del departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Málaga sobre una estructura fija de aluminio separada del edificio para evitar efectos de sombreado sobre los mismos, y están orientados al Sur con una inclinación de 21° respecto de la horizontal. Esta disposición facilita la disipación de calor de los módulos por efecto de la velocidad del viento, y además le permite una buena ventilación.

La localidad de Málaga (latitud: 36.72° N, longitud: 4.48° O y elevación: 50 m) está situada en el sur de la península ibérica y bañada por el Mar Mediterráneo. Sus características climáticas hacen del emplazamiento un lugar ideal para los sistemas de energía solar fotovoltaica. Durante el periodo de medidas cada módulo ha recibido una irradiación total de 1930 kWh/m^2 , lo que significa un valor medio diario de 5.65 kWh/m^2 . Los módulos se encuentran sometidos a viento constante y suave y las temperaturas medias mensuales del aire son suaves por la influencia del mar, que además hace que la humedad relativa del aire sea elevada.

La campaña de medidas se ha realizado desde enero de 2011 hasta diciembre de 2012. El primer año de datos se ha utilizado para proponer los modelos y validarlos y el segundo año para comprobar que los coeficientes hallados para los modelos son válidos para cualquier año distinto del que se ha utilizado para calcular los coeficientes.

Los datos registrados para llevar a cabo este estudio son la medida de los parámetros eléctricos de los módulos y la medida de las condiciones meteorológicas presentes en el momento del registro de los datos eléctricos.

Los parámetros eléctricos registrados por el sistema de adquisición de datos consisten en todos los pares de valores de tensión-intensidad de la curva característica de los módulos seleccionados para el estudio medida, curva *I-V*. A partir de estos datos se

obtienen los valores extremos de tensión e intensidad (intensidad de cortocircuito, I_{sc} y voltaje en circuito abierto, V_{oc}), potencia máxima (P_{MAX}), etc.

Inicio	Fin	ISC (A)	VOC (V)	P _{MAX} (W)	IP _{MAX} (A)	V _{P_{MAX}} (V)	FF (%)	EDA (Wh)	ETA (Wh)
15:14:36	15:14:52	8.065	29.699	164.791	7.327	22.490	69	200.547	200.547
15:20:36	15:20:52	8.040	29.779	164.945	7.330	22.503	69	217.045	217.045
15:26:36	15:26:52	7.880	29.919	163.296	7.179	22.745	69	233.466	233.466
15:32:36	15:32:52	7.792	29.916	161.594	7.100	22.761	69	249.718	249.718

Figura II.3. Interfaz gráfica del sistema de medidas implementado en el laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga. Imagen de algunos de los datos eléctricos registrados por el sistema.

Simultáneamente se miden las condiciones meteorológicas al inicio y al final de cada medida.

Velocidad Viento media (m/s)	Velocidad Viento inicial (m/s)	Velocidad Viento final (m/s)	Dirección Viento media (°)	Dirección Viento inicial (°)	Dirección Viento final (°)	Humedad Relativa media (%)	Humedad Relativa inicial (%)	Humedad Relativa final (%)	Temperatura Ambiente media (°C)	Temperatura Ambiente inicial (°C)	Temperatura Ambiente final (°C)
1.3	2.5	0.1	84	124	44	58	58	58	26.4	26.4	26.4
1.2	0.1	2.4	136	156	116	62	62	63	25.1	25.1	25.1
1.1	0.1	2.1	92	80	104	60	60	60	25.4	25.4	25.5

Piranómetro Parrilla media (W/m ²)	Piranómetro Parrilla inicial (W/m ²)	Piranómetro Parrilla final (W/m ²)	RTD o.o media (°C)	RTD o.o inicial (°C)	RTD o.o final (°C)	Célula Isofotón Sucia media (W/m ²)	Célula Isofotón Sucia inicial (W/m ²)	Célula Isofotón Sucia final (W/m ²)	Célula Isofotón Limpia media (W/m ²)	Célula Isofotón Limpia inicial (W/m ²)	Célula Isofotón Limpia final (W/m ²)
973	974	972	51.6	51.6	51.6	1009	1010	1008	988	989	988
967	966	967	49.7	49.7	49.8	1003	1003	1003	982	981	983
953	953	953	48.8	48.8	48.8	985	984	985	964	964	963

Figura II.4. Interfaz gráfica del sistema de medidas implementado en el laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga. Imagen de algunos de los datos meteorológicos registrados por el sistema.

De todos los valores meteorológicos registrados se han seleccionado los valores de irradiancia recibida en el plano del módulo, temperatura ambiente, temperatura del módulo y velocidad del viento, además de la humedad relativa. Todos los parámetros

han sido medidos en intervalos de 6 minutos desde la salida hasta la puesta del sol, y con ellos se ha implementado una base de datos para cada una de las tecnologías estudiadas con todos los valores medidos.

El procedimiento de medidas y los instrumentos utilizados para este fin se exponen en el siguiente apartado del presente capítulo.

Previamente a la realización de los cálculos, se han estudiado los datos recogidos y se han aplicado una serie de filtros para asegurar la coherencia y validez de los mismos.

Cuando se mide la curva $I-V$, también se miden los parámetros meteorológicos al inicio y al final de la toma de medidas de la misma, y si la diferencia entre la irradiancia medida al comienzo y al final de la medida de la curva es superior a 5 W/m^2 ese dato se elimina, pues la curva no es válida al no haber sido medida bajo condiciones de irradiancia uniforme.

De todos los datos registrados para este estudio se van a utilizar aquellos que cumplen las siguientes condiciones meteorológicas:

- Irradiancia incidente sobre el plano de módulos mayor o igual que 100 W/m^2 .
- Humedad relativa del aire menor o igual al 90%.

Con estas condiciones se eliminan los valores registrados al amanecer y al atardecer así como aquellos con una alta humedad relativa. La razón es que se ha observado que en ciertas condiciones de irradiancia, humedad relativa y temperatura ambiente, los módulos presentan valores instantáneos de temperatura menores que los de la temperatura ambiente, lo que sucede, principalmente, al amanecer y al atardecer, en condiciones de baja irradiancia y alta humedad relativa que a menudo originan la condensación de agua en la parte posterior de los módulos. En estas condiciones, la temperatura del módulo depende también del calor latente de vaporización del agua. Además, la temperatura del módulo puede ser inferior a la temperatura ambiente como consecuencia del intercambio radiativo con la atmósfera. Esto ocurre, sobre todo, en las noches despejadas.

Por todo ello, se han eliminado de los datos registrados los que cumplen que:

$$T_m - T_{amb} < 2.5^{\circ}\text{C}$$

Estas situaciones termodinámicas especiales ocurren en menos del 1% de los datos registrados y, por lo tanto, tienen poco impacto en la energía producida por los módulos.

Los valores medios diarios mensuales de las principales variables meteorológicas, con su correspondiente desviación estándar, y el valor medio diario anual de estos parámetros en el primer año del periodo de medidas se muestran en la Tabla II.2.

Tabla II.2. Valores medios diarios mensuales y anuales de la irradiación, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento y sus desviaciones estándar.

	Irradiación (kWh/m ²)		Temperatura Ambiente (°C)		Humedad relativa (%)		Velocidad del viento (m/s)	
	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD	MEDIA	STD
Enero 2011	3.8	1.7	14.7	1.8	66.0	9.8	1.5	1.3
Febrero 2011	5.1	1.3	15.6	2.2	57.0	11.0	2.4	1.9
Marzo 2011	5.0	2.3	16.5	2.8	62.0	15.0	2.0	1.2
Abril 2011	5.6	2.3	20.1	1.4	60.0	14.0	1.5	0.9
Mayo 2011	6.3	1.9	22.6	2.1	59.0	11.0	1.5	0.6
Junio 2011	7.3	1.2	25.4	2.3	60.0	12.0	1.8	0.8
Julio 2011	7.5	0.9	28.6	1.8	52.0	13.0	1.8	0.8
Agosto 2011	7.0	0.8	29.1	2.0	55.0	14.0	1.8	0.8
Septiembre 2011	6.5	1.2	26.8	1.8	55.0	10.0	1.6	0.9
Octubre 2011	5.7	0.7	22.9	2.1	62.0	12.0	1.2	0.6
Noviembre 2011	3.9	1.7	17.9	1.6	64.0	12.0	1.7	1.4
Diciembre 2011	4.1	0.8	15.7	1.5	57.0	11.0	2.3	1.9
Media diaria anual	5.7	1.4	21.3	2.0	59.1	12.1	1.8	1.1

2.3. MEDICIONES REALIZADAS. INSTRUMENTACIÓN

Para cada uno de los módulos se ha medido regularmente su curva característica I - V . Esta metodología ha sido usada por diferentes investigadores para la caracterización energética de módulos fotovoltaicos (Akhmad et al., 1997; Rummel et al., 1998; Ikisawa et al., 1998 y King et al., 2000). Para medir la curva característica se utiliza un sistema experimental desarrollado por el grupo de investigación Sistemas Fotovoltaicos del departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Málaga y que está descrito con detalle en Piliougine et al. (2011). La curva I - V se mide usando 2 multímetros digitales de 4 hilos conectados a un ordenador que los monitoriza. Para sincronizarlos se usa un generador de funciones que envía una señal cuadrada para activarlos simultáneamente. Las curvas se adquieren en 2 pasos: en el primero, el barrido se hace entre un valor inicial de la tensión y un punto intermedio antes del codo de la curva; en el segundo, el barrido se hace entre ese punto intermedio y el valor final de la tensión. A fin de disponer de más puntos en la segunda parte de la curva, cuya pendiente es pronunciada, el barrido del primer paso se realiza en 0,250 ms, mientras que ese tiempo es de 0,750 ms en el segundo paso (con lo que el tiempo de adquisición de la curva completa es de 1 s). En la Figura II.3 se muestra la captura de una curva I - V .

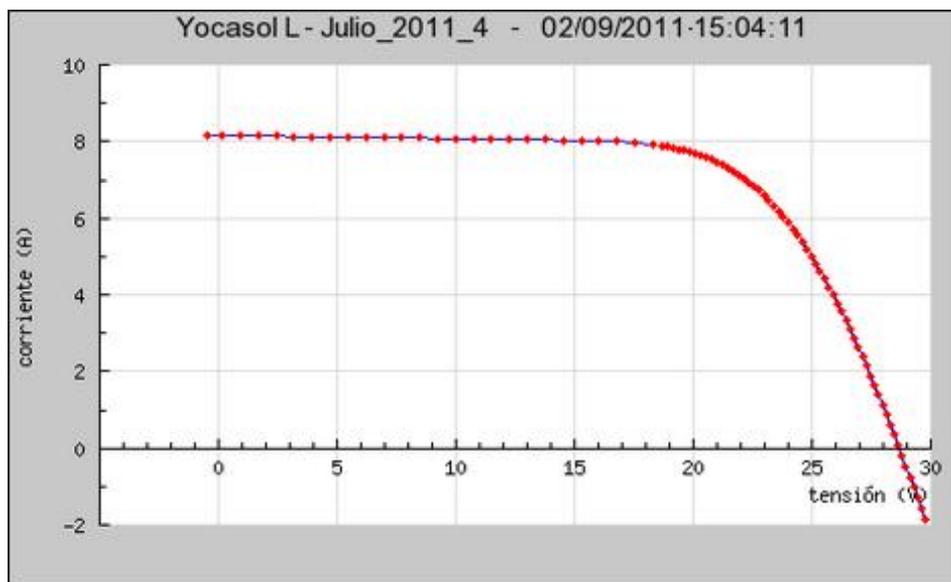


Figura II.5. Interfaz gráfica del sistema de medidas implementado en el laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de Málaga.
Imagen de los datos registrados por el sistema para la curva I - V

Simultáneamente a la medida de la curva I - V , se ha medido la irradiancia en el plano del módulo, la temperatura ambiente, la temperatura del módulo, la velocidad y dirección del viento y la humedad relativa del aire.

Los parámetros meteorológicos se han medido por medio de los sensores de una estación meteorológica estándar que se encuentra situada cerca de los módulos fotovoltaicos, cuyas características se detallan en la Tabla II.3. Todos los sensores están conectados a un sistema de adquisición de datos Field Point CFP-2220 de National Instruments.

Para medir la irradiancia se ha utilizado un piranómetro Kipp & Zonen CMP21 debidamente calibrado. Este piranómetro es de alto rendimiento y el sensor de radiación que posee es una termopila protegida por dos cúpulas hemisféricas de alto grado óptico, que sirven para proteger al sensor de la lluvia y del viento. Dichas cúpulas se han limpiado diariamente para evitar la acumulación de polvo y sustancias que puedan perturbar las medidas. Posee un tiempo de respuesta rápido, por lo que es muy adecuado para medir la irradiancia solar en condiciones meteorológicas variables.

La temperatura de cada uno de los módulos se mide usando un sensor RTD acoplado a la parte trasera del mismo. Está situado en su centro geométrico y pegado con una pasta térmica conductora, para evitar pérdidas, y además se ha fijado con cinta americana. El sensor está fabricado con platino, y posee una resistencia a 0 °C de 100 Ω que varía en función de la temperatura.

La temperatura ambiente se mide con un sensor RTD a cuatro hilos, con un tiempo de respuesta de 10 s y una precisión de ± 0.3 °C a 0 °C

La humedad relativa del ambiente se mide mediante un higrómetro compuesto por un sensor capacitivo que proporciona una señal eléctrica que se transforma mediante una ecuación de equivalencia a un valor de humedad relativa. Mide valores comprendidos entre 0 y 100% con una precisión de $\pm 2\%$, con un tiempo de respuesta de 10 s.

Para medir la velocidad del viento se utiliza un anemómetro de tres cazoletas que giran dando una señal de frecuencia proporcional a la velocidad del viento que las mueve.

Tabla II.3. Principales características de los sensores meteorológicos.

	Tipo de Sensor	Precisión	Rango
Irradiancia	Kipp Zonen CM21	1 W/m ²	310-2800 nm
Temperatura ambiente	Platinum RTD	± 0.3 °C	-50 +50 °C
Temperatura módulo	Platinum RTD	± 0.3 °C	-50 +150 °C
Humedad Relativa	Rotronic Hygromer™	± 2.0%	0 – 100 %
Velocidad del viento	Young 03002 L	± 0.5 m/s	0 – 50 m/s

Medir la temperatura de operación de un módulo no es fácil. Hay que tener en cuenta que no es posible acceder al interior del módulo y que además cada una de las células presenta una temperatura de trabajo diferente que depende de su posición en el módulo. Las células centrales presentan mayor temperatura que las situadas en las zonas más próximas a los bordes, como exponen Tina y Abate (2008). Por lo tanto, lo que realmente se mide acoplado un sensor RTD es la temperatura de la cara posterior del módulo. Además, dependiendo de la tecnología del módulo y de las condiciones meteorológicas, la temperatura real de la célula será diferente y normalmente superior. Sin embargo, a pesar de todo lo expuesto, es una práctica común en la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas medir la temperatura acoplado un sensor a la parte trasera del módulo para estimar la temperatura de trabajo del mismo.

Los Laboratorios Sandia han desarrollado una metodología para estimar la temperatura del módulo a partir de la temperatura de la cara posterior del módulo en condiciones próximas al equilibrio térmico. Esta corrección implica que la temperatura de operación del módulo cuando éste trabaja cerca de las condiciones estándar de irradiancia (1000 W/m²) es alrededor de 4°C mayor que la que se mide experimentalmente en la superficie posterior del módulo.

En el sistema experimental de medida usado, los módulos permanecen en circuito abierto (V_{oc}) en el tiempo entre medidas de la curva $I-V$. En estas condiciones, la temperatura de los módulos es mayor que la temperatura en el punto de máxima potencia (PMP), debido a que en este punto parte de la energía incidente se ha

convertido en electricidad. De acuerdo con Tina y Abate (2008), la temperatura en la parte posterior del módulo en circuito abierto en condiciones de alta irradiancia es de 4 a 5 °C superior a la temperatura del módulo en el punto de máxima potencia para módulos cuya estructura sea vidrio/célula/Tedlar.

Como ya se ha indicado, el sistema experimental mide la curva $I-V$ en 1 s, por lo que se puede considerar que la temperatura medida es la temperatura en circuito abierto. Además, se mide la temperatura del módulo antes y después de realizar la medida de la curva $I-V$, comprobando que la temperatura del módulo es constante durante todo el trazado de la misma.

Por otro lado, es bien conocido que existe un gradiente térmico que hace que la temperatura de la parte posterior del módulo sea menor que la temperatura real de la célula. La diferencia entre estas dos temperaturas, Tedlar-célula, depende tanto de los materiales del módulo como de las condiciones meteorológicas particulares. Teniendo en cuenta que estas condiciones son siempre cambiantes, resulta imposible dar un valor concreto de esta diferencia. En este estudio, se va a asumir que ambos efectos se contrarrestan, es decir, se asume que el gradiente térmico se compensa con el hecho de medir la temperatura cuando el módulo se encuentra en circuito abierto.

A falta de establecer un modelo térmico que dé información del gradiente térmico para cada una de las tecnologías estudiadas, se ha considerado que la medida experimental de la temperatura realizada en la parte posterior del módulo es una buena aproximación de su temperatura de operación.

2.4. 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 del año 2011 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. Los datos recogidos del año 2012 se han utilizado para comprobar la eficacia de los modelos con un año

distinto del que se ha utilizado para construir los modelos. Del total de datos del año 2012 se han seleccionado 31 días al azar.

Las variables seleccionadas para llevar a cabo este estudio se han expuesto en el apartado de campaña de medidas, registro y selección de los datos.

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.

Para calcularlos, se ha procedido de la misma forma que para los modelos instantáneos: se ha seleccionado aleatoriamente un 30% de los datos para construir los modelos y el 70% restante para validarlos.

Con los datos de los 31 días del año 2012 se ha procedido de la misma forma: se han calculado las series horarias de los datos y, al igual que en los modelos instantáneos, los datos del año 2012 se han utilizado para ver la eficacia de los modelos propuestos con un año distinto del que se ha utilizado para proponer los modelos.

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.

2.5. 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:

$$\overline{TD} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{predicha} - T_{medida})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n TD}{n} \tag{2.1}$$

- 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:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |TD| \tag{2.2}$$

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

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{TD}{T_{medida}} \right| \tag{2.3}$$

- 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.

Capítulo 3

Descripción de los modelos analizados

En este capítulo se exponen los modelos analizados en este estudio y la descripción que realiza cada uno de los autores de los mismos. Se proponen dos nuevos modelos instantáneos desarrollados a partir del modelo NOCT.

También se proponen nuevos modelos horarios para el cálculo de la temperatura de operación de los módulos.

3.1. 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.

3.1.1. 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:

$$\eta = \eta_r [1 - \gamma(T_c - T_r) + \mu \log G_e] \quad (3.1)$$

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

Para una irradiancia G , la parte que atraviesa el cristal es τG , donde τ es la transmitancia del cristal, y la parte absorbida por las células fotovoltaicas es $(c_\alpha \tau)G$ siendo c_α 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:

$$(c_\alpha \tau)G = \eta_r G + U_{PV} (T_m - T_{amb}) \quad (3.2)$$

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:

$$T_m = \frac{U_{PV} T_{amb} + G [(c_\alpha \tau) - \eta_r - \gamma \eta_r T_r]}{U_{PV} - \gamma \eta_r G} \quad (3.3)$$

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

$$U_{PV} = p + qW \quad (3.4)$$

siendo:

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

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

$$T_m = \frac{(p + qW)T_{amb} + G[(c_\alpha \tau) - \eta_r - \gamma \eta_r T_r]}{(p + qW) - \gamma \eta_r T_r} \quad (3.5)$$

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_α es el coeficiente de absorción de las células,
- τ es la transmitancia del cristal,
- η_r es la eficiencia del módulo a la temperatura de referencia $T_r = 25 \text{ } ^\circ C$ y a una irradiancia de 1000 W/m^2 ,
- γ es el valor absoluto del coeficiente de variación de la potencia con la temperatura del módulo en $\%/^\circ C$.

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:

$$T_{m-h} = \frac{(p_h + q_h W_h) T_{amb-h} + H [(c_\alpha \tau)_h - \eta_r - \gamma \eta_r T_r]}{p_h + q_h W_h - \gamma \eta_r T_r} \quad (3.6)$$

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 $(Wh \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$,
- q_h expresado en $(Wh \cdot s \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$.

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 .

3.1.2. 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:

$$T_m = T_{amb} + k_R G \quad (3.7)$$

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 $^\circ C \cdot m^2 \cdot W^{-1}$, expresa el incremento de la temperatura del módulo cuando se incrementa la irradiancia solar, y puede expresarse como:

$$k_R = \frac{\Delta(T_m - T_{amb})}{\Delta G} \quad (3.8)$$

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:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + k_{R-h} H \quad (3.9)$$

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 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Wh}^{-1}$.

3.1.3. 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°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:

$$T_m = T_{amb} + G e^{m+nW} \quad (3.10)$$

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 (3.10), 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:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + \frac{T_0}{H_0} H \left(e^{m_h + n_h W_h} \right) \quad (3.11)$$

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, Ecuación (3.10), la expresión horaria obtenida sería la siguiente:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + H \left(e^{m_{K-h} + n_{K-h} W_h} \right) \quad (3.12)$$

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 (3.11) y (3.12). Igualando estas ecuaciones, se llega a las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} n_{K-h} &= n_h \\ m_{K-h} &= m_h - \ln \frac{H_0}{T_0} = m_h - \ln 40 \end{aligned} \quad (3.13)$$

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 $s \cdot m^{-1}$.

3.1.4. 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:

$$T_m = T_{amb} + d_s G (1 + e_s T_{amb}) (1 - f_s W) \quad (3.14)$$

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

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 W/m^2 y 1000 W/m^2 , velocidad del viento entre 0 m/s y 5 m/s (medidos un minuto antes del resto de los datos), temperatura ambiente entre $4 \text{ }^{\circ}C$ y $32 \text{ }^{\circ}C$ y la temperatura de la célula entre $10 \text{ }^{\circ}C$ y $55^{\circ}C$.

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 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 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:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + d_{S-h} H (1 + e_{S-h} T_{amb-h}) (1 - f_{S-h} W_h) \quad (3.15)$$

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 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Wh}^{-1}$.

3.1.5. 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° respecto a la horizontal, a una irradiancia de 800 W/m^2 , a temperatura ambiente de 20°C y una velocidad de viento de 1 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:

$$T_m = T_{amb} + \frac{G}{800}(NOCT - 20) \quad (3.16)$$

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:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + \frac{H}{800}(NOCT - 20) \quad (3.17)$$

3.1.6. 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:

$$V_{oc} = V_{oc}(STC) + \beta_{V_{oc}}(G_{ef}) \cdot (T_c - T_0) + N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(G_{ef}) \quad (3.18)$$

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:

$$\delta(T_c) = \frac{m_d \cdot k \cdot (T_c + 273.15)}{e} \quad (3.19)$$

donde:

- m_d es el factor de idealidad del diodo (adimensional),
- k es la constante de Boltzman, de valor 1.38066 e⁻²³ J/K,
- e es el valor absoluto de la carga del electrón, cuyo valor es 1.60218 e⁻¹⁹ 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:

$$\beta_{V_{oc}}(G_{ef}) = \beta_{V_{oc}(STC)} + n_{\beta_{V_{oc}}} \cdot (1 - G_{ef}) \quad (3.20)$$

donde, $\beta_{V_{oc}(STC)}$ es el coeficiente de temperatura del módulo a la tensión de circuito abierto y a la irradiancia de 1000 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 β es constante e igual a $\beta_{V_{oc}(STC)}$.

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

$$V_{oc} = V_{oc}(STC) + \beta(T_m - 25) + m_d \cdot N_s \frac{k(T_m + 273.15)}{e} \ln G_{ef} \quad (3.21)$$

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:

$$G_{ef} = \frac{G}{G_0(STC)} \quad (3.22)$$

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 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:

$$G_{ef} = \frac{I_{sc}}{I_{sc} (STC)} \tag{3.23}$$

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 (3.21). La ecuación resultante es:

$$T_m = \frac{V_{oc} - V_{oc} (STC) + 25 \beta - \frac{273.15 m_d N_s k}{e} \ln G_{ef}}{\beta + \frac{m_d N_s k}{e} \ln G_{ef}} \tag{3.24}$$

Y mediante una regresión lineal múltiple de los datos a la Ecuación (3.21), se han calculado la tensión a circuito abierto en condiciones STC ($V_{oc}(STC)$), que vendrá expresada en V, el coeficiente de temperatura en circuito abierto (β), expresado en $V \cdot ^\circ C^{-1}$ y el coeficiente de idealidad del diodo (m_d), que es adimensional.

El modelo horario propuesto es el siguiente:

$$T_{m-h} = \frac{V_{oc-h} - V_{oc-h} (STC) + 25 \beta_h - \frac{273.15 m_{d-h} N_s k}{e} \ln H_{ef}}{\beta_h + \frac{m_{d-h} N_s k}{e} \ln H_{ef}} \tag{3.25}$$

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 $V_{oc-h}(STC)$, β_h y m_{d-h} , cuyas unidades serán las mismas que las del modelo instantáneo.

3.2. 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.

3.2.1. 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:

$$T_m = T_{amb} + \frac{G}{G_0}(NOCT - T_0) + a(W - W_1) \quad (3.26)$$

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:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + \frac{H}{H_0}(NOCT - T_0) + a_h(W_h - W_1) \quad (3.27)$$

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 $W_h = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.2.2. 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:

$$T_m = T_{amb} + b \left[\frac{G}{G_0} (NOCT - T_0) \right] + c (W - W_1) \quad (3.28)$$

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:

$$T_{m-h} = T_{amb-h} + b_h \left[\frac{H}{H_0} (NOCT - T_0) \right] + c_h (W_h - W_1) \quad (3.29)$$

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

Capítulo 4

Resultados obtenidos con los modelos instantáneos

En el presente capítulo se van a exponer todos los resultados obtenidos para los modelos instantáneos. Se recuerda que el primer paso ha sido la adquisición de los datos experimentales para llevar a cabo este estudio, el filtrado de los mismos y la separación de forma aleatoria de los datos del año 2011 en un 30% para hallar los coeficientes de los modelos y el 70% restante para estudiar la predicción que realizan los modelos. Todo esto está ampliamente descrito en el capítulo 2.

Para presentar los resultados, en primer lugar se exponen todos los coeficientes hallados para cada uno de los modelos y a continuación se exponen los resultados obtenidos en la predicción de temperatura con los datos del año 2011 (con el 70% de la muestra total del año).

También se analizan los resultados de la predicción con 31 días seleccionados de forma aleatoria del año 2012, un año distinto del que se ha utilizado para proponer los coeficientes de los modelos.

4.1. COEFICIENTES OBTENIDOS PARA LOS MODELOS INSTANTÁNEOS EXISTENTES

4.1.1. Modelo de balance de energía de Mattei

En este estudio, a partir de la expresión de Mattei et al. para calcular la temperatura del módulo, Ecuación (3.5), se determinan los valores de los dos coeficientes (p y q) del coeficiente de intercambio de calor dependiente de la velocidad del viento (U_{PV}), y del producto del coeficiente de absorción del módulo por la transmitancia ($c_{\alpha}\tau$) para cada uno de los módulos de las distintas tecnologías.

Mediante un ajuste no lineal multivariante de los datos experimentales al modelo expresado por la Ecuación (3.5), se han obtenido los coeficientes que se presentan en la Tabla IV.1, los cuales se usarán para predecir la temperatura de operación del módulo usando valores instantáneos.

Tabla IV.1. Valores de los coeficientes del modelo Mattei para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	$c_{\alpha}\tau$ (adimensional)	p ($W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)	q ($W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)	R^2 (%)
MATTEI	CdTe	0.88	26.5	2.4	93.8
	a-Si	0.80	27.5	2.9	92.4
	a-Si/ μ c-Si	0.88	26.5	3.0	91.1
	mc-Si	0.88	26.4	2.6	88.9

Mattei et al. (2006) proponen los siguientes valores:

- Para el producto de la transmitancia por la absorptancia ($c_{\alpha}\tau$), expresado en la ecuación (3.3) proponen el valor de 0.81,
- Para el cálculo de la expresión definida en la Ecuación (3.4), y que define el intercambio de calor del módulo, proponen para p el valor de $26.6 W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ y para q el valor de $2.3 W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot ^{\circ}C^{-1}$.

4.1.2. Modelo de Ross

Un ajuste lineal de los datos a la Ecuación (3.7) permite calcular el valor del coeficiente k_R . En este estudio se ha realizado una regresión lineal para cada una de las cuatro tecnologías estudiadas para calcular el valor del coeficiente k_R . Los valores hallados para el coeficiente k_R , que se utilizarán para predecir la temperatura del módulo usando valores instantáneos de temperatura ambiente e irradiancia según la Ecuación (3.7), son los que se muestran en la Tabla IV.2.

Tabla IV.2. Valores del coeficiente del modelo de Ross para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	k_R ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	R^2 (%)
ROSS	CdTe	0.025	89.8
	a-Si	0.022	87.6
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.025	85.6
	mc-Si	0.024	84.9

El coeficiente k_R de la ecuación de Ross, ecuación (3.7), 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). Ross propone el valor de $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ para este coeficiente a lo largo de su artículo.

Estudios más recientes realizados por distintos autores y recogidos en diversos artículos de Skoplaki (Skoplaki y Palyvos, 2008 y Skoplaki et al., 2008) cuantifican el valor de k_R según la integración de los módulos con respecto a la edificación y según el nivel de refrigeración que tenga (bien refrigerado, situado en una cubierta, integrado en fachada, no demasiado bien refrigerado, etc.)

En la Tabla IV.3 se listan los valores del coeficiente k_R para distintos tipos de montajes y configuraciones para módulos de silicio monocristalino.

Tabla IV.3. Valores del coeficiente de Ross según diferentes autores.

Tipo de montaje del campo fotovoltaico	k_R ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$)
Montaje libre	0.0208
Buena ventilación	0.02
Sin buena ventilación	0.0342
Montaje en estructura plana sobre tejado	0.026
Sobre techo inclinado	0.0563
Sobre techo inclinado y buena ventilación	0.02
Sobre techo inclinado: sin buena ventilación	0.034
Sobre techo inclinado: bien integrado y mal refrigerado	0.056
Integrado en fachada	0.0538
Integrado en fachada: módulos transparentes	0.0455
Integrado en fachada: módulos opacos – hueco posterior estrecho	0.054

4.1.3. Modelo exponencial de King

Los coeficientes del modelo se determinan por medio de una regresión no lineal multivariante a la Ecuación (3.10) para cada una de las diferentes tecnologías. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla IV.4.

Tabla IV.4. Valores de los coeficientes del modelo exponencial de King para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	m (adimensional)	n ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	R^2 (%)
KING	CdTe	-3.52	-0.076	93.8
	a-Si	-3.62	-0.089	92.6
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	-3.50	-0.095	91.3
	mc-Si	-3.56	-0.079	89.0

En este modelo, King et al. (2004) cuantifican los valores de los coeficientes en distintas configuraciones de montaje de los módulos y para distintos tipos de encapsulados de los mismos, tal y como se muestra en la Tabla IV.5.

Según estos autores, estos valores están calculados mediante un modelo térmico de los módulos, que utiliza valores medios horarios de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad de viento.

Tabla IV.5. Coeficientes para predecir la temperatura de los módulos en función de la irradiancia, de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento. (Valores propuestos por King, et al.).

Encapsulado de módulos	Montaje	<i>m</i>	<i>n</i>
Vidrio/célula/vidrio	Estructura ventilada	-3.47	-0.0594
Vidrio/célula/vidrio	Sobre tejado	-2.98	-0.0471
Vidrio/célula/lámina de polímero	Estructura ventilada	-3.56	-0.075
Vidrio/célula/lámina de polímero	Con aislamiento posterior	-2.81	-0.0455
Polímero/lámina delgada/acero	Estructura ventilada	-3.58	-0.113

4.1.4. Modelo de Servant

En este estudio, el cálculo de los coeficientes se ha realizado mediante un ajuste no lineal multivariante de los datos a la Ecuación (3.14), de forma que los tres coeficientes han sido determinados al mismo tiempo (y no en dos pasos como hace Servant). Los valores obtenidos para estos coeficientes se muestran en la Tabla IV.6.

Tabla IV.6. Valores de los coeficientes de la ecuación del modelo de Servant para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste

Modelo	Tecnología	d_s ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	e_s ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	f_s ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	R^2 (%)
Servant	CdTe	0.028	0.001	0.061	93.8
	a-Si	0.021	0.001	0.072	93.1
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.024	0.009	0.076	91.9
	mc-Si	0.022	0.009	0.063	87.7

Servant realiza el estudio con módulos de células monocristalinas. Los valores que el autor encuentra para estos coeficientes se muestran en la Tabla IV.7

Tabla IV.7. Coeficientes determinados por Servant.

Doble acristalamiento	d_s ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	0.0138
	e_s ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.031
	f_s ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.042
Doble polimetilmetacrilato (PMMA)	d_s ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	0.0155
	e_s ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.036
	f_s ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.021

4.1.5. Modelo eléctrico

Mediante una regresión lineal múltiple de los datos a la Ecuación (3.21), se ha calculado la tensión a circuito abierto en condiciones STC ($V_{oc}(STC)$), el coeficiente de temperatura de la tensión en circuito abierto (β) y el coeficiente de idealidad del diodo (m_d) para ambos modelos eléctricos.

Los valores utilizados para ajustar la Ecuación (3.21) se muestran en la Tabla IV.8.

Tabla IV.8. Valores de los parámetros usados para ajustar la ecuación del modelo eléctrico.

Parámetro	CdTe	a-Si	a-Si/ μ c-Si	mc-Si
N_s	116	108	96	54
$I_{sc}(STC)$ (A)	1.19	1.19	3.35	8.27

Para el modelo Eléctrico_G se usa la expresión definida en la Ecuación (3.22) para hallar el valor de la irradiancia efectiva. Los valores calculados para este modelo se muestran en la Tabla IV.9.

Tabla IV.9. Valores de los coeficientes del modelo Eléctrico_G para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	$V_{oc}(STC)$ (V)	β ($V \cdot ^\circ C^{-1}$)	m_d (adimensional)	R^2 (%)
ELÉCTRICO_G	CdTe	87.9	-0.250	1.28	89.0
	a-Si	86.6	-0.245	1.35	91.2
	a-Si/ μ c-Si	58.2	-0.164	1.28	93.6
	mc-Si	32.7	-0.106	1.00	90.6

Para el modelo Eléctrico_Isc se usa la expresión definida en la Ecuación (3.23) para la irradiancia efectiva. Los valores de los coeficientes hallados para este modelo se muestran en la Tabla IV.10.

Tabla IV.10. Valores de los coeficientes del modelo Eléctrico_Isc para el cálculo de la temperatura de operación del módulo con valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	$V_{oc}(STC)$ (V)	β ($V \cdot ^\circ C^{-1}$)	m_d (adimensional)	R^2 (%)
ELÉCTRICO_Isc	CdTe	88.1	-0.258	1.30	91.9
	a-Si	87.3	-0.266	1.46	96.5
	a-Si/ μ c-Si	58.5	-0.175	1.32	97.2
	mc-Si	32.7	-0.109	1.10	93.2

4.2. COEFICIENTES OBTENIDOS PARA LOS MODELOS INSTANTÁNEOS PROPUESTOS

4.2.1. Modelo NOCT_1p

El valor de a de la Ecuación (3.26) se determina realizando un ajuste experimental de los datos por el método de mínimos cuadrados. Si la velocidad del viento es de 1 m/s, el valor de la temperatura de trabajo del módulo calculado por este método va a coincidir con la que se calcularía usando el método NOCT.

El valor del coeficiente a obtenido para cada una de las diferentes tecnologías usando valores instantáneos se muestra en la Tabla IV.11.

Tabla IV.11. Valores del coeficiente a del modelo propuesto NOCT_1p para el cálculo de temperatura de operación del módulo usando valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	a ($^\circ C \cdot s \cdot m^{-1}$)	R^2 (%)
NOCT_1p	CdTe	-1.78	87.9
	a-Si	-2.39	76.9
	a-Si/ μ c-Si	-1.95	88.1
	mc-Si	-2.42	67.9

4.2.2. Modelo NOCT_2p

Los valores obtenidos para los coeficientes b y c de la Ecuación (3.28) se muestran en la Tabla IV.12.

Tabla IV.12. Valores de los coeficientes b y c del modelo propuesto NOCT_2p para el cálculo de la temperatura de operación del módulo usando valores instantáneos y R^2 del ajuste.

Modelo	Tecnología	b (adimensional)	c ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	R^2 (%)
NOCT_2p	CdTe	0.86	-1.10	93.1
	a-Si	0.77	-1.23	92.0
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.90	-1.43	90.5
	mc-Si	0.76	-1.07	88.1

4.3. ANÁLISIS GLOBAL DE LOS COEFICIENTES

En la Tabla IV.13, 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.

El modelo NOCT no aparece en la tabla ya que, como se ha indicado anteriormente, no tiene coeficientes y la temperatura del módulo se determina usando la temperatura NOCT dada por el fabricante, la irradiancia y la temperatura ambiente.

Tabla IV.13. Coeficientes de los ajustes con valores instantáneos de las variables

Modelos existentes analizados							
Modelo	Tecnología	d_S ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	e_S ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	f_S ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	R^2 (%)		
SERVANT	CdTe	0.028	0.001	0.061	93.8		
	a-Si	0.021	0.001	0.072	93.1		
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.024	0.009	0.076	91.9		
	mc-Si	0.022	0.009	0.063	87.7		
Modelo	Tecnología	k_R ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)			R^2 (%)		
ROSS	CdTe	0.025			89.8		
	a-Si	0.022			87.6		
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.025			85.6		
	mc-Si	0.024			84.9		
Modelo	Tecnología	m (adimensional)	n ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)			R^2 (%)	
KING	CdTe	-3.52	-0.076			93.8	
	a-Si	-3.62	-0.089			92.6	
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	-3.50	-0.095			91.3	
	mc-Si	-3.56	-0.079			89.0	
Modelo	Tecnología	αt (adimensional)	p ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	q ($\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)			R^2 (%)
MATTEI	CdTe	0.88	26.5	2.4			93.8
	a-Si	0.80	27.5	2.9			92.4
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.88	26.5	3.0			91.1
	mc-Si	0.88	26.4	2.6			88.9
Modelo	Tecnología	V_{oc} (STC)(V)	β ($\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m_d (adimensional)			R^2 (%)
ELÉCTRICO_G	CdTe	87.9	-0.250	1.28			89.0
	a-Si	86.6	-0.245	1.35			91.2
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	58.2	-0.164	1.28			93.6
	mc-Si	32.7	-0.106	1.00			90.6
Modelo	Tecnología	V_{oc} (STC)(V)	β ($\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m_d (adimensional)			R^2 (%)
ELÉCTRICO_Isc	CdTe	88.1	-0.258	1.30			91.9
	a-Si	87.3	-0.266	1.46			96.5
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	58.5	-0.175	1.32			97.2
	mc-Si	32.7	-0.109	1.01			93.2
Modelos propuestos							
Modelo	Tecnología	a ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)				R^2 (%)	
NOCT_1p	CdTe	-1.78				87.9	
	a-Si	-2.39				76.9	
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	-1.95				88.1	
	mc-Si	-2.42				67.9	
Modelo	Tecnología	b (adimensional)	c ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)			R^2 (%)	
NOCT_2p	CdTe	0.86	-1.10			93.1	
	a-Si	0.77	-1.23			92.0	
	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	0.90	-1.43			90.5	
	mc-Si	0.76	-1.07			88.1	

Todos los valores de los coeficientes hallados son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% ya que, según el tipo de ajustes realizado, 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. Si algún coeficiente no hubiese sido estadísticamente significativo, se habría eliminado simplificando así el modelo correspondiente.

En los resultados presentados en la Tabla IV.13, puede observarse que el modelo Eléctrico_Isc presenta las R^2 más altas, excepto para la tecnología CdTe. Este modelo es mucho más preciso que los modelos meteorológicos porque para calcular los coeficientes anteriormente dados, se tienen en cuenta las características eléctricas de cada uno de los módulos (V_{oc} e I_{sc}) medidas para cada uno de ellos.

Los coeficientes hallados para el modelo Eléctrico_G y Eléctrico_Isc son muy parecidos. Sin embargo, puede apreciarse, observando los valores de R^2 de los ajustes, que el modelo Eléctrico_Isc es mejor que el modelo Eléctrico_G, pues los valores de R^2 son superiores para todas las tecnologías. Esto es debido a que en el modelo Eléctrico_G el cálculo de la temperatura se hace usando como valor de la irradiancia efectiva el valor de la irradiancia recibida en el plano del módulo, medida de forma instantánea y dividida por el valor de irradiancia en condiciones estándar de medida (1000 W/m^2), mientras que en el modelo Eléctrico_Isc, la irradiancia efectiva que se considera es el valor de la intensidad de cortocircuito medida de forma instantánea y dividida por el valor de la intensidad de cortocircuito proporcionada por el fabricante. Con esta diferencia, en el modelo Eléctrico_Isc se consigue eliminar la influencia del espectro solar.

De los modelos meteorológicos, el modelo NOCT_1p y el modelo de Ross presentan los valores de R^2 más bajos para todos los módulos, mientras que los demás modelos presentan valores más altos. Esto se explica porque son los dos modelos más sencillos: solo tienen un coeficiente en su definición.

El coeficiente a del modelo NOCT_1p es negativo para todos los módulos. Esto indica que las predicciones de este modelo para velocidades de viento inferiores a 1 m/s son mayores que las correspondientes predicciones del modelo NOCT y que el modelo NOCT_1p predice temperaturas de módulos inferiores a las predicciones del modelo NOCT cuando la velocidad del viento es superior a 1 m/s, lo que es coherente ya que la

acción del viento enfría al módulo. Cuando la velocidad del viento es exactamente de 1 m/s, las predicciones de ambos modelos son idénticas.

Para el modelo NOCT_2p ocurre lo mismo, el coeficiente que afecta a la velocidad del viento es negativo para todas las tecnologías, y tiene el mismo significado que en el modelo anterior. El otro coeficiente de cálculo, que es el que matiza el incremento de temperatura por el efecto de la irradiancia solar, tiene valores inferiores a la unidad en todas las tecnologías, lo que es coherente ya que solo una parte de esa irradiancia se emplea en incrementar la temperatura de operación del módulo.

Los resultados obtenidos para el modelo de Servant muestran unos valores de los coeficientes diferentes a los que presentó el autor. Esto es debido a las diferencias existentes entre las tecnologías estudiadas en este trabajo con respecto a las usadas en el trabajo de Servant, así como a los materiales del encapsulado que presentaban los módulos descritos por el autor. En este trabajo, el modelo propuesto por Servant se ha utilizado para más tecnologías de módulos, además de que la aplicación del modelo se ha realizado en condiciones de sol real y no bajo condiciones específicas de un laboratorio.

Los valores calculados para el coeficiente del modelo de Ross coinciden con los que encontramos en publicaciones previas: Buresch (1983), y con los aportados por distintos autores, recogidos en diversos artículos de Skoplaki.

Los valores propuestos para el modelo de King también están de acuerdo con los valores publicados por los autores. King et al. proponen, cuando los módulos están instalados en estructuras bien ventiladas, valores para el coeficiente m de -3.47, -3.56 o -3.58 según sea el tipo de encapsulado de los módulos, y para n valores de -0.0594, -0.075 o $-0.113 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ (véase la Tabla IV.5).

El modelo de Mattei, basado en el balance de energía, presenta valores para $c_a \tau$ entre 0.80 y 0.88 dependiendo de la tecnología del módulo y sus características constructivas. Los valores obtenidos para U_{PV} con velocidades de viento de 1 m/s están comprendidos entre 28.9 y 30.4 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Estos valores concuerdan con los indicados por los diferentes autores mencionados en el artículo de Mattei et al. (2006).

4.4. RESULTADOS DE LA PREDICCIÓN DE TEMPERATURA CON MODELOS INSTANTÁNEOS

En este apartado se analizan todos los resultados de la predicción de temperatura de cada uno de los modelos analizados utilizando datos instantáneos.

Los resultados se han organizado de la siguiente forma:

En primer lugar se presentan los resultados para cada una de las tecnologías de módulos estudiadas. Los datos aparecen agrupados por tecnología de módulo y en cada uno de los apartados se muestran los resultados obtenidos por cada uno de los modelos, mostrándose primero los obtenidos para el año 2011 y a continuación los del año 2012.

Tras esto, al final de este apartado se han expuesto todos los resultados obtenidos para todas las tecnologías, agrupados por modelos para poder obtener unas conclusiones globales de todo el estudio realizado sobre los modelos instantáneos de predicción.

Antes de presentar los resultados obtenidos sobre los modelos instantáneos de predicción se muestran los valores estadísticos de los datos registrados para el estudio. La temperatura ambiente, velocidad del viento e irradiancia registrados en el periodo de medida están representados en la Figura IV.1. En dicha figura se muestran los datos instantáneos del año 2011 a la izquierda y los de los 31 días aleatorios del año 2012 a la derecha.

Datos instantáneos - Año 2011

Datos instantáneos – 31 días 2012

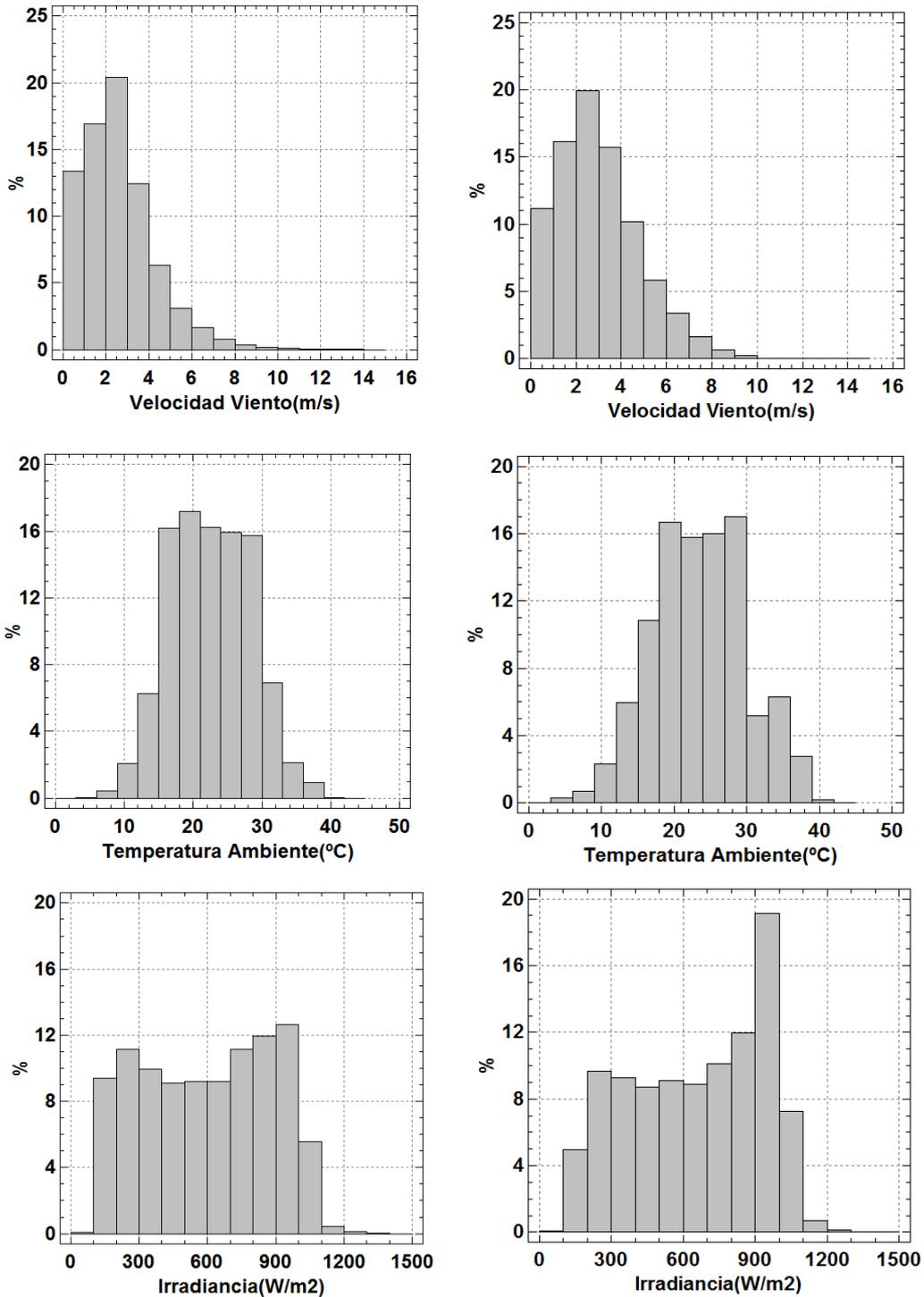


Figura IV.1. Distribución porcentual de los datos registrados durante el periodo de medidas. Valores instantáneos de 2011 y de los 31 días aleatorios de 2012.

Nótese la variabilidad de los datos recogidos en ambos periodos, especialmente en la irradiancia. Los valores medios de la velocidad del viento (W), de la temperatura ambiente (T_{amb}) y de la irradiancia (G) así como la desviación estándar de los datos registrados de 2011 y 2012 se muestran en la Tabla IV.14.

Tabla IV.14. Tabla de valores medios y desviación estándar 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	1.8	2.6	2
T_{amb} (°C)	22.6	5.8	23.6	6.5
G (W/m ²)	599	282	657	277

4.4.1. Módulo de tecnología de telururo de cadmio

Los resultados para el módulo de telururo de cadmio se muestran en la Tabla IV.15, en la que R^2 es el coeficiente de determinación de la regresión lineal entre la temperatura del módulo medida y la predicha por el correspondiente modelo.

Tabla IV.15. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de telururo de cadmio.

Tecnología	Modelo	\overline{TD}	STD	MAE	MAPE	R^2
		(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
CdTe	NOCT	3.40	4.6	4.5	12.5	84.8
	NOCT_1p	1.66	4.0	3.3	9.5	87.7
	NOCT_2p	-0.28	3.5	2.5	7.0	89.7
	ROSS	-0.24	4.0	2.9	8.1	86.7
	SERVANT	-0.15	3.4	2.4	6.6	90.6
	KING	-0.13	3.4	2.4	6.7	90.6
	MATTEI	-0.13	3.4	2.4	6.7	90.5
	ELÉCTRICO_G	-0.08	2.6	1.9	5.9	94.8
ELÉCTRICO_Isc	-0.04	2.1	1.6	5.0	96.2	

En la Tabla IV.15, puede observarse que de todos los modelos, el que mejor realiza la predicción es el modelo eléctrico que utiliza la I_{sc} para el cálculo de la temperatura del módulo, pues su valor medio de desviación de temperatura es el menor de todos y muy próximo a cero (-0.04 °C). También presenta la menor desviación estándar de todos (2.1 °C), el valor más alto de R^2 (96.2%) y los errores más bajos (1.6 °C de error absoluto medio y 5% de error relativo medio).

El modelo Eléctrico_Isc es el más preciso de todos (2.1 °C de desviación estándar) porque utiliza los datos eléctricos del módulo en lugar de los parámetros meteorológicos, ya que en el cálculo de la temperatura usa la irradiancia efectiva dada por el cociente entre la intensidad de cortocircuito medida y la intensidad de cortocircuito en condiciones estándar de medida proporcionada por el fabricante. Con esto se elimina la influencia del espectro además de dejar a un lado la arbitrariedad de los parámetros meteorológicos.

El modelo Eléctrico_G es el segundo mejor modelo, pues presenta los mejores segundos resultados. Este modelo mejora considerablemente a los modelos puramente meteorológicos pero sin conseguir los resultados del modelo Eléctrico_Isc. Puede observarse que la R^2 se distancia 10 puntos del peor de los modelos meteorológicos (el NOCT), y algo más de 4 puntos de los mejores modelos meteorológicos (King y Servant, con una R^2 del 90.6%). Los valores MAE (1.9 °C) y MAPE (5.9%) son también más bajos que en los modelos meteorológicos y la precisión y exactitud de este modelo son las segundas más altas.

Que este modelo sea peor que el modelo Eléctrico_Isc es debido a que usa la irradiancia para calcular la irradiancia efectiva en vez de la corriente de cortocircuito. Aquí se aprecia la influencia del espectro solar, pues estos dos modelos usan la misma ecuación de cálculo para predecir la temperatura del módulo, y la única diferencia que presentan es precisamente el término de la irradiancia efectiva.

Los modelos que le siguen, en cuanto a exactitud en la predicción de temperatura, son los de Servant, King y Mattei, con resultados muy similares en los tres. La desviación media de la temperatura (\overline{TD}) está comprendida entre -0.13 °C y -0.15 °C, prediciendo siempre la temperatura del módulo por defecto (valor negativo de \overline{TD}) con desviaciones estándar de 3.4 °C. Todos ellos tienen además los mismos errores absolutos (2.4 °C) y

relativos (6.6% Servant y 6.7% los demás) y las R^2 , todas con valores superiores al 90%, son muy parecidas entre sí. Estos modelos, tras los modelos eléctricos, son los más precisos, pues son los que presentan los menores valores de la desviación estándar (3.4 °C).

El modelo NOCT no ofrece buenos resultados en el cálculo de la temperatura instantánea del módulo, presentando una desviación media de la temperatura (\overline{TD}) de 3.4 °C, el valor más alto de todos los modelos, y es por lo tanto el modelo menos exacto. También es el menos preciso de todos, con una desviación estándar de 4.6 °C. Los valores MAE y MAPE también son los más altos, mientras que el valor de R^2 es el más bajo, lo que confirma que este no es un buen modelo para predecir la temperatura del módulo. Estos resultados mejoran considerablemente con los nuevos modelos propuestos (NOCT_1p y NOCT_2p). Con el modelo NOCT_2p la desviación media es de -0.28 °C y la desviación estándar es de 3.5 °C, valores que no se alejan mucho de los conseguidos por los modelos de King o Mattei.

Puede observarse que, para esta tecnología, todos los modelos excepto el NOCT y el NOCT_1p predicen la temperatura del módulo por defecto, indicado por los valores negativos de la desviación de temperatura.

También se ha aplicado la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) a cada una de las series de temperatura predicha por cada modelo para compararla con la serie de la temperatura medida. Esta prueba resulta muy útil para determinar el grado de coincidencia existente entre los valores de la muestra de la temperatura medida y los valores de la distribución teórica (temperatura de cada uno de los modelos). La bondad del modelo vendría dada por el resultado en el que las diferencias entre la distribución teórica (temperatura de cada uno de los modelos) y la distribución observada (temperatura medida) sea pequeña y esté dentro de los límites de los errores aleatorios. La prueba se ha realizado calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. El test de K-S se ha aplicado con un nivel de confianza del 95%, por lo que el valor del estadístico p-valor que marcará la zona de rechazo es 0.05, es decir las distribuciones de temperatura de cada uno de los modelos que tengan un p-valor menor de 0.05 serán las que presenten una diferencia estadísticamente significativa con respecto a la distribución de la temperatura medida.

Los resultados de aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov se muestran en la Tabla IV.16.

Como puede apreciarse en dicha tabla, ninguna de las series de temperatura predicha tiene la misma distribución que la que tiene la serie de la temperatura medida.

Tabla IV.16. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de telururo de cadmio con valores instantáneos del año 2011.

Tecnología	Modelo	Estadístico DN estimado	p-valor	Misma distribución
CdTe	NOCT	0.125	0	NO
	NOCT_1p	0.081	0	NO
	NOCT_2p	0.027	0	NO
	ROSS	0.038	0	NO
	SERVANT	0.025	0	NO
	KING	0.025	9.54E-09	NO
	MATTEI	0.025	7.45E-09	NO
	ELÉCTRICO_G	0.014	3.77E-03	NO
	ELÉCTRICO_Isc	0.013	0.015	NO

También se ha analizado la 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 de esa diferencia de temperatura y poder comparar como es la precisión, exactitud y modo de predecir la temperatura de cada uno de los modelos. La Figura IV.2.a y la Figura IV.2.b muestran la distribución porcentual de esa diferencia de temperatura para el módulo de telururo de cadmio con los datos del año 2011.

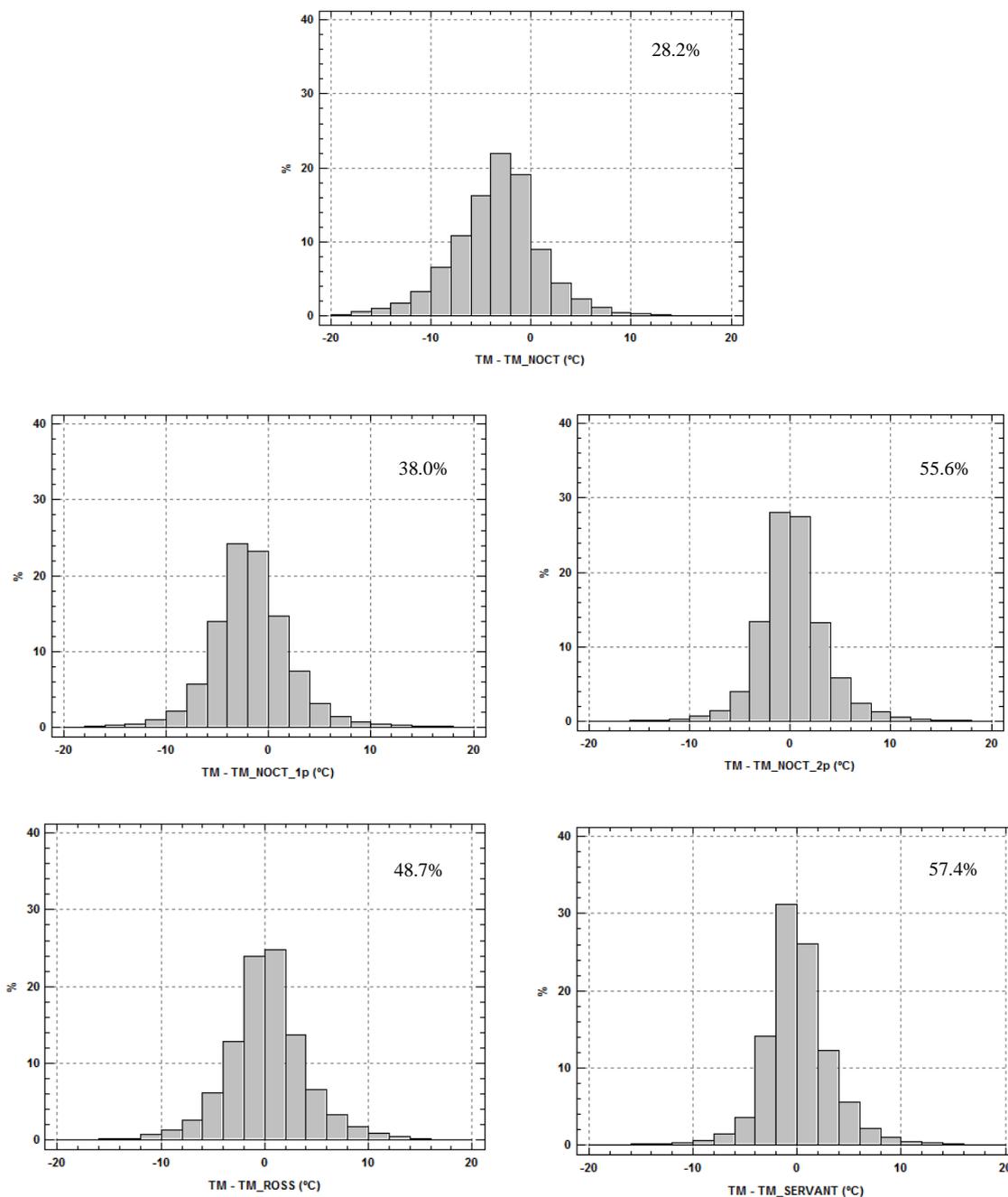


Figura IV.2.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de telururo de cadmio con los datos instantáneos del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

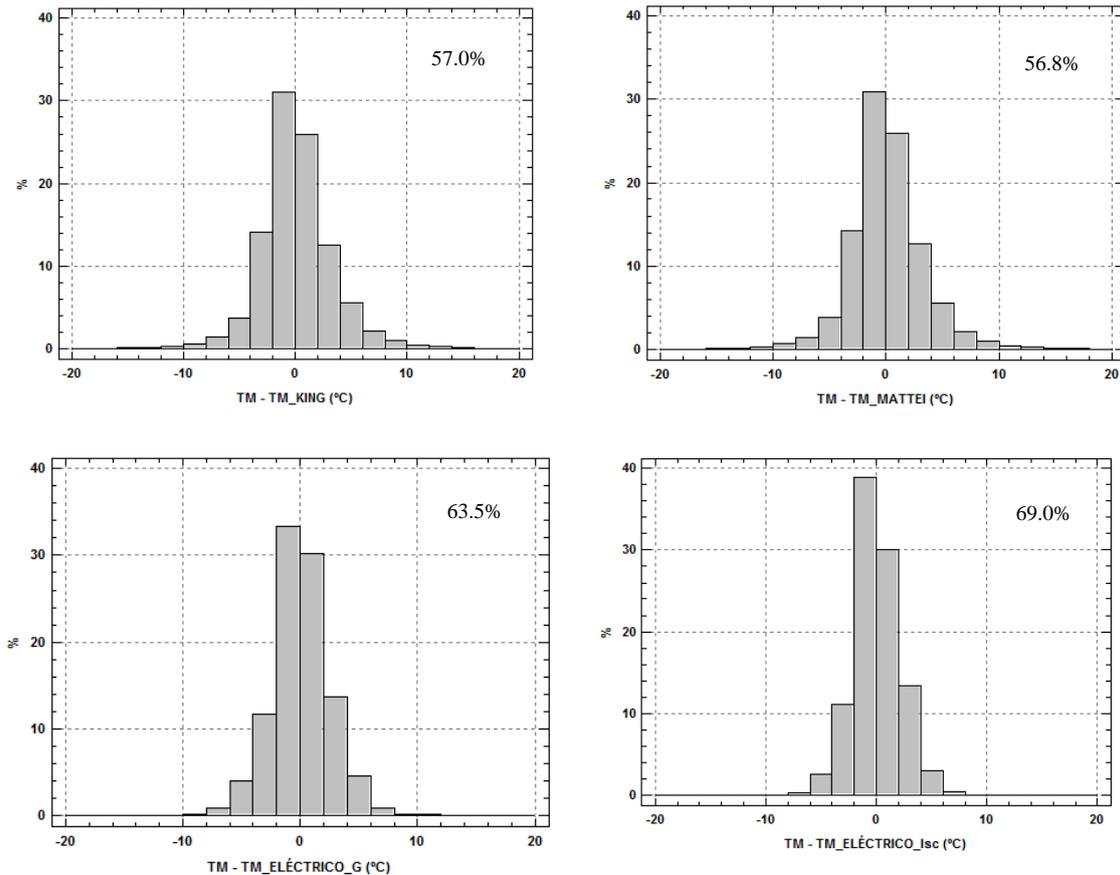


Figura IV.2.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de telururo de cadmio con los datos instantáneos del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

En las gráficas de la Figura IV.2.a y de la Figura IV.2.b puede apreciarse que el modelo Eléctrico_Isc es el que presenta el porcentaje más alto (69%) de valores cuya diferencia, en valor absoluto, entre la temperatura medida y temperatura predicha es menor que 2 °C (en adelante diferencia de temperatura medida y predicha próxima a cero), lo que vuelve a demostrar que es el modelo más exacto de todos.

También queda patente que el modelo Eléctrico_G es más exacto que los modelos meteorológicos, pero que esa exactitud es inferior a la del modelo Eléctrico_Isc, pues el porcentaje de valores con la diferencia de temperatura medida y predicha próxima a cero es del 63.5%, porcentaje menor que en el modelo anterior.

Los modelos de Servant, King y Mattei tienen unas distribuciones de diferencias de temperaturas muy parecidas entre sí, y el modelo propuesto NOCT_2p, arroja unos resultados muy similares a los de estos modelos. El porcentaje de valores con la diferencia de temperatura medida y predicha próximo a cero está en torno al 57% en los

modelos analizados y es del 55.6% en el propuesto. Sin embargo los modelos sencillos de Ross y NOCT_1p, son los que agrupan un menor número de valores con diferencia de temperatura próxima a cero.

Queda patente de nuevo que el modelo NOCT es el peor de todos, el menos preciso y menos exacto de todos los modelos, pues el porcentaje de valores próximos a cero es el más bajo de todos, presentando además porcentajes altos de valores con diferencias entre la temperatura medida y predicha bastante alejadas de cero. En las gráficas de la Figura IV.2 se aprecia claramente que el modelo predice la temperatura del módulo por exceso, pues la diferencia entre las temperaturas medida y predicha tiene un claro balance hacia la parte negativa de los resultados.

Se han analizado las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha de todos los modelos. Dichas gráficas se muestran en las Figura IV.3.a y la Figura IV.3.b.

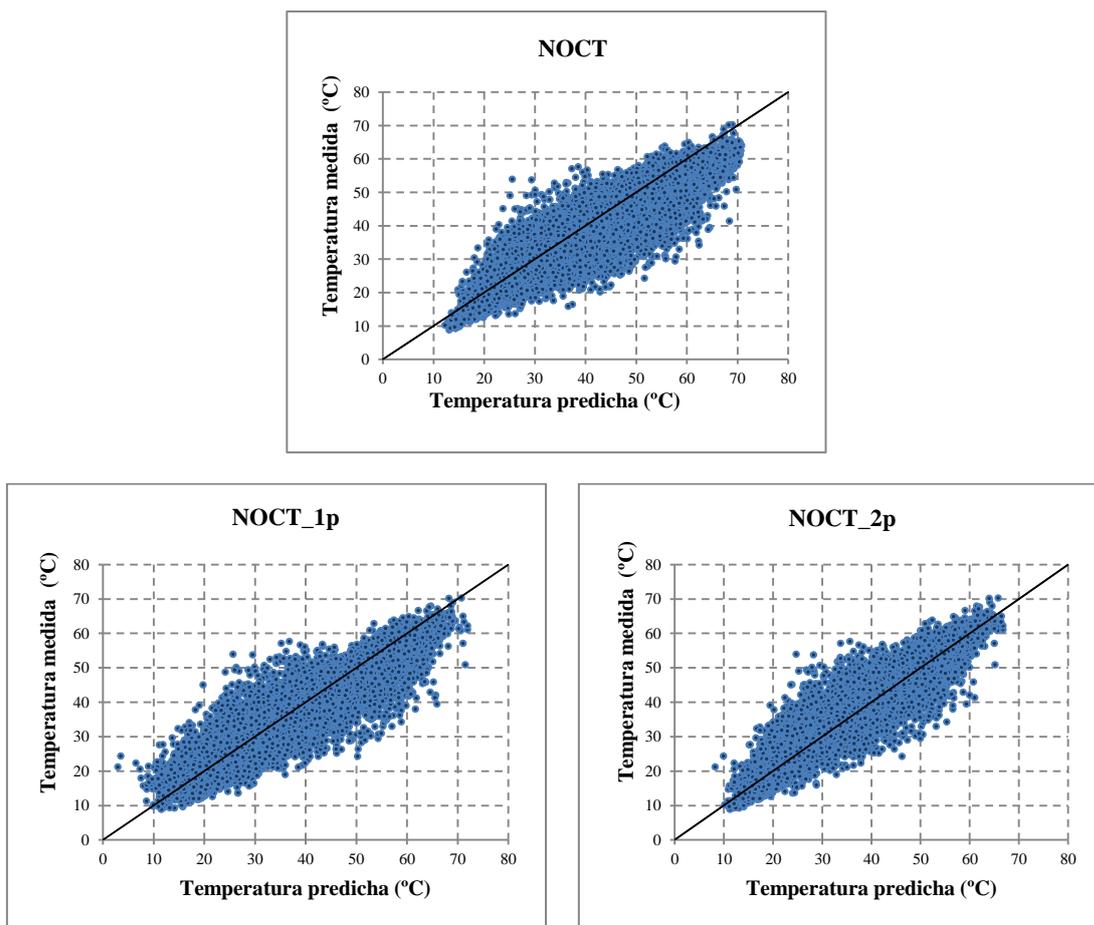


Figura IV.3.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores instantáneos de 2011.

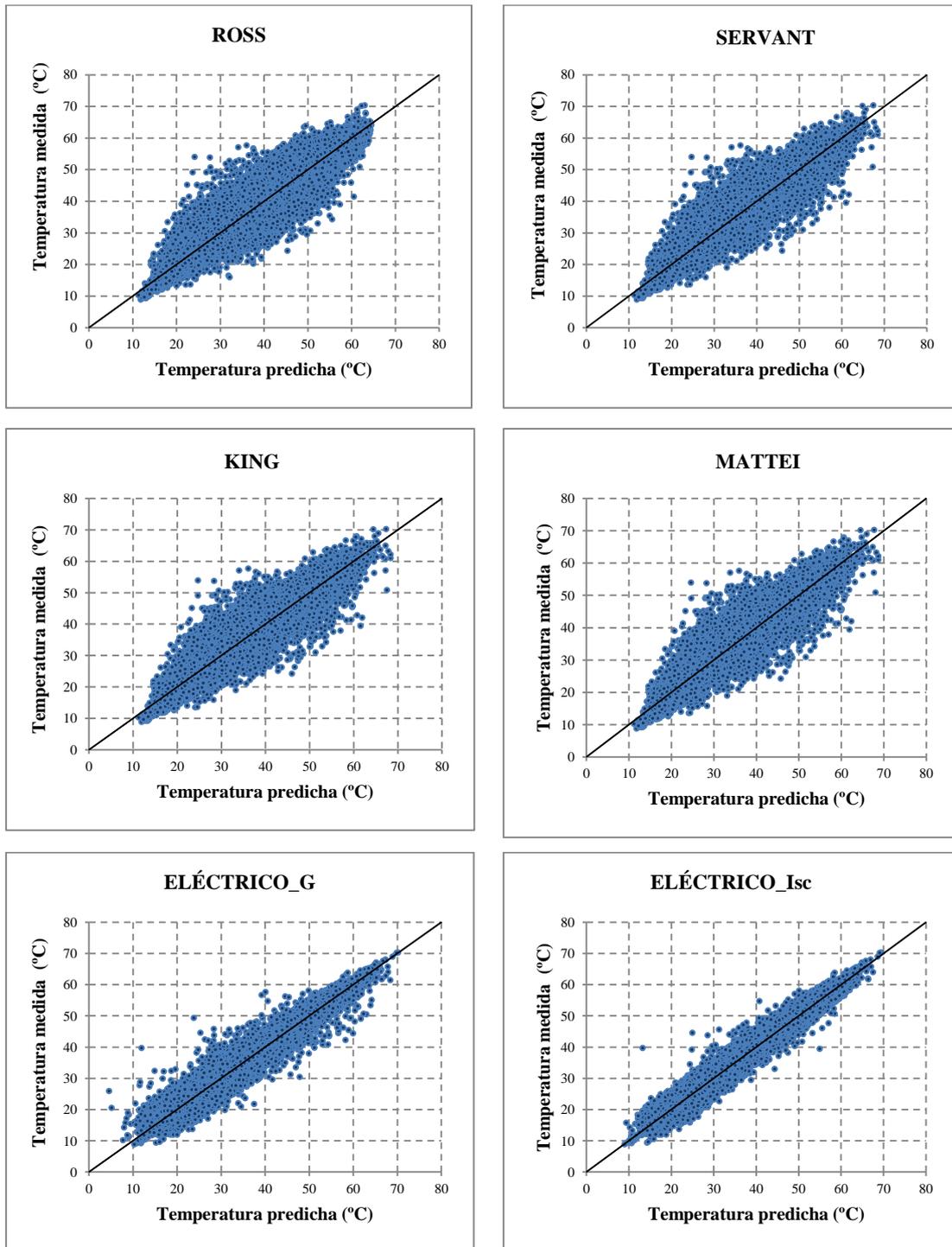


Figura IV.3.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores instantáneos de 2011.

Puede observarse en las gráficas de la Figura IV.3.a y Figura IV.3.b que el modelo Eléctrico_Isc, es el que presenta mayor exactitud y precisión en la predicción de la temperatura: los datos se encuentran muy agrupados en torno a la recta de pendiente

igual a la unidad, y esto indica un menor error en la predicción. La exactitud del modelo Eléctrico_G también es superior a la del resto de los modelos meteorológicos, la agrupación de datos en torno a la recta de pendiente unidad es mucho más compacta que en el resto.

Los resultados del estudio de la predicción de la temperatura del módulo con los datos instantáneos de los 31 días del año 2012 se muestran en la Tabla IV.17.

Tabla IV.17. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de telururo de cadmio.

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
CdTe	NOCT	4.18	4.5	5.0	13.3	85.7
	NOCT_1p	1.37	4.0	3.2	8.7	87.9
	NOCT_2p	-0.40	3.3	2.3	6.3	90.6
	ROSS	0.20	3.9	2.9	7.9	87.5
	SERVANT	-0.36	3.1	2.2	6.0	91.7
	KING	-0.36	3.1	2.2	6.0	91.7
	MATTEI	-0.34	3.1	2.2	6.0	91.7
	ELÉCTRICO_G	0.44	2.3	1.7	5.2	95.7
	ELÉCTRICO_Isc	0.95	1.9	1.7	4.8	97.0

Estos resultados tienen el mismo comportamiento que los que se obtuvieron para el año 2011, lo que aporta un valor añadido a este estudio, ya que el año 2012 es un año diferente al que se utilizó para construir los modelos. La comparación de los datos registrados ya fue mostrada en la Figura IV.1.

Es importante también analizar la distribución de los datos de temperatura del módulo registrados para el año 2011 y para los 31 días 2012. Dicha distribución queda reflejada en la Figura IV.4.

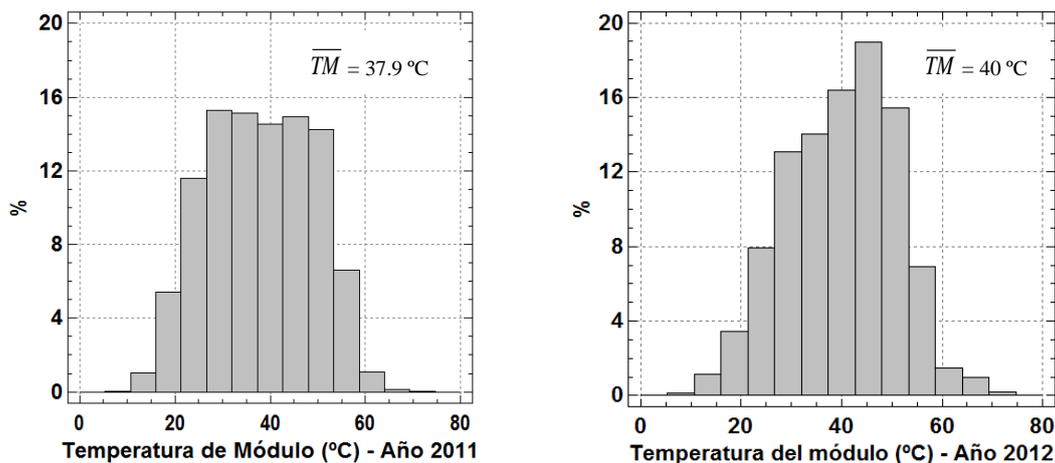


Figura IV.4. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura del módulo para la tecnología de telururo de cadmio durante el periodo de medidas.

Queda patente la diferencia de los datos recogidos en ambos periodos de medida, siendo notorio que en el año 2012 se han registrado mayores temperaturas en el módulo de esta tecnología. Para el año 2011 la temperatura media del módulo presentó un valor medio de 37.9 °C y una desviación estándar de 10.9 °C , mientras que para el año 2012 el valor medio de los datos registrados fue de 40 °C con una desviación estándar de 10.9 °C también. Por tanto, existe una diferencia media de 2.1 °C superior en el año 2012. Sin embargo, este hecho no afecta a la predicción de temperatura pues, como se ha comentado anteriormente, ésta tiene el mismo comportamiento que con los datos de 2011. El modelo Eléctrico_Isc vuelve a ser el que mejor predicción realiza, presenta los valores mayores de R^2 (97.0%) y los valores más bajos de los errores, y el modelo Eléctrico_G es el siguiente mejor modelo.

Tras estos modelos, y con resultados muy similares entre ellos, se encuentran los modelos de Servant, King y Mattei. Tal y como ocurría con los datos instantáneos de 2011, estos tres modelos predicen la temperatura por defecto (la desviación media de temperatura es -0.34 °C en el modelo de Mattei y -0.36 °C en los modelos de Servant y King). El valor de la desviación estándar de estos modelos es de 3.1 °C , mientras que los modelos eléctricos tienen una desviación estándar de 1.9 °C para el Eléctrico_Isc y 2.3 °C para el Eléctrico_G. Los valores MAE de estos modelos también son superiores

a los que tienen los modelos eléctricos, 2.2 °C frente a 1.7 °C que presentan ambos modelos eléctricos.

El modelo NOCT es el que realiza la peor predicción (4.18 °C de desviación de la temperatura, 4.5 °C de desviación estándar, 5 °C de error absoluto medio, 13.3% de error relativo medio y una R^2 igual a 85.7%). Con el modelo NOCT_2p la predicción se mejora considerablemente, acercándose sus resultados a los obtenidos con los modelos de Servant, King y Mattei.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha, con los datos del año 2012 para el módulo de telururo de cadmio para cada uno de los modelos analizados y propuestos, se muestran en la Figura IV.5.a y la Figura IV.5.b.

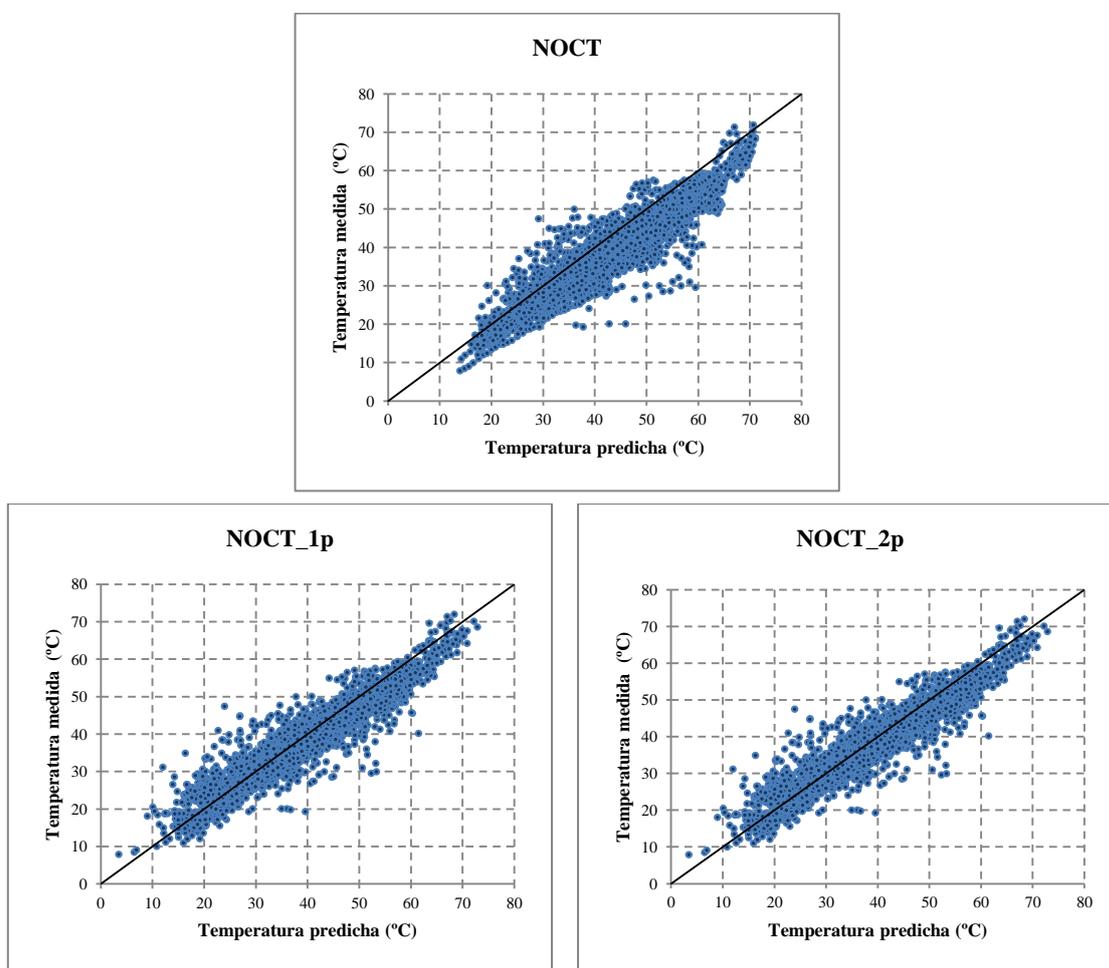


Figura IV.5.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores instantáneos de 2012.

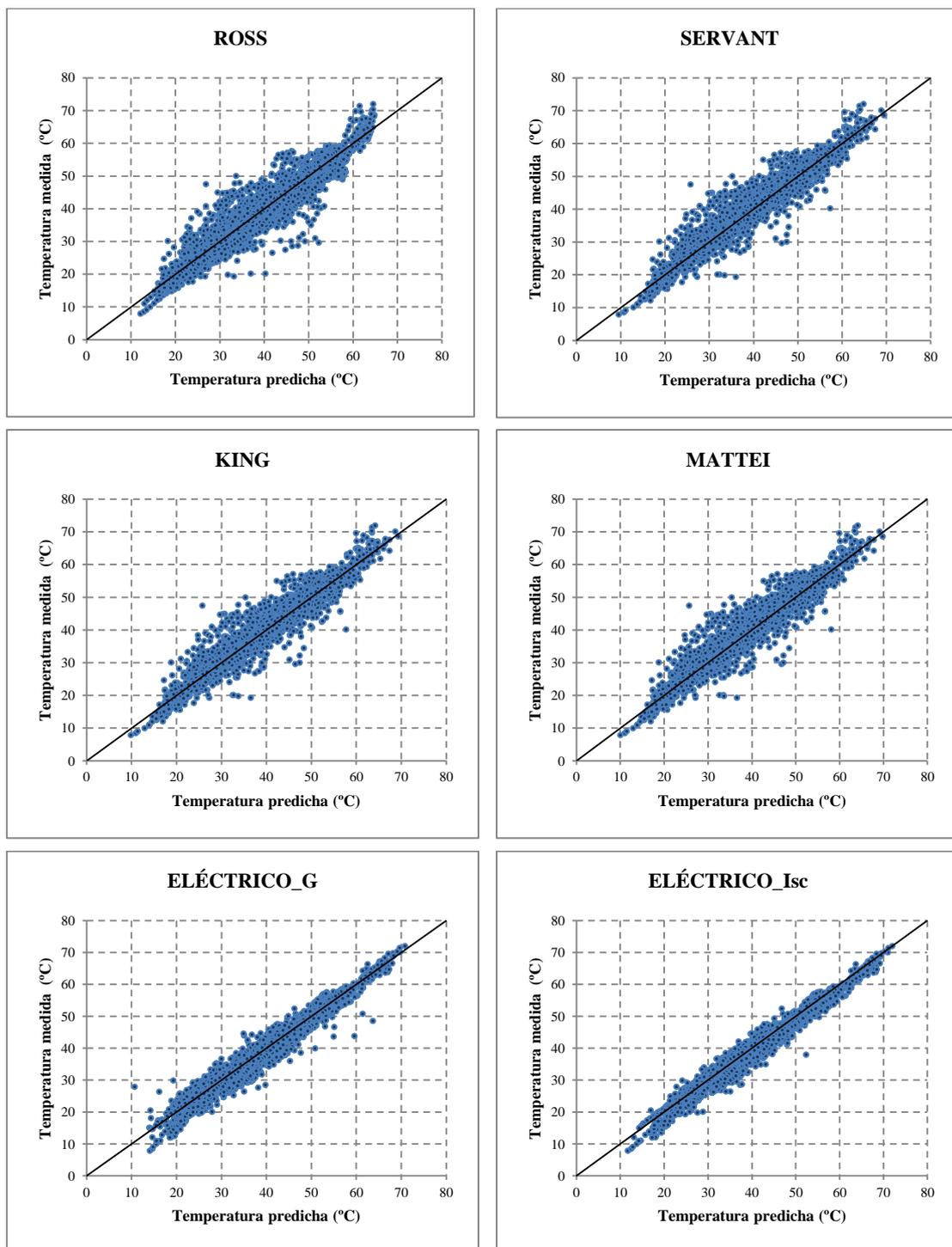


Figura IV.5.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores instantáneos de 2012.

Puede observarse en las gráficas que los modelos eléctricos alcanzan una precisión en la predicción muy superior a la de los restantes modelos: la agrupación de datos alrededor de la recta de pendiente unidad (que es la recta de temperatura predicha igual a temperatura medida) es, en ambos, la mejor de todos los modelos. Estos modelos son los que presentan los valores más altos de R^2 (97.0% y 95.7% respectivamente para el Eléctrico_Isc y el Eléctrico_G).

La predicción que realizan los modelos de Servant, King y Mattei alcanzan valores de R^2 superiores al 91%. El nuevo modelo propuesto NOCT_2p se acerca mucho a estos resultados (el valor de R^2 es de 90.6%) y además mejora notablemente la predicción que realiza el modelo NOCT, que tan solo presenta una R^2 de 85.7%.

4.4.2. Módulo de tecnología de silicio amorfo

Una vez calculada la temperatura que se predice con cada uno de los modelos y tras compararla con la temperatura medida, los resultados de la predicción con el 70% de los datos instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio amorfo se muestran en la Tabla IV.18.

Los histogramas de los datos registrados en el periodo de medida para este módulo están recogidos en la Figura IV.1, mostrada anteriormente, pues es la misma para las cuatro tecnologías estudiadas. El histograma de los datos de temperatura de módulo registrado en el año 2011 se presentará en este apartado un poco más adelante junto con el del año 2012 para poder comparar mejor los datos recogidos.

Tabla IV.18. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio amorfo.

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R^2 (%)
a-Si	NOCT	5.38	4.8	5.8	17.4	82.9
	NOCT_1p	3.07	4.4	4.3	12.9	85.8
	NOCT_2p	-0.18	3.3	2.5	7.4	90.3
	ROSS	-0.19	3.9	3.0	8.9	86.2
	SERVANT	-0.09	3.1	2.3	6.6	91.5
	KING	-0.01	3.2	2.4	7.1	91.1
	MATTEI	-0.01	3.2	2.4	7.2	90.9
	ELÉCTRICO_G	0.00	2.4	1.7	5.5	95.1
	ELÉCTRICO_Isc	0.01	1.4	1.1	3.3	98.3

El modelo Eléctrico_Isc vuelve a presentar la mejor predicción de todos, con desviaciones de temperatura prácticamente nulas y el valor de la desviación estándar menor de todos los modelos, siendo ésta de 1.4 °C. De nuevo, la R^2 que presenta este modelo es bastante más alta que en el resto de los modelos analizados, alejándose considerablemente del mejor de los modelos meteorológicos (98.3% en el modelo Eléctrico_Isc y 91.5% en el modelo de Servant).

El siguiente mejor modelo es el Eléctrico_G. Este modelo es, en términos absolutos, el modelo más exacto de todos, pues la desviación de temperatura es de 0.00 °C. Los valores MAE y MAPE de este modelo son algo peores que los que presenta el modelo Eléctrico_Isc, pero son más bajos que los del mejor modelo meteorológico. El valor de R^2 de este modelo también es superior al mejor valor de R^2 de los modelos meteorológicos (95.1% frente a 91.5% en Servant). Este dato, junto con los bajos valores de MAE y MAPE, nos indica que la predicción de este modelo es muy buena también.

En este tipo de tecnología, el modelo de Servant es, tras los dos modelos eléctricos, el mejor modelo para predecir la temperatura, pues presenta un valor muy bajo de la desviación media de la temperatura, -0.09 °C, una desviación estándar de 3.1 °C, con una R^2 igual a 91.5%. Tras este modelo, y con resultados muy similares al mismo, encontramos los modelos de King y Mattei, que presentan resultados casi idénticos

entre sí en cuanto a valores de las desviaciones medias de la temperatura, -0.01 °C, y valores de desviación estándar, 3.2 °C. Las diferencias en la predicción de ambos modelos es mínima, pero el modelo de King presenta un valor más alto de R^2 , un 91.1% frente al 90.9% de Mattei.

El modelo NOCT vuelve a ser el que realiza la peor predicción. Presenta el valor de desviación media de temperatura más alto, 5.38 °C, y una desviación estándar considerablemente alta también, 4.8 °C y los valores MAE y MAPE también son los más altos, 5.8 °C y 17.4% respectivamente, mientras que el valor de R^2 es el más bajo de todos los modelos, 82.9%, lo que confirma que éste no es un buen modelo para predecir la temperatura del módulo (es el menos preciso y el menos exacto de todos los modelos).

El nuevo modelo propuesto NOCT_2p, mejora notablemente los resultados del modelo NOCT. En este nuevo modelo la desviación media es -0.18 °C y la desviación estándar es de 3.3 °C (valor prácticamente igual al de los mejores modelos meteorológicos). Los valores de los errores están muy próximos a los modelo existentes, King o Mattei, y la R^2 toma un valor de 90.3%.

Los resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov se muestran en la Tabla IV.19.

Tabla IV.19. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio amorfo con valores instantáneos del año 2011.

Tecnología	Modelo	Estadístico DN estimado	p-valor	Misma distribución
a-Si	NOCT	0.168	0	NO
	NOCT_1p	0.111	0	NO
	NOCT_2p	0.032	0	NO
	ROSS	0.042	0	NO
	SERVANT	0.029	0	NO
	KING	0.036	0	NO
	MATTEI	0.036	0	NO
	ELÉCTRICO_G	0.013	0.012	NO
ELÉCTRICO_Isc	0.008	0.283	SÍ	

Puede apreciarse, que tan sólo el modelo Eléctrico_Isc presenta la misma distribución que la serie de la temperatura medida en el módulo.

Las gráficas de la distribución porcentual de frecuencias de la diferencia de temperatura existente entre la temperatura del módulo y la temperatura predicha por cada uno de los modelos, con los datos instantáneos de 2011, se muestran en la Figura IV.6.a y la Figura IV.6.b. En ellas puede apreciarse que el modelo Eléctrico_Isc es el que presenta el mayor porcentaje de valores con diferencias entre la temperatura medida y predicha muy próximos a cero. Este porcentaje es del 86.0% y apenas existen valores cuya diferencia entre la temperatura medida y la predicha estén fuera del rango de ± 4 °C.

Los modelos Servant, King y Mattei presentan unas distribuciones de frecuencias muy similares entre sí, con porcentajes de valores de diferencia de temperatura próximos a cero de 55.3%, 52.1% y 51.0% respectivamente. El modelo propuesto NOCT_2p, aunque tiene una distribución de frecuencias parecida a la del modelo Ross, logra mejores resultados que éste y con un porcentaje (51.3%) muy similar a estos modelos comentados.

En la distribución porcentual de los modelos NOCT y Ross puede apreciarse que existen bastantes más intervalos de frecuencias con diferencias mucho mayores que cero. Además puede verse de nuevo, como ocurría con la tecnología anterior, que el modelo NOCT predice la temperatura del módulo por exceso, pues la distribución de frecuencias muestra un claro balance hacia los valores negativos (la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por el modelo es negativa). El modelo NOCT_1p tiene unos resultados muy similares a estos modelos sencillos.

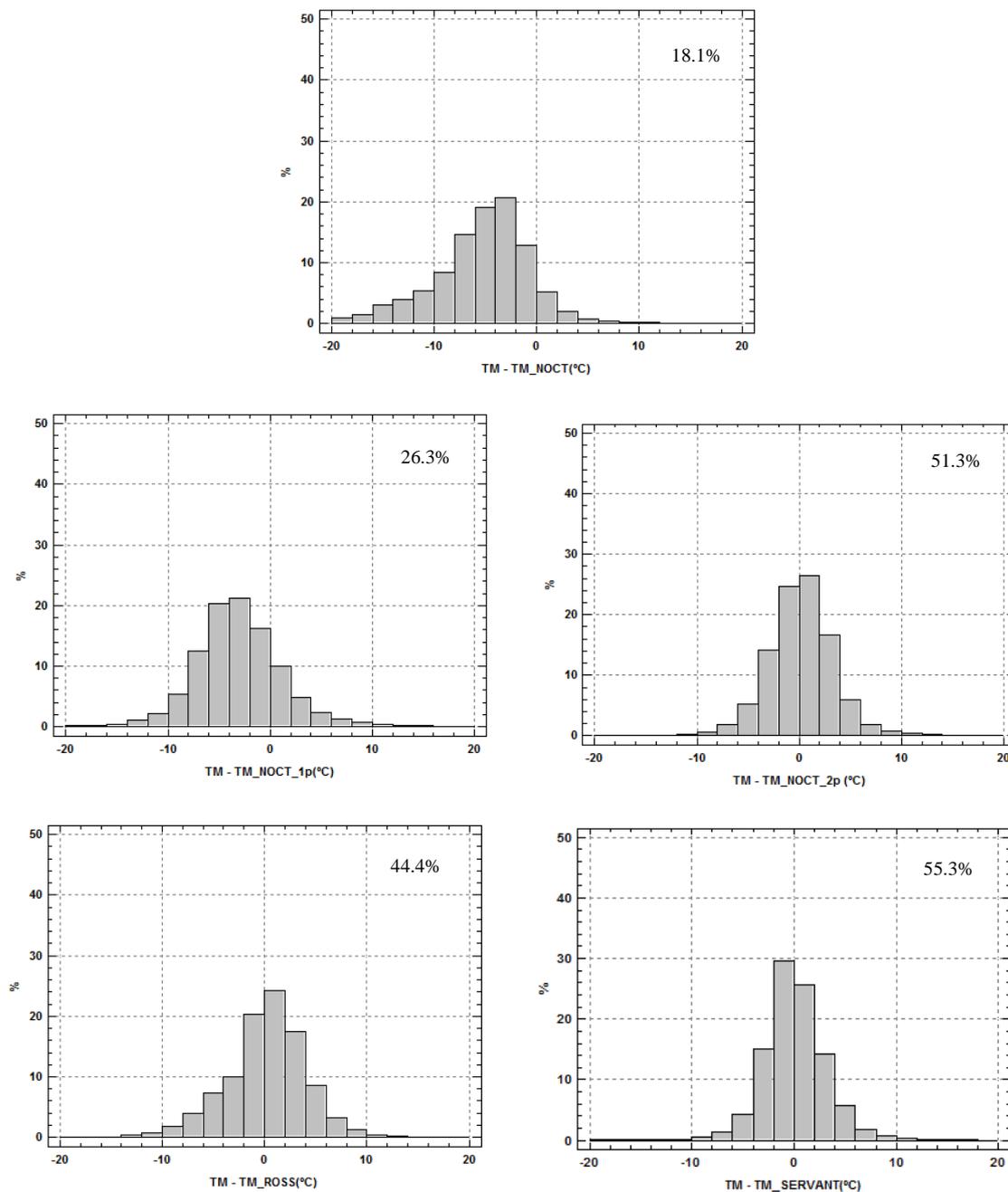


Figura IV.6.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos instantáneos del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

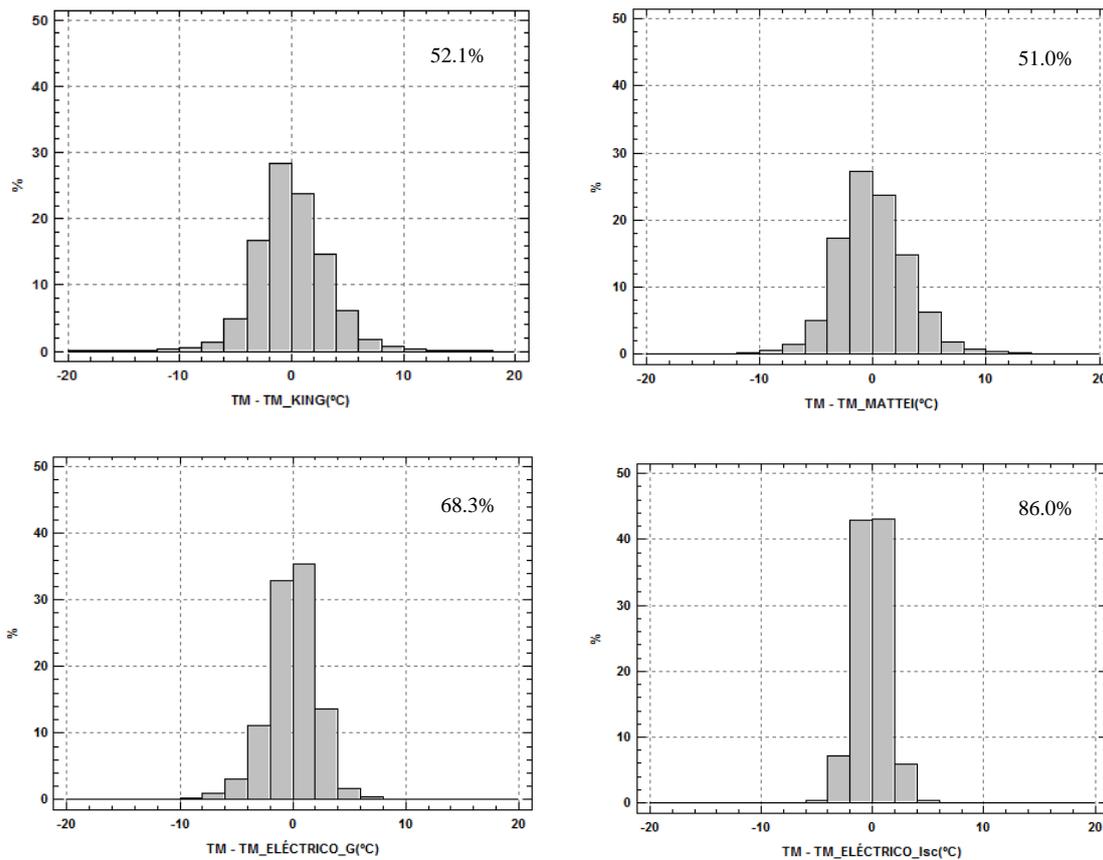


Figura IV.6.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos instantáneos del año 2011.

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 cada uno de los modelos se muestran en la Figura IV.7.a y la Figura IV.7.b.

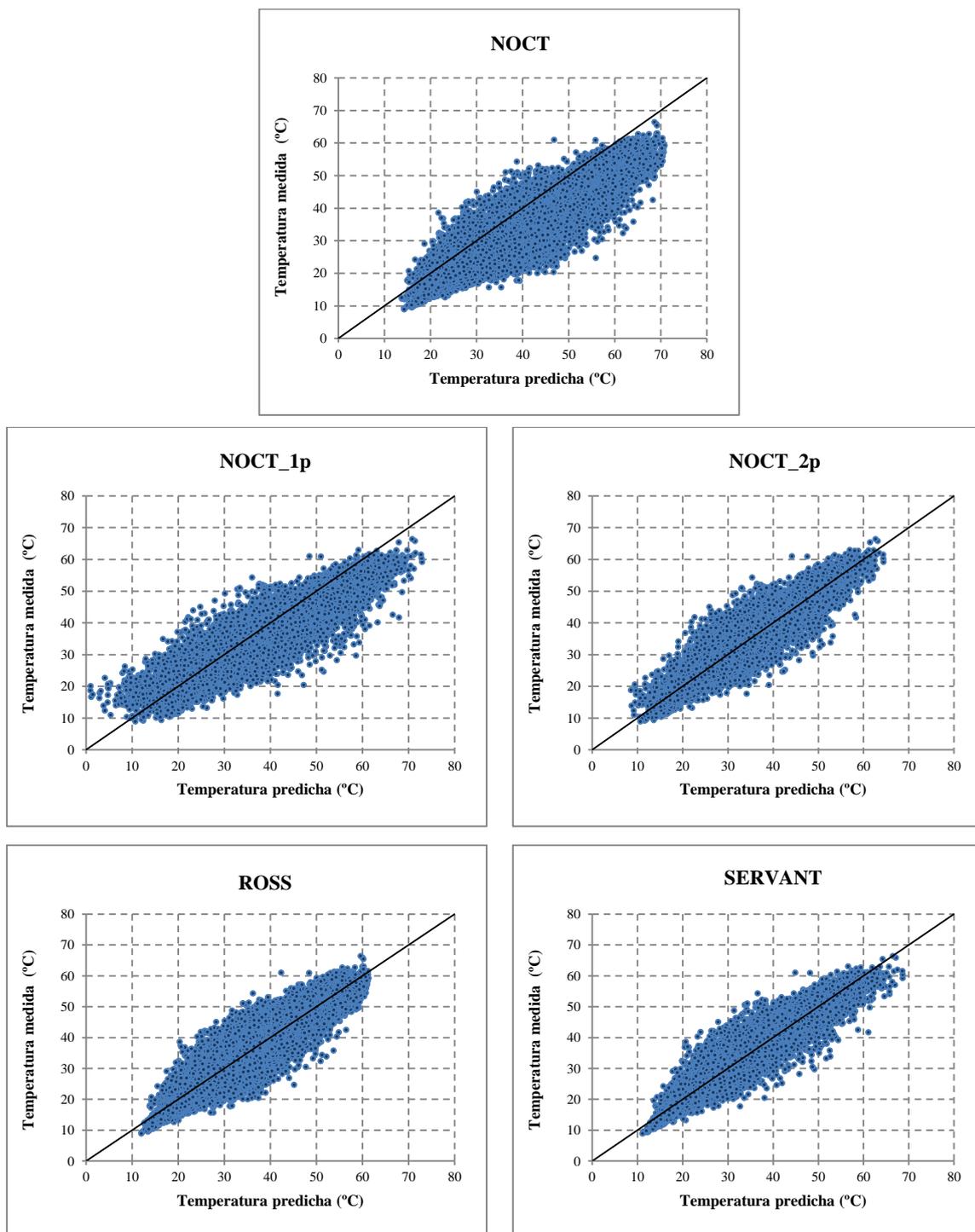


Figura IV.7.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores instantáneos de 2011.

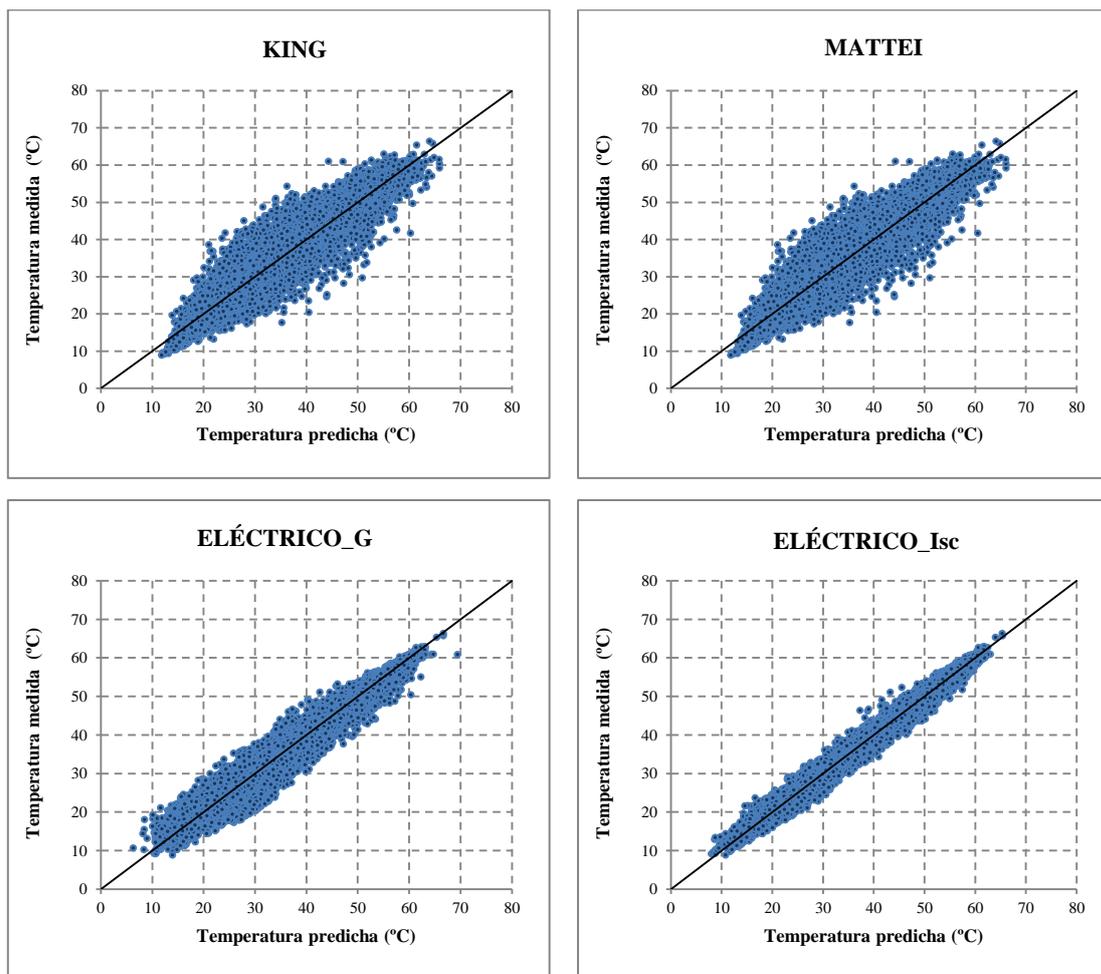


Figura IV.7.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores instantáneos de 2011.

Como puede observarse en estas gráficas, la agrupación de datos en torno a la recta de pendiente unidad del modelo Eléctrico_Isc es muy superior al resto de modelos. También lo es la del modelo Eléctrico_G.

La relación entre la temperatura predicha y la medida que alcanzan los modelos meteorológicos presenta valores superiores al 91%, siendo del 91.5% en el modelo de Servant y 91.2% en el modelo de King. El modelo de balance de energía de Mattei presenta una R^2 del 90.9% y en el nuevo modelo NOCT_2p propuesto es del 90.3%. El nuevo modelo NOCT_2p mejora considerablemente la predicción que realiza el modelo existente NOCT, que tan solo alcanza valores del 82.9%.

Tras el análisis con los datos del año 2011, se ha realizado todo el estudio de predicción de la temperatura del módulo con los datos instantáneos del año 2012. Los resultados se muestran en la Tabla IV.20.

Tabla IV.20. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de silicio amorfo.

Tecnología	Modelo	\overline{TD}	STD	MAE	MAPE	R ²
		(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
a-Si	NOCT	6.79	5.1	7.1	20.1	80.6
	NOCT_1p	3.02	4.4	4.3	12.3	84.7
	NOCT_2p	0.01	3.3	2.5	7.1	89.7
	ROSS	0.63	4.1	3.3	9.5	84.0
	SERVANT	0.06	3.1	2.4	6.6	90.8
	KING	0.07	3.1	2.4	6.7	91.0
	MATTEI	0.11	3.1	2.4	6.9	90.8
	ELÉCTRICO_G	3.20	2.1	3.3	8.2	96.1
	ELÉCTRICO_Isc	3.04	1.1	3.0	8.8	98.5

Hay que hacer constar que en la tecnología del módulo de silicio amorfo ninguno de los modelos eléctricos da buenos resultados en cuanto a exactitud se refiere. Aunque la R^2 del ajuste es muy buena, los valores MAE y MAPE muestran que se está produciendo un error alto en la predicción. Además, los valores de desviación media de temperatura indican que hay un error sistemático de 3 °C en la predicción de la temperatura.

Para el resto de modelos meteorológicos, el comportamiento con los datos del año 2012 es el mismo que el resultante con los datos de 2011.

Puede comprobarse a la vista de los resultados obtenidos, que los modelos atmosféricos de Servant y King y el modelo de balance de energía de Mattei tienen resultados muy parecidos, y que el modelo propuesto NOCT_2p, presenta unos resultados muy similares a ellos. Estos modelos tienen una desviación media de temperatura de 0.06, 0.07 y 0.11 °C respectivamente, y el modelo NOCT_2p de 0.01 °C, lo que indica que el modelo propuesto es más exacto. El valor de la desviación estándar es de 3.1 °C en los tres modelos y en el modelo NOCT_2p es de 3.3 °C. Los valores MAE y MAPE, de todos estos modelos son los menores de todos los modelos atmosféricos.

Para analizar con más profundidad lo que muestran los resultados de los dos modelos eléctricos, se han comparado también las gráficas de frecuencias de temperatura de módulo registrados en el año 2011 y en los 31 días aleatorios de 2012. Estas gráficas se muestran en la Figura IV.8.

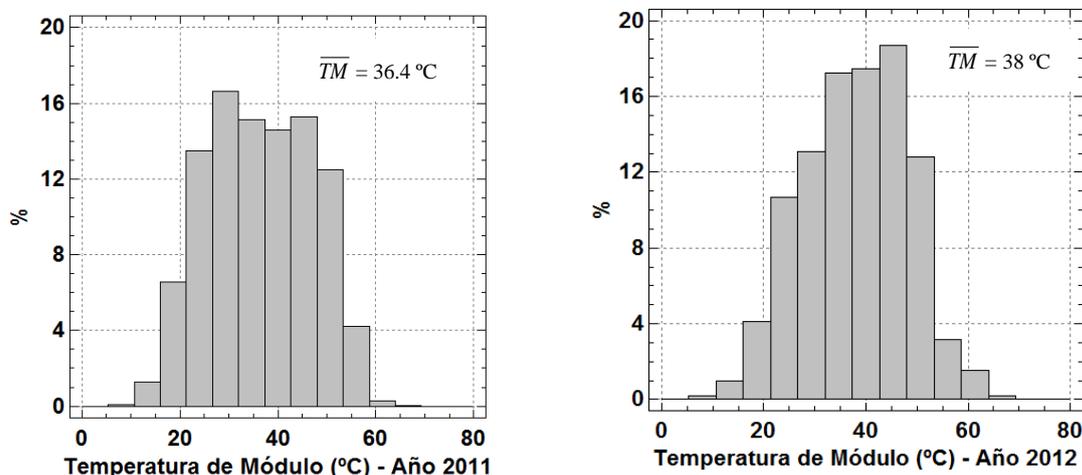


Figura IV.8. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura del módulo para la tecnología de silicio amorfo durante el periodo de medidas.

En la Figura IV.8 se aprecia que la temperatura medida en el módulo en el año 2012 es netamente mayor que en el año 2011. El valor medio de la temperatura medido es de 36.4 °C en 2011 y 38.1 °C en 2012, y sus desviaciones estándar son de 10.6 °C y 10.2 °C respectivamente. Existe una diferencia media de 1.7 °C

En el grupo de investigación se han realizado diversas pruebas para comprobar si ese fallo en la predicción que realizan los modelos eléctricos se debe a una medida errónea de la temperatura, debida por ejemplo a que se hubiese desprendido el sensor que mide la temperatura del módulo (Pt-100); pero la distribución de temperatura superior en el año 2012, indica que esto no ha ocurrido. Para analizar este problema, se ha construido el modelo con los datos del año 2012 para predecir la temperatura del módulo en el año 2011, pero ocurre justamente lo que se esperaba: que la predicción de temperatura calculada muestra un defecto de -3.04 °C. Analizado los valores de la irradiancia, puede observarse que en 2012 son mayores que en 2011, motivo que indica que la temperatura del módulo debe ser mayor en 2012 que en 2011, y esto además concuerda con lo que predice el modelo, pero no es la causa determinante del problema, pues también hubiese ocurrido en el módulo anteriormente estudiado (el de CdTe) y sin embargo este

problema no se presentó en esa tecnología. Analizando los valores de V_{oc} , en el año 2012, el valor medio de esta variable es 0.9 V menor que en 2011. Cabe destacar que V_{oc} es una de las variables que se usan para predecir la temperatura del módulo y por este hecho, en 2012 la temperatura predicha por el modelo debería ser menor que en 2011, aunque ocurre justamente lo contrario. También se ha analizado la potencia máxima que entrega el módulo en ambos años y se ha comprobado que se han perdido 2 W en condiciones estándar. Este hecho podría significar que ha habido una degradación del módulo en 2012. Según el estudio realizado por Ishii et al. (2010) con 14 módulos de diferentes tecnologías, el que presenta la mayor degradación es el de a-Si (alrededor de 4.4% en un periodo de 3 años, aunque más de la mitad de la degradación total ocurre en el primer año). Los autores atribuyen esta degradación a dos causas: la degradación inicial debida al efecto de Staebler-Wronski (durante los 6 primeros meses de exposición a la luz solar), y al hecho de que los módulos de esta tecnología necesitan 2 años para tener un rendimiento estable. (Akhmad, 1997). Estudiar esta posible degradación o la no estabilización del módulo no es objeto de esta tesis, siendo una futura línea de investigación.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha con los datos del año 2012 se muestran en la Figura IV.9.a y la Figura IV.9.b.

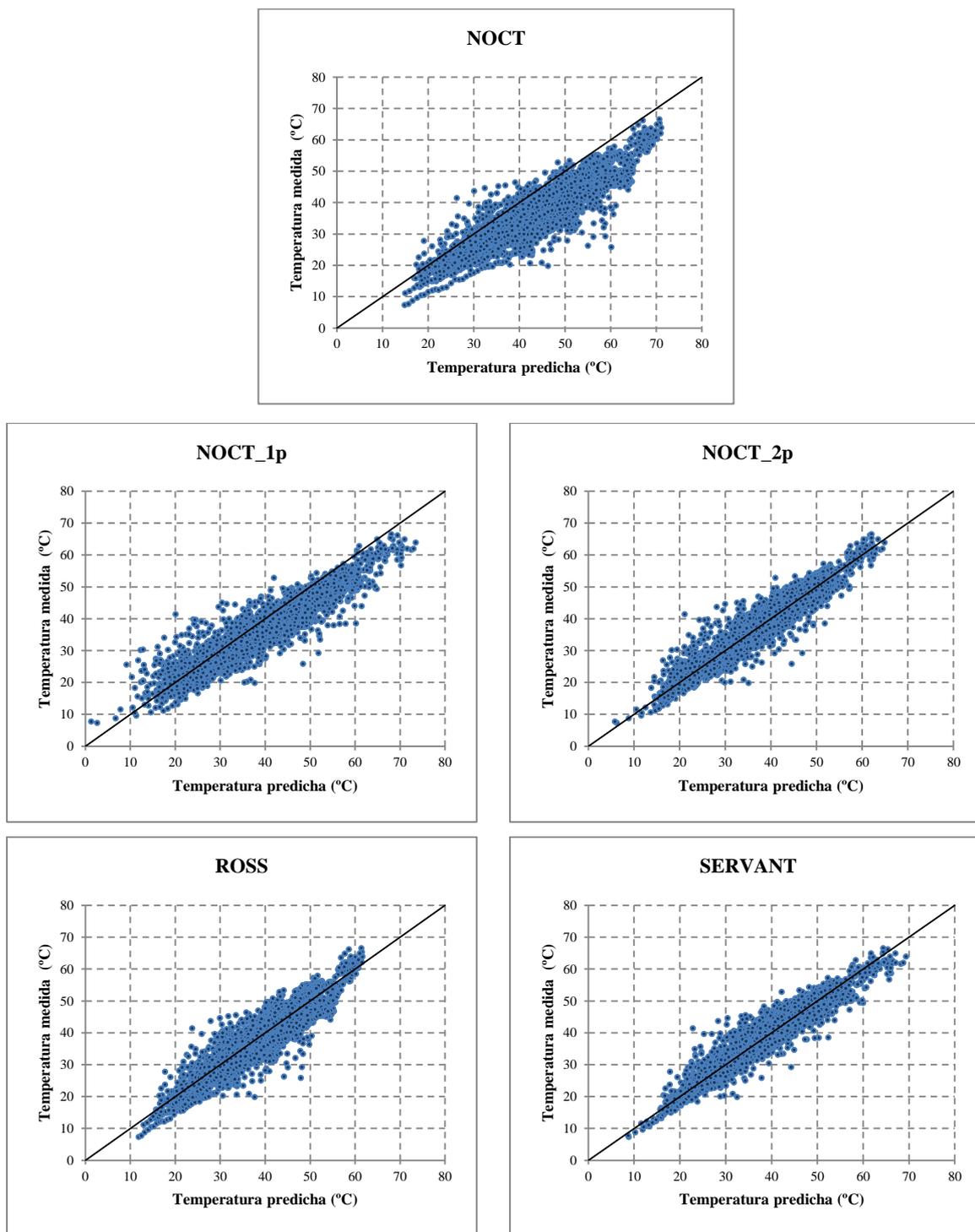


Figura IV.9.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores instantáneos de 2012.

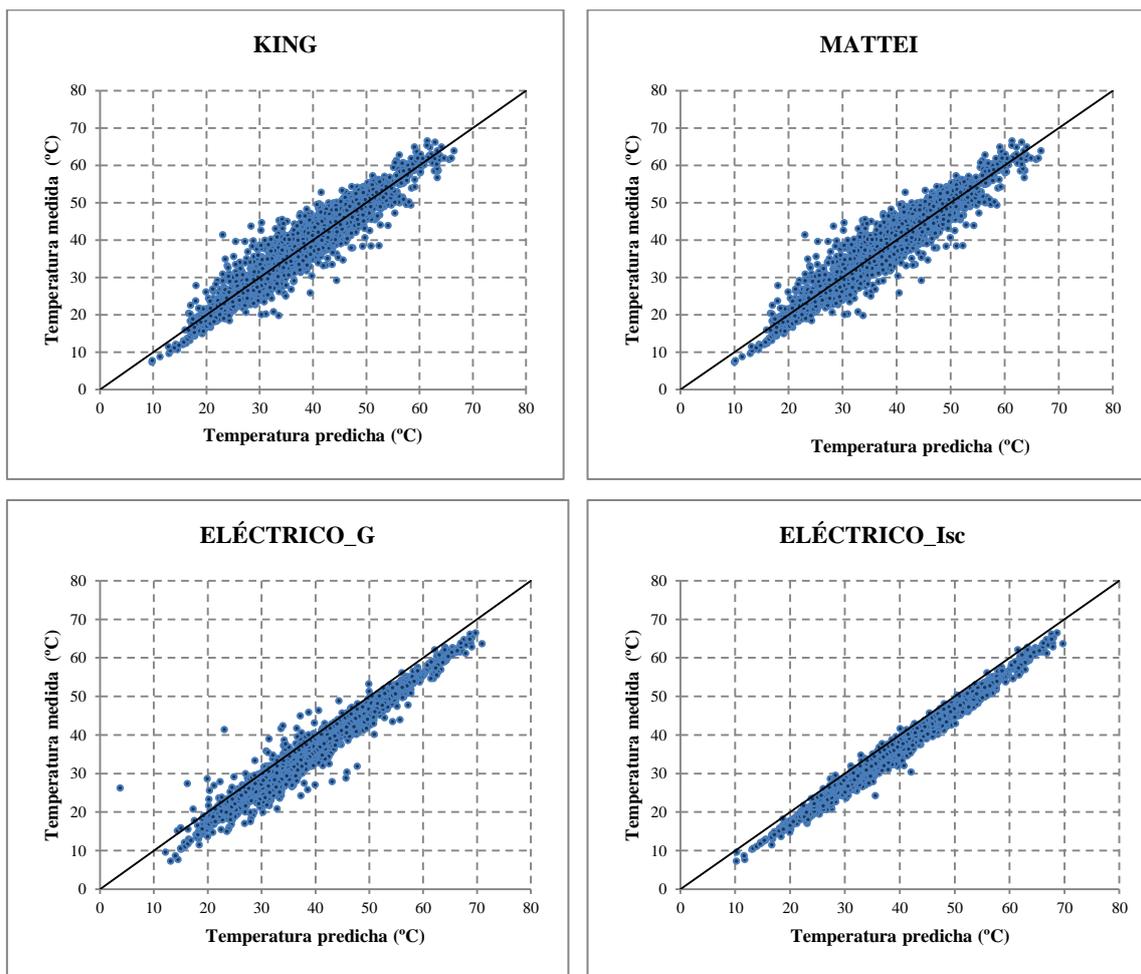


Figura IV.9.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores instantáneos de 2012.

A pesar de que la relación lineal entre la temperatura medida y la predicha por el modelo Eléctrico_Isc es muy buena, con un valor de R^2 del 98.8%, se aprecia claramente que el modelo predice la temperatura por exceso. El valor de R^2 para los modelos meteorológicos es del 91% para el modelo de King, del 90.1% para los modelos de Servant y Mattei y del 89.7% para el modelo propuesto NOCT_2p.

En la gráfica además puede apreciarse que el modelo NOCT predice la temperatura por exceso en gran parte del rango de temperaturas predichas.

4.4.3. Módulo de tecnología de silicio amorfo/microcristalino

Los resultados de la predicción de los distintos modelos para este módulo se muestran en la Tabla IV.21.

Tabla IV.21. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino.

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
a-Si/ μ c-Si	NOCT	3.08	4.9	4.2	12.8	82.4
	NOCT_1p	1.22	4.1	3.3	8.7	87.4
	NOCT_2p	-0.16	3.9	3.0	8.4	88.5
	ROSS	-0.12	4.6	3.5	9.9	83.9
	SERVANT	-0.02	3.6	2.7	7.6	89.9
	KING	0.05	3.7	2.8	7.9	89.4
	MATTEI	0.05	3.8	2.9	8.0	89.2
	ELÉCTRICO_G	0.03	2.3	1.5	4.8	96.0
	ELÉCTRICO_Isc	0.01	1.5	1.1	3.3	98.4

De la misma forma que ocurría en las tecnologías anteriores, el modelo Eléctrico_Isc vuelve a ser el modelo con mayor exactitud y precisión para predecir la temperatura de los módulos de todos los modelos, con una desviación media de temperatura prácticamente nula (0.01 °C), y la menor desviación estándar de todos los modelos (1.5 °C). También presenta los valores MAE (1.1 °C) y MAPE (3.3%) más bajos, y el valor más alto de R^2 (98.4%).

El modelo Eléctrico_G presenta valores algo peores que el Eléctrico_Isc, pero bastante mejores a los valores de los modelos meteorológicos. La R^2 es del 96.0% frente al 89.9% en el mejor de los modelos meteorológicos, que es Servant. Y los valores MAE y MAPE también son mucho más bajos en este modelo, 1.5 °C y 4.8% respectivamente.

El modelo de Servant es el mejor de los modelos meteorológicos, pues presenta una desviación media de la temperatura prácticamente nula ($-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$), la menor desviación estándar ($3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$), los menores valores MAE ($2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y MAPE ($7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el valor de R^2 más alto (89.9%). Con resultados muy parecidos a este modelo, encontramos los modelos de King y Mattei que presentan resultados casi idénticos entre sí en cuanto a valores de las desviaciones medias de la temperatura, $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, y valores de desviación estándar, $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Pero el modelo de King presenta un valor más alto de R^2 , un 89.4% , frente al 89.1% del modelo de Mattei. Estos dos modelos son, tras el modelo de Servant, los que tienen los valores MAE y MAPE más bajos.

El modelo NOCT vuelve a ser el que realiza la peor predicción. Presenta un valor de desviación media de temperatura de $3.08\text{ }^{\circ}\text{C}$, el mayor valor de todos, la mayor desviación estándar, $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, y los valores MAE y MAPE también son los más altos, $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 12.8% respectivamente, además de que el valor de R^2 es el más bajo de todos los modelos, 82.4% . Se confirma, de nuevo, que este no es un buen modelo para predecir temperatura de módulos.

El nuevo modelo propuesto, NOCT_2p, mejora de nuevo la predicción del modelo NOCT. Con el modelo NOCT_2p la desviación media es de $-0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la desviación estándar es de $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. El valor de la R^2 es de 88.5% . Los resultados obtenidos por este modelo propuesto se aproximan bastante a los de los modelos existentes y previamente comentados (Servant, King y Mattei).

Los resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov se muestran en la Tabla IV.22.

Tabla IV.22. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio amorfo/microcristalino con valores instantáneos del año 2011.

Tecnología	Modelo	Estadístico DN estimado	p-valor	Misma distribución
a-Si/ μ c-Si	NOCT	0.101	0	NO
	NOCT_1p	0.054	0	NO
	NOCT_2p	0.031	0	NO
	ROSS	0.044	0	NO
	SERVANT	0.029	0	NO
	KING	0.035	0	NO
	MATTEI	0.036	0	NO
	ELÉCTRICO_G	0.012	0.011	NO
	ELÉCTRICO_Isc	0.010	0.073	SÍ

La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov vuelve a mostrar que todos los modelos excepto el modelo Eléctrico_Isc, tienen distinta distribución que la de la serie de temperatura medida.

Las gráficas de la 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 el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos del año 2011 se muestran en la Figura IV.10.a y la Figura IV.10.b. En dichas gráficas se muestra la distribución porcentual de esa diferencia de temperatura.

En las gráficas de la Figura IV.10.a y la Figura IV.10.b puede apreciarse que, de nuevo, el modelo Eléctrico_Isc, es el más exacto, pues el porcentaje de valores con diferencias entre la temperatura medida y la predicha comprendidas entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ es muy alto, siendo del 85.2%. Y para el modelo Eléctrico_G es del 74.6%. Los resultados obtenidos por estos dos modelos superan todos los resultados conseguidos por el resto de modelos.

Los modelos de King y Mattei presentan unos resultados en la predicción de la temperatura muy similares, pues los histogramas de ambos modelos son casi idénticos. El porcentaje de valores cuya diferencia de temperatura es próximo a cero es del 44.3% y 42.7% respectivamente.

El modelo de Servant es el más exacto tras los modelos eléctricos, y el porcentaje de valores próximos a cero es de un 47.1% en este modelo. Los resultados del modelo NOCT_2p (con un porcentaje del 42.8%) son algo peores que los de Servant, pero no se alejan de los resultados conseguidos por los modelos meteorológicos anteriormente comentados. La predicción del modelo NOCT_1p no se aleja tanto de la predicción que realiza el modelo de dos parámetros en esta tecnología de módulo. En las anteriores tecnologías de módulos esta diferencia ha sido mucho mayor.

Los modelos sencillos no obtienen buenos resultados. El modelo NOCT predice claramente por exceso: lo indica el marcado balance hacia la izquierda de los intervalos de clases del histograma.

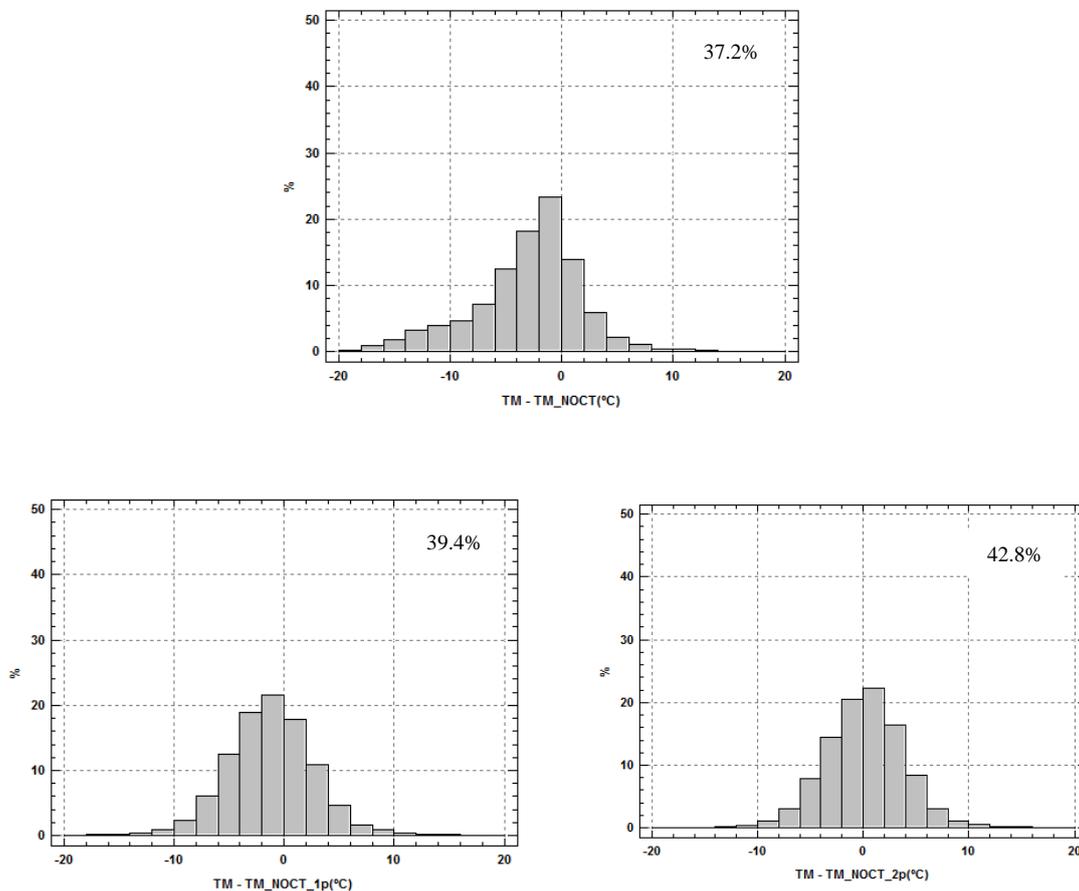


Figura IV.10.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos instantáneos del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

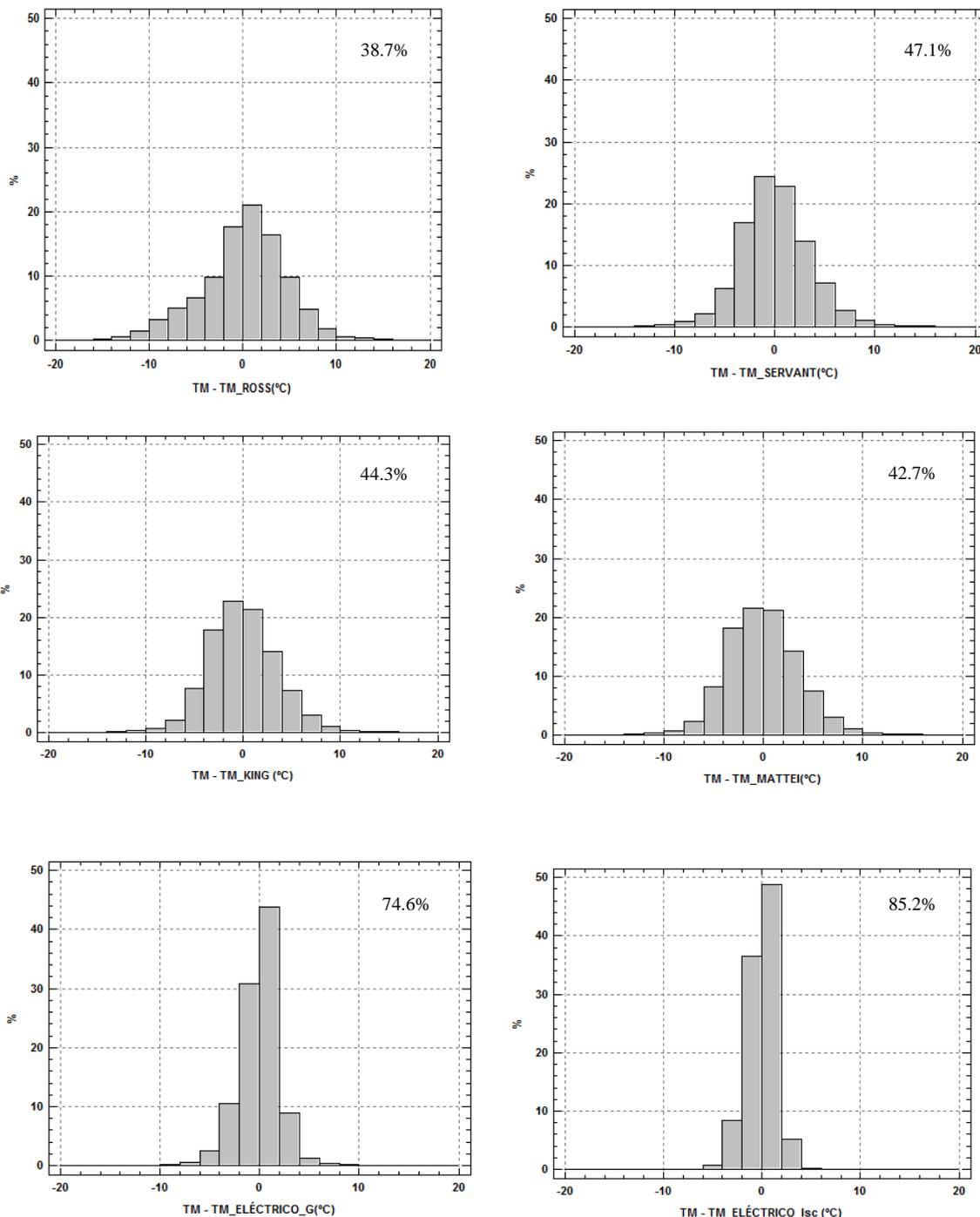


Figura IV.10.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos instantáneos del año 2011.

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 analizados y propuestos con los datos instantáneos del año 2011 se muestran en la Figura IV.11.a y la Figura IV.11.b.

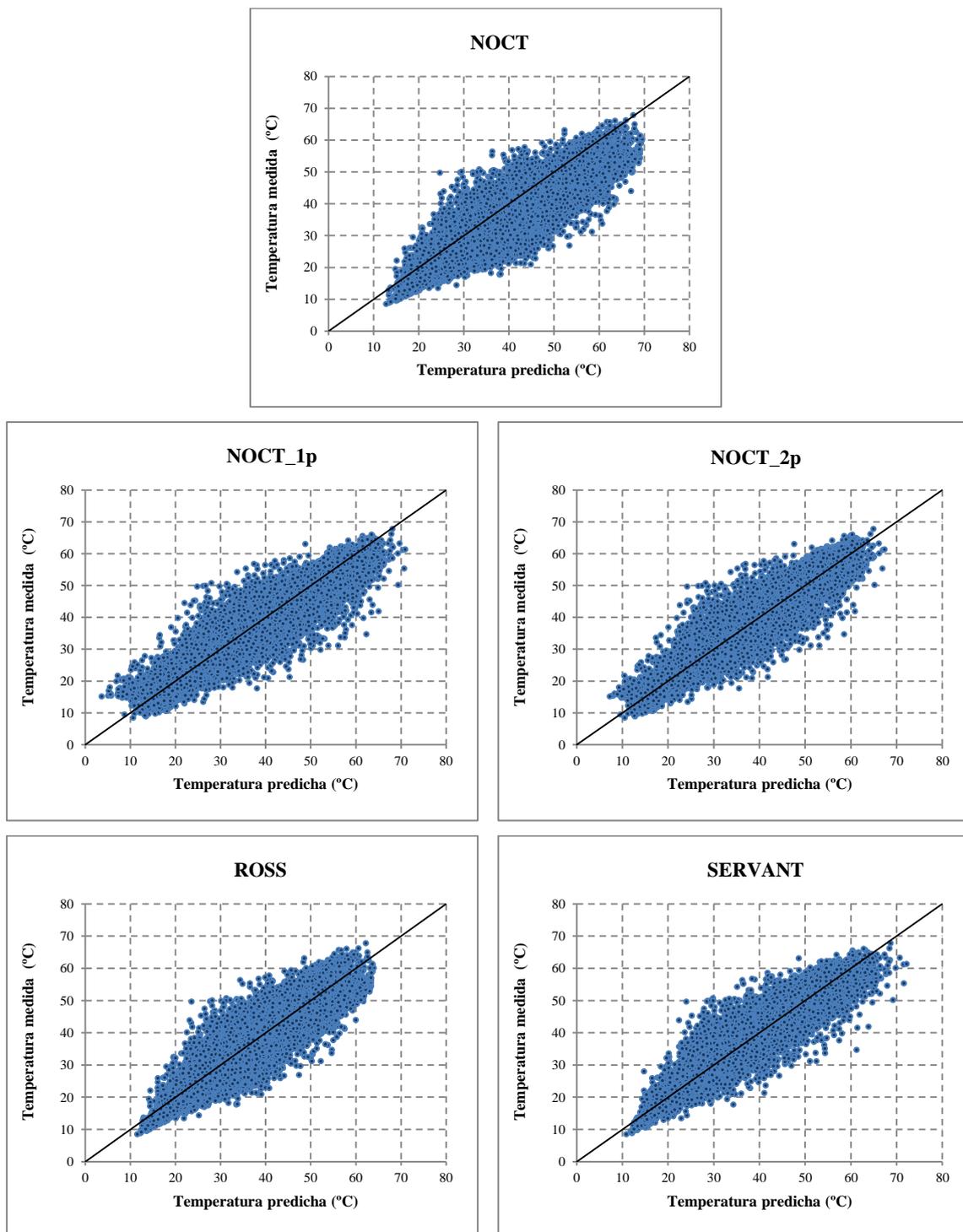


Figura IV.11.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores instantáneos de 2011.

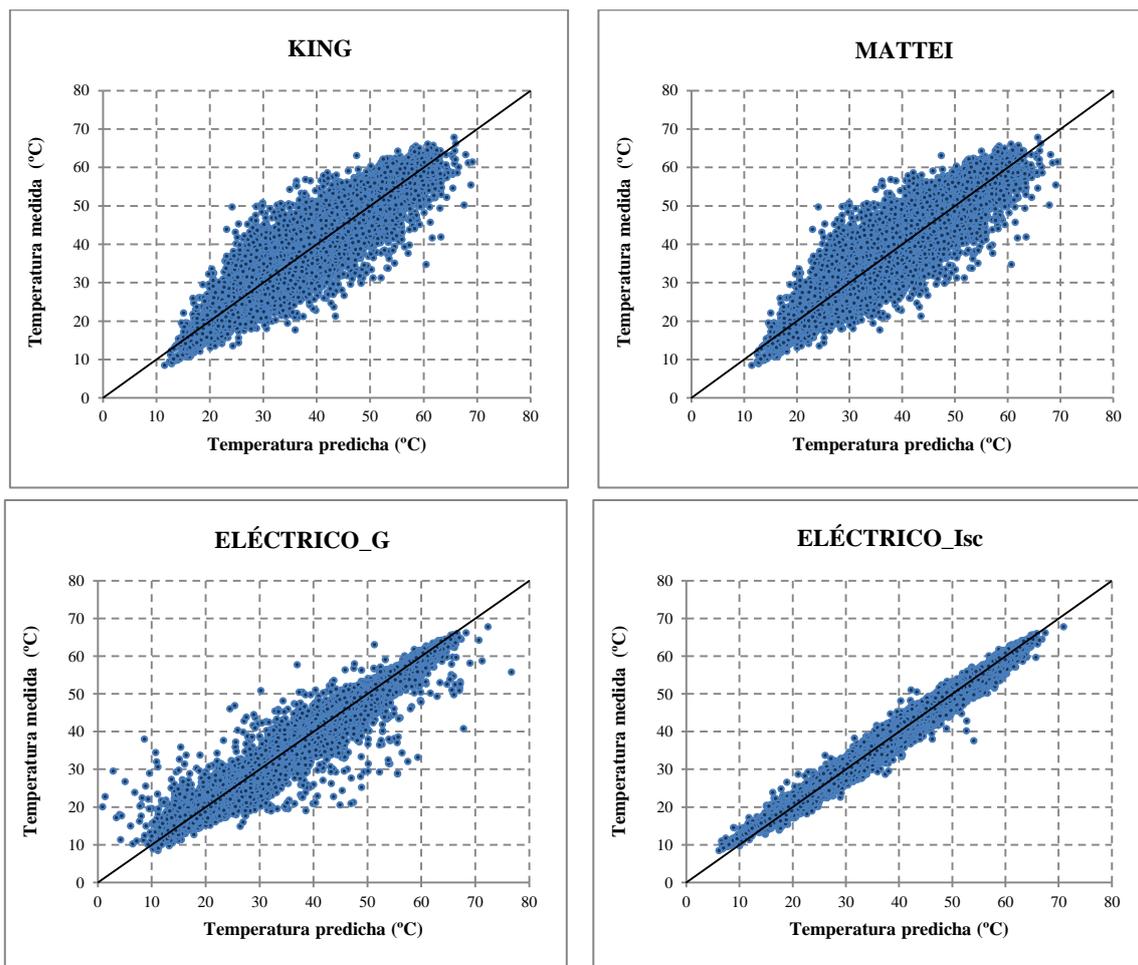


Figura IV.11.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores instantáneos de 2011.

En las gráficas de la Figura IV.11.a y la Figura IV.11.b se observa la exactitud y precisión que tiene el modelo Eléctrico_Isc, que se aleja mucho de los modelos meteorológicos. En estas gráficas se aprecian claramente que los valores MAE y MAPE de este modelo son muy bajos en comparación con los de los modelos meteorológicos. La diferencia en el valor MAE es de 1.6 °C, y en el MAPE es de 4.3% comparada en ambos casos con el modelo de Servant, que es el que presenta los valores más bajos de estos errores.

Los valores de R^2 de los modelos eléctricos también son muy superiores al valor que presentan el resto de modelos y esto se muestra en las gráficas, pues hay una mayor agrupación de valores en torno a la recta de pendiente unidad.

Tras el análisis con los datos del año 2011, se ha realizado todo el estudio de predicción de la temperatura del módulo con los datos instantáneos del año 2012. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla IV.23.

Tabla IV.23. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de silicio amorfo/microcristalino.

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
a-Si/ μ c-Si	NOCT	4.58	5.4	5.4	15.5	78.3
	NOCT_1p	1.58	4.2	3.5	9.9	86.3
	NOCT_2p	0.29	3.9	3.1	8.6	87.3
	ROSS	0.99	4.9	4.1	11.4	80.0
	SERVANT	0.36	3.6	2.9	7.7	89.1
	KING	0.36	3.6	2.9	8.1	89.0
	MATTEI	0.90	3.7	3.1	8.8	88.3
	ELÉCTRICO_G	1.62	2.1	2.0	5.0	96.4
	ELÉCTRICO_Isc	1.52	1.3	1.6	4.6	98.5

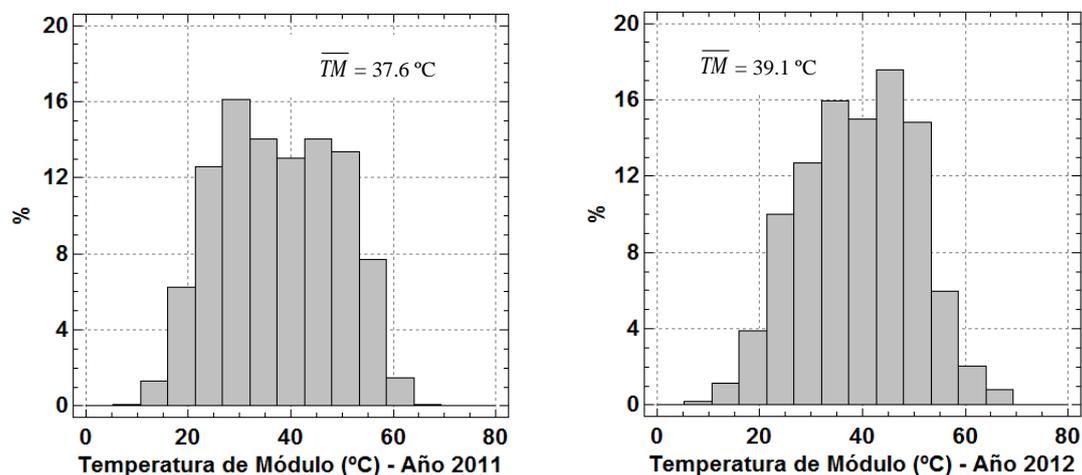


Figura IV.12. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura del módulo para la tecnología de silicio amorfo/microcristalino durante el periodo de medidas.

En la Figura IV.12, comparando los histogramas de temperaturas, puede apreciarse que las temperaturas medidas en el módulo son mayores en 2012. El valor medio de la temperatura medida es de 37.6 °C en 2011 y de 39.1 °C en 2012, y sus desviaciones estándar son de 11.4 °C y 11.0 °C respectivamente. La diferencia es de 1.5 °C más en el año 2012.

En los resultados mostrados en la Tabla IV.11 puede apreciarse que en la predicción del modelo Eléctrico_G y Eléctrico_Isc hay un error sistemático de 1.62 °C y de 1.52 °C respectivamente. A pesar de esto, los modelos eléctricos son los más precisos de todos, presentando la menor desviación estándar de todos, 2.1 °C y 1.3 °C respectivamente, frente a 3.6 °C (en los modelos de Servant y King que es el mejor resultado de los modelos meteorológicos). Los resultados que obtienen estos dos modelos dejan bastante atrás los resultados de los modelos meteorológicos, bastando observar los valores de R^2 (98.5% y 96.4% en los eléctricos y 89.0% en el mejor de los meteorológicos) y los valores MAPE (4.6% y 5% en los eléctricos y 7.7% en el mejor de los meteorológicos).

Este hecho, que ya ocurrió con el módulo de silicio amorfo, puede ser debido a la pérdida de potencia que se produce en los módulos de esta tecnología, debida al efecto de la degradación de Staebler-Wronski, y que se produce generalmente durante los 6 primeros meses de exposición a la luz solar, o al hecho de que los módulos de esta tecnología necesitan 2 años para tener un rendimiento estable. Estudiar este hecho con mayor profundidad se propone como una futura línea de investigación.

Del resto de modelos, el más exacto de todos es el modelo propuesto NOCT_2p, con el valor medio de desviación de temperatura más bajo. Este modelo consigue resultados muy próximos a los modelos de Servant, King y Mattei, y mejora considerablemente, de nuevo, los resultados obtenidos por el modelo NOCT. El valor de la relación entre temperatura medida y predicha mejora desde el 78.3% que presenta el modelo NOCT hasta el 87.3% que tiene el modelo NOCT_2p, y los valores MAE y MAPE, bajan de 5.4 °C a 3.1 °C y del 15.5% al 8.6% respectivamente.

Los modelos de Servant, King y Mattei, a pesar de ser menos exactos que el modelo NOCT_2p, tienen mayor precisión que él, por lo que los valores MAE y MAPE son más bajos en estos modelos. Los valores de R^2 también son más altos en estos modelos.

En la Figura IV.13.a y la Figura IV.13.b se muestran las gráficas de la relación entre la temperatura medida y la predicha por cada uno de los modelos para los valores instantáneos del año 2012.

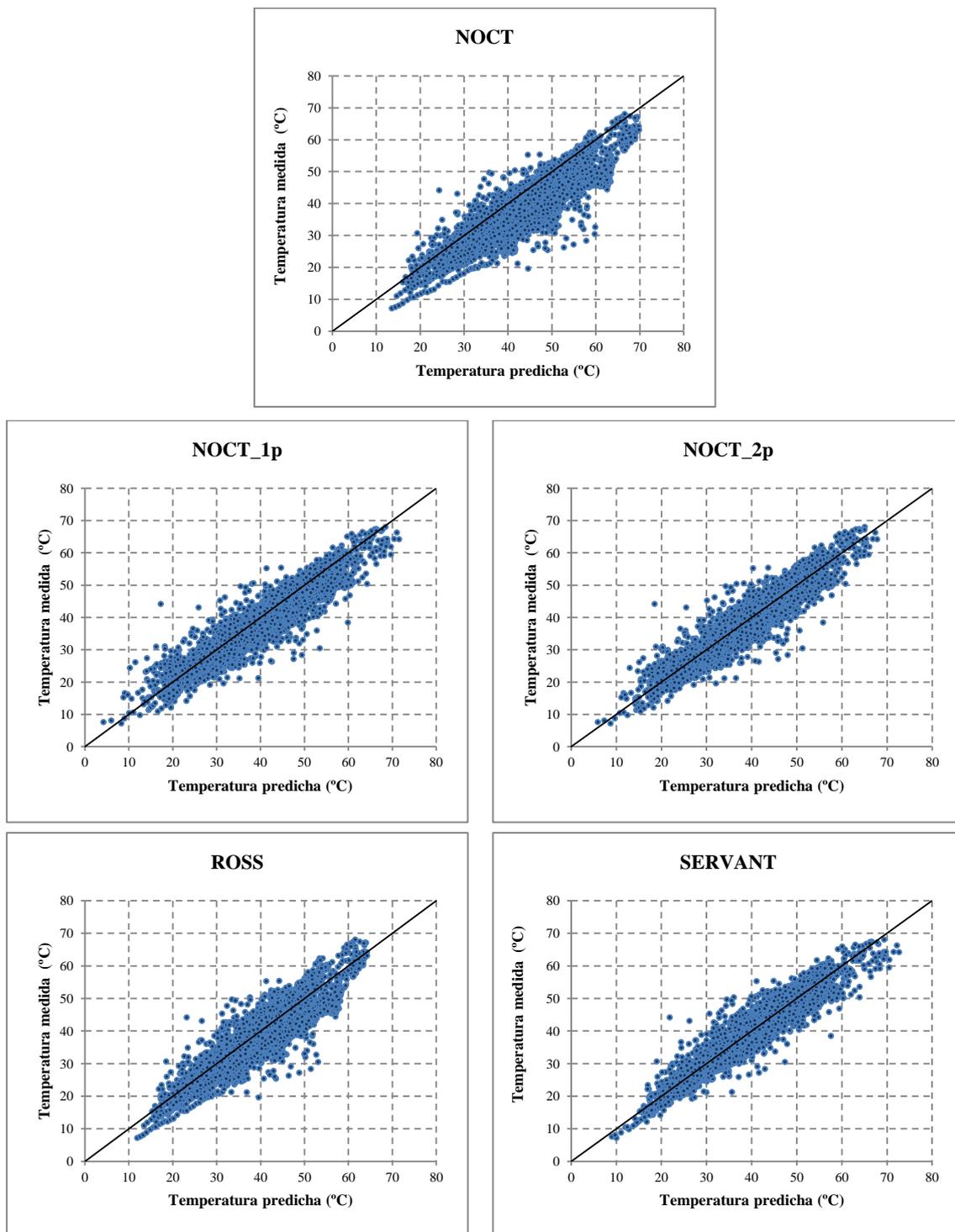


Figura IV.13.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores instantáneos de 2012.

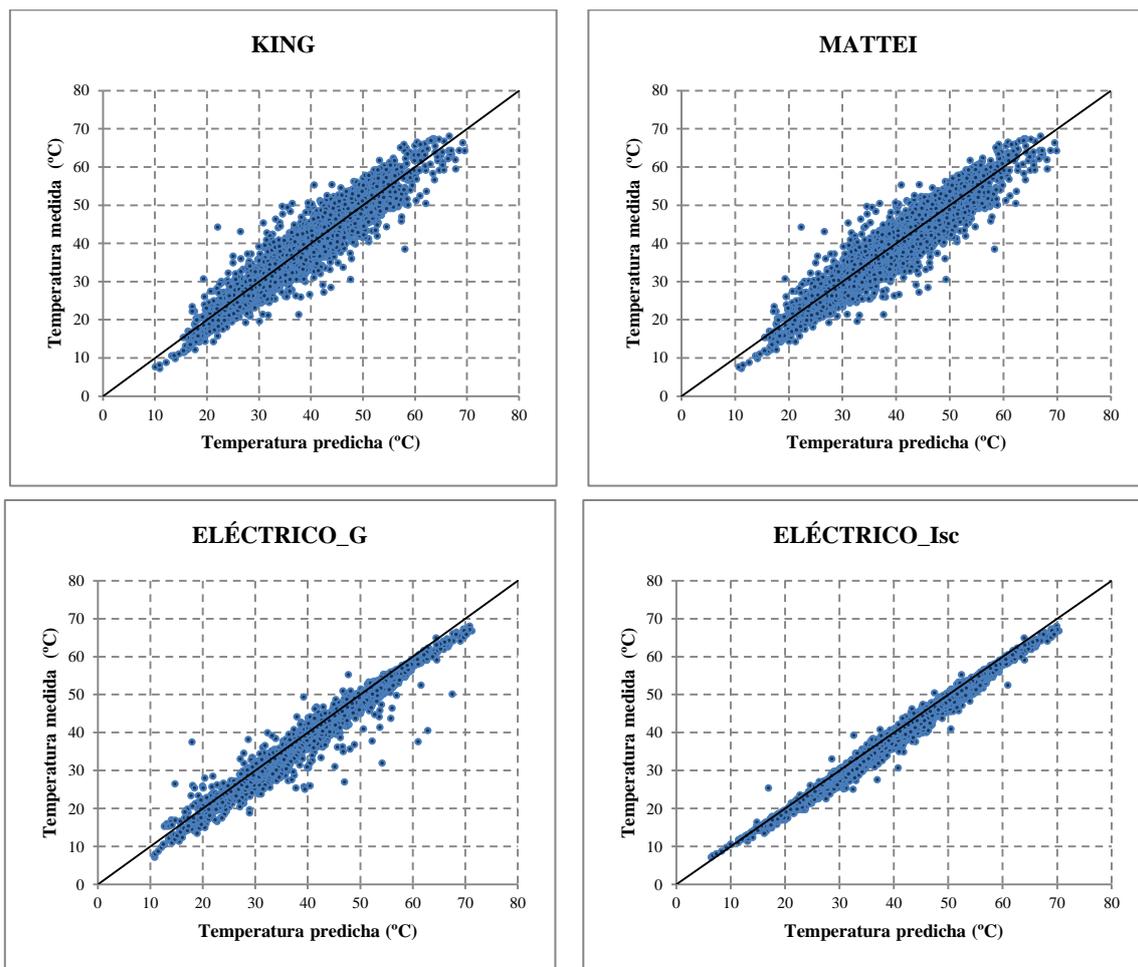


Figura IV.13.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores instantáneos de 2012.

Puede verse en estas gráficas de la Figura IV.13.a y la Figura IV.13.b que la relación lineal entre la temperatura medida y la temperatura predicha por los dos modelos eléctricos es muy alta, aunque ambos modelos predicen la temperatura ligeramente por exceso. Este hecho lo indica una mayor agrupación de valores por debajo de la recta de pendiente unidad y el valor de la diferencia de temperatura media dada en la Tabla IV.23 (que era de 1.62 °C y 1.52 °C para los modelos Eléctrico_G y Eléctrico_Isc respectivamente).

También puede verse que el nuevo modelo propuesto NOCT_2p sigue muy de cerca al mejor de todos los modelos meteorológicos con un valor de R^2 igual a 87.3%, y que los modelos NOCT_1p y NOCT_2p no presentan una diferencia en la predicción tan acusada como había ocurrido en otras tecnologías.

4.4.4. Módulo de tecnología de silicio multicristalino

Los resultados de la predicción se muestran en la Tabla IV.24.

Tabla IV.24. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011 para el módulo de silicio multicristalino

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R^2 (%)
mc-Si	NOCT	5.78	5.1	6.4	17.1	83.0
	NOCT_1p	3.38	4.9	4.8	12.9	83.4
	NOCT_2p	-0.21	3.5	2.5	6.7	88.7
	ROSS	-0.40	3.9	2.8	7.6	85.7
	SERVANT	-0.20	3.6	2.5	6.8	88.2
	KING	-0.29	3.4	2.4	6.4	89.4
	MATTEI	-0.10	3.4	2.6	7.0	89.4
	ELÉCTRICO_G	0.39	2.0	1.3	3.6	98.1
ELÉCTRICO_Isc	0.04	1.7	1.0	2.6	98.8	

Una vez más, el modelo Eléctrico_Isc es el más exacto y preciso de todos los modelos, con una desviación de la temperatura prácticamente nula, 0.04 °C y un valor de la desviación estándar que es la menor de todos los modelos, 1.7 °C. Los dos modelos eléctricos son los que realizan la mejor predicción alejándose bastante de los modelos meteorológicos. Sus valores de R^2 son del 98.8% y del 98.1% respectivamente frente al 89.4% que presentan King o Mattei (los mejores en esta tecnología). Los valores MAE y MAPE también se distancian bastante de los conseguidos por los modelos meteorológicos. Si los comparamos con el peor de los modelos, el NOCT, estos resultados son sorprendentes: para el MAE 1.0 °C y 1.3 °C respectivamente frente a 6.4 °C, y para el MAPE, 2.6% y 3.6% frente a 17.1%.

Del resto de modelos, el más exacto de todos es el de Mattei, con una desviación media de la temperatura de -0.01 °C. Este modelo y el de King tienen resultados casi idénticos en cuanto a desviación estándar, 3.4 °C, y valores MAE (2.4 °C) y MAPE (6.4% y 6.5% respectivamente), que son además los valores más bajos de todos los modelos meteorológicos. Además, el valor de la R^2 de estos dos modelos es el más alto (89.4%).

El modelo NOCT vuelve a ser el que realiza la peor predicción. Presenta un valor de desviación media de temperatura de 5.78 °C y una alta desviación estándar de 5.1 °C. Los valores MAE y MAPE son los más altos, 6.4 °C y 17.1% respectivamente, mientras que el valor de R^2 es el más bajo de todos los modelos, 83.1%, lo que confirma una vez más que éste no es un buen modelo para predecir temperaturas de módulos.

El nuevo modelo propuesto, NOCT_2p, mejora una vez más la predicción del modelo NOCT. Con el modelo NOCT_2p la desviación media de la temperatura es de -0.21 °C, la desviación estándar es de 3.5 °C y el valor de la R^2 es de 88.7%, mayor incluso que la alcanzada por el modelo de Servant. Para esta tecnología, el modelo de Servant no es el mejor de los modelos meteorológicos. El modelo de Servant para esta tecnología, presenta resultados muy similares al modelo NOCT_2p, aunque algo peores, pues los valores de la desviación estándar y de los errores son algo superiores y el valor de R^2 es menor.

Se ha aplicado el test de Kolmogorov-Smirnov para comprobar si la serie de temperatura predicha por cada modelo tiene la misma distribución que la serie de temperatura medida, y se ha encontrado que no ocurre en ningún caso. Los resultados del test de K-S se muestran en la Tabla IV.25.

Tabla IV.25. Tabla de resultados de la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov a las series de temperaturas del módulo de silicio multicristalino con valores instantáneos del año 2011.

Tecnología	Modelo	Estadístico DN estimado	p-valor	Misma distribución
mc-Si	NOCT	0.220	0	NO
	NOCT_1p	0.164	0	NO
	NOCT_2p	0.028	1.51E-08	NO
	ROSS	0.036	0	NO
	SERVANT	0.031	0	NO
	KING	0.029	0	NO
	MATTEI	0.022	1.16E-05	NO
	ELÉCTRICO_G	0.028	0	NO
ELÉCTRICO_Isc	0.022	1.70E-05	NO	

Las gráficas de la 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 el módulo de silicio multicristalino con los datos del año 2011 se muestran en la Figura IV.14.a y la Figura IV.14.b.

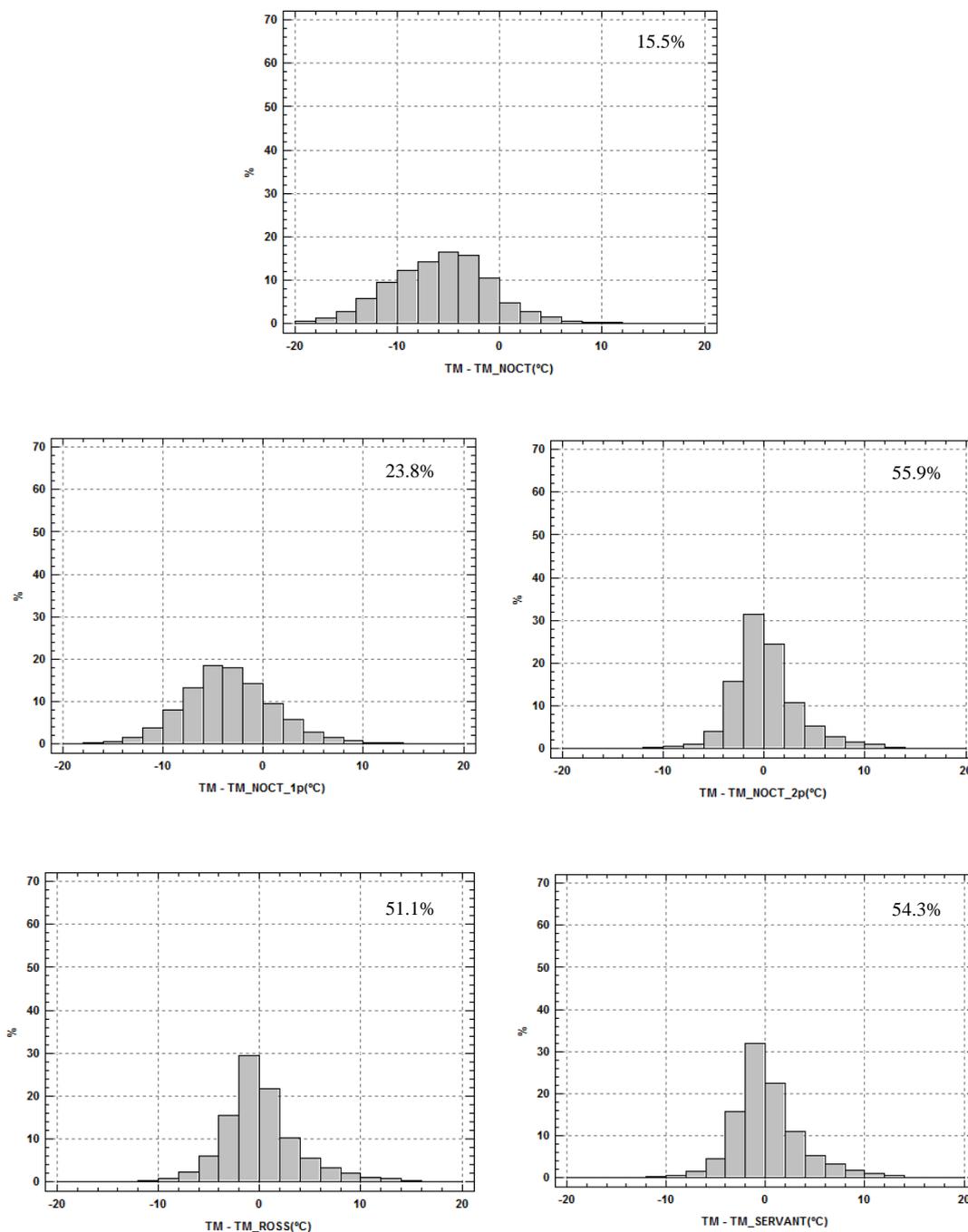


Figura IV.14.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos instantáneos del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

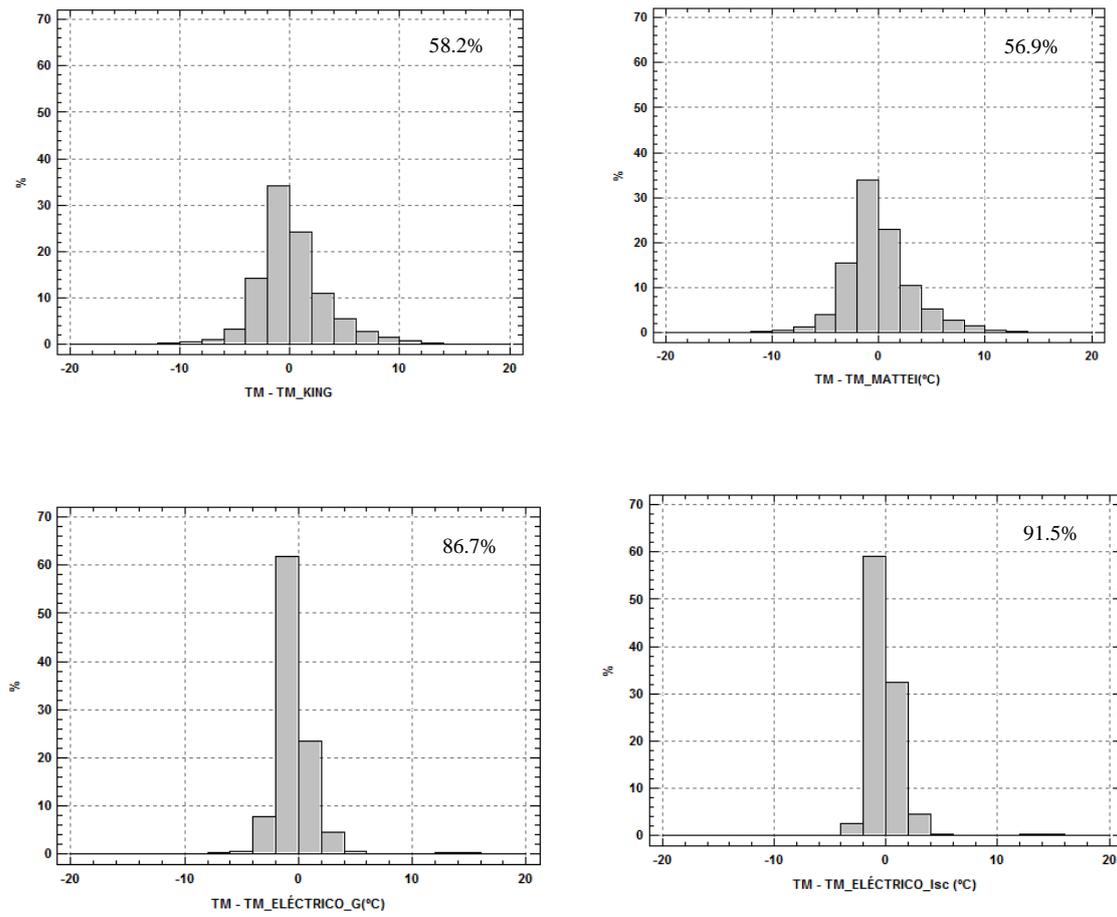


Figura IV.14.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos instantáneos del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

Nótese que en esta tecnología la escala de los porcentajes de valores se ha ampliado hasta el 70%, mientras que anteriormente siempre ha sido menor (hasta el 40% para el telururo de cadmio y el 50% para el silicio amorfo y silicio amorfo/microcristalino). La escala se ha ampliado porque el porcentaje de valores con diferencias entre temperatura medida y temperatura predicha muy próximos a cero es del 86.7% para el modelo Eléctrico_G y del 91.5% para el Eléctrico_Isc.

Los modelos NOCT_2p, Ross, Servant, King y Mattei presentan una distribución de frecuencias muy parecidas entre sí. El porcentaje de valores con diferencias de temperatura próximos a cero está alrededor del 55%, siendo un poco inferior en el modelo de Ross.

Los modelos NOCT y NOCT_1p son los modelos con peores resultados, siendo el NOCT el menos exacto de todos. Ambos modelos predicen la temperatura por exceso, pues en las gráficas puede apreciarse que la distribución de diferencias de temperaturas está prácticamente toda a la izquierda de 0 °C en la escala horizontal.

Las gráficas de temperatura medida frente a temperatura predicha por todos los modelos analizados y propuestos para esta tecnología y usando los valores instantáneos del año 2011 se muestran en la Figura IV.15.a y la Figura IV.15.b.

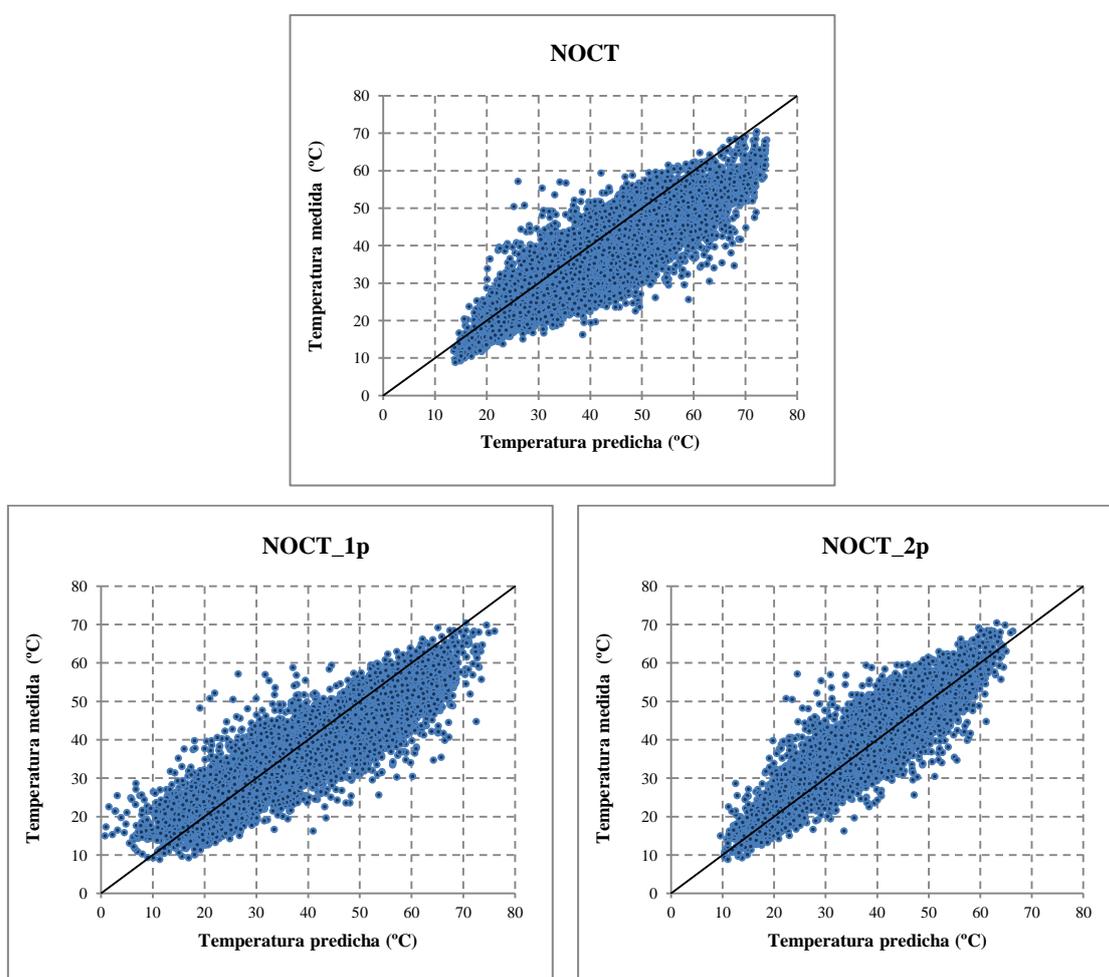


Figura IV.15.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores instantáneos de 2011.

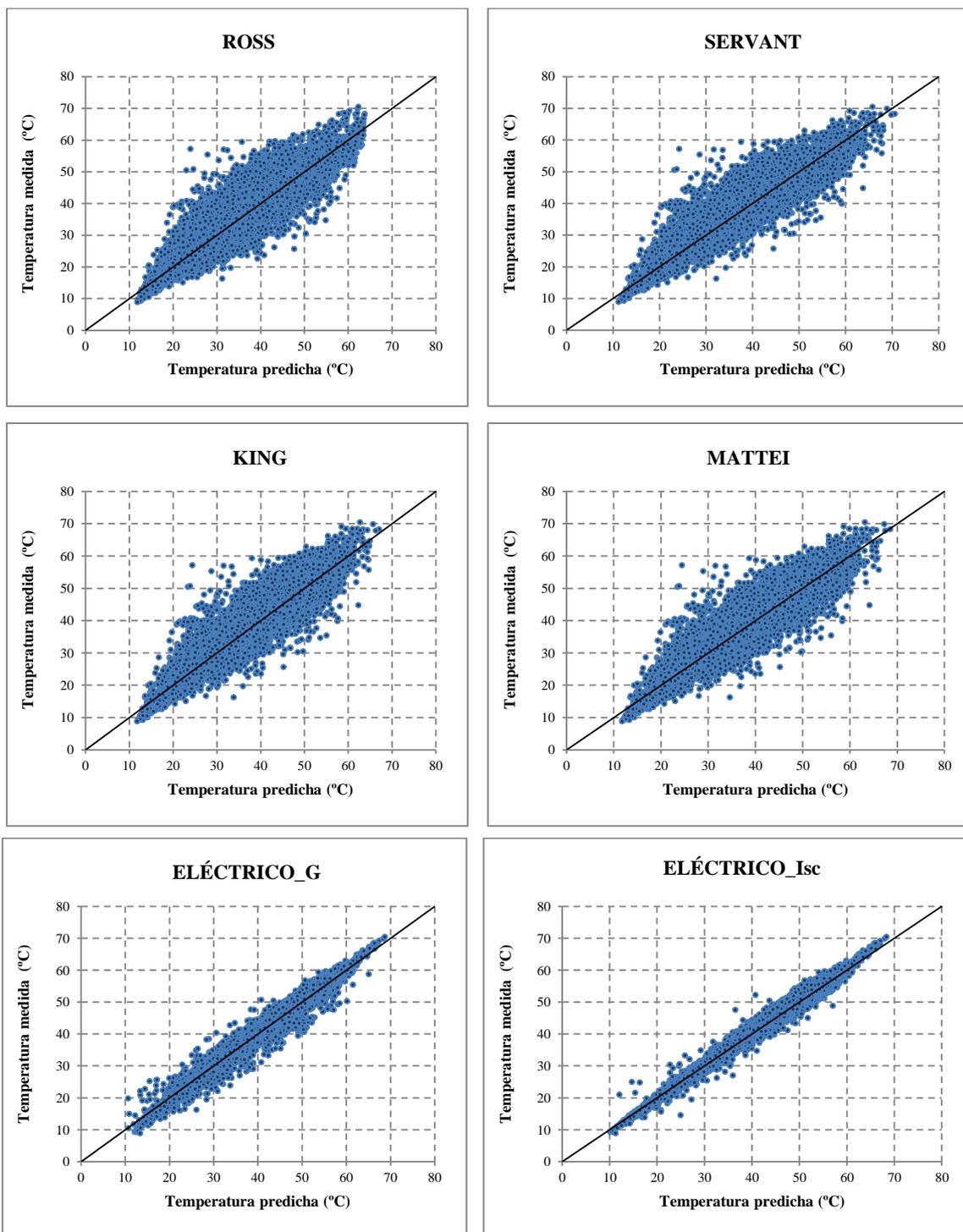


Figura IV.15.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores instantáneos de 2011.

Al observar estas gráficas, se obtiene la misma lectura que la obtenida con las gráficas de las frecuencias acumuladas. La predicción realizada por los modelos NOCT_2p, Ross, Servant, King y Mattei es muy similar, y todos estos resultados quedan muy

alejados de los conseguidos por ambos modelos eléctricos.

Tras realizar todo el estudio de predicción de temperatura con los datos del año 2011, se ha realizado también con los datos instantáneos del año 2012, mostrándose los resultados obtenidos en la Tabla IV.26.

Tabla IV.26. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2012 para el módulo de silicio multicristalino.

Tecnología	Modelo	\overline{TD}	STD	MAE	MAPE	R ²
		(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
mc-Si	NOCT	6.50	5.0	6.9	18.6	81.2
	NOCT_1p	2.74	4.6	4.3	11.7	82.3
	NOCT_2p	-0.51	3.3	2.3	6.3	88.7
	ROSS	0.07	4.0	3.0	8.0	83.8
	SERVANT	-0.72	3.4	2.5	6.5	88.2
	KING	-0.64	3.2	2.3	6.1	89.8
	MATTEI	-0.49	3.2	2.3	6.1	89.8
	ELÉCTRICO_G	-0.40	1.6	1.1	2.7	97.5
	ELÉCTRICO_Isc	-0.38	1.1	0.8	2.2	98.8

Las gráficas de los histogramas de frecuencias de temperatura medida de módulo registradas en el año 2011 y en 2012 se muestran en la Figura IV.16.

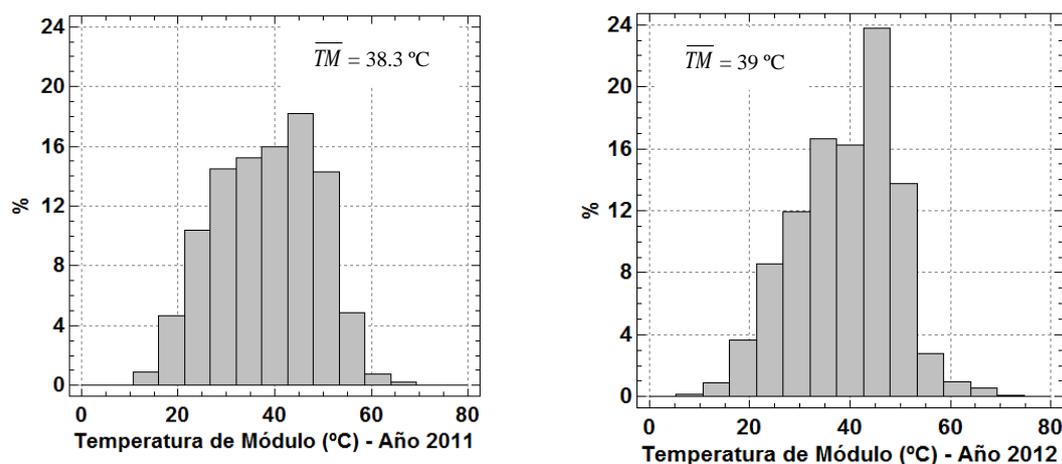


Figura IV.16. Distribución porcentual de los datos registrados de temperatura de módulo para la tecnología de silicio multicristalino durante el periodo de medidas.

En las gráficas de la Figura IV.16 puede apreciarse que la distribución de temperaturas es bastante diferente, y que en el año 2012 existe un porcentaje próximo al 24% de valores de temperatura de módulo superiores a 50 °C. Sin embargo la temperatura media en ambos años es muy similar, 38.3 °C en 2011 y 39 °C en 2012 con unas desviaciones estándar de 10.4 °C y 10 °C respectivamente. Lo que supone una diferencia de 0.7 °C mayor en 2012.

De los datos de la Tabla IV.26 puede deducirse que una vez más, el modelo Eléctrico_Isc es el que presenta la mayor precisión en la predicción de la temperatura del módulo, ya que de todos los modelos, es el que exhibe el valor más bajo de la desviación estándar, 1.1 °C, de los valores MAE y MAPE, 0.8 °C y 2.2% respectivamente y el valor más alto de R^2 (98.8%). El modelo Eléctrico_G, le sigue muy de cerca con valores muy próximos a éstos y bastante alejados de los valores que se obtienen con los modelos meteorológicos.

Al igual que ocurría con los datos del año 2011, puede observarse que para esta tecnología de módulos, el nuevo modelo propuesto NOCT_2p vuelve a ser mejor que el modelo de Servant. La desviación de temperatura está muy próxima en ambos modelos, pero los valores de desviación estándar y de valores MAE y MAPE son menores en el nuevo modelo NOCT_2p que en el de Servant. Además el valor de R^2 es mayor para el NOCT_2p.

Del resto de modelos, Mattei y King son los que presentan mayor precisión, con desviaciones estándar de 3.2 °C, menores valores MAE (2.3 °C) y MAPE (6.1%) y mayores valores de R^2 (89.8% y 89.9% respectivamente).

Las gráficas de la temperatura medida frente a la predicha para el módulo de silicio multicristalino con los valores instantáneos de los 31 días aleatorios del año 2012 se muestran en la Figura IV.17.a y Figura IV.17.b

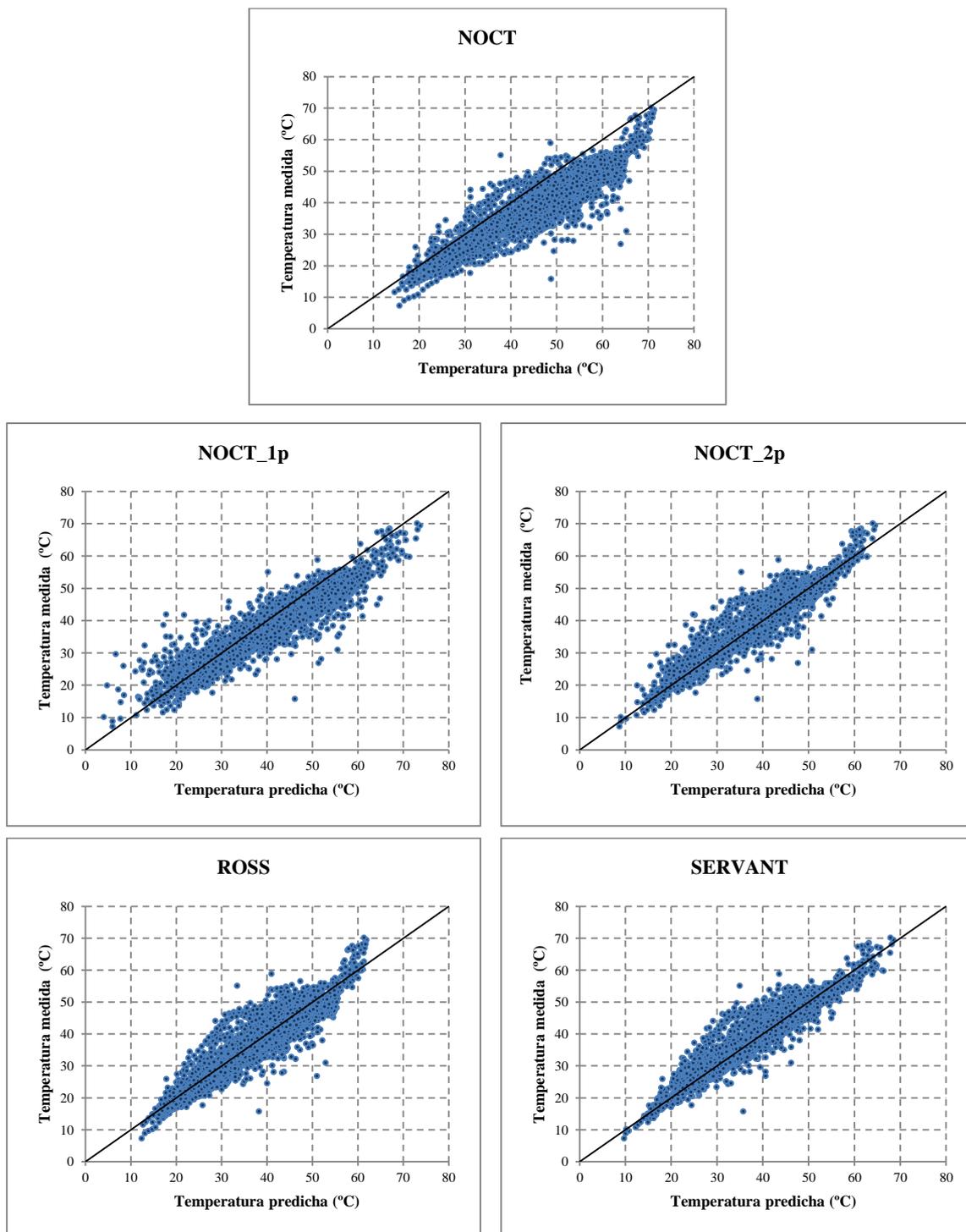


Figura IV.17.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores instantáneos de 2012.

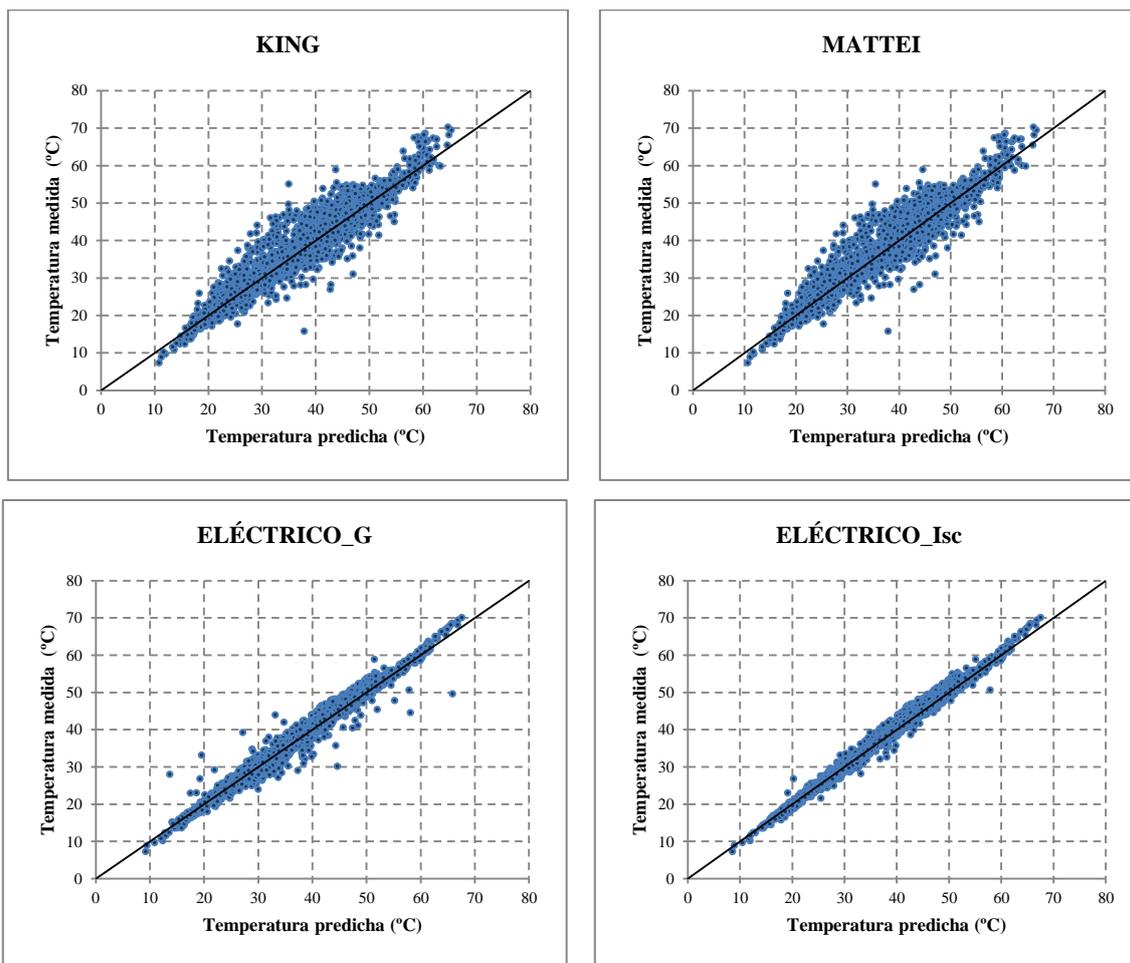


Figura IV.17.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores instantáneos de 2012.

Se observa en las gráficas de la Figura IV.17.a y la Figura IV.17.b que, como había ocurrido con los datos de 2011, la predicción de los modelos NOCT_2p, Ross, Servant, King y Mattei tiene una forma muy similar, y la predicción de los modelos eléctricos es mucho más exacta y precisa.

4.4.5. Análisis global de la validación con modelos instantáneos

En la Tabla IV.27 se presentan todos los resultados obtenidos en el estudio de la predicción de temperatura con valores instantáneos del año 2011, con el objetivo de obtener conclusiones globales. En dicha tabla los resultados se muestran agrupados por modelos y no por tecnología de módulo como se ha realizado en apartados anteriores.

Tabla IV.27. Tabla de resultados de predicción con valores instantáneos del año 2011.

Modelos existentes analizados						
Modelo	Tecnología	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
NOCT	CdTe	3.40	4.6	4.5	12.5	84.8
	a-Si	5.38	4.8	5.8	17.4	82.9
	a-Si/ μ c-Si	3.08	4.9	4.2	12.8	82.4
	mc-Si	5.78	5.1	6.4	17.1	83.0
SERVANT	CdTe	-0.15	3.4	2.4	6.6	90.6
	a-Si	-0.09	3.1	2.3	6.6	91.5
	a-Si/ μ c-Si	-0.02	3.6	2.7	7.6	89.9
	mc-Si	-0.20	3.6	2.5	6.8	88.2
ROSS	CdTe	-0.24	4.0	2.9	8.1	86.7
	a-Si	-0.19	3.9	3.0	8.9	86.2
	a-Si/ μ c-Si	-0.15	4.6	3.5	9.9	83.9
	mc-Si	-0.40	3.9	2.8	7.6	85.7
KING	CdTe	-0.13	3.4	2.4	6.7	90.6
	a-Si	-0.01	3.2	2.4	7.1	91.1
	a-Si/ μ c-Si	0.05	3.7	2.8	7.9	89.4
	mc-Si	-0.29	3.4	2.4	6.4	89.4
MATTEI	CdTe	-0.13	3.4	2.4	6.7	90.5
	a-Si	-0.01	3.2	2.4	7.2	90.9
	a-Si/ μ c-Si	0.05	3.8	2.9	8.0	89.2
	mc-Si	-0.10	3.4	2.6	7.0	89.4
ELÉCTRICO_G	CdTe	-0.08	2.6	1.9	5.9	94.8
	a-Si	0.00	2.4	1.7	5.5	95.1
	a-Si/ μ c-Si	0.03	2.3	1.5	4.8	96.0
	mc-Si	0.39	2.0	1.3	3.6	98.1
ELÉCTRICO_Isc	CdTe	-0.04	2.1	1.6	5.0	96.2
	a-Si	0.01	1.4	1.1	3.3	98.3
	a-Si/ μ c-Si	0.01	1.5	1.1	3.3	98.4
	mc-Si	0.04	1.7	1.0	2.6	98.8
Modelos propuestos						
Modelo	Tecnología	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
NOCT_1p	CdTe	1.66	4.0	3.3	9.5	87.7
	a-Si	3.07	4.4	4.3	12.9	85.8
	a-Si/ μ c-Si	1.22	4.1	3.3	8.7	87.4
	mc-Si	3.38	4.9	4.8	12.9	83.4
NOCT_2p	CdTe	-0.28	3.5	2.5	7.0	89.7
	a-Si	-0.18	3.3	2.5	7.4	90.3
	a-Si/ μ c-Si	-0.16	3.9	3.0	8.4	88.5
	mc-Si	-0.21	3.5	2.5	6.7	88.7

El modelo Eléctrico_G, a pesar de utilizar la irradiancia para el cálculo de la temperatura del módulo como en los modelos meteorológicos, obtiene resultados mucho mejores que ellos. Las desviaciones de temperatura de este modelo están muy próximas a cero para todos los módulos, los valores de R^2 son muy altos, con valores comprendidos entre 94.8% y 98.1%, los valores de la desviación estándar van de 2 °C a 2.6 °C, mientras que en los modelos puramente meteorológicos son superiores a 3 °C en todas las tecnologías de módulos. Los valores MAE también son más bajos que en los modelos meteorológicos (superiores a 2.3 °C en éstos) y oscilan entre 1.3 °C y 1.9 °C. Los valores MAPE, también son inferiores y están comprendidos entre 3.6% y 5.9%. Los mejores resultados de este modelo se obtienen para el módulo de silicio multicristalino y los peores para el módulo de telururo de cadmio.

El modelo Eléctrico_Isc es el más preciso y exacto de todos, con unas desviaciones medias de la temperatura muy próximas a cero para todas las tecnologías, las menores desviaciones estándar (entre 1.5 °C y 2.1 °C), menores valores MAE (entre 1.0 °C y 1.6 °C) y MAPE (entre 3.3% y 5.0%), y los mayores valores de R^2 (todos superiores al 96%). Este modelo, con respecto al modelo Eléctrico_G, tiene la ventaja de mejorar la predicción de temperatura porque al utilizar como irradiancia efectiva el valor del cociente $I_{sc}/I_{sc}(STC)$ elimina la influencia del espectro y por tanto obtiene un resultado mucho más exacto. Como ya se ha comentado anteriormente, el mayor inconveniente para implementar este modelo es que se necesitan mediciones de la tensión a circuito abierto (V_{oc}) y de la corriente de cortocircuito (I_{sc}), mientras que para implementar el modelo Eléctrico_G solo se necesita medir la V_{oc} , que puede hacerse con un voltímetro, y la irradiancia. De todas las tecnologías estudiadas, la que tiene peores resultados para el modelo Eléctrico_Isc es la de telururo de cadmio (presenta los mayores valores de la desviación media de la temperatura, de la desviación estándar, de los valores MAE y MAPE y el menor valor de R^2). Las otras tres tecnologías de módulos muestran resultados muy similares entre sí.

Como hemos visto, la predicción de la temperatura del módulo utilizando el método NOCT no ofrece buenos resultados, presentando una desviación media de la temperatura (\overline{TD}) comprendida entre 3.08 °C y 5.78 °C con desviaciones estándar superiores a 4.5 °C en todos los módulos. Además, los valores MAE y MAPE son los más altos, mientras que los valores de R^2 son los más bajos, lo que confirma que éste no

es un buen modelo para predecir la temperatura del módulo.

El modelo de Ross, aunque mejora los resultados obtenidos por el modelo NOCT, no alcanza la precisión del resto de los modelos meteorológicos estudiados. El modelo propuesto de un parámetro, NOCT_1p, obtiene unos resultados similares en cuanto a R^2 se refiere, a los obtenidos por el modelo de Ross, pero la exactitud y precisión alcanzada por el modelo propuesto es inferior, ya que presenta valores más altos de las desviaciones de temperatura y desviación estándar y valores MAE y MAPE también más altos.

Del resto de modelos estudiados, el modelo propuesto por Servant es el que presenta los mejores resultados para todos los módulos de lámina delgada, con desviaciones medias de la temperatura menores que 0.2 °C, prediciendo siempre la temperatura del módulo por defecto (valor negativo de \overline{TD}). Para el módulo de silicio multicristalino, los mejores resultados en la predicción de temperatura se obtienen con el modelo propuesto NOCT_2p.

Los modelos propuestos por King y Mattei muestran resultados similares entre sí, destacando el hecho de que presentan valores de desviaciones medias de la temperatura próximos a cero. Asimismo, estos modelos presentan valores más altos de R^2 de entre los meteorológicos (alrededor del 90%) y valores más bajos de los valores MAE y MAPE.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo que incluye dos parámetros empíricos (NOCT_2p) es mejor que el modelo de un único parámetro (NOCT_1p). Con el modelo propuesto de dos parámetros es posible realizar la predicción de la temperatura del módulo con una desviación media de la temperatura comprendida entre -0.16 °C y -0.28 °C, una desviación estándar entre 3.3 °C y 3.9 °C, un MAE entre 2.5 °C y 3.0 °C y una R^2 entre 88.5% y 90.3%.

En todas las tecnologías, los resultados obtenidos en la predicción de temperatura con datos de un año distinto al que se ha utilizado para construir los modelos, el año 2012, ha tenido el mismo comportamiento que con los datos del año 2011, excepto en el caso del módulo de silicio amorfo y silicio amorfo/microcristalino. En estas dos tecnologías, la predicción que hacen los modelos eléctricos presenta un error sistemático de 3 °C y 1.5 °C respectivamente. Este error podría deberse a la degradación de los módulos o a la

falta de estabilización de los mismos. Esto afecta solo a los modelos eléctricos, pues utilizan parámetros eléctricos del mismo para el cálculo de la temperatura. Sin embargo en los modelos meteorológicos no se aprecia el efecto de la degradación o falta de estabilización, pues los datos para calcular la temperatura son puramente meteorológicos.

A la vista de los resultados, puede afirmarse que el modelo propuesto, NOCT_2p, predice razonablemente bien el comportamiento instantáneo de la temperatura de los módulos. Los modelos meteorológicos previos estudiados ofrecen resultados similares a los obtenidos con el nuevo modelo, si bien el mejor de todos ellos, el de Mattei, necesita tres parámetros para su construcción y el propuesto NOCT_2p solo necesita dos. Sin embargo, todos estos modelos tienen una validez limitada ya que, por tratarse de valores instantáneos, no tienen en cuenta la inercia térmica del módulo. Dicho de otro modo, se asignan valores estacionarios a situaciones transitorias, donde la temperatura del módulo no refleja los posibles cambios, más rápidos, de las otras variables meteorológicas. Por este motivo, la desviación estándar de todos los modelos es alta. La predicción de la temperatura del módulo en condiciones reales de funcionamiento mediante este tipo de modelos no es aconsejable si se quiere conocer la temperatura de operación en un instante concreto.

En resumen, este tipo de modelos no permiten predecir con buena precisión la temperatura de los módulos debido a su inercia térmica, ya que ésta hace que su respuesta térmica a los cambios en las condiciones meteorológicas no sea inmediata.

El test de Kolmogorov-Smirnov, que se ha aplicado con un nivel de confianza del 95%, lo corrobora, al comparar la serie de la temperatura medida con la serie de cada una de las temperaturas predichas por los modelos. Para todos los modelos estudiados, el resultado ha sido que la serie de temperaturas predichas tiene distinta distribución que la serie de temperatura medida, pues todas tenían una diferencia estadísticamente significativa, excepto para el modelo Eléctrico_Isc. En este modelo, en dos de las tecnologías estudiadas, las tecnologías de silicio amorfo y silicio amorfo/microcristalino, se ha encontrado que sí tiene la misma distribución que la serie de la temperatura medida.

Capítulo 5

Resultados obtenidos con los modelos horarios

En el presente capítulo se exponen todos los resultados obtenidos para los modelos horarios.

El primer paso ha sido preparar las series de los datos horarios que se han usado para proponer los coeficientes de los modelos y posteriormente validarlos.

Una vez preparadas las series horarias se ha procedido de la misma forma que con los modelos instantáneos, separando de forma aleatoria un 30% para hallar los coeficientes de los modelos y el 70% restante para estudiar la predicción que realizan los modelos.

En primer lugar se presentan todos los coeficientes hallados para cada uno de los modelos y a continuación se exponen los resultados obtenidos en la predicción de temperatura con los datos del año 2011 (con el 70% de la muestra total del año) y se analizan los resultados de la predicción con los 31 días seleccionados de forma aleatoria del año 2012.

Se calculan valores medios diarios de temperatura de operación de módulos y se analizan todos los resultados obtenidos en este procedimiento.

5.1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo, a partir de los modelos instantáneos, se proponen nuevos modelos de cálculo de temperatura de operación horaria de módulos. Cabe resaltar que todos los modelos horarios propuestos en este trabajo, aunque están basados en los modelos instantáneos analizados anteriormente, son nuevos. Se comienza calculando los valores de los coeficientes de los distintos modelos usando valores horarios de los diferentes parámetros.

5.2. COEFICIENTES PARA LOS MODELOS HORARIOS

En la Tabla V.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 V.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	$(c_{\alpha}\tau)_h$ (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)	β_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)	β_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, Ecuación (3.11), es diferente de la usada para el modelo instantáneo, Ecuación (3.10). No obstante, en la Tabla V.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.

5.3. RESULTADOS DE 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.

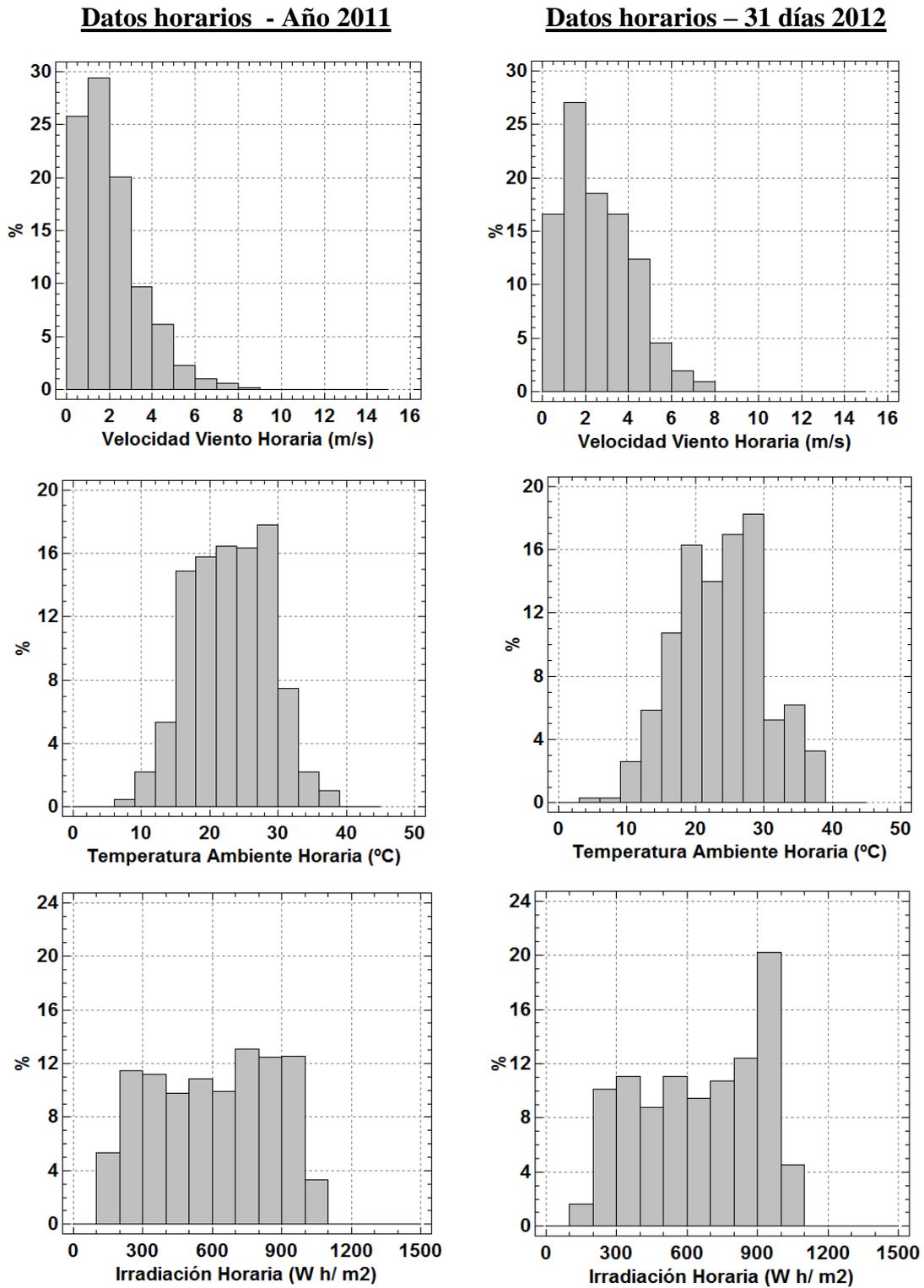


Figura V.1. Valores horarios integrados de los datos registrados durante el periodo de medidas.
Valores horarios integrados de 2011 y de los 31 días aleatorios de 2012.

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

Tabla V.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 ²)	600	260	655	260

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

5.3.1. Módulo de tecnología de telururo de cadmio

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

Tabla V.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 ²
		(°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 V.4.

Tabla V.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 V.2.a y la Figura V.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.

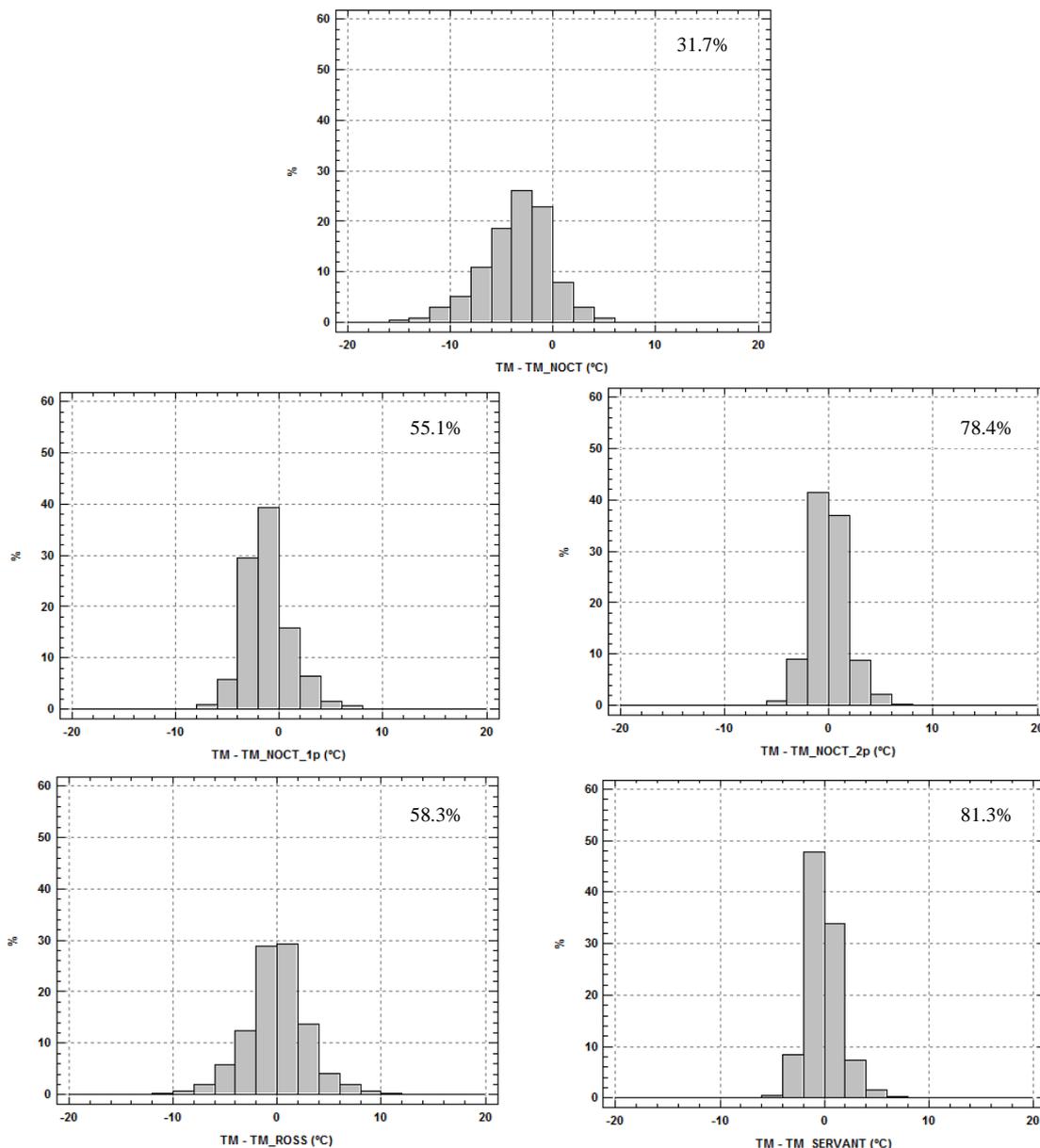


Figura V.2.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de telururo de cadmio con los datos horarios del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

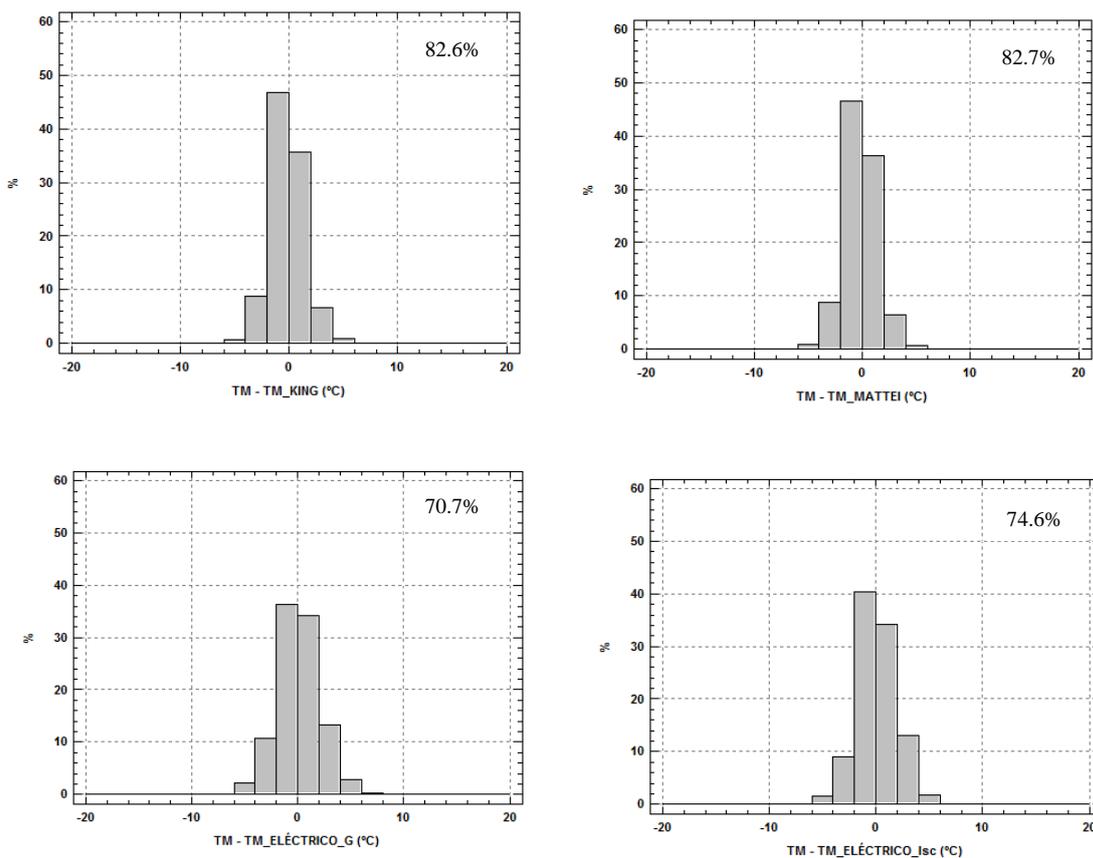


Figura V.2.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de telururo de cadmio con los datos horarios del año 2011.

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 V.3.a y la Figura V.3.b.

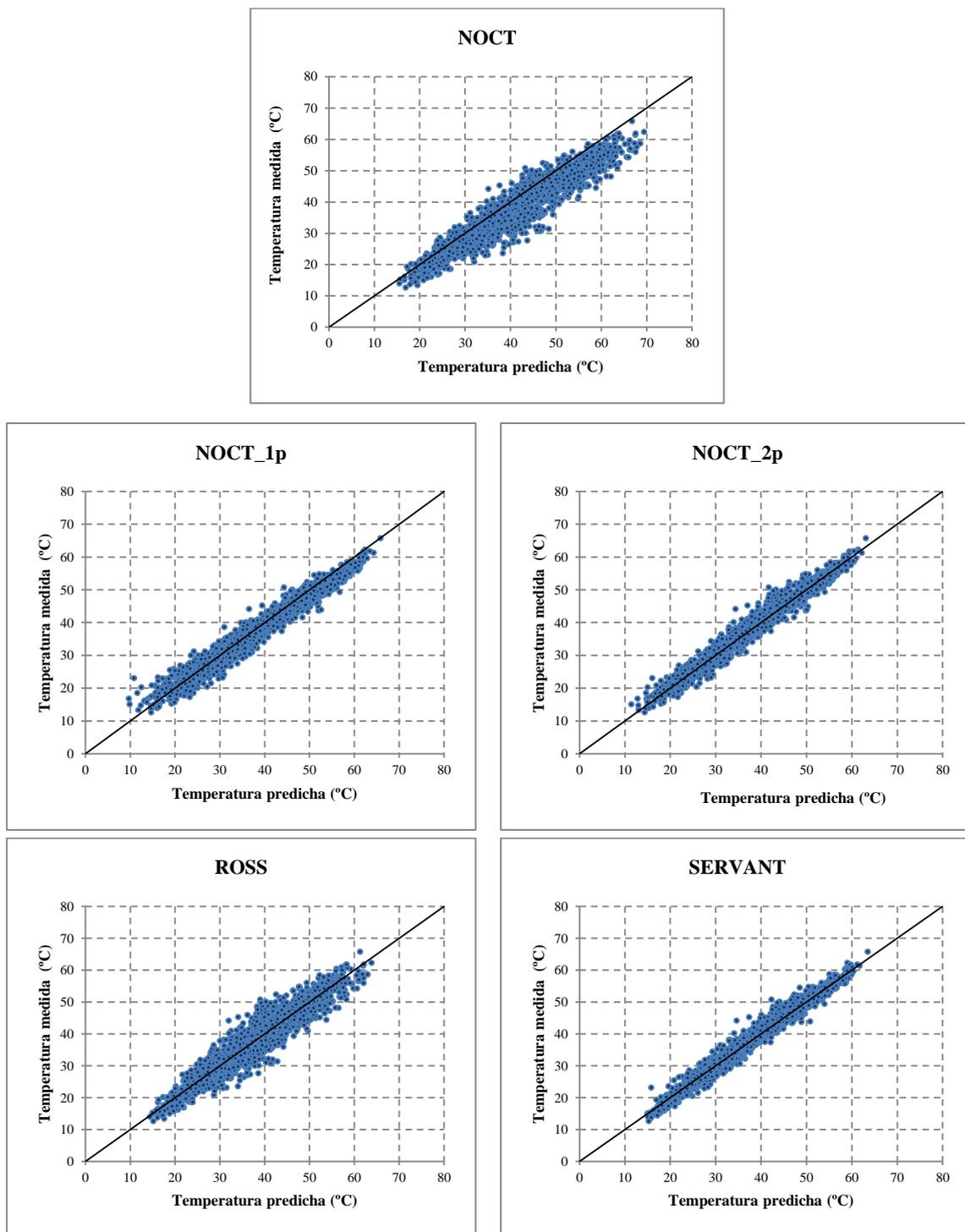


Figura V.3.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2011.

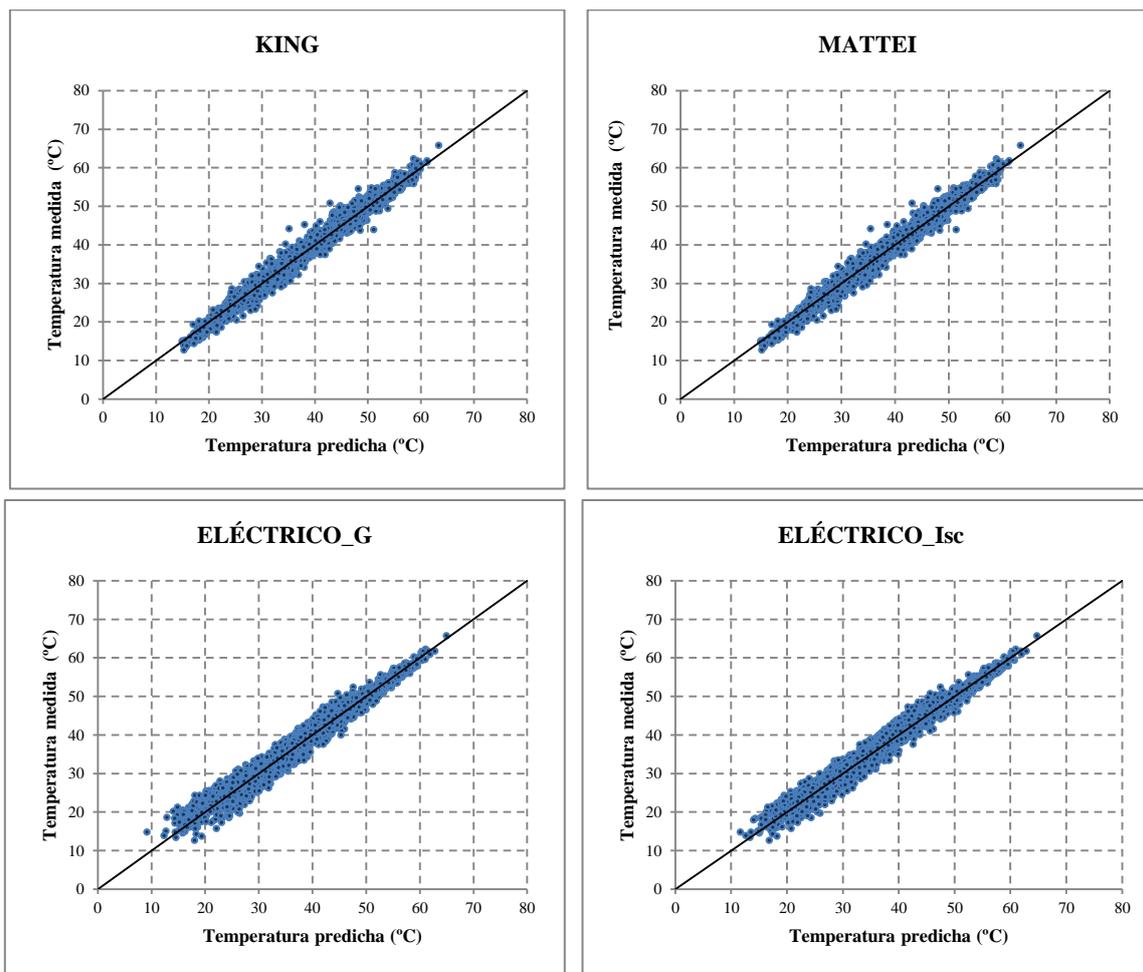


Figura V.3.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2011.

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 V.5.

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
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 V.4.a y la Figura V.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.

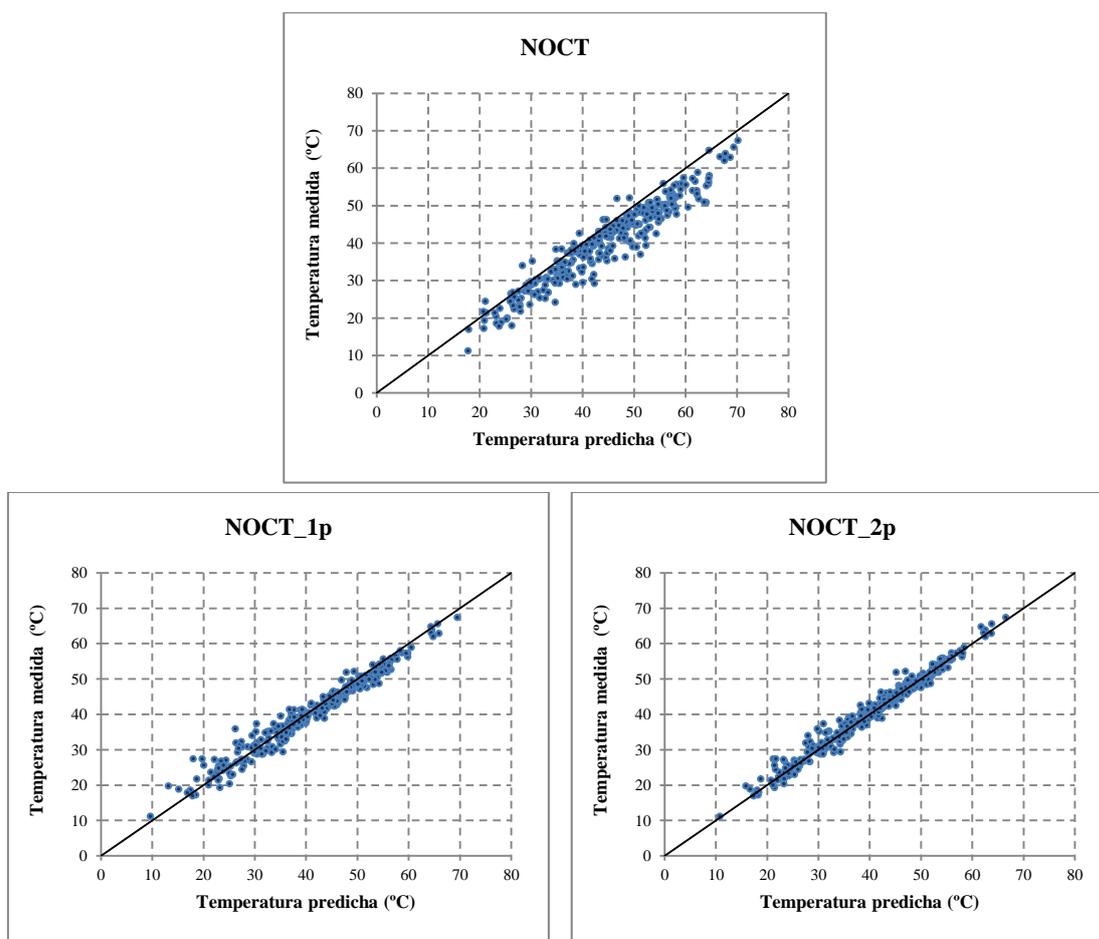


Figura V.4.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2012.

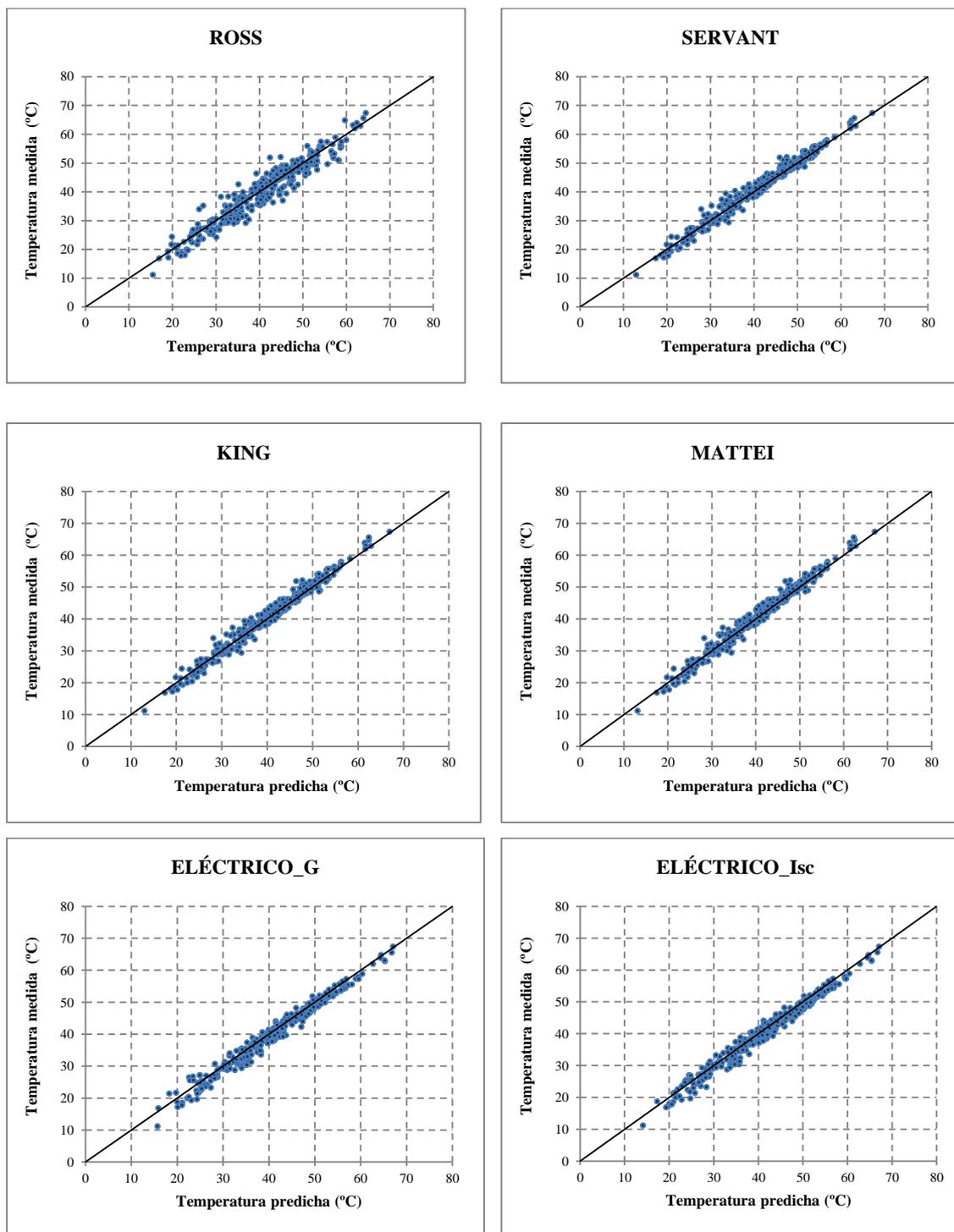


Figura V.4.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios horarios de 2012.

En la Figura V.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.

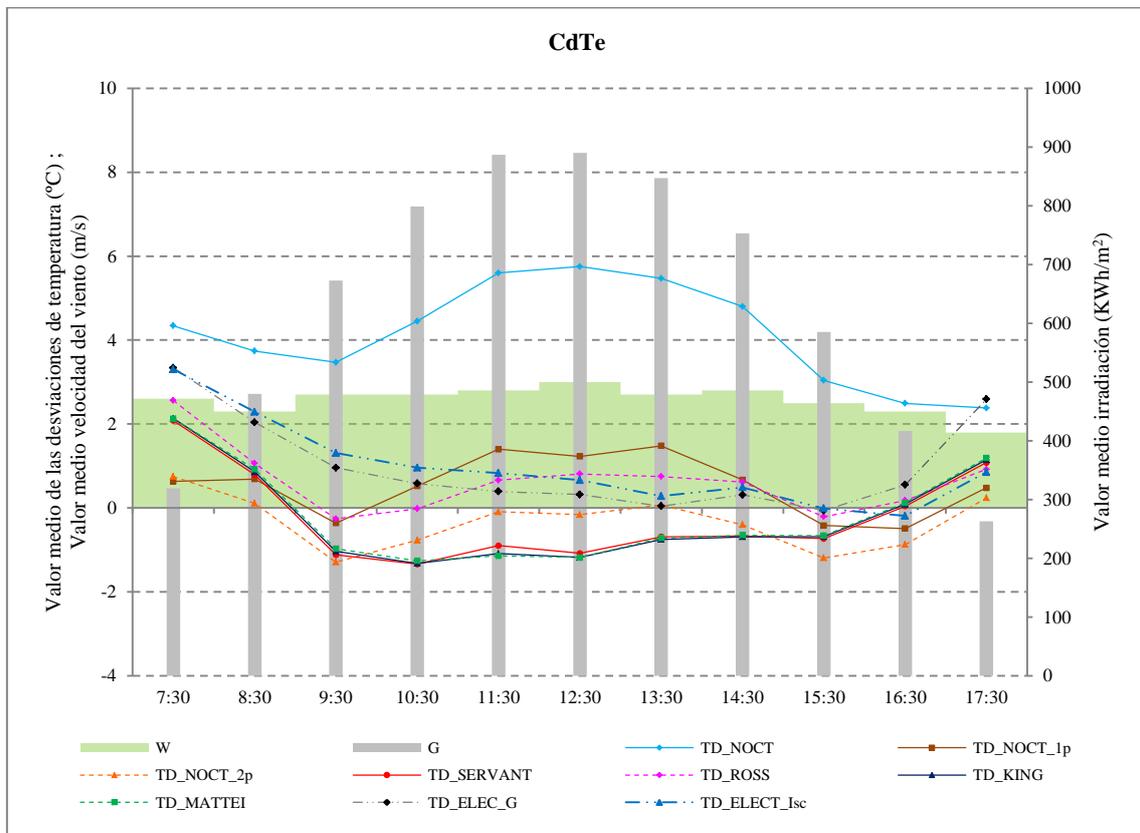


Figura V.5. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología telururo de cadmio. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

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.

5.3.2. Módulo 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 V.6.

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
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 V.7.

Tabla V.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 V.23.a y la Figura V.23.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%.

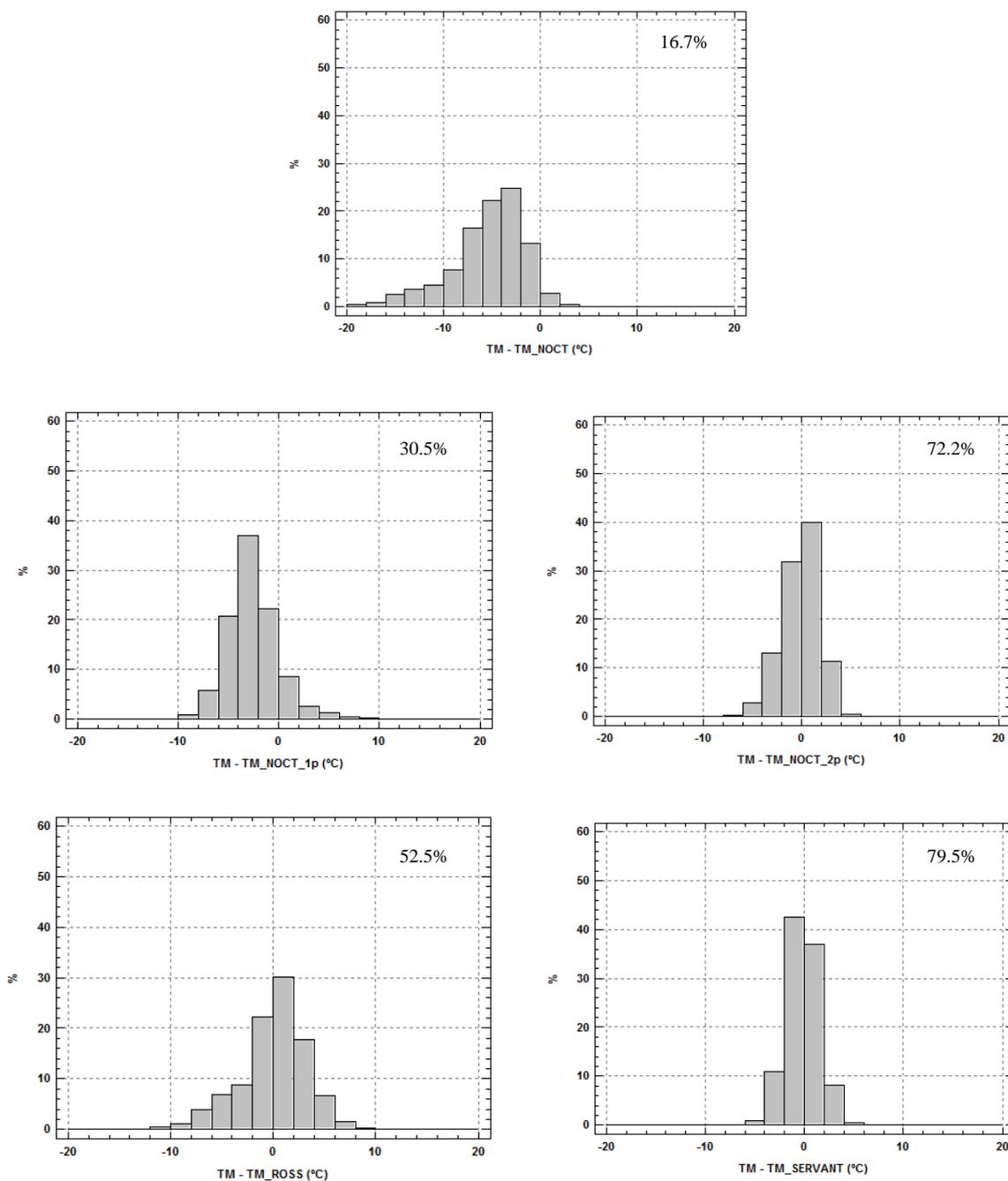


Figura V.6.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

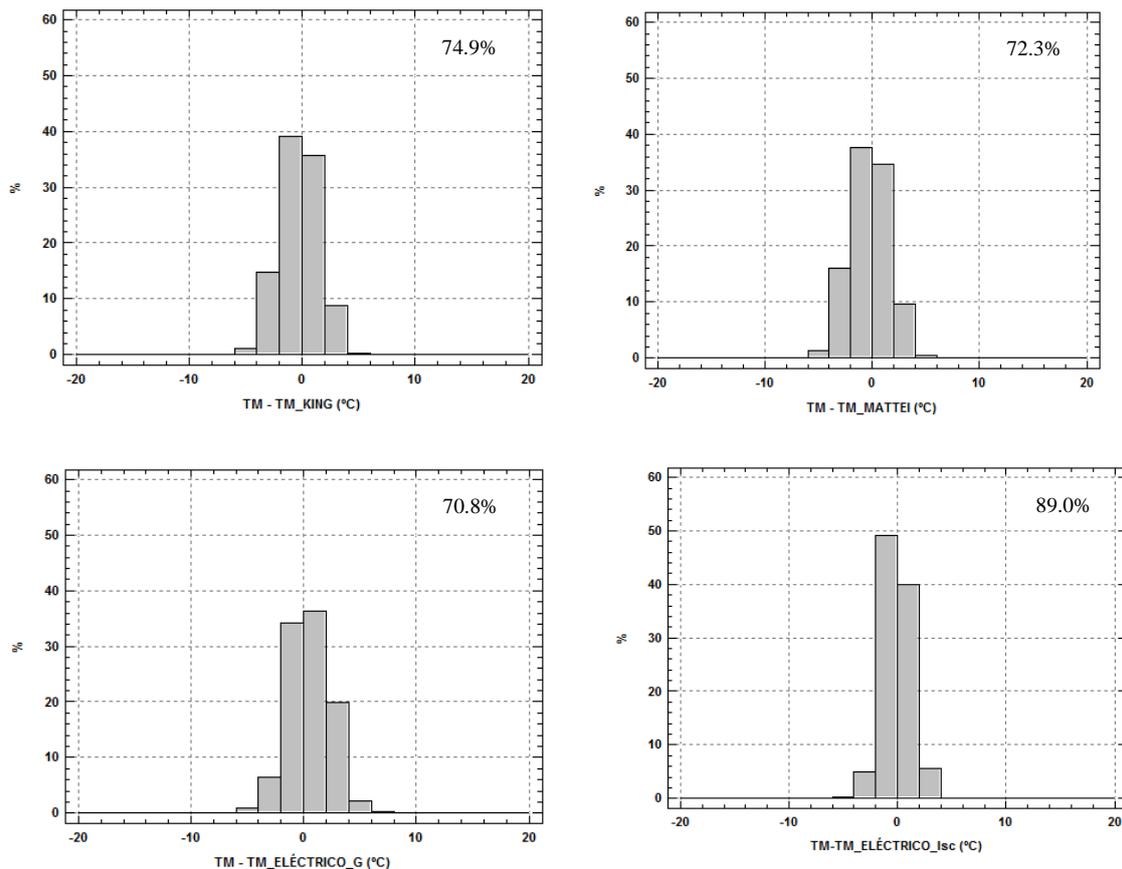


Figura V.6.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo con los datos horarios del año 2011.

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 V.7.a y la Figura V.7.b.

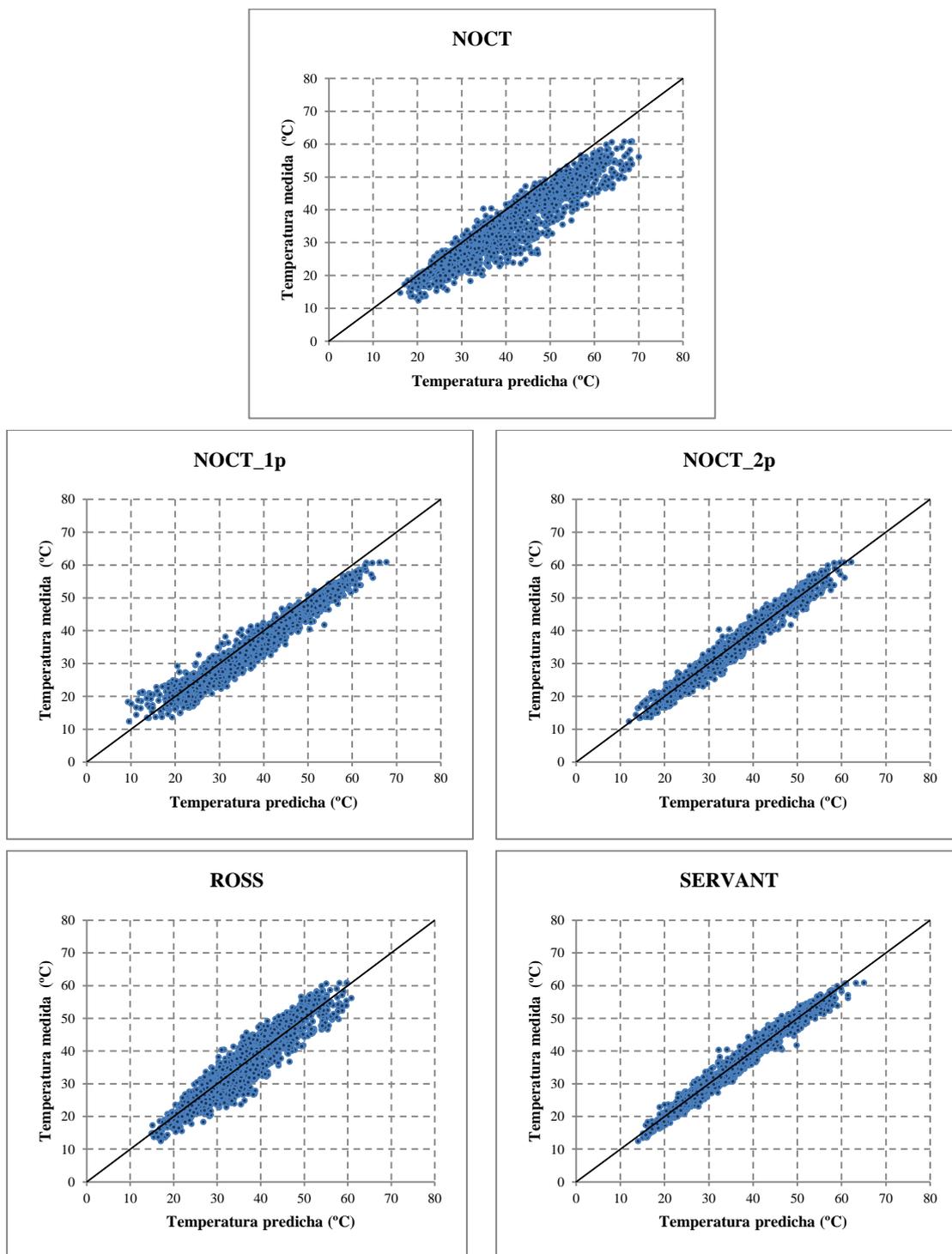


Figura V.7.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2011.

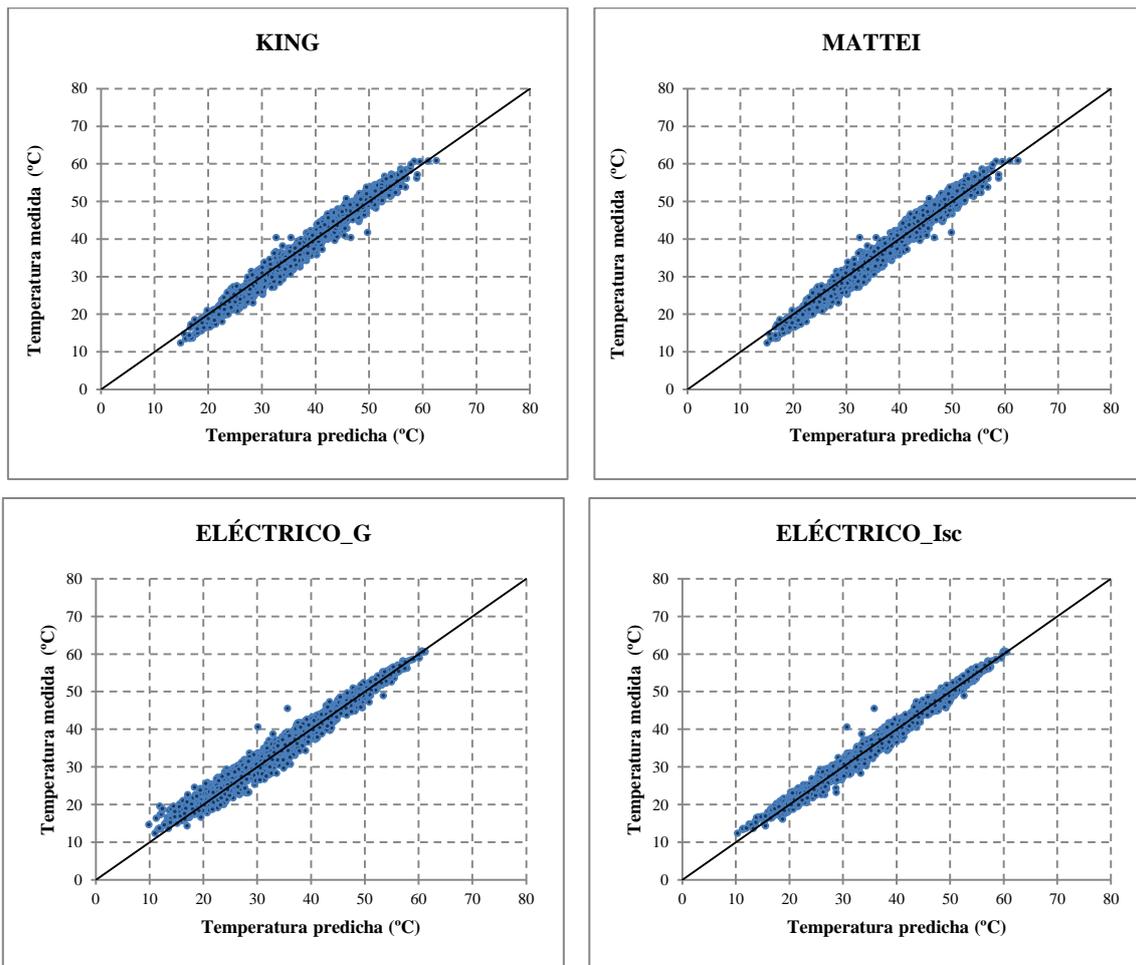


Figura V.7.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2011.

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 V.8.

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
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 V.8.a y la Figura V.8.b.

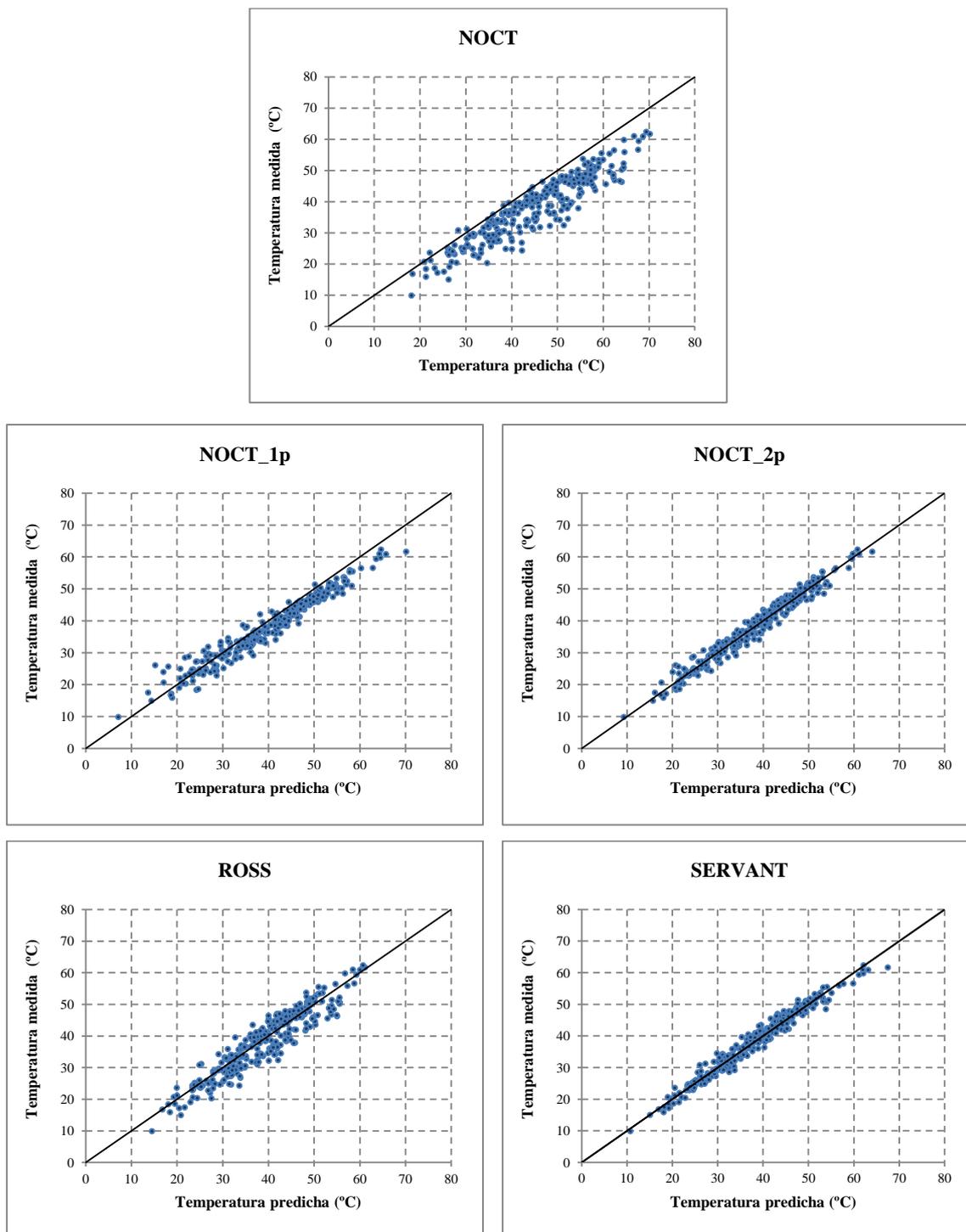


Figura V.8.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2012.

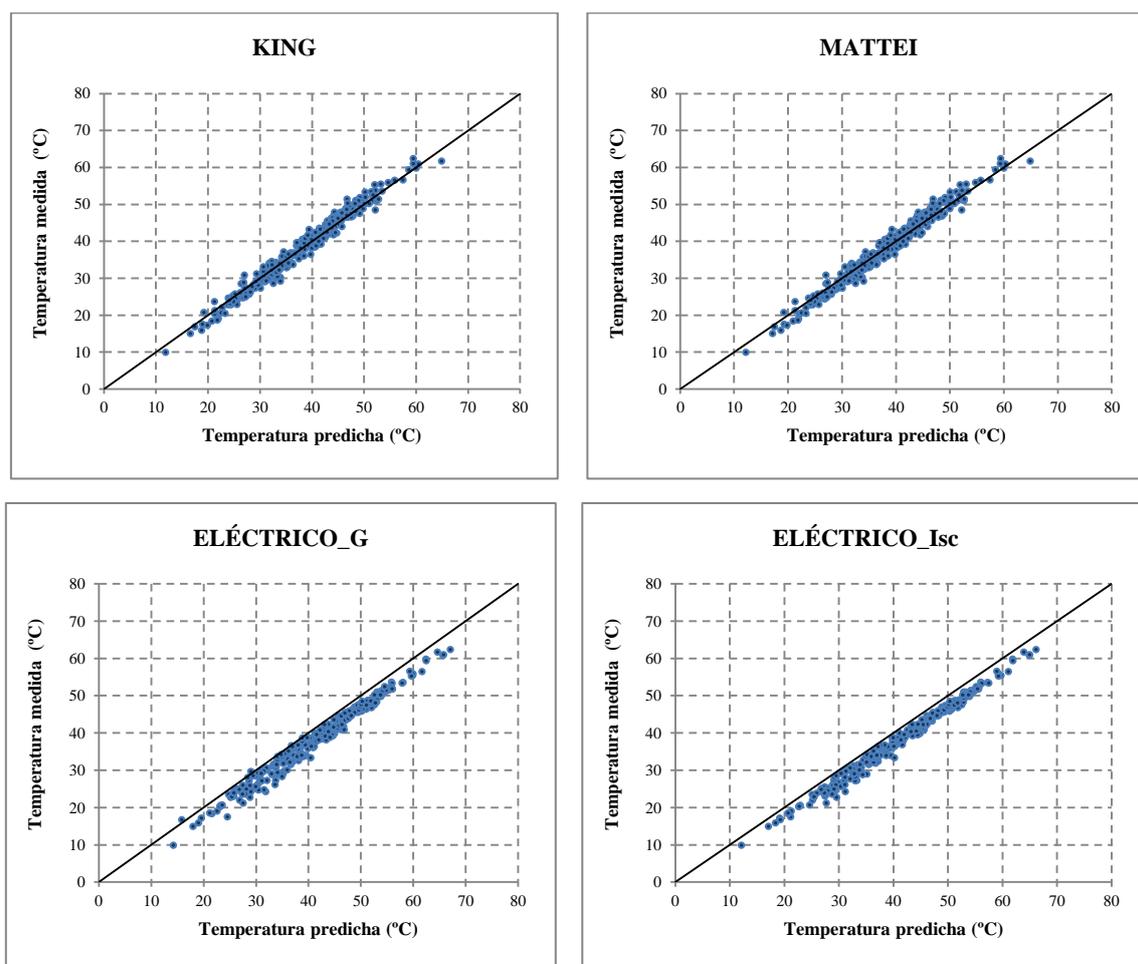


Figura V.8.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios horarios de 2012.

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 V.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.

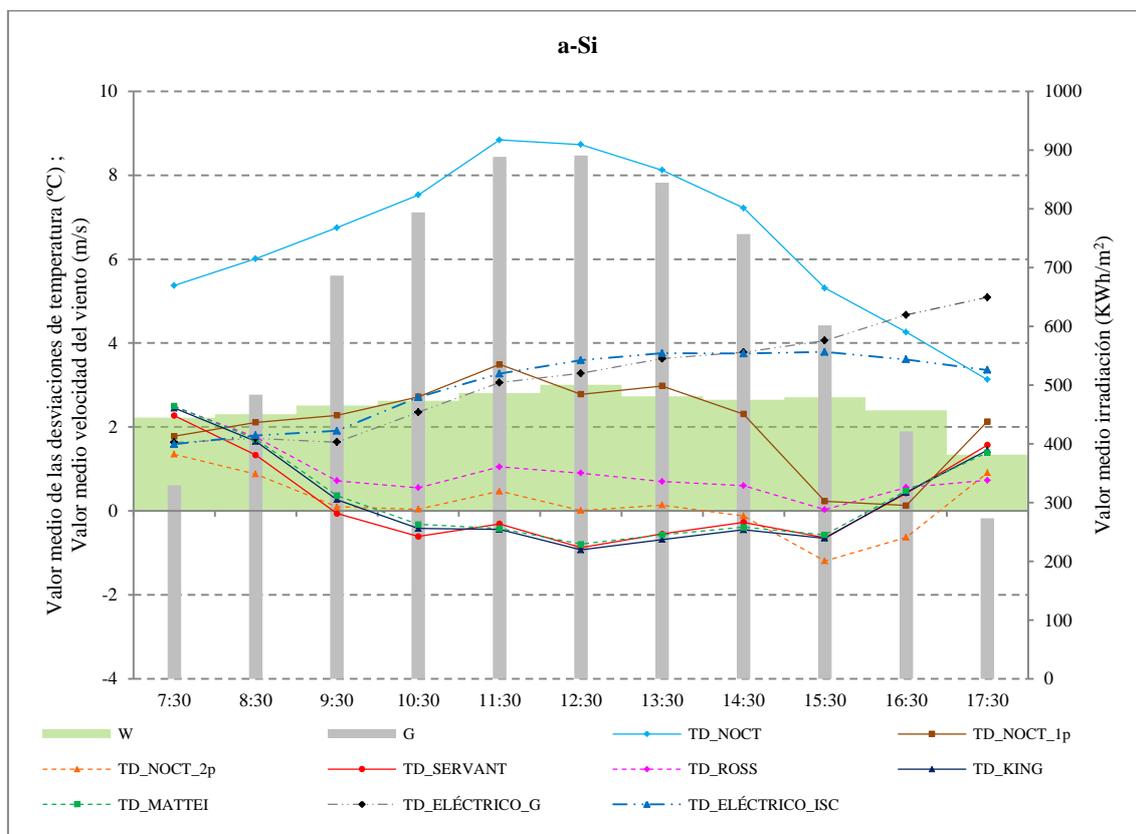


Figura V.9. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología silicio amorfo. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

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.

5.3.3. Módulo de tecnología de silicio amorfo/microcristalino

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

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
a-Si/ μ c-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 R² (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 R² (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 V.10.

Tabla V.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/ μ 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 V.10.a y la Figura V.10.b.

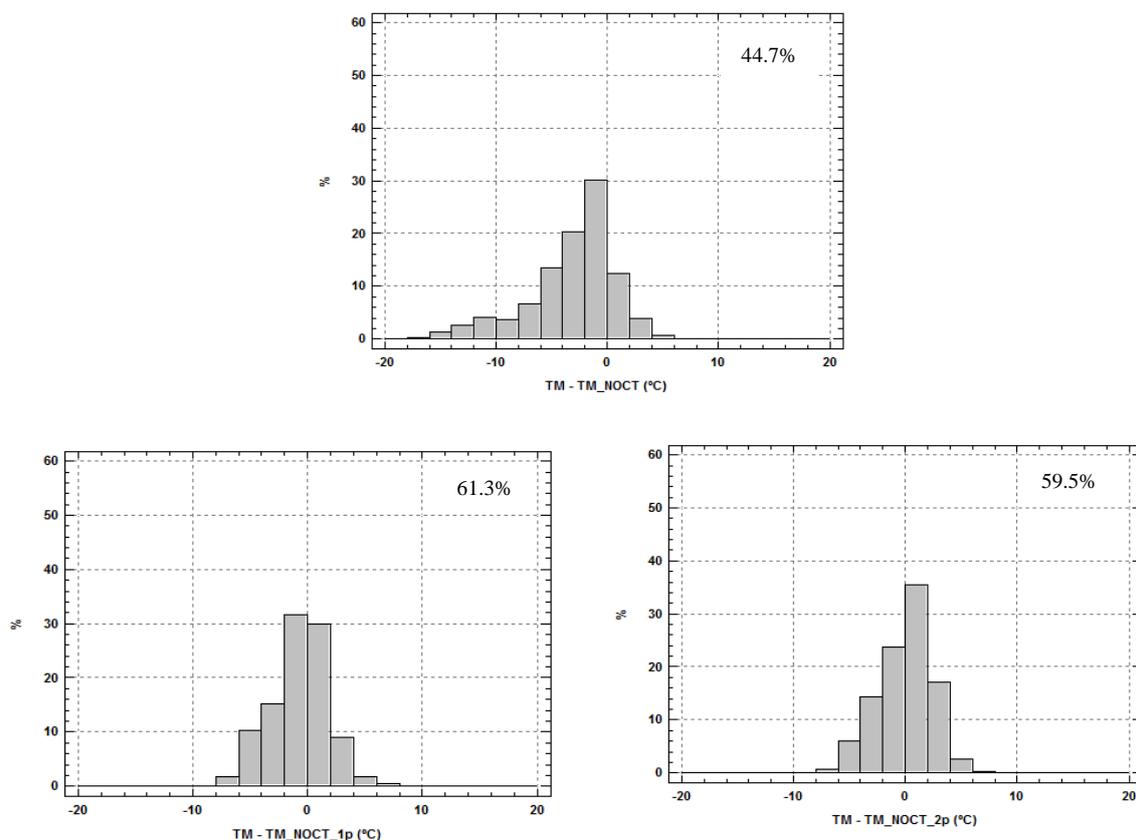


Figura V.10.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos horarios del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores con diferencia menor de ± 2 °C.

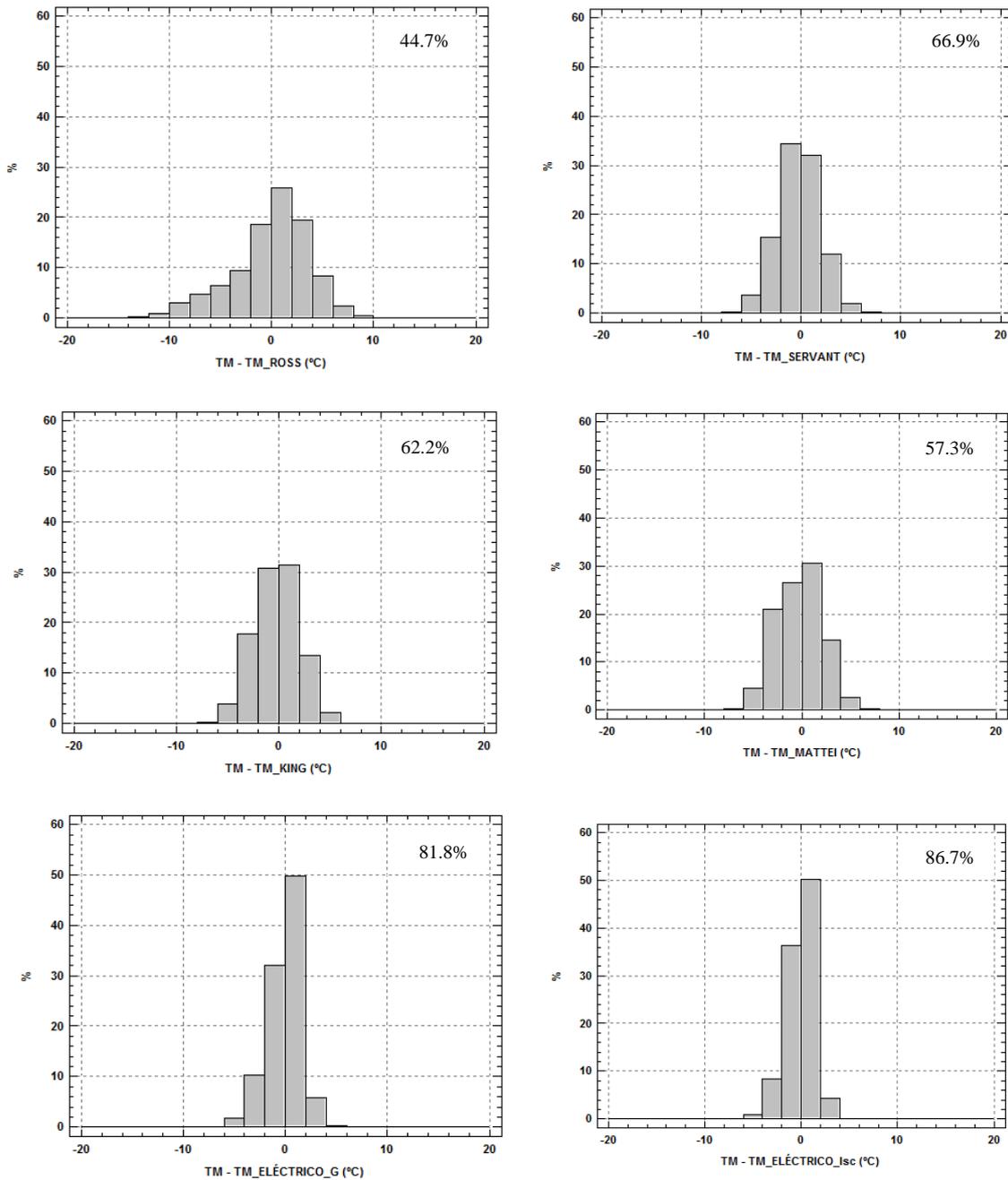


Figura V.10.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio amorfo/microcristalino con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

El aumento en la exactitud de los modelos horarios con respecto a los modelos instantáneos puede verse comparando dichas gráficas con las mostradas en la Figura IV.10.a y la Figura IV.10.b en las que se muestra la distribución porcentual de la diferencia de temperatura predicha y medida.

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 V.11.a y la Figura V.11.b.

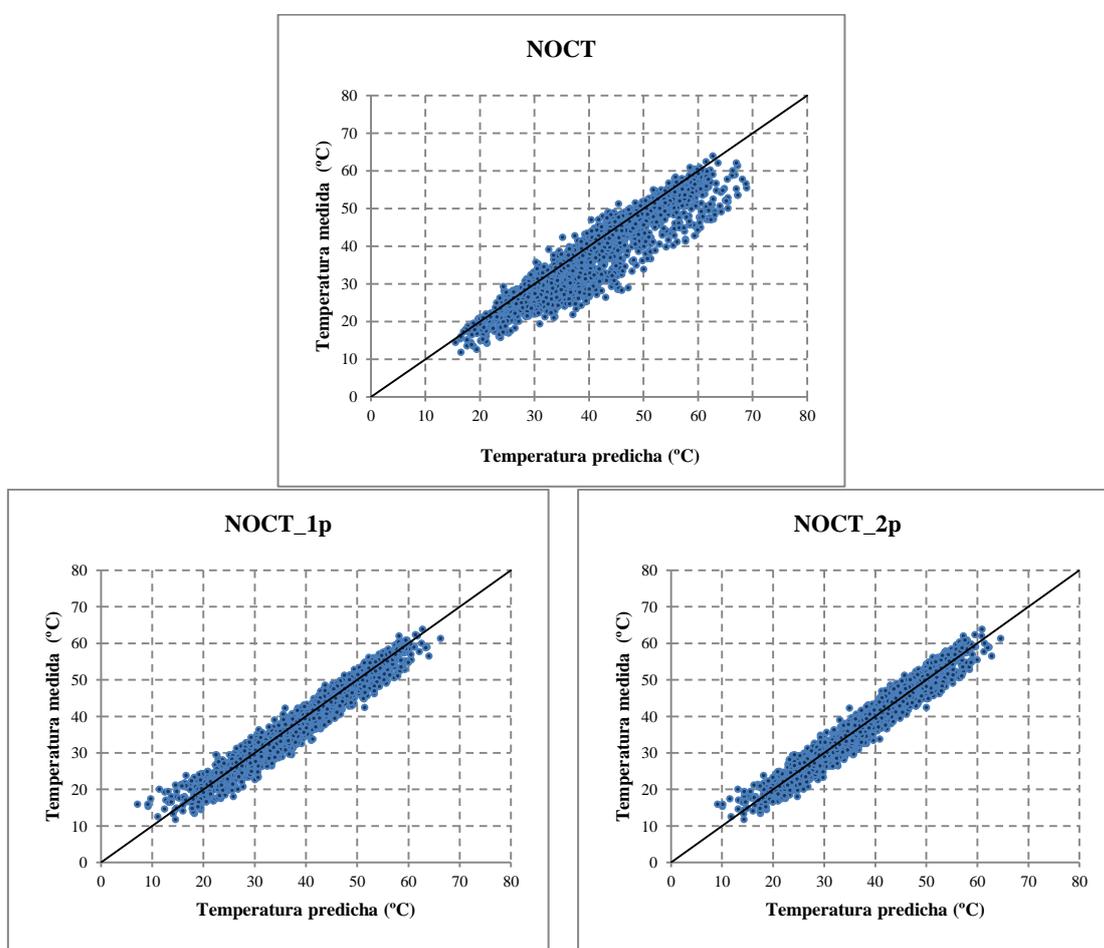


Figura V.11.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2011.

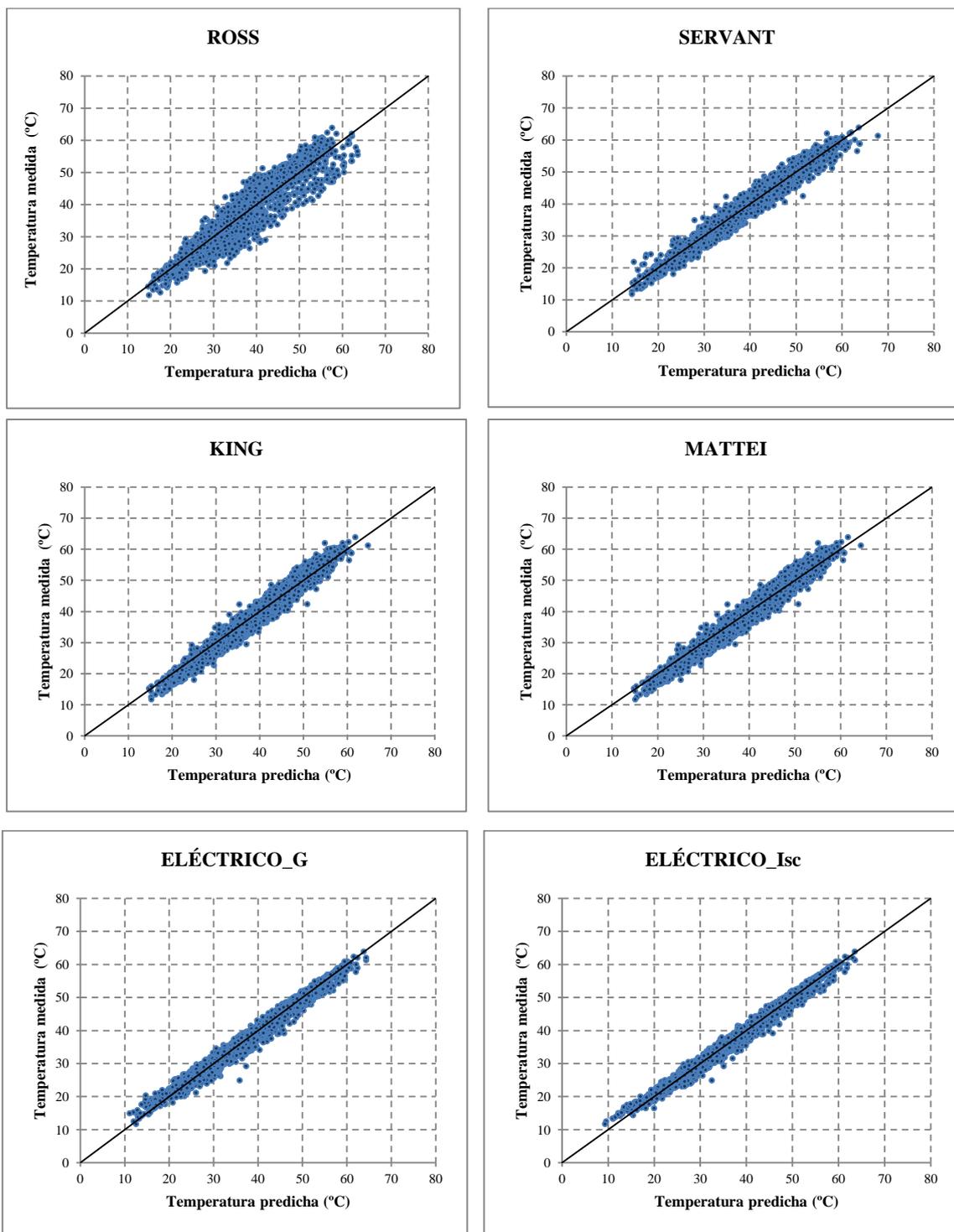


Figura V.11.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2011.

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 V.11.

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
	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
a-Si/μc-Si	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 V.12.a y la Figura V.12.b.

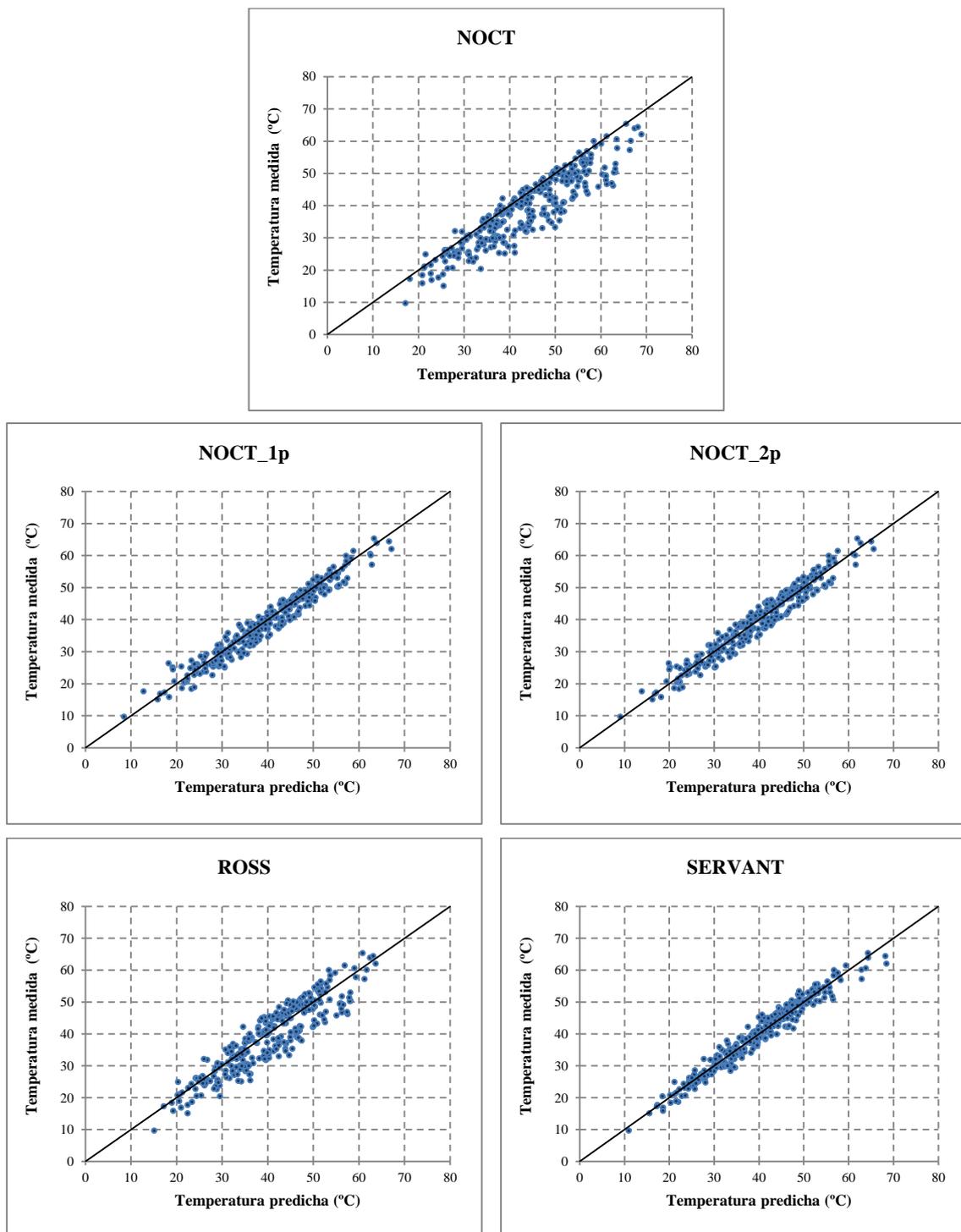


Figura V.12.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2012.

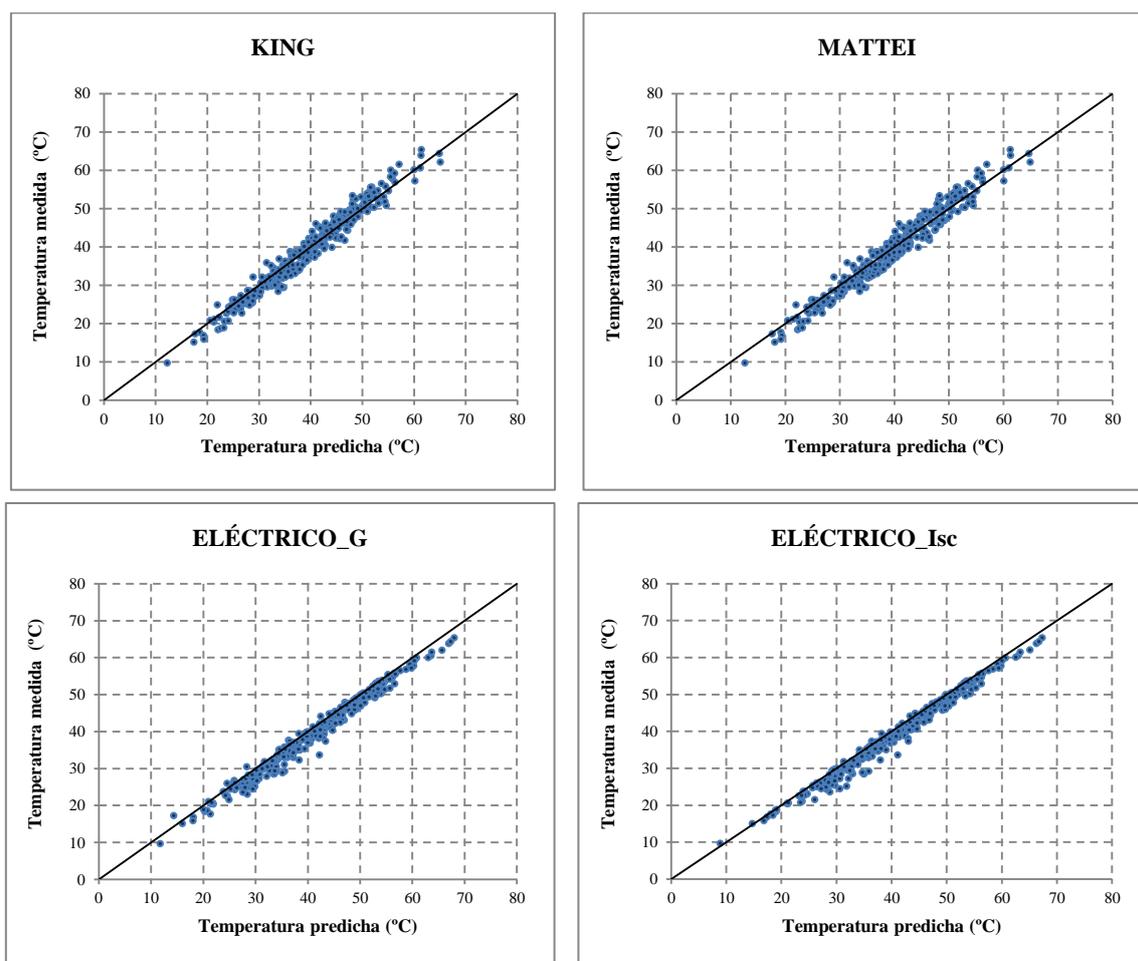


Figura V.12.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios horarios de 2012.

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 V.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.

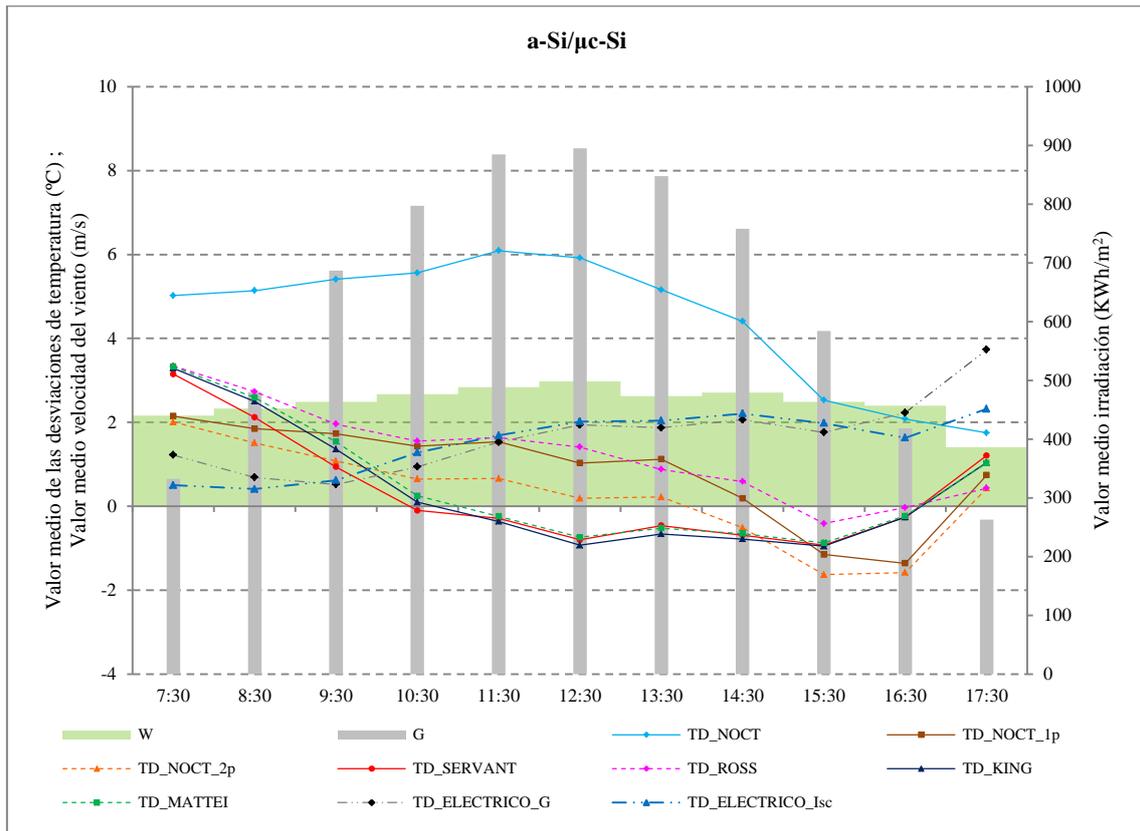


Figura V.13. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología silicio amorfo/microcristalino. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

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/m², 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.

5.3.4. Módulo de tecnología de silicio multicristalino

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

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R^2 (%)
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 V.13.

Tabla V.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 V.14.a y la Figura V.14.b.

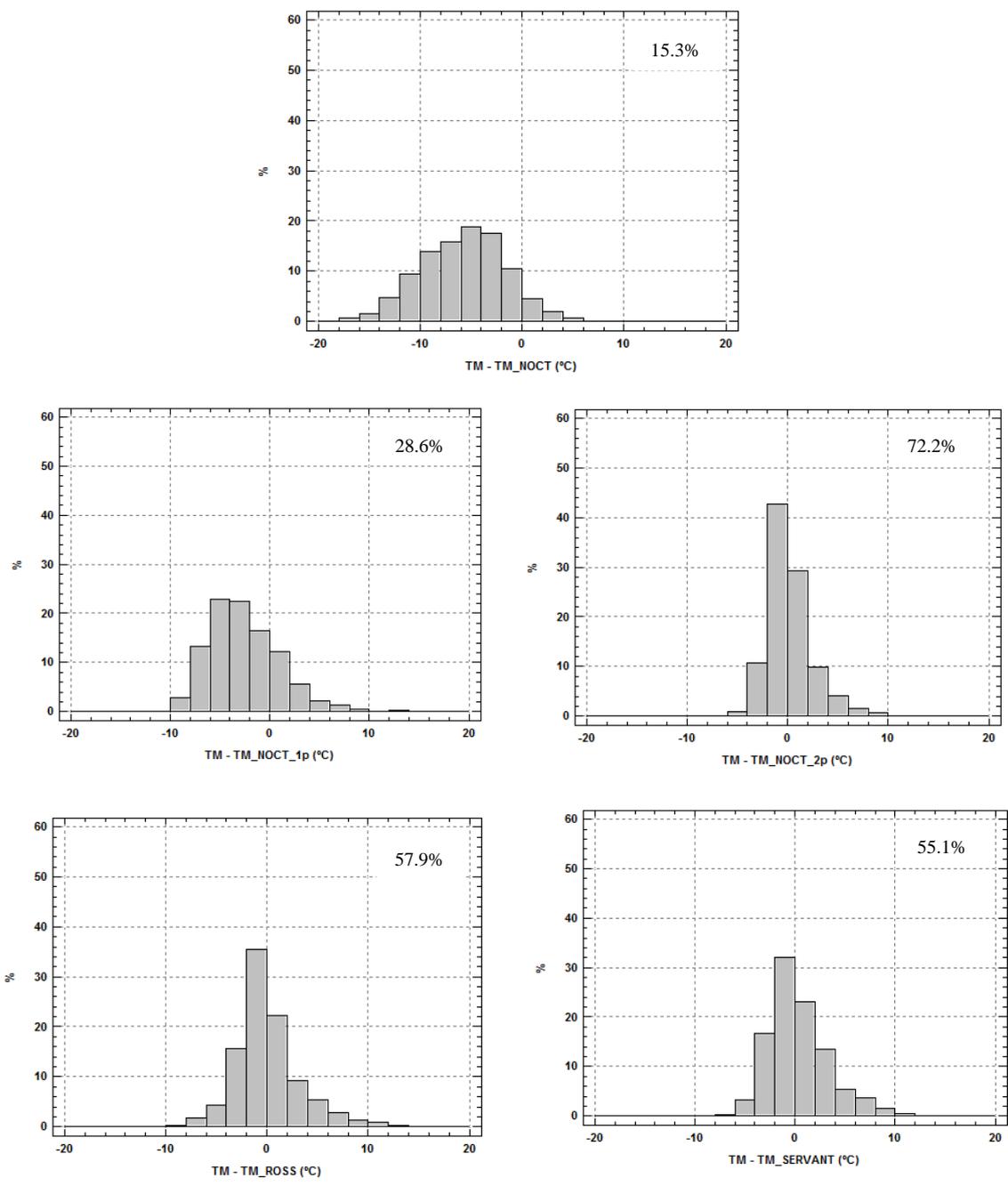


Figura V.14.a. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos horarios del año 2011. La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

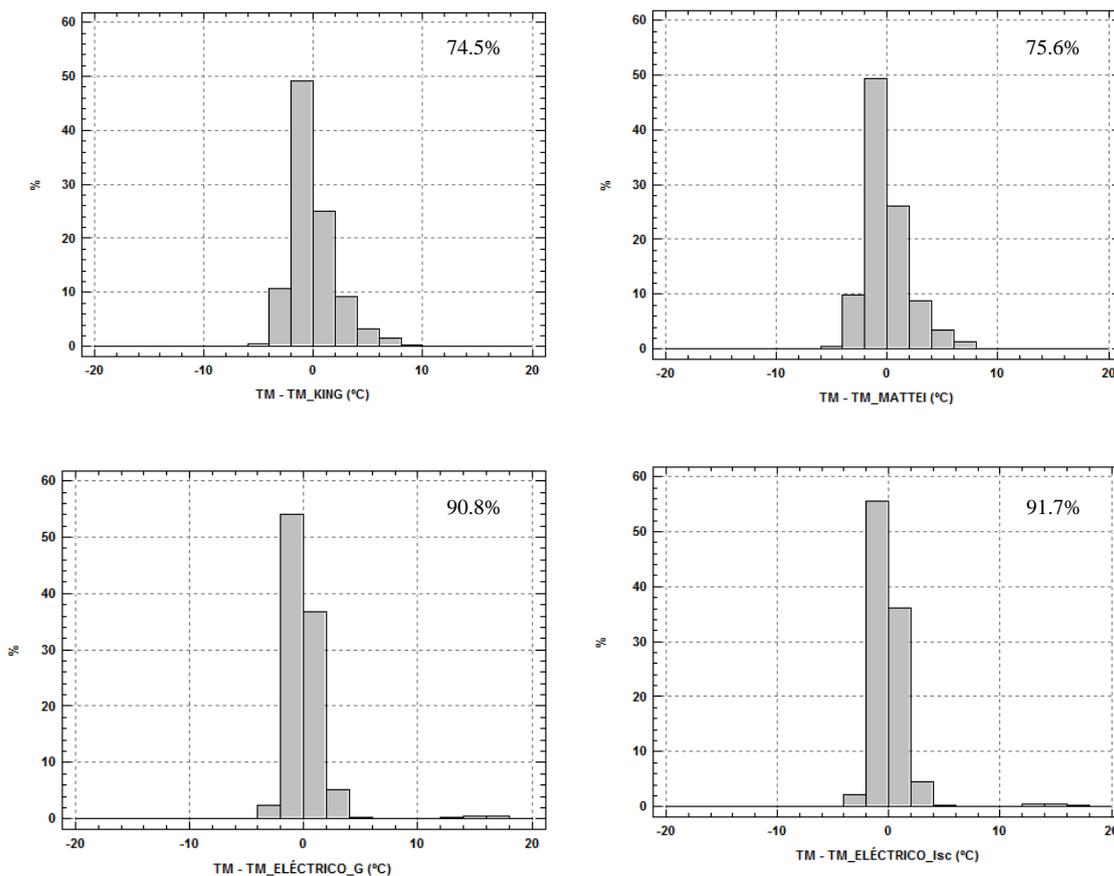


Figura V.14.b. Distribución porcentual de la diferencia entre la temperatura medida y la predicha por cada modelo para el módulo de silicio multicristalino con los datos horarios del año 2011.

La cifra indica el porcentaje de valores cuya diferencia, en valor absoluto, es menor que 2 °C.

En las gráficas de la Figura V.14.a y la Figura V.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 V.15.a y la Figura V.15.b.

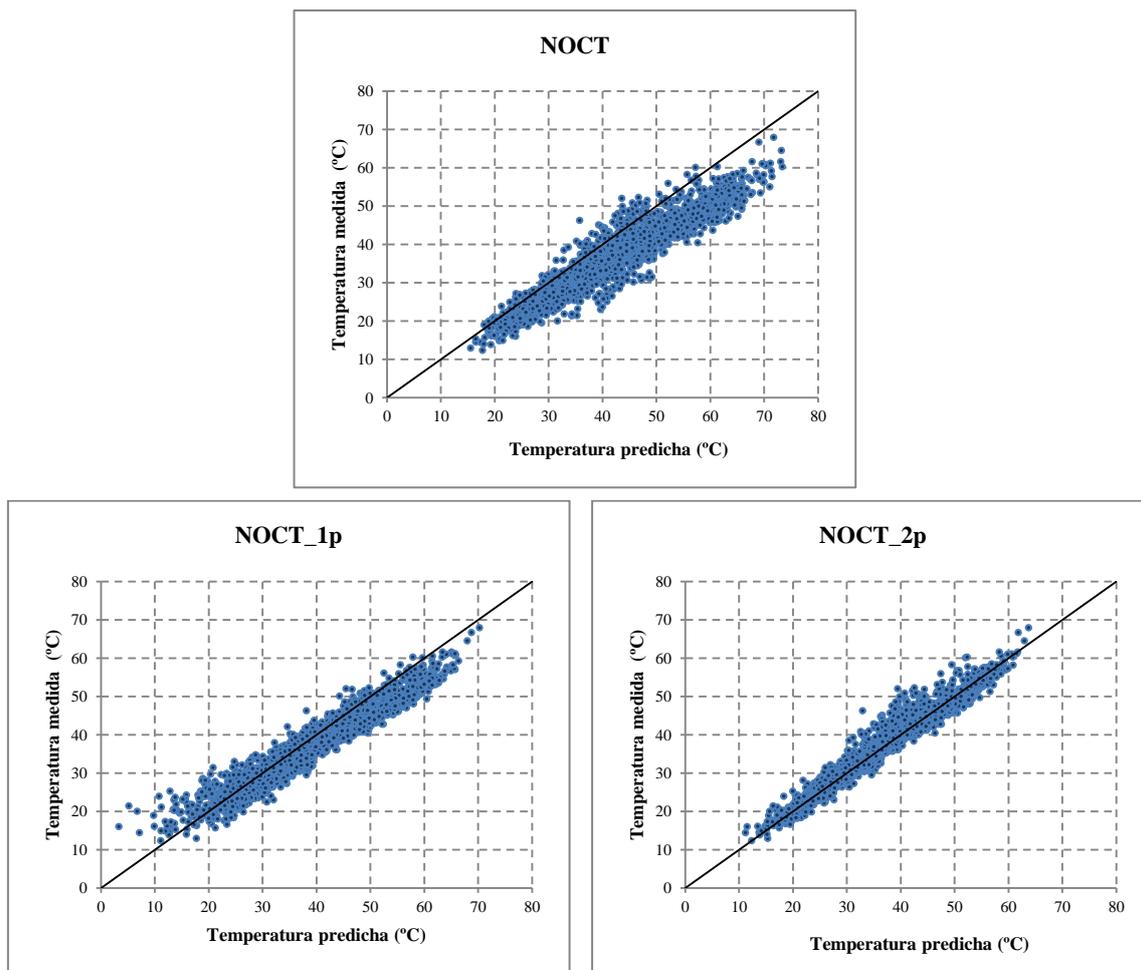


Figura V.15.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2011.

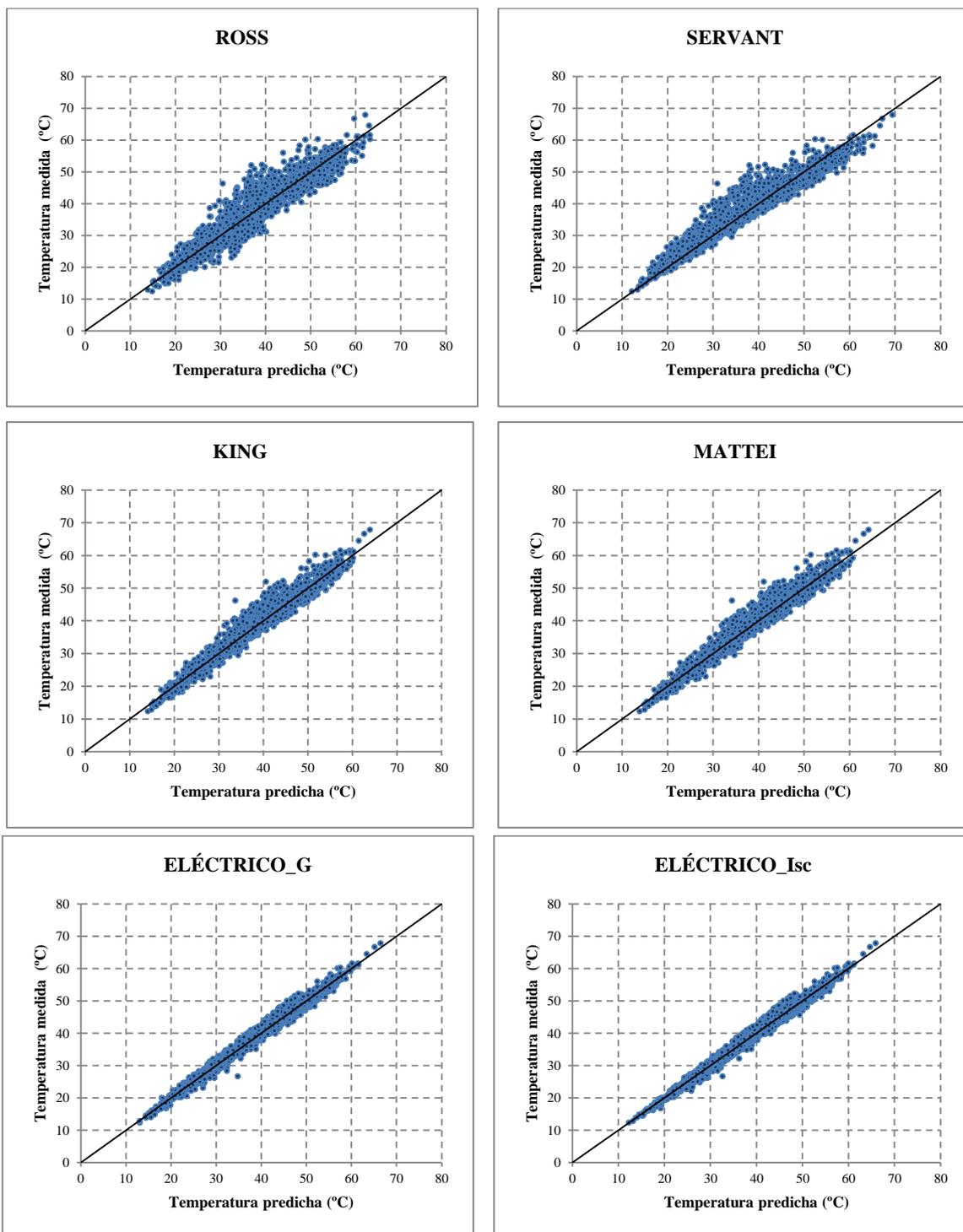


Figura V.15.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2011.

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 V.14.

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

Tecnología	Modelo	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R^2 (%)
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 V.16.a y la Figura V.16.b.

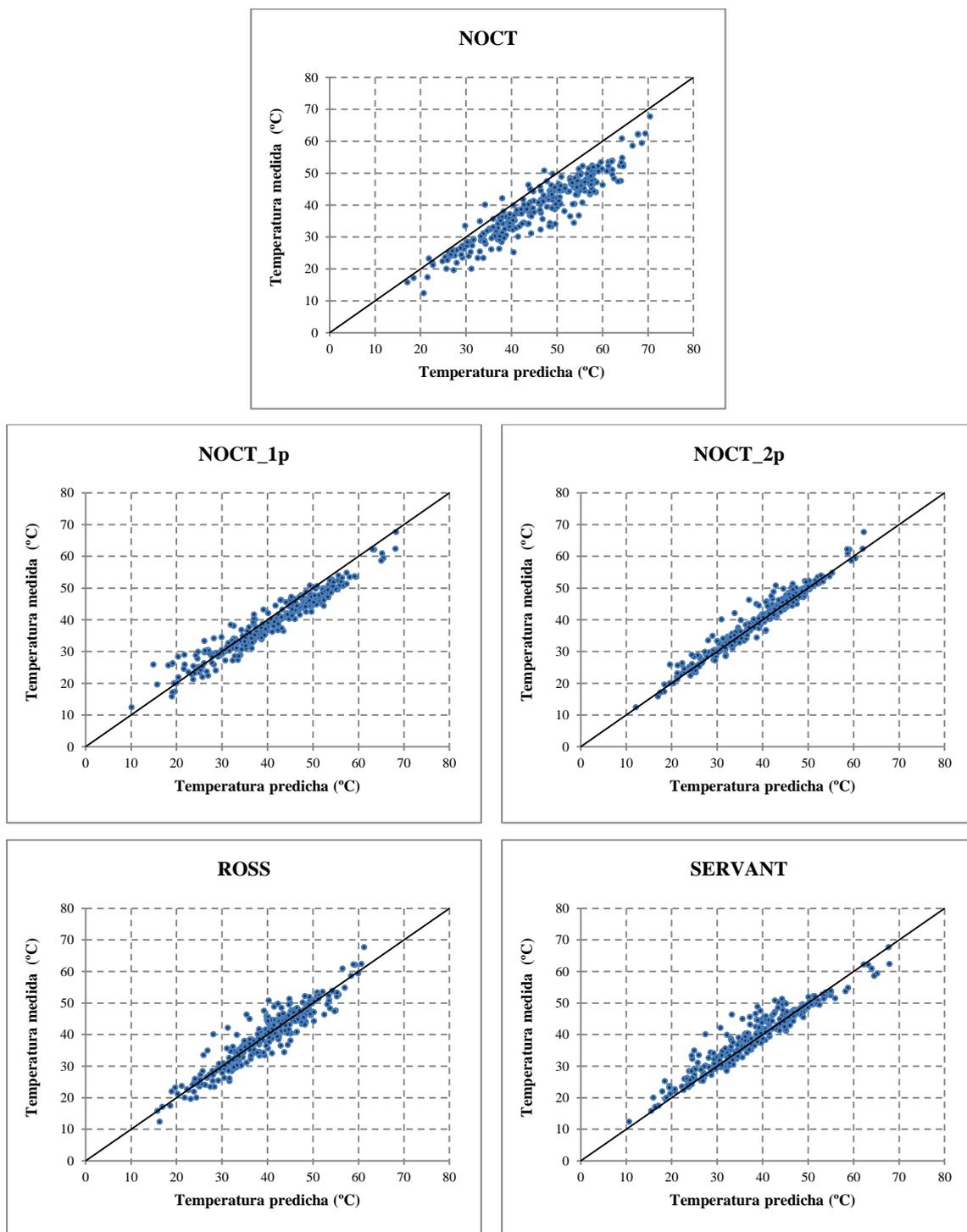


Figura V.16.a. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2012.

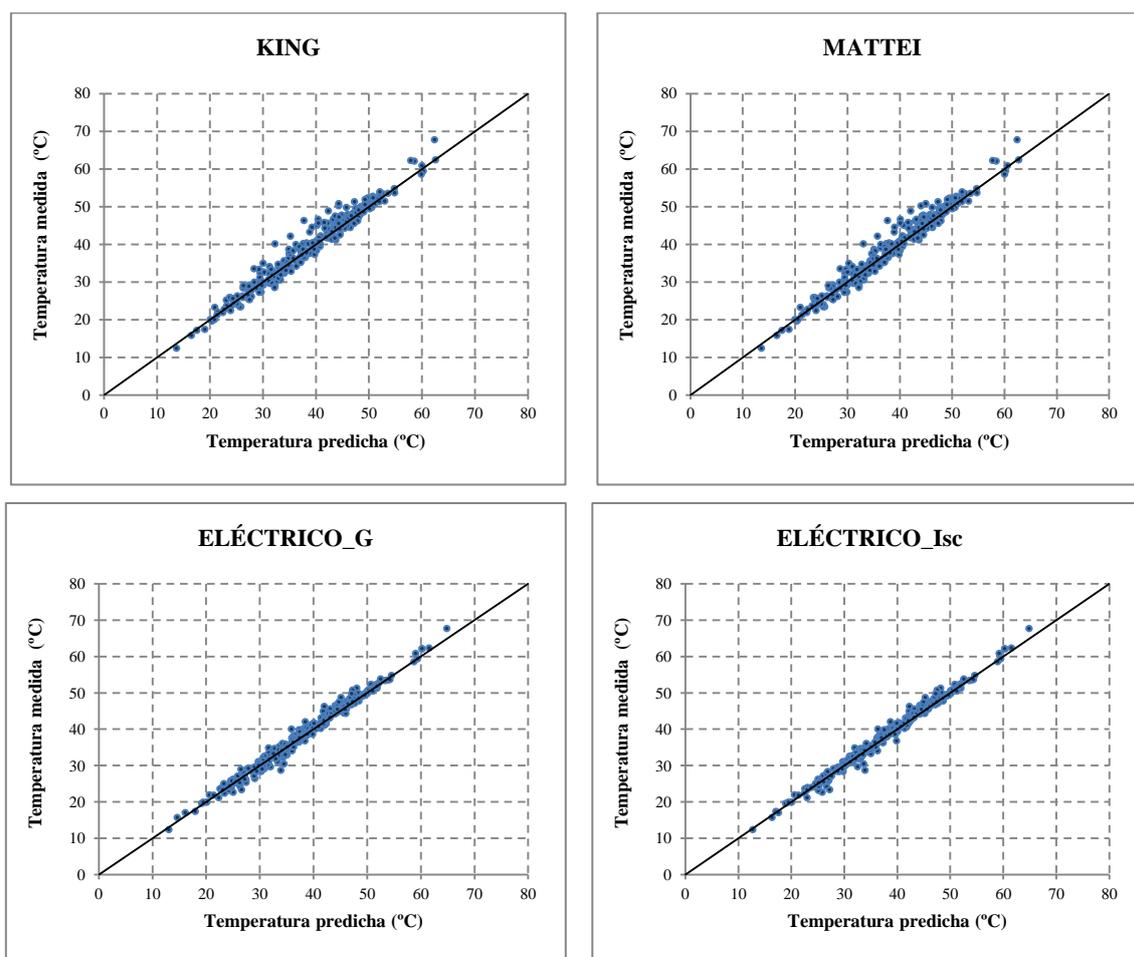


Figura V.16.b. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios horarios de 2012.

En las gráficas de la Figura V.16.a y la Figura V.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 V.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.

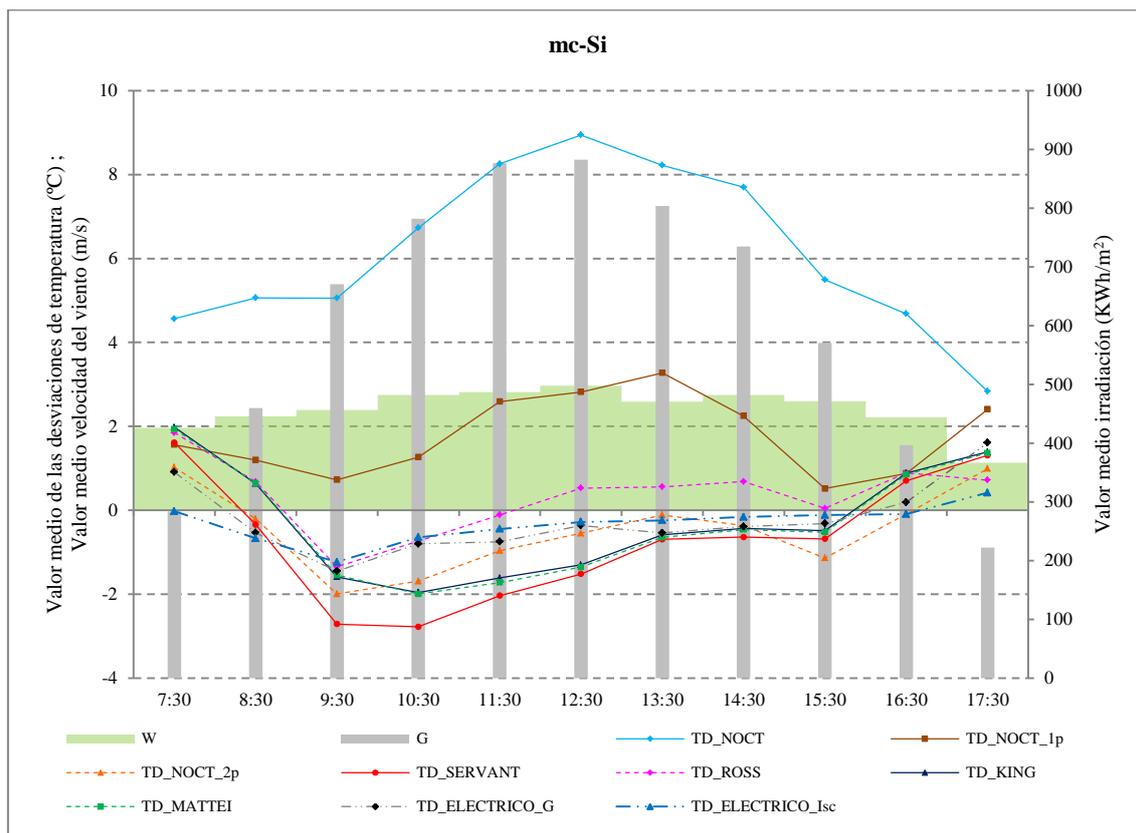


Figura V.17. Gráfica de la media de desviaciones de temperatura de todos los modelos con valores medios horarios de 2012 para el módulo de tecnología silicio multicristalino. Se ha representado también la irradiación y la velocidad del viento media horaria.

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.

5.3.5. 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 V.15.

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

Modelo	Tecnología	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
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/ μ 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/ μ 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/ μ 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/ μ 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/ μ 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/ μ 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/ μ 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/ μ 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/ μ 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 V.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.

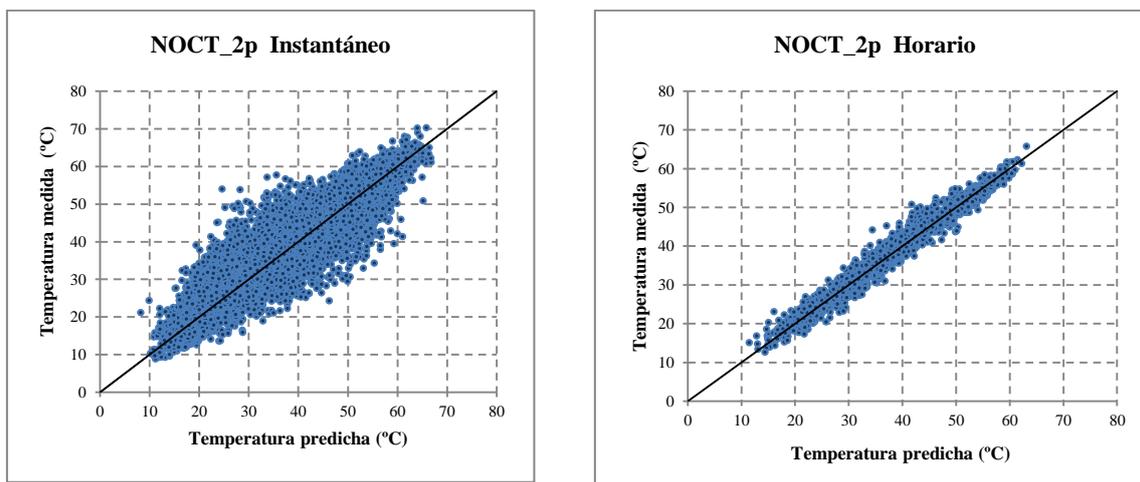


Figura V.18. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por el modelo propuesto NOCT_2p para el módulo de telururo de cadmio, usando valores instantáneos (a la izquierda) y valores medios horarios (a la derecha), en ambos con datos de 2011.

En la Figura V.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.

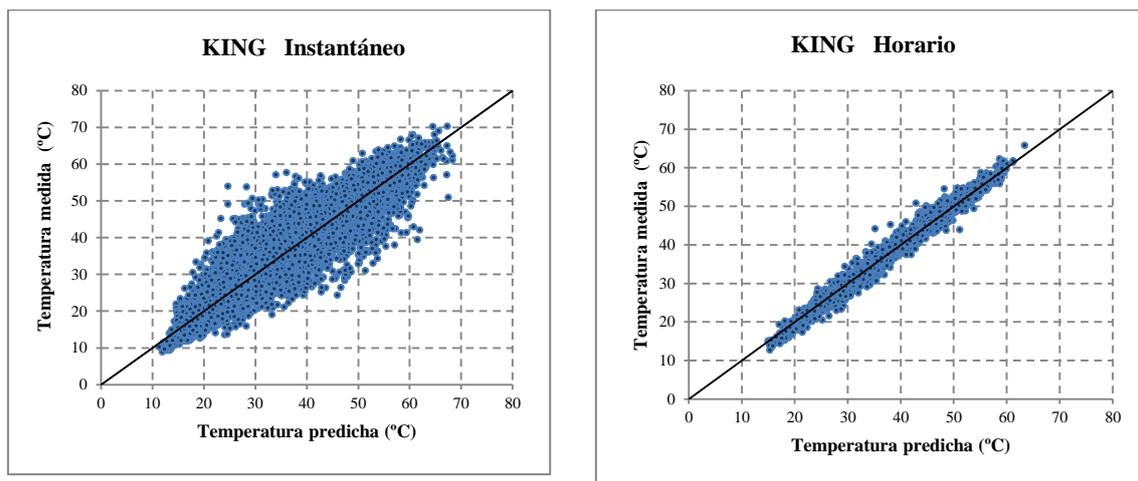


Figura V.19. Temperatura medida frente a la temperatura predicha por el modelo de King para el módulo de silicio amorfo, usando valores instantáneos (a la izquierda) y valores medios horarios (a la derecha), en ambos con datos de 2011.

Los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para cada modelo se presentan en la Tabla V.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 V.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/ μ 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 V.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 V.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.

En las Figuras V.21, Figura V.22, Figura V.23 y Figura V.24 se muestran los resultados obtenidos para las desviaciones medias de la temperatura en cada una de las tecnologías de módulos estudiada. Cada punto representa la diferencia entre la temperatura horaria predicha por cada modelo y la temperatura horaria observada. Cada valor se representa con su desviación estándar (con factor de cobertura igual a 1).

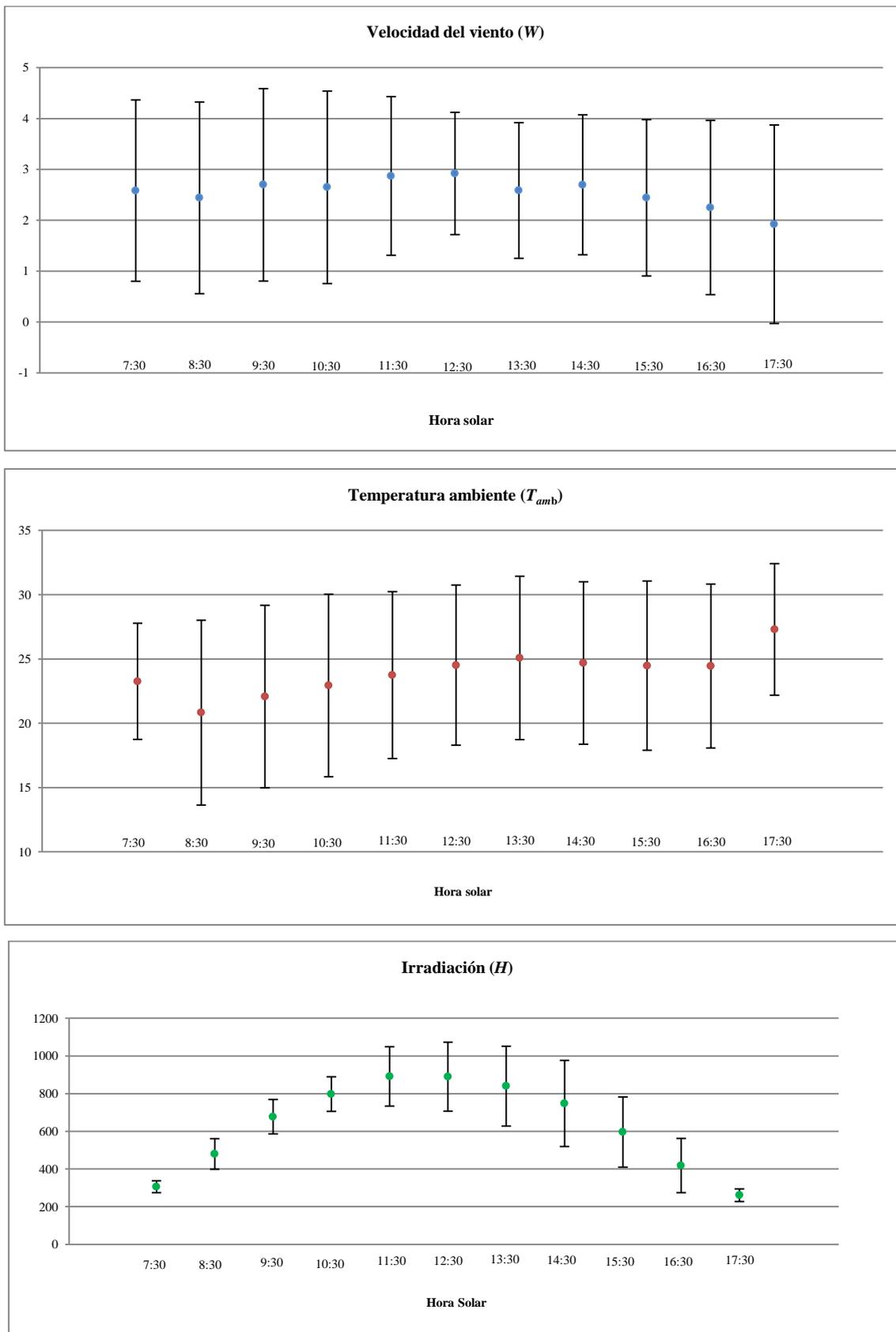


Figura V.20. Valores experimentales medios horarios de la irradiación, de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento con su correspondiente desviación estándar de los 31 días seleccionados

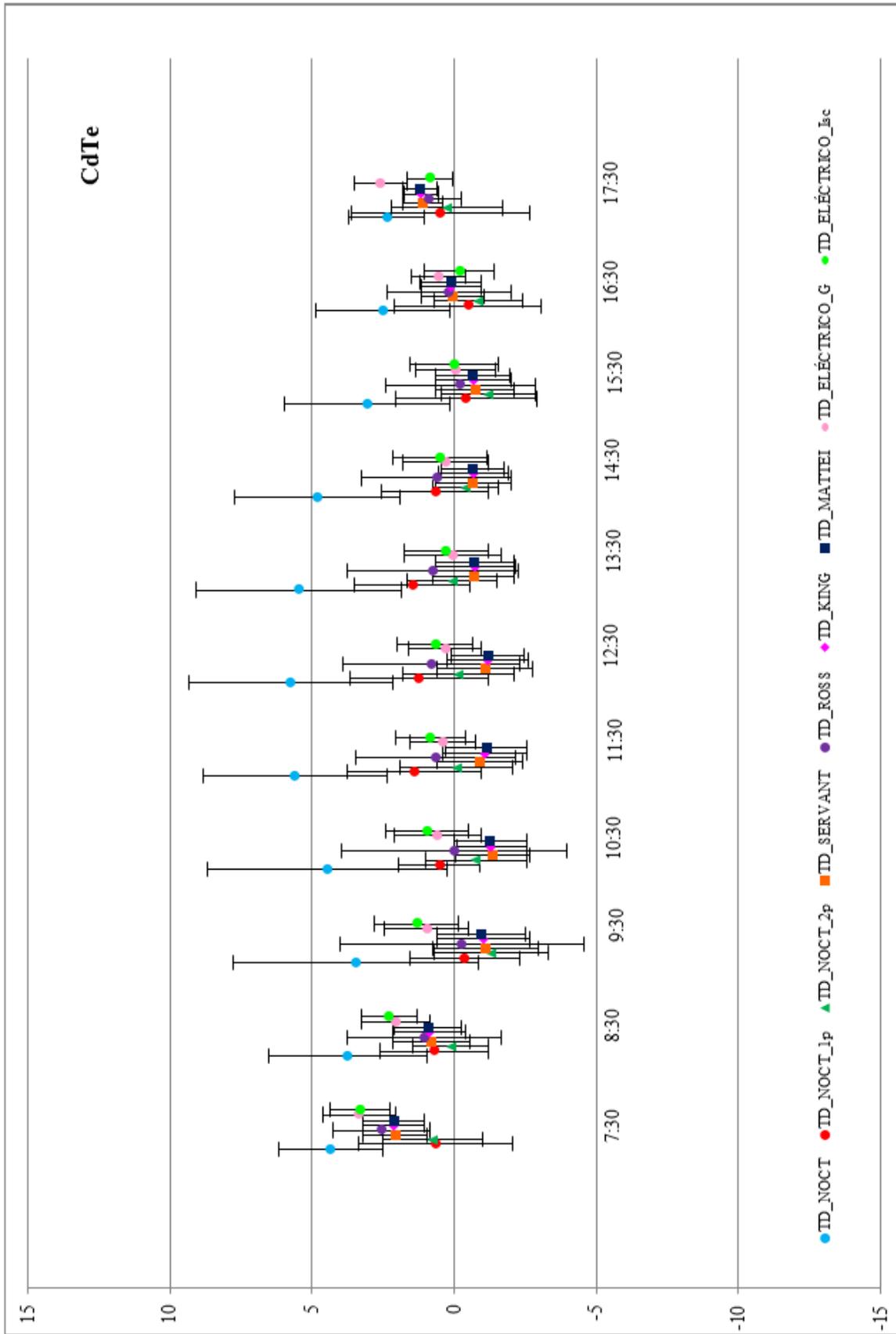


Figura V.21. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de telururo de cadmio.

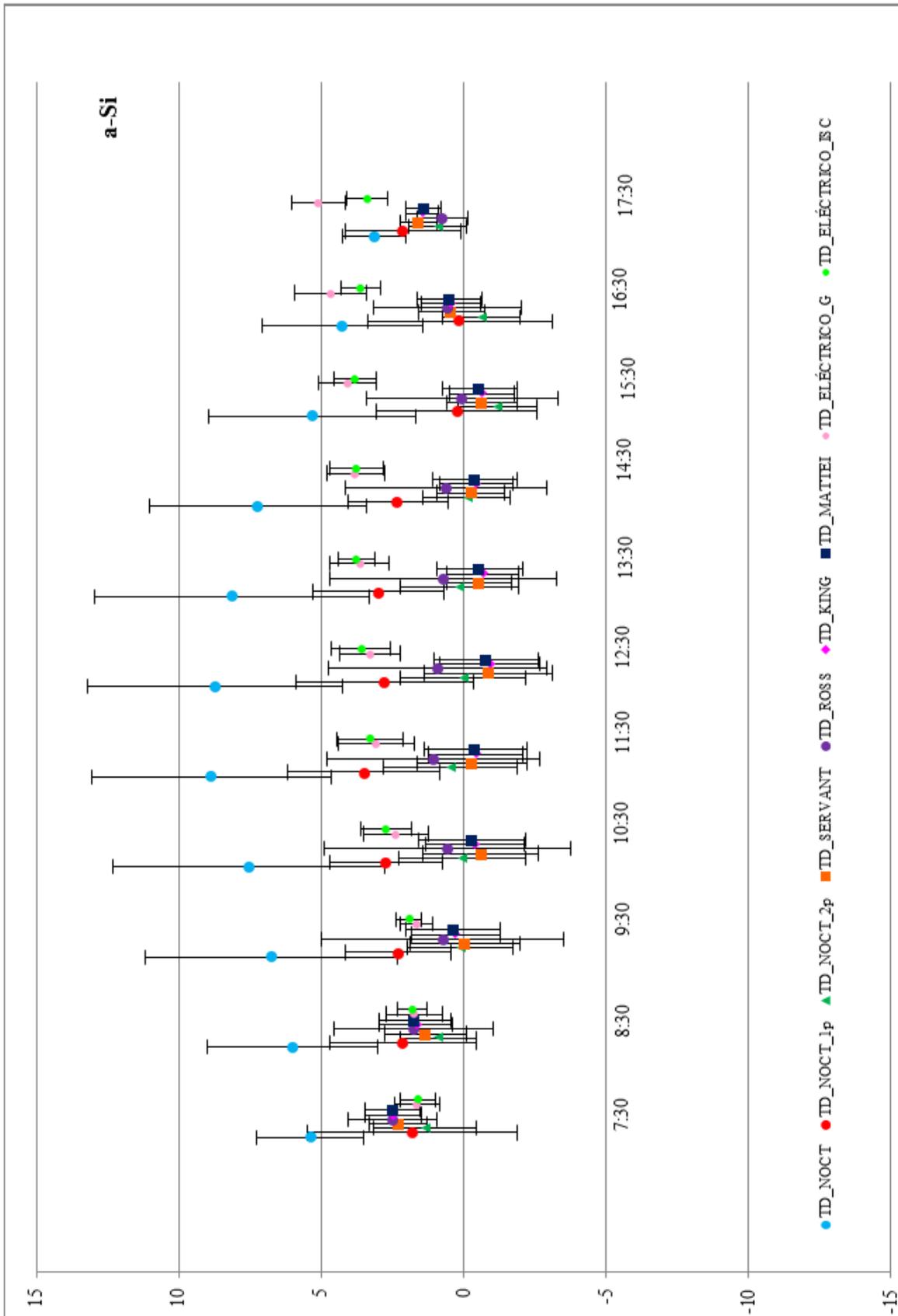


Figura V.22. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de silicio amorfo.

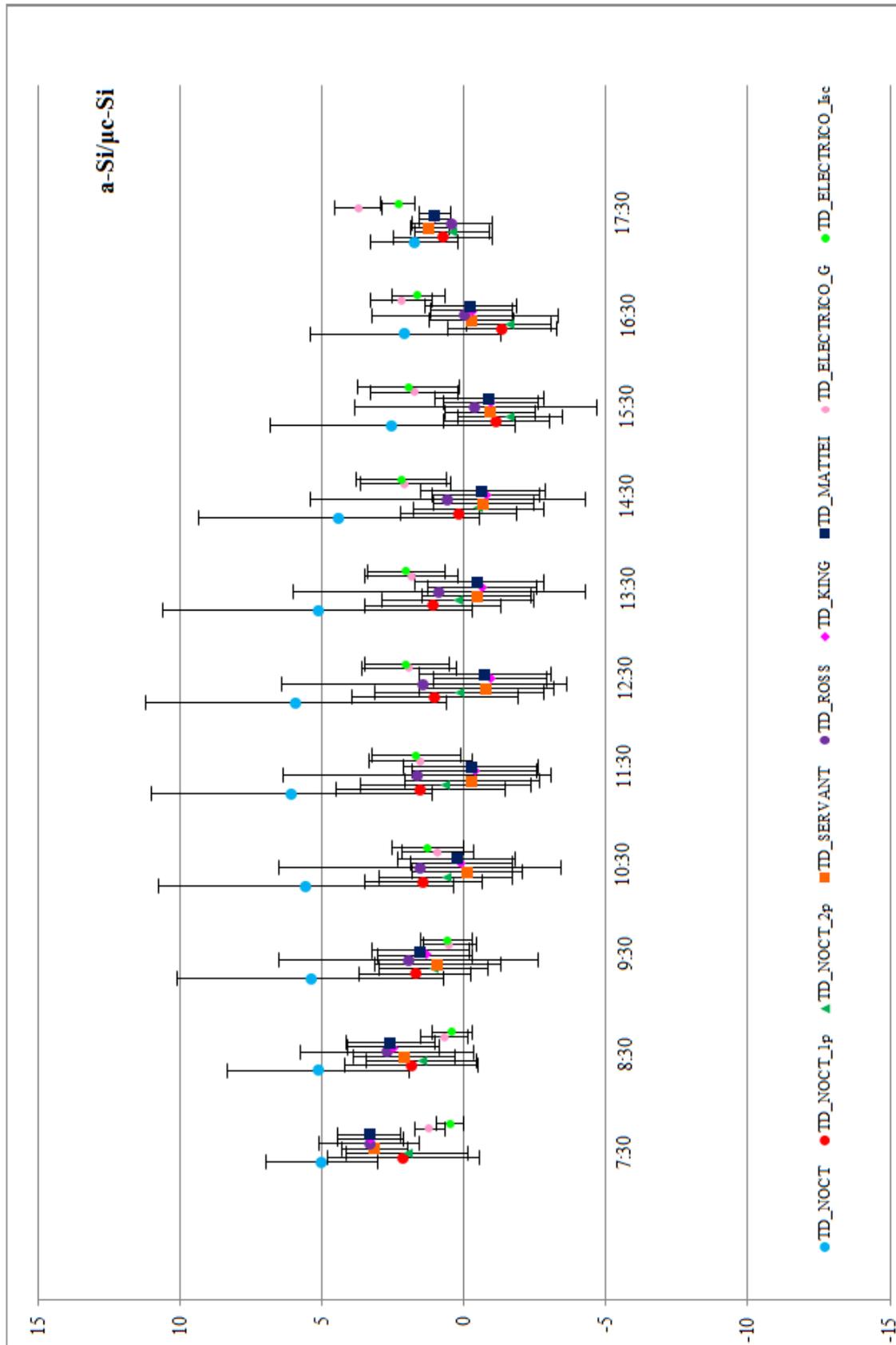


Figura V.23. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de silicio amorfo/microcristalino.

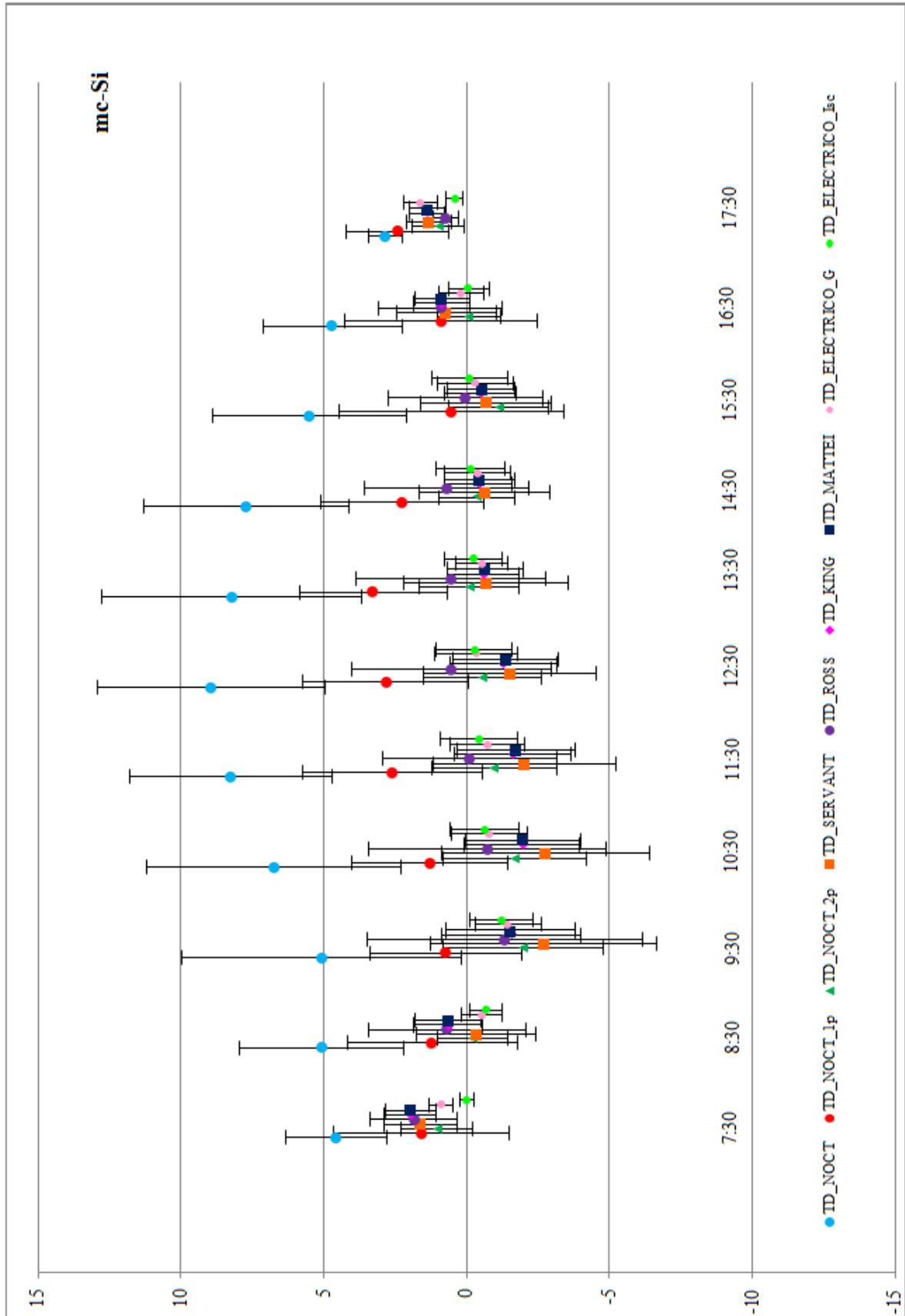


Figura V.24. Desviaciones de temperatura de cada uno de los modelos y su desviación estándar con los datos de los 31 días aleatorios de 2012, para el módulo de silicio multicristalino.

En las gráficas de la Figura V.21, Figura V.22, Figura V.23 y Figura V.24 se puede observar que el modelo NOCT predice siempre una temperatura mayor que la temperatura medida del módulo, con altos valores de desviación estándar. Estas diferencias llegan a ser en las horas centrales del día, de 8 °C para los módulos de a-Si y de mc-Si. El modelo propuesto de un solo parámetro, NOCT_1p, si bien mejora sustancialmente los resultados anteriores, todavía predice en todas las horas del día valores superiores a la temperatura observada en todos los módulos estudiados. El modelo horario de Ross mejora los resultados del NOCT_1p, pero presenta valores altos de la desviación estándar, sin duda debido a que este modelo no tiene en cuenta la influencia de la velocidad del viento. El modelo propuesto NOCT_2p ofrece excelentes resultados. Este modelo predice la temperatura horaria con valores muy próximos a la temperatura observada con valores bajos de desviación estándar. El resto de los modelos estudiados presentan resultados muy similares entre sí y comparables con el modelo NOCT_2p, siendo difícil decidir qué modelo presenta los mejores resultados. Si se exceptúan los modelos sencillos, NOCT y NOCT_1p, todos los modelos estudiados predicen mejor los valores horarios de temperatura en las horas centrales del día que en las primeras y últimas horas del mismo. En las primeras horas de sol los modelos predicen una temperatura por encima de la observada mientras que en las horas centrales del día la temperatura predicha está próxima a la observada. Respecto a las diferentes tecnologías de módulos, los mejores resultados se obtienen para los módulos de lámina delgada, en especial los módulos de CdTe y de a-Si, que presentan pocas diferencias entre las predicciones de los diferentes modelos, mientras que la mayor dispersión de resultados se da en la predicción de la temperatura del módulo de mc-Si. Esto es coherente con el hecho de que el módulo de mc-Si tiene un valor más alto del coeficiente γ de variación de la potencia con la temperatura (valores presentados en la Tabla II.1 del Capítulo 2), lo que influye en su inercia térmica.

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 V.25 se muestran los valores instantáneos de la irradiancia y de la velocidad del viento para el mencionado día.

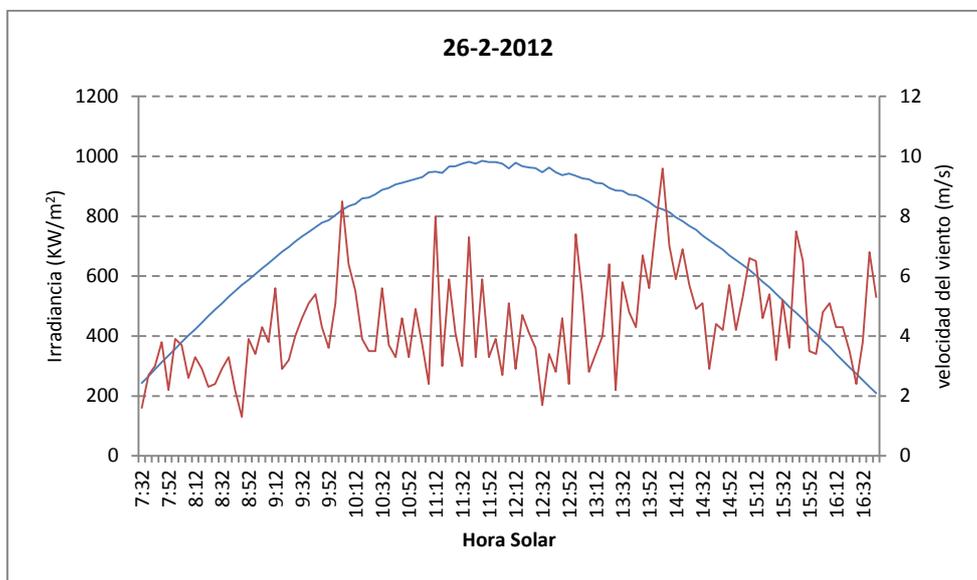


Figura V.25. Gráfica de valores instantáneos de irradiancia y velocidad del viento para el día 26 de febrero de 2012.

En la Figura V.26.a y la Figura V.26.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 V.27 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 V.26.a y la Figura V.26.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/ μ 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.

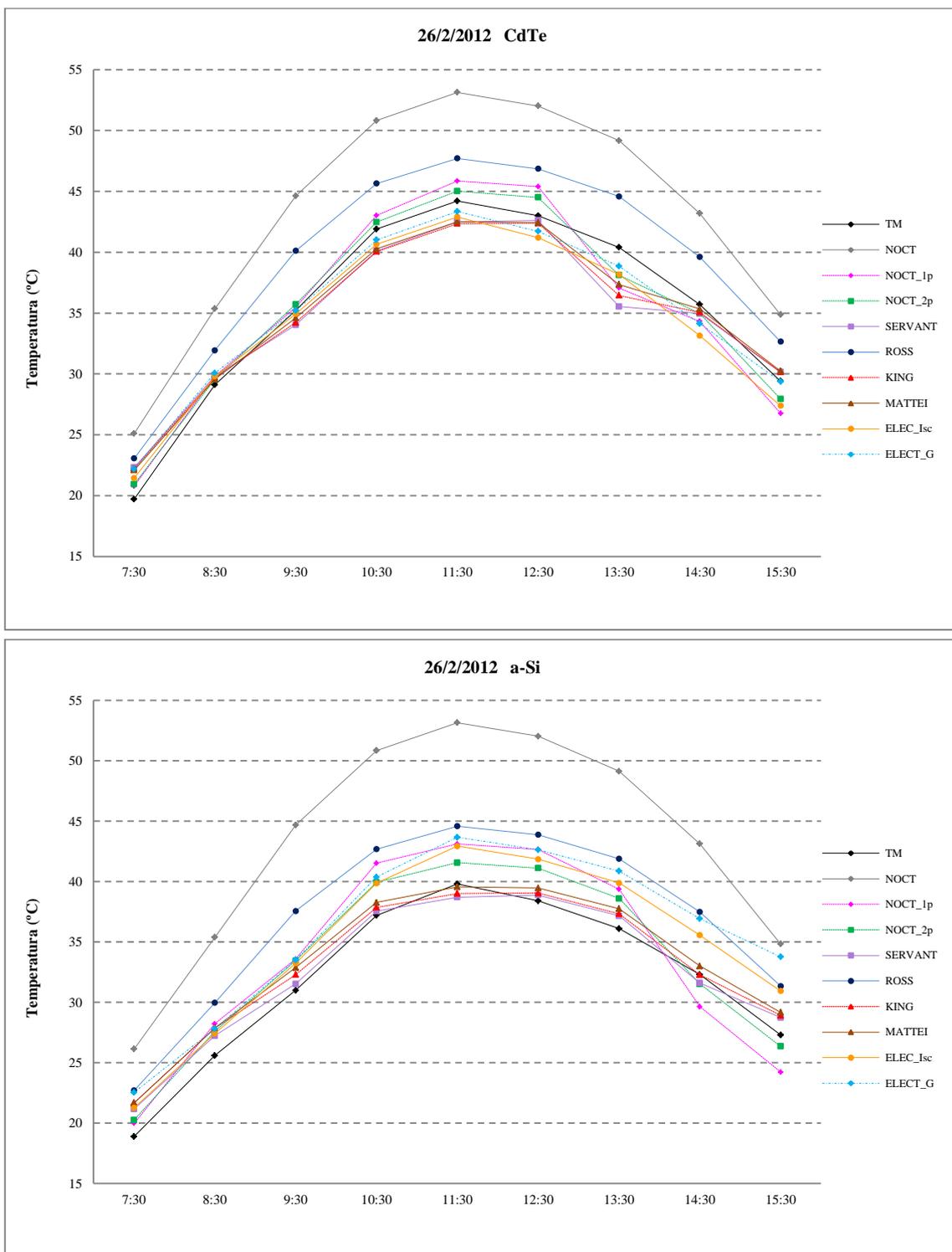


Figura V.26.a. Gráficas de la temperatura medida y la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012, para los módulos de telururo de cadmio y silicio amorfo.

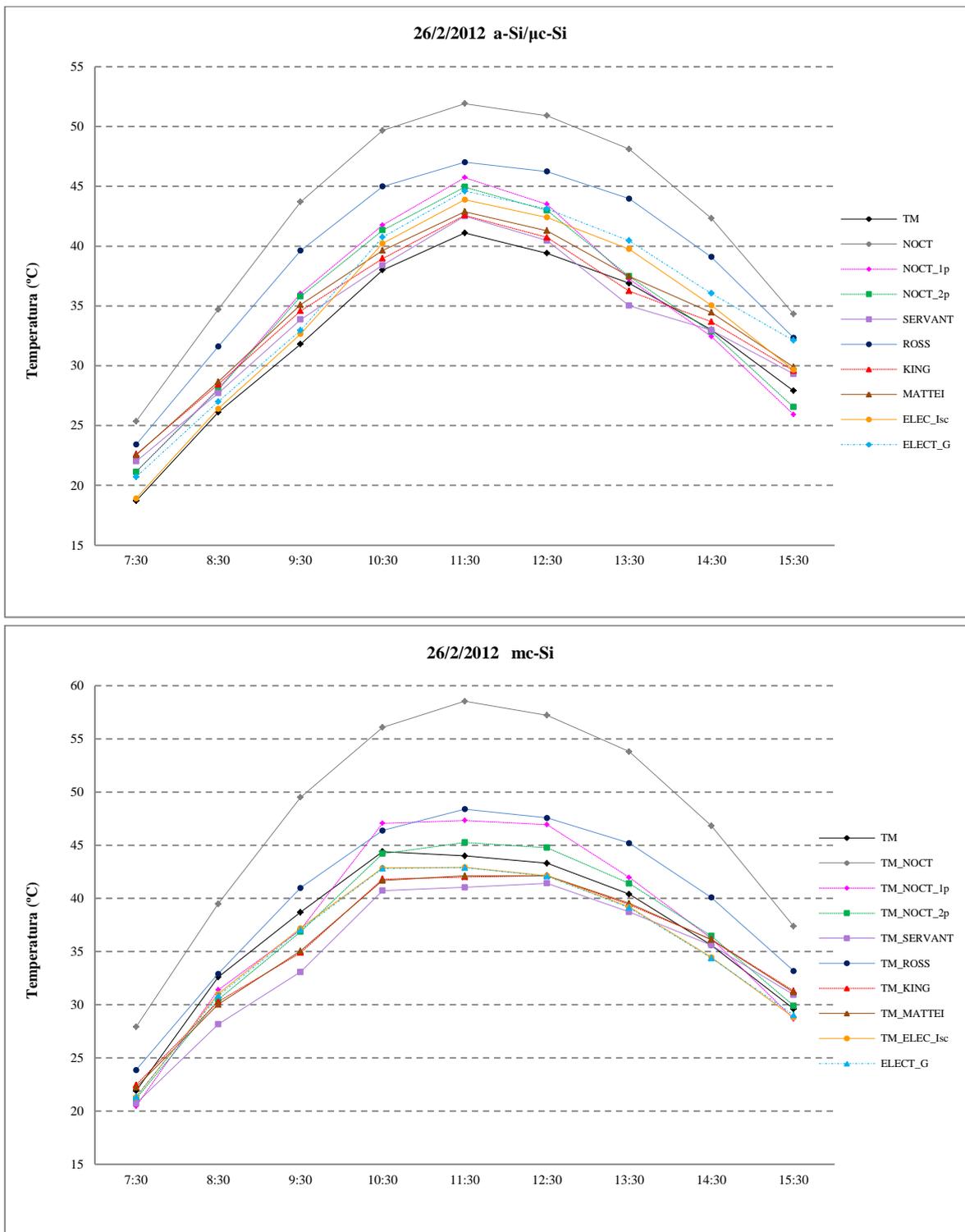


Figura V.26.b. Gráficas de la temperatura medida y la temperatura predicha por cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012, para los módulos de silicio amorfo/microcristalino y silicio multicristalino.

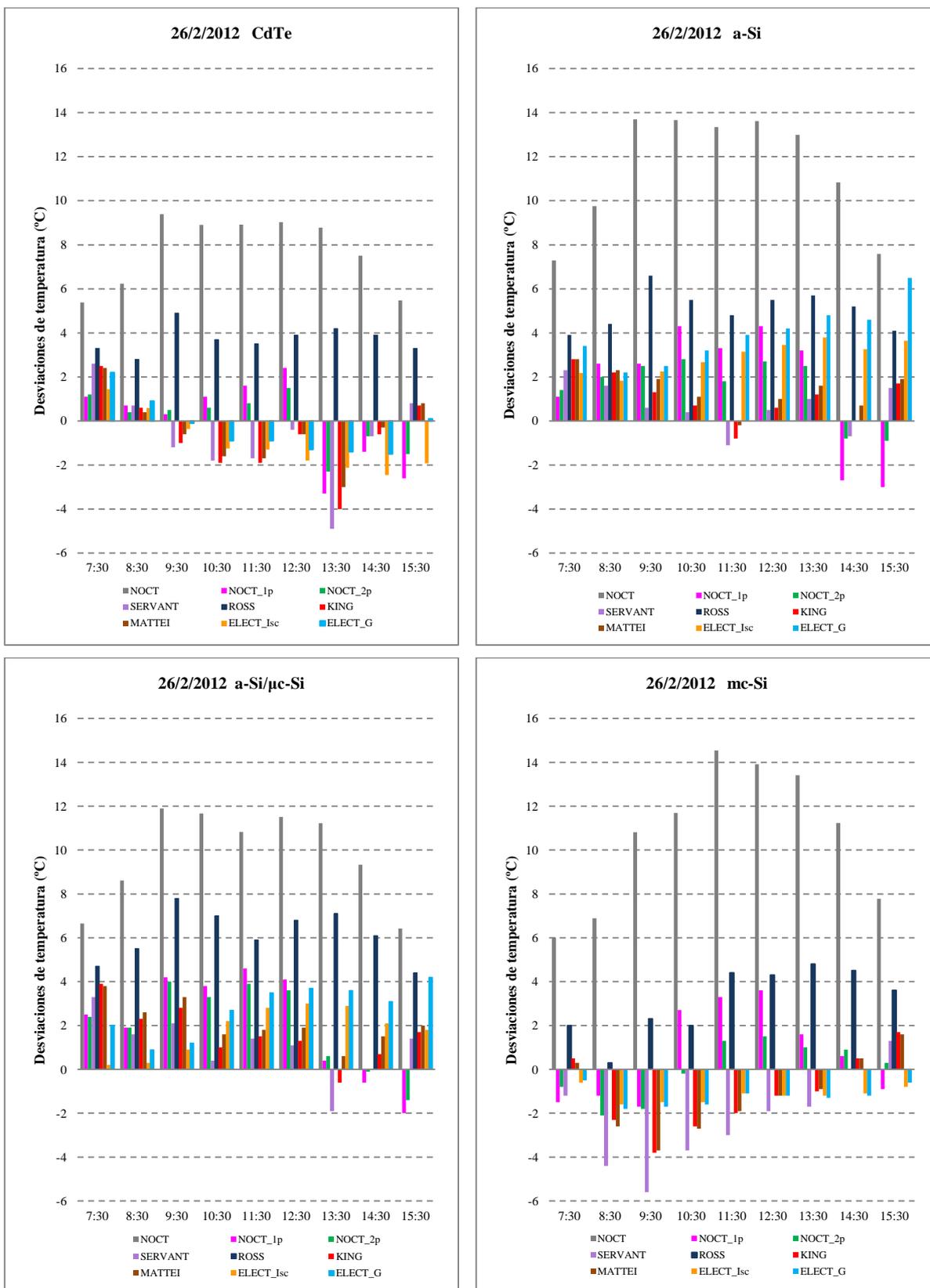


Figura V.27. Gráficas de la desviación de temperatura de cada uno de los modelos para el día 26 de febrero de 2012.

5.4. ANÁLISIS DE LOS VALORES MEDIOS DIARIOS DE LA TEMPERATURA DE LOS MÓDULOS

Con los modelos horarios usados en esta tesis no ha sido posible establecer los correspondientes modelos diarios para predecir la temperatura media diaria de trabajo de los módulos. Sin embargo, en el análisis realizado en los epígrafes anteriores se ha observado una gran variabilidad en la predicción en cuanto a exactitud y precisión en las distintas horas del día, que además es diferente para los distintos modelos y las diferentes tecnologías.

Lo que se propone ahora es analizar la relación entre la temperatura media diaria calculada para cada tecnología, a partir de las predicciones horarias que realiza cada modelo (en lo sucesivo, temperatura media diaria calculada), y la temperatura media diaria registrada de cada módulo, evaluada como la temperatura media integrada de las temperatura horarias medidas (en lo sucesivo, temperatura media diaria registrada), realizando este análisis tanto con los datos del año 2011 como con los datos de los 31 días del año 2012.

5.4.1. Resultados obtenidos con los datos del año 2011

En la tabla V.17 se muestran los resultados obtenidos al comparar la temperatura media diaria calculada con la temperatura media diaria registrada, usando todos los datos del año 2011, utilizando las mismas métricas que en los apartados anteriores.

Tabla V.17.- Tabla de resultados de la comparación de los valores medios diarios de temperatura de 2011.

Modelo horario usado	Tecnología	\overline{TD} (°C)	STD (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)	R ² (%)
NOCT	CdTe	3.02	2.4	3.2	9.5	90.7
	a-Si	4.89	2.9	4.9	15.8	87.0
	a-Si/ μ c-Si	2.81	3.1	3.0	9.9	84.7
	mc-Si	5.09	2.8	5.1	15.2	90.7
SERVANT	CdTe	-0.06	0.8	0.6	1.8	99.0
	a-Si	0.01	0.8	0.6	2.0	98.9
	a-Si/ μ c-Si	0.01	1.1	0.9	2.6	98.2
	mc-Si	-0.78	2.1	1.8	5.6	95.8
ROSS	CdTe	-0.09	2.2	1.7	5.3	91.6
	a-Si	-0.08	2.5	1.9	6.5	89.3
	a-Si/ μ c-Si	-0.02	3.0	2.3	7.4	85.8
	mc-Si	-0.26	2.2	1.7	5.4	91.6
KING	CdTe	-0.01	0.7	0.5	1.6	99.2
	a-Si	0.13	0.9	0.7	2.3	98.9
	a-Si/ μ c-Si	0.13	1.1	0.9	2.8	98.2
	mc-Si	-0.14	1.2	0.9	2.8	97.7
MATTEI	CdTe	0.02	0.7	0.5	1.5	99.2
	a-Si	0.15	1.0	0.8	2.6	98.7
	a-Si/ μ c-Si	0.16	1.2	1.0	3.2	97.8
	mc-Si	-0.13	1.1	0.9	2.6	97.9
ELÉCTRICO_G	CdTe	0.30	1.4	1.1	3.3	97.1
	a-Si	0.26	0.9	0.7	2.2	98.5
	a-Si/ μ c-Si	0.28	1.0	0.7	2.1	98.6
	mc-Si	0.42	1.5	0.9	2.4	97.1
ELÉCTRICO_Isc	CdTe	-0.08	1.2	1.0	3.1	97.4
	a-Si	0.06	0.7	0.5	1.9	99.2
	a-Si/ μ c-Si	0.03	1.0	0.7	2.3	98.5
	mc-Si	-0.12	1.5	0.7	2.2	96.0
NOCT_1p	CdTe	0.96	1.2	1.3	3.7	98.5
	a-Si	2.25	1.5	2.4	7.5	97.3
	a-Si/ μ c-Si	0.62	1.2	1.0	3.4	97.8
	mc-Si	2.30	2.3	2.8	8.2	95.3
NOCT_2p	CdTe	-0.14	0.9	0.7	2.1	98.8
	a-Si	0.00	1.0	0.8	2.5	98.4
	a-Si/ μ c-Si	-0.05	1.2	1.0	3.0	97.7
	mc-Si	-0.29	1.3	1.0	3.2	98.8

La precisión en la predicción de la temperatura media diaria de todos los modelos con respecto a la precisión que tenían los modelos horarios, ha mejorado en todos los modelos en proporciones variables.

Los modelos con el menor aumento de precisión han sido los modelos NOCT y de Ross, con aumentos variables entre un 21% a un 31%, según tecnologías, siendo la tecnología con el mayor incremento la de silicio multicristalino. Los modelos de Servant y NOCT_1p presentan aumentos de precisión variables entre un 30% y un 50%. Los modelos de King, Mattei y NOCT_2p presentan los mayores aumentos de precisión de todos los modelos, entre un 43% y un 53%, siendo el mayor aumento para el módulo de telururo de cadmio. Para los modelos eléctricos, el aumento de precisión está comprendido entre valores que oscilan de un 25% a un 50%.

Desde la Figura V.28.a y la Figura V.28.b hasta la Figura V.31.a y la Figura V.31.b se muestran las gráficas de la temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para todos los modelos con los datos diarios del año 2011 para cada tecnología.

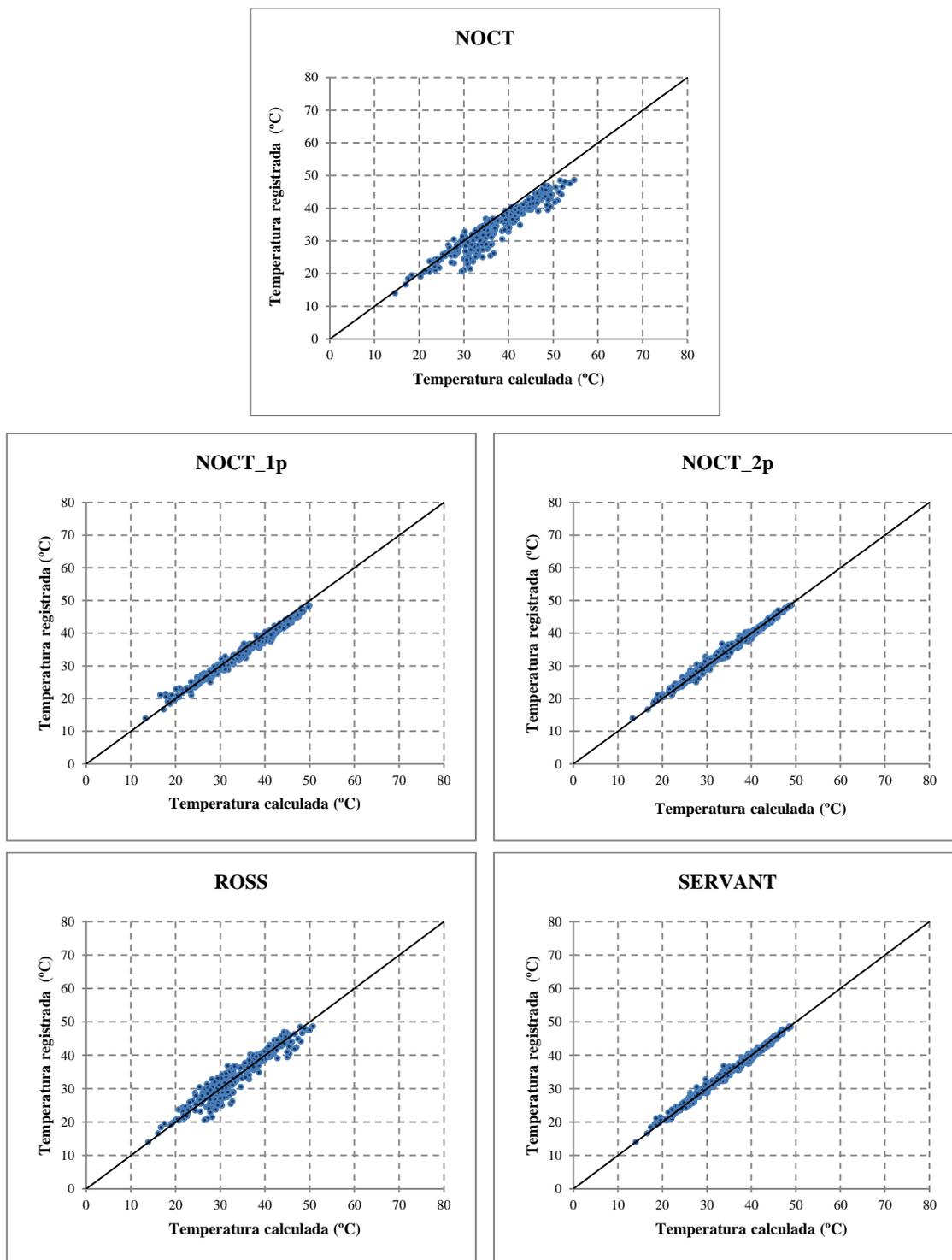


Figura V.28.a. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios diarios de 2011.

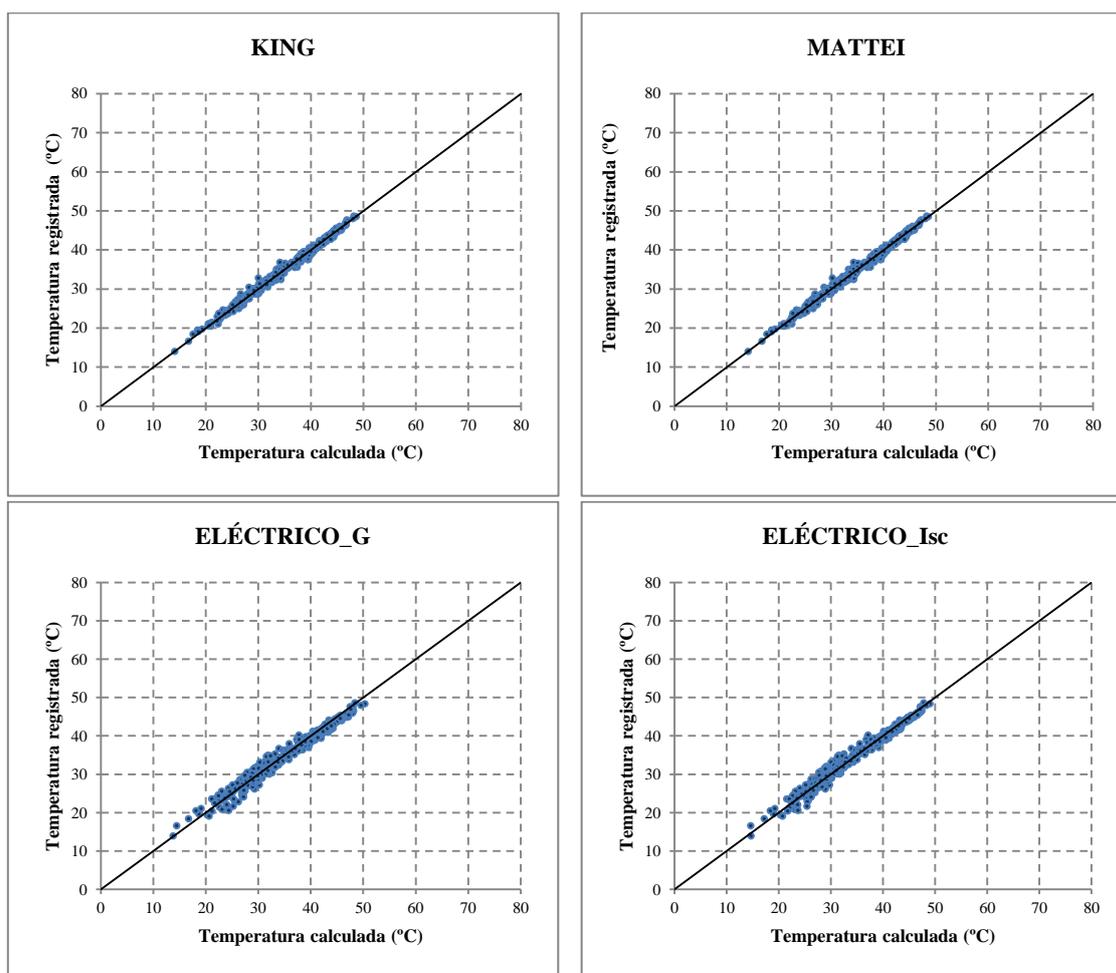


Figura V.28.b. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de telururo de cadmio usando valores medios diarios de 2011.

Para la tecnología de telururo de cadmio, puede apreciarse en las gráficas de las Figura V.28.a y Figura V.28.b que en los modelos NOCT y Ross, los datos no están tan agrupados en torno a la recta de pendiente unidad como en el resto de modelos. Estos modelos presentan un valor de R^2 del 90.7% y 91.6% respectivamente, y además son los que presentan los valores más altos de la desviación estándar, 2.4 °C y 2.2 °C respectivamente.

La integración de los modelos eléctricos presentan valores de R^2 superiores al 97%, los modelos NOCT_1p y NOCT_2p superiores al 98.5% y los modelos de Servant, King y Mattei superiores al 99%, mientras que los valores de desviación estándar oscilan desde 1.4 °C a 0.7 °C, siendo los modelos que tienen los mayores valores de R^2 los que presentan los valores más bajos de la desviación estándar.

Los valores MAE y MAPE en los modelos NOCT y Ross son los más altos, 3.2 °C y 9.5% para NOCT y 1.7 °C y 5.3% para Ross. El resto de modelos presentan valores MAE entre 0.5 °C y 1.3 °C y MAPE entre 1.5% y 3.7%. El modelo NOCT_2p destaca por sus buenos resultados, 0.7 °C y 2.1%.

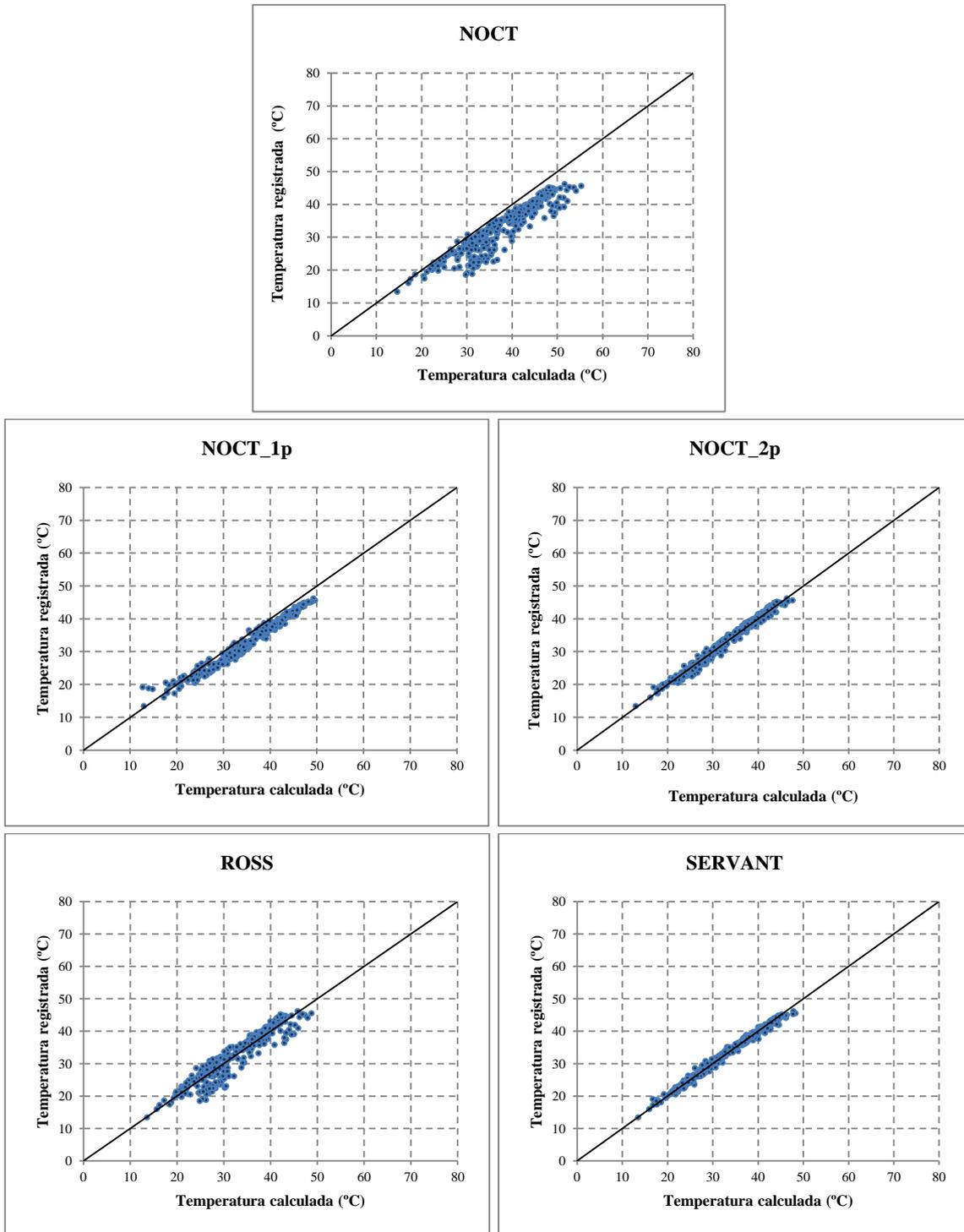


Figura V.29.a. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios diarios de 2011.

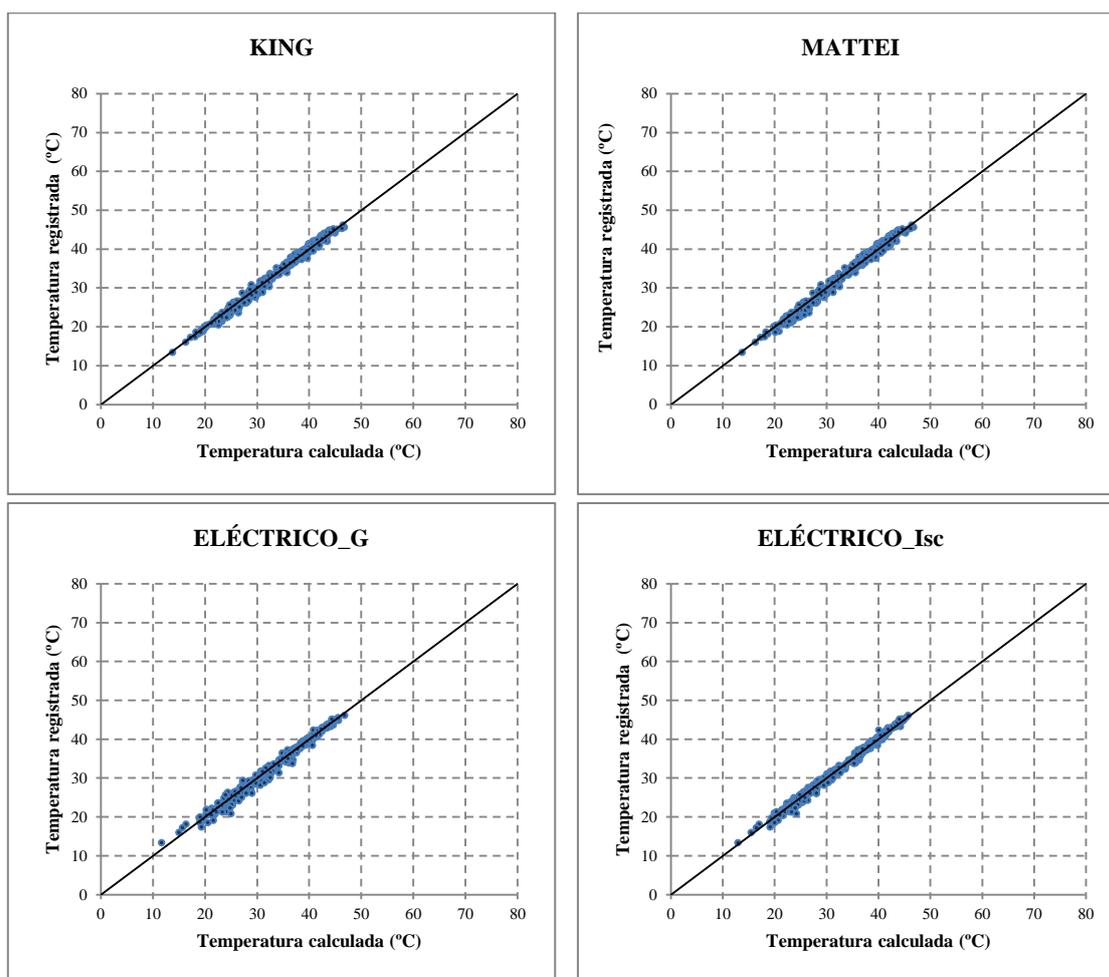


Figura V.29.b. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo usando valores medios diarios de 2011.

En las gráficas de las Figura V.29.a y Figura V.29.b podemos apreciar que el modelo NOCT proporciona un valor de temperatura calculada muy superior a la registrada, pues prácticamente todos los puntos están por debajo de la recta de pendiente unidad. Además, los valores MAE y MAPE para este modelo son los más altos, 4.9 °C y 15.8%. Aunque con los modelos NOCT_1p y Ross se consiguen mejores resultados que con el NOCT, tampoco obtienen buenos resultados en la temperatura calculada. Los valores MAE y MAPE con estos modelos todavía son muy altos, 2.4 °C y 7.5% con NOCT_1p y 1.9 °C y 6.5% con Ross. Los valores de R^2 con estos modelos son del 87.0%, 97.3% y 89.3% respectivamente para NOCT, NOCT_1p y Ross.

El resto de modelos presenta una agrupación de valores muy bien ajustados a la recta de pendiente unidad, y el valor de R^2 es superior al 98.4% en todos ellos (99.2% en

Eléctrico_Isc). Los valores MAE oscilan entre 0.5 °C y 0.8 °C y los MAPE entre 1.9% y 2.6%, siendo los del modelo NOCT_2p 0.8 °C y 2.5%.

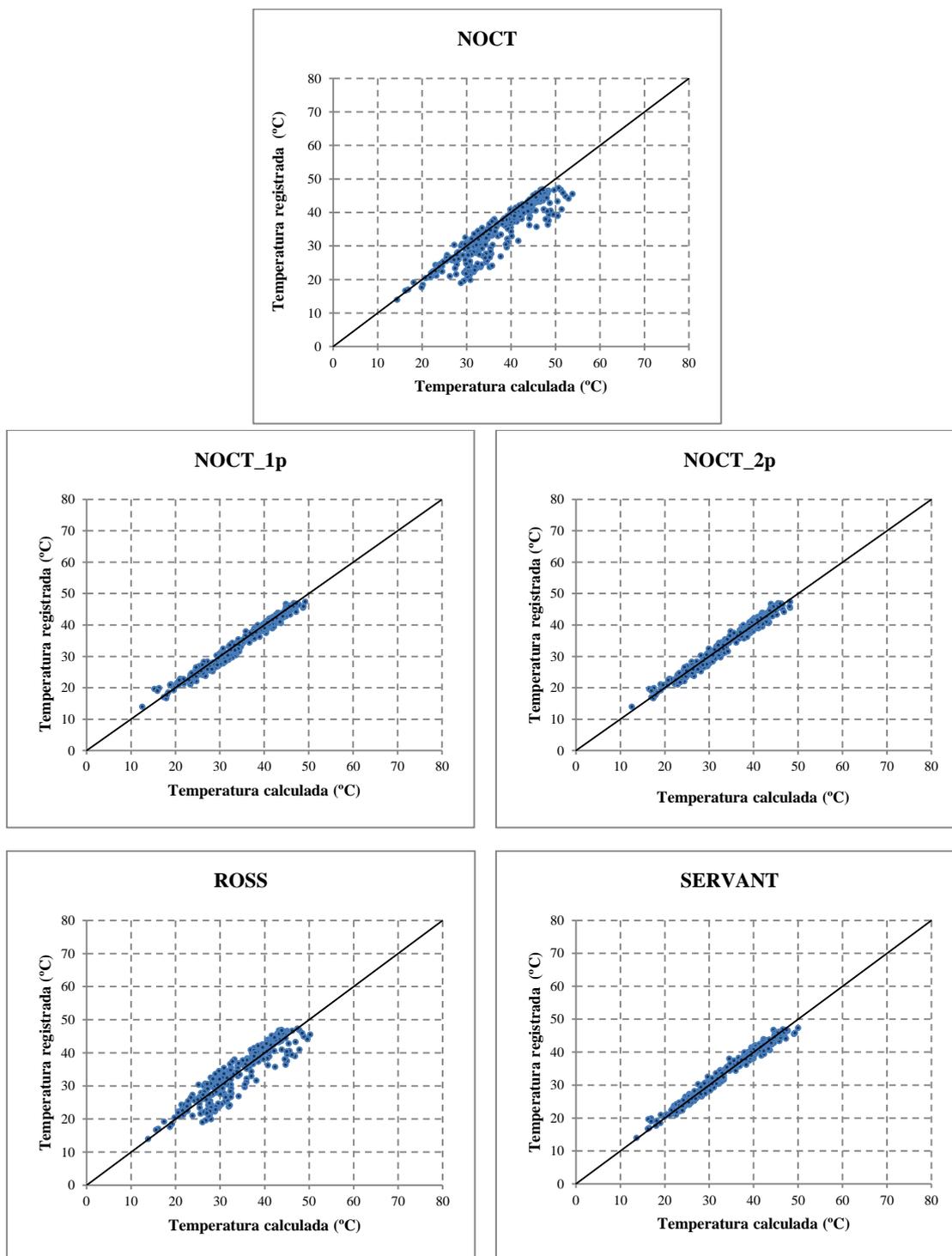


Figura V.30.a. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios diarios de 2011.

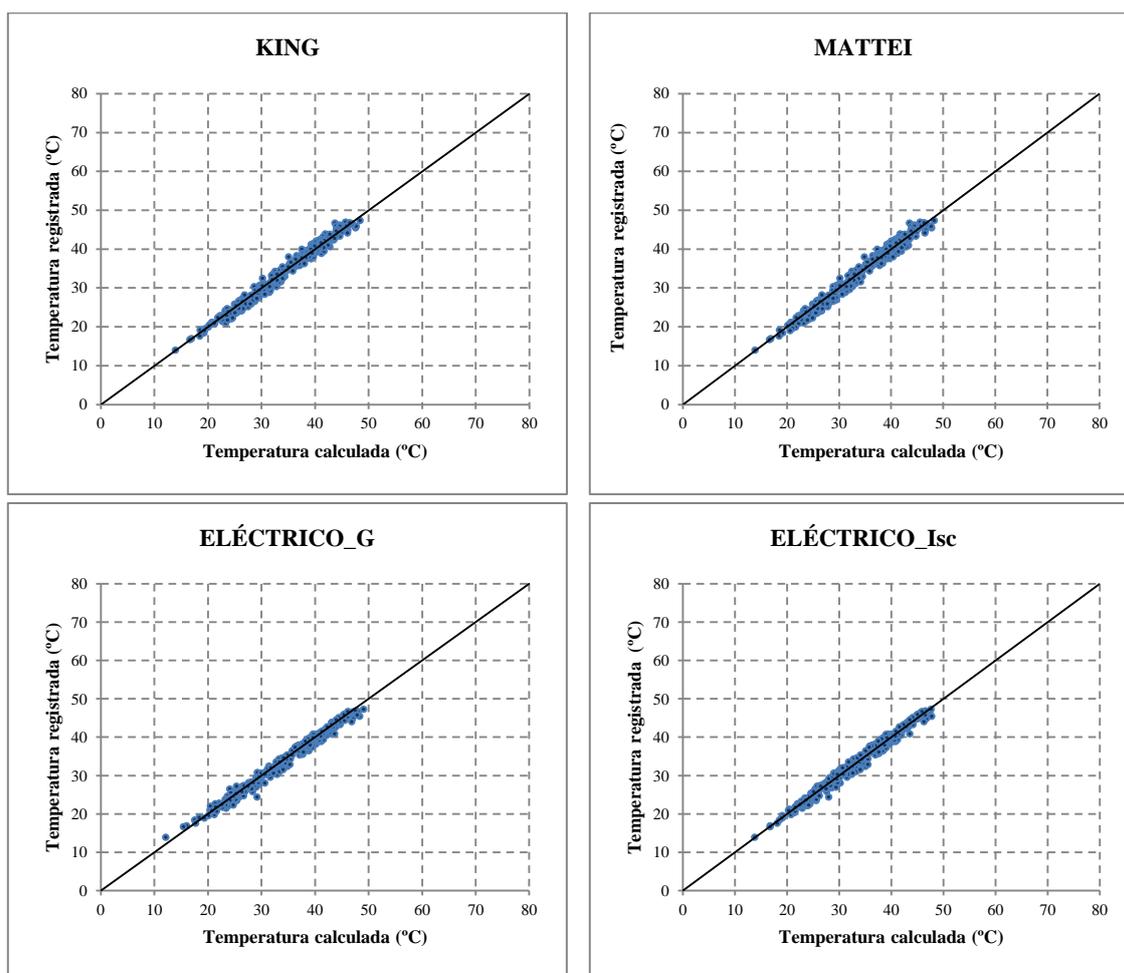


Figura V.30.b. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio amorfo/microcristalino usando valores medios diarios de 2011.

Las gráficas de las Figura V.30.a y Figura V.30.b muestran que los resultados obtenidos con los modelos NOCT y Ross son los que presentan mayor dispersión de datos. Los valores de la R^2 con estos dos modelos son los más bajos de todas las tecnologías, 84.7% y 85.8% respectivamente. Los valores MAE y MAPE siguen siendo muy altos también en esta tecnología, 3 °C y 2.3 °C y 9.9% y 7.4% respectivamente.

Los resultados con el resto de modelos presenta una agrupación de valores muy buena, estando los valores de R^2 comprendidos entre el 97.7% (NOCT_2p) y el 98.6% (Eléctrico_G), los valores MAE oscilando entre un rango muy estrecho de valores: 0.7 °C (los dos eléctricos) y 1 °C (los dos modelos NOCT propuestos) y los valores MAPE entre 2.1% (Eléctrico_G) y 3.4% (NOCT_1p).

Esta tecnología es la que presenta los peores resultados en todos los modelos.

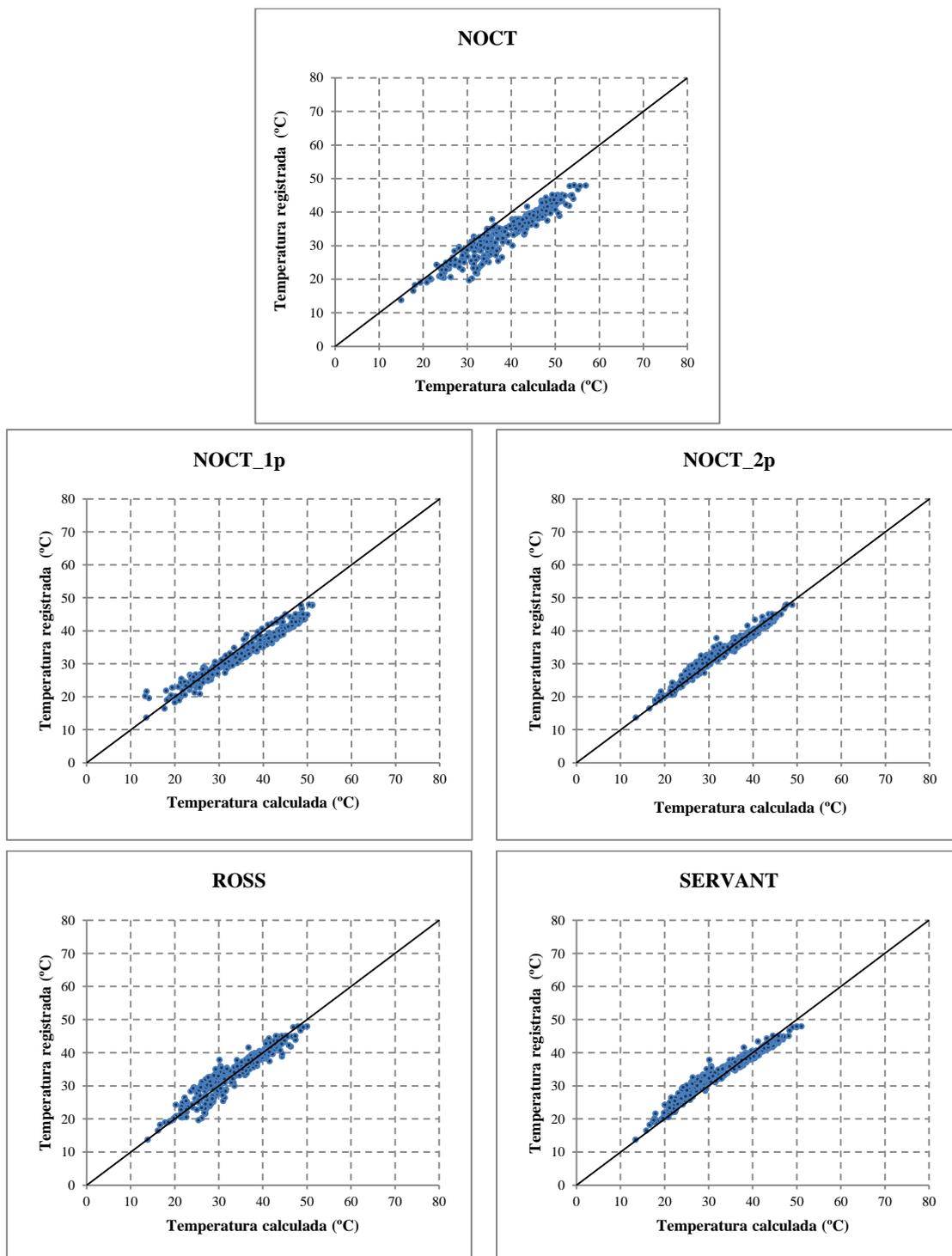


Figura V.31.a. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios diarios de 2011.

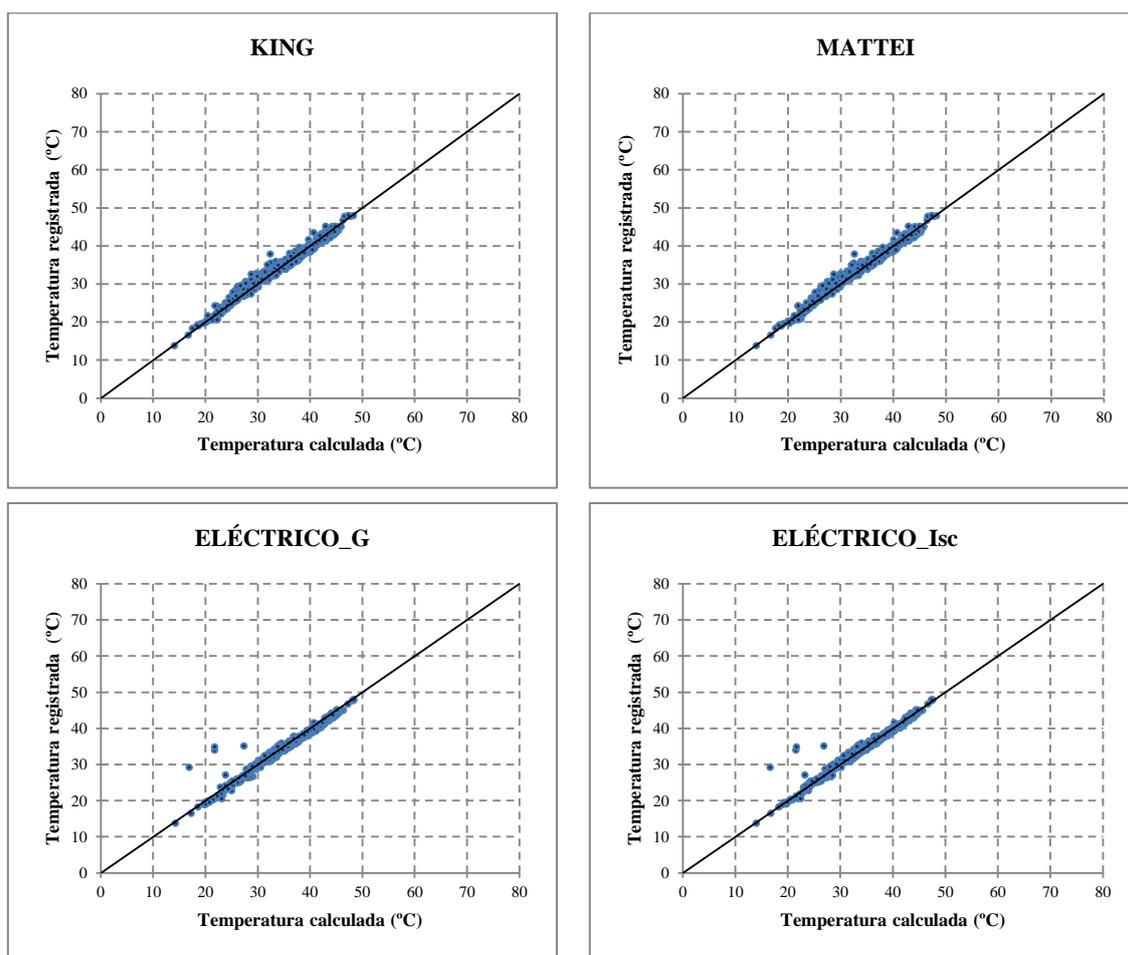


Figura V.31.b. Temperatura media diaria registrada frente a la temperatura media diaria calculada para cada uno de los modelos para el módulo de silicio multicristalino usando valores medios diarios de 2011.

En las gráficas de las Figura V.31.a y Figura V.31.b, se observa nuevamente lo inexactos e imprecisos que son los cálculos realizados con el modelo NOCT. Con este modelo se obtiene la mayor desviación de temperatura media, 5.09 °C, y el segundo valor más alto de la desviación estándar, 2.8 °C, siendo también muy altos los valores MAE y MAPE (5.1 °C y 15.2%, respectivamente).

Los resultados obtenidos al integrar los modelos NOCT_1p y de Ross tampoco presentan buenos resultados de la temperatura media diaria calculada, apreciándose una mayor dispersión de valores alrededor de la recta de pendiente unidad y, además, los valores MAE y MAPE aún son muy altos en estos modelos.

Puede apreciarse que con el modelo de Servant la agrupación de valores en torno a la recta de pendiente unidad no es tan buena como en otras tecnologías. En esta tecnología,

y con este modelo, la temperatura media diaria calculada presenta una desviación media de temperatura de $-0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, una desviación estándar de $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los valores MAE y MAPE son $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 5.6% respectivamente. Todos estos valores son mucho más altos de lo habitual en este modelo.

Con el resto de modelos, los valores de la desviación estándar oscilan entre $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, los de los valores MAE entre $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, los valores MAPE entre 2.2% y 3.2% y los de R^2 oscilan entre 96% y 98.8% , todos ellos en márgenes de valores muy ajustados como puede apreciarse, lo que dificulta poder decidir cuál es el mejor modelo para obtener la temperatura media diaria calculada.

También se ha aplicado el test de K-S con los datos del año 2011 a cada una de las series de la temperatura media diaria calculada con cada modelo comparadas con la serie de la temperatura media diaria registrada. Los resultados del test de K-S por modelos se presentan en la Tabla V.18 En dicha tabla se indica si la distribución de la temperatura media diaria calculada con cada modelo tiene la misma distribución de probabilidad que la correspondiente temperatura media diaria registrada, con un nivel de confianza del 95% .

Tabla V.18. Tabla de comparación de la distribución de la serie de la temperatura media diaria registrada y la de la temperatura media diaria calculada a partir de las horarias predichas por cada uno de los modelos, indicado 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	sí	sí	sí	sí	sí	sí
a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	NO	SÍ	SÍ	sí	sí	sí	sí	sí	sí
mc-Si	NO	NO	SÍ	sí	NO	sí	sí	sí	sí

En la Tabla V.18 puede observarse que la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT no presenta la misma distribución que la serie de la temperatura media diaria registrada en ninguna de las tecnologías. Sin embargo, la temperatura calculada con el modelo NOCT_2p sí tiene la misma distribución de probabilidad que la registrada; con el modelo NOCT_1p, solo se obtiene la misma distribución en una de las tecnologías, la de silicio amorfo microcristalino. Con el resto de modelos sí se obtiene la misma distribución, incluso con el modelo de Ross. En el caso de modelo de Servant,

para la tecnología de silicio multicristalino, las distribuciones presentan diferencias significativas con un intervalo de confianza del 95% (esto ya se había apuntado también en el análisis de gráficas y tablas de resultados obtenidos por los modelos tanto instantáneos como horarios, observando que el modelo de Servant no predecía bien la temperatura para el módulo de esta tecnología).

Por lo tanto, queda patente que los resultados con las temperaturas medias diarias calculadas mejoran ostensiblemente la predicción que se hace usando modelos instantáneos como se ha usado en toda la literatura existente, y también mejora los modelos horarios propuestos en este proyecto de investigación. En la aplicación del test de K-S a los modelos instantáneos se observó que todas las distribuciones de las series de las temperaturas predichas eran distintas a la distribución de la serie medida salvo la del modelo Eléctrico_Isc que, en las tecnologías de silicio amorfo y silicio amorfo y microcristalino, sí tenía la misma distribución. En los modelos horarios este hecho había mejorado considerablemente, como puede observarse en la Tabla V.16.

Las conclusiones generales tras el análisis de cada una de las tecnologías son las siguientes:

Con la temperatura media diaria calculada para los distintos modelos, la inercia térmica del módulo no es obstáculo para alcanzar una gran precisión con los modelos atmosféricos, ya que incluso en algunas tecnologías superan a los modelos eléctricos, como se ha podido constatar.

Puede apreciarse que la integración de las predicciones horarias de los modelos de Ross y NOCT proporcionan resultados que, a pesar de que han mejorado bastante en comparación con los modelos instantáneos, no consiguen la misma precisión que cuando se usan los restantes modelos.

La precisión que alcanza la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT_1p es muy alta, a pesar de la sencillez de este modelo, y además los resultados obtenidos superan a los obtenidos con los modelos sencillos NOCT y Ross.

Para todos los modelos, los mejores resultados diarios se obtienen con la tecnología de telururo de cadmio, y los peores con la de silicio multicristalino.

Con el modelo propuesto NOCT_2p, se obtienen resultados similares al resto los modelos, siendo comparables a los obtenidos con los mejores modelos meteorológicos o eléctricos, e incluso en algunas tecnologías, supera los mejores valores obtenidos con ellos.

5.4.2. Resultados obtenidos con los datos del año 2012

Para complementar este estudio y valorar la validez del análisis de los valores medios diarios, se ha realizado un estudio detallado de la temperatura media diaria de los 31 días del año 2012.

En las Figuras que van desde la V.32 hasta la V.40 se muestran, para los 31 días del año 2012, las gráficas de la temperatura media diaria registrada junto con la calculada a partir de los valores horarios predichos por cada uno de los modelos horarios para cada una de las tecnologías. Se presentan agrupadas por modelo, mostrándose para cada modelo las cuatro tecnologías.

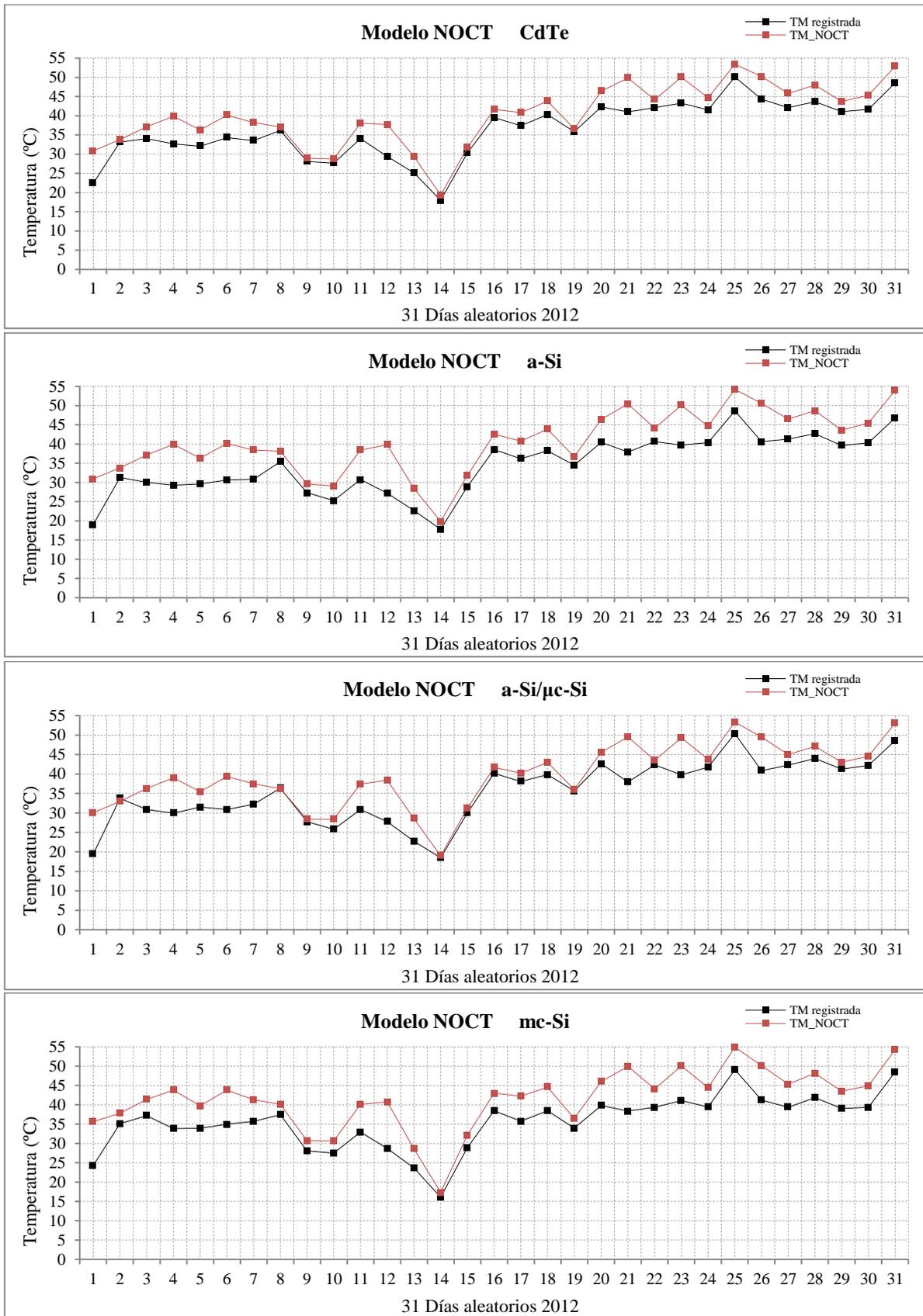


Figura V.32. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

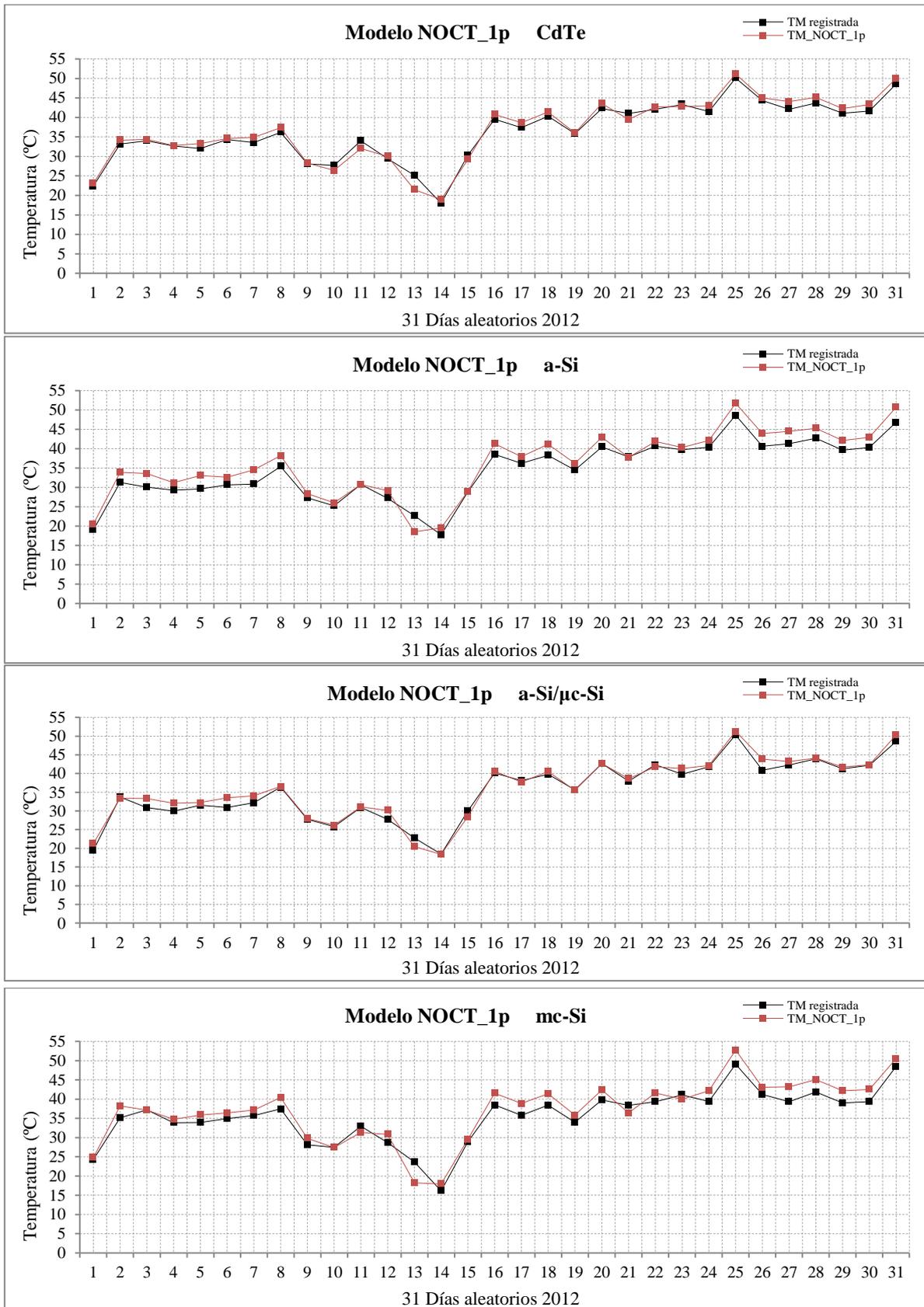


Figura V.33. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT_1p y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

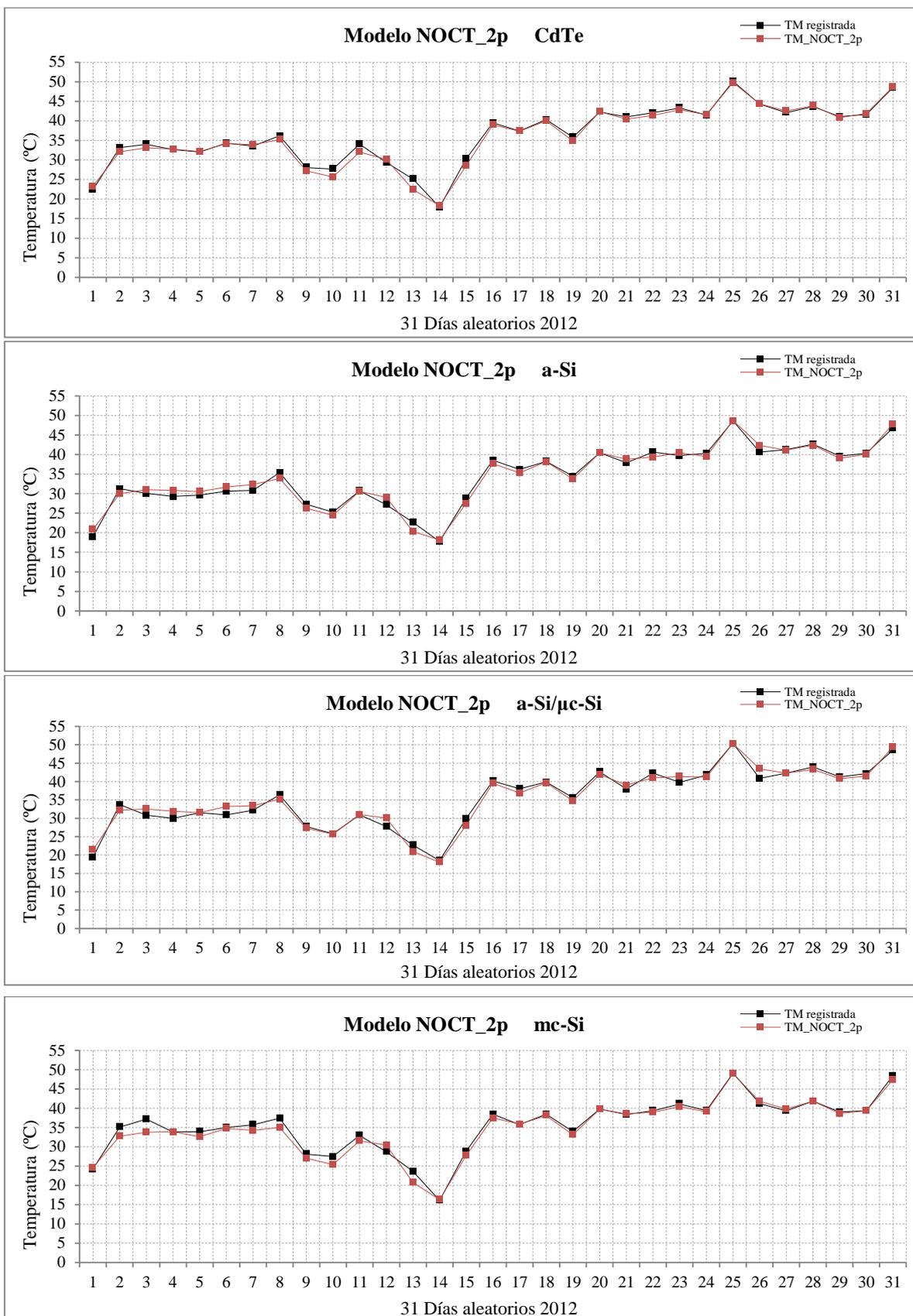


Figura V.34. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo NOCT_2p y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

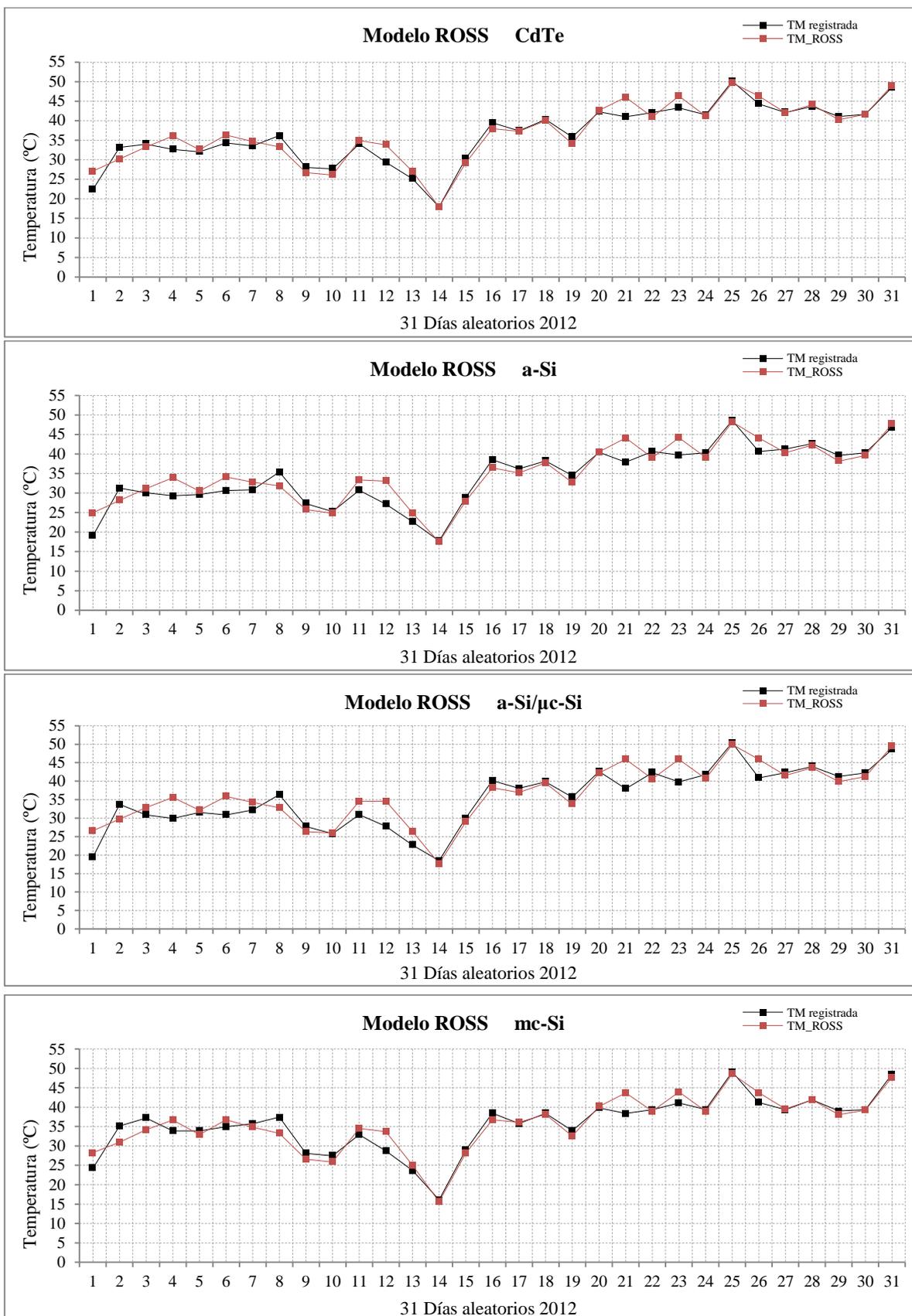


Figura V.35. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de Ross y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

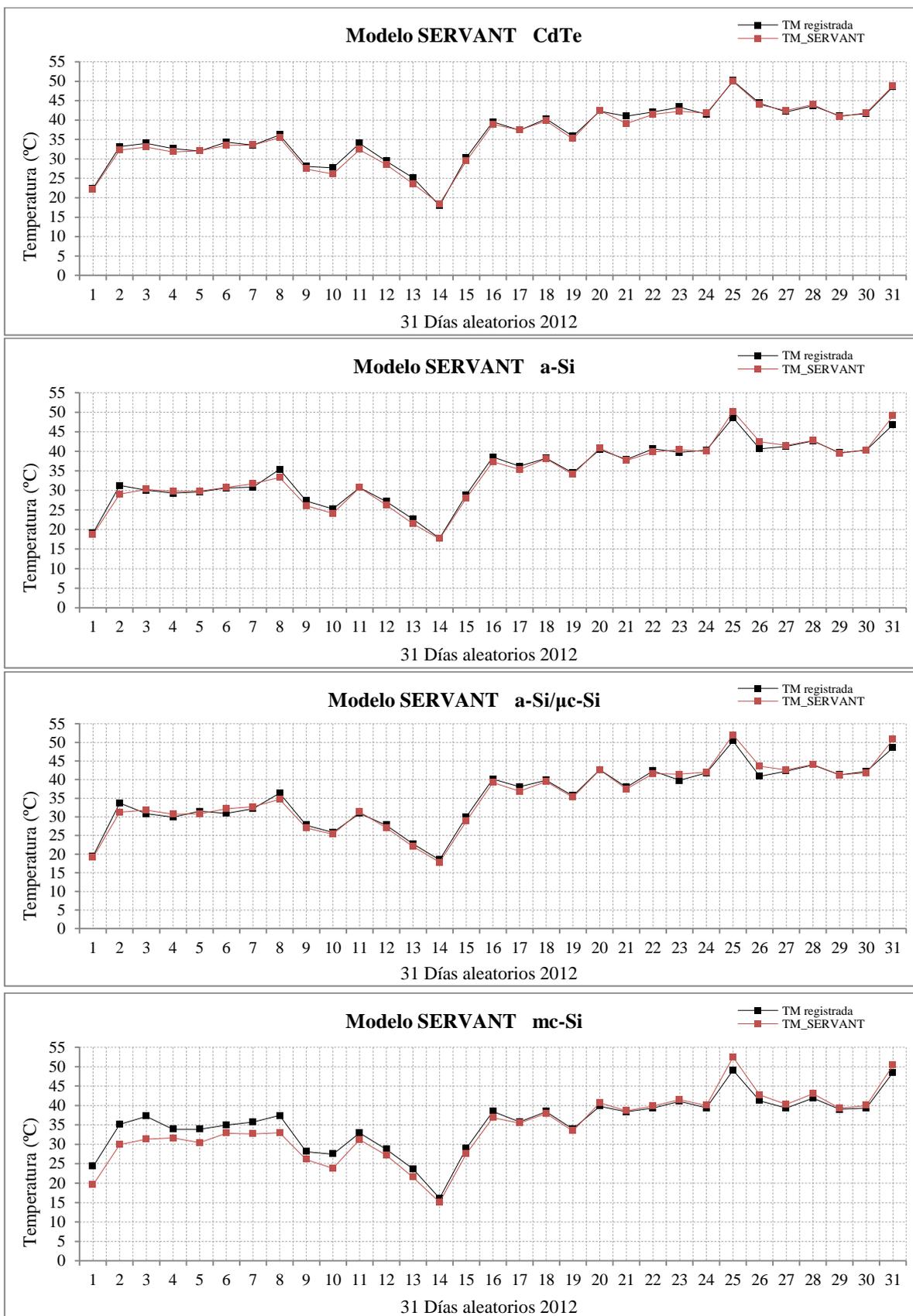


Figura V.36. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de Servant y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

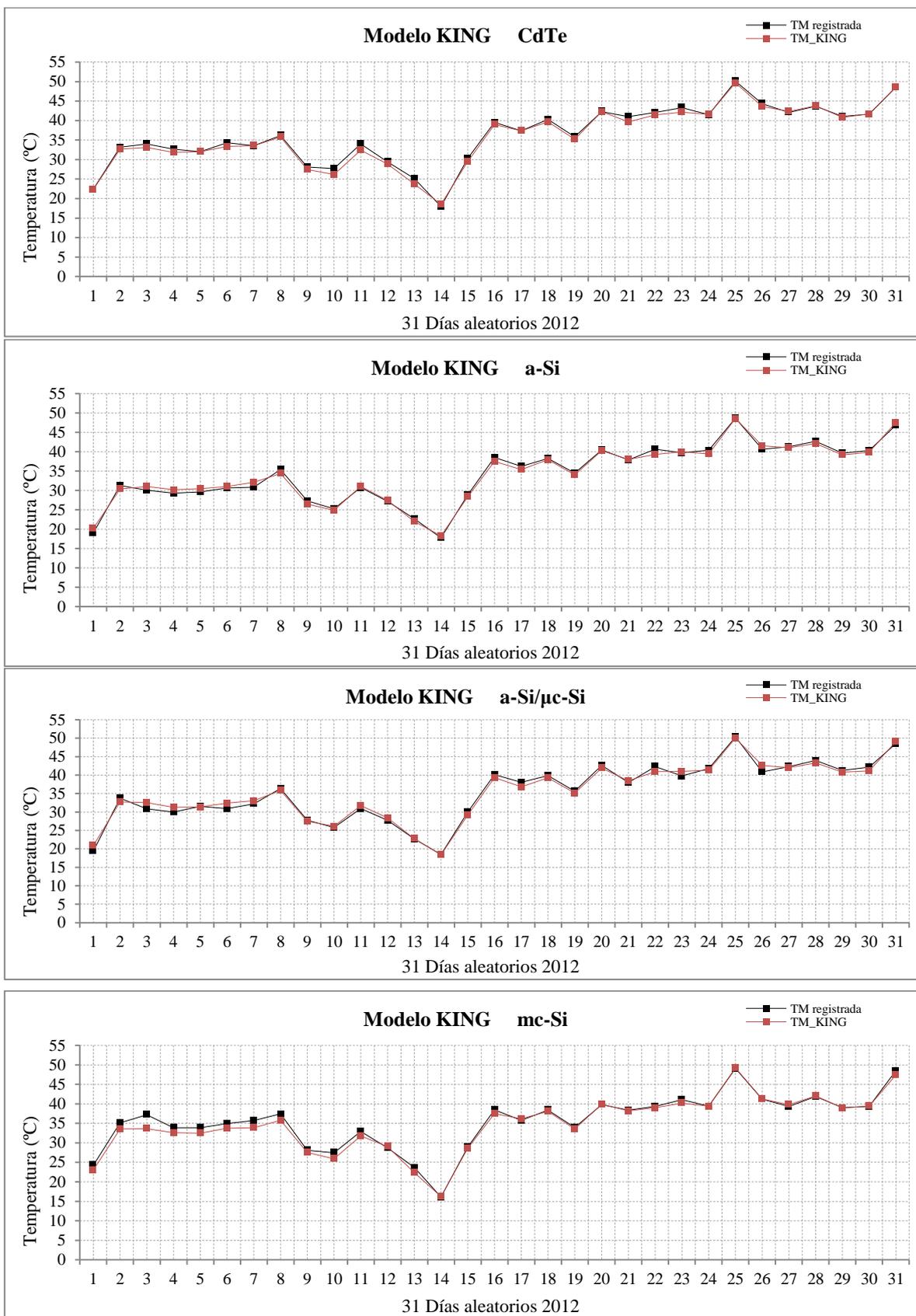


Figura V.37. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de King y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

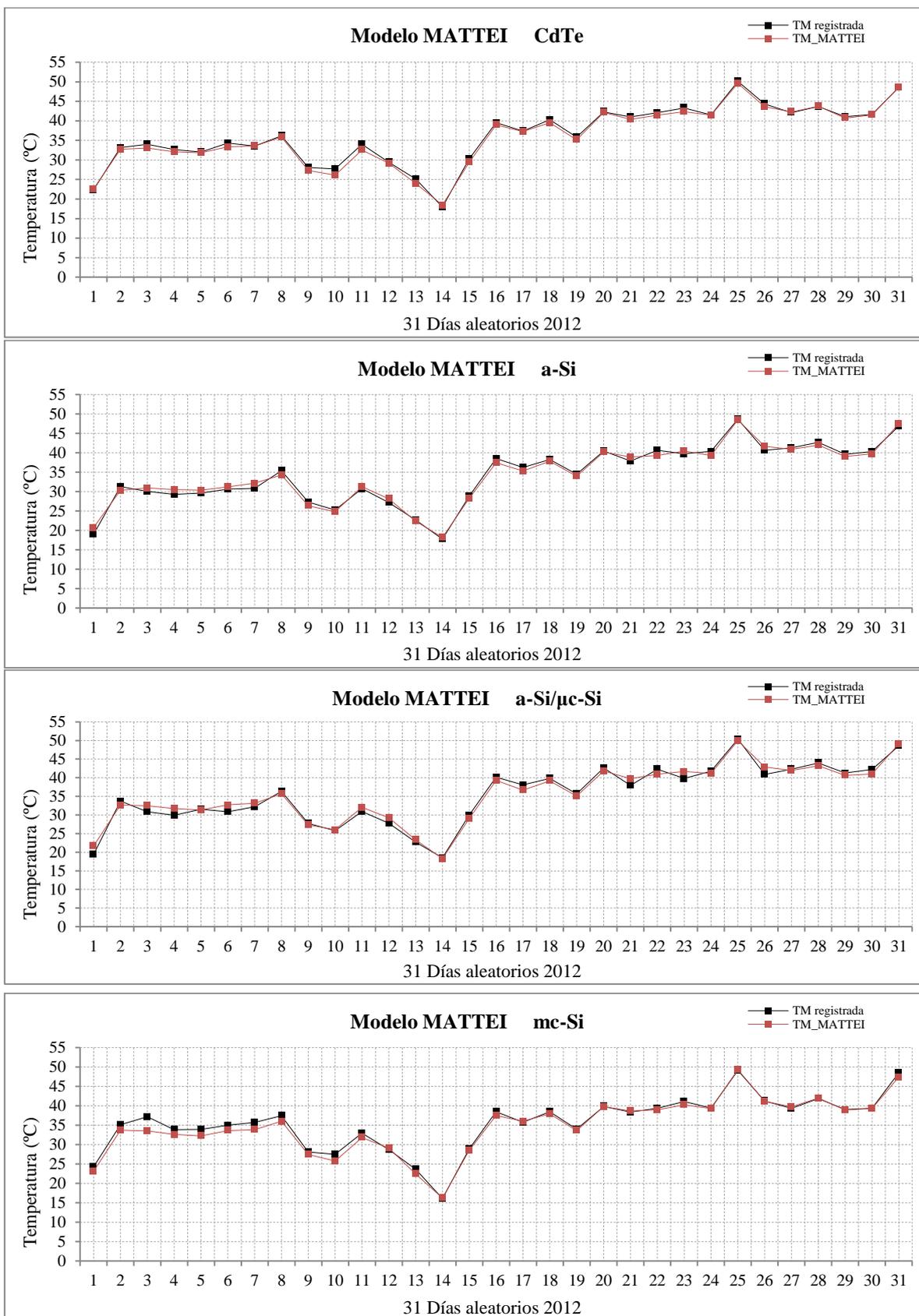


Figura V.38. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo de Mattei y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

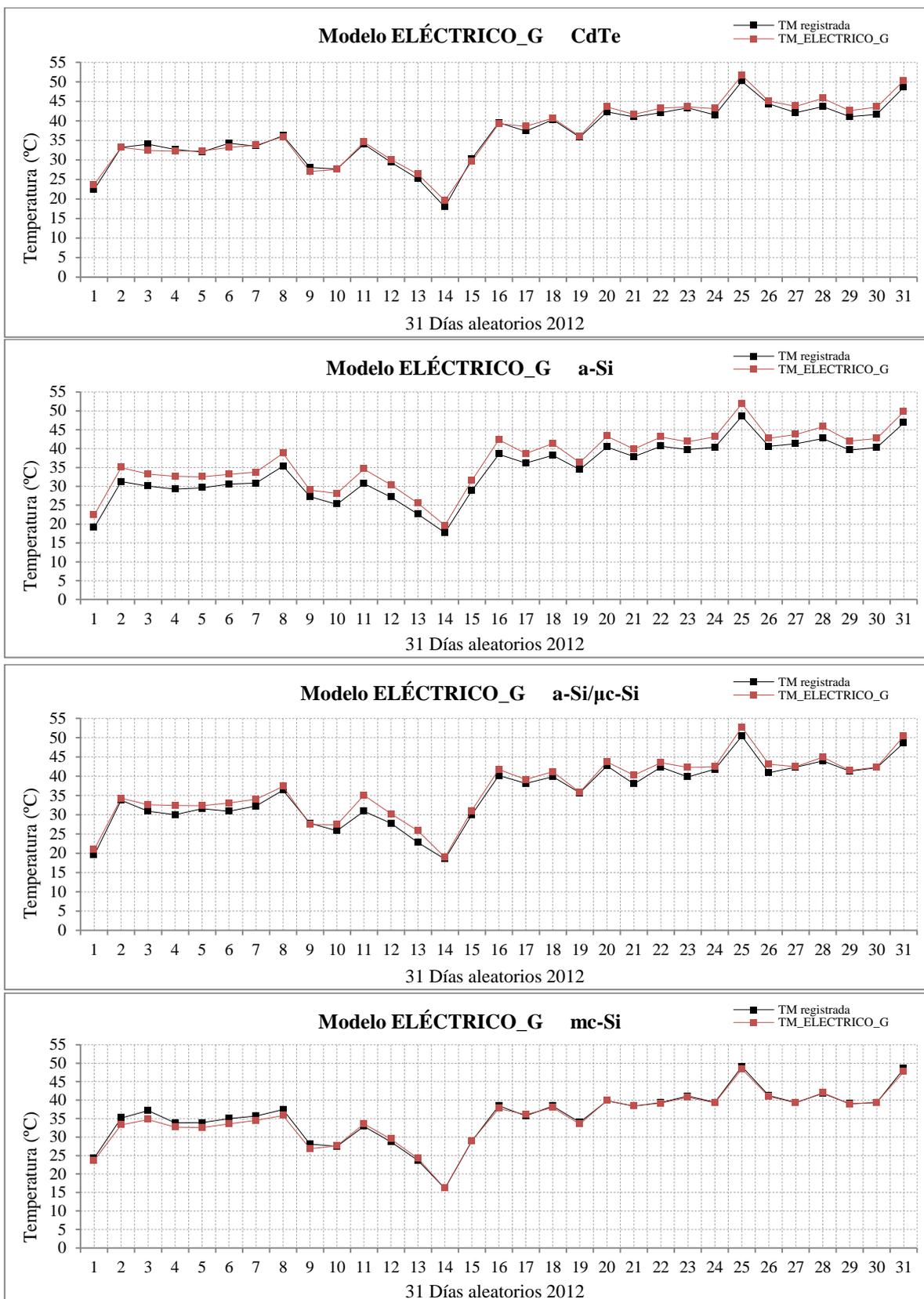


Figura V.39. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo Eléctrico_G y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

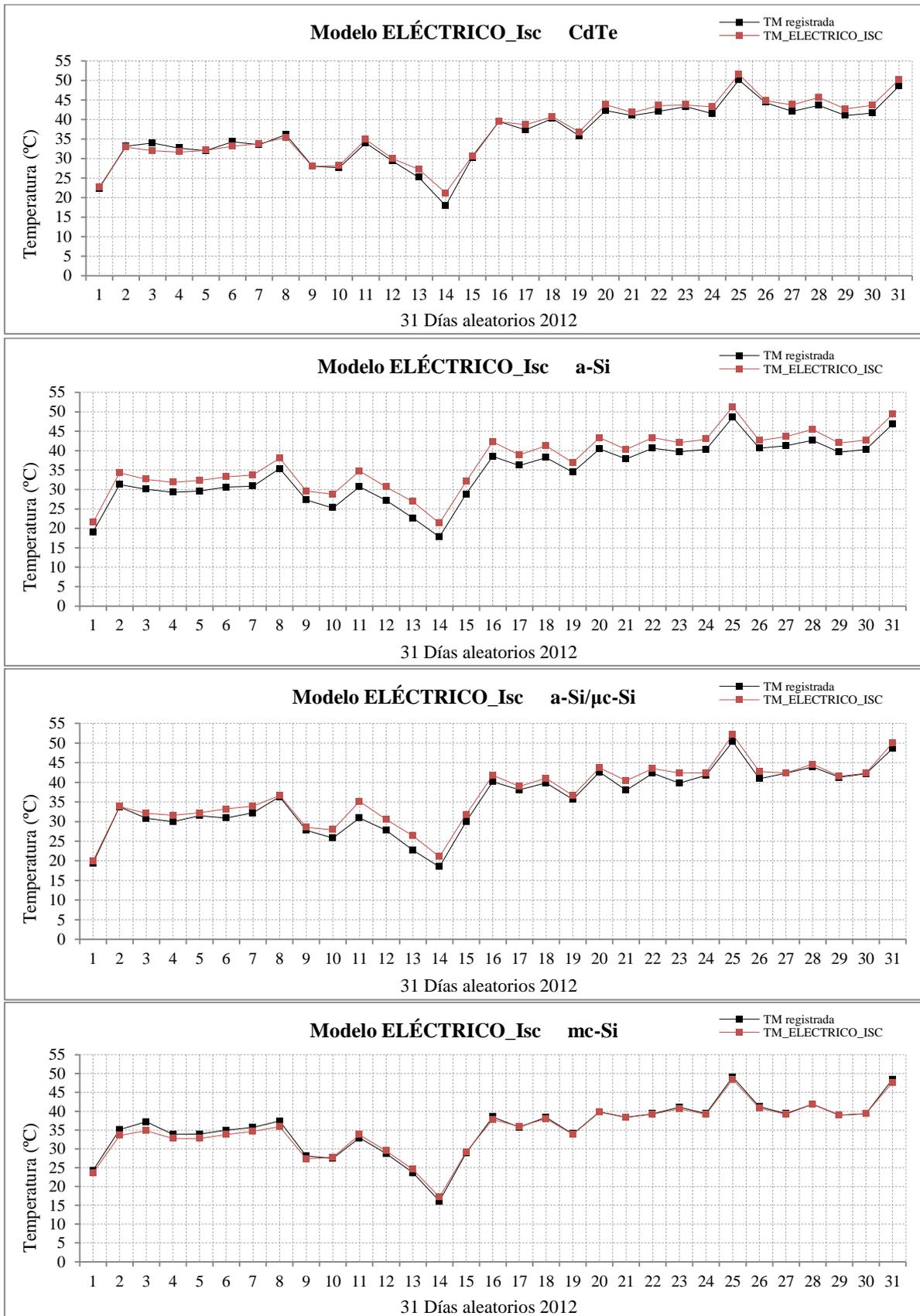


Figura V.40. Gráficas de la temperatura media diaria calculada con el modelo Eléctrico_IsC y la temperatura media diaria registrada para cada una de las tecnologías de módulos con los 31 días aleatorios del año 2012.

Nótese que la temperatura media diaria registrada en cada uno de los módulos es diferente, dependiendo de su tecnología. La tecnología de módulo con la mayor temperatura media diaria registrada es la de silicio multicristalino. Las menores temperaturas medias registradas son las de las tecnologías de silicio amorfo y silicio amorfo/microcristalino.

Usando el modelo NOCT puede observarse que, en todas las tecnologías, la temperatura media diaria calculada con las predicciones horarias de dicho modelo es mayor que la temperatura media diaria registrada y, además, que esa diferencia puede llegar a ser de hasta 10 °C. Este hecho ocurre puntualmente en las cuatro tecnologías, tal y como ocurría en los modelos NOCT instantáneo y horario.

Con el modelo NOCT_1p, puede observarse que esa diferencia se ha reducido considerablemente, y que la mayor exactitud se alcanza en la tecnología de telururo de cadmio. En el resto de tecnologías, la temperatura media diaria calculada con las predicciones horarias que realiza este modelo se distancia de la temperatura media diaria registrada en unos cuantos grados, siempre por exceso (salvo en contadas ocasiones). Puede verse en la gráficas que el día 13 es una de esas excepciones y la causa que ha podido influir en ello podría ser la velocidad del viento media registrada, pues ese día es el que presenta el valor medio más alto de los 31 días (5.4 m/s).

Analizando las gráficas a que da lugar el modelo NOCT_2p, se observa que la exactitud con este modelo es mayor que con el anterior para todas las tecnologías. Las mayores diferencias ocurren en el módulo de silicio multicristalino y son siempre menores que 3 °C.

En las gráficas correspondientes al modelo de Ross, podemos ver que con este modelo (que no tiene en cuenta la velocidad del viento) la temperatura media diaria calculada es unas veces superior a la temperatura media diaria registrada y otras inferior a la misma.

Con el modelo de Servant, las gráficas muestran una gran exactitud en la temperatura media diaria calculada, y ponen de manifiesto que este modelo no funciona bien con la tecnología de silicio multicristalino, como ocurría en el cálculo con valores medios horarios. Debe recordarse que con valores instantáneos ya se percibió que este modelo ya no era uno de los mejores y que sí lo era en otras tecnologías de módulos.

Cuando se calculan las temperaturas medias diarias usando las predicciones horarias de los modelos de King y Mattei se obtienen temperaturas muy próximas a las registradas en todas las tecnologías. Las mayores diferencias ocurren en el módulo de silicio multicristalino, en la zona de los días 2 al 11, en la que la temperatura calculada por ambos modelos es inferior a la temperatura media registrada, siendo esa diferencia de unos 1.5 °C, excepto para el día 3 que es de 3.5 °C.

Cuando se usa el modelo Eléctrico_G, la exactitud es muy buena para el módulo de silicio multicristalino (nótese que las líneas de temperatura están superpuestas a partir del día 10). También lo es en la tecnología de telururo de cadmio. Como no podía ser de otra manera, en la tecnología de silicio amorfo se observa que se produce el error sistemático de 3 °C que también fue detectado y comentado en el cálculo de la temperatura con valores horarios. Y en la tecnología de silicio amorfo y microcristalino también puede observarse una diferencia por exceso algo menor que 1 °C de media.

El uso del modelo Eléctrico_Isc horario para calcular la temperatura media diaria logra buenos resultados en la tecnología de telururo de cadmio y en la de silicio multicristalino, pero en las otras tecnologías esta temperatura es mayor que la temperatura media diaria registrada. Debe recordarse que el modelo horario, con los datos del año 2012 para el módulo de a-Si, presentaba el problema de la predicción con el error sistemático de 3 °C tanto en la predicción realizada con los datos instantáneos como con los horarios, y esto es perceptible de nuevo con datos diarios. Para el módulo tándem de silicio amorfo y microcristalino, también se aprecia que existe un error sistemático, de algo más de 1 °C, hecho que fue ya constatado también en el análisis con datos instantáneos y horarios.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de investigación

En el presente capítulo se resumen las conclusiones y los resultados más importantes de esta tesis doctoral.

También se exponen las líneas futuras de investigación que se pueden desarrollar en esta materia.

6.1. CONCLUSIONES

El **primer 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.

El **segundo objetivo** del presente trabajo era proponer nuevos modelos instantáneos para determinar la temperatura de operación de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologías. Con respecto a este objetivo, las conclusiones son las siguientes:

- 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.

El **tercer objetivo** de este trabajo era analizar la posibilidad de predecir valores horarios y diarios de temperatura de operación de módulos fotovoltaicos proponiendo nuevos modelos horarios basados en los modelos instantáneos descritos anteriormente.

Las conclusiones obtenidas para los modelos horarios son:

- 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.

- El modelo horario NOCT_2p predice la temperatura con valores muy próximos a la temperatura medida, valores bajos de la desviación estándar y de los MAE y MAPE. Los resultados de este modelo son comparables a los obtenidos por el resto de modelos, incluidos los modelos Eléctricos.
- Las predicciones realizadas con los modelos Eléctricos horarios no mejoran sustancialmente los resultados obtenidos con los modelos instantáneos correspondientes. Esto es debido al buen funcionamiento del modelo Eléctrico, donde los valores eléctricos medidos están poco influidos por la inercia térmica del módulo.
- El test de Kolmogorov-Smirnov, aplicado con un nivel de confianza del 95%, indica que las temperaturas horarias predichas por los modelos NOCT_2p y los modelos eléctricos, son las *únicas* que tienen la misma distribución de probabilidad que las correspondientes temperaturas horarias registradas en todas las tecnologías.

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.

6.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Para la realización de la presente tesis doctoral se han registrado y analizado una gran cantidad de datos recogidos en una campaña de medidas realizada en la ciudad de Málaga. A partir de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

- Comprobar si los modelos de predicción propuestos son válidos en otras zonas climáticas.
- Aplicar los modelos propuestos a módulos con diferentes situaciones de instalación a la intemperie.
- Aplicar los modelos de predicción de temperatura a una planta generadora, con el objeto de predecir la producción estimada.
- Estudiar la posibilidad de establecer otro tipo de modelos para predecir la temperatura media diaria de los módulos.
- Estudiar la posible degradación o la falta de estabilización de los módulos de silicio amorfo y silicio amorfo microcristalino y su influencia en los parámetros de los modelos presentados.

Capítulo 7

Bibliografía

En el presente capítulo se presenta toda la bibliografía consultada para desarrollar este trabajo de investigación.

Las referencias bibliográficas aparecen por orden alfabético.

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, Rummyantsev 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 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference 2012. pp. 3946-50. DOI: [10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.1.21](https://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

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|| μ 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 28th 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

Koehl M, 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, June 2012. <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., Iniyam 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>

Publicaciones

- Revistas indexadas (JCR):

Mora Segado, P., Carretero, J., and Sidrach-de-Cardona, M. (2015). Models to predict the operating temperature of different photovoltaic modules in outdoor conditions. *Progress in Photovoltaics: Res. Appl.*, 23: 1267–1282. Índice de impacto 7.443. doi: [10.1002/pip.2549](https://doi.org/10.1002/pip.2549). ISSN 1062-7995.

- Conferencias y congresos:

Sidrach-de-Cardona M., Carretero, J., Mora Segado, P., Cañete, C., Piliouquine Rocha, M., Mora-López Ll. (2015) Hourly Models to Estimate the Energy Produced by Photovoltaic Modules of Different Technologies. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany. Pages 2049 – 2052. DOI: [10.4229/EUPVSEC20152015-5AV.6.42](https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20152015-5AV.6.42). ISBN: 3-936338-39-6

