



**Departamento de Física Aplicada  
UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**Análisis y evaluación energética de sistemas  
constructivos ventilados a partir de datos  
experimentales medidos en condiciones reales de  
uso y utilizando métodos de análisis de series  
temporales.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
CURSO 2013/2014**

**AUTOR**

**IBÁN NAVEROS MESA**

**DIRECTORES**

**M<sup>a</sup> JOSÉ JIMÉNEZ TABOADA**

**DIEGO PABLO RUIZ PADILLO**



Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Ibán Naveros Mesa  
D.L.: GR 1828-2014  
ISBN: 978-84-9083-011-6



## AGRADECIMIENTOS

Deseo ser breve y no individualizar sobre quienes me han ayudado a llegar hasta este punto y han hecho posible finalizar este trabajo, ya que probablemente olvidaría a alguien importante y el orden en que nombrase a las personas no haría justicia.

Gracias a mi familia por sencillamente todo, gracias a Marta por estar siempre a mi lado, gracias a mis amigos por disfrutar del paso del tiempo juntos y gracias a mis compañeros por todo su apoyo. Para terminar, tomando una frase que leí y creo que es merecedora de ser repetida, gracias a todos mis educadores, desde los primeros hasta los últimos, por haberme ayudado a disfrutar aprendiendo en todas las áreas del conocimiento, y en la parte que me corresponde, principalmente de la física y las matemáticas. Espero mantener la misma ilusión que recuerdo desde que era niño para continuar aprendiendo durante toda mi vida.

Por último, quisiera agradecer formalmente a la Plataforma Solar de Almería y al Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, el apoyo tanto humano como material que me han ofrecido durante mi estancia en ambas instituciones. Así como agradecer al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) la concesión de una ayuda para Formación del Personal Investigador, gracias a la cual he podido llevar a cabo esta investigación para la realización de mi Tesis Doctoral. Y debo añadir a la Agencia Francesa de Investigación (ANR) por los últimos meses de contrato gracias a los cuales he podido finalizar el presente trabajo.



## ÍNDICE

<b>1.- Prólogo</b> .....	10
<b>2.- Introducción</b> .....	12
2.1.- Motivación .....	12
2.2.- Introducción al estado del arte .....	12
2.3.- Objetivos .....	14
2.4.- Desarrollo de la Tesis .....	16
<b>3.- Metodología</b> .....	18
3.1.- Transferencia de energía en forma de calor .....	18
3.1.1.- Conducción.....	18
3.1.2.- Convección.....	19
3.1.3.- Radiación.....	20
3.2.- Identificación de sistemas mediante modelos de caja gris: regresión lineal basada en valores medios. ....	21
3.2.1.- Regresión Multilineal .....	21
3.2.2.- Desarrollo de Taylor .....	22
3.3.- Identificación de sistemas mediante modelos de caja gris: ecuaciones diferenciales estocásticas. ....	23
3.3.1.- Ecuaciones diferenciales estocásticas y máxima verosimilitud. ....	23
3.3.2.- Filtro de Kalman .....	24
3.3.3.- Autocorrelación de los residuos .....	26
3.3.4.- Períodograma acumulado de los residuos.....	27
3.3.5.- Test de verosimilitud.....	28
<b>4.- Dispositivos experimentales</b> .....	31
4.1.- Introducción .....	31
4.2.- Muro simple .....	31
4.2.1.- Descripción.....	32
4.2.2.- Instrumentación.....	34
4.3.- Muro simple integrado en fachada ventilada.....	34
4.3.1.- Descripción.....	34
4.3.2.- Instrumentación.....	35
4.4.- Chimenea Solar .....	36
4.4.1.-Descripción.....	36

4.4.2.- Instrumentación.....	37
4.5.- Sistema de adquisición de datos.....	37
<b>5.- Análisis dinámico integrado. Regresión lineal basada en valores medios.....</b>	<b>40</b>
5.1.- Introducción.....	40
5.2.- Datos experimentales.....	41
5.3.- Método dinámico integrado. Regresión lineal basada en valores medios.....	45
5.3.1.- Justificación teórica.....	45
5.3.2.- Resultados y discusión.....	49
5.4.- Conclusiones.....	64
<b>6.- Caracterización térmica de un muro simple: Análisis dinámico.....</b>	<b>66</b>
6.1.- Introducción.....	66
6.2.- Datos experimentales.....	66
6.3.- Identificación de sistemas: Modelos de caja-gris.....	66
6.3.1.- Ecuación de balance energético a través de un muro.....	68
6.3.2.- Cálculo analítico de la temperatura superficial de un muro.....	69
6.3.3.- Modelos candidatos considerados basados en ecuaciones diferenciales estocásticas.....	70
6.3.4.- Identificación de los parámetros físicos.....	73
6.4.- Resultados y discusión.....	73
6.4.1.- Introducción.....	73
6.4.2.- Período de muestra y tiempo de muestreo.....	74
6.4.3.- Modelo de un estado no medido.....	75
6.4.4.- Modelo de dos estados no medidos.....	78
6.4.5.- Test de máxima verosimilitud.....	82
6.4.6.- Consistencia física de los parámetros.....	83
6.5.- Conclusiones.....	84
<b>7.- Caracterización térmica de una fachada ventilada: Análisis dinámico.....</b>	<b>88</b>
7.1.- Introducción.....	88
7.2.- Datos experimentales.....	88
7.3.- Identificación de sistemas: Modelos de caja-gris.....	89
7.3.1.- Modelos candidatos considerados basados en ecuaciones diferenciales estocásticas.....	91
7.3.2.- Identificación de los parámetros físicos.....	93
7.4.- Resultados y discusión.....	94

7.4.1.- Introducción .....	94
7.4.2.- Modelo de un estado no medido.....	95
7.3.3.- Modelo de dos estados no medidos.....	98
7.4.4.- Test de máxima verosimilitud .....	105
7.4.5.- Consistencia física de los parámetros.....	105
7.5.- Conclusiones .....	106
<b>8.- Caracterización térmica de una chimenea solar: Análisis dinámico .....</b>	<b>110</b>
8.1.- Introducción.....	110
8.2.- Datos Experimentales .....	111
8.3.- Estudio estacionario de correlación de variables .....	113
8.4.- Identificación de sistemas: Modelos de caja-gris .....	114
8.4.1.- Modelos candidatos considerados basados en ecuaciones diferenciales estocásticas .....	114
8.4.2.- Identificación de los parámetros físicos.....	117
8.5.- Resultados y discusión .....	117
8.5.1.- Introducción.....	117
8.5.2.- Modelo de un estado no medido.....	118
8.5.3.- Modelo de dos estados no medidos.....	124
8.5.4.- Test de máxima verosimilitud .....	126
8.5.5.- Consistencia física de los parámetros.....	128
8.6.- Conclusiones .....	129
<b>9.- Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación .....</b>	<b>131</b>
9.1.- Conclusiones .....	131
9.2.- Futuras Líneas de Investigación .....	132
<b>10.- Bibliografía .....</b>	<b>134</b>
<b>11.- Listas de Tablas y Figuras.....</b>	<b>142</b>
11.1.- Lista de Tablas.....	142
11.1.- Lista de Figuras.....	143





# I

## PRÓLOGO

"Convertid un árbol en leña y podrá arder para vosotros; pero ya no producirá flores ni frutos."

Rabindranath Tagore (1861-1941)

## 1.- Prólogo

Desde siempre, uno de los mayores retos de la humanidad ha sido, y sigue siéndolo, optimizar la utilización de los recursos naturales de su entorno para mejorar su calidad de vida y conseguir el mayor aprovechamiento posible de los mismos, minimizando los esfuerzos para conseguirlo.

A lo largo de la historia, diferentes civilizaciones han ido adaptándose e interactuando con su medio ambiente. Produciendo un impacto en él que no siempre ha sido, ni es, considerado, puesto que en la mayoría de las ocasiones las consecuencias no son apreciables si no se valoran en un período de tiempo suficientemente extenso.

Tras siglos de civilización, si ha ido haciéndose visible como el impacto del ser humano ha dejado su huella de forma apreciable allí donde se ha establecido de forma duradera y ha desarrollado sus actividades cotidianas.

La preocupación por las consecuencias negativas de la actuación del hombre sobre su entorno, salvo excepciones, es algo relativamente reciente. Puesto que, a veces por desconocimiento, y otras por despreocupación e infravaloración de la repercusión de sus acciones, todas las civilizaciones conforme fueron evolucionando y alejándose de su relación directa con la naturaleza, fueron relegando a un segundo plano la conservación de su medio ambiente en favor de lo que era considerado como una mejora en su calidad de vida.

No obstante, con el transcurso del tiempo y la experiencia acumulada, la humanidad debe ser consciente de la importancia que tiene el explotar el medio ambiente de una forma sostenible para evitar el agotamiento de los recursos naturales y la destrucción irreversible del medio ambiente en que habita, por causas relacionadas con su actividad cotidiana.

Por este motivo, la palabra desarrollo sostenible, tal y como la conocemos hoy, ha ido emergiendo desde las últimas décadas del siglo XX, buscando concienciar a toda la sociedad de la importancia de armonizar el desarrollo humano con la conservación del entorno en el que vive.

Dentro del amplio campo que abarca el desarrollo sostenible, el punto en el que puede englobarse el estudio de esta Tesis, es el referente al ahorro y la eficiencia energética en la edificación.

El ahorro y la eficiencia en la edificación deben abordarse puesto que una gran parte del consumo de energía que tiene la sociedad actual se debe a la climatización de edificios, sea cual sea su uso, para conseguir unas condiciones de confort que faciliten el buen desempeño de las actividades diarias de las personas que los ocupan.

Y es en este punto, donde además de las consideraciones cualitativas de mejora, debe hacerse hincapié en la elaboración de estudios cuantitativos que puedan establecer valores comparativos entre las diferentes soluciones arquitectónicas, y los diferentes medios técnicos de climatización y de control de las condiciones óptimas de confort. De modo que con el mínimo gasto energético posible, incidiendo sobre todo en la mayor reducción posible del uso de energías no renovables, puedan seguir llevándose a cabo todas las actividades necesarias para el desarrollo de la sociedad manteniendo nuestra calidad de vida, y mejorando la de quienes se encuentran más desfavorecidos, pero desde un referente de sostenibilidad.

# **II**

# **INTRODUCCIÓN**

## 2.- Introducción

El ahorro y la eficiencia energética en la edificación forman parte de una estrategia global de aprovechamiento de la energía, dentro de una sociedad que está apostando definitivamente por el desarrollo sostenible como camino a seguir para asegurar un futuro donde las condiciones de vida de la población estén siempre dentro de unos niveles de confort aceptables, y sin que esto tenga una incidencia negativa irreversible en el medio ambiente como causa de la actuación humana.

La utilización de fuentes de energías no renovables debe ir quedando relegada a un segundo plano en el tiempo, de una forma gradual, para evitar un colapso de la civilización actual debido a su agotamiento. Por ello dado que el gasto energético en la edificación es una parte importante de esta sociedad, todos los estudios y los esfuerzos orientados a reducirlo deben ser bien recibidos e incentivados.

Dentro de este estudio se pueden abarcar varios campos, desde el más amplio de todos como puede ser el que trate sobre el urbanismo en su conjunto, pasando por el que trate sobre los edificios de forma individual, hasta llegar a los diferentes componentes constructivos individuales que los conforman. Es sobre el estudio de algunos de estos componentes constructivos sobre lo que se desarrollará el presente trabajo de Tesis Doctoral.

En concreto se evaluará un muro simple en su etapa inicial como tal, y posteriormente como parte de una fachada ventilada. Para terminar estudiando una chimenea solar aislada. Todos estos componentes serán detallados y analizados desde un punto de vista energético estudiando su comportamiento térmico.

### 2.1- Motivación

Previamente a esta investigación la Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), ha llevado a cabo diversos estudios sobre la influencia del aprovechamiento de la energía solar, tanto de forma pasiva como activa, en el ahorro energético de diversos edificios. Así como ha realizado ensayos para caracterizar y modelar empíricamente distintos elementos constructivos que han conducido a la realización de varias Tesis Doctorales [Jiménez, Martí, Porcar, Soutullo, San Juan, Enríquez].

Los procedimientos de monitorización utilizados en este trabajo han sido desarrollados en proyectos de ámbito nacional e internacional. Con lo que este estudio continúa la labor investigadora que se viene llevando a cabo en la UiE3 del CIEMAT, y concretamente en el Laboratorio de Ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE), ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA).

### 2.2.- Introducción al estado del arte

Una vez enfocado el tema que se desarrollará en el presente trabajo, es interesante introducir la temática, para proporcionar una visión sobre trabajos y acciones que se han elaborado previamente y han servido de orientación para llevarlo a cabo.

En la presente sección, se pretende dar una visión general del enfoque y las acciones que han sido, y son llevadas, a cabo actualmente en la materia objeto de estudio. Para facilitar el acceso a la información relevante de una forma más precisa y concreta según temática, se han detallado más extensamente en la introducción de los Capítulos 5, 6, 7 y 8 aquellos trabajos que han sido considerados relevantes para la realización de la presente Tesis Doctoral.

Así mismo se justificará la necesidad de la realización de este trabajo para avanzar en el desarrollo y mejora de métodos adecuados para caracterizar energéticamente edificios y sus componentes constructivos.

El punto de partida viene dado por la importancia de optimizar la utilización de las fuentes de energía de que se dispone en la actualidad para favorecer el desarrollo sostenible de la sociedad, y puesto que el consumo energético empleado en el acondicionamiento térmico de edificios representa una proporción elevada del consumo energético global, es necesario plantear estrategias de ahorro energético para reducirlo y contribuir así a la disminución de la demanda energética de los edificios. Todo esto debe conseguirse, sin perjuicio de las condiciones de confort establecidas, para que los usuarios puedan desempeñar sus tareas tal y como vienen haciendo habitualmente, sin verse afectados negativamente. Asimismo, se deben potenciar los hábitos de buen comportamiento energético entre los usuarios para contribuir de manera más eficiente al ahorro energético.

La necesidad, pues, de mejorar la eficiencia energética en el sector de la edificación, ha motivado un impulso en todos los temas relacionados con la investigación en este campo a nivel mundial, europeo y español ([ARFRISOL], [DYNASTEE], [IEA01], [IEA02]) así como en la actualización y mejora de las normativas que en materia de ahorro y eficiencia energética se aplican a las nuevas construcciones y a aquellas existentes que deban ser reformadas. En este sentido debe tenerse en cuenta la actividad del Grupo de Trabajo 13 del Comité Técnico 89 del Comité Europeo de Normalización (TC89 WG13 del CEN) que está elaborando una norma Europea sobre Ensayos in-situ, de componentes, sistemas constructivos y edificios, como actualización y extensión de la ISO-9869.

El modo principal en que el consumo de energía puede verse significativamente reducido en un edificio concreto consiste en tener en cuenta los aspectos relativos al consumo energético que va a tener dicho edificio desde el comienzo de su diseño, es decir, debe conocerse bien la climatología del emplazamiento para tener así en cuenta qué materiales poseen unas propiedades térmicas más adecuadas para ser utilizados en su construcción, así como las estrategias pasivas más adecuadas a la climatología del lugar, el uso al que está destinado el edificio y los perfiles de ocupación previstos.

De esta forma, con el uso de los materiales de construcción adecuados y utilizando otras estrategias pasivas de ahorro energético (como puedan ser entre otras la correcta orientación del edificio y la inclusión de elementos constructivos que favorezcan el aprovechamiento de la energía solar), además de añadir al edificio sistemas solares activos para la producción de energía, se puede conseguir una considerable reducción de la demanda energética del edificio.

Uno de los puntos clave, como se ha mencionado, consiste en elegir los materiales de construcción adecuados en función de sus propiedades térmicas, de modo que queda de manifiesto lo necesario que es conocer estas propiedades con la mayor exactitud posible.

Junto a ello, es interesante poder conocer el comportamiento térmico de los materiales una vez que se construye con ellos un determinado elemento constructivo, para, a partir del conocimiento de los materiales, poder simular aproximadamente el comportamiento que tendrá un elemento dentro de un edificio antes de ser construido. Con esto se conseguiría poder hacer una estimación del consumo energético que se tendrá en un edificio que utilice unos materiales determinados en lugar de otros si se une esta información al resto de variables relevantes que afectan al consumo energético del edificio en sí.

A pesar de que las propiedades térmicas de los materiales de construcción son obtenidas bajo condiciones de laboratorio y son proporcionadas en todo caso por el fabricante, una vez que se construye un cerramiento determinado en un enclave particular, la estructura compleja de la construcción hace que no sea trivial obtener las propiedades del todo a partir de las propiedades de las partes componentes. Con lo que para conseguir obtener las propiedades térmicas de los cerramientos, a partir de las propiedades térmicas de los materiales que fueron empleados en su construcción con exactitud, sería necesario conocer además todos los detalles constructivos del cerramiento.

Sin embargo, en la práctica puede no ser factible conocer suficientemente estos detalles sobre la construcción del componente, y por tanto no se podrán estimar sus propiedades significativamente, o puede que incluso conociendo dicha información, no se pueda estar seguro del grado de exactitud con que se ha llevado a cabo la ejecución de la obra.

Además, muchas veces la complejidad del sistema constructivo puede inferirle un funcionamiento propio más allá de la relación entre las propiedades térmicas de los componentes individuales del cerramiento. Viéndose por esto dificultada la labor de hacer estimaciones teóricas mediante simulaciones que no tengan en cuenta datos experimentales. Como consecuencia de lo cual, deben buscarse soluciones que puedan proporcionar experimentalmente las propiedades térmicas de un cerramiento particular, considerando a éste como un todo. Y estos experimentos pueden ser realizados in-situ mediante el uso de células de ensayo y utilizando una monitorización lo más adecuada posible del elemento a estudiar [Guzmán10].

En este último aspecto, la caracterización energética de componentes a escala real y mediante ensayos en condiciones reales de intemperie, presenta muchas ventajas y permite la caracterización de una amplia variedad de los mismos, incluyendo algunos que por su complejidad resultaría difícil o incluso imposible caracterizar con exactitud mediante otros métodos. Sin embargo esta caracterización implica procedimientos de ensayo y cálculo complejos, y plantea una serie de problemas cuya solución no es trivial. Muchos de estos problemas están asociados principalmente al hecho de que las condiciones reales durante el ensayo llevan implícito un régimen dinámico, lo cual es ventajoso a la hora de hacer una estimación realista de los parámetros requeridos, pero complica significativamente el análisis para la obtención de los mismos, así como la estimación de incertidumbres [Jiménez13].

De este modo, la monitorización de un elemento constructivo en su ubicación final proporcionará información muy útil sobre el propio sistema y sobre una posible metodología a utilizar para su caracterización. Dicha información debe poder ser comparada de una forma exacta con la nueva información que resulte de hacer variaciones de mejora en el elemento constructivo, para así tener la capacidad de hacer una estimación, con la mayor exactitud posible, del ahorro energético que se podría alcanzar una vez integrado en el edificio.

### 2.3.- Objetivos

Como se ha mencionado previamente, el presente trabajo persigue avanzar en la línea de investigación que la Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ha ido desarrollando en los últimos años sobre la realización de ensayos de elementos constructivos en condiciones reales de uso y en el análisis experimental de dichos sistemas. Más concretamente, se busca evaluar dichos elementos tras su compleja monitorización, utilizando técnicas de Identificación de Sistemas [Jiménez08b].

La Identificación de Sistemas [Ljung] se encuentra bastante desarrollada en estos momentos, y abarca distintos campos de actuación como el control de procesos industriales, el procesado de señales o el análisis de series temporales que nos concierne en el presente estudio. En este caso se buscará obtener a partir de datos experimentales una serie de parámetros que caractericen los sistemas experimentales estudiados, lo que viene a representar la resolución del problema inverso.

En la resolución del problema inverso que nos ocupa, el proceso de identificación comienza con el diseño y ejecución de los experimentos [Guzmán10, Martí06], existiendo un trabajo preliminar que se verá ampliado con el presente texto [Naveros10, Naveros11]. De manera tal que se han registrado medidas de todas las variables que serán posteriormente analizadas, tanto de las que tendrán la categoría de variables de salida o respuesta del sistema, como de las que serán consideradas como variables de entrada al mismo y que serán las responsables de los cambios que experimente el propio sistema.

Una vez reunidos todos los datos y organizados adecuadamente, se debe realizar el ajuste de éstos a un determinado modelo, que deberá ser elegido entre diferentes modelos candidatos teniendo en cuenta la naturaleza del problema a la hora de considerar que variables físicas deben ser incluidas en el modelo, de hacer aproximaciones sobre la linealidad o no-linealidad del mismo, sobre si se trata de un proceso estocástico o determinista, o sobre el número de parámetros a calcular y su significación física. Con lo que será preciso considerar qué modelo físico puede describir nuestro sistema y conseguir estimar los valores de los parámetros contenidos en él que mejor describan la realidad observada. Todo esto supone un problema de selección y validación del modelo, que debe ser tenido en cuenta siempre.

Para llevar a cabo este proceso de identificación se considerarán técnicas de análisis estadístico [Box] y se aplicarán sobre los modelos obtenidos para poder proceder a la posterior validación de los mismos. Si se consigue validar el modelo, el proceso de identificación puede darse por terminado.

No obstante, como se verá, obtener un método de identificación que proporcione parámetros para el modelo físico tales que se pueda dar por cerrado el problema es complejo. Y siempre podrán buscarse mejoras que incluyan incluso un replanteamiento completo del problema en cuestión.

Esto es así porque los resultados que se obtienen al realizar la identificación de un sistema dependen del sistema físico en sí, del modelo físico que representará al sistema, de las condiciones en que se realiza el experimento y del método de identificación empleado.

En nuestro caso los sistemas a estudiar puede considerarse fijos durante el tiempo de duración del experimento, y las condiciones en que se realiza el experimento vienen dadas por la climatología del lugar y por las restricciones hechas por el experimentador.

Por tanto el esfuerzo se centrará en buscar un modelo físico que describa el problema que sea adecuado, y en aplicar distintos métodos [Jiménez05, Jiménez08a] de identificación para poder conocer cuál proporciona mejor información de una manera más sencilla sobre los parámetros que caracterizan los distintos elementos constructivos.

Con todo lo dicho, a pesar de la validez y la versatilidad de la identificación de sistemas, y su gran ayuda para tratar problemas muy complejos como el que nos atañe, no se debe olvidar que sin la interpretación física adecuada de los resultados, la información que proporciona puede ser irrelevante para entender los fenómenos observados y serviría únicamente para resolver un problema muy particularmente, sin que los resultados fuesen extrapolables.

La tarea consistirá pues en estudiar los procesos físicos que tienen lugar en los elementos constructivos. Y después a partir de los datos de los ensayos y los conocimientos teóricos sobre ellos, proponer distintos modelos y métodos de Identificación de Sistemas para determinar los más apropiados para obtener una mejor caracterización de cada elemento constructivo [Naveros11].

En cuanto a los modelos físicos a utilizar, se buscará que describan correctamente el intercambio energético entre los elementos constructivos y su entorno, para poder así caracterizar bien las propiedades térmicas de éstos. Deberá venir dado por una ecuación de balance energético que relacione todas las variables físicas que se considere que intervienen en el mismo de forma significativa [Rab188, Jiménez08, Jiménez09].

Respecto a los métodos de Identificación aplicados en el presente estudio, al estar llevándose a cabo la medida de series temporales de datos de larga duración (meses), se utilizan métodos de análisis basados en balances energéticos globales a partir de valores medios de la variables. Y también se utilizan métodos de análisis de series temporales dinámicos que persiguen obtener mejores resultados con series temporales de menor duración, en concreto, métodos que emplean



ecuaciones diferenciales estocásticas (basados en el filtro de Kalman [Kristensen03, Friling09, Juhl12]).

Concluyendo, el presente estudio analiza una serie de elementos constructivos con la finalidad de caracterizarlos energéticamente de la forma más adecuada posible, buscando técnicas y criterios de análisis que posteriormente puedan ayudar al estudio de otros componentes constructivos similares o diferentes, para después poder utilizar la información obtenida como referencia en la evaluación energética de edificios reales, campo este último en el que la UiE3 se encuentra experimentando actualmente en diferentes proyectos de investigación llevados a cabo por el CIEMAT.

#### **2.4.- Desarrollo de la Tesis**

En el Capítulo 3 se presentará una descripción detallada de la metodología matemática y de los conceptos más relevantes que serán considerados en el presente trabajo.

El Capítulo 4 describirá los dispositivos experimentales que serán estudiados para caracterizar, en condiciones de ensayo a escala real, sus propiedades térmicas.

En los Capítulos 5 y 6 se procederá a mostrar la estimación de las propiedades térmicas de un muro simple, y que será supuesto homogéneo, como uno de los elementos constructivos estudiados en la presente Tesis. En primer lugar, en el Capítulo 5 se empleará el método dinámico integrado basado en la regresión lineal de las medias utilizando diferentes modelos para este propósito. A continuación, en el Capítulo 6, se procederá a la aplicación de un método dinámico basado en el uso de ecuaciones diferenciales estocásticas y se concluirá con las observaciones de mejora que suponen los métodos dinámicos basados en planteamientos diferenciales.

En el capítulo 7, una vez estudiado el muro simple en su fase inicial, se procederá a caracterizar después de haber sido transformado en una fachada ventilada, mediante la colocación de una piel exterior cerámica que produce sobre el muro una protección frente a las condiciones meteorológicas exteriores. Para esta caracterización solo se aplicará el método de análisis dinámico diferencial. Se presentarán conclusiones acerca de los cambios en la caracterización energética del muro antes y después de ser una fachada ventilada, todo ello desde un punto de vista del balance energético que atraviesa el muro en forma de calor.

En el Capítulo 8 se procederá con el estudio de una chimenea solar desde el punto de vista del balance energético de su muro de inercia. Dado que el sistema constructivo difiere del muro simple y homogéneo, a pesar de tener similitudes, antes de analizar las ecuaciones de balance energético que lo describen, se ha estudiado de forma estadística a partir de los valores medios de sus variables físicas, aquellas que pudieran ser las candidatas más relevantes a tener en cuenta para obtener una caracterización térmica lo más correcta posible de una forma razonada.

Finalmente, el Capítulo 9 resumirá todas las conclusiones más relevantes de los estudios llevados a cabo en el presente trabajo y se presentarán las líneas de investigación futuras que quedan abiertas tras las investigaciones realizadas.

# **III**

# **METODOLOGÍA**

### 3.- Metodología

A continuación se presenta una descripción de la metodología empleada, tanto en lo que respecta a los fenómenos físicos que deben ser considerados como en lo que respecta a las herramientas matemáticas empleadas en el presente trabajo de investigación. Dado el enfoque eminentemente experimental buscando la resolución del problema inverso, y la complejidad que esto conlleva, la base física se presenta simplificada en la forma en que ha sido utilizada para centrar la atención del lector en la parte de identificación de los parámetros.

#### 3.1.- Transferencia de energía en forma de calor

A la hora de describir los fenómenos asociados con la transferencia de energía en forma de calor, se debe realizar primero una breve introducción sobre los conceptos de calor y temperatura que puede encontrarse en cualquier libro de física general o de termodinámica [Holman, Inzunza].

El calor se define como el proceso de transferencia de energía entre un sistema y el medio que le rodea debido a los choques entre sus átomos y moléculas, y el exterior al mismo siempre que no pueda expresarse macroscópicamente como un producto de fuerza por desplazamiento.

La temperatura, por su parte, se define como una magnitud física escalar que proporciona una medida de la energía cinética promedio de las partículas que conforman un cuerpo.

De este modo, el flujo de calor se define como la transferencia de energía que se lleva a cabo debido a las diferencias de temperatura entre dos sistemas, o entre dos partes diferentes de un mismo sistema.

Esta transferencia de calor puede realizarse mediante mecanismos físicos diferenciados [Incropera07, Duffie06], en el caso que nos ocupa no se tendrá en cuenta la advección, por lo que serán descritos de una forma breve y simplificada: conducción, convección y radiación (ver Figura 3.1).



Figura 3.1.- Fenómenos de transmisión de energía en forma de calor

##### 3.1.1.- Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor a escala atómica a través de la materia, por actividad molecular, debido al choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más

energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde el sistema o la parte del sistema con temperatura más alta, al medio con temperatura más baja. Esta conducción de calor sólo ocurre por tanto cuando hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor  $dx$ , con área de sección transversal  $A$  y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes  $T_1$  y  $T_2$ , con  $T_2 > T_1$  como se muestra en la Figura 3.2, se encuentra que el calor  $\Delta Q$  transferido en un tiempo  $\Delta t$  fluye del extremo caliente al frío. Si se llama  $Q$  ( $W/m^2K$ ) a la densidad de flujo de calor transferido por unidad de tiempo y superficie, se tiene, gracias a la ley de la conducción de calor de Fourier, la Ec. 3.1.

$$\frac{dQ}{Adt} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

donde  $k$  ( $W/mK$ ) es una magnitud llamada conductividad térmica del material, y representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura. El signo negativo indica que la conducción de calor se produce en el sentido decreciente de temperaturas.

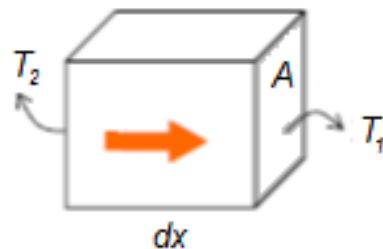


Figura 3.2.- Flujo de calor monodimensional a través de un elemento de volumen por conducción sin acumulación de calor

### 3.1.2.- Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor producido en un medio fluido por movimiento de masa o circulación del mismo. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por algún tipo de fuerza externa.

La ley de enfriamiento de Newton proporciona un modelo matemático para establecer una relación para el intercambio de calor por convección de una superficie  $A$ , con el fluido que de su entorno, ver Ec. 3.2.

$$\frac{dQ}{Adt} = h(T_a - T_s) \quad (3.2)$$

donde  $h$  es el coeficiente de convección de calor ( $W/(m^2K)$ ),  $A$  es la superficie en contacto con el fluido.  $T_a$  es la temperatura ambiente del mismo y  $T_s$  es la temperatura de la superficie.

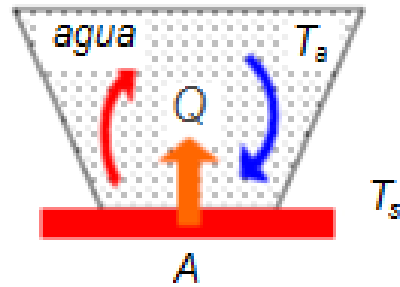


Figura 3.3.- Flujo de calor en una superficie por convección.

De modo que se tendrá una densidad de flujo de calor positiva cuando el fluido ceda calor a la superficie,  $T_a > T_s$ , y negativa cuando la superficie ceda calor al fluido,  $T_a < T_s$ .

### 3.1.3.- Radiación

La radiación térmica se define como la energía emitida por un cuerpo que se encuentra a una temperatura,  $T$ , dada. Se produce directamente desde el cuerpo hacia fuera en todas las direcciones. Está producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y es transportada por ondas electromagnéticas o fotones, de modo que es llamada también radiación electromagnética.

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro sin necesidad de un medio material, hecho éste, en el que se diferencia de la conducción y la convección.

La presencia de un medio material produce una variación en la velocidad, intensidad y dirección de flujo de la energía por radiación. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $\nu$ ) de las ondas electromagnéticas, están relacionadas mediante la expresión  $\lambda\nu = c$ , donde  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s es, aproximadamente, la velocidad de la luz en el vacío.

Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, como ejemplo la energía radiada por el Sol influye de diversas formas en la vida en la Tierra.

Si se considera la transferencia de energía en forma de radiación que tiene lugar en una superficie  $A$ , que se encuentra a una temperatura  $T$ . La radiación térmica que emite dicha superficie, se produce a partir de la energía térmica de la misma y puede expresarse la densidad de flujo de calor mediante la Ec. 3.3, en la que esta densidad de flujo de calor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Este hecho se conoce como ley de Stefan-Boltzmann.

$$\frac{dQ}{Adt} = \epsilon\sigma T^4 \quad (3.3)$$

donde  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>) se llama constante de Stefan-Boltzmann y  $\epsilon$  es una propiedad radiativa de la superficie llamada emitancia, sus valores varían entre cero y uno. Es una medida de la eficiencia con que la superficie emite energía radiante, y es dependiente de sus características materiales.

Un cuerpo además de emitir energía radiante según la expresión dada en la Ec. 3.3, absorbe parte de la radiación que le llega desde su entorno, de modo que existe un continuo balance energético en forma de radiación entre el cuerpo y el medio que le rodea.

La energía que un cuerpo absorbe proviene de las superficies de sus alrededores, las cuales también emiten energía radiante. Si un cuerpo se encuentra a temperatura  $T$  y el ambiente a una temperatura efectiva  $T_a$ , la densidad de flujo de calor total ganada o perdida por el cuerpo debido a la radiación puede ser expresada por la Ec. 3.4.

$$\frac{dQ_{\text{Total}}}{Adt} = \varepsilon\sigma(T_a^4 - T^4) \quad (3.4)$$

Cuando el cuerpo se encuentra en equilibrio con su alrededor, absorbe e irradia la misma cantidad de energía en forma de radiación, con lo que su temperatura permanece constante. Cuando el cuerpo tiene una temperatura superior que el ambiente irradia más energía de la que absorbe y se enfría, o viceversa.

Un cuerpo negro se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie, con lo que su absorptancia es igual a uno, así como su emitancia. Es decir, en teoría un cuerpo negro sería también un emisor perfecto de radiación, y emitiría a cualquier temperatura la máxima cantidad de energía posible. A una temperatura dada, emitiría una cantidad definida de energía en cada longitud de onda. Por contra, un cuerpo cuya emitancia sea igual a cero, no absorberá ninguna parte de la energía incidente sobre él, y sería un reflector perfecto. Y son denominados cuerpos grises aquellos que tienen una emitancia comprendida entre 0 y 1.

### 3.2.- Identificación de sistemas mediante modelos de caja gris: regresión lineal basada en valores medios.

A continuación se detallarán las principales partes de la metodología matemática, basada en la utilización de modelos de caja gris para la resolución del problema inverso [Naveros11], que será empleada en el Capítulo 5 del presente trabajo de investigación

#### 3.2.1.- Regresión Multilineal

El objetivo del análisis de la regresión lineal [Montgomery] es analizar un modelo que pretende explicar el comportamiento de una variable (Variable endógena, explicada o dependiente), que denotaremos por  $Y$ , utilizando la información proporcionada por los valores tomados por un conjunto de variables independientes, que denotaremos por  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Las variables del modelo de regresión deben ser cuantitativas. Pero dada la robustez, un estadístico se dice que es robusto cuando sigue siendo válido a pesar de que uno o más de sus supuestos no se cumplan, de la regresión es frecuente encontrar incluidas en el modelo como variables independientes a variables no cuantitativas, pero no será el caso del estudio realizado en el presente estudio.

El modelo lineal viene dado por la ecuación lineal, Ec. 3.5.

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_k X_k \quad (3.5)$$

Los parámetros a estimar,  $a_1, a_2, \dots, a_k$  denotan la magnitud del efecto de las variables independientes, esto es, representan los pesos de la regresión o de la combinación lineal de las variables independientes  $X_1, X_2, \dots, X_k$  sobre la variable dependiente  $Y$ . El coeficiente  $a_0$  se denomina término independiente del modelo. Si disponemos de  $T$  observaciones para cada variable, el modelo de expresa como se indica en la Ec. 3.6.

$$Y_t = b_0 + b_1 X_{1t} + b_2 X_{2t} + \dots + b_k X_{kt} \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (3.6)$$

El problema fundamental que se plantea es el de obtener estimaciones de los parámetros  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ , suponiendo que la relación entre la variable  $Y$  y el conjunto de variables  $X_1, X_2, \dots, X_k$  es como se ha descrito en el modelo, y que se dispone de un conjunto de  $T$  observaciones para cada una de las variables.

Estas estimaciones de los parámetros son llamados coeficientes de regresión. Representan las unidades de cambio en la variable dependiente por unidad de cambio en la variable independiente correspondiente. En el caso de que sólo haya una variable dependiente se llega a la ecuación de una recta donde  $a_0$  es la ordenada en el origen y  $a_1$  la pendiente de la recta. Pudiendo realizarse también la regresión suponiendo que  $a_0$  es cero como una condición inicial del modelo.

El coeficiente de correlación  $R$  elevado al cuadrado se le llama coeficiente de determinación y es una medida de la bondad del ajuste del modelo ya que da la proporción de variación de  $Y$  explicada por el modelo. Se suele emplear  $R^2$  ajustado, que es una corrección de  $R^2$  para ajustar mejor el modelo a la población objeto de estudio.

Se define el coeficiente de correlación múltiple  $R$  como la raíz cuadrada del coeficiente de determinación y mide la correlación entre la variable dependiente y las independientes.

El análisis de regresión tiene el objetivo en este estudio de confirmar si es posible aplicar los modelos análogos a los utilizados para estado estacionario para identificar los parámetros térmicos que caracterizan a un elemento constructivo dado.

Un modelo lineal se aplica considerando que se cumplen las siguientes suposiciones:

- Tamaño adecuado de la muestra
- Las variables  $X_1, X_2, \dots, X_k$  son deterministas (no son variables aleatorias) ya que sus valores vienen de la muestra tomada.
- Se supone que todas las variables  $X$  relevantes para la explicación de  $Y$  están incluidas en la definición del modelo lineal.
- Las variables  $X_1, X_2, \dots, X_k$  son linealmente independientes.
- Linealidad de las relaciones: la variable independiente presenta relación lineal con cada una de las dependientes.
- Los residuos siguen una distribución Normal  $N(0, \sigma^2)$ , no están correlacionados con ninguna de las variables independientes, ni están autocorrelacionados.

Las estimaciones de los parámetros se realizan por el método de los mínimos cuadrados que consiste en minimizar la suma de los cuadrados de los residuos.

### 3.2.2.- Desarrollo de Taylor

En matemáticas, la serie de Taylor [Kudirávtsev] para una función  $f$ , infinitamente derivable (real o compleja) definida en un intervalo abierto  $(a-r, a+r)$ , se define con la suma de la Ec. 3.7.

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n \quad (3.7)$$

Donde,  $n!$  es el factorial  $n$  y  $f^{(n)}(a)$  indica la  $n$ -ésima derivada de  $f$  en el punto  $a$ .

Si esta serie converge para todo  $x$  perteneciente al intervalo  $(a-r, a+r)$  y la suma es igual a  $f(x)$ , entonces la función  $f(x)$  se llama analítica. Para comprobar si la serie converge a  $f(x)$ , se suele utilizar una estimación del resto del teorema de Taylor. Una función es analítica si y solo si se puede representar con una serie de potencias; los coeficientes de esa serie son necesariamente los determinados en la fórmula de la serie de Taylor.

Esta representación tiene tres ventajas importantes:

- La derivación e integración de una de estas series se puede realizar término a término, que resultan operaciones triviales.
- Se puede utilizar para calcular valores aproximados de la función.
- Es posible demostrar que, si es viable la transformación de una función a una serie de Taylor, es la óptima aproximación posible.

Teorema.- Si  $f(z)$  es analítica en un círculo abierto  $|z - z_0| < r_0$ , admite en dicho dominio una representación en serie, Ec. 3.8:

$$f(z) = f(z_0) + \frac{f'(z_0)}{1!}(z - z_0) + \dots + \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!}(z - z_0)^n + \dots \quad (3.8)$$

que se podrá escribir, Ec. 3.9:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!}(z - z_0)^n \quad (3.9)$$

Con, Ec. 3.10:

$$f^{(0)}(z_0) = f(z_0) \quad (3.10)$$

Esta serie de potencias es el llamado desarrollo de  $f(z)$  en serie de Taylor en un entorno de  $z_0$ .

En el presente estudio se llevará a cabo tan solo una aproximación de primer orden,  $n=1$ .

### 3.3.- Identificación de sistemas mediante modelos de caja gris: ecuaciones diferenciales estocásticas.

A continuación se detallarán las principales partes de la metodología matemática, basada en la utilización de modelos de caja gris para la resolución del problema inverso [Naveros11], que será empleada en los Capítulos 6, 7 y 8 del presente trabajo de investigación.

#### 3.3.1.- Ecuaciones diferenciales estocásticas y máxima verosimilitud.

La presente sección tiene como objetivo mostrar una metodología dinámica que pueda mejorar los resultados obtenidos. A continuación se resume la metodología para un modelo de espacio de estados en tiempo continuo [Madsen95, Andersen00, Kristensen03, Juhl12, Rcore].

La representación del problema de transferencia de calor en el muro se supondrá que puede ser explicada por modelos RC, de modo que se podrán construir modelos basados en ecuaciones de balance energético cuyos límites de aplicabilidad vendrán impuestos por los supuestos que implica aceptar su utilización en problemas de transferencia de calor en sólidos bajo condiciones de ensayo in-situ, regidas por la meteorología del lugar. [Rab188].



Estos modelos podrán ser representados en el espacio de estados en tiempo continuo, de modo que se tendrá un conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas que presentarán la forma que puede verse detallada en las Ecs. 3.11 y 3.12.

Ecuación de estado del sistema:

$$dx_t = f(x_t, u_t, \theta, t)dt + \sigma(u_t, \theta, t)d\omega_t \quad (3.11)$$

Ecuación de observación:

$$y_k = h(x_k, u_k, \theta, t)dt + e_k \quad (3.12)$$

donde:

$x_t$  son variables de estado

$u_t$  son variables de entrada

$\theta$  son los parámetros característicos del modelo

$y_k$  son las variables de salida del modelo

$\omega_t$  es un proceso de Wiener que representa el error del proceso

$e_t$  es un ruido blanco que representa el error residual del modelo

Una vez que se tienen las ecuaciones que representan al modelo que se desea estudiar, se podrán estimar los parámetros basándose en la aplicación del principio de máxima verosimilitud, es decir, hallando el valor de los parámetros que maximiza la función densidad de probabilidad posterior, definida por la Ec. 3.13.

$$p(\theta | Y) \propto p(Y_N | \theta)p(\theta) \quad (3.13)$$

donde la Ec.3.14.

$$Y_N = [y_N \dots y_1, y_0] \quad (3.14)$$

es una secuencia estocásticamente independiente de N medidas consecutivas.

De modo tal que la estimación de los parámetros se hará de acuerdo al cumplimiento de la expresión mostrada en la Ec. 3.15.

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta \in \Theta} \{-\ln(p(\theta, Y))\} \quad (3.15)$$

La evaluación de la función de verosimilitud que es necesaria realizar para poder conocer la función densidad de probabilidad a posteriori se podrá obtener mediante la utilización de técnicas de filtrado de estados (i. e. Filtro de Kalman o Filtro de Kalman Extendido), para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas.

### 3.3.2.- Filtro de Kalman

El filtro de Kalman [Kalman60, Hokoi90, Fernández] es un algoritmo predictivo que produce una estimación de los valores de una serie temporal de valores no observados, usando los valores de otras series temporales de variables observadas y relacionadas con la primera. Esta estimación de valores no observados puede ir acompañada de la estimación de parámetros del modelo teórico que genera esos valores no observados. Las estimaciones de la variable no observada, así como las de los parámetros de su modelo teórico, son actualizadas a intervalos regulares de tiempo, coincidentes con la disponibilidad de nuevos valores de las variables observadas. El filtro de Kalman obtiene un nuevo valor para la variable no observada,

combinando el filtrado con una estimación, con máxima verosimilitud, de los parámetros del modelo.

La base matemática para la formulación del filtro de Kalman se encuentra en la notación utilizada en ingeniería de control denominada el espacio de los estados. El modelo que relaciona variables y tiempo parte de la suposición de una o más variables, o parámetros variables, con los cuales podemos describir completamente el estado en que se encuentra algún sistema en un momento determinado. Estas son las variables de estado, y el conjunto de las mismas se conoce como vector de estado. Una o varias de estas variables de estado suelen ser las variables no observadas, mientras que en su lugar observamos (podemos medir) otra u otras variables que son combinación lineal de las variables de estado más un error de predicción.

Los bloques matemáticos fundamentales para un filtro de Kalman son dos, la ecuación de observación o medida y la ecuación de estado o transición del proceso. La ecuación de medida relaciona las variables observadas con las variables de estado, además de incluir un término de error residual. La Ec. 3.16 representa esta ecuación de medida, en la que  $Z_t$  representa el vector de variables observadas en el instante  $t$  (se supone que son más de una las variables observadas, en otro caso sería un escalar, el de la salida observada);  $C_t$  es una matriz numérica conocida en el instante  $t$ ;  $X_t$  corresponde al vector de variables de estado en el instante  $t$ ; y  $v_t$  representa un vector de error de medición residual (se le denomina ruido de la ecuación medida) también para el instante  $t$ . La condición temporal que cumplen los términos del error de medición es que tienen valor medio nulo y varianza conocida; en concreto se supone que siguen una distribución normal de media cero y varianza  $R$ . A la ecuación de observación se le pueden añadir variables exógenas.

$$Z_t = C_t X_t + v_t \quad (3.16)$$

La ecuación de estado es la que nos proporciona la evolución en el tiempo del vector de estado. Esta ecuación está representada en la Ec. 3.17, donde la matriz  $A$  relaciona el estado (vector estado) en el instante actual con su valor futuro;  $U$  es el vector de entradas externas;  $B$  es la matriz que relaciona las variables de estado en el instante siguiente con las entradas externas;  $G$  la matriz que relaciona el vector de estado en el instante siguiente con el ruido actual; y  $\omega_{t-1}$  representa un ruido blanco (se le denomina ruido del proceso del sistema) con distribución de probabilidad normal de valor medio cero y varianza  $Q$ .

$$X_t = A_{t-1} X_{t-1} + B_{t-1} U_{t-1} + G_{t-1} \omega_{t-1} \quad (3.17)$$

En muchos casos prácticos, las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $G$ ,  $Q$  y  $R$  se consideran constantes. En el caso general, que es el que se considera en esta sección, los elementos de las matrices  $A$ ,  $B$  y  $G$  se considerarán variables con el tiempo.

El filtro de Kalman estima el valor del vector de estado en cualquier instante  $t$  con el mínimo valor de la matriz de covarianza del error,  $P$ . El funcionamiento del filtro es análogo al de un sistema de control con realimentación: el filtro de Kalman estima primero el estado del proceso y después obtiene una realimentación en la forma de observaciones (afectadas por ruido blanco). Así, a partir de la ecuación de transición 3.17 es posible proyectar en el tiempo el estado actual y la estimación de la covarianza del error, y obtener una estimación del estado (vector estado) a priori para el siguiente instante de tiempo. Con las observaciones (medidas) se produce la realimentación y las estimaciones a priori se pueden mejorar para obtener las estimaciones a posteriori.

La Figura 3.4 muestra el proceso iterativo de cálculo que representa el filtro de Kalman, cuyo objetivo final es la mejor estimación posible para el valor del vector de estado en el instante  $t$ ,  $X_{|t}$ . en la parte izquierda de la Figura 3.4 se encuentra la ecuación de transición, con la

estimación a priori del estado para el instante siguiente. El significado de  $X_{t|t-1}$  es el de la estimación del vector de estado para el instante t, pero calculada en el instante t-1; representa, por tanto, una estimación a priori. Además de la estimación del estado, se realiza la estimación, también a priori, de la matriz de covarianza del error  $P_{t|t-1}$ . El significado de  $A_{t-1}^T$  es el de la matriz transpuesta de la matriz A en el instante t-1.

$$\begin{array}{ll}
 P_{t-1|t-1}, \hat{X}_{t-1|t-1} & 3) \text{ Cálculo de la ganancia} \\
 1) \text{ Proyección del estado} & K_t = P_{t|t-1} C^T [C P_{t|t-1} C^T + R]^{-1} \\
 \hat{X}_{t|t-1} = A_{t-1} \hat{X}_{t-1|t-1} + B_{t-1} U_{t-1} & 4) \text{ Actualización de la estimación con la medida} \\
 2) \text{ Proyección de la covarianza del error:} & \hat{X}_{t|t} = \hat{X}_{t|t-1} + K_t [Z_t + C \hat{X}_{t|t-1}] \\
 P_{t|t-1} = A_{t-1} P_{t-1|t-1} A_{t-1}^T + G_{t-1} Q G_{t-1}^T & 5) \text{ Actualización de la covarianza del error} \\
 & P_{t|t} = P_{t|t-1} + K_t C P_{t|t-1}
 \end{array}$$

Figura 3.4.- Esquema iterativo de operación del filtro de Kalman

El recuadro de la derecha de la Figura 3.4 representa la realimentación, incluyendo la ecuación de medida y el cálculo del factor de actualización (ganancia de Kalman) de los valores calculados anteriormente a priori. Así, el vector  $K_t$ , representa la ganancia de Kalman (el valor de la ganancia puede ser distinto para cada una de las variables de estado; de ahí que sea un vector con igual número de filas que el vector de estado). La ganancia de Kalman multiplica al error de la ecuación de medida en la ecuación central de este recuadro derecho (el vector entre corchetes representa la diferencia entre las variables observadas y su valor teórico, de acuerdo a la estimación a priori del vector de estado). En la última ecuación, se calcula el valor a posteriori de la matriz de covarianza del error,  $P_{t|t}$ .

Para poder usar iterativamente el filtro de Kalman y que éste vaya ajustando a cada nuevo instante de tiempo el vector de estado, hacen falta unos valores iniciales de estimación del vector de estado y de la matriz de covarianza del error (representados en la esquina inferior izquierda de la Figura 3.4).

En el filtro de Kalman las matrices P, Q y R juegan un importante papel, ya que aparecen en tres de las cinco ecuaciones que permiten implementar el filtro. Para la matriz P se suele tomar un valor inicial elevado, con valores exclusivamente en la diagonal principal. La matriz está relacionada con el ruido de la ecuación de medida, cuyos únicos valores no nulos son los de la diagonal principal y representan la varianza del ruido asociado a la ecuación de medida. Más complicada de calcular resulta la matriz Q, relacionada con el ruido del sistema. El valor de los elementos de esta matriz se puede calcular a partir de datos históricos del sistema.

La principal ventaja que aporta el filtro de Kalman es la de proporcionar una estimación a priori del estado del sistema. Con lo que el filtro de Kalman puede proporcionar una valiosa información si hacemos que el estado del sistema tenga cierta relación con el error de predicción.

### 3.3.3.- Autocorrelación de los residuos

En el presente estudio se utilizará el concepto estadístico de autocorrelación en el análisis de residuos [Box], de modo que se define la autocorrelación de una serie temporal de un proceso  $X_t$  como la correlación de dicho proceso con una versión desplazada en el tiempo de la propia serie temporal.

Si  $X_t$  representa un proceso estacionario de segundo orden con un valor principal de  $\mu$  se definir la Ec. 3.18.

$$R(k) = \frac{E[(X_i - \mu)(X_{i-k} - \mu)]}{\sigma^2} \quad (3.18)$$

donde E es el valor esperado y k el desplazamiento temporal considerado (normalmente denominado desfase). Esta función varía dentro del rango  $[-1, 1]$ , donde 1 indica una correlación perfecta (la señal se superpone perfectamente tras un desplazamiento temporal de k) y  $-1$  indica una anticorrelación perfecta.

El concepto de autocorrelación será empleado para estudiar los residuos en el caso de algunos de los diferentes modelos empleados para la obtención de los parámetros térmicos de los elementos constructivos estudiados.

### 3.3.4.- Períodograma acumulado de los residuos

Una idea usual en matemáticas y estadística es dividir un objeto complejo en otros objetos más sencillos para poder estudiarlo más fácilmente [JNewton, Madsen].

La descomposición espectral de series temporales es un ejemplo de esta técnica, y da paso a la definición del períodograma acumulado de una serie temporal.

Dada una serie temporal con n términos, consideraremos n par, es posible encontrar una suma de senos y cosenos, tales que sus periodos sean  $n, n/2, \dots, n/(n/2)=2$  que represente dicha serie.

Esto se puede expresar con la Ec. 3.19.

$$x(t) - \bar{x} = \sum_{k=2}^{\frac{n}{2}+1} \gamma_k [a_k \cos(2\pi(t-1)\omega_k) + b_k \text{sen}(2\pi(t-1)\omega_k)] \quad (3.19)$$

donde  $\omega_k = (k-1)/n$ ,  $\gamma_k$  es dos, excepto cuando  $k=n/2+1$  que es uno, y  $a_k$  y  $b_k$  son las partes real e imaginaria de la transformada discreta de Fourier  $z(1), \dots, z(n)$  de los datos (ver Ec. 3.20).

$$z(k) = \sum_{j=1}^n x(t) e^{2\pi i(t-1)\omega_k}, \quad k = 1, \dots, n \quad (3.20)$$

Si definimos las Ecs. 3.21 y 3.22

$$C_k^2 = a_k^2 + b_k^2 \quad \varphi_k = \arctan(b_k/a_k) \quad (3.21, 3-22)$$

se podrá escribir la Ec. 3.23.

$$x(t) - \bar{x} = \sum_{k=2}^{\frac{n}{2}+1} \gamma_k C_k \cos(2\pi(t-1)\omega_k) + \varphi_k \quad (3.23)$$

Se podrá escribir la Ec. 3.24.

$$\hat{R}(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - \bar{x})^2 = \sum_{k=2}^{\frac{n}{2}+1} \gamma_k C_k^2 \quad (3.24)$$

Una expresión similar podría obtenerse para  $n$  impar.

Pues bien, la representación gráfica de  $nC_k^2$  respecto a  $\omega_k = (k-1)/n$  para  $k=1, \dots, [n/2]+1$  es llamada el periódograma de un conjunto de datos.

Siendo la función de densidad espectral de un conjunto de datos, dada por la Ec.3.25.:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{n} \left| \sum_{j=1}^n x(t) e^{2\pi i(t-1)\omega} \right|, \quad \omega \in [0,0.5] \quad (3.25)$$

Y a partir de ésta expresión se construye el conocido como periódograma acumulado de un conjunto de datos, Ec. 3.26.

$$\hat{F}(\omega_k) = \frac{\sum_{j=1}^k \hat{f}(\omega_j)}{\sum_{j=1}^q \hat{f}(\omega_j)}, \quad k = 1, \dots, q = [n/2] + 1 \quad (3.26)$$

$\hat{F}$  comienza cerca de cero para  $\omega_1 = 0$  y crece hasta ser igual a uno para  $\omega_q = 0.5$ , dado que  $\hat{f}$  es positivo por definición.

La interpretación del periódograma aplicado a un conjunto de datos, como se hará en el presente estudio, parte del hecho de que cuando se tiene una serie aleatoria que cumple con la definición de ruido blanco,  $\hat{F}$  es una línea recta que va desde (0,0) hasta (0.5,1). De modo que para series con un exceso de bajas frecuencias,  $\hat{F}$  comenzará por encima de la línea  $y=2x$  y para series con un exceso de frecuencias altas,  $\hat{F}$  comenzará por debajo de dicha línea. Además, podrán observarse en el periódograma acumulado las frecuencias para las que el conjunto de datos presente desviaciones apreciables de la línea recta que debería seguir un conjunto de datos con propiedades de ruido blanco.

### 3.3.5.- Test de verosimilitud

Sea un modelo que contiene los parámetros  $\theta \in \Omega_0$  donde  $\Omega_0 \in \mathbb{R}^r$  es el espacio de los parámetros, y  $r$ -dim ( $\Omega_0$ ) es el número de parámetros en el modelo. Sean un modelo mayor que contiene los parámetros  $\theta \in \Omega$  donde  $\Omega \in \mathbb{R}^m$  es el espacio de los parámetros, y  $m$ -dim ( $\Omega$ ), suponiendo que  $\Omega_0 \subset \Omega$ , es decir, el primer modelo es un submodelo del segundo modelo tal que,  $r < m$ .

Entonces, el test del cociente de máxima verosimilitud para determinar si es mejor estadísticamente el modelo que contiene los parámetros  $\theta \in \Omega_0$  frente al modelo más complejo que contiene a los parámetros  $\theta \in \Omega$  puede expresarse como:

$$\lambda(Y_N) = \frac{\sup_{\theta \in \Omega_0} L(\theta; Y_N)}{\sup_{\theta \in \Omega} L(\theta; Y_N)}$$

donde  $Y_N$  es el conjunto de los valores observados y puede utilizarse el contraste de hipótesis:

$$H_0: \theta \in \Omega_0 \quad \text{vs} \quad H_a: \theta \in \Omega \setminus \Omega_0$$

bajo la hipótesis  $H_0$  el test estadístico  $-2\log(\lambda(Y_N))$  converge como una distribución  $\chi^2$  con  $(m-r)$  grados de libertad cuando el número de muestras de  $Y_N$  tiende a infinito. Si la hipótesis  $H_0$  es rechazada frente a la hipótesis  $H_a$  (esto será aceptado en el presente trabajo dentro de un intervalo de confianza del 95%, al aplicar el test estadístico del valor-p, es decir, cuando  $p < 0.05$ ) la verosimilitud del modelo mayor,  $\theta \in \Omega \setminus \Omega_0$ , será significativamente mayor, dentro del intervalo de confianza elegido, que la verosimilitud del sub-modelo,  $\theta \in \Omega_0$ . Y se puede concluir estadísticamente que el modelo con los parámetros  $\theta \in \Omega \setminus \Omega_0$  ajustado utilizando el conjunto de datos  $Y_N$ , es más verosímil, o en otro modo, el modelo mayor es estadísticamente mejor para describir la información imbuida en los datos [Bacher11].

# **IV**

## **DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES**

## 4.- Dispositivos experimentales

### 4.1.- Introducción

Los sistemas experimentales estudiados se encuentran ubicados en el Laboratorio de Ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE), en la Plataforma Solar de Almería. Este laboratorio está integrado y gestionado directamente por la Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3), de la División de Energías Renovables, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y forma parte de la red de interés económico PASLINK EEIG que integra a laboratorios europeos con las mismas características [Strachan93, Bloem01 Santamouris10a, Santamouris10b, Jiménez11].

El objetivo del LECE es contribuir a la mejora de conocimiento sobre la calidad energética de elementos de la edificación, llevando a cabo experimentos para determinar las propiedades térmicas de cerramientos, como por ejemplo son: el coeficiente global de transferencia de calor, su absorptancia, etc.. Así como para estudiar su relación con fenómenos de ventilación dada a la importancia que éstos tienen dentro de las condiciones climáticas en España.

El conocimiento de dichas propiedades persigue mejorar el diseño de edificios con vistas a aumentar su ahorro energético sin pérdida de confort, y para predecir el comportamiento térmico de los mismos.

Las actividades llevadas a cabo en LECE, en relación con los objetivos de los estudios de los dispositivos experimentales ensayados, se pueden clasificar en:

- Apoyo experimental a la elaboración de normas y reglamentaciones.
- Actividades experimentales de I+D sobre eficiencia energética en la edificación.
- Colaboración y servicio a los fabricantes de materiales y componentes para la edificación.

El LECE dispone de 4 células de ensayo equipadas con sistemas de acondicionamiento e instrumentación para el ensayo de componentes constructivos a escala real y bajo condiciones meteorológicas reales. La célula de ensayo dispone de una habitación de ensayo de tamaño real. Las paredes de este dispositivo impiden el intercambio de energía entre la habitación de ensayo y el exterior. En estas células es posible sustituir uno de los cerramientos originales por el cerramiento a ensayar. Una vez instalado este cerramiento sólo es significativa la parte del intercambio de energía a través de él, lo cual permite la caracterización energética del mismo.

Actualmente se realizan ensayos e investigación de diferentes tipos de componentes de la construcción en contacto con empresas del sector, además se trabaja en la mejora de los procedimientos de evaluación empírica de los componentes. Estas investigaciones van encaminadas tanto a la obtención de modelos empíricos, como al desarrollo mejora y optimización de los procedimientos de ensayos de los diferentes componentes. Para ello se aplican métodos de análisis de datos estacionarios y/o dinámicos basados en técnicas de identificación de sistemas. En este laboratorio también es posible llevar a cabo ensayos para la validación de modelos de simulación obtenidos a partir de valores de diseño y geometría ([www.psa.es](http://www.psa.es)).

De entre las instalaciones que se encuentran en el laboratorio, se emplearán en el presente trabajo se utilizan: una célula de ensayo, donde se estudiarán un muro simple antes y después de constituir una fachada ventilada [Guzmán10], y una chimenea solar aislada [Martí, Arce09].

### 4.2.- Muro simple

El muro está situado en una célula de ensayo en el Laboratorio para ensayos de componentes de la edificación (LECE) en la Plataforma Solar de Almería (PSA), en el Sudeste de España



(37.1°N, 2.4°W). La climatología de la zona es extremadamente seca y cálida en verano y fría en invierno. Las temperaturas tienen una variación grande entre el día y la noche, y dada la posición vertical del muro, recibe una alta radiación solar global vertical en invierno y baja en verano, predominando los cielos despejados a lo largo del año.

#### 4.2.1.- Descripción

El muro referencia está construido con ladrillos de cerámica de unas dimensiones de 32cm x 16cm x 11.5cm unidos con mortero de cemento CEM V/A (S-P-V) 32,5 N EN-UNE 197-1 y arena clasificada. En la parte exterior está enfoscado con un mortero de las mismas características que la de la unión de los ladrillos de aproximadamente 2cm de espesor. En el interior se ha terminado el muro con un enlucido de yeso (Yesodur-R UNE 102-110-86) de 1.5cm de espesor. Con lo que el espesor del muro total es de aproximadamente 15cm.

Las medidas del muro en su parte interior son de 298cm de ancho por 276cm de alto. El área de medidas se sitúa en la parte central del muro para reducir el posible efecto borde entre la unión del muro con la célula de ensayo.

Dadas las características materiales del muro se puede estimar que teóricamente el valor su transmitancia térmica total,  $U$ , a partir de la Ec. 4.1. Su valor es aproximadamente 2.45 W/m<sup>2</sup>K, suponiendo constantes los valores de los coeficientes de transmitancia térmica superficiales exterior e interior.,  $h_{se}$  y  $h_{si}$ , [Naveros11], [ISO6946].

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{se}} + \frac{1}{U_c} + \frac{1}{h_{si}} \quad (4.1)$$

donde:

$$R = \frac{1}{U_c} = \sum \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (4.2)$$

donde  $d_i$  es el espesor de la capa material “i” y  $\lambda_i$  su conductividad térmica.

Si se supusiese dependiente con el viento el coeficiente de transmitancia superficial exterior,  $h_{se}$ , se podría apreciar una variación del valor de la transmitancia total  $U$  superior al 10% para el muro simple estudiado dado su bajo aislamiento [ISO6946]. Este porcentaje de variación sería despreciable para muros con un aislamiento mayor. El cambio en la transmitancia térmica total con la velocidad del viento puede apreciarse en la Figura 4.1a, donde se supone, a partir de la Ec. 4.1, que  $U_c$  y  $h_{si}$  son constantes y  $h_{se}$  varía solo con la velocidad del viento [Sharples84]. Del mismo modo, si se supusiese solo dependiente con la temperatura radiante media, Figura 4.1b el coeficiente  $h_{se}$ , la variación de la transmitancia térmica total  $U$ , sería cercana al 1%, por lo que en lo que respecta a su influencia, puede ser despreciada la variación producida por este efecto [Duffie06, ISO6946]

Por otra parte, la absorptancia de un muro vertical como el estudiado se establece que está en el rango de 0.5 -0.9, en función del color de la superficie, por lo que al ser ésta gris es de esperar que el valor sea más cercano a su límite máximo.

Por último la capacidad calorífica del muro también puede ser estimada teóricamente a partir de sus propiedades físicas, utilizando los valores conocidos, bien sean proporcionados por el fabricante o consultados en tablas especializadas, del calor específico,  $c$  (J/kgK) y la densidad,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), de los materiales que forman el muro, junto a los valores de su superficie,  $S$  (m<sup>2</sup>), y

profundidad,  $d$  (m), se obtiene que está en torno a los  $10^6$  J/K, Ec. 4.3, puesto que el muro está formado por ladrillo, mortero y yeso. No obstante, este valor solo sirve para dar una aproximación al orden de magnitud del valor de la capacidad calorífica efectiva que se determinará experimentalmente [Rab188].

$$C = \rho S d c \quad (4.3)$$

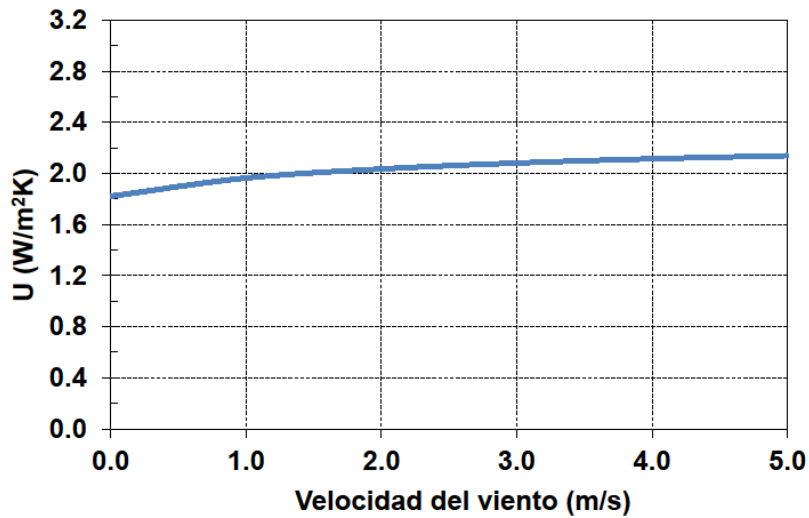


Figura 4.1a.- Variación teórica de la transmitancia térmica total,  $U$ , debido a la dependencia de  $h_{se}$  con la velocidad del viento ( $T_m=10^\circ\text{C}$ )

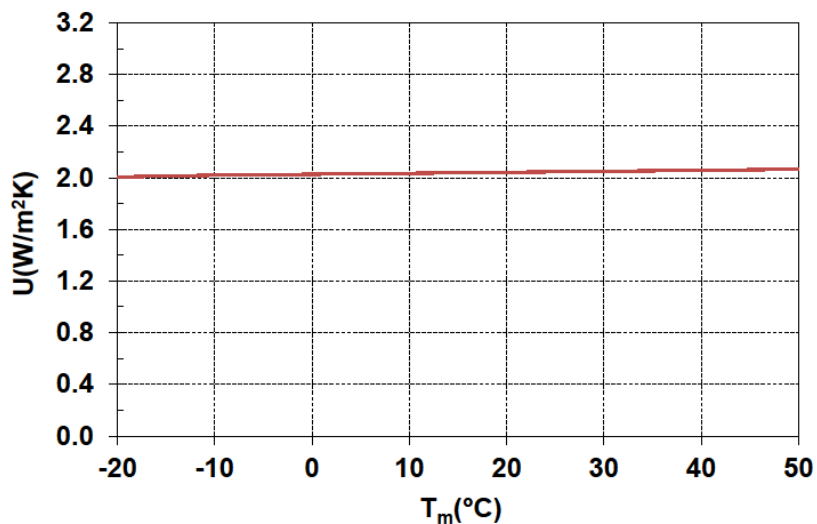


Figura 4.1b.- Variación teórica de la transmitancia térmica total,  $U$ , debido a la dependencia de  $h_{se}$  con la temperatura media radiante entre la superficie y sus alrededores ( $v=1\text{m/s}$ )

En la Figura 4.2 se puede observar un esquema de su composición.

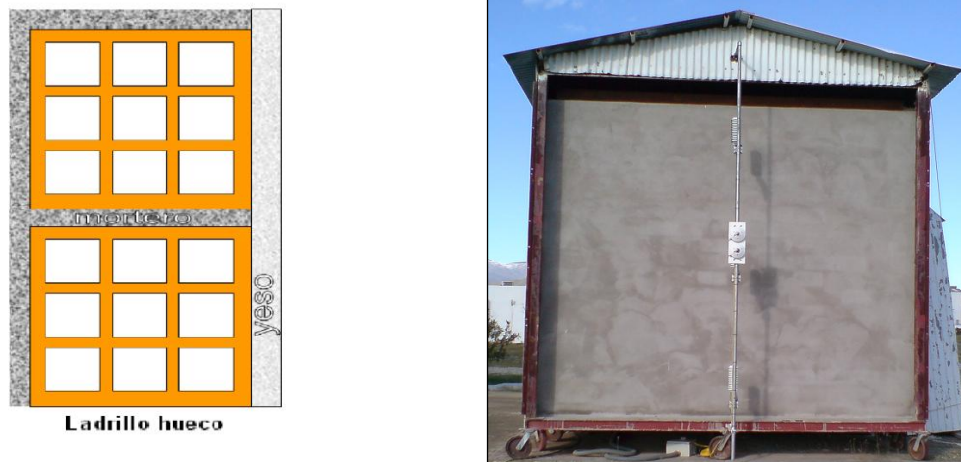


Figura 4.2.- Perfil del muro base (izquierda) y vista exterior del muro (derecha)

#### 4.2.2.- Instrumentación

A continuación se describen los equipos de medida empleados y se detallan las consideraciones referentes a su precisión:

- Temperaturas ambiente y superficiales: Termoresistencia de Platino, PT100, 1/10 DIN, medidas con una conexión a cuatro hilos, con protección de radiación solar y ventiladas para las medidas de aire exterior.
- Densidad de flujo térmico: Sensor modelo HFP01 fabricado por Hukseflux, coeficiente de sensibilidad de 5% de precisión en la medida, el voltaje es medido directamente usando una conexión diferencial.
- Irradiancia solar global vertical: Piranómetro, modelo CM11 fabricado por Kipp and Zonen, de acuerdo a la norma ISO 9060:1990, el voltaje es medido directamente usando una conexión diferencial.
- Radiación de onda larga vertical en la superficie del muro: Pirgeómetro, modelo CGR4 fabricado por Kipp and Zonen, el voltaje es medido directamente usando una conexión diferencial.
- Velocidad de viento: Sensor modelo WindSonic fabricado por GILL INSTRUMENTS LTD.
- Humedad relativa exterior. Sensor modelo HMP45A/D fabricado por VAISALA.

#### 4.3.- Muro simple integrado en fachada ventilada.

##### 4.3.1.- Descripción

La fachada ventilada ha sido construida en varias fases, y está formada por:

- Muro base o de referencia, descrito en la sección anterior, 4.2.
- Estructura de soporte metálica.
- Canal de aire de 11cm de espesor
- Hoja cerámica de junta abierta formada por losas cerámicas blancas.

En la Figura 4.3 puede verse un esquema de la fachada ventilada, como referencia de su detalle constructivo.

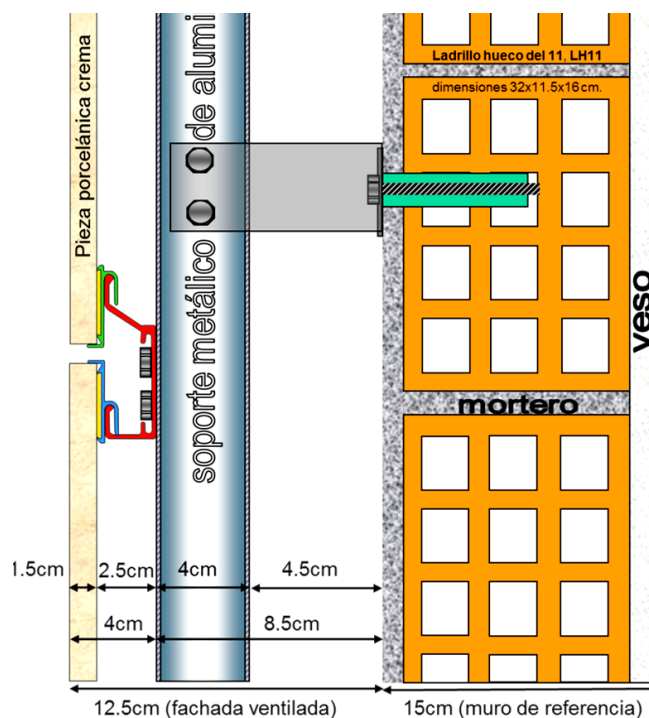


Figura 4.3. Esquema del perfil de la fachada ventilada

La fachada ventilada está compuesta por una estructura metálica (aluminio) de soporte, ver Figura 4.4, a la que se han fijado losas de material cerámico, de dimensiones 120cm x 59.5cm, mediante unos perfiles de aluminio adheridos a ellas y que se encajan sobre los soportes horizontales de la estructura metálica, ver Figura 4.5.

La estructura metálica formada por tubos cuadrados de aluminio de 40mm x 40mm, que sirve de soporte de las losas cerámicas, va anclada al muro de referencia mediante unos ángulos atornillados a ambos. Los tubos están separados del muro de referencia entre 4 y 5 cm, permitiendo que la fachada ventilada quede vertical. La separación permitirá formar una cámara de aire ventilada con entrada de aire lateral, inferior y a través de las separaciones verticales entre losas. Las losas por su parte, se unen a la estructura metálica colgando de unas pletinas con un perfil específico que están atornilladas a los perfiles cuadrados.

#### 4.3.2.- Instrumentación

La parte de la instrumentación correspondiente al muro de referencia ya ha sido detallada en la Sección 4.2.2, a continuación se describen los nuevos equipos de medida añadidos que han sido empleados y se detallan las consideraciones referentes a su precisión:

- Velocidad de viento en la cámara ventilada: Anemómetros de hilo caliente omnidireccionales de la marca TSI modelo 8495 con una longitud de sonda de 30cm
- Temperaturas ambiente y superficiales en la cámara ventilada: Termopares de tipo 'T' de clase II.

Tanto los anemómetros como los termopares han sido situados de forma distribuida en el sistema constructivo como puede apreciarse, en parte, en las Figuras 4.4-5.



Figura 4.4.- Vista de la fase intermedia de construcción: Estructura metálica



Figura 4.5.- Vista exterior de la fachada ventilada

#### 4.4.- Chimenea Solar

##### 4.4.1.-Descripción

Por último se presenta una chimenea solar orientada al sur, ver Figura 4.6, cuyas dimensiones son 4.5m de alto por 1m de ancho. El canal de aire de la misma tiene una profundidad de 20cm. El área de entrada de aire al canal tiene unas dimensiones de  $0.5 \times 0.5 \text{m}^2$ .

Para su construcción se han empleado materiales comunes utilizados en la edificación. La superficie captadora es de hormigón forjado con 15 cm de grosor la cual se ha pintado de negro mate para aumentar el coeficiente de absorción. Con la finalidad de disminuir pérdidas de energía hacia el exterior, se ha protegido con una cubierta de vidrio ordinario de 4mm de espesor. Los laterales se han construido con sándwiches de madera contrachapada y poliestireno expandido.

Las propiedades físicas del muro de la chimenea pueden ser también consultadas en [Martí06], pudiéndose concluir que el valor de la transmitancia térmica total para el conjunto muro más aislante es del orden de  $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

La absorptancia estará próxima a 0.9 dado el color oscuro de la misma, y su capacidad calorífica será del orden de  $10^7 \text{ J/K}$ , mayor que la del muro simple dada su composición más pesada.

La chimenea solar se ha protegido del viento exterior para evitar el flujo inverso a través de la misma, con una salida superior orientable a la dirección del viento y un parapeto a la entrada para disminuir la influencia del viento.



Figura 4.6.- Chimenea solar

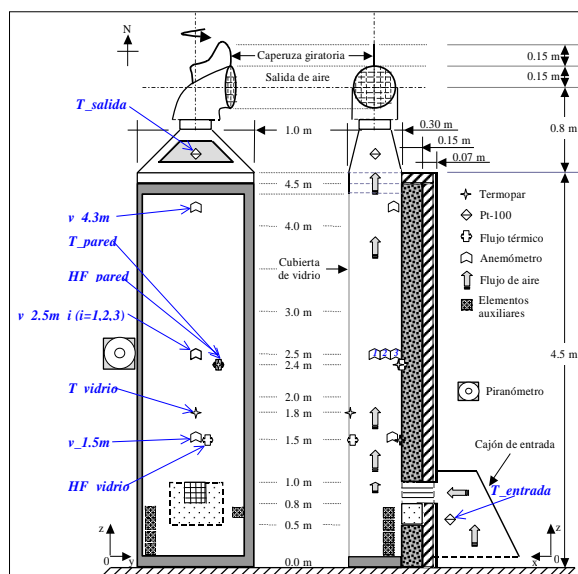


Figura 4.7.- Sensores colocados en la Chimenea Solar

#### 4.4.2.- Instrumentación

Las medidas realizadas, así como la localización de cada uno de los sensores se indican en la Figura 4.7. Para estas medidas se han utilizado los siguientes dispositivos:

- Temperaturas de entrada, salida y exterior: Termorresistencia de Platino PT100, modelo Vaisala-HMP45D, 1/3 clase B según EIC 751.
- Velocidad de viento en la entrada y el interior del canal de la chimenea: Anemómetros de hilo caliente, modelo TSI-8475
- Irradiancia solar: Piranómetro, modelo Kipp&Zonen-CM11, situado a 2m de altura junto a la chimenea. Patrón secundario según clasificación WMO.
- Densidad de flujo térmico: Dispositivo basado en una termopila, modelo TNO-PU32.
- Temperaturas superficiales e interior del canal: Termopar tipo T y clase 1 de tolerancia según la norma IEC-584-1982.
- Humedad relativa exterior y a la entrada del canal: Sensor capacitivo, modelo Vaisala-HMP45D.
- Velocidad de viento: Anemómetro de cazoletas basado en dispositivo optoelectrónico.
- Dirección de viento: Veleta basada en dispositivo potenciométrico.

#### 4.5.- Sistema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos implementado tiene las siguientes características: resolución 16-bit A/D, con un rango de medidas ajustado a la salida de los sensores, módulos distribuidos para minimizar el ruido producido por el cableado. El sistema está basado en módulos "Compact Field Point" fabricados por NATIONAL INSTRUMENTS, en particular el módulo utilizado es un cFP-1808 al que se han conectado las siguientes tarjetas:

- 3 Módulo cFP-TC-125: 8 entradas de termopar o bajo voltaje diferencial. Rango de -20mV a 80mV usados para la medida de la irradiancia solar global, la irradiancia de onda larga y la densidad de flujo térmico.
- 2 Módulos cFP-RTD-124: 8 entradas de Pt100 a 4 hilos. Rango de -200°C a 850°C usados para la medida de las temperaturas.
- 2 Módulos cFP-AI-110. 8 entradas analógicas en voltaje o intensidad.

- 1 Módulo cFP-AI-111. 16 entradas analógicas en intensidad. Rango de 4mA a 20mA usados para las medidas de la velocidad del viento/aire.

El cableado al igual que el resto de los elementos de la cadena de medida se ha implementado con el objetivo de reducir tanto como sea posible la incertidumbre por ruido que pudiera introducir, se ha utilizado doble par trenzado y apantallado, un detalle del mismo puede verse en la Figura 4.8.

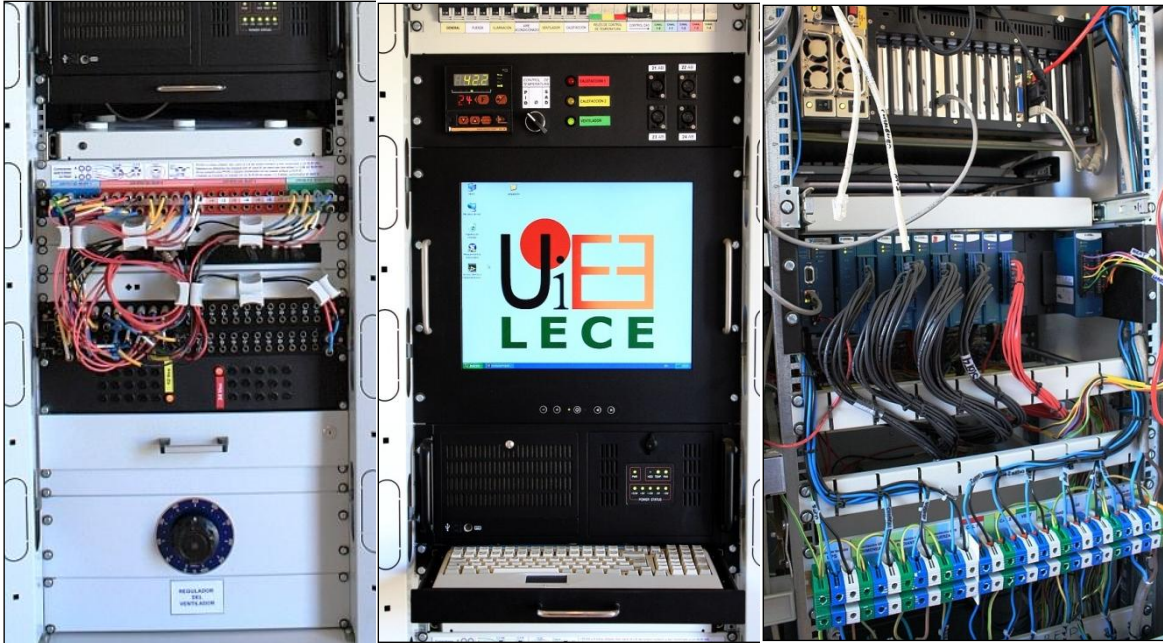


Figura 4.8.- Detalle del sistema de adquisición de datos

**V**

**ANÁLISIS DINÁMICO INTEGRADO.  
REGRESIÓN LINEAL BASADA EN VALORES  
MEDIOS**



## 5.- Análisis dinámico integrado. Regresión lineal basada en valores medios

### 5.1.- Introducción

El modelado térmico de un elemento constructivo depende de la interacción de complejos procesos físicos, y su análisis simplificado o bajo condiciones no adecuadas puede añadir más incertidumbre de la deseada a su caracterización. El desarrollo de ensayos in-situ que puedan marcar una pauta a seguir para monitorizar los sistemas experimentales y analizarlos de una forma normalizada, puede contribuir a mejorar el modelado térmico de dichos sistemas reduciendo el grado de incertidumbre asociado los resultados obtenidos en su posterior análisis y mejorar los criterios existentes para la certificación energética en edificios.

Los experimentos realizados a la intemperie usando células de ensayo [Strachan08b, Strachan08c], representan una excelente herramienta para la estimación de los parámetros que caracterizan el comportamiento térmico de un elemento constructivo en concreto. Estos experimentos se realizan bajo condiciones meteorológicas reales lo que implica que el posterior análisis de los datos registrados debe tener presente las condiciones dinámicas de los mismos.

El análisis de elementos constructivos basado en experimentos a escala real está además vigente en la actualidad, y pueden consultarse distintas iniciativas como la del Annex 58 “Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements” dentro del programa “Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme” (ECBCS) de la “International Energy Agency” (IEA) [IEA12].

Existen diversos métodos para analizar las características térmicas de un elemento constructivo, con diferentes grados de complejidad y exactitud en cuanto a la estimación de los parámetros térmicos característicos, tales como la transmitancia térmica  $U$ , entre otros. Algunos de estos métodos han sido utilizados para caracterizar edificios [Rabl88, Madsen95, Yang12] y elementos constructivos [Bloem94, Bloem96, Jiménez08a] a partir de medidas en condiciones reales de uso.

Los diferentes métodos y las herramientas informáticas necesitan de experiencia previa para su aplicación de forma satisfactoria. Las principales diferencias entre los métodos radican en la base matemática y los distintos modelos utilizados para estimar los parámetros característicos deseados.

En una primera fase, se llevará a cabo la caracterización de un muro simple para estudiar su comportamiento tras un largo período de experimentación, haciendo un estudio a partir de los valores medios de las variables físicas que determinan su comportamiento térmico. El estudio de un muro simple facilita el objetivo de estudiar los métodos de identificación [Naveros12].

Con estos valores medios, pueden aplicarse técnicas de regresión lineal a partir de unas ecuaciones de balance energético, de modo que se pueden obtener los parámetros característicos del elemento constructivo en sí, suponiendo que éstos son constantes a lo largo del ensayo.

Este tipo de análisis supone una serie de hipótesis para que los parámetros obtenidos sean considerados adecuados, debiendo corregirse posibles variaciones cuando se tenga evidencia del incumplimiento de estas hipótesis.

Las hipótesis a tener en cuenta para la realización de este tipo de análisis son:

- Las propiedades térmicas del material y los coeficientes de transferencia de calor son constantes para el rango de temperatura en que se desarrolla el experimento.
- La energía en forma de calor acumulada en el elemento, durante el ensayo, es despreciable en comparación con la cantidad de energía que intercambia el elemento con su entorno.

Estas condiciones limitan la aplicación del método a experimentos que cumplan un período de ensayo concreto y que variará en función del elemento constructivo a analizar.

En el caso que nos ocupa, al disponer de meses de medidas, los métodos pueden ser aplicados de forma satisfactoria y pueden estudiarse sus límites de aplicabilidad.

No obstante deben tenerse presente estudios previos en los que la aplicación de métodos de regresión lineal a partir de valores medios proporciona resultados que pueden ser poco exactos cuando el período de integración o las ecuaciones de balance consideradas no son adecuadas [Richalet01].

En este Capítulo va a emplearse el método de regresión lineal aplicado a los valores medios de las variables físicas que intervienen en la ecuación de balance energético de un muro simple que es considerado homogéneo, a partir de medidas obtenidas bajo condiciones meteorológicas reales. La descripción del muro simple puede verse de forma detallada en el Capítulo 4.

El análisis con valores medios aportará información sobre el uso de distintos modelos considerando que variables físicas son necesarias para la obtención de los parámetros térmicos del elemento. Además permitirá identificar el período de tiempo más adecuado sobre el que obtener los valores medios y proporcionará una estimación de la exactitud del método.

## 5.2.- Datos experimentales

El experimento se lleva a cabo bajo condiciones exteriores reales y en su interior se alternan períodos con temperaturas en torno a los 18°C en verano y los 40°C en invierno. La temperatura interior es controlada y se dispone de un ventilador para evitar la estratificación.

Las magnitudes físicas medidas en el experimento son las siguientes:

- $T_i$ ,  $T_e$ , se considera el gradiente de temperaturas como la principal causa de existencia de flujo térmico a través del muro.
- $G_v$  se introduce para analizar su efecto sobre el flujo térmico a través del muro y la necesidad de su utilización en las ecuaciones de balance energético.
- $T_{si}$ ,  $T_{se}$ ,  $G_{lw}$ , y  $w$  para investigar su posible influencia en la ecuación de balance energético. Existe también una estación meteorológica instalada en las cercanías del muro, donde se toman medidas adicionales redundantes que permiten verificar la validez de los datos registrados, así como se toman medidas de algunas variables adicionales como son la humedad relativa y la concentración de  $CO_2$ .

Los datos analizados corresponden a un período de tiempo comprendido entre el 7 de marzo de 2009 y el 30 de octubre de 2010, lo que permite tener, a pesar de algunas discontinuidades por fallos del sistema de adquisición, un año de datos válidos aproximadamente. Un ejemplo con una pequeña muestra de los datos registrados puede verse en la Figura 5.1.

Y en las Tablas 5.1 y 5.2 se presentan la distribución de las distintas series en que ha sido dividido el conjunto total de datos y los valores medios de algunas variables registradas.

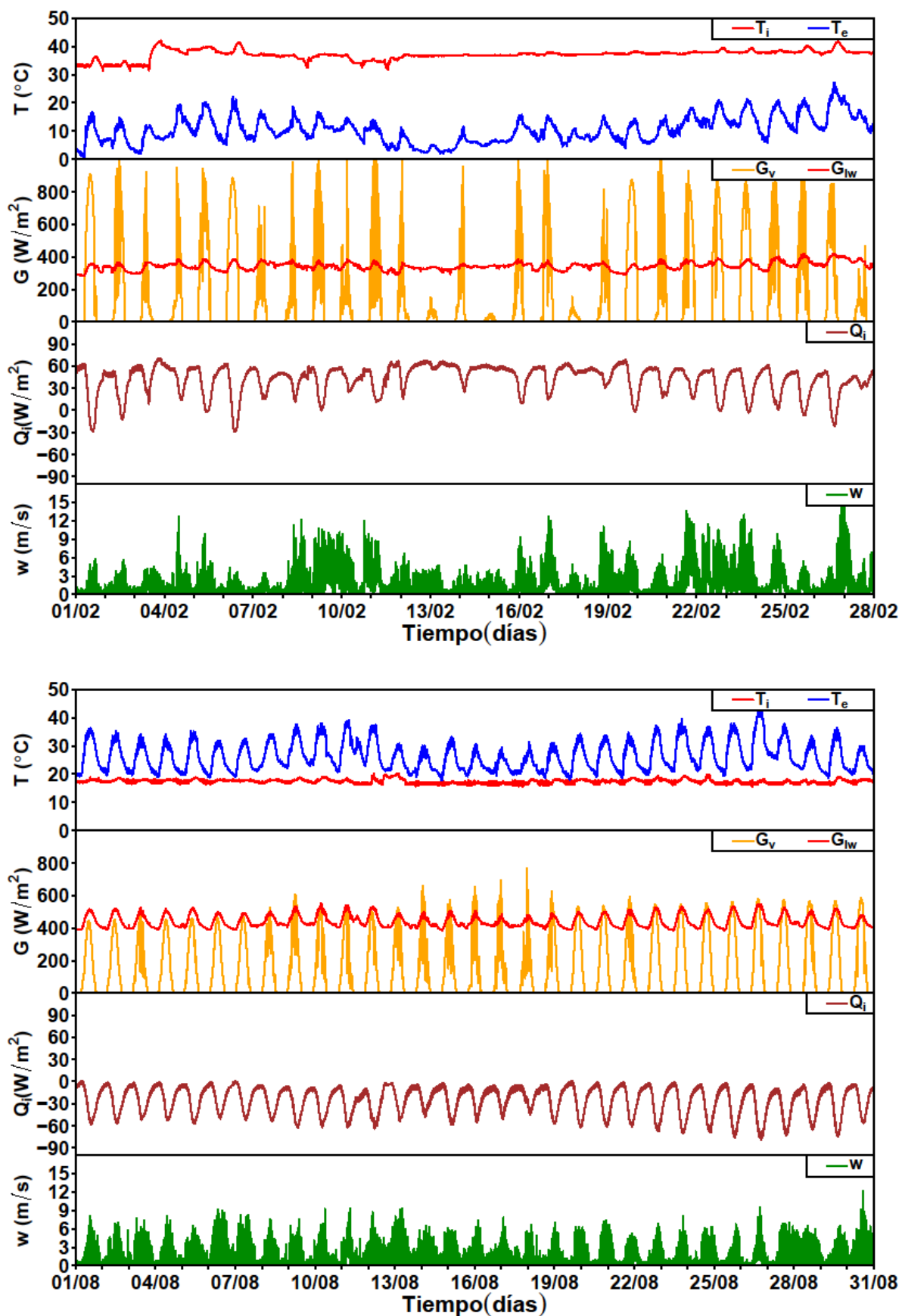


Figura 5.1.- Datos registrados para invierno y verano. Se muestra el mes de febrero y el mes de agosto de 2010.

Tabla 5.1.- Series de datos analizadas. Invierno(azul), verano (amarillo), primavera y otoño( blanco)

$\Delta t = 1$ day	$\Delta t = 2$ days	$\Delta t = 3$ days	$\Delta t = 4$ days	$\Delta t = 5$ days	$\Delta t = 6$ days	$\Delta t = 7$ days	$\Delta t = 8$ days	$\Delta t = 9$ days	$\Delta t = 10$ days
1: 07/03/2009-16/03/2009	1: 07/03/2009-26/03/2009	1: 07/03/2009-08/04/2009	1: 07/03/2009-23/04/2009	1: 07/03/2009-25/04/2009	1: 07/03/2009-27/07/2009	1: 07/03/2009-28/07/2009	1: 07/03/2009-29/07/2009	1: 07/03/2009-30/07/2009	1: 07/03/2009-31/07/2009
2: 17/03/2009-26/03/2009									
3: 27/03/2009-05/04/2009	2: 27/03/2009-15/04/2009								
4: 06/04/2009-15/04/2009		2: 09/04/2009-27/06/2009							
5: 16/04/2009-25/04/2009	3: 16/04/2009-21/06/2009								
6: 12/06/2009-21/06/2009			2: 12/06/2009-29/07/2009	2: 12/06/2009-31/07/2009					
7: 22/06/2009-01/07/2009	4: 22/06/2009-11/07/2009	3: 28/06/2009-30/07/2009							
8: 02/07/2009-11/07/2009									
9: 12/07/2009-21/07/2009	5: 12/07/2009-31/07/2009								
10: 22/07/2009-31/07/2009									
11: 03/02/2010-12/02/2010	6: 03/02/2010-22/02/2010	4: 03/02/2010-07/03/2010	3: 03/02/2010-22/03/2010	3: 03/02/2010-24/03/2010	2: 03/02/2010-09/05/2010	2: 03/02/2010-10/05/2010	2: 03/02/2010-11/05/2010	2: 03/02/2010-12/05/2010	2: 03/02/2010-13/05/2010
12: 13/02/2010-22/02/2010									
13: 23/02/2010-04/03/2010	7: 23/02/2010-14/03/2010								
14: 05/03/2010-14/03/2010									
15: 15/03/2010-24/03/2010	8: 15/03/2010-03/04/2010	5: 08/03/2010-09/04/2010							
16: 25/03/2010-03/04/2010			4: 25/03/2010-11/05/2010	4: 25/03/2010-13/05/2010					
17: 04/04/2010-13/04/2010	9: 04/04/2010-23/04/2010	6: 10/04/2010-12/05/2010							
18: 14/04/2010-23/04/2010									
19: 24/04/2010-03/05/2010	10: 24/04/2010-13/05/2010								
20: 04/05/2010-13/05/2010									
21: 20/05/2010-29/05/2010	11: 20/05/2010-08/06/2010	7: 20/05/2010-25/06/2010	5: 20/05/2010-10/07/2010	5: 20/05/2010-12/07/2010	3: 20/05/2010-27/08/2010	3: 20/05/2010-28/08/2010	3: 20/05/2010-29/08/2010	3: 20/05/2010-30/08/2010	3: 20/05/2010-31/08/2010
22: 30/05/2010-08/06/2010									
23: 09/06/2010-18/06/2010	12: 09/06/2010-02/07/2010								
24: 23/06/2010-02/07/2010		8: 26/06/2010-28/07/2010							
25: 03/07/2010-12/07/2010	13: 03/07/2010-22/07/2010								
26: 13/07/2010-22/07/2010			6: 13/07/2010-29/08/2010	6: 13/07/2010-31/08/2010					
27: 23/07/2010-01/08/2010	14: 23/07/2010-11/08/2010	9: 29/07/2010-30/08/2010							
28: 02/08/2010-11/08/2010									
29: 12/08/2010-21/08/2010	15: 12/08/2010-31/08/2010								
30: 22/08/2010-31/08/2010									
31: 01/09/2010-10/09/2010	16: 01/09/2010-20/09/2010	10: 01/09/2010-03/10/2010	7: 01/09/2010-18/10/2010	7: 01/09/2010-20/10/2010	4: 01/09/2010-26/10/2010	4: 01/09/2010-27/10/2010	4: 01/09/2010-28/10/2010	4: 01/09/2010-29/10/2010	4: 01/09/2010-30/10/2010
32: 11/09/2010-20/09/2010									
33: 21/09/2010-30/09/2010	17: 21/09/2010-10/10/2010								
34: 01/10/2010-10/10/2010		11: 04/10/2010-29/10/2010							
35: 11/10/2010-20/10/2010	18: 11/10/2010-30/10/2010								
36: 21/10/2010-30/10/2010									

Tabla 5.2.- Valores medios de los datos registrados para todas las series. Invierno(azul), verano (amarillo), primavera y otoño( blanco)

Series	Dates	$\Delta T$ (°C)	$\Delta T_s$ (°C)	Gv (W/m <sup>2</sup> )	W (m/s)	Glw (W/m <sup>2</sup> )	$\Phi$ (W/m <sup>2</sup> )
01	07/03/2009 a 16/03/2009	27.68	12.97	222.72	N/A	342.69	35.75
02	17/03/2009 a 26/03/2009	27.33	13.15	188.95	N/A	346.31	36.64
03	27/03/2009 a 05/04/2009	23.77	11.40	134.67	N/A	355.40	32.35
04	06/04/2009 a 15/04/2009	20.66	10.35	145.67	N/A	350.31	28.83
05	16/04/2009 a 25/04/2009	17.23	7.92	131.32	N/A	364.64	22.53
06	12/06/2009 a 21/06/2009	-9.86	-7.63	108.53	N/A	438.49	-23.07
07	22/06/2009 a 01/07/2009	-9.19	-7.17	106.10	N/A	430.82	-20.85
08	02/07/2009 a 11/07/2009	-10.66	-8.13	108.26	N/A	N/A	-23.93
09	12/07/2009 a 21/07/2009	-9.88	-7.73	105.69	N/A	N/A	-23.13
10	22/07/2009 a 31/07/2009	-11.59	-8.92	116.38	N/A	N/A	-27.81
11	03/02/2010 a 12/02/2010	26.14	21.13	157.27	1.60	341.12	39.92
12	13/02/2010 a 22/02/2010	28.73	23.32	110.78	1.53	338.42	49.34
13	23/02/2010 a 04/03/2010	24.10	18.86	182.88	2.65	357.63	36.05
14	05/03/2010 a 14/03/2010	29.11	22.83	113.72	3.18	338.85	47.51
15	15/03/2010 a 24/03/2010	33.80	26.34	128.76	2.42	356.17	57.98
16	25/03/2010 a 03/04/2010	32.13	20.19	184.70	2.79	353.03	50.97
17	04/04/2010 a 13/04/2010	31.90	17.78	137.11	3.41	363.87	54.48
18	14/04/2010 a 23/04/2010	28.47	14.55	100.99	2.46	372.68	48.33
19	24/04/2010 a 03/05/2010	18.85	8.38	133.81	2.10	390.75	27.36
20	04/05/2010 a 13/05/2010	20.98	10.19	133.12	1.48	374.22	33.83
21	20/05/2010 a 29/05/2010	18.10	8.95	120.56	1.27	394.71	29.70
22	30/05/2010 a 08/06/2010	13.91	6.44	116.34	1.23	430.05	21.71
23	09/06/2010 a 18/06/2010	17.75	8.87	99.52	1.48	403.55	29.20
24	23/06/2010 a 02/07/2010	-6.96	-4.98	112.70	1.30	423.92	-17.12
25	03/07/2010 a 12/07/2010	-9.27	-6.36	113.08	1.32	440.89	-22.21
26	13/07/2010 a 22/07/2010	-9.37	-6.88	124.28	1.30	448.99	-23.85
27	23/07/2010 a 01/08/2010	-8.02	-6.37	128.75	1.35	441.48	-22.42
28	02/08/2010 a 11/08/2010	-9.06	-6.97	131.30	1.32	445.87	-24.77
29	12/08/2010 a 21/08/2010	-7.56	-6.03	131.72	1.24	436.27	-22.90
30	22/08/2010 a 31/08/2010	-10.09	-6.03	163.31	1.27	444.83	-29.32
31	01/09/2010 a 10/09/2010	-6.52	-6.04	165.33	1.09	421.65	-23.82
32	11/09/2010 a 20/09/2010	-4.75	-4.98	161.70	1.08	413.27	-20.43
33	21/09/2010 a 30/09/2010	-4.00	-4.90	186.54	1.00	406.82	-21.11
34	01/10/2010 a 10/10/2010	-3.01	-4.39	187.10	1.27	401.79	-19.45
35	11/10/2010 a 20/10/2010	1.80	-2.09	196.05	0.47	376.14	-10.94
36	21/10/2010 a 30/10/2010	3.73	-0.83	197.07	1.00	366.51	-7.61

### 5.3.- Método dinámico integrado. Regresión lineal basada en valores medios.

#### 5.3.1.- Justificación teórica.

El método de regresión lineal a partir de los valores medios de las variables físicas que conforman la ecuación de balance energético proporciona estimaciones de los parámetros térmicos que caracterizan un cerramiento constructivo.

Antes de proceder a utilizar este método, dado que el experimento parte de unas condiciones de ensayo dinámico, se procederá a detallar las condiciones bajo las cuales su utilización puede proporcionar resultados satisfactorios.

Considerando que el balance energético en un cerramiento puede verse afectado por diversos términos. Será importante comprobar la relevancia que pueda tener cada uno de éstos en el intercambio de calor entre el interior y el exterior del muro, y ver qué términos pueden ser no considerados por este método debido a que no produzcan cambios significativos en el balance. Los resultados por tanto vendrán siempre dados bajo unas hipótesis establecidas y deberán ser revisados en caso de que éstas cambien.

En ocasiones, puede que los efectos de algunas variables físicas existan, pero que no puedan ser detectados en el modelado del sistema debido a que su influencia esté dentro de unos rangos de influencia por debajo de los que permite detectar el método aplicado. Por lo que variables que cualitativamente pueda pensarse que tienen influencia, pueden finalmente no estar presentes en la ecuación de balance al no presentar cuantitativamente cambios significativos en la transmisión de calor.

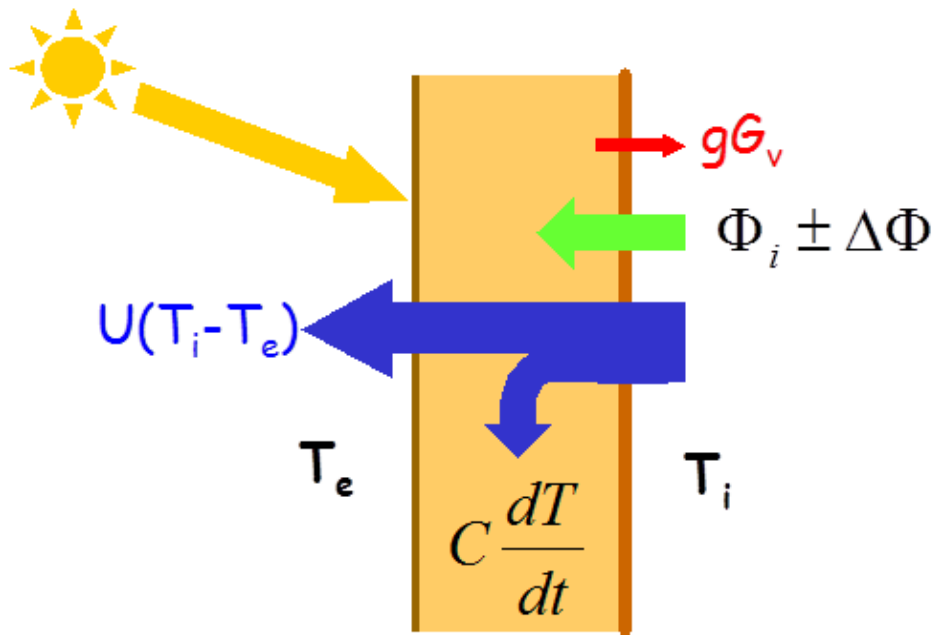


Figura 5.2.- Esquema del balance de energía, en una dimensión, a través del muro

El modelo más simple que se puede considerar para estudiar el flujo de calor a través de un cerramiento, es aquel que considera la hipótesis de que el único motivo de transferencia de calor a través de la superficie interior del muro se debe a la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior al muro, Ec. 5.1. Suponiendo que la influencia de la irradiancia solar, la velocidad del viento

o el balance de radiación de onda larga, entre otras variables, no tienen una influencia por encima del grado de incertidumbre de la medida de densidad de flujo térmico (ver Figura 5.2).

$$\Phi_i = C \frac{dT}{dt} + U(T_i - T_e) \quad (5.1)$$

El cumplimiento de las condiciones anteriores depende en parte del sistema experimental a estudiar y de las condiciones meteorológicas del ensayo, así como de las condiciones impuestas por el experimentador en aquellas variables que son controlables como la temperatura interior.

Si la Ec. 5.1 es integrada para un período de tiempo suficiente para que el término de acumulación sea despreciable en relación con el término debido a la diferencia de temperaturas, Ec. 5.2.

$$\int^{\Delta t} C \frac{dT}{dt} dt \ll \int^{\Delta t} U(T_i - T_e) dt \quad (5.2)$$

La Ec. 5.1 puede expresarse entonces como se muestra en la Ec. 5.3.

$$\int^{\Delta t} \Phi_i dt \cong \int^{\Delta t} U(T_i - T_e) dt \quad (5.3)$$

Siendo uno de los puntos claves para poder utilizar esta expresión, conocer el mínimo periodo de tiempo para el que el término debido a la acumulación de calor en el cerramiento puede ser considerado despreciable. Por este motivo, como parte de la identificación de los parámetros del muro se han empleado distintos períodos de integración para obtener conclusiones acerca del que sería más adecuado para este sistema experimental. Se han considerado períodos de integración (promedios) de 1 a 10 días.

Para proceder a utilizar el método de las medias, se aproximan las integrales en cada período por sus valores medios considerando que U es una constante, Ecs. 5.4 y 5.5.

$$\int_{t_0}^{t_1} \Phi dt \cong \bar{\Phi}(t_1 - t_0) \quad (5.4)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} (T_i - T_j) dt \cong (\bar{T}_i - \bar{T}_j)(t_1 - t_0) \quad (5.5)$$

Con lo que se obtiene la ecuación de balance energético más simple posible, Ec. 5.6.

$$\bar{\Phi}_i \cong U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) \quad (5.6)$$

De forma que si las medidas de densidad de flujo térmico y de las temperaturas ambiente interior y exterior están disponibles, podrá obtenerse un valor aproximado de U utilizando la Ec. 5.6.

Sin embargo, debe tenerse presente que el valor obtenido no será correcto si alguna de las consideraciones tenidas en cuenta pierden validez debido a que cambien las condiciones del experimento. Concretamente, debe hacerse énfasis en que:

- Cuando parte de la energía que contribuye al intercambio de calor no puede ser medida directamente, se han tenido en cuenta estos efectos de forma aproximada en este trabajo proponiendo la inclusión de un término independiente en las ecuaciones de balance.
- La Ec. 5.1 desprecia los efectos de otras variables físicas que pueden afectar al balance de energía, como son la irradiancia solar, la velocidad del viento o el balance de radiación de

onda larga con el entorno. Cuando los efectos de estas variables no sean despreciables los resultados obtenidos pueden presentar valores incorrectos.

Además, la influencia de todas las variables físicas será considerada como lineal, con lo que debe ser tenida en cuenta como hipótesis, en las ecuaciones de balance energético siguientes en que se introducen estas variables para tratar de mejorar la identificación de U.

Entonces de forma general, una vez integrada la ecuación de balance global se tendrá la siguiente relación, Ec. 5.7, entre valores medios para identificar los parámetros que determinan el flujo de calor a través del muro.

$$\bar{\phi} = a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + \dots + a_n \bar{x}_n + b \tag{5.7}$$

donde a<sub>j</sub> y b son supuestas como constantes.

De modo que U puede ser obtenido por regresión lineal y comparado para cada una de las ecuaciones de balance para todas las series de datos registradas, con lo que su valor real podrá ser mejor estimado.

En la Tabla 5.3 pueden verse todas las ecuaciones en sus diferentes variaciones, con todos los términos explicados.

Tabla 5.3.- Modelos considerados para la identificación

nº	Entradas	Salida	b	Modelo
0	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub>	Φ	No	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e)$
1	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub>	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) + b$
2	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub>	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) + b$
3	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> , G <sub>v</sub>	Φ	No	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v$
4	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> , G <sub>v</sub>	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + b$
5	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> , G <sub>v</sub> , v	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U_0(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + U_w \overline{W(T_i - T_e)} + b$
6	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> , G <sub>v</sub> , T <sub>se</sub> <sup>4</sup>	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + a_4 \overline{\sigma T_{se}^4} + b^*$
7	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> , G <sub>v</sub> , v, T <sub>se</sub> <sup>4</sup> , G <sub>ir</sub>	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U_0(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + U_w \overline{W(T_i - T_e)} + a_4 \overline{\sigma T_{se}^4} - \overline{G_{ir}} + b$
8	T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> , G <sub>v</sub> , v, T <sub>se</sub> <sup>4</sup> , G <sub>ir</sub> , C	Φ	Sí	$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + U_w \overline{W(T_i - T_e)} + a_4 \overline{\sigma T_{se}^4} - \overline{G_{ir}} + a_5 (\overline{T_{si}(k)} - \overline{T_{si}(k-1)}) + b$

Debe hacerse énfasis en los efectos que han sido analizados en la presente sección con el método de las medias:

- Ha sido estudiado el mínimo período de integración que proporciona resultados satisfactorios para las diferentes series de datos. Este estudio se ha realizado para todos los modelos.
- Ha sido estudiada la necesidad de incluir la irradiancia solar en el balance energético.
- Se ha estudiado la posibilidad de estudiar solo períodos de noche para evitar el uso de la irradiancia solar.
- Se ha añadido la velocidad del viento y la radiación de onda larga para comprobar también su posible influencia en la ecuación de balance energético.



- Se ha estudiado la utilidad de incluir términos representando la acumulación de calor en el muro.

A continuación se describen los modelos resumidos en la Tabla 5.3.

**Modelo 1:** Este modelo, Ec. 5.8, viene a desarrollar el modelo más básico tratado con anterioridad con la inclusión en la ecuación de balance de un término independiente para que sean tenidas en cuenta las contribuciones por otras causas a la ecuación de balance energético.

$$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) + b \quad (5.8)$$

**Modelo 2:** Igual que el modelo 1, Ec. 5.8, pero considera solo períodos de noche para la estimación de U.

**Modelo 3:** Incorpora la irradiancia solar en la ecuación de balance, Ec. 5.9, de modo que se pueda observar si se produce, y es significativa, una mejora en la estimación de U.

$$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v \quad (5.9)$$

**Modelo 4:** Se vuelve a emplear el modelo 3 introduciendo el término independiente, Ec. 5.10.

$$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + b \quad (5.10)$$

**Modelo 5:** Este modelo, Ec. 5.11, pasa a tener en cuenta la velocidad del viento en la superficie exterior del muro. Asumiendo que el efecto que este produce sobre el mismo es equivalente a suponer que el valor de U tiene una variación que puede ser desarrollada en serie de Taylor, quedándonos con el primer orden de dicho desarrollo.

$$\bar{\Phi} = U_0(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + U_w \overline{W(T_i - T_e)} + b \quad (5.11)$$

**Modelo 6:** El siguiente modelo, Ec. 5.12, considera el efecto de la radiación de onda larga de la superficie externa del muro, suponiendo de forma aproximada que está tendrá una influencia dada por la expresión  $\sigma T_{se}^4$ . Para remarcar la diferencia que existe entre los términos independientes de los distintos modelos, se emplea en este caso la constante  $b^*$ , principalmente para destacar que en este caso se está omitiendo una parte de la ecuación de balance energético respecto a la radiación de onda larga, al no considerar la energía que recibe el muro de su entorno ( $G_{lw}$ ).

$$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + a_4 \overline{\sigma T_{se}^4} + b^* \quad (5.12)$$

**Modelo 7:** La Ec. 5.13, incluye tanto el efecto de la velocidad del viento como el del balance de energía.

$$\bar{\Phi} = U_0(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + U_w \overline{W(T_i - T_e)} + a_4 \overline{\sigma T_{se}^4} - \bar{G}_{ir} + b \quad (5.13)$$

**Modelo 8:** Por último el modelo más detallado, Ec. 5.14, añade un término al modelo 7 para tratar de tener en cuenta también el posible efecto considerado despreciable en los demás modelos, de la acumulación de energía en forma de calor en el muro.

$$\bar{\Phi} = U(\bar{T}_i - \bar{T}_e) - g\bar{G}_v + U_w \overline{W(T_i - T_e)} + a_4 \overline{\sigma T_{se}^4} - \bar{G}_{ir} + a_5 (\bar{T}_{si}(k) - \bar{T}_{si}(k-1)) + b \quad (5.14)$$

Todos los modelos han sido estudiados utilizando períodos de integración de 1 a 10 días.

En todos los modelos descritos para la estimación de U deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La consistencia de los resultados obtenidos viene dada por la gran cantidad de datos registrados y la coherencia entre las estimaciones de  $U$  para las distintas series de datos analizadas. Siendo considerados mejores modelos y mejores períodos de integración aquellos que presentaban una menor dispersión en el valor de  $U$ .
- El valor y la dispersión del término independiente en todos los modelos en que es considerado para la estimación de  $U$ , se considera indicador del grado de error que se está cometiendo al no incluir otros factores que pueden estar afectando al balance energético del muro.

### 5.3.2.- Resultados y discusión

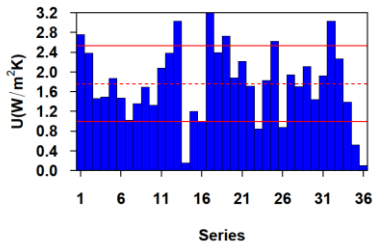
Una vez descritos todos los modelos que serán estudiados mediante el método de regresión lineal de las medias, vamos a pasar a ver los resultados obtenidos, por cada modelo, para la estimación de  $U$ .

A continuación se expone una breve discusión sobre los resultados que pueden verse gráficamente en las Figuras 5.3 a 5.11, y numéricamente se encuentran ordenados en las Tablas 5.4 a 5.12.

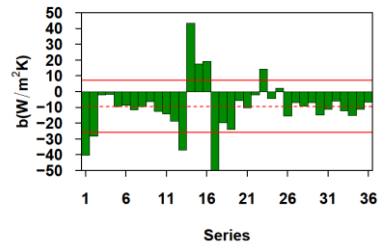
Debe ser tenido en cuenta que la velocidad del viento no está disponible para todo el período, si no solo para las fechas posteriores al 3 de febrero de 2010 como se indicó en la Tabla 5.1. Motivo por el cual todas las gráficas y modelos que utilizan esta variable no presentan resultados para períodos de tiempo anteriores.

En todos los modelos considerados puede observarse una fuerte dispersión en los resultados tanto de  $U$  como del término independiente se observa que la dispersión entre las diferentes series es muy alta cuando se toman períodos de integración de un solo día. Mientras que dicha dispersión va disminuyendo a medida que se toman períodos de integración mayores, llegando a estabilizarse la mejora a partir de períodos de 5 días. Para períodos de integración más largos no se aprecia una mejora significativa e incluso se observa empeoramiento en algunos casos, debido probablemente a la pérdida de significancia estadística que sucede al disponer de menos datos para la regresión multilínea.

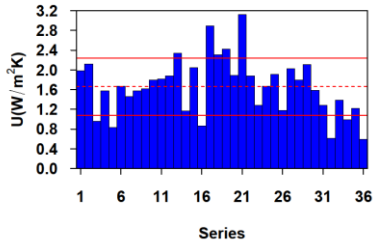
Observando las tendencias para los distintos períodos de integración, para las comparaciones entre los distintos modelos se han tomado los correspondientes a períodos de integración (promedios) de 1, 5 y 10 días respectivamente. Para los períodos de integración de un día puede verse la Figura 5.3 y las Tablas 5.4, 5.7 y 5.10. La Figura 5.4 y las Tablas 5.5, 5.8 y 5.11 muestran los resultados para el período de integración de cinco días. Y la Figura 5.5 y las Tablas 5.6, 5.9 y 5.12 presentan los resultados obtenidos para el período de integración de 10 días.



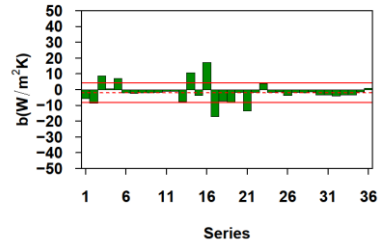
(a) modelo 1 con  $T_i-T_e$ , b.



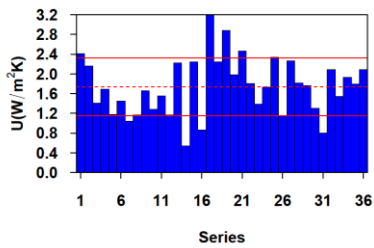
(b) modelo 1 con  $T_i-T_e$ , b.



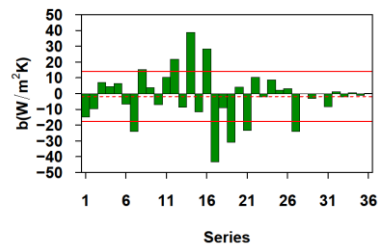
(c) modelo 2 con  $T_i-T_e$ , b.



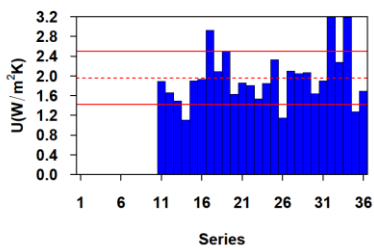
(d) modelo 2 con  $T_i-T_e$ , b.



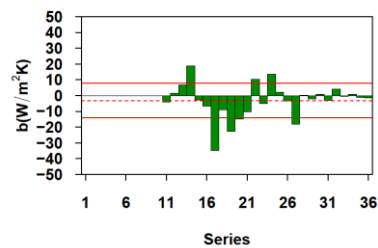
(e) modelo 4 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , b.



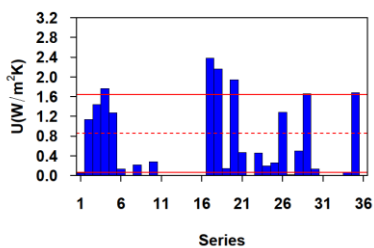
(f) modelo 4 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , b.



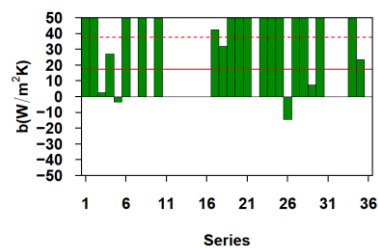
(g) modelo 5 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w, b.



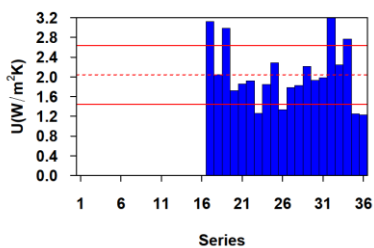
(h) modelo 5 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w, b.



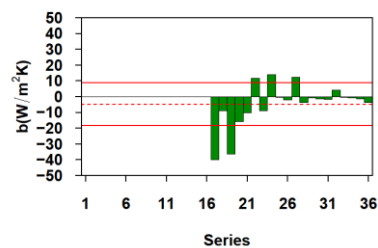
(i) modelo 6 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ ,  $T_{se}^4$ , b.



(j) modelo 6 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ ,  $T_{se}^4$ , b.

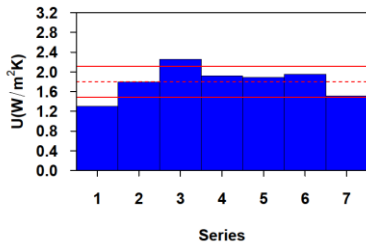


(k) modelo 7 with  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w,  $T_{se}^4$ ,  $G_{ir}$ , b.

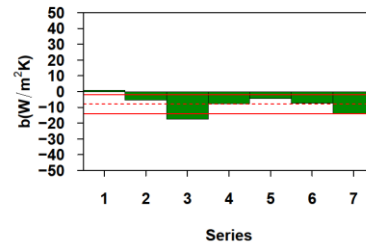


(l) modelo 7 with  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w,  $T_{se}^4$ ,  $G_{ir}$ , b.

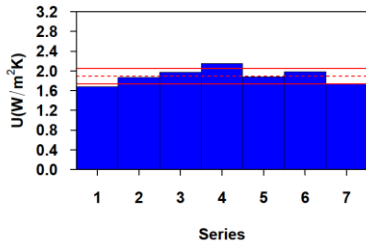
Figura 5.3.- Resultados utilizando todas las series de datos y considerando 1 día como período de integración.



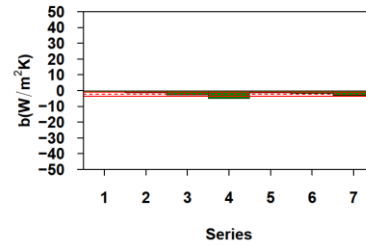
(a) modelo 1 con  $T_i-T_e$ , b.



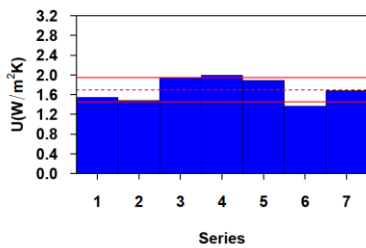
(b) modelo 1 con  $T_i-T_e$ , b.



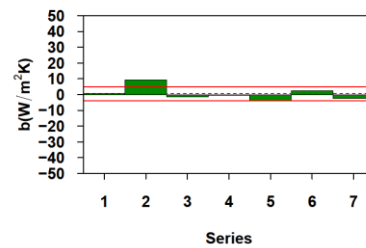
(c) modelo 2 con  $T_i-T_e$ , b.



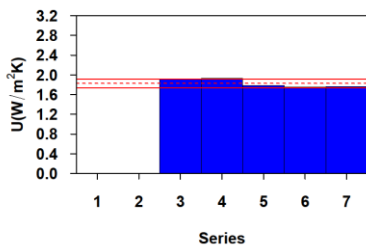
(d) modelo 2 con  $T_i-T_e$ , b.



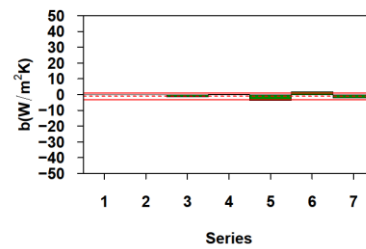
(e) modelo 4 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , b.



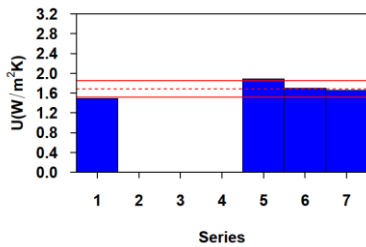
(f) modelo 4 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , b.



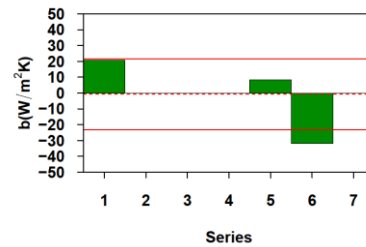
(g) modelo 5 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w, b.



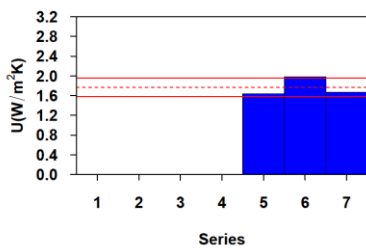
(h) modelo 5 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w, b.



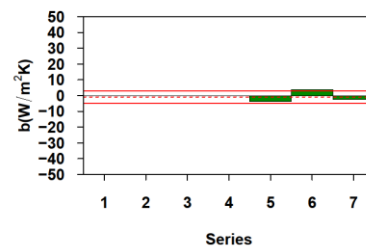
(i) modelo 6 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ ,  $T_{se}^4$ , b.



(j) modelo 6 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ ,  $T_{se}^4$ , b.

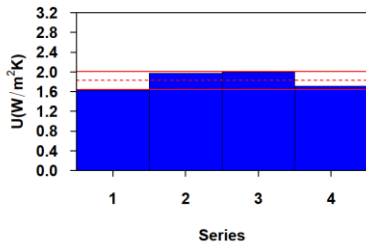


(k) modelo 7 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w,  $T_{se}^4$ ,  $G_{ir}$ , b.

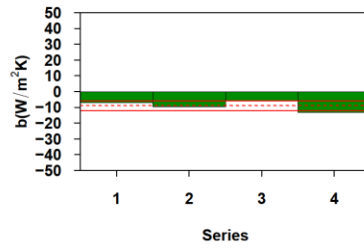


(l) modelo 7 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w,  $T_{se}^4$ ,  $G_{ir}$ , b.

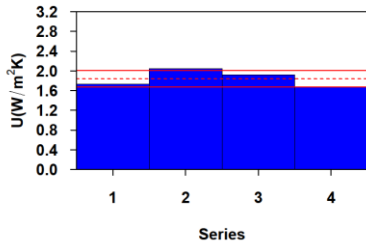
Figura 5.4.-: Resultados utilizando todas las series de datos y considerando 5 días como período de integración.



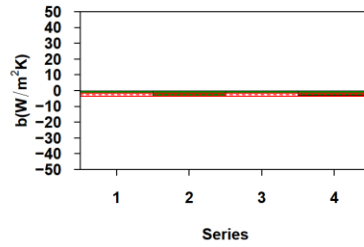
(a) modelo 1 con  $T_i-T_e$ , b.



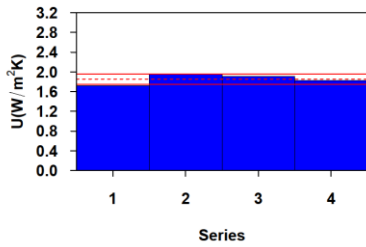
(b) modelo 1 con  $T_i-T_e$ , b.



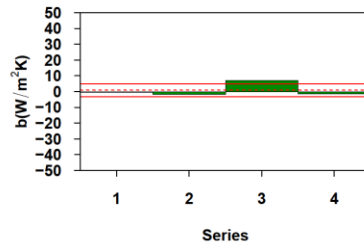
(c) modelo 2 con  $T_i-T_e$ , b.



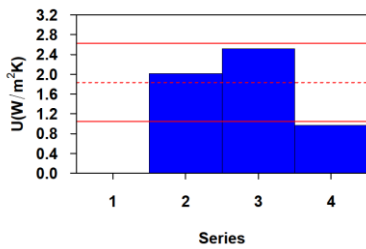
(d) modelo 2 con  $T_i-T_e$ , b.



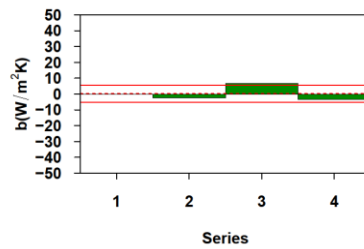
(e) modelo 4 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , b.



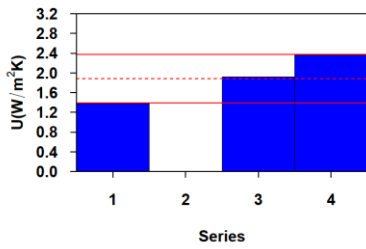
(f) modelo 4 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , b.



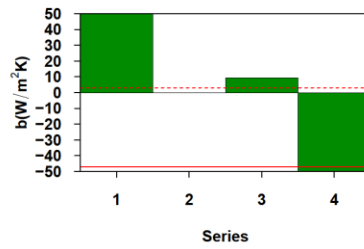
(g) modelo 5 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w, b.



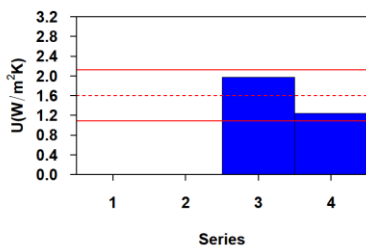
(h) modelo 5 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w, b.



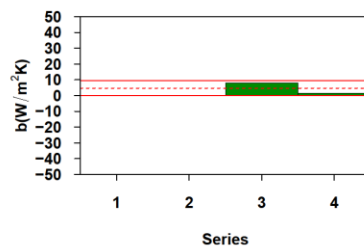
(i) modelo 6 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ ,  $T_{se}^4$ , b.



(j) modelo 6 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ ,  $T_{se}^4$ , b.



(k) modelo 7 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w,  $T_{se}^4$ ,  $G_{ir}$ , b.



(l) modelo 7 con  $T_i-T_e$ ,  $G_v$ , w,  $T_{se}^4$ ,  $G_{ir}$ , b.

Figura 5.5.- Resultados utilizando todas las series de datos y considerando 10 días como período de integración.

Tabla 5.4.- Transmitancia térmica, U (modelos m1 a m8). Período de integración de 1 día

Series	U (W/m <sup>2</sup> K)							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	2.76	1.98	2.02	2.41	N/A	N/A	N/A	N/A
02	2.38	2.12	1.87	2.16	N/A	N/A	N/A	N/A
03	1.46	0.96	1.70	1.41	N/A	N/A	N/A	N/A
04	1.49	1.57	1.85	1.69	N/A	N/A	N/A	N/A
05	1.87	0.83	1.50	1.18	N/A	N/A	N/A	N/A
06	1.47	1.67	1.56	1.45	N/A	N/A	N/A	N/A
07	1.02	1.46	1.07	1.04	N/A	N/A	N/A	N/A
08	1.35	1.57	1.26	1.17	N/A	N/A	N/A	N/A
09	1.69	1.62	1.58	1.66	N/A	N/A	N/A	N/A
10	1.32	1.79	1.34	1.28	N/A	N/A	N/A	N/A
11	2.08	1.81	1.93	1.55	1.89	1.31	1.80	2.15
12	2.38	1.88	1.87	1.17	1.66	-4.67	1.75	1.72
13	3.03	2.34	1.90	2.22	1.49	-0.52	1.50	0.54
14	0.15	1.17	1.87	0.54	1.10	-1.72	0.98	0.81
15	1.20	2.04	1.89	2.24	1.90	2.34	1.75	1.96
16	0.99	0.86	1.53	0.86	1.93	0.59	1.87	1.33
17	4.35	2.89	2.07	3.33	2.92	2.38	3.12	2.57
18	2.39	2.31	2.03	2.24	2.09	2.16	2.04	1.95
19	2.72	2.42	1.56	2.88	2.50	0.14	2.99	3.03
20	1.88	1.89	1.98	1.98	1.63	1.94	1.72	1.40
21	2.21	3.12	1.52	2.46	1.86	0.47	1.86	1.64
22	1.71	1.88	1.75	1.80	1.80	-0.68	1.92	2.44
23	0.84	1.28	1.30	1.39	1.53	0.46	1.26	1.25
24	1.82	1.67	1.77	1.73	1.85	0.19	1.85	1.74
25	2.62	1.91	2.12	2.34	2.33	0.26	2.29	2.38
26	0.87	1.18	1.11	1.16	1.14	1.28	1.33	1.37
27	1.94	2.02	1.93	2.26	2.10	0.02	1.78	1.79
28	1.70	1.79	1.82	1.81	2.04	0.50	1.82	1.84
29	2.11	2.11	1.90	1.76	2.07	1.66	2.21	2.05
30	1.44	1.58	1.30	1.30	1.64	0.13	1.93	0.90
31	1.92	1.28	1.83	0.80	1.90	-0.55	1.98	1.71
32	3.03	0.61	1.88	2.09	3.31	-0.18	3.39	3.38
33	2.26	1.39	1.81	1.54	2.27	0.00	2.24	2.27
34	1.39	0.99	1.87	1.93	3.18	0.07	2.77	2.79
35	0.52	1.22	1.85	1.79	1.27	1.68	1.25	1.87
36	0.10	0.59	2.09	2.09	1.69	-0.34	1.23	1.15
<b>Media</b>	<b>1.79</b>	<b>1.66</b>	<b>1.73</b>	<b>1.74</b>	<b>1.97</b>	<b>0.34</b>	<b>1.95</b>	<b>1.85</b>
<b>DesvEst</b>	<b>0.85</b>	<b>0.58</b>	<b>0.28</b>	<b>0.60</b>	<b>0.55</b>	<b>1.45</b>	<b>0.59</b>	<b>0.68</b>

Tabla 5.5.- Transmitancia térmica, U (modelos m1 a m8). Período de integración de 5 días

Series	U (W/m <sup>2</sup> K)							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	1.30	1.68	1.58	1.54	N/A	N/A	N/A	N/A
02	1.79	1.87	1.57	1.48	N/A	N/A	N/A	N/A
03	2.25	1.97	1.90	1.94	1.91	1.92	2.00	1.88
04	1.92	2.15	1.98	1.99	1.93	1.85	1.97	2.01
05	1.89	1.88	1.89	1.89	1.78	1.89	1.64	1.69
06	1.95	1.98	1.28	1.36	1.75	1.70	1.98	1.90
07	1.51	1.73	1.73	1.68	1.76	1.66	1.67	1.83
<b>Media</b>	<b>1.80</b>	<b>1.89</b>	<b>1.72</b>	<b>1.70</b>	<b>1.83</b>	<b>1.80</b>	<b>1.85</b>	<b>1.86</b>
<b>DesvEst</b>	<b>0.31</b>	<b>0.16</b>	<b>0.31</b>	<b>0.25</b>	<b>0.09</b>	<b>0.12</b>	<b>0.18</b>	<b>0.12</b>

Tabla 5.6.- Transmitancia térmica, U (modelos m1 a m8). Período de integración de 10 días

Series	U (W/m <sup>2</sup> K)							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	1.63	1.73	1.73	1.72	N/A	N/A	N/A	N/A
02	1.97	2.04	1.92	1.96	2.01	1.98	2.06	2.06
03	1.99	1.92	1.95	1.91	2.52	1.92	1.97	1.56
04	1.71	1.67	1.84	1.82	0.97	2.36	1.24	2.56
<b>Media</b>	<b>1.83</b>	<b>1.84</b>	<b>1.86</b>	<b>1.85</b>	<b>1.83</b>	<b>2.09</b>	<b>1.76</b>	<b>2.06</b>
<b>DesvEst</b>	<b>0.18</b>	<b>0.17</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>0.79</b>	<b>0.24</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>

Tabla 5.7.- Ordenada en el origen, b (modelos m1 a m8). Período de integración de 1 día

Series	b (W/m <sup>2</sup> )							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	-40.52	-5.82	N/A	-14.81	N/A	N/A	N/A	N/A
02	-28.35	-8.51	N/A	-9.52	N/A	N/A	N/A	N/A
03	-2.26	8.53	N/A	7.10	N/A	N/A	N/A	N/A
04	-1.85	0.54	N/A	4.57	N/A	N/A	N/A	N/A
05	-9.76	7.18	N/A	6.38	N/A	N/A	N/A	N/A
06	-8.62	-2.10	N/A	-6.77	N/A	N/A	N/A	N/A
07	-11.44	-2.35	N/A	-24.14	N/A	N/A	N/A	N/A
08	-9.53	-2.13	N/A	15.07	N/A	N/A	N/A	N/A
09	-6.51	-2.28	N/A	3.61	N/A	N/A	N/A	N/A
10	-12.54	-1.88	N/A	-7.12	N/A	N/A	N/A	N/A
11	-14.33	-1.27	N/A	10.40	-4.00	39.45	-0.15	0.72
12	-18.89	-1.13	N/A	21.76	1.53	584.55	-1.63	-0.18
13	-36.97	-7.73	N/A	-8.60	6.74	256.75	7.77	1.10
14	43.21	10.67	N/A	38.63	18.74	307.16	21.09	0.25
15	17.38	-3.76	N/A	-11.57	-2.74	-23.31	4.17	-0.14
16	19.04	17.13	N/A	28.21	-6.61	15.70	-4.81	0.60
17	-84.24	-17.14	N/A	-43.16	-34.93	42.42	-39.92	0.26
18	-19.69	-7.38	N/A	-9.13	-8.98	31.85	-9.11	0.32
19	-23.93	-8.16	N/A	-31.00	-22.57	126.87	-36.32	-0.53
20	-5.60	-1.74	N/A	4.10	-14.93	76.81	-15.90	0.66
21	-10.25	-13.44	N/A	-23.43	-10.42	119.78	-10.18	0.11
22	-2.08	-1.90	N/A	10.38	10.30	281.17	11.61	0.84
23	14.25	3.90	N/A	-2.08	-5.19	116.53	-8.95	0.61
24	-4.49	-1.81	N/A	8.57	13.53	126.30	13.91	0.12
25	2.08	-1.57	N/A	2.12	2.01	134.61	-0.58	-0.15
26	-15.66	-3.63	N/A	2.98	-3.43	-14.54	-2.17	-0.07
27	-6.87	-1.80	N/A	-24.03	-18.27	133.00	12.17	-0.05
28	-9.38	-2.24	N/A	-0.20	0.15	116.36	-3.85	0.50
29	-6.94	-1.56	N/A	-3.23	-2.18	7.23	-0.92	0.22
30	-14.84	-3.33	N/A	-0.27	0.81	132.50	-1.50	0.11
31	-11.37	-3.39	N/A	-8.37	-3.25	154.47	-1.66	-0.18
32	-5.97	-3.96	N/A	1.16	4.16	145.48	4.20	0.05
33	-12.09	-3.30	N/A	-2.14	-0.43	142.33	-0.56	0.24
34	-15.29	-3.46	N/A	0.44	0.81	141.34	-0.83	0.34
35	-11.31	-1.50	N/A	-0.98	-1.14	23.47	-1.42	0.37
36	-6.79	0.68	N/A	0.03	-1.60	173.34	-3.89	0.24
<b>Media</b>	<b>-10.35</b>	<b>-1.99</b>	<b>N/A</b>	<b>-1.81</b>	<b>-3.15</b>	<b>119.24</b>	<b>-2.67</b>	<b>0.24</b>
<b>DesvEst</b>	<b>19.60</b>	<b>6.11</b>	<b>N/A</b>	<b>15.71</b>	<b>11.05</b>	<b>111.93</b>	<b>13.16</b>	<b>0.37</b>

Tabla 5.8.- Ordenada en el origen, b (modelos m1 a m8). Período de integración de 5 días

Series	b (W/m <sup>2</sup> )							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	0.84	-1.14	N/A	0.98	N/A	N/A	N/A	N/A
02	-5.41	-1.57	N/A	9.25	N/A	N/A	N/A	N/A
03	-17.58	-2.83	N/A	-1.50	0.05	-12.45	-5.12	0.18
04	-7.73	-4.93	N/A	-0.52	0.07	38.93	1.80	0.01
05	-4.41	-1.62	N/A	-4.01	0.00	8.22	-3.78	0.03
06	-7.44	-1.92	N/A	2.42	0.11	-31.86	3.60	0.14
07	-14.09	-2.98	N/A	-2.48	0.07	-0.06	-2.55	0.22
<b>Media</b>	<b>-7.97</b>	<b>-2.43</b>	<b>N/A</b>	<b>0.59</b>	<b>0.06</b>	<b>0.56</b>	<b>-1.21</b>	<b>0.12</b>
<b>DesvEst</b>	<b>6.15</b>	<b>1.29</b>	<b>N/A</b>	<b>4.37</b>	<b>0.04</b>	<b>26.23</b>	<b>3.74</b>	<b>0.09</b>

Tabla 5.9.- Ordenada en el origen, b (modelos m1 a m8). Período de integración de 10 días

Series	b (W/m <sup>2</sup> )							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	-6.94	-1.89	N/A	-0.42	N/A	N/A	N/A	N/A
02	-9.52	-3.68	N/A	-1.67	-2.42	-5.82	-4.15	0.00
03	-6.10	-1.93	N/A	6.95	6.54	9.22	8.00	0.34
04	-13.31	-3.04	N/A	-1.44	-3.55	-70.41	1.43	0.59
<b>Media</b>	<b>-8.97</b>	<b>-2.63</b>	<b>N/A</b>	<b>0.85</b>	<b>0.19</b>	<b>-22.33</b>	<b>1.76</b>	<b>0.31</b>
<b>DesvEst</b>	<b>3.24</b>	<b>0.87</b>	<b>N/A</b>	<b>4.10</b>	<b>5.53</b>	<b>42.31</b>	<b>6.08</b>	<b>0.30</b>

Tabla 5.10.- Ganancia solar, g (modelos m1 a m8). Período de integración de 1 día

Series	g (-)							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	N/A	N/A	0.09	0.07	0.00	0.02	0.00	0.00
02	N/A	N/A	0.08	0.07	0.00	0.04	0.00	0.00
03	N/A	N/A	0.06	0.06	0.00	0.07	0.00	0.00
04	N/A	N/A	0.06	0.07	0.00	0.05	0.00	0.00
05	N/A	N/A	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00
06	N/A	N/A	0.07	0.02	0.00	-0.02	0.00	0.00
07	N/A	N/A	0.10	-0.12	0.00	-0.04	0.00	0.00
08	N/A	N/A	0.10	0.25	0.00	0.08	0.00	0.00
09	N/A	N/A	0.07	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
10	N/A	N/A	0.11	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00
11	N/A	N/A	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05
12	N/A	N/A	0.04	0.05	0.06	0.02	0.08	0.08
13	N/A	N/A	0.05	0.05	0.06	0.02	0.05	0.07
14	N/A	N/A	0.06	0.06	0.06	0.02	0.08	0.07
15	N/A	N/A	0.05	0.05	0.07	0.05	0.02	0.02
16	N/A	N/A	-0.01	0.03	0.07	0.04	0.07	0.09
17	N/A	N/A	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
18	N/A	N/A	0.09	0.06	0.05	0.03	0.06	0.07
19	N/A	N/A	0.02	-0.03	-0.01	-0.06	0.04	-0.03
20	N/A	N/A	0.06	0.09	-0.04	0.05	-0.06	-0.09
21	N/A	N/A	-0.02	-0.07	-0.03	-0.04	-0.03	-0.01
22	N/A	N/A	0.02	0.12	0.12	0.05	0.11	0.33
23	N/A	N/A	-0.06	-0.07	-0.07	-0.06	-0.04	-0.05
24	N/A	N/A	0.04	0.12	0.18	0.04	0.19	0.12
25	N/A	N/A	0.02	0.02	0.04	-0.02	0.07	0.08
26	N/A	N/A	0.11	0.13	0.09	0.14	0.12	0.13
27	N/A	N/A	0.05	-0.15	-0.09	-0.06	0.23	0.24
28	N/A	N/A	0.06	0.06	0.07	0.00	0.12	0.09
29	N/A	N/A	0.06	0.05	0.05	0.04	0.08	0.04
30	N/A	N/A	0.10	0.10	0.10	0.09	0.13	0.17
31	N/A	N/A	0.07	0.06	0.07	0.01	0.12	0.11
32	N/A	N/A	0.07	0.07	0.10	0.01	0.12	0.12
33	N/A	N/A	0.07	0.07	0.09	0.01	0.09	0.09
34	N/A	N/A	0.07	0.08	0.07	0.01	0.02	0.02
35	N/A	N/A	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08
36	N/A	N/A	0.07	0.07	0.07	0.00	0.10	0.09
<b>Media</b>	N/A	N/A	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>
<b>DesvEst</b>	N/A	N/A	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.08</b>

Tabla 5.11.- Ganancia solar, g (modelos m1 a m8). Período de integración de 5 días

Series	g (-)							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	N/A	N/A	0.03	0.03	N/A	N/A	N/A	N/A
02	N/A	N/A	0.07	0.16	N/A	N/A	N/A	N/A
03	N/A	N/A	0.06	0.05	0.05	0.06	0.01	0.01
04	N/A	N/A	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07
05	N/A	N/A	0.04	0.00	0.01	-0.01	0.03	0.02
06	N/A	N/A	0.10	0.11	0.11	0.13	0.15	0.11
07	N/A	N/A	0.08	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06
<b>Media</b>	N/A	N/A	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>
<b>DesvEst</b>	N/A	N/A	<b>0.02</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>

Tabla 5.12.- Ganancia solar, g (modelos m1 a m8). Período de integración de 10 días

Series	g (-)							
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
01	N/A	N/A	0.06	0.05	0.00	-0.02	0.00	0.00
02	N/A	N/A	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
03	N/A	N/A	0.05	0.11	0.11	0.10	0.20	0.24
04	N/A	N/A	0.07	0.07	0.05	0.08	0.03	0.07
<b>Media</b>	N/A	N/A	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.10</b>	<b>0.12</b>
<b>DesvEst</b>	N/A	N/A	<b>0.01</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>



Utilizando el modelo más simple inicial, ver Ec. 5.6, que supone que la transmisión de calor es solo debida a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del muro considerando despreciables todas las demás variables físicas. Se obtienen valores de  $U$  que presentan poca dispersión cuando se estudian solo las series de datos correspondientes al período de invierno, como se muestra en la Figura 5.6a, y esto sucede para los diferentes períodos de integración. Para las diferentes series con datos registrados en verano se observa un comportamiento similar entre las distintas series, ver Figura 5.6b. Sin embargo, una comparación entre los resultados obtenidos en invierno y verano muestra una discrepancia considerable entre ellos. Y estas diferencias se observan incluso empleando períodos de integración más largos. Los resultados para un período de integración de 9 días pueden verse en la Figura 5.6c. Por este motivo, el modelo inicial debe ser considerado no válido y debe pasarse a utilizar modelos más complejos para estimar el valor de  $U$  de una forma correcta, ya que la variación observada no puede ser explicada desde un punto de vista físico.

Con lo que, para tratar de resolver el problema observado con la estimación de  $U$ , el modelo 1 incluye un término independiente para agrupar todas las contribuciones al balance energético que no fueron tenidas en cuenta inicialmente. Las Figuras 5.7 y 5.8 presentan los resultados obtenidos para las distintas series a lo largo del tiempo de experimentación y para los distintos períodos de integración de 1 a 10 días. Donde puede observarse como hay una alta dispersión para los resultados de  $U$  y del término independiente cuando se toman períodos de integración de 1 día, pero como esta dispersión va disminuyendo a medida que el período de integración aumenta. Además como se observa para este modelo si se comparan las Figuras 5.6c y 5.8q, la diferencia no es apreciable entre las diferentes series de verano e invierno. Notándose que el término independiente mantiene un valor negativo para períodos de integración altos que hace intuir la necesidad de incluir algún nuevo término en la ecuación de balance energético que compense esa tendencia.

El modelo 2 se probó considerando que es el efecto de la radiación solar el principal causante de la tendencia negativa en el término independiente, por lo que se evaluó el resultado de analizar solo periodos de noche.

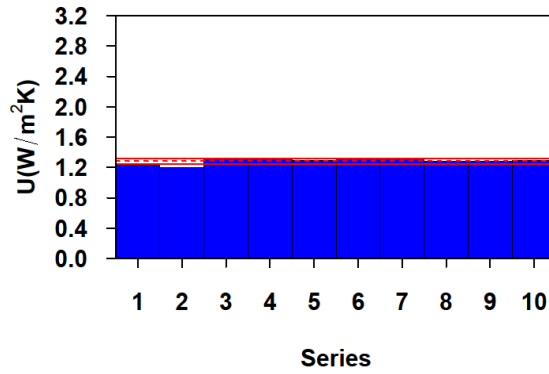
El modelo 3 pasa a incluir el efecto de la radiación solar directamente en la ecuación de balance, pero por considerar a este efecto incluido como principal causante de la tendencia negativa no incluye término independiente.

El modelo 4 ya pasa a suponer que pueden existir otros factores que afecten a la ecuación de balance energético por lo que incluye un término independiente además de la radiación solar.

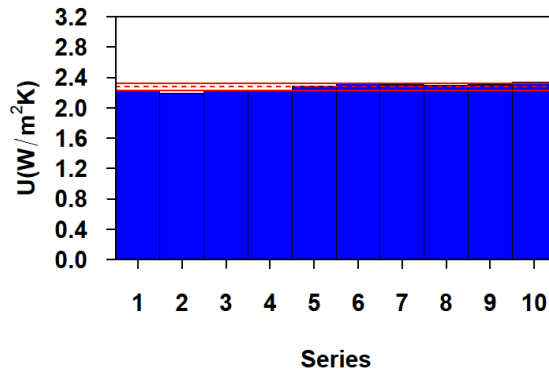
La Figura 5.9 presenta los resultados que se obtienen a partir del modelo 3 para cada serie de datos correspondiente a los períodos de integración de 1 a 10 días. Las gráficas muestran la misma tendencia respecto a la dispersión de los valores estimados de  $U$  usando todos los datos disponibles y cómo mejora cuando incrementa el período de integración empleado para la estimación. Más concretamente, la dispersión de  $U$  es más baja que en el modelo 1 para todos los períodos de integración como puede observarse comparando las Figuras 5.7 y 5.8 con la Figura 5.9.

El modelo 1 puede compararse con los modelos 2, 3 y 4 para el período de integración de 1 día observando las Figuras 5.3a, 5.3c, 5.9a y 5.3e respectivamente, el valor estimado de  $U$  usando todos los modelos para períodos de integración de 1 día muestra una mayor dispersión para los modelos 1, 2 y 4 que para el modelo 3. Si se toman en cuenta los modelos 2 y 4, el término independiente presenta un comportamiento que alterna valores negativos con positivos, y oscila más suavemente cuando se consideran períodos de noche solamente sin tener en cuenta por tanto la radiación solar.

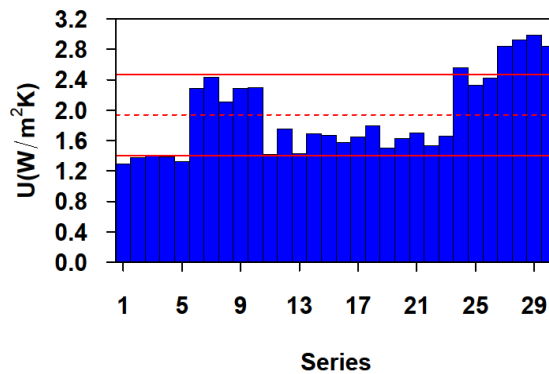
Respecto a la influencia de los períodos de integración en la estimación de  $U$  la mejoría es observada en la Figura 5.9 para el modelo 3 conforme éstos van aumentando de 1 a 5 días, y análogamente puede observarse para los



(a) Resultados obtenidos considerando diferentes períodos de integración utilizando los datos de las series número 1 (invierno,  $T_i > T_e$ ).

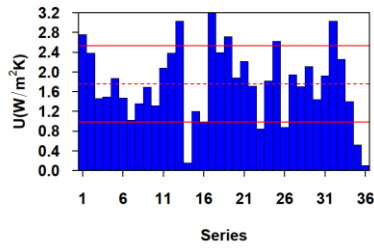


(b) Resultados obtenidos considerando diferentes períodos de integración utilizando los datos de las series número 1 (verano,  $T_i < T_e$ ).

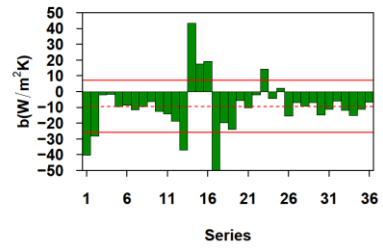


(c) Resultados utilizando las series 1 a 30 considerando un periodo de integración de 5 días.

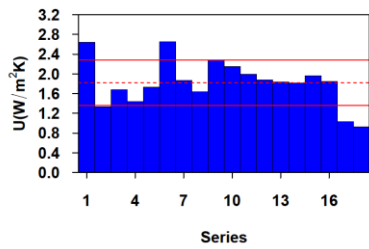
Figura 5.6.- Valor de U estimado suponiendo que  $T_i - T_e$  es el único efecto que tiene influencia en la densidad de flujo de calor medida en la superficie interior.



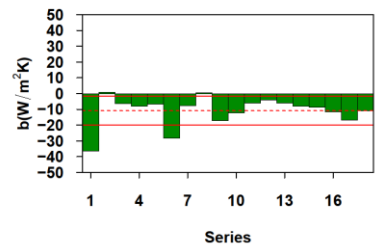
(a) Valor de U, período de integración: 1día.



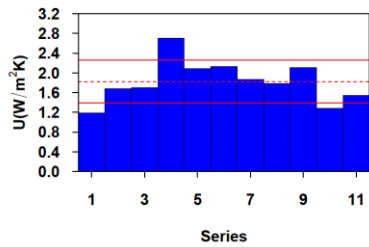
(b) Valor de b, período de integración: 1día.



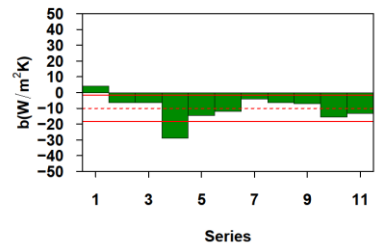
(c) Valor de U, período de integración: 2días.



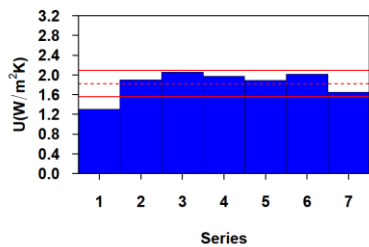
(d) Valor de b, período de integración: 2días.



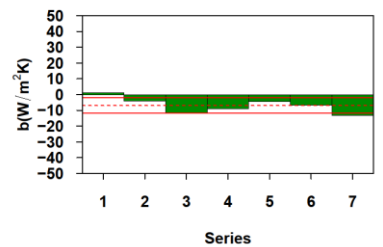
(e) Valor de U, período de integración: 3días.



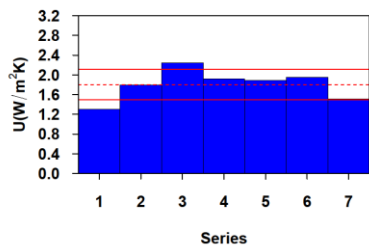
(f) Valor de b, período de integración: 3días.



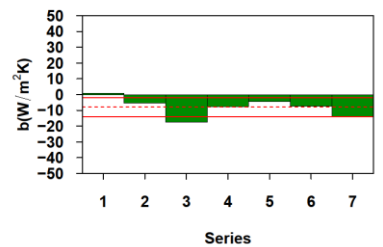
(g) Valor de U, período de integración: 4días.



(h) Valor de b, período de integración: 4días.

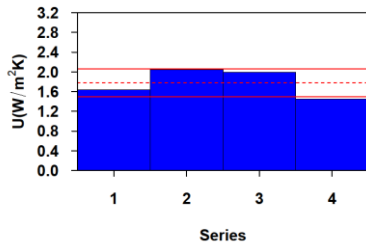


(i) Valor de U, período de integración: 5días.

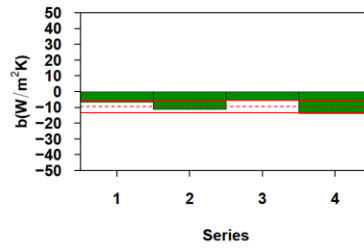


(j) Valor de b, período de integración: 5días.

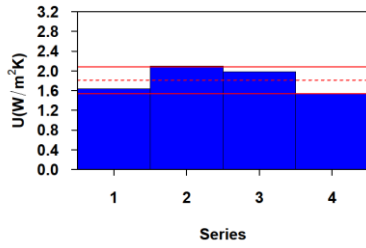
Figura 5.7.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 1, con  $T_i$ - $T_e$  y b.



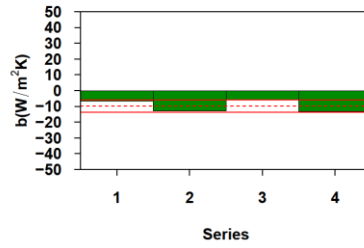
(k) Valor de U, período de integración: 6días.



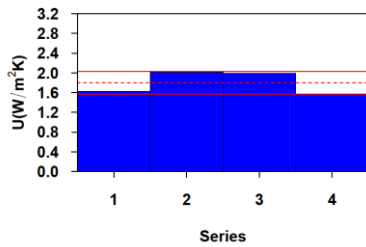
(l) Valor de b, período de integración: 6días.



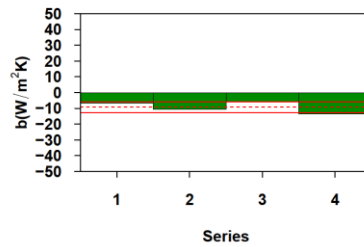
(m) Valor de U, período de integración: 7días.



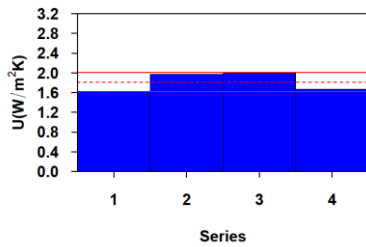
(n) Valor de b, período de integración: 7días.



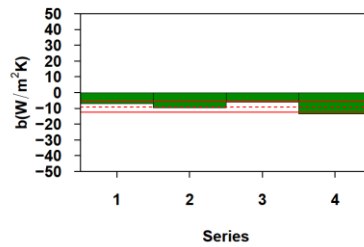
(o) Valor de U, período de integración: 8días.



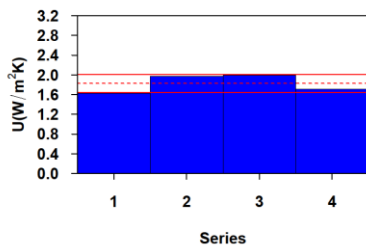
(p) Valor de b, período de integración: 8días.



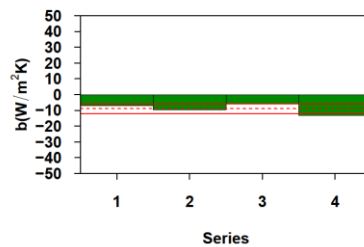
(q) Valor de U, período de integración: 9días.



(r) Valor de b, período de integración: 9días.

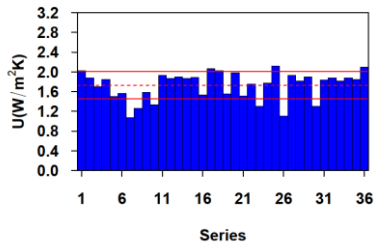


(s) Valor de U, período de integración: 10días.

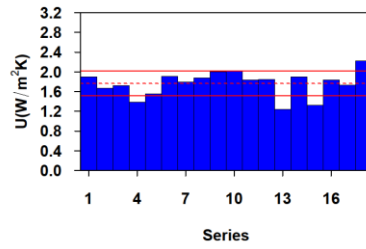


(t) Valor de b, período de integración: 10días.

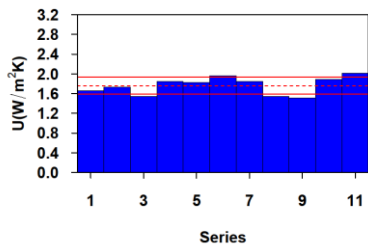
Figura 5.8.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 1, con  $T_i$ - $T_e$  y b.



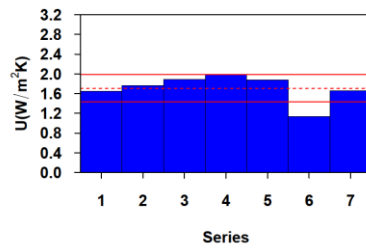
(a) Período de integración: 1día.



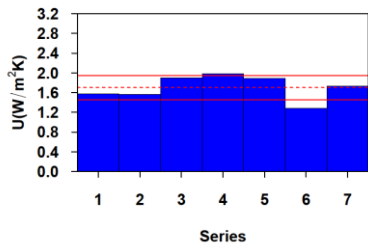
(b) Período de integración: 2días.



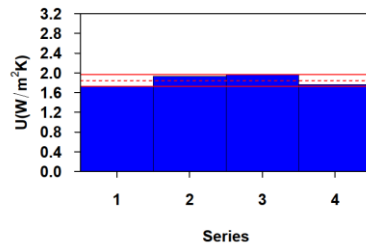
(c) Período de integración: 3días.



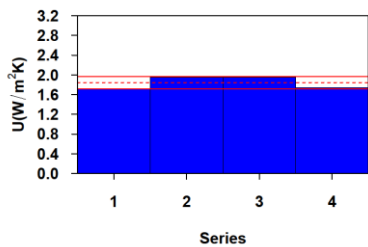
(d) Período de integración: 4días.



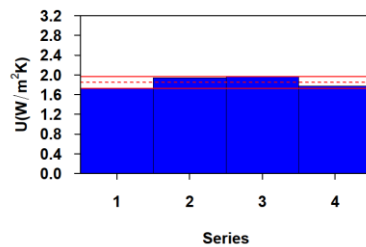
(e) Período de integración: 5días.



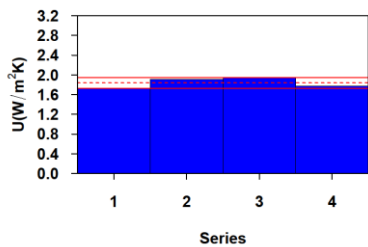
(f) Período de integración: 6días.



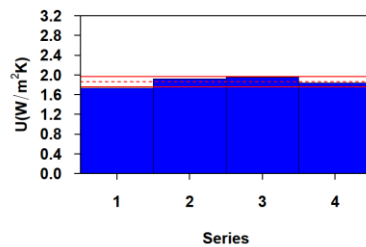
(g) Período de integración: 7días.



(h) Período de integración: 8días.



(i) Período de integración: 9días.



(j) Período de integración: 10días.

Figura 5.9.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 3, con Ti-Te, Gv sin b.

modelos 2 y 4 observando las Figuras 5.3c y 5.4c, y las Figuras 5.3e y 5.4e. La tendencia se observa en la Figura 5.9 de forma significativa cuando el período de integración se incrementa,

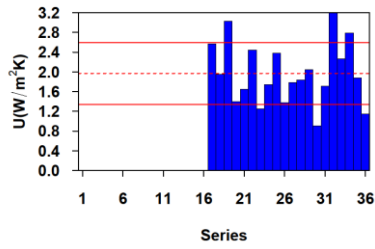
para el modelo 3, y para los modelos 2 y 4 considerando por ejemplo los períodos de integración, de 1 y 5 días, comparando las Figuras 5.3c y 5.3e con las Figuras 5.4c y 5.4e. El efecto producido en el término independiente puede observarse comparando las Figuras 5.3d y 5.3f, y las Figuras 5.4d y 5.4f, donde se aprecia que éste es cercano a cero, siempre negativo en el caso del modelo 2 que solo considera períodos de noche y alternando su signo para el modelo 3 que considera la radiación solar y utiliza todos los datos disponibles.

Los modelos 5 y 6 que consideran en la ecuación de balance energético la velocidad del viento y la radiación de onda larga en la parte exterior del muro, respectivamente, muestran una alta dispersión cuando se observan los resultados para períodos de integración de 1 día. Esta dispersión, tanto en la estimación de  $U$ , como en la estimación del término independiente, muestra una tendencia a decrecer como en los modelos anteriores cuando aumenta el período de integración hasta 5 días como puede observarse comparando las Figuras 5.3g y 5.4g, y las Figuras 5.3i y 5.4i. Cuando el período de integración es de 5 días se observa una importante mejoría es observada en los modelos 5 y 6 más allá de la observada en los modelos anteriores si se comparan las Figuras 5.4g y 5.4i con las Figuras 5.4a, 5.4c y 5.4e.

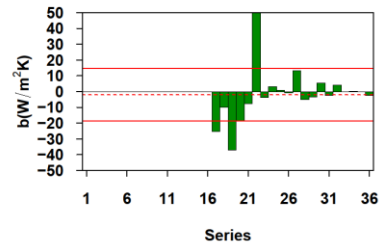
Fijándonos en la Figura 5.4 para el período de integración de 5 días, el modelo 7 que es el que considera de una forma más detallada la ecuación de balance energético, presenta también una dispersión baja para los valores estimados de  $U$  y del término independiente, que se reduce con el período de integración, pero no mejora los resultados obtenidos por los modelos 5 y 6 que consideran la velocidad del viento y la radiación de onda larga de la superficie exterior por separado.

Finalmente, en las Figuras 5.10 y 5.11 se presentan los resultados obtenidos para el modelo 8, que equivale al modelo 7 con la inclusión de un término adicional que representa la cantidad de energía en forma de calor que acumula el muro a lo largo del período de integración que se considere. Y como en todos los modelos anteriores se observa la mejoría en las estimaciones de  $U$  cuando el período de integración aumenta hasta 5 días. Con lo que el término de acumulación empleado no ayuda a reducir el período de integración necesario para obtener una estimación óptima de  $U$  como podía esperarse en un principio. No obstante puede observarse una mejoría respecto de los resultados obtenidos por el modelo 7, en cuanto que se observa una menor dispersión en los resultados y valores más bajos del término independiente.

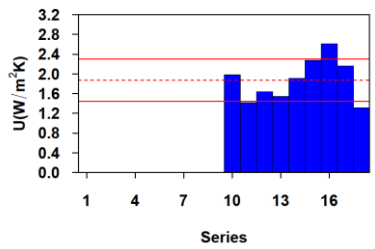
Respecto al valor de  $g$ , que puede observarse en las Tablas 5.10, 5.11 y 5.12, es importante destacar que aunque la radiación solar ha quedado demostrado que tiene una influencia significativa importante, los valores obtenidos por el método de regresión lineal de las medias presentan una dispersión cercana al propio valor de  $g$  para todas las series y períodos de integración analizados.



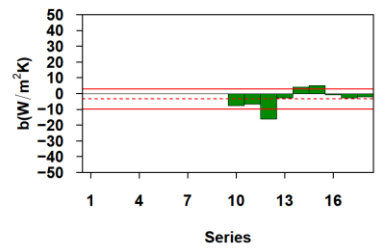
(a) Valor de U, período de integración: 1día.



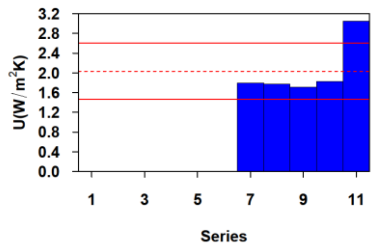
(b) Valor de b, período de integración: 1día.



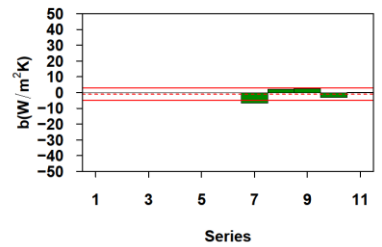
(c) Valor de U, período de integración: 2días.



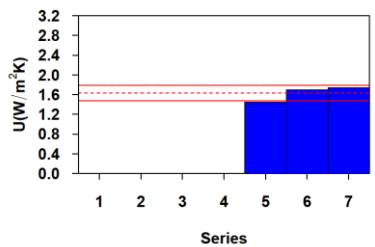
(d) Valor de b, período de integración: 2días.



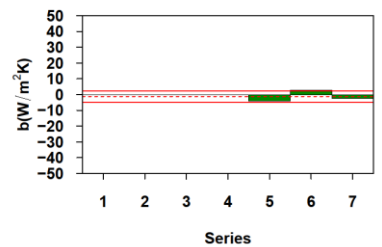
(e) Valor de U, período de integración: 3días.



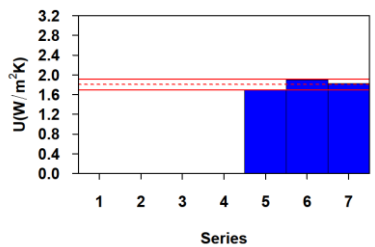
(f) Valor de b, período de integración: 3días.



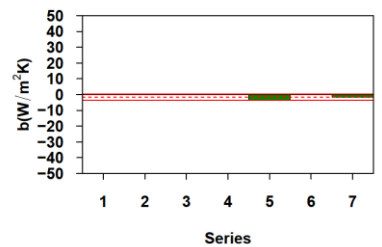
(g) Valor de U, período de integración: 4días.



(h) Valor de b, período de integración: 4días.

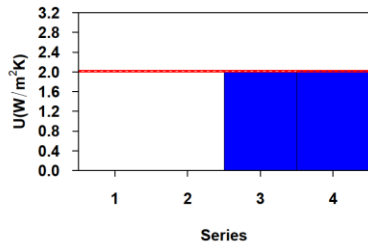


(i) Valor de U, período de integración: 5días.

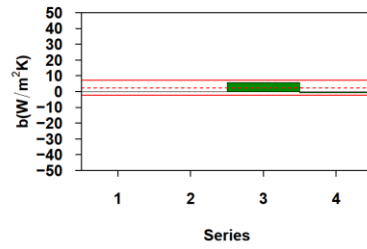


(j) Valor de b, período de integración: 5días.

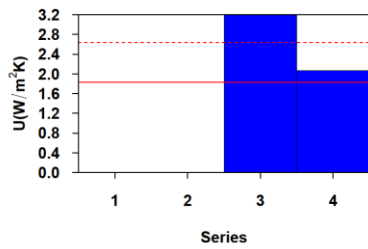
Figura 5.10.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 8, con Ti-Te, Gv, w, Tse4, Gir, C y b.



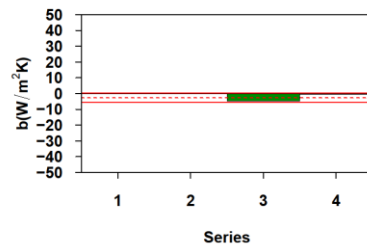
(k) Valor de U, período de integración: 6días.



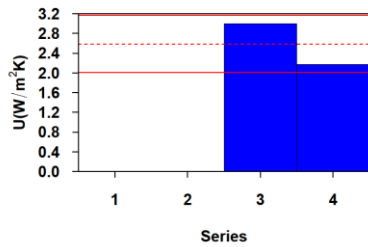
(l) Valor de b, período de integración: 6días.



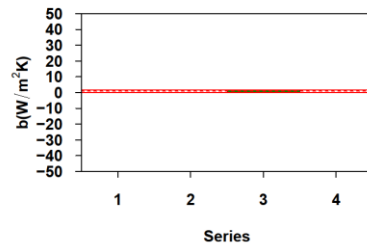
(m) Valor de U, período de integración: 7días.



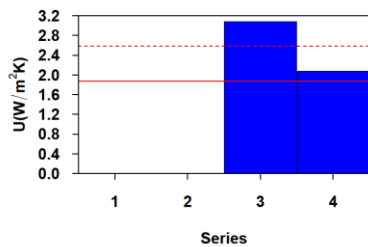
(n) Valor de b, período de integración: 7días.



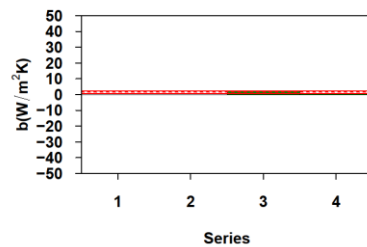
(o) Valor de U, período de integración: 8días.



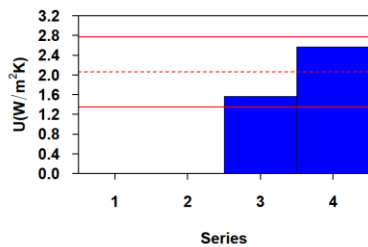
(p) Valor de b, período de integración: 8días.



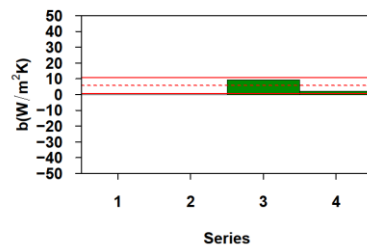
(q) Valor de U, período de integración: 9días.



(r) Valor de b, período de integración: 9días.



(s) Valor de U, período de integración: 10días.



(t) Valor de b, período de integración: 10días.

Figura 5.11.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 8, con Ti-Te, Gv, w, Tse4, Gir, C y b.



#### 5.4.- Conclusiones

Se han estudiado las capacidades y limitaciones del método de regresión lineal de los valores medios de las variables físicas que se han supuesto como causantes de la transmisión de calor a través del muro. Habiéndose identificado por una parte el período mínimo de ensayo necesario para poder aplicar el método para obtener una estimación óptima de  $U$ , y por otra parte la influencia de las distintas variables físicas que se consideraba podían tener influencia en la estimación óptima de  $U$ .

El estudio se ha llevado a cabo suponiendo que se estaba estudiando un muro simple, opaco y homogéneo, y se han empleado los datos registrados a lo largo de un año, distribuidos en series de igual longitud temporal obtenidos en condiciones meteorológicas reales de ensayo. De modo que se ha podido obtener una serie de conclusiones acerca de la validez y el alcance del método para identificar los parámetros que caracterizan la transmitancia térmica del muro, y en particular el valor de  $U$ .

Al variar los períodos de integración entre 1 y 10 días, ha podido observarse como los resultados para 1 día presentaban valores muy dispersos entre sí, mejorando éstos cuando se incrementaba el período de integración hasta 5 días, y manteniéndose estable superado este período y llegando a 10 días.

Cuando se han empleado solo datos correspondientes a períodos de noche no se ha observado ninguna mejora respecto a la posibilidad de emplear períodos de integración más cortos para estimar el valor de  $U$ , ni en cuanto a los propios valores de  $U$ .

Con respecto a las variables físicas necesarias para poder realizar el análisis, se ha observado la necesidad de incluir, además de la diferencia de temperaturas ambiente entre el interior y el exterior del muro, la radiación solar para evitar inconsistencias en la estimación del valor de  $U$  cuando cambiaban las condiciones de ensayo.

También se puede observar una mejora cuando se incorporan a la ecuación de balance energético los efectos de la velocidad del viento y de la radiación de onda larga, estos efectos son incluidos considerando que tienen una dependencia lineal de primer orden.

El término considerado para modelar el comportamiento del muro con respecto a la acumulación de calor en la ecuación de balance energético no ha mejorado los resultados.

De modo que para la aplicación del presente método de estimación de  $U$ , se ha observado como puntos a destacar la elección del período de integración y la de las variables que intervienen de forma significativa en la ecuación de balance energético. Y se debe resaltar que ambas elecciones son dependientes del elemento constructivo a caracterizar y de las condiciones del experimento.

La principal ventaja de este método es su simplicidad a la hora de ser aplicado, sin embargo, la obtención de resultados satisfactorios implica la utilización de períodos de integración grandes, lo que supone en la práctica que se requiera de mucho tiempo de experimentación para estimar de una forma óptima los parámetros que caracterizan, en este caso, a un muro simple.

## **VI**

# **CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UN MURO SIMPLE: ANÁLISIS DINÁMICO**

## 6.- Caracterización térmica de un muro simple: Análisis dinámico

### 6.1.- Introducción

En el presente Capítulo se estudiará el muro simple descrito en el Capítulo 4 aplicando métodos dinámicos de identificación de sistemas, en contraposición a los métodos de regresión considerados en el Capítulo 5, con el objetivo de comprobar las mejoras que pueden aportar estos métodos a la hora de poder identificar de una forma óptima los parámetros que caractericen a cada elemento constructivo respectivamente. Pudiendo hacerse además una comparación de forma cuantitativa de la identificación del método dinámico diferencial frente al integrado basado en la regresión lineal de promedios.

A continuación se procederá a mostrar, en primer lugar, las ecuaciones de balance energético que se combinarán con los modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, presentados en el Capítulo 3, que serán utilizados para la identificación de sistemas componiendo modelos de tipo caja gris. Que facilitarán la identificación de los parámetros térmicos característicos del muro objeto de estudio, en este caso la transmitancia térmica del muro,  $U$ , la absorptancia,  $\alpha$ , y la capacidad efectiva del muro  $C$ .

### 6.2.- Datos experimentales

Los datos analizados pertenecen al período comprendido entre el 5 de marzo y el 11 de octubre de 2010. Los datos son registrados cada minuto y la representación gráfica de parte de los datos, para una serie en período frío y otra en período caluroso, series 5 y 15, puede verse en la Figura 6.1. De modo que puede observarse la variación de las condiciones del ensayo experimental a lo largo de dicho período.

Observando la Figura 6.1, pueden apreciarse dos períodos de tiempo visiblemente diferenciados, el primero comienza en marzo y llega hasta la mitad de junio, donde la temperatura interior de la célula de ensayo es mayor que la temperatura exterior de forma muy significativa y la irradiancia solar vertical sobre el muro es alta. El segundo período abarca desde mediados de junio hasta octubre y la temperatura interior es inferior a la temperatura exterior pero de forma poco significativa y además la irradiancia solar vertical sobre el muro es baja.

Por su parte, el valor absoluto de la densidad de flujo de calor, que es debido principalmente a los dos efectos descritos en el párrafo anterior, es decir, la diferencia de temperaturas interior y exterior, y la irradiancia solar, presenta una variación dentro de un rango similar en todo el período de medida. En el primer período la energía térmica abandona la habitación, los dos efectos son altos y opuestos, y en el segundo período cuando la temperatura interior cambia la energía térmica entra en la habitación y los dos efectos se suman pero teniendo valores bajos, lo que provoca que los resultados tengan una incertidumbre mayor y dificulta el proceso de identificación, principalmente en la primera parte del segundo período cuando estos efectos presentan sus valores más bajos.

### 6.3.- Identificación de sistemas: Modelos de caja-gris

En la presente sección se procederá a la resolución del problema inverso empleando técnicas de identificación de sistemas a partir del uso de modelos en ecuaciones diferenciales estocásticas. Para lo cual se presentarán en primer lugar los detalles sobre la física de transmisión de calor que serán considerados, para posteriormente introducir las herramientas matemáticas empleadas en el método dinámico y que permitirán finalmente la identificación de los parámetros térmicos del muro por comparación, como corresponde al tipo de modelos de caja-gris que son utilizados [Naveros2011].

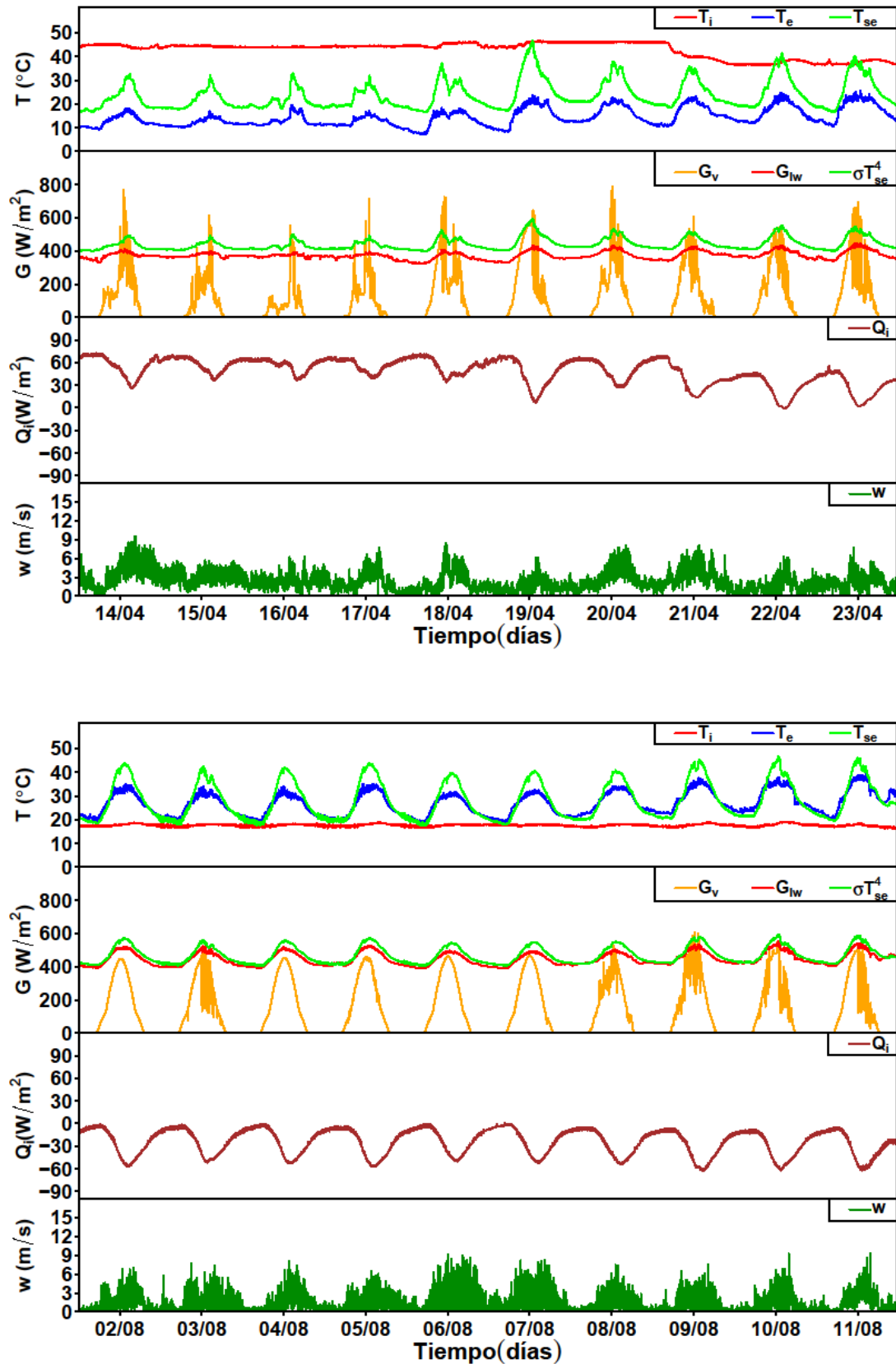


Figura 6.1.- Datos para las series 05 y 15, ubicadas en los meses de abril y agosto de 2010

### 6.3.1.- Ecuación de balance energético a través de un muro

En régimen estático la transferencia de energía en forma de calor a través de un cerramiento simple como el de nuestro experimento viene dada por [ISO9869]:

$$Q = U(T_i - T_e) \quad (6.1)$$

donde  $Q$  es la densidad de flujo de calor a través del muro,  $U$  es la transmitancia térmica y  $T_i$ ,  $T_e$  son las temperaturas ambiente interior y exterior, respectivamente. Esta ecuación supone que el flujo de calor puede ser explicado tan solo a la diferencia de temperaturas ambiente entre la parte interior y exterior del muro, y solo es válida bajo las condiciones que establece la norma ISO 9869 [ISO9869].

La Ec. 6.1 también puede ser empleada para estimar el valor de  $U$  en condiciones dinámicas de ensayo, siempre que se cumplan una serie de condiciones establecidas [ISO9869]. Para ello se utilizan los valores medios de las variables durante el intervalo de tiempo de ensayo que se considere, tal y como se ha hecho en la sección anterior, suponiendo que el resultado será igual al de un ensayo en condiciones estacionarias.

Por otra parte, en el capítulo anterior se ha demostrado que hay otras variables físicas que intervienen en el flujo de calor a través del muro. Por lo que también será necesario incluirlas para obtener una caracterización correcta del mismo a la hora de hacer un análisis dinámico completo.

La principal variable física que tiene influencia en el flujo de calor, en el muro, es la irradiancia solar global vertical,  $G_v$ , por lo que si la añadimos junto con una expresión que da cuenta del balance de radiación de onda larga del muro con sus alrededores, donde  $G_{lw}$  es la radiación de onda larga recibida,  $T_{se}$  es la temperatura de la superficie exterior del muro y  $\sigma$  en la constante de Stefan-Boltzmann. Con lo que la ecuación de balance quedará como puede verse en la Ec. 6.2.

$$Q = U(T_i - T_e) - gG_v - b'(G_{lw} - \sigma T_{se}^4) \quad (6.2)$$

La ecuación de balance energético puede obtenerse también a partir de la utilización de la conocida como temperatura sol-aire [O'Callaghan77, Tham10],  $T_{sa}$ , que se define como la temperatura efectiva que produce el flujo de calor a través de un cerramiento, su expresión viene dada por la Ec. 6.3.

$$T_{sa} = T_e + \frac{1}{h_{se}} [\alpha G_v + b(G_{lw} - \sigma T_{se}^4)] \quad (6.3)$$

donde  $\alpha$  es la absorptancia del muro,  $b$  es un parámetro dependiente del intercambio de energía de onda larga y  $h_{se}$  es el coeficiente de transmitancia térmica superficial.

De modo que la ecuación de balance energético (Ec. 6.1) puede escribirse como la Ec. 6.4.

$$Q = U(T_i - T_{sa}) \quad (6.4)$$

Entonces, la ecuación de balance energético puede reescribirse con el término de absorptancia explícitamente, como puede verse en las Ecs. 6.5 y 6.6.

$$Q = U \left( T_i - T_e - \frac{\alpha}{h_{se}} G_v - \frac{b}{h_{se}} (G_{lw} - \sigma T_{se}^4) \right) \quad (6.5)$$

$$Q = U(T_i - T_e) - \frac{U\alpha}{h_{se}} G_v - \frac{Ub}{h_{se}} (G_{lw} - \sigma T_{se}^4) \quad (6.6)$$

y comparando la Ec. 6.6 con la Ec.6.2 se obtiene la conocida relación mostrada en la Ec. 6.7 [Parsons97].

$$g = \frac{U\alpha}{h_{se}} \quad (6.7)$$

Donde el coeficiente de transmitancia solar se expresa como función de otros parámetros físicos que interesa identificar.

Dos parámetros importantes que se deben tener en cuenta son los coeficientes de transmitancia térmica superficial interior y exterior,  $h_{si}$  y  $h_{se}$ , que dependen a su vez tanto de un término convectivo, como de un término radiativo, y que forma parte de la definición de la transmitancia térmica,  $U$ , como se observa en la Ec. 6.8 [ISO6946].

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{se}} + \frac{1}{U_c} + \frac{1}{h_{si}} \quad (6.8)$$

La mayoría de las veces  $h_{se}$  y  $h_{si}$  son considerados constantes dentro de unos límites dados [O'Callaghan77]. En el presente estudio la resistencia superficial interior,  $R_{si}=1/h_{si}$ , será considerada constante y  $h_{se}$  se supondrá tanto que es constante, como que es solamente variable con la velocidad del viento (lo que supone implícitamente una dependencia con el término radiativo constante), la relación con la velocidad del viento será considerada con una dependencia lineal como se expresa en la Ec. 6.9.

$$h_{se} = h_{se}(w) \approx k_1 + k_2 w \quad (6.9)$$

donde  $k_1$  y  $k_2$  son supuestas constantes.

Además, hay referencias que justifican que la dependencia con el viento deber ser considerada no lineal bajo determinadas circunstancias [Sharples84, CIBSE06].

Por tanto, existen estudios que deben tenerse en cuenta a la hora de considerar diferentes formas de evaluar el valor de la transmitancia térmica superficial exterior,  $h_{se}$ , en función de las condiciones externas y la geometría de los elementos constructivos estudiados, para obtener una estimación adecuada de éste [CIBSE06, Watmuff77, Sharples98]. Pero en el presente trabajo, los rangos de valores que proporcionan estos estudios solo serán empleados para verificar que las estimaciones a partir de los datos experimentales están dentro de unos valores aceptables.

Otro parámetro característico que se intenta calcular de forma aproximada en el presente estudio es el término de acumulación de energía, con lo que se conseguirá una estimación para la capacidad efectiva del muro,  $C$ .

### 6.3.2.- Cálculo analítico de la temperatura superficial de un muro.

La temperatura superficial es una variable física importante a la hora de caracterizar el muro y por ello es necesario poder modelarla.

Lo primero a tener en consideración es que la temperatura superficial puede ser calculada, bajo ciertas suposiciones, por medio de la ecuación diferencial ordinaria, Ec. 6.10 [Gil06].

$$C_s \frac{dT_{se}}{dt} = -h_{se}A(T_{se} - T_e) - U_cA(T_{se} - T_{wi}) + \alpha AG_v \quad (6.10)$$

donde  $C_s$  es la capacidad efectiva de la superficie del muro,  $T_{se}$ ,  $T_e$  y  $T_{wi}$  son las temperaturas de la superficie exterior del muro, ambiente exterior y en un punto interior del muro, respectivamente,  $h_{se}$  es el coeficiente de transmitancia térmica superficial exterior,  $\alpha$  es la absorptancia del muro,  $A$  es el área del muro,  $U_c$  es el coeficiente conductivo de transmitancia térmica entre la superficie del muro y un punto interior del mismo, y  $G_v$  es la irradiancia solar vertical global.

Para simplificar la manipulación de la Ec. 6.10 se introducirán las relaciones mostradas en las Ecs. 6.11 y 6.12.

$$k = \frac{h_{se} + U_c}{C_s} A \quad (6.11)$$

$$T_\infty = \frac{h_{se}}{h_{se} + U_c} T_e + \frac{U_c}{h_{se} + U_c} T_{wi} + \frac{\alpha}{h_{se} + U_c} G_v \quad (6.12)$$

De manera que la Ec. 6.10 puede escribirse de forma más compacta como la Ec. 6.13.

$$\frac{dT_{se}}{dt} + kT_{se} = kT_\infty \quad (6.13)$$

cuya solución viene dada por la Ec. 6.14.

$$T_{se} = (T_{s0} - T_\infty)e^{-kt} + T_\infty \quad (6.14)$$

donde  $T_{s0}$  es la temperatura inicial de la superficie.

Las relaciones presentadas no pretenden dar una solución general de la temperatura superficial del muro, solo mostrar bajo unas condiciones dadas de que variables depende dicha temperatura superficial. Siempre y cuando  $C_s$  pueda considerarse despreciable, como será supuesto para los modelos presentados en el presente trabajo, la temperatura superficial vendrá dada aproximadamente por la Ec. 6.12 [Ghiaus13]

### 6.3.3.- Modelos candidatos considerados basados en ecuaciones diferenciales estocásticas

En la presente sección se presentan los modelos candidatos basados en ecuaciones diferenciales estocásticas que han sido considerados para obtener los parámetros térmicos necesarios para caracterizar el muro.

Se han considerado tres modelos, el modelo 1 con un estado no medido y los modelos 2a y 2b que tienen dos estados no medidos.

Tanto en el modelo 1 como en el modelo 2b, se ha realizado un estudio suponiendo  $h_{se}$  constante por un lado, y suponiéndolo variable con la velocidad del viento por otro.

A continuación se indican las distintas variables y parámetros que forman parte de los modelos:

Variables medidas:

- $T_{se}$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  son las temperatura superficial, exterior e interior ambiente, respectivamente.
- $Q_i$ ,  $G_v$  son la densidad de flujo de calor a través de la superficie interior del muro y la irradiancia solar vertical global.

Variables de estado

- $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  son temperaturas en el interior del muro que no se han medido directamente.

Parámetros estimados:

- $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $h_{se}$  son coeficientes de transmitancia térmica del muro y el coeficiente de transmitancia térmica superficial del muro, respectivamente.
- $C_1$ ,  $C_2$  son las capacidades térmicas efectivas de parte del muro.
- $b$  es un parámetro que depende del modo en que el muro intercambia energía de onda larga con sus alrededores.
- $\alpha$  es la absorptancia del muro.

### 6.3.3.1.- Modelo de un estado no medido

La Figura 6.2 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través del muro.

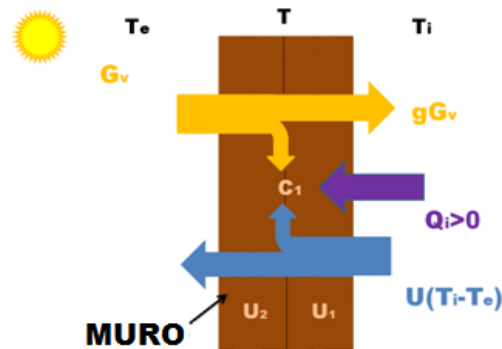


Figura 6.2.- Esquema del flujo de calor del muro considerando un estado interior no medido.

La ecuación de estado que describe el balance de energía vendría dada por la Ec. 6.15.

$$dT = \left[ \frac{U_2}{C_1} (T_e - T) + \frac{U_1}{C_1} (T_i - T) + \frac{U_2 \alpha}{C_1 h_{se}} G_v + \frac{U_2 b}{C_1 h_{se}} (G_{lw} - \sigma T_{se}^4) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad (6.15)$$

donde  $T$  es la variable de estado no medida. Y por otra parte, la ecuación de observación será la Ec. 6.16.

$$Q_i = U_1 (T_i - T) + e_1 \quad (6.16)$$

Como se ha mencionado previamente, este modelo 1 se estudiará bajo dos suposiciones:



- m1: suponiendo que  $h_{se}$  es constante.
- m1w: suponiendo que  $h_{se}$  es linealmente dependiente con la velocidad del viento.

### 6.3.3.2.- Modelo de dos estados no medidos

La Figura 6.3 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor, a través del muro, en el caso de suponer que tenemos dos variables de estado no medidos.

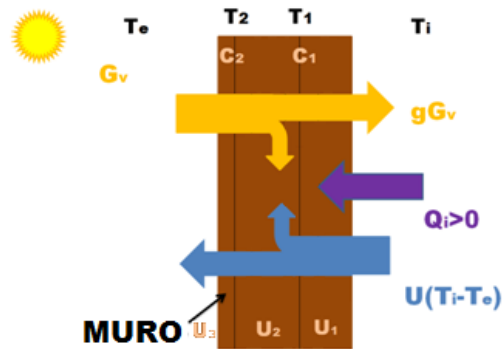


Figura 6.3.- Esquema del flujo de calor en el muro considerando dos estados intermedios no medidos.

A partir del esquema de la Figura 6.3 podemos obtener, las correspondientes ecuaciones para cada estado, Ecs. 6.17 y 6.18,

$$dT_1 = \left[ \frac{U_2}{C_1} (T_2 - T_1) + \frac{U_1}{C_1} (T_i - T_1) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad (6.17)$$

$$dT_2 = \left[ \frac{U_3}{C_2} (T_e - T_2) + \frac{U_2}{C_2} (T_1 - T_2) + \frac{U_3 \alpha}{C_2 h_{se}} G_v + \frac{U_3 b}{C_2 h_{se}} (G_{lw} - \sigma T_{se}^4) \right] dt + \sigma_{22} d\omega_t \quad (6.18)$$

donde  $T_1$  y  $T_2$  son los dos estados no medidos.

En este caso se dispondrá de dos ecuaciones de observación inicialmente Ecs. 6.19 y 6.20.

$$Q_i = U_1 (T_i - T) + e_{11} \quad (6.19)$$

$$T_{se} = T_2 + e_{22} \quad (6.20)$$

También será utilizada, como alternativa a la Ec. 6.20, la ecuación de observación mostrada a continuación, Ec. 6.21.

$$T_{se} = a_1 T_e + a_2 T_2 + a_3 G_v + e_{22} \quad (6.21)$$

donde se supondrá que la temperatura de la superficie del muro es función de  $T_e$ ,  $T_2$  y  $G_v$ , ver Ec. 6.12.

Este modelo se estudiará bajo las siguientes hipótesis:

- m2a: utilizando la Ec. 6.20 de observación, y suponiendo que  $h_{se}$  es constante
- m2b: utilizando la Ec. 6.21 de observación, y suponiendo que  $h_{se}$  es constante
- m2bw: utilizando la Ec. 6.21 de observación, y suponiendo que  $h_{se}$  es linealmente dependiente con la velocidad del viento

### 6.3.4.- Identificación de los parámetros físicos

A partir de los modelos mostrados en la sección anterior pueden obtenerse algunos de los parámetros físicos que son considerados necesarios para describir y caracterizar el comportamiento térmico del muro.

En todos los modelos presentados la identificación de la absorptancia puede hacerse directamente, ver Ecs. 6.15 y 6.18.

La capacidad efectiva por su parte es obtenida mediante la expresión que puede verse en la Ec. 6.22.

$$C = \sum_i C_i A \quad (6.22)$$

donde  $C_i$  son las capacidades efectivas del muro correspondientes a cada estado que es estimado, y  $A$  es el área del muro.

El valor de la transmitancia térmica  $U$  se obtiene a partir de la identificación de los parámetros obtenidos en los modelos, como se muestra en la Ec. 6.23.

$$\frac{1}{U} = \sum_i \frac{1}{U_i} \quad (6.23)$$

donde  $U_i$  son las transmitancias térmicas parciales estimadas a partir de cada modelo, para cada caso en concreto.

## 6.4.- Resultados y discusión

### 6.4.1.- Introducción

En la sección anterior se han presentado los modelos matemáticos que fueron empleados para obtener los parámetros térmicos del muro. A continuación se procederá a mostrar los resultados más relevantes que han sido obtenidos a partir de ellos y se discutirán brevemente las consecuencias de éstos.

En primer lugar se presentarán los resultados asociados al modelo 1, de un estado. Con el que es posible obtener la transmitancia térmica  $U$ , la absorptancia  $\alpha$  y la capacidad efectiva del muro  $C$ .

Después se mostrarán los resultados del modelo de dos estados no medidos y se verán las diferencias entre los modelos 2a y 2b, detallándose el motivo por el que es más apropiado el modelo 2b, también se discutirán las ventajas e inconvenientes que presenta el utilizar modelos de dos estados en lugar de uno.

Antes de pasar a presentar los resultados, se comentarán algunos detalles a tener en cuenta para comprender mejor el porqué de la utilización de estos modelos y no otros más complejos, además se comentará brevemente el motivo por el que no se considerará en los resultados el parámetro relativo al término de balance energético de radiación de onda larga.

En cuanto a aumentar la complejidad de los modelos estocásticos empleados, se estudió la posibilidad de incluir más estados para tratar de comprobar si la descripción del muro podía ser más precisa aumentando la complejidad de su estudio. Pero los resultados no fueron satisfactorios debido a que no había mejora significativa en la estimación de parámetros, y sin embargo el cálculo y la identificación pasaban a ser más complejos.

Por su parte, todos los modelos presentan un término asociado al balance de longitud de onda larga entre el muro y sus alrededores, este término fue tenido en cuenta en los cálculos obteniéndose valores para el parámetro ligado a él muy próximos a cero. Ese resultado no implica que el valor del parámetro sea cero, sino que da cuenta de que la inclusión del término de balance de radiación de onda larga no mejora la ecuación de balance para el caso estudiado.

#### 6.4.2.- Período de muestra y tiempo de muestreo

Los datos para realizar los cálculos que proporcionan los parámetros buscados han sido divididos en 21 períodos de 10 días cada uno. Se han tomado períodos de 10 días por ser el período típico considerado en trabajos previos. No obstante, en futuros estudios sería interesante el realizar pruebas para tratar de ajustar este período.

En la Tabla 6.1 pueden verse las fechas a las que corresponde cada serie de datos.

El disponer de un conjunto de datos extenso ha permitido estudiar la robustez de los resultados bajo diferentes condiciones de ensayo y evaluar la idoneidad de los datos obtenidos bajo dichas condiciones, que además ha permitido el ensayar el experimento con diferentes condiciones de entorno. Lo cual proporciona una mayor fiabilidad a los resultados obtenidos.

Inicialmente, una vez tomados los períodos de 10 días para hacer el estudio, se procedió a comprobar cuál era el mejor tiempo de muestreo para hacer el análisis. Los valores de las distintas variables medidas son registrados cada minuto, con lo que inicialmente este fue el tiempo de muestreo empleado para proceder a su análisis.

Tabla 6.1.- Series de datos con la fecha de su registro

<b>Serie</b>	<b>Fecha</b>
01	05/03/2010 - 14/03/2010
02	15/03/2010 - 24/03/2010
03	25/03/2010 - 03/04/2010
04	04/04/2010 - 13/04/2010
05	14/04/2010 - 23/04/2010
06	24/04/2010 - 03/05/2010
07	04/05/2010 - 13/05/2010
08	20/05/2010 - 29/05/2010
09	30/05/2010 - 08/06/2010
10	09/06/2010 - 18/06/2010
11	23/06/2010 - 02/07/2010
12	03/07/2010 - 12/07/2010
13	13/07/2010 - 22/07/2010
14	23/07/2010 - 01/08/2010
15	02/08/2010 - 11/08/2010
16	12/08/2010 - 21/08/2010
17	22/08/2010 - 31/08/2010
18	01/09/2010 - 10/09/2010
19	11/09/2010 - 20/09/2010
20	21/09/2010 - 30/09/2010
21	01/10/2010 - 10/10/2010

Un resultado de este análisis de residuos preliminar, para la serie 14 correspondiente al período del 14 al 23 de abril de 2010, puede verse en la Figura 6.4.

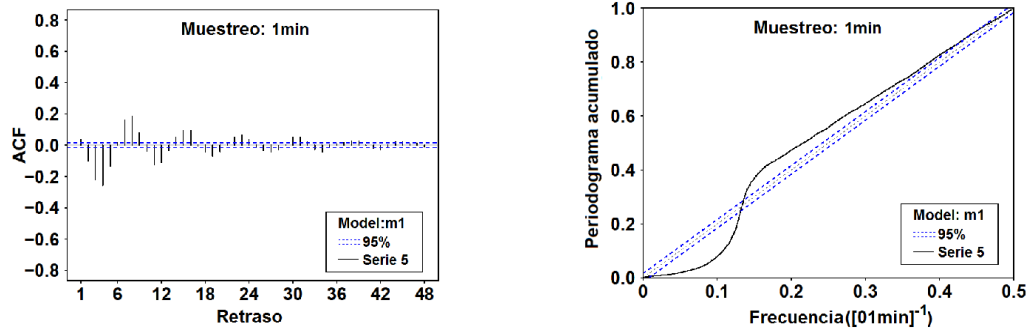


Figura 6.4.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos, con un minuto de tiempo de muestreo

En la Figura 6.4 puede observarse que existe una fuerte correlación para las frecuencias altas, tanto en la gráfica de autocorrelación como en la del períodograma acumulado de los residuos [Naveros11]. Por lo que esta frecuencia fue descartada dado que la fluctuación de las medidas introduce una perturbación que se ve reflejada en los cálculos.

Una vez detectado el problema, se procedió a aumentar el tiempo de muestreo hasta que se observó que tomando 30 minutos el análisis de los residuos ofrecía mejores resultados, ver Figura 6.5, y las estimaciones de los parámetros mejoraban sin llegar a perder precisión.

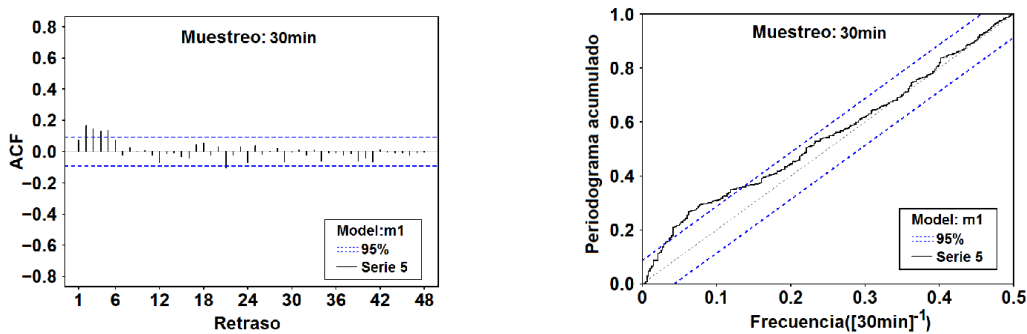


Figura 6.5.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos, con treinta minutos de tiempo de muestreo

Una vez finalizada esta breve discusión, pasaremos a mostrar los resultados obtenidos con los distintos modelos de uno y dos estados. Ya que la utilización de más estados, aun siendo posible, ha demostrado en pruebas iniciales un empeoramiento debido a lo que puede ser considerado como una sobreparametrización de los modelos. Con lo que ha prevalecido la aportación de sencillez para la propia reducción del coste temporal que supone el emplear modelos excesivamente complejos, cuando éstos no demuestran aportar mejoras significativas.

### 6.4.3.- Modelo de un estado no medido

#### 6.4.3.1.- Estimación de los parámetros

El modelo 1 fue aplicado utilizando las series de datos mostradas en la Tabla 6.1.

Como se mencionó previamente, este modelo fue utilizado para calcular los parámetros característicos del muro haciendo dos suposiciones. La primera consideraba  $h_{se}$  constante y la

segunda lo consideraba dependiente linealmente de la velocidad del viento. Los resultados pueden verse en la Tablas 6.2 y 6.3, respectivamente. En ellas se muestran, para todas las series, los valores de la transmitancia térmica U, la capacidad efectiva, C, la absorptancia,  $\alpha$ , y el parámetro de máxima verosimilitud estimado, Logver.

Tabla 6.2.- Parámetros del modelo 1 sin considerar la velocidad del viento (m1)

Serie	U(W/m2K)	Logver	C(J/K)	$\alpha$
01	1.965 ± 0.037	-893	(1.19 ± 0.19)·10 <sup>6</sup>	0.76 ± 12.12
02	1.984 ± 0.023	-829	(5.95 ± 0.48)·10 <sup>5</sup>	0.75 ± 06.62
03	2.097 ± 0.033	-919	(7.73 ± 0.77)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 11.68
04	2.065 ± 0.031	-900	(7.53 ± 0.75)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 09.05
05	2.003 ± 0.031	-824	(7.29 ± 0.69)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 09.54
06	2.038 ± 0.046	-728	(7.82 ± 0.75)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 02.44
07	2.046 ± 0.042	-912	(6.52 ± 0.61)·10 <sup>5</sup>	0.74 ± 07.79
08	1.966 ± 0.032	-672	(9.47 ± 0.68)·10 <sup>5</sup>	0.68 ± 02.56
09	1.941 ± 0.033	-605	(9.32 ± 0.59)·10 <sup>5</sup>	0.66 ± 02.24
10	1.981 ± 0.042	-655	(1.18 ± 0.22)·10 <sup>6</sup>	0.72 ± 05.76
11	2.104 ± 0.080	-824	(6.48 ± 0.54)·10 <sup>5</sup>	0.60 ± 00.01
12	2.077 ± 0.079	-829	(6.22 ± 0.43)·10 <sup>5</sup>	0.73 ± 02.87
13	1.953 ± 0.105	-758	(6.55 ± 0.38)·10 <sup>5</sup>	0.75 ± 06.70
14	2.247 ± 0.127	-736	(6.28 ± 0.36)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 04.33
15	2.253 ± 0.120	-855	(6.26 ± 0.40)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 05.84
16	2.589 ± 0.100	-1003	(6.61 ± 0.52)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 10.15
17	1.996 ± 0.189	-1003	(6.39 ± 0.40)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 21.43
18	2.145 ± 0.388	-979	(6.19 ± 0.40)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 03.90
19	1.547 ± 0.347	-961	(5.18 ± 0.11)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 01.88
20	1.877 ± 0.334	-987	(5.67 ± 0.61)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 10.21
21	2.143 ± 0.328	-948	(6.76 ± 0.74)·10 <sup>5</sup>	0.75 ± 10.11
<b>Media</b>	<b>2.048 ± 0.372</b>		<b>(7.33 ± 1.79)·10<sup>5</sup></b>	<b>0.74 ± 00.04</b>

Tabla 6.3.- Parámetros del modelo 1 considerando la velocidad del viento (m1w)

Serie	U(W/m2K)	Logver	C(J/K)	$\alpha$
01	1.961 ± 0.037	-820	(8.90 ± 6.97)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 07.50
02	1.997 ± 0.024	-808	(6.23 ± 0.47)·10 <sup>5</sup>	0.68 ± 00.03
03	2.105 ± 0.029	-853	(7.89 ± 0.73)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 00.06
04	2.065 ± 0.031	-885	(7.44 ± 0.78)·10 <sup>5</sup>	0.78 ± 00.09
05	2.012 ± 0.034	-814	(7.66 ± 0.76)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 00.24
06	2.046 ± 0.047	-720	(7.83 ± 0.75)·10 <sup>5</sup>	0.72 ± 00.04
07	2.060 ± 0.045	-904	(6.66 ± 0.66)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 00.13
08	1.967 ± 0.039	-671	(9.50 ± 0.67)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 00.09
09	1.943 ± 0.034	-604	(9.37 ± 0.62)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 00.74
10	1.994 ± 0.044	-639	(1.22 ± 0.31)·10 <sup>6</sup>	0.77 ± 00.06
11	1.580 ± 0.064	-819	(6.56 ± 0.55)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 01.38
12	1.631 ± 0.033	-829	(6.22 ± 0.44)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 01.14
13	1.686 ± 0.029	-758	(6.55 ± 0.40)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 00.03
14	1.714 ± 0.035	-736	(6.28 ± 0.37)·10 <sup>5</sup>	0.80 ± 01.94
15	1.751 ± 0.041	-855	(6.28 ± 0.40)·10 <sup>5</sup>	0.77 ± 00.03
16	1.774 ± 0.054	-1011	(6.50 ± 0.58)·10 <sup>5</sup>	0.79 ± 04.11
17	1.795 ± 0.045	-1002	(6.45 ± 0.41)·10 <sup>5</sup>	0.79 ± 00.03
18	1.863 ± 0.056	-978	(6.22 ± 0.40)·10 <sup>5</sup>	0.80 ± 00.06
19	1.903 ± 0.137	-959	(5.04 ± 1.14)·10 <sup>5</sup>	0.80 ± 04.24
20	1.781 ± 0.393	-985	(5.67 ± 0.65)·10 <sup>5</sup>	0.71 ± 00.10
21	2.083 ± 0.351	-940	(6.76 ± 0.69)·10 <sup>5</sup>	0.76 ± 00.09
<b>Media</b>	<b>1.895 ± 0.311</b>		<b>(7.25 ± 1.59)·10<sup>5</sup></b>	<b>0.77 ± 00.03</b>

Los valores de  $U$  y  $\alpha$  pueden observarse de forma gráfica en la Figura 6.6, donde se han añadido los valores medios, para las distintas series, de la diferencia de temperaturas de aire interior-externo, la velocidad del viento y la irradiancia solar.

De modo que puede observarse la variación de las condiciones de ensayo a lo largo del experimento así como la relación entre cada parámetro estimado y las variables motrices correspondientes.

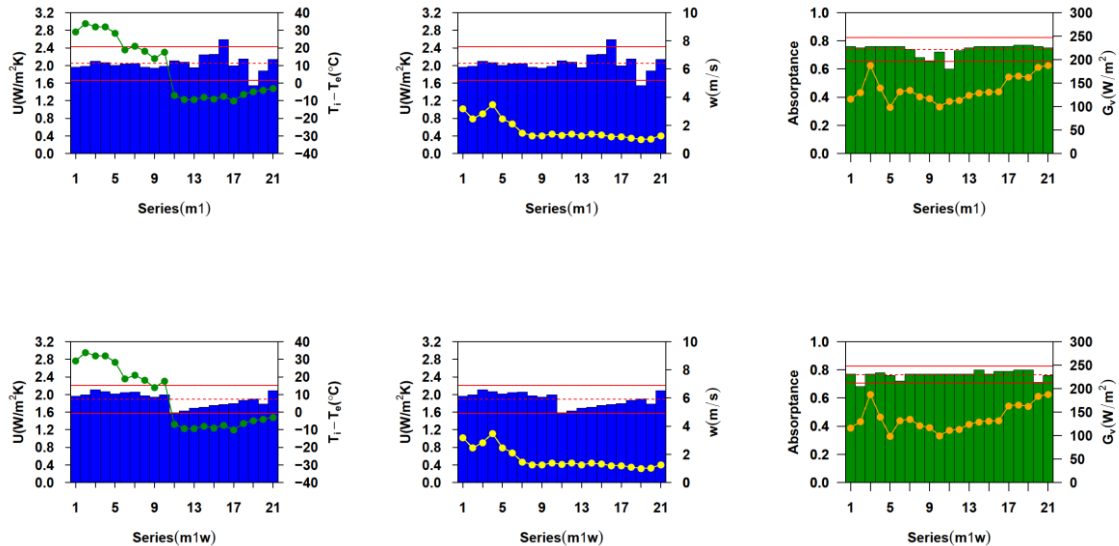


Figura 6.6.- Transmitancia  $U$  y absorptancia para el modelo 1, sin y con velocidad de viento. Se representan también los valores medios de la diferencia de temperaturas, de la velocidad de viento y de la irradiancia solar vertical

#### 6.4.3.2.- Análisis de residuos

Uno de los criterios para estudiar la validez de los modelos es el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionados por el modelo matemático, ver Ec. 6.16.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco, para poder valorar la bondad del modelo.

El resultado del análisis para el modelo 1, para todas las series de datos, se muestra en la siguiente Figura 6.7, donde se representan comparados los resultados sin considerar, y considerando, la velocidad del viento.

En las Tablas 6.2 y 6.3, se observa como los valores de los parámetros no varían de forma importante, aunque si se observa como la incertidumbre disminuye. Por su lado, en la Figura 6.7, en el análisis de los residuos puede apreciarse como el incluir la velocidad del viento en el modelo supone una mejora sustancial en el comportamiento de los residuos.

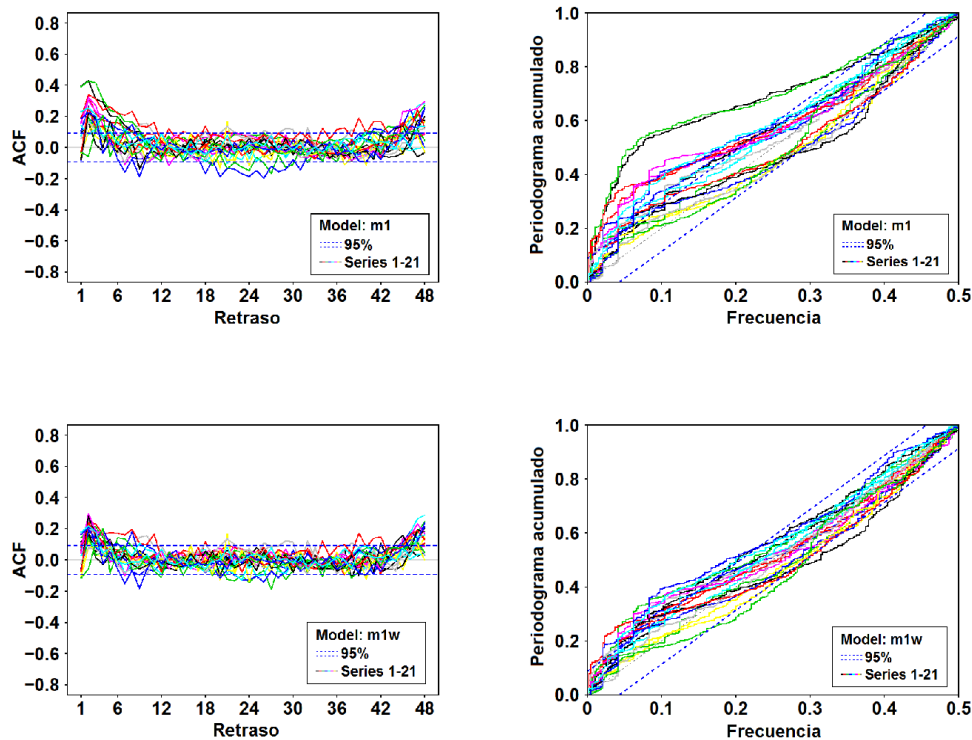


Figura 6.7.- Autocorrelación y períodograma de los residuos para todas las series del modelo 1, sin considerar el viento (arriba) y considerando la velocidad del viento (abajo)

#### 6.4.4.- Modelo de dos estados no medidos

Los modelos 2a y 2b son una ampliación a dos estados del modelo 1 con el objeto de intentar modelar, además de la densidad de flujo de calor, la temperatura superficial del muro. Además de buscar conseguir una mejor estimación de los parámetros térmicos del muro.

Ambos modelos incorporan una variable de estado, temperatura interior del muro, adicional y una ecuación de observación asociada con la temperatura superficial del muro. Es en esta ecuación de observación donde se encuentra la diferencia entre ambos modelos.

En estudios previos [Jiménez08a, Jiménez08c], la forma de definir la temperatura superficial del muro venía implicando situar una de las variables de estado ubicada justo en la superficie del elemento a estudiar, tal y como hace el modelo 2a a partir de la Ec. 6.20.

De modo que el estudio inicial con este modelo presentaba el problema que puede verse, a modo de ejemplo, en la Fig. 6.8 (Izquierda, verde) al comparar los valores medidos de la temperatura superficial con los valores predichos. Donde puede apreciarse un retraso entre el valor medido y el predicho, lo cual muestra que no es llega a ser la mejor aproximación el utilizar la Ec. 6.20. Es decir, debe buscarse una alternativa para que la variable de estado no esté situada exactamente en la superficie del muro.

Por este motivo, en el modelo 2b se plantea una nueva ecuación de observación para la temperatura superficial (Ec. 6.21) que se basa en la solución a la ecuación analítica (Ec. 6.12) que describe la evolución de la temperatura en una superficie y que se ha representado en la Sección 6.3.2.

De esta manera, la variable de estado adicional ( $T_2$ ) queda asociada a una temperatura cercana a la superficie del muro, pero situada en el interior del muro.

El resultado que se obtiene con el modelo 2b cuando se comparan la temperatura superficial medida y la predicha por él, puede verse en la Figura 6.8 (derecha, rojo). Donde se aprecia como el retraso que existía en el modelo 2a ha sido corregido, con lo que la modelización de la temperatura superficial es más precisa.

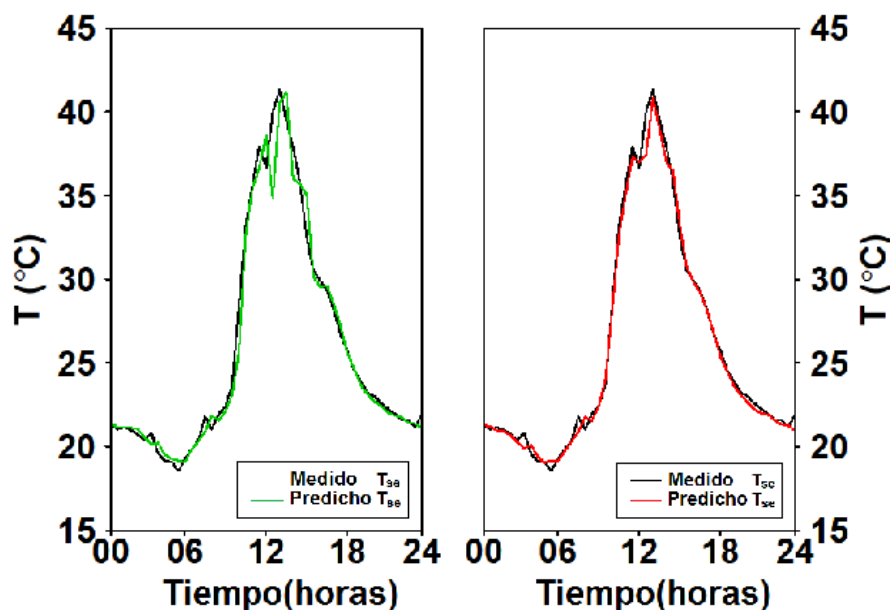


Figura 6.8.- Temperatura superficial medida y predicha (modelo 2a:verde, modelo 2b:rojo), para el día 16 de agosto de 2010

Estos resultados previos llevaron a descartar el modelo 2a a la hora de hacer un análisis extenso de los datos, dado que su limitación a la hora de modelar la temperatura superficial así lo aconsejaba.

Por tanto, se procedió a utilizar el modelo 2b para realizar el análisis completo de todas las series de datos registradas, de forma que pudiera verse si un modelo con dos estados aportaba una mejora significativa sobre el modelo 1, con un estado no medido.

#### 6.4.4.1.- Estimación de los parámetros

En las Tablas 6.4 y 6.5 se presentan los valores de  $U$ ,  $\alpha$ ,  $C$  y del valor de la máxima verosimilitud (Logver). Al igual que con el modelo 1, los valores se presentan cuando  $h_{se}$  es considerado constante, Tabla 6.4, y cuando es considerado linealmente dependiente con la velocidad del viento, Tabla 6.5.

Los valores de  $U$  y  $\alpha$  se pueden ver en la Figura 6.9, donde se han añadido los valores medios para cada serie de datos de las variables motrices de las ecuaciones de balance, es decir, de la diferencia de temperaturas de aire interior-exterior, la velocidad del viento y la irradiancia solar como en el caso del modelo 1.



Tabla 6.4.- Parámetros del modelo 2 sin considerar la velocidad del viento (m2b)

Serie	U(W/m2K)	Logver	C(J/K)	$\alpha$
01	1.900 ± 0.031	-1464	(1.33 ± 0.23)·10 <sup>6</sup>	0.68 ± 05.67
02	1.873 ± 0.051	-1790	(4.59 ± 2.10)·10 <sup>6</sup>	0.65 ± 09.61
03	2.226 ± 0.297	-2122	(4.44 ± 3.97)·10 <sup>6</sup>	0.69 ± 04.81
04	2.073 ± 0.057	-1490	(1.10 ± 0.16)·10 <sup>6</sup>	0.68 ± 03.82
05	1.999 ± 0.035	-1295	(8.66 ± 0.93)·10 <sup>5</sup>	0.69 ± 04.68
06	2.046 ± 0.046	-1167	(9.51 ± 1.05)·10 <sup>5</sup>	0.68 ± 13.47
07	2.054 ± 0.041	-1376	(8.64 ± 1.03)·10 <sup>5</sup>	0.67 ± 12.37
08	2.075 ± 0.057	-1207	(1.11 ± 0.21)·10 <sup>6</sup>	0.65 ± 10.43
09	2.024 ± 0.043	-1134	(7.56 ± 0.95)·10 <sup>5</sup>	0.63 ± 06.04
10	2.014 ± 0.047	-1065	(9.50 ± 1.40)·10 <sup>5</sup>	0.66 ± 07.33
11	1.607 ± 0.137	-1107	(6.24 ± 0.66)·10 <sup>5</sup>	0.68 ± 12.04
12	1.561 ± 0.091	-1014	(5.98 ± 0.47)·10 <sup>5</sup>	0.69 ± 01.33
13	1.391 ± 0.087	-1013	(5.73 ± 0.48)·10 <sup>5</sup>	0.70 ± 13.71
14	1.527 ± 0.123	-946	(5.89 ± 0.59)·10 <sup>5</sup>	0.70 ± 10.13
15	1.673 ± 0.132	-1219	(5.87 ± 0.69)·10 <sup>5</sup>	0.69 ± 11.17
16	1.752 ± 0.172	-1403	(7.12 ± 1.87)·10 <sup>5</sup>	0.69 ± 04.85
17	1.509 ± 0.137	-1360	(5.63 ± 0.67)·10 <sup>5</sup>	0.70 ± 14.29
18	2.004 ± 0.130	-1509	(1.39 ± 0.24)·10 <sup>6</sup>	0.68 ± 03.57
19	1.950 ± 0.219	-1462	(1.17 ± 1.08)·10 <sup>6</sup>	0.68 ± 02.76
20	2.107 ± 0.139	-1616	(1.29 ± 0.13)·10 <sup>6</sup>	0.67 ± 02.10
21	2.180 ± 0.146	-1673	(1.43 ± 0.27)·10 <sup>6</sup>	0.66 ± 03.47
<b>Media</b>	<b>1.883 ± 0.479</b>		<b>(1.26 ± 1.09)·10<sup>6</sup></b>	<b>0.68 ± 00.02</b>

#### 6.4.4.2.- Análisis de residuos

Como uno de los posibles criterios para estudiar la validez de los modelos identificados, se utiliza el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionada por el modelo matemático, como en el caso del modelo 1. Y se añade el análisis de residuos equivalente correspondiente a la temperatura superficial del muro,  $T_{se}$ .

Tabla 6.5.- Parámetros del modelo 2 considerando la velocidad del viento (m2bw)

Serie	U(W/m2K)	Logver	C(J/K)	$\alpha$
01	1.914 ± 0.019	-1376	(1.65 ± 0.29)·10 <sup>6</sup>	0.55 ± 00.41
02	1.969 ± 0.017	-1608	(1.60 ± 0.37)·10 <sup>6</sup>	0.51 ± 00.07
03	2.217 ± 0.208	-2101	(3.85 ± 2.35)·10 <sup>6</sup>	0.67 ± 05.00
04	2.073 ± 0.025	-1466	(1.04 ± 0.12)·10 <sup>6</sup>	0.59 ± 06.99
05	1.999 ± 0.021	-1244	(8.39 ± 0.78)·10 <sup>5</sup>	0.60 ± 00.05
06	2.038 ± 0.043	-1136	(9.13 ± 0.93)·10 <sup>5</sup>	0.51 ± 00.10
07	2.073 ± 0.041	-1352	(9.11 ± 1.00)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.00
08	2.117 ± 0.063	-1213	(1.42 ± 0.27)·10 <sup>6</sup>	0.50 ± 00.00
09	2.069 ± 0.074	-1163	(9.65 ± 3.09)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.00
10	2.026 ± 0.048	-1034	(9.77 ± 1.30)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.01
11	1.594 ± 0.103	-1142	(7.06 ± 0.70)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.00
12	1.672 ± 0.052	-1054	(6.90 ± 0.67)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.00
13	1.718 ± 0.033	-1069	(7.13 ± 0.66)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.00
14	1.713 ± 0.028	-973	(6.66 ± 0.57)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.01
15	1.779 ± 0.035	-1229	(6.62 ± 0.60)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.01
16	1.735 ± 0.189	-1415	(7.30 ± 2.35)·10 <sup>5</sup>	0.52 ± 00.11
17	1.737 ± 0.058	-1350	(6.85 ± 0.58)·10 <sup>5</sup>	0.54 ± 00.06
18	1.852 ± 0.095	-1501	(8.81 ± 2.92)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.04
19	1.816 ± 0.053	-1467	(8.67 ± 3.07)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.01
20	1.920 ± 0.067	-1640	(2.80 ± 0.33)·10 <sup>6</sup>	0.58 ± 00.08
21	1.938 ± 0.094	-1635	(8.70 ± 2.91)·10 <sup>5</sup>	0.50 ± 00.01
<b>Media</b>	<b>1.903 ± 0.332</b>		<b>(1.16 ± 0.77)·10<sup>6</sup></b>	<b>0.53 ± 00.05</b>

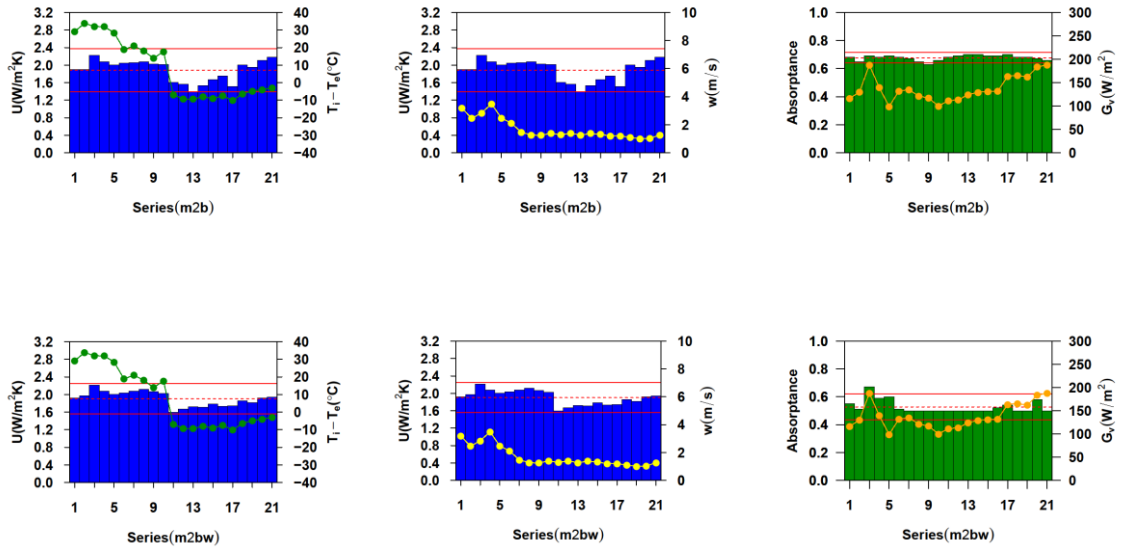


Figura 6.9.- Transmitancia  $U$  y absorptancia para el modelo 2, con y sin velocidad de viento. Se representan también los valores medios del gradiente de temperatura, de la velocidad de viento y de la irradiancia solar vertical.

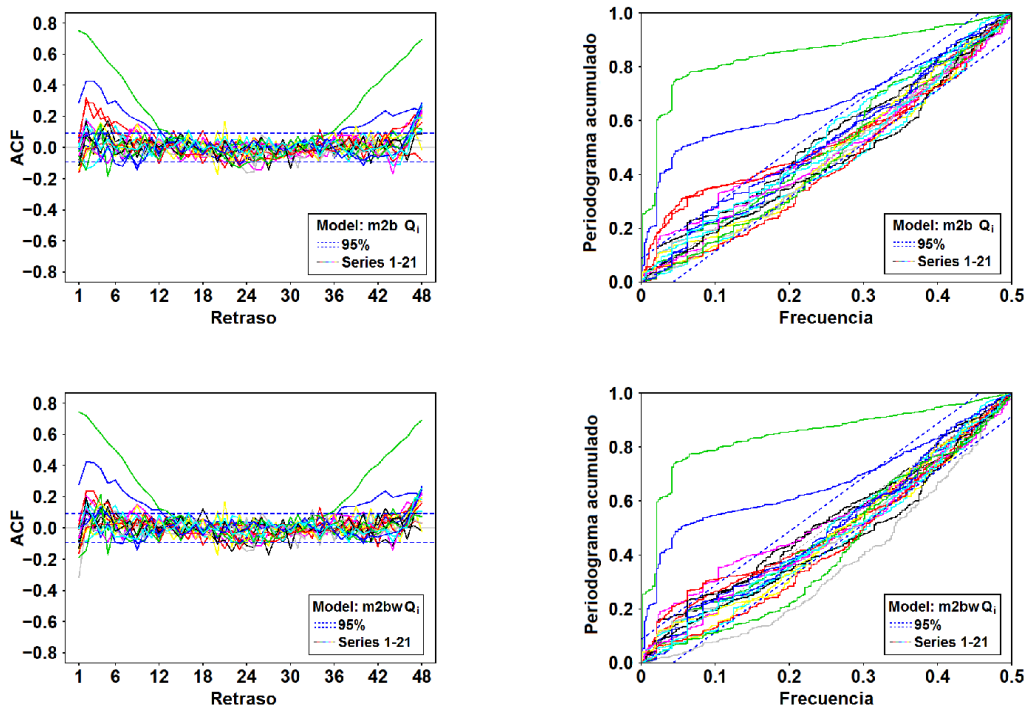


Figura 6.10.- Autocorrelación y periódograma de los residuos para todas las series del modelo 2,  $Q_i$ , sin considerar el viento (arriba) y considerando la velocidad del viento (abajo)

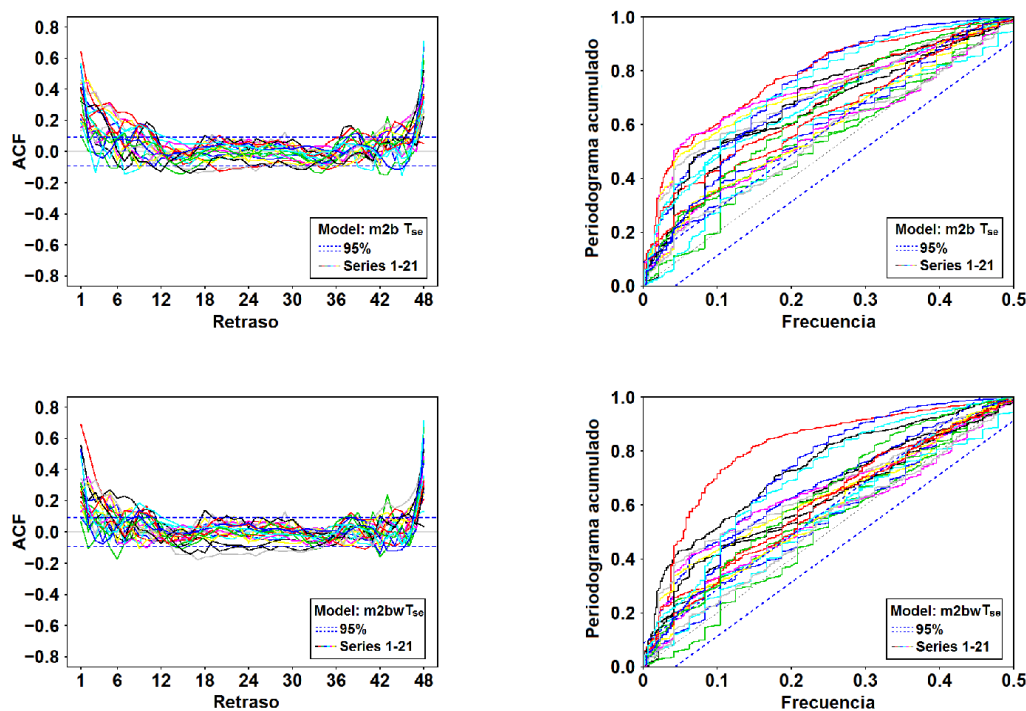


Figura 6.11.- Autocorrelación y períodograma de los residuos para todas las series del modelo 2,  $T_{se}$ , sin considerar el viento (arriba) y considerando la velocidad del viento (abajo)

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco para poder valorar la bondad del modelo.

El resultado del análisis para el modelo 2b, para todas las series de datos, se muestra en las Figuras 6.10 y 6.11.

En ellas puede apreciarse como el incluir la velocidad del viento en el modelo la mejora no es tan significativa como para el modelo 1, pero sigue siendo considerable.

Además se aprecia como algunas de las series de datos no presentan un buen comportamiento en cuanto al test de ruido blanco. No habiendo encontrado un motivo claro con lo que respecta a este resultado.

También en algunas series puede apreciarse que la temperatura superficial presenta problemas para bajas frecuencias. Estos problemas parecen estar debidos a la irradiancia solar, ya que son sus variaciones diarias las que provocan la acumulación de errores en el modelo en los mismos intervalos de tiempo múltiplos de un día. O a cualquier otra variable o efecto que no esté bien modelado y que se manifieste con frecuencia diaria.

Viéndose corregido este efecto cuando se estudian series de datos que consideran la predicción para un menor intervalo de tiempo, como uno, dos o tres días. Lo cual es comparable con la problemática existente en el campo de la meteorología, donde las predicciones que emplean variables meteorológicas van perdiendo fiabilidad, dada su alta variabilidad, con el paso del tiempo. No obstante, la estimación de los parámetros arroja valores que están dentro de los rangos esperados y son coherentes con los obtenidos previamente.

#### 6.4.5.- Test de máxima verosimilitud

Una vez estimados los parámetros utilizando los modelos 1 y 2b, y una vez que se han realizado los tests de análisis de residuos para comprobar su semejanza con un ruido blanco. Se procedió

a realizar un test de máxima verosimilitud [Bacher11] para tener significancia estadística de si la inclusión del viento, y la utilización de modelos más complejos era adecuada cuantitativamente. Los resultados se presentan en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6.- Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p

Serie	m1cm1w	m1cm2b	m1wcm2b	m1cm2bw	m1wcm2bw	m2bcm2bw Qi	m2bcm2bw T <sub>se</sub>
01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
03	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00
04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
08	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
09	0.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
12	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
13	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
14	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
15	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
16	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
17	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
18	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
19	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	1.00
20	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Donde se muestra el valor-p, de modo que cuando está por debajo del 5% (<0.05) para una serie de datos, el modelo de mayor complejidad, que está formado por un conjunto de variables que incluye a todas las del modelo menor, puede decirse que estadísticamente supone una mejora en la estimación de los parámetros.

Para la mayoría de las series calculadas, los resultados mostrados en la Tabla 6.6 muestran como los modelos que incluyen la dependencia con la velocidad del viento mejoran a los que no lo hacen, y también se observa como emplear dos estados no medidos mejora respecto a emplear un solo estado.

#### 6.4.6.- Consistencia física de los parámetros.

Debe tenerse en cuenta que el análisis de residuos es una herramienta estadística que facilita la elección de modelos, pero que no es ningún caso una prueba positiva por sí sola de que los parámetros obtenidos tengan un significado físico correcto, es decir, la consistencia física de los parámetros teniendo en cuenta sus propiedades materiales debe ser también considerada, y ante valores de los parámetros fuera de un rango aceptable, éstos no deben ser aceptados.

Esto puede apreciarse en varias de las series estudiadas, donde la variación de la transmitancia térmica, U, toma valores anómalamente bajos para las series 11 a 17 cuando es tenida en cuenta la velocidad del viento. Sus valores cuando el efecto de la velocidad del viento no es tenida en cuenta presentan valores también bastante desviados del valor medio pero con los errores estimados mayores, lo que da cuenta de la mayor incertidumbre en este período.

En la Figura 6.12 puede verse como el análisis de residuos indica que los residuos tienen buen comportamiento para la serie 11, dentro de los límites del 95%, tanto cuando es incluida la velocidad del viento en el modelo como cuando no es incluida. Por lo que es al observar las Tablas 6.1 y 6.2 se puede apreciar que en casos como el presentado, un buen comportamiento o

mejora en el análisis de residuos no debe ser automáticamente considerado como una mejora en la descripción del modelo.

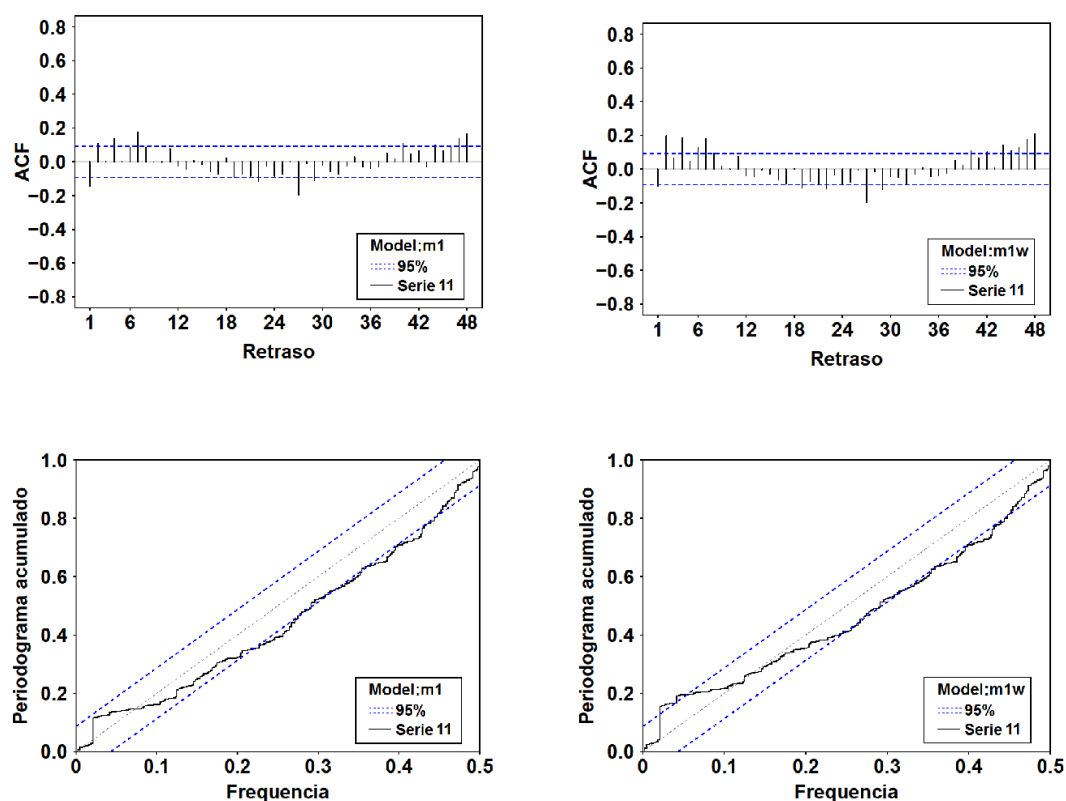


Figura 6.12.- Autocorrelación y períodograma de los residuos para la serie 16 del modelo 1, sin considerar el viento (izquierda) y considerando la velocidad del viento (derecha)

## 6.5.- Conclusiones

Se ha realizado un estudio dinámico del comportamiento térmico de un muro simple, supuesto homogéneo para obtener estimaciones sobre los parámetros físicos que caracterizan dicho elemento constructivo.

Se han propuesto varios modelos para estimar, fundamentalmente, la transmitancia térmica,  $U$ , la absorptancia,  $\alpha$ , y la capacidad efectiva del muro,  $C$ . En concreto se han utilizado modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, de un estado, y de dos estados. Haciendo a la vez para cada uno respectivamente, una distinción entre cuando se consideraban las estimaciones independientes o dependientes linealmente de la velocidad del viento.

Todas las estimaciones se han llevado a cabo para un período largo de tiempo, en torno a nueve meses, dividido en varias series de datos tanto para facilitar su análisis, como para disponer de suficientes estimaciones para evaluar la robustez de los resultados para las diferentes series. También ha permitido poder contrastar la diferencia entre estimaciones realizadas en condiciones de ensayo reales diferentes entre sí. Algunas de éstas condiciones extremas, lo cual permite evaluar la idoneidad de las condiciones de ensayo.

Con estos modelos se han empleado dos estados para modelar la temperatura superficial del muro. Aunque el resultado de las estimaciones de los distintos parámetros ha mostrado también que las estimaciones con un solo estado pueden ser consideradas suficientes.

Se ha observado una clara mejora con la inclusión de la dependencia lineal de las estimaciones con la velocidad del viento si solo es tenido en cuenta el análisis de residuos. Aunque se ha visto también que contrastando la consistencia física de los parámetros hay ciertas series en que la mejora no puede ser considerada adecuada dados los valores de los parámetros.

Por otra parte, el término de balance de radiación de onda larga, que fue empleado en los modelos, no ha demostrado tener influencia para este muro vertical.

Los valores de los parámetros estimados concuerdan con los valores de los parámetros obtenidos mediante el método de regresión lineal basado en promedios en lo que respecta al valor de la transmitancia térmica,  $U$  [Naveros12]. Lo cual supone un importante avance a la hora de caracterizar un muro simple, ya que se ha reducido de manera muy considerable el tiempo de experimentación y además se han obtenido otros parámetros como la absorptancia o la capacidad efectiva del muro. El método aplicado permite modelar la temperatura de superficie y la densidad de flujo de calor que atraviesa el muro.

Resumiendo, basándonos en los resultados obtenidos con los diferentes modelos, puede concluirse que la utilización de un modelo de un estado es adecuada para la estimación de los parámetros que caracterizan un muro simple y supuesto homogéneo como el del experimento. Sin embargo, la utilización de dos estados permite la modelización de la temperatura superficial del muro, lo que conlleva que se pueda realizar una caracterización más detallada del mismo.

También se ha observado, ver Figuras 6.6 y 6.9, como el valor estimado de la transmitancia térmica es menor en las series correspondientes a períodos de verano, cuando el cambio en las condiciones de ensayo hace que la diferencia entre las temperaturas de aire entre el interior y el exterior sea menor. Esto puede implicar una limitación en la utilización del método cuando se tienen estas condiciones de ensayo.

La incertidumbre de las estimaciones está dentro de unos límites aceptables, dada la naturaleza a escala real de los ensayos. Y se observa como en los modelos que consideran la velocidad del viento se reduce, mientras que entre modelos con distinto número de estados no se aprecia diferencia significativa.

Respecto a la absorptancia, aunque todos los modelos dan valores aceptables dentro del rango de valores esperados dada la naturaleza del muro. Son el modelo m1w, que presenta el menor error, y el modelo 2b, que presenta menor dispersión, los que parecen estimar mejor dicho parámetro. No obstante, la inclusión de este parámetro de forma explícita en las ecuaciones es algo novedoso, y su relación con otros parámetros a estimar dentro de la ecuación hace que su interpretación e identificación deba ser tratada con cautela mientras que se llevan a cabo más estudios que puedan seguir aportando solidez a su estimación.

La validación de los modelos mediante los tests de comportamiento similar a ruido blanco de los residuos, mostraron que para todas las series una gran parte de los resultados estaban dentro o muy próximos al rango establecido por los límites de confianza que fueron establecidos para todos los modelos en el 95%.

Además los valores estimados de los parámetros están en el rango de los valores teóricos que pueden ser calculados de forma aproximada para el muro, gracias al conocimiento que se tiene sobre las propiedades físicas de los materiales que lo conforman.

Además los valores de los parámetros están dentro del rango de los valores teóricos que han sido calculados en el Capítulo 4, dadas las propiedades físicas del muro, lo cual es un indicador de su consistencia física, considerando que la metodología utilizada implica la obtención de unos parámetros térmicos equivalentes [Rab1988].

Por último, el uso de un método dinámico avanzado como el empleado en el presente capítulo, supone un paso hacia adelante en la modelización de sistemas constructivos más complejos de una forma precisa y con un coste temporal reducido. Así como facilita la identificación de parámetros dada la manera de poder introducir los diferentes fenómenos físicos que intervienen en la caracterización térmica de una forma separada y explícita. Lo cual muestra un gran potencial en cuanto a ampliación del campo de aplicación de esta metodología, no obstante esto debe ser contrastado y reforzada con la realización de nuevos experimentos, tanto similares, como más complejos.

**VII**

**CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UNA  
FACHADA VENTILADA: ANÁLISIS  
DINÁMICO**



## 7.- Caracterización térmica de una fachada ventilada: Análisis dinámico

### 7.1.- Introducción

Las fachadas ventiladas han empezado a tener un especial interés en los últimos años dentro del estudio energético de los edificios [Marinosci11, Seferis11]. Dado que, y más aún en un escenario de crisis energética como el actual, pueden representar un aumento de la eficiencia y el ahorro energético de los edificios, disminuyendo así el consumo de energía de los mismos.

De este modo, el estudio de las fachadas ventiladas vendría a sumarse al de otros elementos constructivos [Clarke96, Heras05, Bloem06, Androuts08], dentro de la filosofía de buscar conseguir el mayor confort de los ocupantes de un edificio con el menor consumo de energía posible para facilitar la disminución de la utilización de energías no renovables.

Por consiguiente, el presente Capítulo va a tratar el análisis del muro de referencia una vez colocada una parte externa cerámica, anexa al muro, para conformar una fachada ventilada.

Los datos empleados en el presente capítulo fueron registrados durante un periodo de diez meses. Posteriormente fueron analizados con las técnicas de identificación de sistemas que se describen en el Capítulo 3 para obtener los resultados acerca de la caracterización térmica de forma análoga al estudio realizado en su primera fase constructiva, en los Capítulos 5 y 6.

En este caso, el disponer también de un gran número de datos registrados a lo largo de distintos períodos del año, con una meteorología variable, permite llevar a cabo un completo estudio de análisis y validación, aportando consistencia a la interpretación de los resultados que se obtienen.

### 7.2.- Datos experimentales

Los datos registrados para el análisis de la fachada ventilada, corresponden al período que abarca desde el día 16 de julio de 2011 hasta el día 1 de mayo de 2012, habiéndose descartado algunos períodos del total debido a fallos en el sistema de adquisición de datos.

Todos los datos registrados sin errores de medida han sido divididos en 27 series de datos, de 10 días cada una de ellas, como se muestra en la Tabla 7.1. Los datos empleados para el análisis abarcan todo el período de registro de medidas y representan dos períodos de tiempo con diferentes condiciones de contorno entre sí, como muestra para diferenciar el período de verano (Series 01 a 07) del período de invierno (Series 08 a 27) se muestran dos series, una de cada período, en la Figura 7.1.

El primer período abarca de julio a septiembre de 2011, siendo la temperatura interior inferior a la exterior, pero de forma poco significativa. Y el segundo de octubre de 2011 a abril de 2012, correspondiendo con una temperatura interior de la célula de ensayo mayor que la temperatura exterior de forma significativa.

Además de que en el segundo período la diferencia de temperaturas interior y exterior es alta, ésta tiene un sentido, que será definido como positivo, hacia el exterior de la habitación. Mientras que en el primer período la diferencia de temperaturas es baja, y la energía térmica se dirige hacia el interior de la célula de ensayo. Para la fachada ventilada el efecto de la irradiancia solar vertical se ve fuertemente atenuado puesto que el muro está sombreado por la parte exterior cerámica.

En este caso también se tiene que el valor absoluto de la densidad de flujo de calor, presenta una variación dentro de un rango similar en todo el período de medida. En el primer período debe ser tenido en cuenta que el menor valor de la diferencia de temperaturas puede inducir a una mayor dificultad para conseguir una identificación de parámetros óptima debido al aumento de la incertidumbre en las estimaciones.

Tabla 7.1.- Series de datos con la fecha de su registro

<b>Serie</b>	<b>Fecha</b>	
<b>01</b>	16/07/2011	25/07/2011
<b>02</b>	26/07/2011	04/08/2011
<b>03</b>	05/08/2011	14/08/2011
<b>04</b>	15/08/2011	24/08/2011
<b>05</b>	25/08/2011	03/09/2011
<b>06</b>	04/09/2011	13/09/2011
<b>07</b>	14/09/2011	21/09/2011
<b>08</b>	28/09/2011	07/10/2011
<b>09</b>	08/10/2011	17/10/2011
<b>10</b>	18/10/2011	27/10/2011
<b>11</b>	28/10/2011	06/11/2011
<b>12</b>	07/11/2011	16/11/2011
<b>13</b>	17/11/2011	26/11/2011
<b>14</b>	27/11/2011	06/12/2011
<b>15</b>	07/12/2011	16/12/2011
<b>16</b>	17/12/2011	26/12/2011
<b>17</b>	27/12/2011	05/01/2012
<b>18</b>	06/01/2012	15/01/2012
<b>19</b>	28/01/2012	05/02/2012
<b>20</b>	11/02/2012	20/02/2012
<b>21</b>	21/02/2012	01/03/2012
<b>22</b>	02/03/2012	11/03/2012
<b>23</b>	12/03/2012	20/03/2012
<b>24</b>	22/03/2012	31/03/2012
<b>25</b>	01/04/2012	10/04/2012
<b>26</b>	11/04/2012	20/04/2012
<b>27</b>	21/04/2012	30/04/2012

### 7.3.- Identificación de sistemas: Modelos de caja-gris

En el Capítulo 3 se presenta con detalle una descripción de los modelos basados en sistemas de ecuaciones diferenciales estocásticas utilizados para la identificación de sistemas, y considerados como modelos de tipo caja gris. La metodología empleada para la fachada ventilada será análoga a la empleada para analizar el muro de referencia de forma dinámica, presentada en el Capítulo 6, dada la mejora observada respecto al método dinámico integrado.

Para dotar de independencia al presente Capítulo se procederá a mostrar, aunque de forma más resumida, tanto los modelos como las ecuaciones de balance energético empleadas para identificar los parámetros térmicos característicos del muro objeto de estudio.

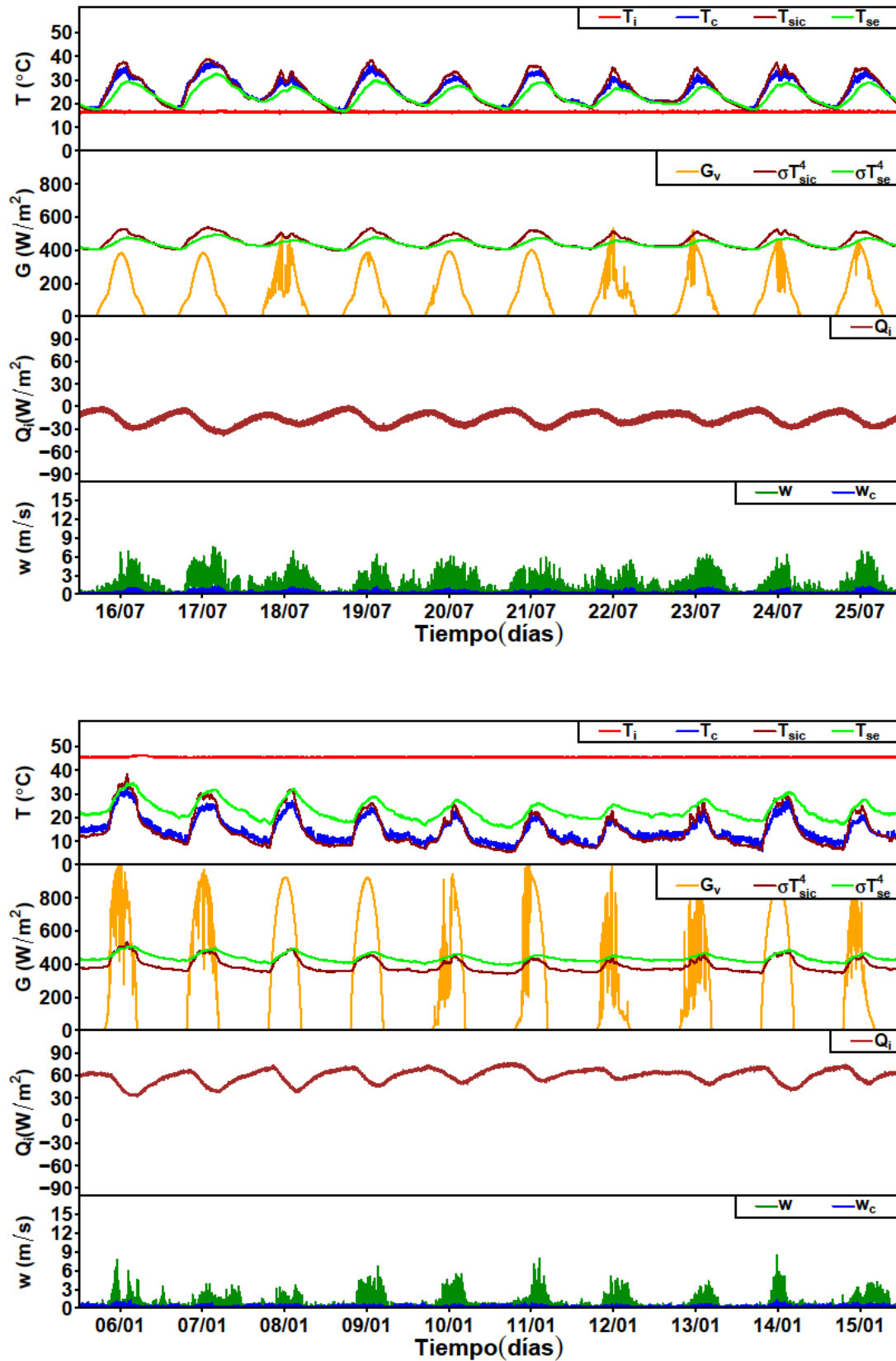


Figura 7.1.- Representación gráfica de una parte de los datos registrados para la fachada ventilada. Período de verano de 2011, serie 04 (arriba) y período de invierno de 2012, serie 18 (abajo).

### 7.3.1.- Modelos candidatos considerados basados en ecuaciones diferenciales estocásticas

Vuelven a presentarse los modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas que se han utilizado para obtener los parámetros térmicos que se han considerado necesarios para caracterizar el muro.

Se han estudiado dos modelos, el modelo 1 con un estado no medido y el modelo 2 con dos estados no medidos, habiendo sido ambos modelos analizados sin considerar, y considerando el efecto del balance de radiación de onda larga y la velocidad del viento.

A continuación se muestran las distintas variables y parámetros que forman parte de los modelos:

VARIABLES MEDIDAS:

- $T_{sic}$ ,  $T_{se}$ ,  $T_c$ ,  $T_i$ : son la temperatura superficial en la parte interior de la losa cerámica, la temperatura superficial exterior del muro, la temperatura de aire en la cámara de aire y la temperatura de aire en el interior de la célula de ensayo, respectivamente.
- $Q_i$ ,  $G_v$ : son la densidad de flujo de calor en la parte interior del muro y la irradiancia solar vertical global, respectivamente.
- $w$ ,  $w_c$ : son la velocidad del viento exterior a la fachada ventilada y la velocidad del aire en el interior de la cámara de aire junto a la superficie del muro.

VARIABLES DE ESTADO

- $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ : son temperaturas en el interior del muro que no han sido medidas directamente.

PARÁMETROS ESTIMADOS:

- $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $h_{se}$ : son coeficientes de transmitancia térmica del muro y el coeficiente de transmitancia térmica superficial del muro, respectivamente.
- $C_1$ ,  $C_2$ : son las capacidades térmicas efectivas del muro.
- $b$ : es un parámetro que depende del modo en que el muro, dadas sus características físicas, intercambia energía de onda larga con sus alrededores [Duffie&Beckman].
- $\alpha$ : es la absorptancia del muro.

#### 7.3.1.1.- Modelo de un estado no medido

La Figura 7.2 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través del muro.

La ecuación de estado que describe el balance de energía será la Ec. 7.1.

$$dT = \left[ \frac{U_2}{C_1} (T_c - T) + \frac{U_1}{C_1} (T_i - T) + \frac{U_2 \alpha}{C_1 h_{se}} G_v + \frac{U_2 b}{C_1 h_{se}} (\sigma T_{sic}^4 - \sigma T_{se}^4) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad (7.1)$$

donde  $T$  es la variable de estado no medida.

Por otra parte, la ecuación de observación vendrá dada por la Ec. 7.2.

$$Q_i = U_1 (T_i - T) + e_1 \quad (7.2)$$

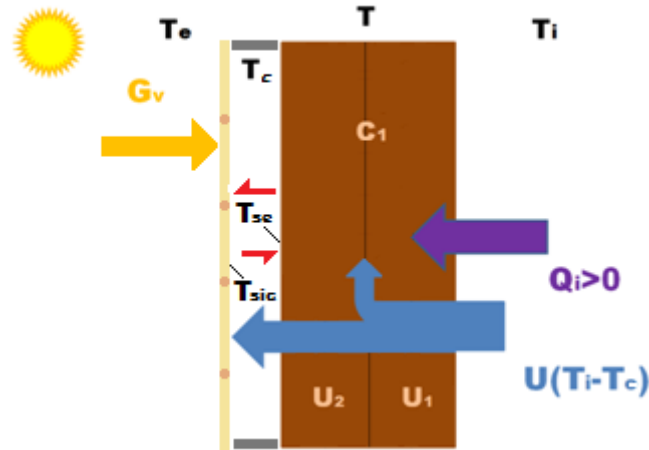


Figura 7.2.- Esquema del balance energético en la fachada ventilada con un estado no medido.

Este modelo se estudiará bajo las siguientes tres hipótesis:

- m1c1: suponiendo despreciable el balance de radiación de onda larga.
- m1: considerando el balance de radiación de onda larga.
- m1w: suponiendo además que  $h_{se}$  es linealmente dependiente con la velocidad del aire en el interior de la cámara junto a la superficie del muro.

### 7.3.1.2.- Modelo de dos estados no medidos

La Figura 7.3 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través del muro en el caso de suponer que tenemos dos variables de estado no medidas.

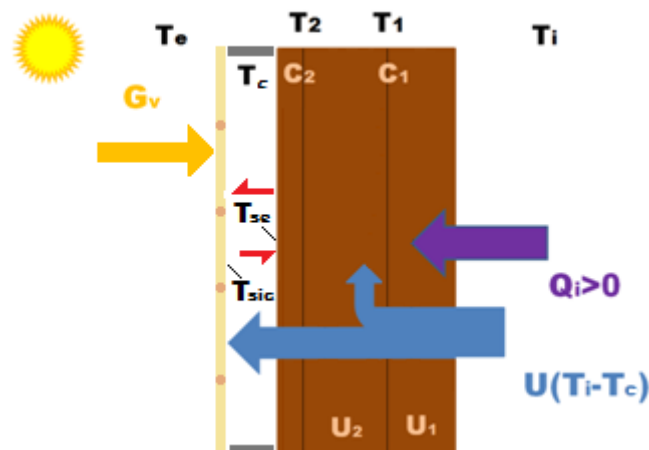


Figura 7.3.- Esquema del balance energético en la fachada ventilada con dos estados no medidos

de donde podemos obtener las correspondientes ecuaciones para cada estado, Ecs. 7.3 y 7.4.

$$dT_1 = \left[ \frac{U_2}{C_1} (T_2 - T_1) + \frac{U_1}{C_1} (T_i - T_1) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad (7.3)$$

$$dT_2 = \left[ \frac{U_3}{C_2}(T_c - T_2) + \frac{U_2}{C_2}(T_1 - T_2) + \frac{U_3 \alpha}{C_2 h_{se}} G_v + \frac{U_3 b}{C_2 h_{se}} (\sigma T_{sic}^4 - \sigma T_{se}^4) \right] dt + \sigma_{22} d\omega_t \quad (7.4)$$

donde  $T_1$  y  $T_2$  son los dos estados no medidos.

Las ecuaciones de observación para este modelo se presentan en las Ecs. 7.5 y 7.6.

$$Q_i = U_1(T_i - T) + e_{11} \quad (7.5)$$

$$T_{se} = T_2 + e_{22} \quad (7.6)$$

También se estudiará este modelo utilizando la ecuación de observación, Ec. 7.7, en lugar de la Ec. 7.6.

$$T_{se} = a_1 T_c + a_2 T_2 + a_3 (\sigma T_{sic}^4 - \sigma T_{se}^4) + e_{22} \quad (7.7)$$

donde se supone que la temperatura de la superficie del muro es función de  $T_c$ ,  $T_2$  y el balance de energía de onda larga, ver Ecs. 6.12-6.14.

El modelo 2 se estudiará bajo las siguientes hipótesis:

- m2cla: suponiendo despreciable el balance de radiación de onda larga y tomando la Ec. 7.6
- m2cl: suponiendo despreciable el balance de radiación de onda larga y tomando la Ec. 7.7, con  $a_3=0$ .
- m2: considerando el balance de radiación de onda larga y la Ec. 7.7.
- m2w: añadiendo a partir de m2 que  $h_{se}$  es linealmente dependiente con la velocidad del aire en el interior de la cámara de aire junto a la superficie del muro.

### 7.3.2.- Identificación de los parámetros físicos

A partir de los modelos mostrados en la sección anterior pueden obtenerse algunos de los parámetros físicos que son considerados necesarios para describir y caracterizar el comportamiento térmico del muro.

En los modelos presentados (Ecs. 7.1-7.3) la identificación del valor de  $b$  asociado al balance de radiación de onda larga, puede hacerse directamente.

La capacidad efectiva por su parte es obtenida mediante la expresión dada en la Ec. 7.8.

$$C = \sum_i C_i A \quad (7.8)$$

donde  $C_i$  son las capacidades efectivas del muro correspondientes a cada estado estimado, y  $A$  es el área del muro.

El valor de la transmitancia térmica  $U$  se obtiene a partir de la expresión mostrada en la Ec. 7.9.

$$\frac{1}{U} = \sum_i \frac{1}{U_i} \quad (7.9)$$

donde  $U_i$  son las transmitancias térmicas parciales calculadas en el modelo.

## 7.4.- Resultados y discusión

### 7.4.1.- Introducción

A continuación se procederá a mostrar los resultados más relevantes que han sido obtenidos a partir de los modelos descritos en la sección anterior junto con una breve discusión de los mismos.

Para estudiar la relevancia del término asociado al balance de longitud de onda larga entre el muro y la piel exterior de la fachada ventilada, se han considerado varias posibilidades en el presente Capítulo, tanto para el modelo 1 como para el modelo 2, de forma que se pueda observar primero la necesidad o no de introducir el término de balance de radiación de onda larga, y por otra parte se observe la influencia o no de la velocidad del aire en el interior de la cámara de aire junto a la superficie del muro sobre la transmitancia térmica del muro una vez que está protegido por la parte exterior de la fachada ventilada. Inicialmente se realizó un análisis previo tomando la Ec. 7.6 de observación para comprobar si, como en el caso del muro, la nueva ecuación de observación, Ec. 7.7, para la nueva configuración del experimento suponía una mejora.

Tabla 7.2.- Parámetros del modelo 1 sin radiación de onda larga (m1cl)

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	Logver	C(J/K)·10 <sup>5</sup>	b
01	1.837 ± 0.110	-934	(8.46 ± 0.88)	N/A
02	1.882 ± 0.111	-936	(8.53 ± 0.83)	N/A
03	1.871 ± 0.143	-940	(7.58 ± 0.84)	N/A
04	1.887 ± 0.094	-926	(7.34 ± 0.58)	N/A
05	1.880 ± 0.122	-896	(7.44 ± 0.69)	N/A
06	1.912 ± 0.121	-861	(7.78 ± 0.65)	N/A
07	1.940 ± 0.176	-618	(7.72 ± 0.77)	N/A
08	1.750 ± 0.067	-491	(6.93 ± 0.60)	N/A
09	1.790 ± 0.072	-547	(6.40 ± 0.44)	N/A
10	1.796 ± 0.124	-534	(5.90 ± 0.44)	N/A
11	1.807 ± 0.148	-552	(6.53 ± 0.56)	N/A
12	1.778 ± 0.333	-564	(5.93 ± 0.64)	N/A
13	1.786 ± 0.143	-472	(5.92 ± 0.48)	N/A
14	1.775 ± 0.451	-601	(6.50 ± 1.33)	N/A
15	1.825 ± 0.170	-636	(6.45 ± 0.60)	N/A
16	1.913 ± 0.392	-715	(6.02 ± 0.54)	N/A
17	1.916 ± 0.236	-748	(6.43 ± 0.74)	N/A
18	1.915 ± 0.191	-703	(6.51 ± 0.57)	N/A
19	1.916 ± 0.304	-746	(6.16 ± 0.67)	N/A
20	1.903 ± 0.183	-763	(6.59 ± 0.79)	N/A
21	1.903 ± 0.176	-694	(6.17 ± 0.53)	N/A
22	1.897 ± 0.386	-674	(6.11 ± 0.45)	N/A
23	1.929 ± 0.333	-539	(5.96 ± 0.49)	N/A
24	1.924 ± 0.463	-646	(6.55 ± 0.52)	N/A
25	1.930 ± 0.416	-660	(6.20 ± 0.55)	N/A
26	1.980 ± 0.797	-707	(7.93 ± 2.11)	N/A
27	1.952 ± 0.453	-818	(6.48 ± 0.54)	N/A
<b>Media</b>	1.874 ± 0.249		(6.76 ± 0.70)	

## 7.4.2.- Modelo de un estado no medido

### 7.4.2.1.- Estimación de los parámetros

El modelo 1 fue aplicado utilizando las 27 series de datos que recoge la Tabla 7.1.

En las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4, pueden verse los distintos parámetros obtenidos, según se consideran, o no, en el modelo 1, las dependencias asociadas al balance de radiación de onda larga y a la velocidad del viento en el interior de la cámara ventilada. En concreto, las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4 muestran los valores de la transmitancia térmica  $U$ , la capacidad efectiva,  $C$ , el parámetro de máxima verosimilitud estimado,  $\text{Logver}$ , y cuando corresponde, la constante asociada al balance de radiación de onda larga,  $b$ .

Tabla 7.3.- Parámetros del modelo 1 con radiación de onda larga (m1)

Serie	$U(\text{W/m}^2\text{K})$	Logver	$C(\text{J/K})\cdot 10^5$	$b$
01	$1.718 \pm 0.059$	-931	$(9.48 \pm 0.96)$	$0.10 \pm 5.73$
02	$1.753 \pm 0.070$	-934	$(9.69 \pm 0.93)$	$0.10 \pm 0.99$
03	$1.708 \pm 0.086$	-938	$(8.82 \pm 0.96)$	$0.09 \pm 0.01$
04	$1.707 \pm 0.138$	-925	$(8.73 \pm 1.04)$	$0.10 \pm 0.01$
05	$1.690 \pm 0.068$	-892	$(8.99 \pm 0.85)$	$0.10 \pm 0.02$
06	$1.647 \pm 0.048$	-852	$(9.49 \pm 0.81)$	$0.10 \pm 0.01$
07	$1.632 \pm 0.098$	-615	$(9.50 \pm 0.92)$	$0.10 \pm 0.13$
08	$1.633 \pm 0.035$	-482	$(8.63 \pm 0.74)$	$0.10 \pm 0.06$
09	$1.578 \pm 0.041$	-522	$(8.65 \pm 0.54)$	$0.10 \pm 0.01$
10	$1.556 \pm 0.193$	-523	$(8.07 \pm 1.35)$	$0.10 \pm 0.01$
11	$1.803 \pm 0.134$	-552	$(6.57 \pm 0.55)$	$0.06 \pm 0.04$
12	$1.335 \pm 0.247$	-517	$(8.02 \pm 0.72)$	$0.10 \pm 2.50$
13	$1.575 \pm 0.152$	-460	$(7.82 \pm 1.02)$	$0.10 \pm 0.01$
14	$1.197 \pm 0.098$	-548	$(7.81 \pm 0.45)$	$0.10 \pm 4.48$
15	$1.462 \pm 0.056$	-599	$(8.64 \pm 0.67)$	$0.11 \pm 0.02$
16	$1.415 \pm 0.103$	-682	$(8.68 \pm 0.54)$	$0.10 \pm 0.04$
17	$1.554 \pm 0.078$	-712	$(8.80 \pm 0.64)$	$0.10 \pm 1.89$
18	$1.542 \pm 0.084$	-679	$(8.96 \pm 0.58)$	$0.11 \pm 0.03$
19	$1.752 \pm 0.304$	-740	$(7.49 \pm 1.30)$	$0.10 \pm 0.02$
20	$1.656 \pm 0.054$	-748	$(8.86 \pm 0.69)$	$0.10 \pm 0.01$
21	$1.597 \pm 0.077$	-672	$(8.48 \pm 0.54)$	$0.10 \pm 0.01$
22	$1.578 \pm 0.326$	-656	$(7.92 \pm 0.93)$	$0.10 \pm 0.01$
23	$1.503 \pm 0.106$	-516	$(8.65 \pm 0.59)$	$0.12 \pm 0.04$
24	$1.658 \pm 0.428$	-640	$(8.24 \pm 1.35)$	$0.10 \pm 0.01$
25	$1.925 \pm 0.405$	-660	$(6.23 \pm 0.53)$	$0.06 \pm 0.08$
26	$1.977 \pm 0.719$	-707	$(7.95 \pm 2.07)$	$0.05 \pm 0.05$
27	$1.949 \pm 0.452$	-818	$(6.51 \pm 0.52)$	$0.05 \pm 0.03$
<b>Media</b>	$1.633 \pm 0.173$		$(8.36 \pm 0.84)$	$0.09 \pm 0.60$

Los valores de  $U$ ,  $C$  y  $b$  pueden observarse de forma gráfica en la Figura 7.4. En ella se han añadido los valores medios, para las distintas series, de la diferencia de temperaturas de aire interior-cámara ventilada, la velocidad del aire en la cámara ventilada y el balance de radiación de onda larga. De modo que puede observarse la variación de las condiciones de ensayo a lo largo del experimento y de la variable motriz correspondiente, variable que junto con el parámetro estimado determina la correspondiente contribución en la ecuación de balance energético y de otras variables que pueden afectar al valor del parámetro.

### 7.4.2.2.- Análisis de residuos

Uno de los criterios para estudiar la validez de los modelos es el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionada por el modelo físico-matemático.



Tabla 7.4.- Parámetros del modelo 1 con radiación de onda larga y velocidad del aire,  $w_c$  (mlw)

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	Logver	C(J/K)·10 <sup>5</sup>	b
01	1.718 ± 0.053	-931	(9.48 ± 0.92)	0.10 ± 0.85
02	1.753 ± 0.068	-934	(9.69 ± 0.97)	0.10 ± 1.21
03	1.708 ± 0.082	-938	(8.82 ± 1.01)	0.10 ± 1.02
04	1.707 ± 0.134	-925	(8.73 ± 0.97)	0.10 ± 2.15
05	1.690 ± 0.071	-892	(8.99 ± 0.90)	0.10 ± 1.64
06	1.647 ± 0.051	-852	(9.49 ± 0.82)	0.10 ± 0.43
07	1.632 ± 0.109	-615	(9.50 ± 0.95)	0.10 ± 4.45
08	1.633 ± 0.038	-482	(8.63 ± 0.72)	0.10 ± 3.12
09	1.578 ± 0.039	-522	(8.65 ± 0.56)	0.09 ± 1.11
10	1.556 ± 0.171	-523	(8.07 ± 1.11)	0.10 ± 0.40
11	1.793 ± 0.141	-552	(6.68 ± 0.58)	0.05 ± 0.04
12	1.335 ± 0.224	-517	(8.02 ± 0.65)	0.10 ± 1.14
13	1.575 ± 0.178	-460	(7.82 ± 1.15)	0.09 ± 1.05
14	1.197 ± 0.068	-548	(7.81 ± 0.42)	0.11 ± 0.07
15	1.462 ± 0.056	-599	(8.64 ± 0.69)	0.14 ± 0.07
16	1.415 ± 0.110	-682	(8.68 ± 0.57)	0.11 ± 0.04
17	1.554 ± 0.081	-712	(8.80 ± 0.63)	0.12 ± 0.03
18	1.542 ± 0.085	-679	(8.96 ± 0.55)	0.11 ± 0.53
19	1.752 ± 0.261	-740	(7.49 ± 1.17)	0.13 ± 0.02
20	1.657 ± 0.049	-748	(8.86 ± 0.61)	0.10 ± 0.02
21	1.597 ± 0.057	-672	(8.48 ± 0.45)	0.12 ± 0.03
22	1.578 ± 0.321	-656	(7.92 ± 0.95)	0.13 ± 0.01
23	1.503 ± 0.100	-516	(8.65 ± 0.51)	0.12 ± 0.02
24	1.658 ± 0.363	-640	(8.24 ± 1.13)	0.10 ± 0.08
25	1.914 ± 0.413	-660	(6.32 ± 0.52)	0.05 ± 0.04
26	1.965 ± 0.673	-707	(8.02 ± 1.89)	0.05 ± 0.01
27	1.937 ± 0.515	-819	(6.61 ± 0.55)	0.05 ± 0.01
<b>Media</b>	1.632 ± 0.167		(8.37 ± 0.81)	0.10 ± 0.73

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco, para poder valorar la bondad del modelo.

El resultado del análisis para el modelo 1, para todas las series de datos, se muestra en la Figura 7.5, donde puede apreciarse como el incluir el balance de radiación de onda larga en el modelo supone una mejora significativa de comportamiento de los residuos. En las Tablas 7.2 y 7.3 puede verse como los valores de los parámetros varían además de forma notable. Mientras que en el caso de la velocidad del aire en el canal, no se observa ningún efecto en los resultados como era de esperar dada la protección de la parte cerámica exterior, que propicia una velocidad del aire baja como puede apreciarse en la Figura 7.4.

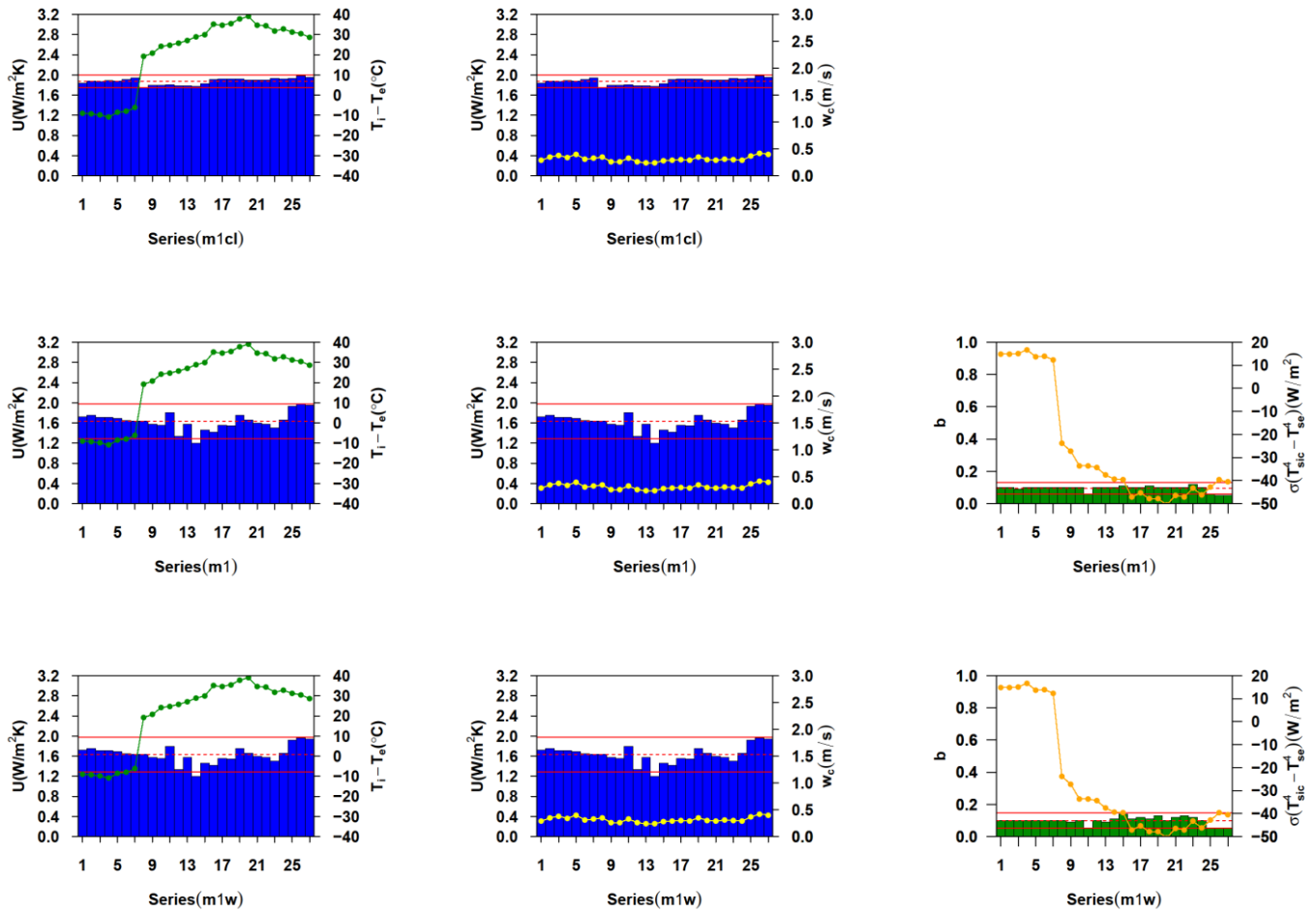


Figura 7.4.- Transmitancia U y valor de b para el modelo 1, sin y con velocidad de aire en el canal. Se representan también los valores medios de la diferencia de temperatura entre el interior y la cámara de aire, de la velocidad de aire en el canal de la cámara de aire y de la irradiancia solar vertical.

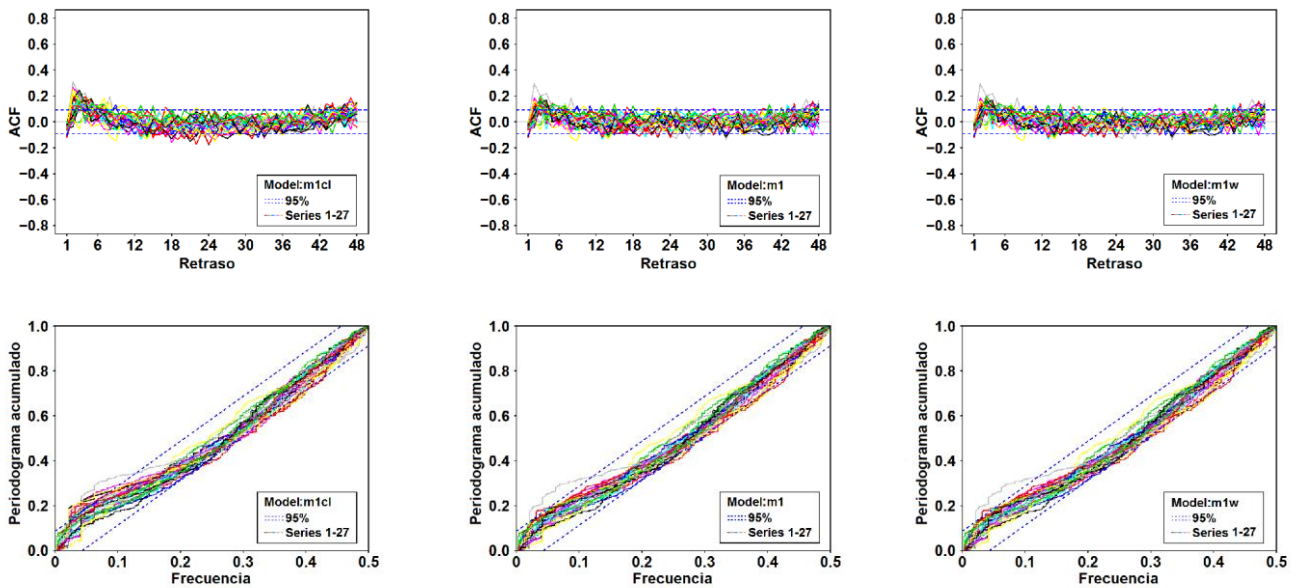


Figura 7.5.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos para todas las series del modelo 1, sin considerar la radiación de onda larga (m1cl, izquierda), considerando la radiación de onda larga (m1, centro) y considerando la radiación de onda larga y la velocidad del aire en el canal (m1w, derecha).

### 7.3.3.- Modelo de dos estados no medidos

El modelo 2 es una ampliación a dos estados del modelo 1 que permite modelar, además de la densidad de flujo de calor, la temperatura superficial del muro de forma análoga a como se hizo en el Capítulo anterior. Introducir otro estado no medido más, busca también conseguir una mejor estimación de los parámetros térmicos del muro.

La nueva variable de estado es una temperatura interior del muro, y además se emplea una ecuación de observación asociada con la temperatura superficial del muro (Ecs. 7.6 y 7.7). Es en estas ecuaciones de observación donde se encuentra la principal diferencia entre ambos modelos.

La forma de definir la temperatura superficial del muro vuelve a ser, inicialmente, situar una de las variables de estado ubicada justo en la superficie del muro de referencia, tal y como hace la Ec. 7.6.

Posteriormente, se aplica la Ec. 7.7 de observación para la temperatura superficial (ver Ec. 6.14) que describe la evolución de la temperatura en una superficie.

De esta manera, la variable de estado adicional ( $T_2$ ) queda asociada a una temperatura cercana a la superficie del muro, pero situada en el interior del mismo.

Con la configuración m2, del modelo de dos estados no medidos, se procedió a realizar el análisis completo de todas las series de datos registradas, de forma que pudiera verse si un modelo con dos estados aportaba una mejora significativa del modelo 1 también en el caso de la fachada ventilada.

#### 7.4.3.1.- Estimación de los parámetros

En las Tablas 7.5-7.8 se resumen los valores de  $U$ ,  $C$  y  $b$ . Al igual que se hizo con el modelo 1, los valores se presentan cuando no se considera el balance de radiación de onda larga utilizando las Ecs. 7.6 y 7.7 de observación, y posteriormente, solo para la Ec. 7.7 de observación se estiman los valores considerando la radiación de onda larga cuando  $h_{se}$  es considerado constante, y cuando es considerado linealmente dependiente con la velocidad del aire en el canal.

Los valores de  $U$  y  $b$  se pueden ver en la Figura 7.6, donde se han añadido los valores medios para cada serie de datos, de la diferencia de temperaturas de aire interior y exterior en el canal ventilado, la velocidad del aire en el interior de la cámara ventilada junto al muro y la irradiancia vertical como en el caso del modelo 1.

#### 7.4.3.2.- Análisis de residuos

Como uno de los criterios posibles para estudiar la validez de los parámetros obtenidos, se utiliza el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionada por el modelo matemático, como en el caso del modelo 1. Y se añade el análisis de residuos equivalente correspondiente a la temperatura superficial del muro,  $T_{se}$ .

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco, para poder valorar la bondad del modelo.

El resultado del análisis de los residuos para el modelo 2, para todas las series de datos, se muestra en las Figuras 7.7-7.12.

Tabla 7.5.- Parámetros del modelo 2 sin radiación de onda larga, Ec. 7.6 (m2cla)

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	Logver	C(J/K)·10 <sup>6</sup>	b
01	1.799 ± 0.135	-2073	(2.44 ± 1.56)	N/A
02	1.845 ± 0.124	-2049	(3.02 ± 1.54)	N/A
03	1.836 ± 0.113	-2069	(3.09 ± 0.86)	N/A
04	1.855 ± 0.114	-2074	(3.32 ± 0.93)	N/A
05	1.842 ± 0.126	-1969	(2.34 ± 0.99)	N/A
06	1.851 ± 0.133	-1972	(2.15 ± 0.87)	N/A
07	1.883 ± 0.513	-1344	(1.62 ± 4.65)	N/A
08	1.749 ± 0.120	-1969	(1.80 ± 1.18)	N/A
09	1.779 ± 0.173	-2019	(1.59 ± 1.43)	N/A
10	1.793 ± 1.163	-2056	(0.60 ± 0.70)	N/A
11	1.805 ± 0.175	-2100	(0.85 ± 0.26)	N/A
12	1.773 ± 0.318	-2110	(2.01 ± 1.55)	N/A
13	1.783 ± 0.198	-2047	(1.39 ± 1.08)	N/A
14	1.771 ± 0.304	-2195	(2.24 ± 0.76)	N/A
15	1.822 ± 0.217	-2240	(1.90 ± 1.27)	N/A
16	1.910 ± 0.414	-2397	(2.05 ± 0.92)	N/A
17	1.911 ± 0.245	-2416	(2.03 ± 0.86)	N/A
18	1.911 ± 0.302	-2392	(1.82 ± 1.50)	N/A
19	1.916 ± 0.045	-2493	(0.65 ± 0.07)	N/A
20	1.901 ± 0.426	-2519	(1.16 ± 2.24)	N/A
21	1.899 ± 0.295	-2391	(1.32 ± 1.64)	N/A
22	1.897 ± 0.016	-2427	(0.87 ± 0.09)	N/A
23	1.925 ± 0.430	-1858	(1.53 ± 2.08)	N/A
24	1.924 ± 0.794	-2322	(0.70 ± 0.91)	N/A
25	1.930 ± 0.453	-2327	(0.72 ± 0.21)	N/A
26	1.978 ± 0.036	-2363	(0.97 ± 0.12)	N/A
27	1.950 ± 1.122	-2445	(0.66 ± 0.65)	N/A
<b>Media</b>	<b>1.861 ± 0.315</b>		<b>(1.66 ± 1.14)</b>	

Tabla 7.6.- Parámetros del modelo 2 sin radiación de onda larga, Ec. 7.7 (m2cl)

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	Logver	C(J/K)·10 <sup>5</sup>	b
01	1.806 ± 0.106	-709	(08.70 ± 0.79)	N/A
02	1.849 ± 0.103	-724	(09.23 ± 0.82)	N/A
03	1.845 ± 0.117	-780	(09.38 ± 0.91)	N/A
04	1.858 ± 0.113	-780	(08.91 ± 0.81)	N/A
05	1.854 ± 0.115	-779	(09.52 ± 0.93)	N/A
06	1.860 ± 0.107	-660	(09.08 ± 0.72)	N/A
07	1.881 ± 0.167	-428	(08.83 ± 1.04)	N/A
08	1.765 ± 0.106	-528	(12.10 ± 2.04)	N/A
09	1.788 ± 0.087	-603	(07.93 ± 0.63)	N/A
10	1.796 ± 0.101	-572	(07.98 ± 0.78)	N/A
11	1.807 ± 0.127	-658	(09.73 ± 1.24)	N/A
12	1.782 ± 0.113	-659	(07.98 ± 0.74)	N/A
13	1.786 ± 0.121	-566	(09.01 ± 1.09)	N/A
14	1.780 ± 0.120	-728	(08.90 ± 0.99)	N/A
15	1.827 ± 0.115	-842	(09.40 ± 0.96)	N/A
16	1.916 ± 0.329	-950	(09.75 ± 1.78)	N/A
17	1.917 ± 0.141	-975	(09.60 ± 1.03)	N/A
18	1.915 ± 0.153	-930	(10.10 ± 1.17)	N/A
19	1.918 ± 0.197	-1101	(14.60 ± 3.14)	N/A
20	1.903 ± 0.178	-1077	(10.80 ± 2.19)	N/A
21	1.902 ± 0.125	-927	(09.07 ± 0.97)	N/A
22	1.897 ± 0.139	-859	(08.89 ± 0.97)	N/A
23	1.929 ± 0.159	-704	(09.18 ± 1.08)	N/A
24	1.923 ± 0.166	-778	(10.90 ± 1.47)	N/A
25	1.932 ± 0.181	-873	(12.20 ± 1.96)	N/A
26	1.981 ± 0.229	-949	(14.40 ± 2.57)	N/A
27	1.952 ± 0.203	-950	(11.90 ± 1.63)	N/A
<b>Media</b>	<b>1.866 ± 0.145</b>		<b>(09.93 ± 1.28)</b>	

Tabla 7.7.- Parámetros del modelo 2 con radiación de onda larga (m2)

Serie	U(W/m2K)	Logver	C(J/K)·10 <sup>5</sup>	b
01	1.541 ± 0.135	-669	(08.67 ± 0.65)	0.24 ± 0.18
02	1.450 ± 0.140	-654	(09.12 ± 0.59)	0.34 ± 0.27
03	1.367 ± 0.076	-670	(08.87 ± 0.74)	0.39 ± 0.03
04	1.463 ± 0.141	-717	(08.48 ± 0.53)	0.35 ± 0.14
05	1.403 ± 0.139	-658	(08.58 ± 0.66)	0.36 ± 0.94
06	1.411 ± 0.132	-546	(08.09 ± 0.61)	0.38 ± 0.04
07	1.554 ± 0.184	-371	(07.95 ± 0.81)	0.27 ± 0.10
08	1.488 ± 0.052	-463	(11.40 ± 1.69)	0.33 ± 0.23
09	1.413 ± 0.120	-517	(09.03 ± 0.92)	0.36 ± 0.46
10	1.388 ± 0.082	-515	(09.15 ± 0.99)	0.38 ± 0.76
11	1.598 ± 0.209	-650	(10.60 ± 1.48)	0.26 ± 0.28
12	1.389 ± 0.059	-547	(08.62 ± 0.87)	0.38 ± 0.10
13	1.379 ± 0.056	-528	(09.90 ± 1.12)	0.39 ± 0.07
14	1.372 ± 0.054	-599	(08.54 ± 0.75)	0.39 ± 0.08
15	1.397 ± 0.082	-765	(09.71 ± 0.97)	0.40 ± 0.01
16	1.463 ± 0.121	-855	(09.32 ± 0.95)	0.40 ± 0.01
17	1.472 ± 0.093	-861	(09.46 ± 0.96)	0.40 ± 0.01
18	1.465 ± 0.053	-861	(10.00 ± 1.06)	0.40 ± 0.01
19	1.496 ± 0.108	-1068	(12.80 ± 1.78)	0.40 ± 0.01
20	1.470 ± 0.094	-1003	(10.30 ± 1.23)	0.40 ± 0.01
21	1.453 ± 0.084	-834	(09.23 ± 0.95)	0.40 ± 0.01
22	1.450 ± 0.090	-808	(09.64 ± 1.09)	0.40 ± 0.01
23	1.472 ± 0.167	-643	(09.53 ± 1.16)	0.40 ± 0.01
24	1.461 ± 0.102	-736	(11.20 ± 1.28)	0.40 ± 0.01
25	1.481 ± 0.121	-844	(12.60 ± 1.58)	0.40 ± 0.01
26	1.548 ± 0.153	-939	(15.30 ± 2.45)	0.40 ± 0.04
27	1.501 ± 0.174	-936	(13.40 ± 1.79)	0.40 ± 0.05
<b>Media</b>	<b>1.457 ± 0.112</b>		<b>(09.98 ± 1.10)</b>	<b>0.37 ± 0.14</b>

Tabla 7.8.- Parámetros del modelo 2 con radiación de onda larga y velocidad del aire en el canal, w<sub>c</sub> (m2w)

Serie	U(W/m2K)	Logver	C(J/K)·10 <sup>5</sup>	b
01	1.541 ± 0.158	-669	(08.67 ± 0.70)	0.25 ± 4.61
02	1.450 ± 0.134	-654	(09.12 ± 0.62)	0.33 ± 1.82
03	1.367 ± 0.091	-670	(08.87 ± 0.62)	0.39 ± 0.11
04	1.463 ± 0.144	-717	(08.48 ± 0.55)	0.34 ± 0.47
05	1.403 ± 0.127	-658	(08.58 ± 0.64)	0.36 ± 2.29
06	1.411 ± 0.146	-546	(08.09 ± 0.65)	0.34 ± 1.01
07	1.554 ± 0.175	-371	(07.95 ± 0.80)	0.27 ± 1.24
08	1.488 ± 0.050	-463	(11.40 ± 1.59)	0.33 ± 0.50
09	1.411 ± 0.143	-517	(09.03 ± 0.96)	0.36 ± 0.31
10	1.394 ± 0.074	-532	(09.03 ± 1.01)	0.38 ± 0.27
11	1.598 ± 0.200	-650	(10.60 ± 1.41)	0.26 ± 0.84
12	1.398 ± 0.058	-564	(08.61 ± 0.92)	0.38 ± 0.17
13	1.382 ± 0.114	-531	(09.86 ± 1.21)	0.38 ± 0.28
14	1.372 ± 0.055	-599	(08.54 ± 0.81)	0.39 ± 0.11
15	1.397 ± 0.077	-765	(09.71 ± 1.00)	0.40 ± 0.01
16	1.463 ± 0.090	-874	(09.25 ± 1.03)	0.40 ± 0.01
17	1.472 ± 0.090	-861	(09.46 ± 1.01)	0.40 ± 0.00
18	1.465 ± 0.081	-861	(10.00 ± 0.99)	0.40 ± 0.01
19	1.496 ± 0.119	-1068	(12.80 ± 1.92)	0.40 ± 0.01
20	1.470 ± 0.084	-1003	(10.30 ± 1.17)	0.40 ± 0.01
21	1.453 ± 0.092	-834	(09.23 ± 0.95)	0.40 ± 0.01
22	1.450 ± 0.090	-808	(09.64 ± 1.03)	0.40 ± 0.01
23	1.472 ± 0.113	-643	(09.53 ± 1.13)	0.40 ± 0.01
24	1.461 ± 0.135	-736	(11.20 ± 1.36)	0.40 ± 0.02
25	1.481 ± 0.110	-844	(12.60 ± 1.59)	0.40 ± 0.01
26	1.548 ± 0.177	-939	(15.30 ± 2.45)	0.40 ± 0.05
27	1.501 ± 0.091	-936	(13.40 ± 1.75)	0.40 ± 0.05
<b>Media</b>	<b>1.458 ± 0.112</b>		<b>(09.97 ± 1.11)</b>	<b>0.37 ± 0.53</b>

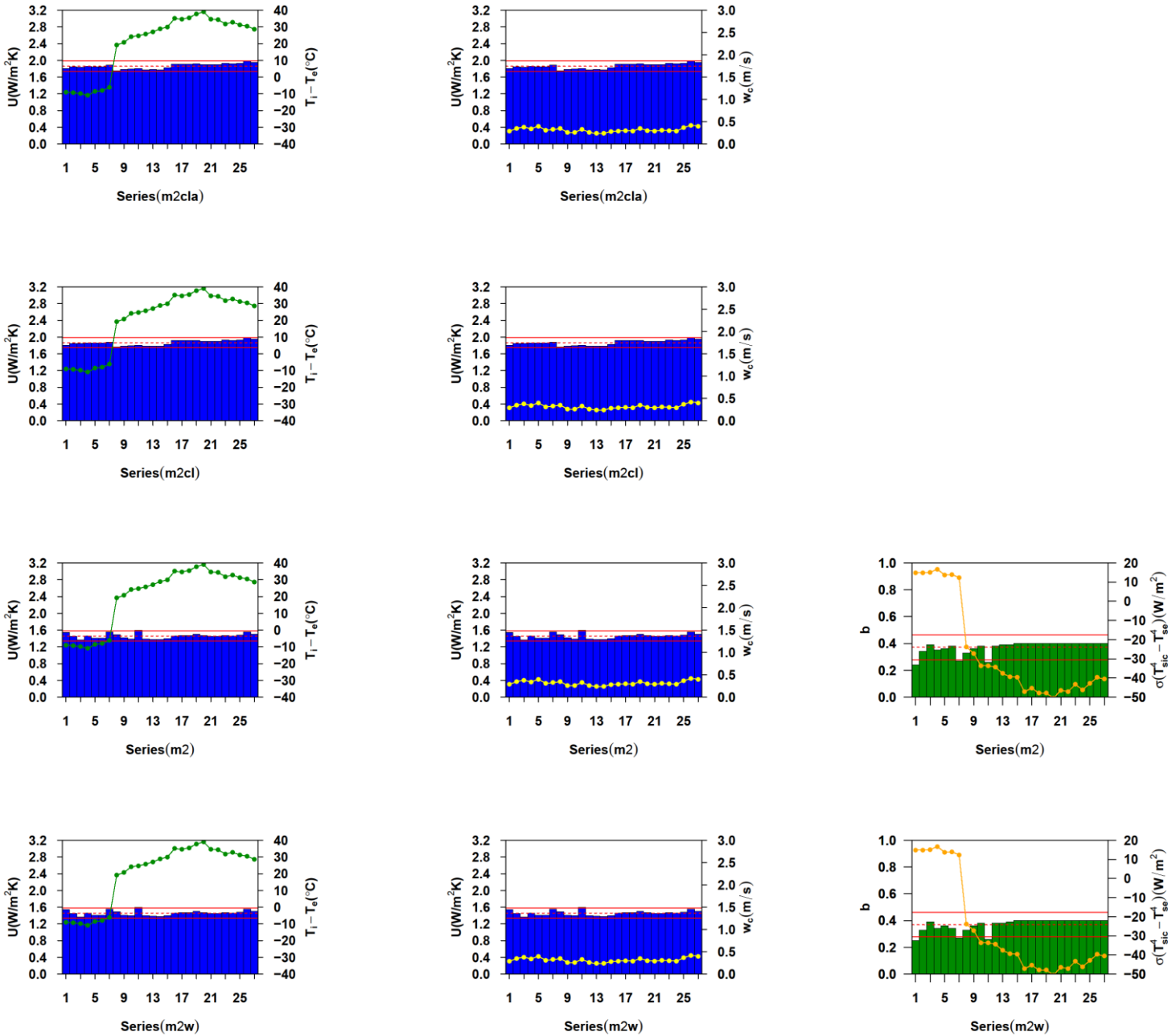


Figura 7.6.- Transmitancia U y valor de b para el modelo 2, con la Ec. 7.6 y con la Ec. 7.7 sin radiación de onda larga. Y con radiación de onda larga utilizando la Ec. 7.7, con y sin con velocidad del aire en el canal. Se representan también los valores medios de la diferencia de temperatura entre el interior y la cámara de aire, de la velocidad de aire en el canal de la cámara de aire y de la irradiancia solar vertical.

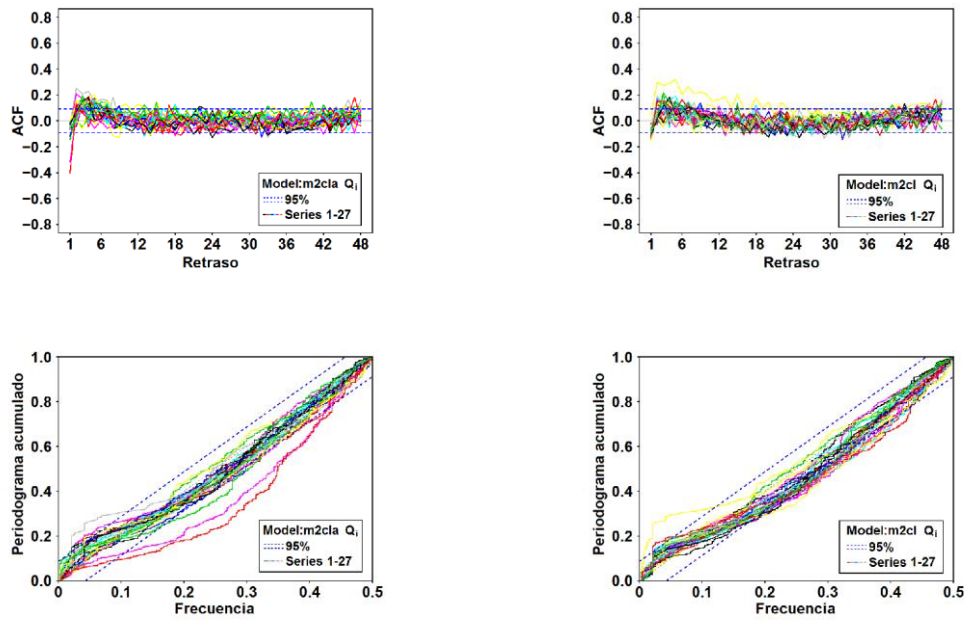


Figura 7.7.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos de la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando la Ec. 7.6 (m2cla, Izquierda) y la Ec. 7.7 (m2cl, derecha).

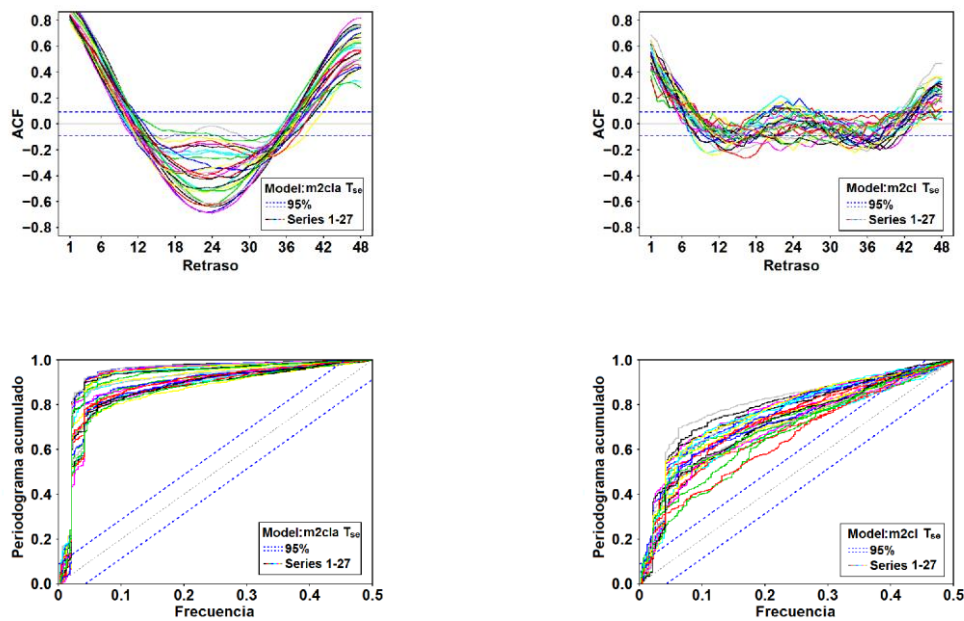


Figura 7.8.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos de la temperatura superficial del muro,  $T_{se}$ , para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando la Ec. 7.6 (m2cla, Izquierda) y la Ec. 7.7 (m2cl, derecha).

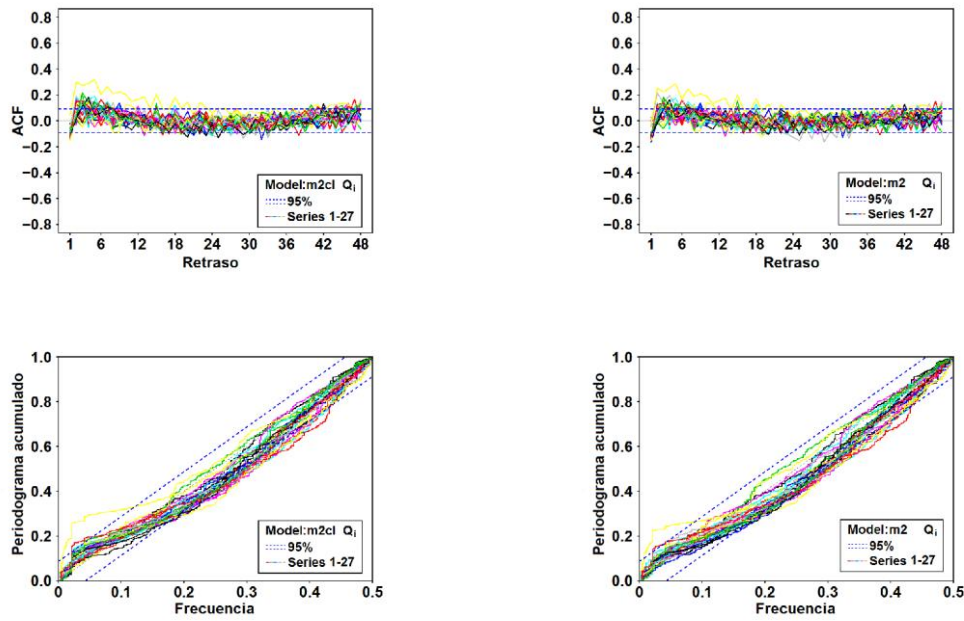


Figura 7.9.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos de la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando a Ec. 7.7 (m2cl, izquierda) y considerando la radiación de onda larga (m2, derecha).

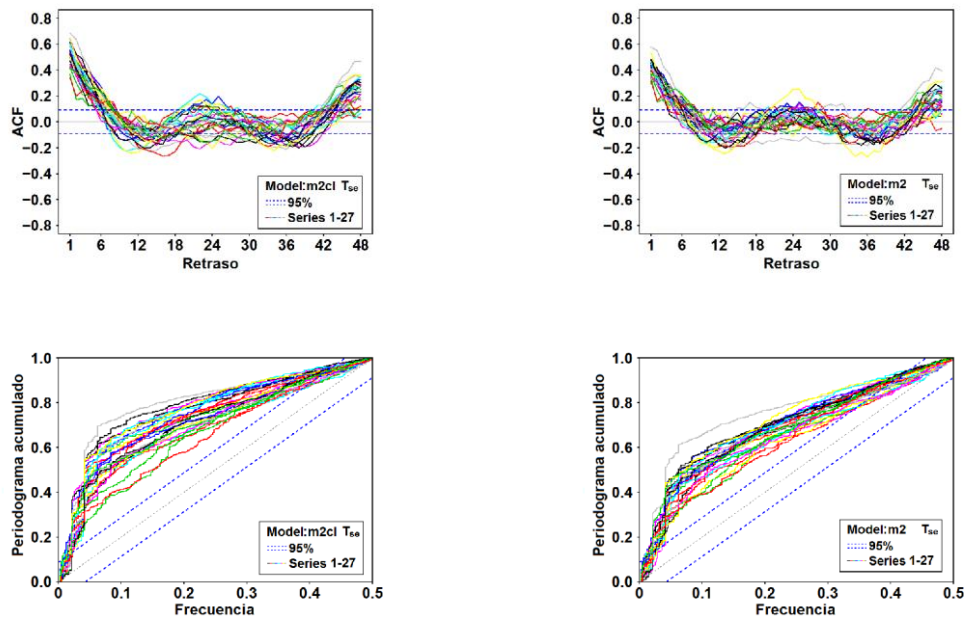


Figura 7.10.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos de la temperatura superficial del muro,  $T_{se}$ , para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando a Ec. 7.7 (m2cl, izquierda) y considerando la radiación de onda larga (m2, derecha).



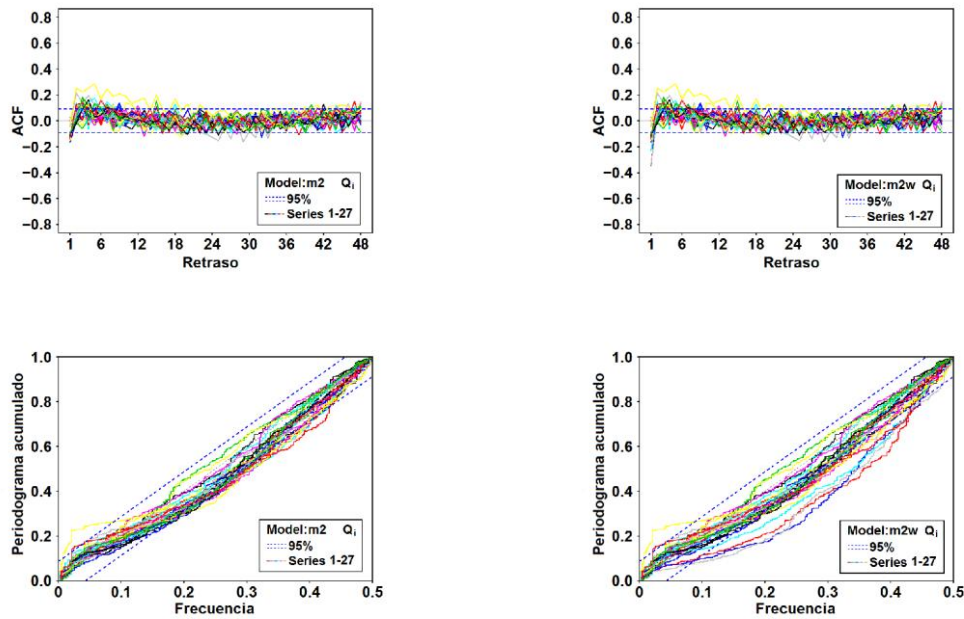


Figura 7.11.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos de la densidad de flujo de calor,  $Q_i$ , para todas las series del modelo 2, considerando la radiación de onda larga ( $m_2$ , izquierda) y considerando la radiación de onda larga y la velocidad del viento ( $m_{2w}$ , derecha).

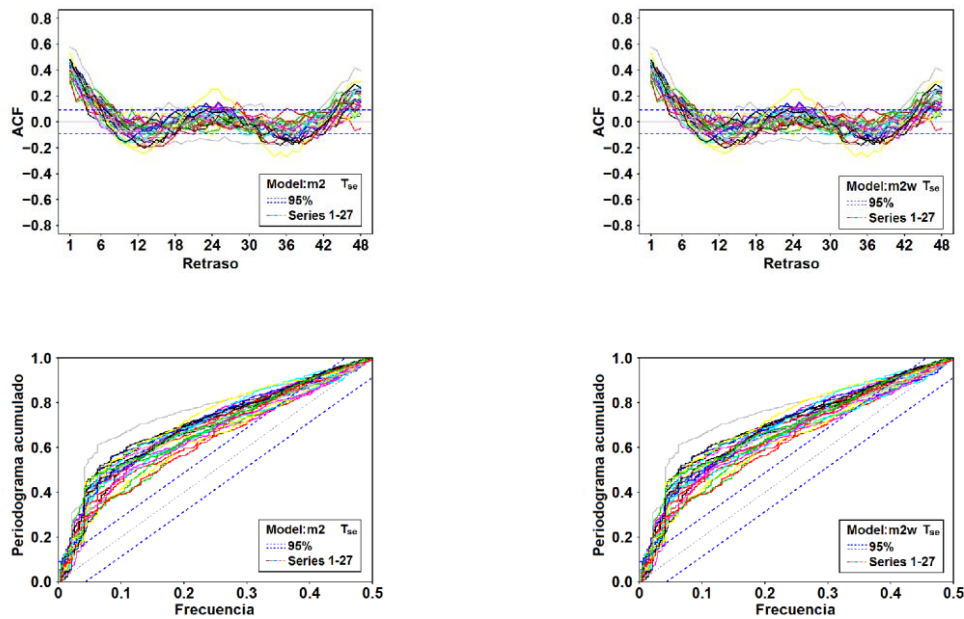


Figura 7.12.- Autocorrelación y períodograma acumulado de los residuos de la temperatura superficial exterior,  $T_{se}$ , para todas las series del modelo 2, considerando la radiación de onda larga ( $m_2$ , izquierda) y considerando la radiación de onda larga y la velocidad del viento ( $m_{2w}$ , derecha).

En las Figuras 7.7 y 7.8, se observa una mejora en las estimaciones cuando se emplea la Ec. 7.7 separando la temperatura de estado  $T_2$ , de la superficie del muro de referencia.

En las Figuras 7.9 y 7.10 puede verse que la mejora cuando se introduce el balance de radiación de onda larga es significativa, mientras que la inclusión de la velocidad del aire en el interior de la cámara ventilada no produce un efecto apreciable, como era de esperar dado el pequeño valor que ésta toma a lo largo de todo el período de medida gracias a la protección de la piel cerámica exterior.

También puede apreciarse que el modelado de la temperatura superficial presenta problemas para bajas frecuencias. Estos problemas parecen estar debidos al balance de energía de radiación de onda larga, ya que son sus variaciones diarias las que provocan la acumulación de errores en el modelo en los mismos intervalos de tiempo (día y múltiplos de día). Este efecto podría corregirse si se estudiaran series de datos con un período de tiempo de menos de diez días para hacer la predicción. Debido a que el principal problema en este caso sucede con la variación de la radiación solar que afecta al sistema, en este caso a la piel cerámica exterior principalmente. De modo que por causa de esta variable meteorológica, que puede presentar una alta variabilidad y es de difícil predicción, las predicciones de variables relacionadas con ella pierden fiabilidad con el paso del tiempo. No obstante, la estimación de los parámetros arroja valores que están dentro de los rangos esperados dadas sus propiedades físicas y son coherentes con los obtenidos previamente.

#### **7.4.4.- Test de máxima verosimilitud**

Una vez estimados los parámetros utilizando los modelos de uno y dos estados no medidos, y una vez que se han realizado los tests de análisis de residuos para comprobar su semejanza con un ruido blanco. Se procedió a realizar un test de máxima verosimilitud para evaluar la significancia estadística de la inclusión del balance de radiación de onda larga y de la velocidad del aire en el canal ventilado, así como para comprobar si la utilización de modelos más complejos implicaba mejora en la obtención de los parámetros o se incurría, entre otros, en un problema de sobreparametrización.

Los resultados pueden verse en la Tabla 7.9, donde se muestra el valor-p, de modo que cuando está es menor que 0.05 (5%), para una serie de datos, el modelo de mayor complejidad que está formado por un conjunto de variables mayor, puede decirse que estadísticamente supone una mejora sobre el modelo menor, que tiene un número de variables inferior.

Para la mayoría de las series calculadas, los resultados de la Tabla 7.9 muestran como los modelos que incluyen la dependencia con el balance de radiación de onda larga mejoran estadísticamente a los que no la consideran, y que los que incluyen la dependencia con la velocidad del aire en el canal no suponen una mejora, en el caso de fachada ventilada, a los que no lo hacen. También se observa como el modelo con dos estados mejora el de un solo estado

#### **7.4.5.- Consistencia física de los parámetros**

Así como se mostró en el Capítulo 6, debe tenerse en cuenta que el análisis de residuos es una herramienta estadística que facilita la elección de modelos, pero que no es ningún caso una prueba positiva por sí sola de que los parámetros obtenidos tengan un significado físico correcto, es decir, la consistencia física de los parámetros teniendo en cuenta sus propiedades materiales debe ser también considerada, y ante valores de los parámetros fuera de un rango aceptable, éstos no deben ser aceptados.

Esto puede apreciarse en las series estudiadas, donde la variación de la transmitancia térmica,  $U$ , toman valores demasiado bajos para todas las series cuando es tenido en cuenta el balance de onda larga. En este caso, la velocidad del viento en el canal de la fachada ventilada es baja y no su inclusión no es significativa.

Esto debe ser tenido en cuenta, puesto que considerando las propiedades físicas del muro, y los valores obtenidos para la transmitancia térmica,  $U$ , debe concluirse que cuando el balance de onda larga es incluido los resultados no mejoran.

Tabla 7.9.- Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p

Serie	m1cm1cl	m1wcm1	m2clcm2cla	m2cm2cl	m2wcm2
01	0.04	1.00	0.00	0.28	1.00
02	0.17	1.00	0.00	0.02	1.00
03	0.16	1.00	0.00	0.00	1.00
04	0.19	1.00	0.00	0.00	1.00
05	0.02	1.00	0.00	0.22	1.00
06	0.00	1.00	0.00	0.77	1.00
07	0.05	1.00	0.00	1.00	1.00
08	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00
09	0.00	1.00	0.00	0.83	0.98
10	0.00	1.00	0.00	0.01	1.00
11	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00
12	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
13	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00
14	0.00	1.00	0.00	0.00	0.90
15	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00
16	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
17	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
18	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
19	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
20	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
21	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
22	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
23	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
24	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
25	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00
26	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00
27	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00

### 7.5.- Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con los diferentes modelos para el caso de la fachada ventilada, puede concluirse que la utilización de un modelo de dos estados no medidas mejora de forma estadísticamente significativa las estimaciones obtenidas por el modelo de un solo estado no medido. No obstante, la ventaja reside en la posibilidad de modelar la temperatura de superficie, a pesar de que el análisis de los residuos revela la necesidad de investigar y buscar más en profundidad alternativas que expliquen este comportamiento, o para conseguir modelos que mejoren los resultados obtenidos.

También se ha observado, ver Figuras 7.4 y 7.6, como el valor de la transmitancia térmica es menor, sobre todo cuando se tiene en cuenta el balance de radiación de onda larga. Esto podría ser debido a la protección que la fachada ventilada produce sobre el muro en lo que respecta a la velocidad del viento, que como se ha visto influye por definición en el valor de  $h_{se}$ , y por tanto, en el valor de la transmitancia térmica,  $U$ . Efecto que es tanto más despreciable cuanto más aislante sea el muro estudiado y que podría ser causa en el presente estudio puesto que se trata de un muro simple con una baja capacidad aislante.

La incertidumbre de las estimaciones está dentro de unos límites aceptables dada la naturaleza a escala real de los ensayos.

Respecto al término relacionado con las absorptancias de la superficie exterior del muro de referencia se imposibilita su estimación dado que queda anulado el término de la irradiancia solar por la hoja cerámica. Por otro lado, para el factor de forma que debe aplicarse para el intercambio de energía en forma de radiación de onda larga entre ellas, se observa que su rango de valores oscila dentro de lo esperado, aunque presenta divergencias para algunas series de valores que obligan a que sea fijado. También se observa en este término que hay variación entre los modelos de uno y dos estados no medidos, de manera que es un término que debe ser analizado e investigado más detalladamente en futuros estudios.

Se ha llevado a cabo, el estudio dinámico del comportamiento térmico de un muro simple, supuesto homogéneo, convertido en una fachada ventilada tras finalizar su acoplamiento a una hoja cerámica exterior, para obtener estimaciones sobre los parámetros físicos que lo caracterizan y poder ver las variaciones respecto a su estado inicial cuando se trataba de un muro simple antes de colocar la hoja cerámica.

Se han podido utilizar los mismos modelos que se utilizaron en el Capítulo 6, variando en ellos solo las variables que diferían por el cambio de configuración del sistema experimental. Habiéndose obtenido la transmitancia térmica,  $U$ , la capacidad efectiva del muro,  $C$ , y el valor de  $b$  que es el coeficiente que determina el intercambio de energía mediante la radiación de onda larga. En concreto se han utilizado dos modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, uno de un estado, y otro de dos estados. Estos parámetros se han obtenido con diferentes hipótesis iniciales, haciendo distinción entre cuando se consideraban las ecuaciones de balance independientes, o dependientes, del balance de energía de onda larga, e independientes, o dependientes, de la velocidad del aire en la cámara ventilada teniendo en cuenta que la velocidad del aire junto a la superficie del muro si era necesaria para su cálculo.

Todas las estimaciones se han llevado a cabo para un período largo de tiempo, en torno a diez meses, tomando un intervalo típico de trabajos previos para su análisis, como para disponer de suficientes estimaciones que realizadas en condiciones de ensayo reales muy diferentes entre sí. Lo cual da un soporte muy robusto al procedimiento y los resultados obtenidos.

Aunque el resultado de las estimaciones de los distintos parámetros ha mostrado que las estimaciones de los modelos con un estado pueden ser consideradas suficientes. Se ha observado como los modelos más complejos, de dos estados, eran capaces de modelar la temperatura superficial del muro y presentaban un mejor comportamiento estadístico.

Un detalle importante a considerar en el estudio de la fachada ventilada, es ver como el sombreado hace de forma cuantitativa despreciable la influencia de la irradiancia solar en las ecuaciones de balance utilizadas para el cálculo de las estimaciones de los parámetros térmicos que caracterizan al muro.

Mientras que si es necesario considerar, dado que la temperatura de la hoja cerámica difiere notablemente de la temperatura superficial del muro, el balance de radiación de onda larga que era despreciable en el estudio del muro simple en su fase previa sin hoja cerámica.

Además, se ha comprobado que en este caso es despreciable la inclusión de la dependencia de las estimaciones con la velocidad del viento exterior. Dada la protección frente a este que ofrece la fachada ventilada, y los bajos valores que presenta el aire en el interior de la cámara ventilada. Esta independencia se traduce en un menor valor de la transmitancia térmica del muro de referencia.

Los valores de los parámetros obtenidos con los datos registrados para la fachada ventilada, concuerdan con los valores de los parámetros que se obtuvieron para el muro de referencia mediante el método dinámico integrado y dinámico, por lo que respecta al valor de la transmitancia térmica,  $U$ , y a la capacidad térmica efectiva,  $C$ . Lo cual supone un importante avance a la hora de caracterizar también una fachada ventilada en un tiempo de experimentación

reducido, pudiendo además, dada la versatilidad de las ecuaciones de balance, estimar más parámetros en futuros estudios.

La validación de los modelos considerando el análisis de residuos, mediante los tests de ruido blanco, mostró que para todas las series una gran parte de los resultados, al estudiar la densidad de flujo térmico, estaban dentro o muy próximos al rango establecido por los límites de confianza que fueron establecidos para todos los modelos en el 95%. Mientras que para la temperatura de superficie, a pesar de la mejora al considerar dos estados y la radiación de onda larga, se observan desviaciones significativas respecto al ruido blanco, por lo que futuros trabajos profundizarán en su análisis.

Los valores de los parámetros están dentro del rango de los valores teóricos que han sido calculados en el Capítulo 4, dadas las propiedades físicas del muro, lo cual es un indicador de su consistencia física. Aunque la metodología utilizada implica la obtención de unos parámetros térmicos equivalentes [Rabl1988], como ya se mencionó en el Capítulo 6. Y se aprecia la disminución de la transmitancia térmica total,  $U$ , al pasar a ser despreciable la velocidad del viento.

Por último, se ha comprobado con la fachada ventilada como el uso de un método dinámico avanzado, de tipo caja gris, facilita la modelización de sistemas constructivos complejos de una forma precisa. Así como hace más sencilla la identificación directa de parámetros, dado que pueden compararse de una forma más directa los modelos matemáticos con las ecuaciones físicas de balance energético. Confirmando el gran potencial en cuanto a la aplicación de esta metodología como ya se mencionó en el Capítulo 6.

## **VIII**

# **CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UNA CHIMENEA SOLAR: ANÁLISIS DINÁMICO**

## 8.- Caracterización térmica de una chimenea solar: Análisis dinámico

En este último Capítulo, una vez desarrollado y probado el análisis dinámico con el método de caja-gris mediante el uso de ecuaciones de balance energético, en forma de ecuaciones diferenciales estocásticas, que ha permitido la identificación de los distintos parámetros físicos de un muro simple y homogéneo, antes y después de formar parte de una fachada ventilada. Se va a proceder a estudiar un elemento constructivo algo más complejo, en concreto, la chimenea solar aislada descrita en el Capítulo 4.

### 8.1.- Introducción

El estudio de las chimeneas solares se engloba dentro de los elementos constructivos en la parte de ventilación natural de los mismos. En los últimos años ha habido una creciente actividad desarrollada entorno a caracterizar estos elementos y poder cuantificar el ahorro energético que podría suponer el integrarlos en los edificios actuales.

El estudio de estos sistemas como elementos pasivos para el ahorro energético en edificios empezó a ser considerado a partir de los años 70 con motivo de la necesidad de ahorrar energía en climatización debido a la crisis energética acontecida en la época.

Desde entonces ha habido diversos estudios teóricos y experimentales que han tratado de investigar la forma de caracterizar estos elementos de ventilación natural. Entre ellos cabe destacar el estudio [Bouchair, Bouchair94] de una chimenea solar que forma parte de una habitación de 12m<sup>3</sup>, donde se detallan aspectos de diseño que mejoran la utilidad de la chimenea para la ventilación de la habitación. Otros estudios sobre el diseño óptimo de una chimenea solar [Hirunlabh99, Khedari00] muestran algunos detalles que pueden ayudar a estimar el ahorro energético que se consigue con estos elementos pasivos.

También se han llevado a cabo estudios de chimeneas solares que emplean sistemas auxiliares de apoyo a la energía solar, así como con variaciones geométricas en busca de conseguir una mayor eficiencia en la ventilación natural [Chen03, Ong03a, Ong03b, Spencer]. En ocasiones se han utilizado simulaciones para verificar los estudios experimentales [Burek07].

No obstante, a pesar de la utilidad que las chimeneas solares pueden tener como elementos pasivos en la integración arquitectónica para conseguir ahorro de energías convencionales, y a pesar de todos los estudios, teóricos y experimentales que se han seguido realizando más recientemente [Chungloo07, Sakonidou08, Chungloo09, Maerefat10, Khanal11, Khanal12], aún es necesario investigar más estos dispositivos en condiciones de ensayo reales, es decir, haciendo experimentos in-situ utilizando chimeneas solares a escala real de modo que puedan cuantificarse de un modo preciso los beneficios de la utilización de este tipo de elementos constructivos pasivos.

También deben consultarse los estudios previos realizados sobre la chimenea solar objeto de estudio, y que han sido elaborados para diseñar y desarrollar el dispositivo experimental de manera que se viese optimizado el análisis posterior de su comportamiento [Martí, Martí07, Arce09].

Para mayor detalle sobre la situación actual del estado del arte de estos elementos pasivos puede consultarse la recopilación que se lleva a cabo en [Quesada2012].

Por todo lo expuesto, se concluye que para conseguir comprender de un modo correcto el funcionamiento de las chimeneas solares, es necesario diseñar e implementar experimentos como el que será objeto de estudio en el presente Capítulo, es decir, se estudiará una chimenea solar a escala real y se caracterizará mediante la utilización de técnicas de identificación de sistemas. Para ello se hará uso como es referente en el presente trabajo, de los datos experimentales obtenidos en un período largo de experimentación para estudiar, mediante la resolución del problema inverso, el comportamiento térmico de la chimenea solar.

Por tanto, el emplear técnicas de identificación de sistemas, viene a tratar de corregir algunos de los problemas con que se encuentran los estudios previos sobre chimeneas solares, dado que debido a la complejidad de los fenómenos físicos que intervienen en el comportamiento de estos elementos pasivos, se deben asumir frecuentemente varias aproximaciones para abordar el estudio teórico de los mismos. Y aporta nueva información a los trabajos previos realizados sobre la chimenea solar analizada.

## 8.2.- Datos Experimentales

Para el análisis de la chimenea solar se han utilizado los datos registrados desde el día 1 de enero de 2011 hasta el día 1 de enero de 2012, con algunas discontinuidades que han sido evitadas en la elección de las 28 series, de 10 días cada una, en que se ha dividido el período de experimentación, Tabla 8.1 (en azul los períodos que serán representados gráficamente, Figura 8.1).

Tabla 8.1.- Series de datos con la fecha de su registro

<b>Serie</b>	<b>Fecha</b>	
01	01/01/2011	11/01/2011
02	11/01/2011	21/01/2011
03	21/01/2011	31/01/2011
04	31/01/2011	10/02/2011
05	10/02/2011	20/02/2011
06	20/02/2011	02/03/2011
07	12/03/2011	22/03/2011
08	22/03/2011	01/04/2011
09	01/04/2011	11/04/2011
10	11/04/2011	21/04/2011
11	21/04/2011	01/05/2011
12	01/05/2011	11/05/2011
13	11/05/2011	21/05/2011
14	21/05/2011	31/05/2011
15	31/05/2011	10/06/2011
16	10/06/2011	20/06/2011
17	20/06/2011	30/06/2011
18	20/07/2011	30/07/2011
19	30/07/2011	09/08/2011
20	09/08/2011	19/08/2011
21	08/09/2011	18/09/2011
22	28/09/2011	08/10/2011
23	08/10/2011	18/10/2011
24	18/10/2011	28/10/2011
25	28/10/2011	07/11/2011
26	07/11/2011	17/11/2011
27	17/11/2011	27/11/2011
28	27/11/2011	07/12/2011



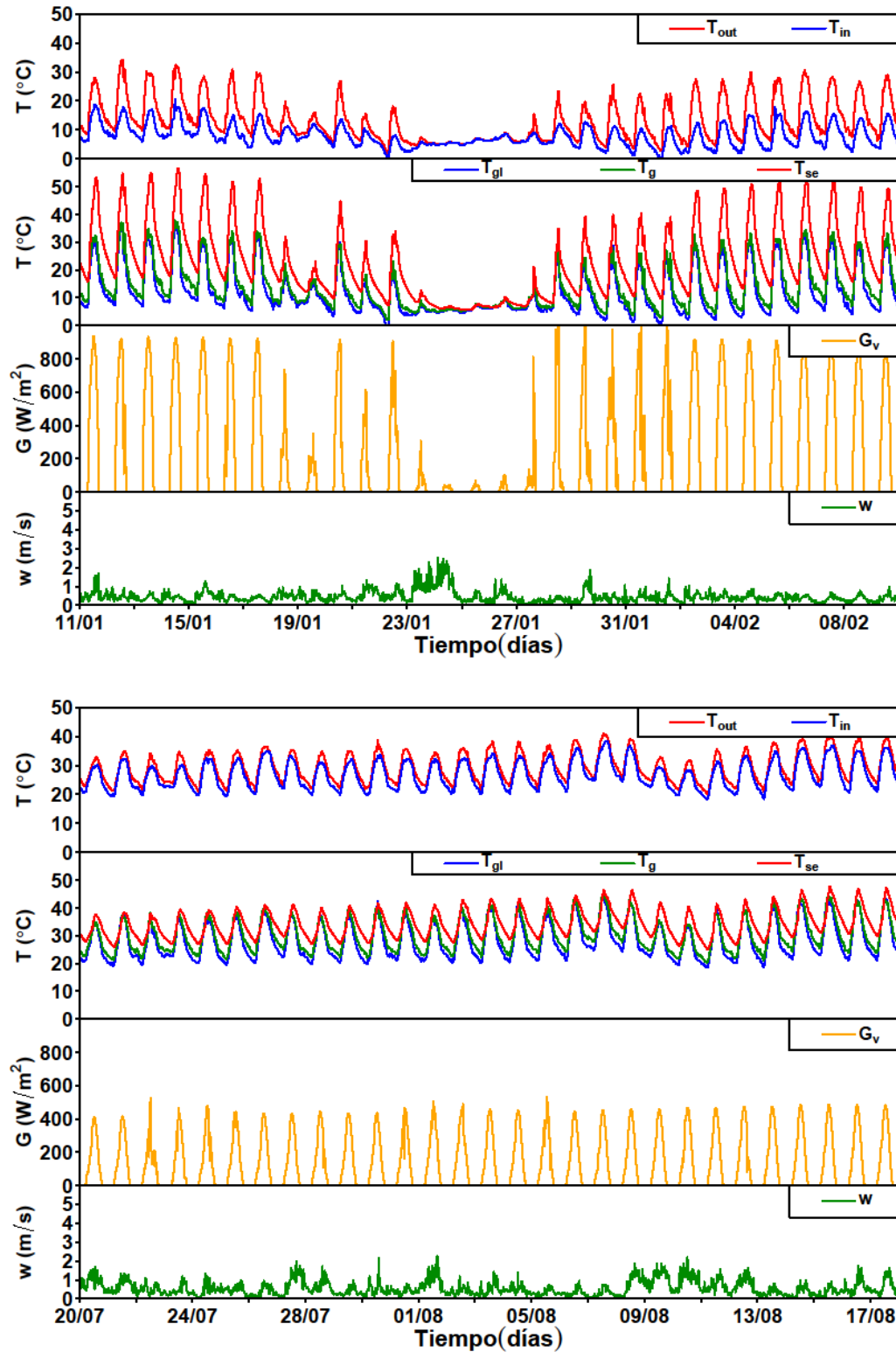


Figura 8.1.- Representación gráfica de los datos registrados, invierno (arriba) y verano (abajo) de 2011.

Una representación gráfica de los datos puede observarse en la Figura 8.1, donde se muestran los datos utilizados para el análisis en dos períodos (marcados en azul en la Tabla 8.1). Uno de ellos se corresponde con la estación de invierno, del 11 de enero al 9 de febrero, y el otro con la estación de verano, del 20 de julio al 18 de agosto, con condiciones meteorológicas muy

diferenciadas entre sí. Los datos representados, a modo de ejemplo, corresponden a las siguientes variables:

- $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_e$ : Temperaturas del aire de entrada y salida a la chimenea, temperatura de aire exterior.
- $T_{se}$ ,  $T_{gl}$ ,  $T_g$ : Temperaturas superficial del muro medido en la superficie en contacto con el canal de aire, del cristal y del canal de aire a media altura.
- $G_v$ ,  $w$ : Irradiancia solar vertical y velocidad del viento junto al exterior de la chimenea.

### 8.3.- Estudio estacionario de correlación de variables

Antes de iniciar el análisis dinámico del muro de inercia la chimenea mediante el uso de modelos de caja gris, aplicado en los capítulos anteriores para la caracterización térmica de un muro simple y homogéneo, se va a proceder, dadas las diferencias y la mayor complejidad del nuevo sistema, a realizar un estudio previo de correlación entre las variables medidas más relevantes, considerando los valores medios de las mismas a lo largo del período total de medida. De esta forma se pretende observar la dependencia de la temperatura superficial del muro de inercia de la chimenea con ellas, y poder así partir de una referencia para construir un modelo que refleje estas relaciones a la hora de obtener los parámetros térmicos característicos de la chimenea solar.

Las variables físicas medidas a considerar para el estudio de correlaciones son:

- $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_e$ ,  $\Delta T$ : Temperaturas del aire de entrada y salida a la chimenea, temperatura de aire exterior y diferencia de temperatura de aire entre salida y entrada ( $T_{out}-T_{in}$ ).
- $w_g$ ,  $G_v$ ,  $Q_w$ : Velocidad del aire en el canal interior de la chimenea, irradiancia solar vertical y densidad de flujo de calor sobre el muro de la chimenea medido en la superficie en contacto con el canal de aire.
- $T_{se}$ ,  $T_{gl}$ ,  $T_g$ : Temperaturas superficial del muro medido en la superficie en contacto con el canal de aire, del cristal y del canal de aire a media altura.

Tabla 8.2.- Correlación entre las principales variables registradas para la chimenea solar

	$T_{se}$	$T_e$	$T_{in}$	$T_{out}$	$Q_w$	$G_v$	$T_{gl}$	$w_g$	$T_g$	$\Delta T$
$T_{se}$	1.00	0.73	0.72	0.87	0.16	0.33	0.85	0.11	0.89	0.16
$T_e$	0.73	1.00	0.99	0.97	-0.55	-0.38	0.98	0.30	0.96	0.21
$T_{in}$	0.72	1.00	1.00	0.97	-0.56	-0.39	0.98	0.31	0.96	0.20
$T_{out}$	0.87	0.97	0.97	1.00	-0.34	-0.16	1.00	0.24	1.00	0.20
$Q_w$	0.16	-0.55	-0.56	-0.34	1.00	0.95	-0.38	-0.34	-0.30	-0.06
$G_v$	0.33	-0.38	-0.39	-0.16	0.95	1.00	-0.20	-0.11	-0.13	0.01
$T_{gl}$	0.85	0.98	0.98	1.00	-0.38	-0.20	1.00	0.26	1.00	0.21
$w_g$	0.11	0.30	0.31	0.24	-0.34	-0.11	0.26	1.00	0.22	0.26
$T_g$	0.89	0.96	0.96	1.00	-0.30	-0.13	1.00	0.22	1.00	0.20
$\Delta T$	0.16	0.21	0.20	0.20	-0.06	0.01	0.21	0.26	0.20	1.00

Los resultados de la Tabla 8.2 muestran como las variables con mayor correlación con la temperatura superficial son las temperaturas de entrada, la exterior, la de salida y la interior de la misma.

Se observa dado que la chimenea recibe aire directamente del exterior una dependencia casi exacta de la temperatura de entrada con la temperatura exterior.

Las temperaturas de entrada y salida muestran una gran correlación con la temperatura superficial, pero no ocurre así con la diferencia de temperatura entre ellas.

La densidad de flujo de calor presenta una correlación muy baja, que puede ser debida a que la mayor parte del proceso de almacenamiento e intercambio de energía no viene regido por el régimen de conducción de energía en forma de calor.

La irradiancia solar presenta un valor bajo dado que han sido tenidos en cuenta los períodos de noche en la media, sin tener en cuenta estos períodos, la dependencia de la temperatura superficial del muro con ella es notable y debe ser tenida en cuenta.

La correlación entre la temperatura ambiente en el interior de la chimenea y la del cristal es alta, así como con la temperatura superficial. El caso a considerar es el de la temperatura del interior del canal que muestra la importancia del intercambio de calor por convección aire-muro y aire-cristal.

#### **8.4.- Identificación de sistemas: Modelos de caja-gris**

La metodología aplicada en el estudio de la chimenea solar será semejante a la utilizada en capítulos anteriores.

En el Capítulos 3 se presentó con detalle una descripción de los modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas utilizados para la identificación de sistemas y considerados como modelos de tipo caja gris, y que han sido empleados en Capítulos precedentes.

##### **8.4.1.- Modelos candidatos considerados basados en ecuaciones diferenciales estocásticas**

Se han construido varios modelos, basados en ecuaciones diferenciales estocásticas, atendiendo a las siguientes hipótesis:

- Todos los coeficientes de transferencia de calor serán considerados constantes, en el tiempo y en toda la superficie del muro.
- La temperatura del muro de hormigón es constante para toda su superficie.
- La velocidad del aire en el interior del canal de la chimenea que favorece el intercambio por convección se considerará proporcional a la calculada a su entrada e igual para toda la superficie.
- Cuando sea supuesto el intercambio de energía en forma de radiación de onda larga, se supondrá que será debido principalmente al efecto invernadero creado por el vidrio, mediante un estado que represente al entorno.
- La temperatura del vidrio es constante para toda la superficie.
- La densidad de flujo térmico a través de la superficie del muro de hormigón es constante para toda la superficie.
- La irradiancia solar vertical incide por igual sobre toda la superficie del muro de hormigón.

Se han considerado dos modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, en primer lugar, un modelo con un estado no medido y posteriormente otro modelo con dos estados no medidos.

Las variables que serán utilizadas en el análisis se detallan a continuación:

VARIABLES MEDIDAS:

- $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_e$ : Temperatura del aire de entrada y salida a la chimenea y temperatura exterior.
- $w_g$ ,  $G_v$ ,  $Q_w$ : Velocidad del aire en el canal interior de la chimenea, e irradiancia solar vertical y densidad de flujo de calor sobre el muro de la chimenea
- $T_{se}$ ,  $T_{gl}$ ,  $T_g$ : Temperaturas superficial del muro, del cristal y del interior de la chimenea a media altura.

Variables de estado

- $T_1$  es la temperatura en el interior del muro que no se ha medido directamente.
- $T_{mr}$  es la temperatura media radiante vista desde la superficie del muro.

Parámetros estimados:

- $U_1$ ,  $U_2$ ,  $h_{se}$  son los coeficientes de conductancia y conductividad convectiva térmica del muro, respectivamente.
- $C$ , es la capacidad térmica efectiva del muro de inercia de la chimenea.
- $\alpha$  es la absorptancia del muro.
- $\tau$  es la transmitancia del vidrio (será supuesta como 1).
- $b$ ,  $b_1$  parámetros vinculados al intercambio de energía en forma de onda larga entre el muro y su entorno, según sus características físicas.
- $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  son parámetros auxiliares para modelar la temperatura superficial del muro.

#### 8.4.1.1.- Modelo de un estado no medido

En primer lugar se presenta el modelo 1, de un estado no medido. Pudiendo observarse en la Figura 8.2 el esquema del balance de energía en forma de calor en la chimenea solar para dicho modelo.

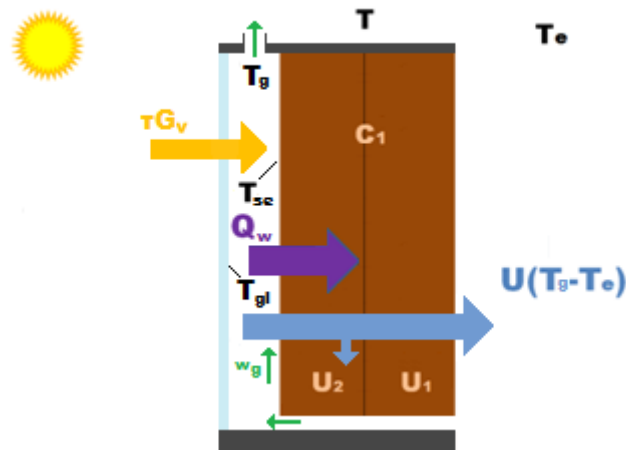


Figura 8.2.- Esquema del balance de energía en la chimenea solar considerando un estado no medido.

La ecuación de estado del sistema considerando el esquema de la Figura 8.2, puede escribirse mediante la ecuación diferencial estocástica mostrada en la Ec. 8.1.

$$dT = \left[ \frac{U_2}{C_1} (T_g - T) + \frac{U_1}{C_1} (T_e - T) + \frac{U_2 \alpha}{C_1 h_{se}} \tau G_v \right] dt + \sigma_{11}(\theta) d\omega_t \quad (8.1)$$



$$dT_{mr} = [b_1(T_{se}^4 - T_{mr}^4)]dt + \sigma_{22}(\theta)d\omega_t \quad (8.4)$$

La ecuación de observación se presenta en la Ec. 8.5.

$$T_{se} = a_1 T_g + a_2 T + a_3 G_v + a_4 (T_{mr}^4 - T_{se}^4) + e_{11} \quad (8.5)$$

La Ec. 8.5 contiene todas las posibles variables que influyen en la variación de la temperatura superficial del muro, y se ha incluido el balance de radiación de onda larga entre el muro y la variable de estado que da cuenta de la temperatura media radiante del entorno del mismo. En este caso, también se ha considerado de forma implícita la velocidad del aire en el canal de la chimenea.

Se han estudiado dos configuraciones del modelo 2 bajo las siguientes hipótesis:

- m2Ch: suponiendo que la irradiancia solar en el muro incide desde el amanecer al anochecer.
- m2Chs: suponiendo que la irradiancia solar en el muro no incide desde el amanecer al anochecer, debido a la sombra de sus paredes laterales.

#### 8.4.2- Identificación de los parámetros físicos

A partir de los modelos mostrados en la sección anterior pueden obtenerse algunos de los parámetros físicos que son considerados necesarios para describir y caracterizar el comportamiento térmico del muro.

En todos los modelos presentados en el presente capítulo (Ecs 8.1 y 8.3) la identificación de la absorptancia,  $\alpha$ , puede hacerse acoplada a otros parámetros, así como la de la capacidad térmica efectiva,  $C$ .

El valor de la transmitancia térmica  $U$  se obtiene a partir de la expresión mostrada en la Ec. 8.6.

$$\frac{1}{U} = \sum_i \frac{1}{U_i} \quad (8.6)$$

En la Ec. 8.6,  $U_i$  representa las transmitancias térmicas parciales calculadas en el modelo.

### 8.5.- Resultados y discusión

#### 8.5.1.- Introducción

En el presente Capítulo se ha modelado la temperatura superficial del muro de inercia de una chimenea solar y se ha identificado la dependencia de ésta con las distintas variables medidas en el experimento. Tanto para el modelo 1 como para el modelo 2, se han diferenciado cuatro configuraciones, de forma que se pueda determinar además la necesidad o no de introducir la influencia de la velocidad del aire en el canal sobre la transmitancia térmica del muro de inercia, así como la influencia del balance de energía en forma de radiación de onda larga entre el muro y su entorno, dado que éste se encuentra protegido por un vidrio del exterior. Otra posibilidad que se ha contemplado es la de considerar la sombra que producen sobre el muro las paredes laterales de la chimenea, y que hacen que la radiación solar incida sobre el muro a lo largo del

día durante un número de horas menor al que es medido por el piranómetro que se encuentra situado en la parte exterior de la chimenea solar. Se han utilizado directamente las Ec. 8.2 y 8.5 de observación basadas en la Ec. 6.14.

A continuación se procederá a mostrar los resultados más relevantes que se han obtenido a partir de los modelos presentados en la Sección 8.4 junto con una breve discusión de los mismos.

## 8.5.2.- Modelo de un estado no medido

### 8.5.2.1.- Estimación de los parámetros

El modelo 1 fue estudiado para las 28 series de datos presentadas en la Tabla 8.1.

Tabla 8.3.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Ch

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	C(MJ/K)	$\tau \alpha$
01	0.114 ± 0.370	12.7 ± 085.3	0.71 ± 13.56
02	0.113 ± 0.280	12.1 ± 053.5	0.71 ± 08.69
03	0.111 ± 0.226	19.2 ± 089.5	0.73 ± 01.66
04	0.108 ± 0.145	10.1 ± 028.4	0.50 ± 00.04
05	0.111 ± 0.202	15.1 ± 065.1	0.73 ± 01.35
06	0.110 ± 0.215	12.5 ± 047.3	0.70 ± 18.98
07	0.109 ± 0.202	12.9 ± 045.3	0.70 ± 12.54
08	0.107 ± 0.106	13.2 ± 028.1	0.70 ± 14.16
09	0.116 ± 0.330	24.6 ± 182.0	0.70 ± 02.12
10	0.109 ± 0.180	17.3 ± 061.8	0.70 ± 13.90
11	0.107 ± 0.114	19.5 ± 042.3	0.70 ± 13.02
12	0.106 ± 0.098	18.5 ± 033.6	0.70 ± 11.59
13	0.107 ± 0.128	20.6 ± 064.9	0.70 ± 29.08
14	0.105 ± 0.084	22.1 ± 034.8	0.69 ± 06.92
15	0.112 ± 0.269	29.0 ± 152.0	0.70 ± 02.14
16	N/A	N/A	N/A
17	0.154 ± 2.264	17.6 ± 334.0	0.70 ± 12.13
18	0.106 ± 0.091	17.8 ± 030.9	0.67 ± 10.73
19	0.106 ± 0.099	18.8 ± 035.7	0.69 ± 10.82
20	0.107 ± 0.135	20.2 ± 048.4	0.70 ± 12.99
21	0.109 ± 0.169	16.1 ± 050.7	0.70 ± 11.66
22	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A
24	0.118 ± 0.460	12.5 ± 100.0	0.68 ± 05.13
25	0.116 ± 0.350	12.3 ± 086.5	0.69 ± 02.95
26	0.116 ± 0.442	11.3 ± 066.0	0.70 ± 13.99
27	0.115 ± 0.356	15.6 ± 106.0	0.68 ± 03.05
28	N/A	N/A	N/A
<b>Media</b>	0.112 ± 0.305	16.7 ± 078.0	0.69 ± 9.72

En las Tablas 8.3-8.6 se recogen los distintos parámetros obtenidos, según se considere en el modelo una u otra configuración de las descritas en la Sección 8.4. En este caso es mostrada la transmitancia térmica del muro de inercia, U, la capacidad térmica efectiva, C, y el valor estimado de la transmitancia  $\tau$  por la absorptancia,  $\alpha$ .

Los valores estimados de U, C y  $\alpha$  también pueden observarse de forma gráfica en la Figura 8.4.

En ella se han añadido los valores medios, para las distintas series, de las temperaturas de entrada y salida, y de la irradiancia solar. De modo que puede observarse la variación de las condiciones de ensayo para las diferentes series consideradas.

Tabla 8.4.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Chs

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	C(MJ/K)	$\tau \alpha$
01	0.109 ± 0.174	15.6 ± 055.5	0.70 ± 01.04
02	0.109 ± 0.185	11.1 ± 033.6	0.70 ± 08.73
03	0.111 ± 0.238	21.3 ± 089.0	0.71 ± 16.80
04	0.109 ± 0.153	12.9 ± 047.5	0.72 ± 00.42
05	0.124 ± 0.772	18.2 ± 195.0	0.72 ± 10.09
06	N/A	N/A	N/A
07	0.135 ± 1.206	14.4 ± 243.0	0.68 ± 03.28
08	0.108 ± 0.152	14.6 ± 042.0	0.70 ± 11.93
09	0.116 ± 0.359	21.0 ± 136.0	0.70 ± 02.42
10	0.109 ± 0.203	17.4 ± 071.0	0.69 ± 12.05
11	0.107 ± 0.129	19.8 ± 047.8	0.71 ± 14.69
12	0.106 ± 0.108	18.6 ± 034.5	0.70 ± 04.28
13	0.108 ± 0.154	21.4 ± 142.0	0.71 ± 15.20
14	0.105 ± 0.089	22.5 ± 039.9	0.69 ± 11.34
15	0.114 ± 0.303	28.4 ± 169.0	0.70 ± 02.70
16	N/A	N/A	N/A
17	0.157 ± 1.592	08.1 ± 155.0	0.68 ± 11.62
18	0.106 ± 0.113	17.9 ± 035.8	0.68 ± 05.10
19	0.106 ± 0.106	17.9 ± 034.5	0.69 ± 09.70
20	0.107 ± 0.129	17.1 ± 040.0	0.70 ± 23.53
21	0.110 ± 0.222	13.6 ± 051.9	0.70 ± 04.23
22	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A
24	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A
26	0.127 ± 1.004	17.3 ± 283.0	0.71 ± 12.92
27	0.115 ± 0.375	19.4 ± 144.0	0.72 ± 12.14
28	0.108 ± 0.132	15.7 ± 047.5	0.71 ± 01.02
<b>Media</b>	0.114 ± 0.359	17.5 ± 097.2	0.70 ± 8.87



Tabla 8.5.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Chw

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	C(MJ/K)	$\tau \alpha$
01	0.120 ± 0.554	13.0 ± 123.0	0.71 ± 4.82
02	0.115 ± 0.049	12.4 ± 012.3	0.70 ± 0.14
03	0.114 ± 0.037	20.4 ± 017.4	0.71 ± 0.10
04	0.110 ± 0.146	10.8 ± 031.6	0.50 ± 0.06
05	0.110 ± 0.228	15.0 ± 021.4	0.70 ± 0.59
06	N/A	N/A	N/A
07	N/A	N/A	N/A
08	0.107 ± 0.209	14.1 ± 056.5	0.70 ± 2.86
09	0.116 ± 0.153	25.0 ± 074.1	0.66 ± 1.34
10	0.109 ± 0.086	17.3 ± 012.3	0.76 ± 1.07
11	0.107 ± 0.125	19.6 ± 017.4	0.70 ± 1.76
12	0.106 ± 0.094	18.6 ± 030.1	0.70 ± 3.32
13	0.107 ± 0.107	20.7 ± 064.6	0.70 ± 0.70
14	0.106 ± 0.077	25.8 ± 061.3	0.70 ± 1.85
15	0.114 ± 0.374	31.8 ± 027.3	0.78 ± 0.54
16	N/A	N/A	N/A
17	0.190 ± 0.099	02.0 ± 002.8	0.73 ± 0.08
18	0.107 ± 0.020	19.8 ± 015.0	0.71 ± 0.11
19	0.108 ± 0.052	25.4 ± 040.3	0.75 ± 0.03
20	0.107 ± 0.136	20.4 ± 110.0	0.72 ± 42.67
21	0.109 ± 0.182	16.1 ± 074.6	0.74 ± 0.68
22	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A
24	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A
26	0.116 ± 0.474	11.1 ± 003.8	0.73 ± 0.08
27	0.121 ± 0.385	15.4 ± 048.8	0.71 ± 2.73
28	N/A	N/A	N/A
<b>Media</b>	0.115 ± 0.179	17.7 ± 042.2	0.71 ± 3.28

Tabla 8.6.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Chsw

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	C(MJ/K)	$\tau \alpha$
01	0.109 ± 0.187	15.6 ± 050.0	0.71 ± 1.91
02	0.109 ± 0.225	11.1 ± 050.6	0.70 ± 0.62
03	0.112 ± 0.280	22.2 ± 070.0	0.71 ± 2.08
04	N/A	N/A	N/A
05	0.135 ± 0.436	17.7 ± 100.0	0.73 ± 0.21
06	N/A	N/A	N/A
07	N/A	N/A	N/A
08	0.108 ± 0.133	15.2 ± 037.6	0.71 ± 0.46
09	0.117 ± 0.332	21.3 ± 044.6	0.69 ± 0.88
10	0.110 ± 0.146	18.0 ± 027.3	0.76 ± 0.70
11	0.107 ± 0.121	19.8 ± 026.0	0.70 ± 20.59
12	0.106 ± 0.099	18.6 ± 031.1	0.73 ± 6.60
13	0.108 ± 0.118	21.5 ± 013.7	0.66 ± 0.62
14	0.106 ± 0.037	25.4 ± 019.9	0.70 ± 0.25
15	0.114 ± 0.481	30.5 ± 290.0	0.80 ± 10.52
16	N/A	N/A	N/A
17	0.154 ± 0.591	1.9 ± 008.1	0.74 ± 0.10
18	0.107 ± 0.096	19.4 ± 027.7	0.70 ± 0.44
19	0.101 ± 0.008	5.1 ± 014.4	0.98 ± 0.10
20	0.107 ± 0.033	17.1 ± 006.5	0.70 ± 0.21
21	0.110 ± 0.180	13.6 ± 043.5	0.68 ± 1.92
22	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A
24	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A
26	0.158 ± 0.280	12.1 ± 140.0	0.71 ± 4.38
27	0.119 ± 0.425	19.3 ± 043.5	0.69 ± 1.75
28	N/A	N/A	N/A
<b>Media</b>	0.115 ± 0.224	17.4 ± 055.7	0.73 ± 2.82

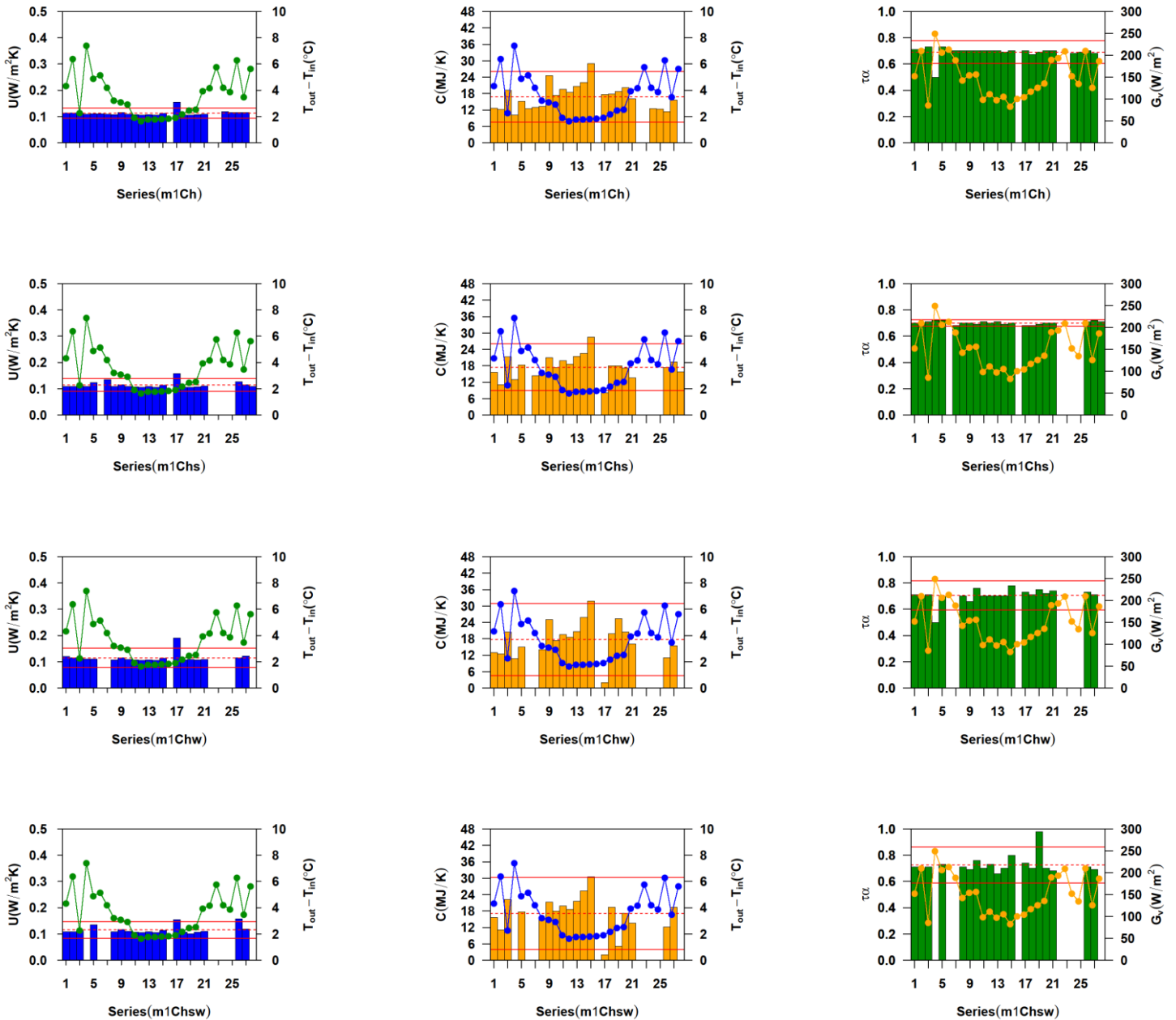
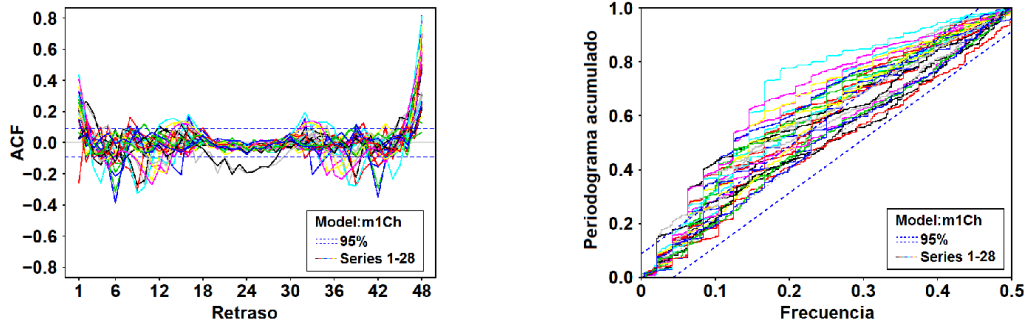


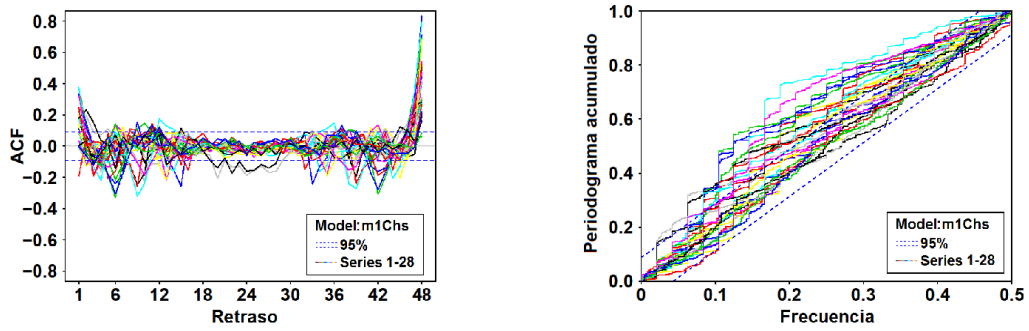
Figura 8.4.- Transmitancia,  $U$ , capacidad térmica efectiva,  $C$ , y absorptancia,  $\alpha$ , para el modelo 1, sin considerar y considerando la velocidad de aire en el canal. Se representan también los valores medios del gradiente de temperatura y de la irradiancia solar vertical.

### 8.5.2.2.-Análisis de residuos

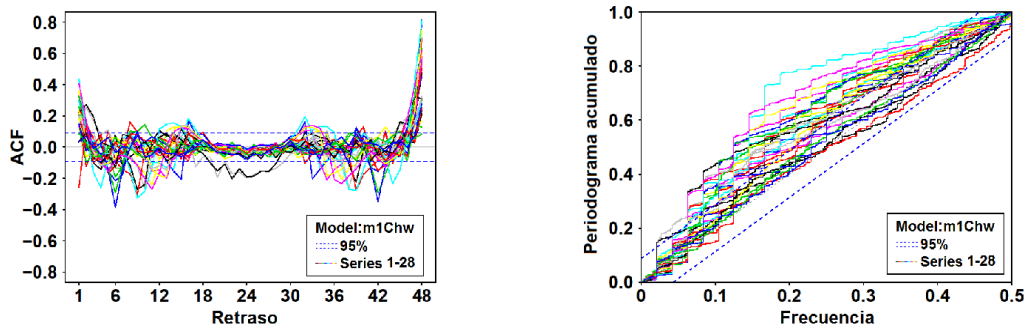
Se ha utilizado como criterio para estudiar la validez de los parámetros el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la temperatura de superficie del muro,  $T_{se}$ , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionada por el modelo físico-matemático.



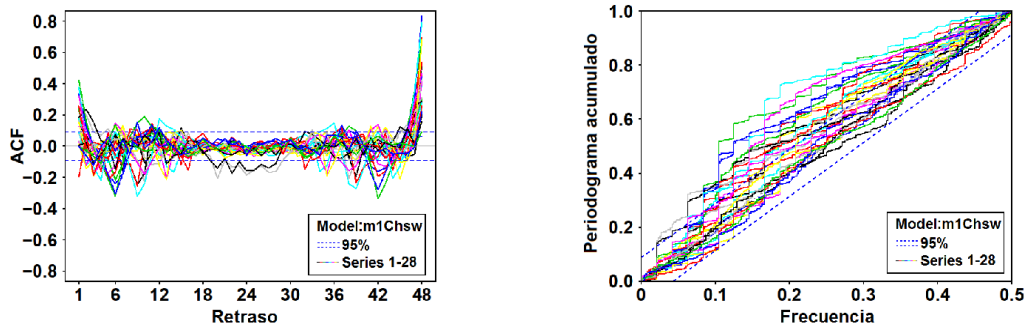
(a) m1Ch



(b) m1Chs



(c) m1Chw



(d) m1Chsw

Figura 8.5.- Autocorrelación (izquierda) y períodograma acumulado (derecha) de los residuos para todas las series del modelo 1 en sus diferentes configuraciones.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado (ver Capítulo 3) se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco, para poder valorar la bondad del modelo.

El resultado del análisis de los residuos para el modelo 1, para todas las series de datos, se muestra en la Figura 8.5, donde puede apreciarse como el tener en cuenta el sombreado de los laterales de la chimenea mejora el resultado de la predicción de la temperatura superficial (las distintas series representadas en las gráficas se sitúan en mayor proporción entre los límites del 95% representados), y como el valor de la velocidad del aire del canal, no mejora de forma estadísticamente significativa el comportamiento de los residuos (no se aprecia para las distintas series representadas en las gráficas que se sitúan en mayor proporción entre los límites del 95% representados), siendo la causa más probable de este resultado que su valor es de poca magnitud comparado con los de otras variables.

### 8.5.3.- Modelo de dos estados no medidos

El modelo 2 es una ampliación a dos estados del modelo 1, con el objeto de intentar apreciar la influencia del balance de la radiación de onda larga en la temperatura superficial del muro de inercia. Además de buscar conseguir una mejor estimación de los parámetros térmicos del muro, tras observar que los errores estimados, ver Tablas 8.3-8.6, son elevados.

Para el estudio de la influencia de la radiación de onda larga en la temperatura superficial, el modelo incorpora una variable de estado que representa a la temperatura media radiante del entorno del muro.

La forma de definir la temperatura superficial del muro supone, teniendo en cuenta los resultados de los Capítulos anteriores, que la variable de estado que proporciona la temperatura interior del muro ( $T_1$ ) queda asociada a una temperatura cercana a la superficie del muro, pero sin llegar a ser exactamente igual a la temperatura superficial.

Se ha realizado el análisis completo de todas las series de datos registradas para poder comprobar si el modelo con dos estados no medidos aportaba una mejora significativa, respecto al modelo 1, una vez añadido un efecto no lineal.

#### 8.5.3.1.- Estimación de los parámetros

En las Tablas 8.7 y 8.8 son presentados los valores estimados de  $U$ ,  $C$  y  $\tau\alpha$  al igual que con el modelo 1. En este caso, a la vista de los resultados del modelo 1, se ha despreciado la influencia de la velocidad del aire en el canal de la chimenea. Con lo que se presentan los valores estimados cuando no se considera el sombreado de las paredes laterales de la chimenea, y cuando si es considerado.

Los valores estimados de  $U$ ,  $C$  y  $\tau\alpha$ , se presentan gráficamente en la Figura 8.6, donde se han añadido los valores medios, para cada serie de datos, de la diferencia de temperaturas de aire interior-exterior y la irradiancia solar que incide sobre la chimenea, al igual que se hizo con el modelo 1.

#### 8.5.3.2.- Análisis de residuos

El criterio seguido para comprobar la validez de los parámetros ha sido el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la temperatura superficial del muro,  $T_{se}$ , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionada por el modelo matemático, como en el caso del modelo 1.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si se acercan más a las propiedades de un ruido blanco, para poder valorar la bondad del modelo y si supone una mejora respecto al modelo de un estado no medido.

El resultado del análisis para el modelo 2, para todas las series de datos, se muestra en la Figura 8.7.

No se observa una mejora significativa respecto a los resultados observados para el modelo 1, en cuanto al comportamiento de los residuos como ruido blanco. Pero si se observa una mejora en las estimaciones cuando se tiene en cuenta el sombreado de las paredes laterales de la chimenea sobre el muro de inercia, al igual que sucedió con el modelo 1.

También puede apreciarse que el modelado de la temperatura de superficie presenta problemas para bajas frecuencias, pero menores que en el estudio de la fachada ventilada. Esta mejora podría ser interpretada como una muestra de que los problemas detectados en la predicción de la temperatura superficial pueden ser debidos al balance de energía de radiación de onda larga.

La estimación de los parámetros arroja valores que están dentro de los rangos esperados, y en el caso del modelo con dos estados no medidos la incertidumbre se ve reducida cuando se modela la temperatura radiante media del entorno del muro de inercia de la chimenea solar.

Tabla 8.7.- Parámetros del modelo 2 para la configuración m2Ch

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	C(MJ/K)	$\tau \alpha$
01	0.114 ± 0.130	12.7 ± 04.6	0.74 ± 0.02
02	0.110 ± 0.064	10.9 ± 05.9	0.66 ± 0.20
03	0.111 ± 0.011	18.1 ± 03.8	0.84 ± 0.02
04	0.108 ± 0.065	09.5 ± 03.8	0.50 ± 0.03
05	0.106 ± 0.298	08.6 ± 28.0	0.92 ± 0.85
06	0.107 ± 0.031	11.3 ± 02.7	0.85 ± 0.16
07	0.110 ± 0.020	11.6 ± 01.1	0.84 ± 0.02
08	0.107 ± 0.047	13.3 ± 02.1	0.83 ± 0.17
09	N/A	N/A	N/A
10	0.108 ± 0.010	15.9 ± 04.0	0.73 ± 0.02
11	0.109 ± 0.311	18.2 ± 35.4	0.80 ± 0.43
12	0.106 ± 0.025	18.5 ± 03.1	0.84 ± 0.04
13	0.106 ± 0.337	18.9 ± 10.3	0.74 ± 0.13
14	N/A	N/A	N/A
15	0.109 ± 0.779	23.9 ± 79.6	0.73 ± 0.93
16	N/A	N/A	N/A
17	0.132 ± 0.029	10.6 ± 01.8	0.91 ± 0.03
18	0.273 ± 1.000	07.8 ± 15.8	0.76 ± 0.05
19	N/A	N/A	N/A
20	N/A	N/A	N/A
21	0.107 ± 0.012	14.7 ± 02.7	0.69 ± 0.01
22	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A
24	0.109 ± 0.076	10.2 ± 19.0	0.80 ± 0.19
25	N/A	N/A	N/A
26	0.144 ± 0.092	12.2 ± 02.1	0.75 ± 0.01
27	N/A	N/A	N/A
28	N/A	N/A	N/A
<b>Media</b>	0.121 ± 0.038	13.7 ± 04.2	0.77 ± 0.10

Tabla 8.8.- Parámetros del modelo 2 para la configuración m2Chs

Serie	U(W/m <sup>2</sup> K)	C(MJ/K)	$\tau \alpha$
01	0.108 ± 0.221	15.4 ± 11.6	0.75 ± 0.70
02	0.108 ± 0.263	10.5 ± 09.2	0.78 ± 0.07
03	0.216 ± 0.273	10.4 ± 06.5	0.77 ± 0.04
04	0.108 ± 0.032	11.8 ± 02.1	0.78 ± 0.02
05	0.116 ± 0.451	13.2 ± 26.2	0.79 ± 0.16
06	N/A	N/A	N/A
07	0.113 ± 0.012	10.0 ± 02.0	0.89 ± 0.12
08	0.107 ± 0.073	14.1 ± 10.4	0.83 ± 0.67
09	N/A	N/A	N/A
10	0.110 ± 0.120	15.9 ± 01.2	0.86 ± 0.16
11	0.106 ± 0.013	18.1 ± 04.3	0.73 ± 0.02
12	0.106 ± 0.029	18.2 ± 03.8	0.72 ± 0.02
13	0.106 ± 0.008	19.8 ± 02.5	0.73 ± 0.01
14	N/A	N/A	N/A
15	0.113 ± 0.046	23.8 ± 10.6	0.82 ± 0.05
16	N/A	N/A	N/A
17	0.137 ± 0.090	10.4 ± 04.8	0.87 ± 0.28
18	0.102 ± 0.063	12.2 ± 30.1	0.70 ± 0.88
19	N/A	N/A	N/A
20	N/A	N/A	N/A
21	0.111 ± 0.025	11.4 ± 02.2	0.81 ± 0.03
22	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A
24	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A
26	0.118 ± 0.033	14.0 ± 06.7	0.74 ± 0.00
27	0.114 ± 0.026	16.1 ± 02.7	0.77 ± 0.00
28	0.110 ± 0.738	11.4 ± 18.8	0.82 ± 2.43
<b>Media</b>	0.117 ± 0.025	14.3 ± 03.7	0.79 ± 0.05

#### 8.5.4.- Test de máxima verosimilitud

Una vez estimados los parámetros utilizando los modelos 1 y 2, considerando las distintas configuraciones descritas anteriormente, y una vez que se han realizado los tests de análisis de residuos para comprobar su semejanza con un ruido blanco. Se procedió a realizar un test de máxima verosimilitud para estimar la significancia estadística de si la inclusión de la velocidad del aire, y la utilización de modelos más complejos era o no apropiada.

Los resultados se presentan en Tabla 8.9, donde se muestra el valor-p, de modo que cuando esté por debajo del 5%(<0.05) para una serie de datos, el modelo de mayor complejidad, por estar formado por un conjunto de variables mayor, puede decirse que estadísticamente supone una mejora sobre el modelo menor.

Para la mayoría de las series calculadas, los resultados de la Tabla 8.9 muestran unos resultados poco satisfactorios en cuanto a lo que el test se refiere. Ya que respecto a ellos, la variación de la irradiancia solar recibida y de la utilización de un modelo de dos estados no medidos, parecen no presentar mejoras estadísticamente hablando. No obstante, este resultado deberá ser estudiado con más detalle en futuros estudios, dado que tanto las pruebas de ruido como los

parámetros estimados mostraban una mejora en su comportamiento y en su incertidumbre, que es apreciable de una forma cuantitativa.

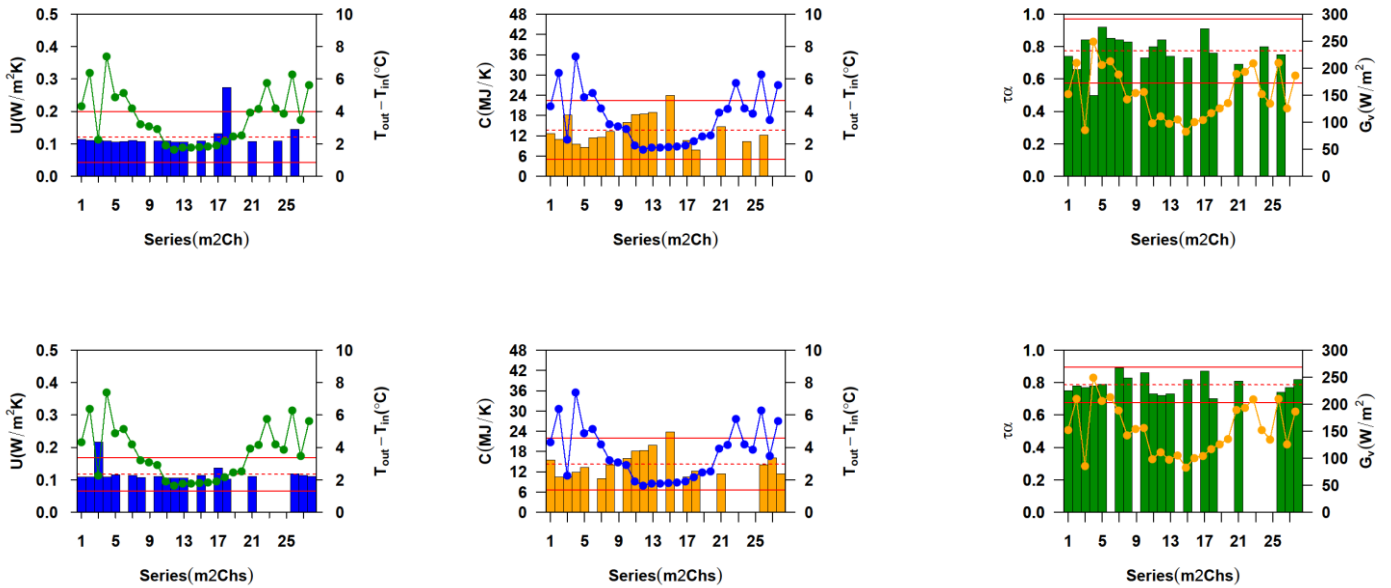


Figura 8.6.- Transmitancia, U, capacidad térmica efectiva, C, y absorptancia,  $\alpha$ , para el modelo 1, sin y con velocidad de viento. Se representan también los valores medios del gradiente de temperatura y de la irradiancia solar vertical.

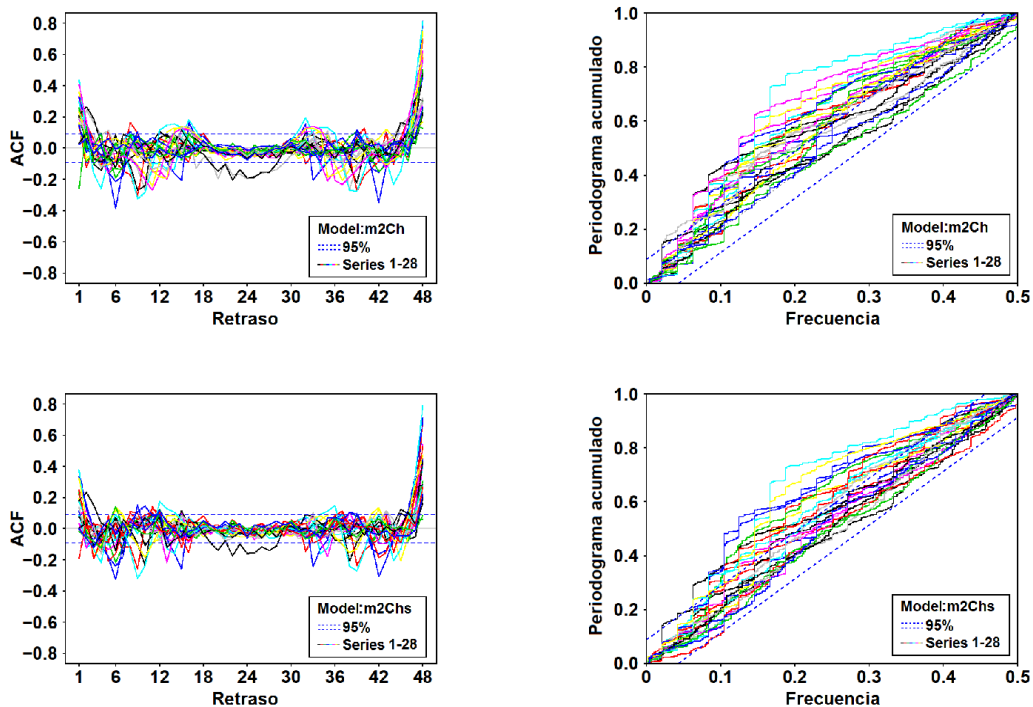


Figura 8.7.- Autocorrelación (izquierda) y períodograma acumulado (derecha) de los residuos para todas las series del modelo 2 en sus diferentes configuraciones, m2Ch (arriba) y m2Chs (abajo).



### 8.5.5.- Consistencia física de los parámetros

De igual modo a como se mostró en los Capítulos 6 y 7, debe tenerse en cuenta que el análisis de residuos es una herramienta estadística que facilita la elección de modelos, pero que no es ningún caso una prueba positiva por sí sola de que los parámetros obtenidos tengan un significado físico correcto, es decir, la consistencia física de los parámetros teniendo en cuenta sus propiedades materiales debe ser también considerada, y ante valores de los parámetros fuera de un rango aceptable, éstos no deben ser aceptados.

En el caso de la chimenea solar, los valores de la transmitancia térmica, U, toman valores dentro del rango esperado, no obstante, en este caso varias series presentan errores de mayor magnitud que el propio valor. Y además la capacidad calorífica efectiva tiene una variación entre series que algunos casos proporciona valores con grandes variaciones que no pueden ser explicadas físicamente, y deberán ser estudiadas en futuros estudios para comprobar la validez del método en unas condiciones que no están controladas como en el caso del muro ubicado en la célula de ensayo.

Tabla 8.9.- Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p

Serie	m1Chcm1Chs	m1Chcm1Chw	m1Chscm1Chsw	m1Chcm2Ch
01	1.00	0.13	0.99	1.00
02	1.00	0.53	1.00	1.00
03	0.00	0.05	1.00	1.00
04	1.00	0.01	0.00	1.00
05	0.00	1.00	0.38	1.00
06	-	-	-	1.00
07	0.00	-	-	1.00
08	0.00	0.16	0.28	1.00
09	1.00	0.99	0.63	-
10	0.00	0.99	0.63	1.00
11	1.00	0.99	1.00	1.00
12	1.00	0.99	1.00	1.00
13	0.00	1.00	1.00	1.00
14	0.00	0.00	0.00	-
15	1.00	0.07	0.18	1.00
16	-	-	-	-
17	1.00	0.26	0.53	1.00
18	1.00	0.16	0.02	1.00
19	1.00	0.00	0.00	-
20	1.00	1.00	1.00	-
21	0.00	1.00	1.00	1.00
22	-	-	-	-
23	-	-	-	-
24	-	-	-	1.00
25	-	-	-	-
26	0.00	1.00	0.18	1.00
27	1.00	0.07	0.14	-
28	1.00	-	-	-

## 8.6.- Conclusiones

Se han propuesto dos modelos para la temperatura de la superficie captadora, dado el importante papel que ésta desempeña en el comportamiento de la chimenea solar.

Teniendo en cuenta los residuos obtenidos, los modelos presentan un buen comportamiento en cuanto a la predicción de la temperatura superficial. Y considerando la desviación típica de los parámetros se concluye que el modelo de 2 estados introduce una mejora respecto al modelo 1, a pesar de que estadísticamente no se aprecie esta mejora si se considera el valor del test de verosimilitud de ambos modelos.

Además se ha obtenido el valor de la transmitancia térmica total  $U$ , el valor de la absorptancia atenuado por la transmitancia del vidrio, y el valor de la capacidad calorífica efectiva.

Como en el caso del muro visto en los Capítulos 6 y 7, los valores de los parámetros están dentro del rango de los valores teóricos que han sido calculados en el Capítulo 4, dadas las propiedades físicas de la chimenea solar, lo cual es un indicador de su consistencia física. Aunque la metodología utilizada implica la obtención de unos parámetros térmicos equivalentes [Rabl1988].

No obstante, observando los resultados obtenidos para los parámetros, y sus errores correspondientes, puede establecerse que sería necesario un estudio más detallado para poder comprobar si estas desviaciones se deben a un problema de los métodos empleados, o si por el contrario se debe a la configuración del experimento.

La justificación de haber tenido mayores dificultades en la identificación de los parámetros equivalentes de la chimenea solar puede deberse a que la principal variable motriz es la irradiancia sobre la superficie del muro. Cuando la irradiancia es débil todas las demás variables son débiles y cuando las variables motrices son del orden de magnitud del error experimental o su efecto en la ecuación de balance es débil no se pueden identificar de una forma óptima los parámetros asociados a esa variable.

Debe ser también considerado que la chimenea solar no está ubicada de forma que se disponga de una habitación auxiliar donde controlar mejor las condiciones del experimento, y poder estudiar así el muro de inercia de una forma más adecuada.

Y en similar sentido, para futuros estudios sería interesante poder disponer también en el muro de inercia de la chimenea solar de la densidad de flujo de calor desde el muro hacia la parte trasera de la misma.

# **IX**

## **CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Es el mejor de los buenos quien sabe que en esta vida todo es cuestión de medida: un poco más, algo menos...

Antonio Machado (1875-1939)

## 9.- Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

### 9.1.- Conclusiones

Se ha realizado un estudio sobre la aplicación de diversos métodos de identificación de sistemas, para comprobar su validez y limitación a la hora de obtener los parámetros físicos que describen el comportamiento térmico de distintos elementos constructivos, principalmente un muro simple supuesto homogéneo, tanto de forma aislada como formando parte de una fachada ventilada, y una chimenea solar.

El estudio ha buscado mostrar la capacidad de los distintos métodos para obtener los parámetros dentro de unos rangos próximos a los valores que las distintas normativas establecen para ellos en función de las propiedades físicas de los materiales constituyentes de los mismos.

En primer lugar se hizo un estudio empleando un método dinámico integrado, basado en la regresión lineal de los valores medios de las variables de entrada, que proporcionó resultados satisfactorios, y se mostraron sus limitaciones y aplicabilidad, antes de dar paso a la utilización de un método dinámico que tratase de mejorar y facilitar la identificación de todos los parámetros, también los relacionados con efectos dinámicos, que caracterizan a un muro.

En el caso del método dinámico, también se pudo observar que los valores de los parámetros obtenidos estaban dentro de un rango esperado dadas las propiedades físicas de los materiales que constituyen los muros estudiados, y se confirmó su concordancia con el método dinámico integrado en el caso del muro simple de la fachada ventilada.

Como una de los posibles métodos de evaluación de los resultados, se realizaron test estadísticos complementarios para estudiar la bondad de los modelos utilizados, habiéndose comprobado que estos tests no proporcionaban en todos los casos resultados positivos para la aceptación de los mismos si dependiese exclusivamente de ellos el tomar dicha decisión. Y habiendo mostrado también como la utilización de estos tests estadísticos necesita del apoyo de la interpretación física para poder ser aceptados, aun cuando sus resultados sean óptimos.

Por tanto, una vez comprobada una cierta diferenciación para la validación de los resultados a partir de la consistencia física y los criterios estadísticos, futuros estudios deberán incidir en su relación y conexión, y si la aplicación de los tests de ruido blanco pueden presentar problemas por causas debidas en el tratamiento del error del modelo, o si su comportamiento se debe un error en la formulación de los modelos que pueda ser subsanado en futuros trabajos con la inclusión de nuevas variables despreciadas o con el cambio de las relaciones entre ellas.

Una vez bien caracterizado el muro, se procedió a estudiarlo cuando se transformó en fachada ventilada, de la que el propio muro sirve de base. Los resultados desde el punto de vista físico fueron satisfactorios, y el sombreado del muro y la protección del mismo sobre el viento exterior propiciaron la mejora en la estimación del valor de la transmitancia térmica total  $U$ . Sin embargo, se pudieron observar ciertos problemas a la hora de interpretar la validación de los mismos mediante el uso de tests estadísticos, ya que aunque aparentemente el comportamiento de los residuos mejoraba teniendo en cuenta el término de balance de radiación de onda larga, la interpretación física de los resultados indicaba que este término parecía ser una fuente de incertidumbre añadida al modelo. Con lo que futuros estudios deberán comprobar si la formulación del modelo no es adecuada y deba revisarse.

Respecto a la chimenea solar se pudo observar que dado que el experimento no estaba diseñado para el cálculo específico de la transmitancia térmica total,  $U$ , en muchas series hubo problemas para la identificación de la misma. Siendo esto debido a que la principal variable motriz es la irradiancia solar, y la incidencia de ésta sobre el muro de inercia de la chimenea era muy variable a lo largo de todas las series de datos durante el experimento, con lo que ya a priori no era de esperar resultados satisfactorios cuando dicha variable tuviese una baja influencia. No obstante, el método ha demostrado ser válido para la mayoría de los datos disponibles, lo cual es positivo dado que aumenta su aplicabilidad.

Con todo lo expuesto, debe destacarse la importancia de tener en cuenta la física de los procesos a la hora de diseñar un modelo y de comprobar la validez del mismo al margen de la información que puedan aportar los tests estadísticos. Debido a que una de las cuestiones fundamentales a tener en cuenta consiste en establecer cuáles son las principales variables motrices del problema estudiado, y si sus magnitudes absolutas son superiores o del mismo orden de magnitud del error experimental, puede tenerse que su efecto en la ecuación de balance sea débil y no se puedan estimar e identificar los parámetros físicos asociados a cada variable motriz de una forma óptima.

Por último, se debe destacar que hay pocos estudios como el presente, que hayan sido llevados a cabo con experimentos en condiciones reales y con series de datos temporales que abarquen períodos de tiempo amplios, y que por tanto favorezcan los cambios en las condiciones experimentales para la identificación de los parámetros en condiciones variables, que no siempre serán óptimas, pero que facilitan que pueda llegarse hasta los límites de los métodos y se presenten las dificultades que conlleva estudiar la validez de los mismos respecto de la significancia estadística de los resultados. Puesto que cuando las condiciones cambian, ésta significancia no debe ser vista igual para todos los conjuntos de datos, y es entonces donde una interpretación de la consistencia física de los resultados juega un papel fundamental.

## **9.2.- Futuras Líneas de Investigación**

El presente trabajo deja abierta la posibilidad de realización de nuevos estudios de investigación a partir de los resultados presentados y de los datos obtenidos a lo largo del período de experimentación.

Dado que se ha hecho un estudio centrado en la validación de los métodos de identificación que no ha diferenciado de forma detallada cada una de las series de datos temporales registradas, sino que se ha hecho un análisis de una forma global buscando la generalidad del método, queda abierta la investigación para futuros trabajos del estudio de algunas de las causas que implican la variabilidad en la obtención de resultados en función de las distintas condiciones experimentales.

La utilización del método de identificación basado en ecuaciones diferenciales estocásticas aplicado en sistemas simples quiere servir como consolidación a su uso en sistemas más complejos, como puedan ser edificios, donde utilizar otras técnicas más detalladas suponga una complejidad y un coste temporal excesivos.

Y por su parte, los sistemas ventilados como la fachada ventilada y la chimenea solar, dejan abiertas todas las expectativas para una vez estudiadas sus características térmicas, futuros estudios de investigación pasen a incidir en los fenómenos de ventilación de la misma, tales como el estudio detallado de, entre otros temas:

- Los coeficientes de ganancia solar y pérdidas respecto al fluido en el canal de aire.
- El coeficiente (constante o función de otras variables) que relacione la irradiancia solar vertical con el caudal (o con la velocidad) del fluido en el canal de aire.
- Retardo entre la señal de radiación y caudal.

# **X**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## 10.- Bibliografía

- [1] [Andersen00] K. K. Andersen, H. Madsen, L. H. Hansen, Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations, *Energy and Buildings* 31 (1) (2000) 13-24.
- [2] [Androuts08] A. Androutsopoulos, J. J. Bloem, H. A. L. van Dijk, P. H. Baker, Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 189-196, "Outdoor 1 Testing, Analysis and Modelling of Building Components".
- [3] [Arce09] J. Arce, M. J. Jimenez, J. D. Guzman, M. R. Heras, G. Alvarez, J. Xaman, Experimental study for natural ventilation on a solar chimney, *Renewable Energy* 34 (12) (2009) 2928-2934.
- [4] [ARFRISOL] Proyecto Singular Estratégico sobre Arquitectura y Frío Solar, [www.arfrisol.es](http://www.arfrisol.es)
- [5] [Bacher11] P. Bacher, H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, *Energy and Buildings* 43 (7) (2011) 1511-1522.
- [6] [Bloem06] J. J. Bloem, Evaluation of a pv-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 205-216, "Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components".
- [7] [Bloem94] J. J. Bloem, C. of the European Communities. Joint Research Centre, I. for Systems Engineering, I. (Ispra), I. for Systems Engineering, Informatics, Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings: October 25-27, 1993, Joint Research Centre, Commission of the European Communities, 1994.
- [8] [Bloem96] J. J. Bloem, I. for Systems Engineering, I. C. of the European Communities. Joint Research Centre), System Identification Competition, EUR (Series), Office for Office Publ. of the Europ. Communities, 1996.
- [9] [Bloem01] J. J. Bloem, S. Martin, A pseudo dynamic analysis tool for thermal certification of dwellings, *Energy and Buildings* 33 (3) (2001) 207-212.
- [10] [Bouchair] Bouchair A. "Solar induced ventilation in the Algerian and similar climates". PhD thesis, Department of Civil Engineering, The University of Leeds, 1989.
- [11] [Bouchair94] Bouchair A. Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. *Buildings Services Engineering Research and Technology* 1994;15:81-93.
- [12] [Box] G.E.P. Box, W.G. Hunter "Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos". Ed. 1999.
- [13] [Burek07] Burek SAM, Habeb A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Wall. *Energy and Building* 2007;39:128-35.
- [14] [CIBSE06] C. I. of Building Services Engineers, Environmental design: CIBSE guide A, CIBSE guide, CIBSE, 2006.
- [15] M. Chaabene, Measurements based dynamic climate observer, *Solar Energy* 82 (9) (2008) 763-771.

- [16] [Chen03] Z. D. Chen, P. Bandopadhyay, J. Halldorsson, C. Byrjalsen, P. Heiselberg, Y. Li, An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat ux, *Building and Environment* 38 (7) (2003) 893-906.
- [17] [Chungloo07] S. Chungloo, B. Limmeechokchai, Utilization of cool ceiling with roof solar chimney in thailand: The experimental and numerical analysis, *Renewable Energy* 34 (3) (2009) 623-633.
- [18] [Chungloo09] S. Chungloo, B. Limmeechokchai, Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand, *Building and Environment* 42 (9) (2007) 3341-3351.
- [19] [Clarke96] J. A. Clarke, J. W. Hand, C. M. Johnstone, N. Kelly, P. Strachan, Photovoltaic-integrated building facades, *Renewable Energy* 8 (14) (1996) 475-479, "Special Issue World Renewable Energy Congress Renewable Energy, Energy Efficiency and the Environment".
- [20] [DYNASTEE] DYNamic Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings, [ww.dinastee.info](http://ww.dinastee.info)
- [21] [Duffie06] J. Duffie, W. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley Interscience Publication, 2006
- [22] [Enriquez] R. Enriquez "Evaluación Energética Experimental de Edificios en condiciones reales de uso mediante el Ajuste de Modelos de Simulación con aplicaciones al Control Predictivo". Tesis doctoral realizada en el CIEMAT, presentada en el departamento de Física Atómica Molecular y Nuclear y Energías Renovables de la Universidad Complutense de Madrid. (2013).
- [23] [Fernández] L.A. Fernández "Modelos avanzados para la predicción a corto plazo de la producción eléctrica en parques eólicos". Tesis Doctoral (2008).
- [24] [Friling09] N. Friling, M. J. Jimenez, H. Bloem, H. Madsen, Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules, *Energy and Buildings* 41 (10) (2009) 1051-1057.
- [25] [Ghiaus13] C. Ghiaus, Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load, *Energy* 50 (2013) 292-301
- [26] [Gil06] S. Gil, M. Mayochi, L. J. Pellizza, Experimental estimation of the luminosity of the sun, *American Journal of Physics* 74 (8) (2006) 728-733.
- [27] [Guzmán10] J.D. Guzmán, S. Castaño, M. J. Jiménez, M. R. Heras. "Instalación experimental para caracterización del comportamiento térmico de fachadas ventiladas". Presentado a I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar. (23-26 de marzo de 2010).
- [28] [Heras05] M. R. Heras, M. J. Jimenez, M. J. S. Isidro, L. F. Zarzalejo, M. Perez, Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept, *Solar Energy* 78 (1) (2005) 85-96.
- [29] [Hirunlabh] Hirunlabh J, Kongduang W, Namprakai P, Khedari J. Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. *Renewable Energy* 1999;18:109-19.



- [30] [Hokoi91] S. Hokoi, M. Matsumoto, T. Ihara, Statistical time series models of solar radiation and outdoor temperature identification of seasonal models by kalman filter, *Energy and Buildings* 15 (34) (1990-1991)373-383.
- [31] [Holman] J.P. Holman “Transferencia de calor”. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, 2000.
- [32] [IEA01] IEA Implementing Agreement on Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS), [www.ecbcs.org](http://www.ecbcs.org)
- [33] [IEA02] IEA Solar Heating and Cooling Programme (SHC), [www.iea-shc.org](http://www.iea-shc.org)
- [34] [IEA12] IEA ECBCS, Annex 58 reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements. (2012).
- [35] [Incropera07] F.P. Incropera, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, 2007.
- [36] [Inzunza] J. Inzunza “Física: Introducción a la mecánica” Universidad de Concepción. ISBN: 956-8029-35-4.
- [37] [ISO6946] Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method. International standard, EN ISO 6946, 2007.
- [38] [ISO9869] Thermal Insulation. Building Elements. In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance, International Standard ISO, ISO, 1994.
- [39] [Jelle12] B. P. Jelle, C. Breivik, H. D. Rkenes, Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 100 (0) (2012) 69-96, “Photovoltaics, Solar Energy Materials, and Technologies: Cancun 2010”.
- [40] [Jiménez] M. J. Jiménez. “Determinación de propiedades térmicas de cerramientos mediante células de ensayo de intemperie. Aplicación del cálculo de incertidumbres a la optimización de los ensayos”, CIEMAT-UAL, Tesis Doctoral (2005).
- [41] [Jiménez05] M. J. Jimenez, M. R. Heras, Application of multi-output arx models for estimation of the u and g values of building components in outdoor testing, *Solar Energy* 79 (3) (2005) 302-310.
- [42] [Jiménez08a] M. J. Jimenez, H. Madsen, Models for describing the thermal characteristics of building components, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 152-162, “Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components”.
- [43] [Jiménez08b] M. J. Jimenez, H. Madsen, K. K. Andersen, Identification of the main thermal characteristics of building components using matlab, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 170-180, “Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components”.
- [44] [Jiménez08c] M. J. Jimenez, H. Madsen, J. J. Bloem, B. Dammann, Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules, *Energy and Buildings* 40 (2) (2008) 157-167.
- [45] [Jiménez09] M. J. Jimenez, B. Porcar, M. R. Heras, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component u value, *Building and Environment* 44 (2) (2009) 361-367.

- [46] [Jiménez08] M. J. Jimenez, B. Porcar, M. R. Heras, Estimation of building component u and g from outdoor tests in warm and moderate weather conditions, *Solar Energy* 82 (7) (2008) 573-587.
- [47] [Jiménez11] M. J. Jiménez. LECE-UiE3-CIEMAT Test Facilities. Full scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances. (A Janssens, S. Roels, L. Vandaele, ed.), ISBN 978-94-9069-584-2, BFG, UGent, Belgium. (Seminario internacional organizado en la fase preparatoria de propuesta de Annex 58 ECBCS IEA. 30-31 Marzo 2011, Bruselas, Bélgica).
- [48] [Jiménez13] M. J. Jiménez, R. Enríquez, L. Castillo, M. R. Heras. Data analysis methods for building energy performance characterisation: context and CIEMAT experiences in applications to test campaigns in warm sunny weather. Workshop on sustainable energy, Brussels, 26-28 June 2013.
- [49] [JNewton] H.J. Newton “Statistics 626: Methods in Time Series Analysis” 1999.
- [50] [Juhl12] R. Juhl, ctsmr: CTSM for R, r package version 0.5.0-12 (2012).
- [51] [Kalman60] R.E. Kalman “A new approach to linear filtering and prediction problems”. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*. Vol. 82, 35-45, 1960
- [52] [Khanal12] R. Khanal, C. Lei, Flow reversal effects on buoyancy induced airflow in a solar chimney, *Solar Energy* 86 (9) (2012) 2783-2794.
- [53] [Khanal11] R. Khanal, C. Lei, Solar chimney: A passive strategy for natural ventilation, *Energy and Buildings* 43 (8) (2011) 1811-1819.
- [54] [Khedari00] Khedari J, Boonsri B, Hirunlabh J. Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. *Energy and Building* 2000;32:89–93.
- [55] [Kristensen03] N. Kristensen, H. Madsen, Continuous Time Stochastic Modelling CTSM 2.3 User Guide (2003).
- [56] [Kudriávtsev] L.D. Kudriávtsev “Curso de análisis matemático” Moscú: Editorial Mir, 1988.
- [57] [Lodi12] C. Lodi, P. Bacher, J. Cipriano, H. Madsen, Modelling the heat dynamics of a monitored test reference environment for building integrated photovoltaic systems using stochastic differential equations, *Energy and Buildings* 50 (0) (2012) 273-281.
- [58] [Ljung] Lennart Ljung. “System Identification: Theory for the User (2nd Edition)”.
- [59] [Madsen] H. Madsen “Time Series Analysis. Theory for the user”. Ed. 1999.
- [60] [Madsen95] H. Madsen, J. Holst, Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, *Energy and Buildings* 22 (1) (1995) 67-79.
- [61] [Maerefat10] M. Maerefat, A. P. Haghghi, Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney, *Renewable Energy* 35 (10) (2010) 2316-2324.
- [62] [Marinosci11] C. Marinosci, P. A. Strachan, G. Semprini, G. L. Morini, Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen faade building, *Energy and Buildings* 43 (4) (2011) 853-863.

- [63] [Martí] J. Martí. “Caracterización de una chimenea solar a través de parámetros físicos como sistema de ventilación natural”. Tesis doctoral realizada en el CIEMAT, presentada en el departamento de Física de los Materiales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia en noviembre de 2006.
- [64] [Martí07] J. Martí-Herrero, M. R. Heras-Celemin, Dynamic physical model for a solar chimney, *Solar Energy* 81 (5) (2007) 614-622.
- [65] [Matsumoto91] M. Matsumoto, S. Hokoi, H. Takamura, An analysis of stochastic properties of room air temperature and the heating load during autumn, *Energy and Buildings* 16 (3-4) (1991) 875-886.
- [66] [Miyazaki11] T. Miyazaki, A. Akisawa, I. Nikai, The cooling performance of a building integrated evaporative cooling system driven by solar energy, *Energy and Buildings* 43 (9) (2011) 2211-2218.
- [67] [Montgomery] D.C. Montgomery, E.A. Peck, G.G. Vining “Introducción al análisis de regresión lineal” México: Compañía Editorial Continental, 2005.
- [68] [Naveros10] I. Naveros, M.J. Jiménez, J.D. Guzmán, M.R. Heras. “Aplicación de métodos de identificación de sistemas al análisis experimental de una fachada ventilada: Análisis del muro base”. Presentado a I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar. (23-26 de marzo de 2010)
- [69] [Naveros11] I. Naveros “Aplicación de métodos de identificación de sistemas al análisis experimental de una fachada ventilada. Análisis del muro base” Trabajo de Investigación Tutelado. Universidad de Granada-CIEMAT. Abril 2011
- [70] [Naveros12] I. Naveros, M. J. Jimenez, M. R. Heras, Analysis of capabilities and limitations of the regression method based in averages, applied to the estimation of the u value of building component tested in mediterranean weather, *Energy and Buildings* (0) (2012) .
- [71] [O’Callaghan77] P. W. O’Callaghan, S. D. Probert, Sol-air temperature, *Applied Energy* 3 (4) (1977) 307-311.
- [72] [Ong03a] K. S. Ong, A mathematical model of a solar chimney, *Renewable Energy* 28 (7) (2003) 1047-1060.
- [73] [Ong03b] K. S. Ong, C. C. Chow, Performance of a solar chimney, *Solar Energy* 74 (1) (2003) 1-17.
- [74] [Parsons97] R. Parsons, R. American Society of Heating, A.-C. Engineers, 1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals, ASHRAE Handbook Fundamentals, ASHRAE, 1997.
- [75] [Porcar] B. Porcar. “Evaluación energética de edificios construidos: Aplicación de metodologías de identificación de sistemas”, CIEMAT-UCM, Tesis Doctoral (2008).
- [76] [Quesada12] G. Quesada, D. Rouse, Y. Dutil, M. Badache, S. Hall, A comprehensive review of solar facades. opaque solar facades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5) (2012) 2820-2832.
- [77] [Rabl88] A. Rabl, Parameter estimation in buildings: Methods for dynamic analysis of measured energy use, *Journal of Solar Energy Engineering* 110 (1) (1988) 52-66.
- [78] [RCore] R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0 (2012).

- [79] [Richalet01] V. Richalet, F.P. Neirac, F. Tellez, J. Marco, J.J. Bloem, HELP (house energy labeling procedure: methodology and present results, *Energy and Buildings* 33 (2001) 229–233.
- [80] [Sakonidou08] E. P. Sakonidou, T. D. Karapantsios, A. I. Balouktsis, D. Chassapis, Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow, *Solar Energy* 82 (1) (2008) 80-94.
- [81] [Sanjuan] C. Sanjuan "Análisis termofluido de fachadas ventiladas de junta abierta". Realizándose en el CIEMAT. Tesis doctoral realizada en el CIEMAT, presentada en la Universidad de Oviedo (2012).
- [82] [Santamouris10a] M. Santamouris, P. Wouters, I. E. Agency, I. N. for Information on Ventilation, E. Performance, I. U. of Architects, Proceedings of the 2nd PALENC Conference and the 28th AIVC Conference: Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 27 - 29 September 2007, Crete Island, Greece, Vol. 2 of Proceedings of the 2nd PALENC Conference and the 28th AIVC Conference: Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 27 - 29 September 2007, Crete Island, Greece, Heliotopos Conferences Limited, 2007.
- [83] [Santamouris10b] M. Santamouris, P. Wouters, I. E. Agency, I. N. for Information on Ventilation, E. Performance, I. U. of Architects, Proceedings of the 2nd PALENC Conference 6 and the 28th AIVC Conference: Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 27 - 29 September 2007, Crete Island, Greece, Vol. 1 of Proceedings of the 2nd PALENC Conference and the 28th AIVC Conference: Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 27 - 29 September 2007, Crete Island, Greece, Heliotopos Conferences Limited, 2007.  
URL <http://books.google.dk/books?id=f1QaPwAACAAJ>
- [84] [Seferis11] P. Seferis, P. Strachan, A. Dimoudi, A. Androutsopoulos, Investigation of the performance of a ventilated wall, *Energy and Buildings* 43 (9) (2011) 2167-2178.
- [85] [Sharples84] S. Sharples, Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces, *Building and Environment* 19 (1) (1984) 31-39.
- [86] [Sharples98] S. Sharples, P. S. Charlesworth, Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted at plate solar collector, *Solar Energy* 62 (2) (1998) 69-77.
- [87] [Strachan93] P. Strachan, Model validation using the passys test cells, *Building and Environment* 28 (2) (1993) 153-165, "Special Issue Thermal Experiments in Simplified Buildings".
- [88] [Spencer] Spencer S. An experimental investigation of a solar chimney natural ventilation system. Master thesis, Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University; 2001
- [89] [Strachan08a] P. A. Strachan, Simulation support for performance assessment of building components, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 228-236,
- [90] [Strachan08b] P. A. Strachan, L. Vandaele, Case studies of outdoor testing and analysis of building components, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 129-142.
- [91] [Strachan08c] P. Strachan, P. Baker, Outdoor testing, analysis and modelling of building components, *Building and Environment* 43 (2) (2008) 127-128,

- [92] [Soutullo] S. Soutullo “Estudio teórico experimental de una torre de viento evaporativa”. Tesis doctoral realizándose en el CIEMAT, presentada en el departamento de Física Atómica Molecular y Nuclear y Energías Renovables de la Universidad Complutense de Madrid (2012).
- [93] [Tham10] Y. Tham, T. Muneer, Sol-air temperature and daylight illuminance profiles for the ukcp09 data sets, *Building and Environment* 46 (6) (2011) 1243-1250. 7
- [94] [Watmuff77] J. H. Watmuff, W. W. S. Charters, D. Proctor, Solar and wind induced external coefficients - solar collectors, Tech. rep. (jun 1977).
- [95] [Yang12] X. Yang, L. Zhao, M. Bruse, Q. Meng, An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments, *Energy and Buildings* 54 (0) (2012) 243-251.

# **XI**

## **LISTAS DE TABLAS Y FIGURAS**

## 11.- Listas de Tablas y Figuras

### 11.1.- Lista de Tablas

Tabla 5.1.- Series de datos analizadas. Invierno(azul), verano (amarillo), primavera y otoño( blanco) .....	43
Tabla 5.2.- Valores medios de los datos registrados para todas las series. Invierno(azul), verano (amarillo), primavera y otoño( blanco) .....	44
Tabla 5.3.- Modelos considerados para la identificación .....	47
Tabla 5.4.- Transmitancia térmica, U (modelos m1 a m8). Período de integración de 1 día .....	53
Tabla 5.5.- Transmitancia térmica, U (modelos m1 a m8). Período de integración de 5 días .....	53
Tabla 5.6.- Transmitancia térmica, U (modelos m1 a m8). Período de integración de 10 días .....	53
Tabla 5.7.- Ordenada en el origen, b (modelos m1 a m8). Período de integración de 1 día .....	54
Tabla 5.8.- Ordenada en el origen, b (modelos m1 a m8). Período de integración de 5 días .....	54
Tabla 5.9.- Ordenada en el origen, b (modelos m1 a m8). Período de integración de 10 días .....	54
Tabla 5.10.- Ganancia solar, g (modelos m1 a m8). Período de integración de 1 día .....	55
Tabla 5.11.- Ganancia solar, g (modelos m1 a m8). Período de integración de 5 días .....	55
Tabla 5.12.- Ganancia solar, g (modelos m1 a m8). Período de integración de 10 días .....	55
Tabla 6.1.- Series de datos con la fecha de su registro .....	74
Tabla 6.2.- Parámetros del modelo 1 sin considerar la velocidad del viento (m1) .....	76
Tabla 6.3.- Parámetros del modelo 1 considerando la velocidad del viento (m1w) .....	76
Tabla 6.4.- Parámetros del modelo 2 sin considerar la velocidad del viento (m2b) .....	80
Tabla 6.5.- Parámetros del modelo 2 considerando la velocidad del viento (m2bw) .....	80
Tabla 6.6.- Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p .....	83
Tabla 7.1.- Series de datos con la fecha de su registro .....	89
Tabla 7.2.- Parámetros del modelo 1 sin radiación de onda larga (m1cl) .....	94
Tabla 7.3.- Parámetros del modelo 1 con radiación de onda larga (m1) .....	95
Tabla 7.4.- Parámetros del modelo 1 con radiación de onda larga y velocidad del aire, $w_c$ (m1w) .....	96
Tabla 7.5.- Parámetros del modelo 2 sin radiación de onda larga, Ec. 7.6 (m2cla) .....	99
Tabla 7.6.- Parámetros del modelo 2 sin radiación de onda larga, Ec. 7.7 (m2cl) .....	99
Tabla 7.7.- Parámetros del modelo 2 con radiación de onda larga (m2) .....	100
Tabla 7.8.- Parámetros del modelo 2 con radiación de onda larga y velocidad del aire en el canal, $w_c$ (m2w) .....	100
Tabla 7.9.- Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p .....	106
Tabla 8.1.- Series de datos con la fecha de su registro .....	111
Tabla 8.2.- Correlación entre las principales variables registradas para la chimenea solar .....	113
Tabla 8.3.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Ch .....	118
Tabla 8.4.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Chs .....	119
Tabla 8.5.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Chw .....	120
Tabla 8.6.- Parámetros del modelo 1 para la configuración m1Chsw .....	121
Tabla 8.7.- Parámetros del modelo 2 para la configuración m2Ch .....	125
Tabla 8.8.- Parámetros del modelo 2 para la configuración m2Chs .....	126
Tabla 8.9.- Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p .....	128

## 11.1.- Lista de Figuras

Figura 3.1.- Fenómenos de transmisión de energía en forma de calor .....	18
Figura 3.2.- Flujo de calor monodimensional a través de un elemento de volumen por conducción sin acumulación de calor .....	19
Figura 3.3.- Flujo de calor en una superficie por convección. ....	20
Figura 3.4.- Esquema iterativo de operación del filtro de Kalman.....	26
Figura 4.1a.- Variación teórica de la transmitancia térmica total, U, debido a la dependencia de hse con la velocidad del viento .....	33
Figura 4.1b.- Variación teórica de la transmitancia térmica total, U, debido a la dependencia de hse con la temperatura media radiante entre la superficie y sus alrededores .....	33
Figura 4.2.- Perfil del muro base (izquierda) y vista exterior del muro (derecha) .....	34
Figura 4.3. Esquema del perfil de la fachada ventilada.....	35
Figura 4.4.- Vista de la fase intermedia de construcción: Estructura metálica.....	36
Figura 4.5.- Vista exterior de la fachada ventilada .....	36
Figura 4.6.- Chimenea solar.....	37
Figura 4.7.- Sensores colocados en la Chimenea Solar.....	37
Figura 4.8.- Detalle del sistema de adquisición de datos .....	38
Figura 5.1.- Datos registrados para invierno y verano. Se muestra el mes de febrero y el mes de agosto de 2010. ....	42
Figura 5.2.- Esquema del balance de energía, en una dimensión, a través del muro .....	45
Figura 5.3.- Resultados utilizando todas las series de datos y considerando 1 día como período de integración. ....	50
Figura 5.4.-: Resultados utilizando todas las series de datos y considerando 5 días como período de integración. ....	51
Figura 5.5.- Resultados utilizando todas las series de datos y considerando 10 días como período de integración. ....	52
Figura 5.6.- Valor de U estimado suponiendo que $T_i - T_e$ es el único efecto que tiene influencia en la densidad de flujo de calor medida en la superficie interior.....	57
Figura 5.7.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 1, con $T_i - T_e$ y b. ....	58
Figura 5.8.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 1, con $T_i - T_e$ y b. ....	59
Figura 5.9.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 3, con $T_i - T_e$ , $G_v$ sin b. ....	60
Figura 5.10.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 8, con $T_i - T_e$ , $G_v$ , w, $T_{se4}$ , $G_{ir}$ , C y b. ....	62
Figura 5.11.- Resultados obtenidos para todas las series con diferentes períodos de integración, para el modelo 8, con $T_i - T_e$ , $G_v$ , w, $T_{se4}$ , $G_{ir}$ , C y b. ....	63
Figura 6.1.- Datos para las series 05 y 15, ubicadas en los meses de abril y agosto de 2010 .....	67
Figura 6.2.- Esquema del flujo de calor del muro considerando un estado interior no medido. ....	71
Figura 6.3.- Esquema del flujo de calor en el muro considerando dos estados intermedios no medidos. ....	72
Figura 6.4.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos, con un minuto de tiempo de muestreo .....	75
Figura 6.5.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos, con treinta minutos de tiempo de muestreo.....	75
Figura 6.6.- Transmitancia U y absorptancia para el modelo 1, sin y con velocidad de viento. Se representan también los valores medios de la diferencia de temperaturas, de la velocidad de viento y de la irradiancia solar vertical .....	77
Figura 6.7.- Autocorrelación y periódograma de los residuos para todas las series del modelo 1, sin considerar el viento (arriba) y considerando la velocidad del viento (abajo) .....	78
Figura 6.8.- Temperatura superficial medida y predicha (modelo 2a:verde, modelo 2b:rojo), para el día 16 de agosto de 2010 .....	79
Figura 6.9.- Transmitancia U y absorptancia para el modelo 2, con y sin velocidad de viento. Se representan también los valores medios del gradiente de temperatura, de la velocidad de viento y de la irradiancia solar vertical. ....	81
Figura 6.10.- Autocorrelación y periódograma de los residuos para todas las series del modelo 2, $Q_i$ , sin considerar el viento (arriba) y considerando la velocidad del viento (abajo).....	81
Figura 6.11.- Autocorrelación y periódograma de los residuos para todas las series del modelo 2, $T_{se}$ , sin considerar el viento (arriba) y considerando la velocidad del viento (abajo).....	82
Figura 6.12.- Autocorrelación y periódograma de los residuos para la serie 16 del modelo 1, sin considerar el viento (izquierda) y considerando la velocidad del viento (derecha) .....	84
Figura 7.1.- Representación gráfica de una parte de los datos registrados para la fachada ventilada. Período de verano de 2011, serie 04 (arriba) y período de invierno de 2012, serie 18 (abajo). ....	90
Figura 7.2.- Esquema del balance energético en la fachada ventilada con un estado no medido.....	92



Figura 7.3.- Esquema del balance energético en la fachada ventilada con dos estados no medidos .....	92
Figura 7.4.- Transmitancia U y valor de b para el modelo 1, sin y con velocidad de aire en el canal. Se representan también los valores medios de la diferencia de temperatura entre el interior y la cámara de aire, de la velocidad de aire en el canal de la cámara de aire y de la irradiancia solar vertical.....	97
Figura 7.5.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos para todas las series del modelo 1, sin considerar la radiación de onda larga (m1cl, izquierda), considerando la radiación de onda larga (m1, centro) y considerando la radiación de onda larga y la velocidad del aire en el canal (m1w, derecha). .....	97
Figura 7.6.- Transmitancia U y valor de b para el modelo 2, con la Ec. 7.6 y con la Ec. 7.7 sin radiación de onda larga. Y con radiación de onda larga utilizando la Ec. 7.7, con y sin con velocidad del aire en el canal. Se representan también los valores medios de la diferencia de temperatura entre el interior y la cámara de aire, de la velocidad de aire en el canal de la cámara de aire y de la irradiancia solar vertical.....	101
Figura 7.7.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos de la densidad de flujo de calor, Qi, para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando la Ec. 7.6 (m2cla, izquierda) y la Ec. 7.7 (m2cl, derecha). .....	102
Figura 7.8.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos de la temperatura superficial del muro, Tse, para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando la Ec. 7.6 (m2cla, izquierda) y la Ec. 7.7 (m2cl, derecha). .....	102
Figura 7.9.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos de la densidad de flujo de calor, Qi, para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando a Ec. 7.7 (m2cl, izquierda) y considerando la radiación de onda larga (m2, derecha). .....	103
Figura 7.10.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos de la temperatura superficial del muro, Tse, para todas las series del modelo 2, sin considerar la radiación de onda larga utilizando a Ec. 7.7 (m2cl, izquierda) y considerando la radiación de onda larga (m2, derecha). .....	103
Figura 7.11.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos de la densidad de flujo de calor, Qi, para todas las series del modelo 2, considerando la radiación de onda larga (m2, izquierda) y considerando la radiación de onda larga y la velocidad del viento (m2w, derecha). .....	104
Figura 7.12.- Autocorrelación y periódograma acumulado de los residuos de la temperatura superficial exterior, Tse, para todas las series del modelo 2, considerando la radiación de onda larga (m2, izquierda) y considerando la radiación de onda larga y la velocidad del viento (m2w, derecha). .....	104
Figura 8.1.- Representación gráfica de los datos registrados, invierno (arriba) y verano (abajo) de 2011.....	112
Figura 8.2.- Esquema del balance de energía en la chimenea solar considerando un estado no medido. ....	115
Figura 8.3.- Esquema del balance de energía en la chimenea solar considerando dos estados no medidos.....	116
Figura 8.4.- Transmitancia, U, capacidad térmica efectiva, C, y absorptancia, $\alpha$ , para el modelo 1, sin considerar y considerando la velocidad de aire en el canal. Se representan también los valores medios del gradiente de temperatura y de la irradiancia solar vertical.....	122
Figura 8.5.- Autocorrelación (izquierda) y periódograma acumulado (derecha) de los residuos para todas las series del modelo 1 en sus diferentes configuraciones.....	123
Figura 8.6.- Transmitancia, U, capacidad térmica efectiva, C, y absorptancia, $\alpha$ , para el modelo 1, sin y con velocidad de viento. Se representan también los valores medios del gradiente de temperatura y de la irradiancia solar vertical.....	127
Figura 8.7.- Autocorrelación (izquierda) y periódograma acumulado (derecha) de los residuos para todas las series del modelo 2 en sus diferentes configuraciones, m2Ch (arriba) y m2Chs (abajo). .....	127

