



# **INFORME DE LOS EXPERIMENTOS Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN**

**Análisis del comportamiento  
energético de los cerramientos de  
hormigón en base a la maximización  
de las ventajas derivadas de su inercia  
térmica**

**Universidad de Sevilla (Grupo Termotecnia)**

**Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)**

**Estudio de Arquitectura SAMLER**



# 1. INTRODUCCION

El proyecto que aquí se presenta tiene como objetivo reducir la demanda energética de calefacción y refrigeración de los edificios potenciando la inercia térmica de un material tradicional en la construcción como es el hormigón.

La potenciación de la inercia se debe a su capacidad para utilizar de manera óptima las fuentes y sumideros medioambientales de calor. En las aplicaciones de calefacción la fuente medioambiental por excelencia es el sol. En las aplicaciones de refrigeración el sumidero medioambiental de calor tradicional es el aire exterior en las aplicaciones de ventilación nocturna.

En numerosas zonas climáticas españolas y especialmente en Andalucía se da la paradoja de que existen muchas localidades en las que la disponibilidad de radiación solar en invierno y de bajas temperaturas nocturnas en verano es más que suficiente como para compensar respectivamente las pérdidas del edificio durante el periodo de calefacción y las ganancias del mismo durante el periodo de refrigeración.

En general el efecto de la inercia térmica en los cerramientos es una variable no considerada habitualmente en el diseño del edificio. Además de su difícil modelización para proyectistas y prescriptores, las herramientas de cálculo no han sido sensibles a este parámetro y el conocimiento de sus potenciales beneficios no ha sido considerado adecuadamente por la comunidad técnica y científica.

El **objetivo principal** del proyecto es parametrizar las variables fundamentales que caracterizan la inercia térmica de los edificios con vistas a mejorar sustancialmente su tratamiento en los procedimientos de cálculo del comportamiento térmico de edificios.

Este producto final responde al **Paquete de Trabajo T3: Validación de modelos mediante ensayos** como muestra la tabla de tareas a continuación.

TAREAS DEL PROYECTO	
T0	Coordinación y gestión técnica del proyecto
T1	Desarrollo o adaptación de modelos de referencia específicos para fenómenos de inercia basados en el contorno y la estructura del edificio
T2	Desarrollo de modelos de referencia específicos para fenómenos de inercia basados en elementos innovadores de la envolvente del edificio
T3	Validación de modelos previos mediante ensayos
T4	Desarrollar modelos de caracterización para los fenómenos de inercia basados en el contorno y la estructura del edificio
T5	Módulo de cálculo específico para la evaluación de los elementos innovadores citados en la tarea 2
T6	Procedimiento para incluir el módulo de cálculo específico de la tarea 5 en otras aplicaciones informáticas existentes
T7	Potencial de aplicación de las soluciones propuestas
T8	Explotación y difusión de los resultados

Este paquete de trabajo proporciona la información necesaria para la justificación del desarrollo del módulo de ensayo previsto en el proyecto, así como la consecución de ensayos y mediciones según lo anticipado para el correcto progreso de estos. Estos documentos facilitan además la reproducibilidad de estos ensayos en otras situaciones y condiciones ante escenarios de nuevos proyectos de mejora, o de estudio de nuevas soluciones en futuras ediciones.

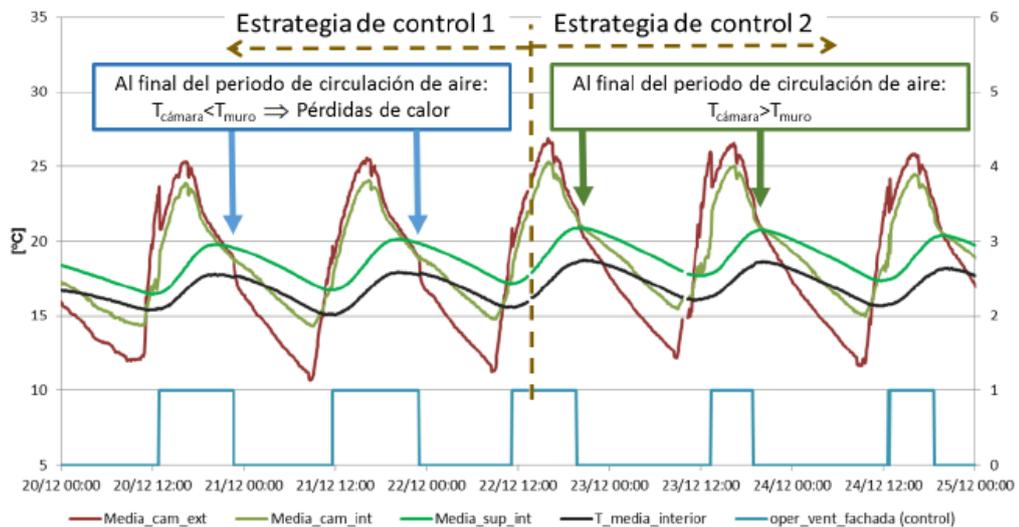
**Producto Final 4.1.- Protocolo de experimentación** incluyendo descripción de sensores, ubicación control de calidad de las medidas, calibración, secuencia de ensayos e instrumentación asociada a cada uno de ellos.

A continuación se incluyen algunas figuras de este documento



**Producto Final 4.2.- Informe de los experimentos.-** que contiene los objetivos de cada campaña de medida, los resultados y conclusiones obtenidos y finalmente las validaciones de los modelos teóricos llevadas a cabo con los datos experimentales recogidos.

A continuación se incluyen algunas figuras de este documento





Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA



Unión Europea



Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional

# PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN

**Análisis del comportamiento  
energético de los cerramientos  
de hormigón en base a la  
maximización de las ventajas  
derivadas de su inercia térmica**

**Universidad de Sevilla (Grupo Termotecnia)  
Instituto Español del Cemento y sus  
Aplicaciones (IECA)  
Estudio de Arquitectura SAMLER**





Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA**



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional



## INDICE

<b>1</b>	<b>MATERIALES Y EQUIPOS.....</b>	<b>5</b>
1.1	Hardware y software para la adquisición de datos y monitorización y control remoto .....	5
1.1.1	Ordenador para adquisición de datos .....	5
1.1.2	Software instalado en el ordenador .....	5
1.1.3	Sistema de adquisición de datos National Instruments CompactDAQ 9174.....	6
1.1.4	Router D-Link DWR-921 WiFi 3G/4G. ....	7
1.2	Estación Meteorológica.....	7
1.3	Registadores de datos (Dataloggers).....	9
1.3.1	Datalogger Delta Ohm HD 32.7.....	9
1.3.2	Datalogger Delta Ohm HD 2102.2.....	9
1.3.3	Datalogger YC-747 UD 4 CHANEL .....	10
1.3.4	Datalogger Testo 174T .....	10
1.3.5	Datalogger PCE-T390 .....	11
1.3.6	Analizador de potencia PCE PA 6000 .....	12
<b>2</b>	<b>SENSORES.....</b>	<b>13</b>
2.1	Listado de sensores .....	13
2.2	Protección de algunos sensores a la radiación solar y de onda larga. .	15
2.2.1	Medición de la temperatura exterior .....	15
2.2.2	Medición de la temperatura del aire en la cámara.....	16
2.2.3	Medición de la temperatura superficial.....	16
<b>3</b>	<b>CONTROL SOBRE LA CALIDAD DE LAS MEDICIONES .....</b>	<b>17</b>
3.1	Temperatura del aire exterior .....	17
3.2	Temperaturas interiores.....	19
3.3	Radiación solar.....	19

<b>4</b>	<b>INSTRUMENTACIÓN EN CADA ETAPA DEL PROYECTO .....</b>	<b>20</b>
4.1	Instrumentación en modo “Caseta de Referencia” .....	21
4.1.1	Sensores de temperatura.....	21
4.1.2	Otros sensores .....	26
4.2	Instrumentación en modo “Fachada activa, configuración verano” (Sinhor, modo verano) .....	28
4.2.1	Sistema de control y adquisición de datos CompaqDAQ .....	28
4.2.2	Cambio en la orientación del piranómetro LP PYRA 03.....	30
4.2.3	Analizador de potencia PCE PA 6000 .....	31
4.3	Instrumentación en modo “Techo refrescante” .....	31
4.3.1	Puntos de medición de temperatura .....	33
4.4	Instrumentación en modo “Fachada activa, configuración invierno” (Sinhor, modo invierno) .....	34
<b>5</b>	<b>RESUMEN FINAL .....</b>	<b>36</b>

Con el fin de hacer reproducible los ensayos realizados durante el presenta proyecto se muestra con este documento el protocolo de experimentación seguido para el experimento.

## 1 MATERIALES Y EQUIPOS.

A continuación se hace una descripción de los materiales y equipos empleados para la realización de las mediciones y pruebas del proyecto.

### 1.1 Hardware y software para la adquisición de datos y monitorización y control remoto

#### 1.1.1 Ordenador para adquisición de datos

Equipo: Intel® Core™2 CPU 6600 @2.40 GHz, 1.98 GB de RAM.

Sistema: Microsoft Windows XP Profesional, Versión 2002 Service Pack 3.

Conexiones: 1 Puerto serie (RS232), 10 Puertos USB



*Figura 1 Ordenador para la adquisición de datos*

#### 1.1.2 Software instalado en el ordenador

- Testo ComSoft-Basic: Software básico para la programación y lectura de los data loggers Testo.
- Temp Monitor\_S2, versión 1.0.12: Software para la lectura de dataloggers YTC
- Dalogger.exe "232 Data Acquisition Software": Software para la lectura del analizador de potencia.

- LabVIEW™ 2013. Software para lectura u control de los módulos conectados al chasis CompactDAQ 9174.
- SpecWare 9 Pro, versión 9.04. Software para la lectura de los datos de la estación meteorológica WatchDog
- Deltalog9. Software para la lectura e dataloggers DeltaOHM. (Piranómetro y sensores PT100)

### 1.1.3 Sistema de adquisición de datos National Instruments CompactDAQ 9174



Figura 2. Chasis CompactDAQ 9174

Este sistema de adquisición de datos consiste de un chasis con conexión USB al ordenador, y al que se le pueden conectar hasta cuatro módulos de distinta naturaleza que pueden tener señales de entrada y/o salida. Este sistema es reconocido automáticamente por el software LabVIEW, con el que se personaliza la manera en la que adquiere, analiza, presenta y administra los datos de medidas.

#### 1.1.3.1 **Módulo NI 9213**

Entrada de Termopares de  $\pm 78$  mV, 75 kS/s, 16 Canales,  $\pm 78$  mV, ADC de 24 bits por hasta 0.02 °C de sensibilidad de medida.

Soporte para tipos de termopares J, K, T, E, N, B, R y S

#### 1.1.3.2 **Módulo NI 9214**

Módulo de Entrada de Termopares Isotérmicos de 16 Canales, Bloque terminal isotérmico precisión de medidas hasta 0.45 °C, Varios sensores de compensación de unión fría (CJC), ADC de 24 bits por hasta 0.02 °C de sensibilidad de medida.

Soporte para tipos J, K, T, E, N, B, R y S

#### 1.1.3.3 **Módulo NI 9474**

Módulo de Salida Digital Sourcing de 8 Canales, 24 V, Salida digital de 8 canales de alta velocidad a 1  $\mu$ s. Salida digital tipo sourcing, 5 V a 30 V

#### 1.1.3.4 Módulo NI 9205

Módulo de  $\pm 200$  mV a  $\pm 10$  V, Entrada Analógica, 250 kS/s, 32 Canales, 32 canales de una sola terminal o 16 canales diferenciales, velocidad de muestreo de 250 kS/s

Rangos de medida programables de  $\pm 200$  mV,  $\pm 1$  V,  $\pm 5$  V y  $\pm 10$  V; resolución de 16 bits



Figura 3 Módulos para la lectura de sensores y actuación sobre los ventiladores

#### 1.1.4 Router D-Link DWR-921 WiFi 3G/4G.

Cuatro puertos 10/100 Ethernet LAN, puerto WAN (RJ-45), dos antenas 4G LTE / 3G, hasta 150 Mbps con 802.11, velocidad de subida 50 Mbps, velocidad de descarga 100 Mbps



Figura 4. Router 3G/4G, para la monitorización remota de la caseta

### 1.2 Estación Meteorológica

Estación meteorológica WatchDog Series 2000.

Esta estación cuenta con los sensores que se describen en la Tabla 1. Se montó en la parte superior de la caseta con el fin de que las mediciones no se vieran afectadas por sombras u obstáculos próximos que modifiquen las condiciones del viento, etc. Un vista de la estación se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5. Estación meteorológica instalada en la caseta

Capacidad de datos: 8800 intervalos,

Puertos de sensor externo 6 (5 en el modelo 2900ET, 9 en el modelo 2800)

Sensores propios:

Tabla 1. Sensores de la estación meteorológica (tomado del manual de la estación)

Sensor	Rango de medición	Precisión
Velocidad del viento	0-175 mph	±5%
Dirección del viento	2° de incrementos	±7°
Temperatura	-20° to 70°C -4° to 158° F	±0.6°C ±1°F
Humedad relativa	Del 20% al 100% @5° a 50° C	±3%
Precipitaciones	0.01" (0.25cm) deresolución	±2%
Radiaciones solares	1-1250 W/m2	±5%

## 1.3 Registradores de datos (Dataloggers)

### 1.3.1 Datalogger Delta Ohm HD 32.7

8 entradas para sondas de temperatura con sensor Pt100 completas de módulo SICRAM. Pt100 de 4 hilos. Memoria flash para 96000 registros por canal. Conexión RS232 y USB 1.1-2.0.

Certificado de calibración de fábrica.



*Figura 6. Datalogger para la lectura de temperaturas interiores (sensores PT100)*

### 1.3.2 Datalogger Delta Ohm HD 2102.2

Instrumento portátil con visualizador LCD, registra la iluminación, la luminancia, el PAR y la irradiación (en las zonas de espectro VIS-NIR, UVA, UVB y UVC o en la medida de la irradiación eficaz según la curva de acción UV). guarda hasta 38.000 muestras que pueden ser transferidas a un ordenador conectado al instrumento a través del puerto serial poli-estándar RS232C y USB 2.0.



*Figura 7. Datalogger para la lectura de la radiación solar*

### 1.3.3 Datalogger YC-747 UD 4 CHANEL

Registrador de temperatura para termopares K/J/T/E/R/N, Resolución 0.1°C, con interfase USB, 4 canales de entrada y memoria interna para 10000 registros por canal.



*Figura 8 Datalogger para la lectura de temperaturas superficiales (sensores: termopares tipo T)*

### 1.3.4 Datalogger Testo 174T

Incluye sensor y registros de temperatura. Sensor tipo NTC (-30°C a +70°C), exactitud +/-0.5°C, resolución 0.1°C, memoria interna para 16000 registros.



*Figura 9 Datalogger para la medición de temperatura de aire interior*

Conexión a ordenador por mediante base interfaz USB para programación y lectura de los data loggers testo 174T y testo 174H .



### 1.3.6 Analizador de potencia PCE PA 6000

Función	Rango de medición; Precisión; Resolución
Medición de potencia real (AC, potencia de valor real), medición directa	1 W ... 6 kW; 1 W; $\pm 1,5\%$ + 5 dgt.
Medición de potencia real (AC, potencia de valor real), con adaptador ext. o convertidor de corriente	1 W ... 999,9 kW; 1 W; $\pm 1,5\%$ + 5 dgt.
Medición de potencia aparente (AC)	0,01 VA ... 9,999 kVA; 0,01 VA; $\pm 2\%$ + 2 dgt.
Factor de potencia (cos $\varphi$ )	0,00 ... 1,00; 0,01; $\pm 1,5\%$ + 2 dgt.
Contador de kWh	0,001 Wh ... 9999 kWh; 0,001 Wh; $\pm 1\%$ + 1 dgt.
ACV / DCV	0,1 V ... 600 V; 0,1 / 1 V; $\pm 1\%$ + 1 dgt. (101 ... 600 V)
ACA eff/rms DCA eff/rms	directa máx. 10 A; 10 mA, con cabezal inductivo máx. 1000 A; $\pm 1\%$ + 3 dgt.
ACA con pinza	hasta 2000 A (según la pinza)
Frecuencia	10,0 ... 999 Hz; 0,1 Hz; $1\%$ + 1 dgt.
Ohmios	1 $\Omega$ ... 19,99 k $\Omega$ ; 1 / 10 $\Omega$ ; $\pm 1\%$ + 1 dgt.
Pantalla	LCD multifuncional de 93 x 52 mm
Condiciones ambientales	máx. 80 % H.r. / 0 ... +50 °C
Alimentación	6 baterías AA de 1,5 V o con adaptador a la red
Dimensiones	280 x 210 x 90 mm
Peso	1600 g



Figura 11. Analizador de potencia para la medición del consumo de energía eléctrica

## 2 SENSORES

En este apartado se hace una enumeración de los sensores utilizados en la instrumentación de la caseta y después se muestran dos casos especiales en los que se protegieron a dos sensores de la radiación exterior para la correcta medida de la temperatura del aire.

### 2.1 Listado de sensores

- Termopares tipo T. (cobre / constantan), para medida de temperatura. precisión 0.5 °C. Son los sensores que se conectan a los dataloggers: YC-747 y a los módulos NI 9213 y NI 9214. Para un máximo de 40 puntos de medición. Se utilizaron principalmente para medición de temperaturas superficiales debido a que su pequeño tamaño hace que se produzca un buen contacto con la superficie y por lo tanto se realice una medición con bajo nivel de error.



Figura 12 Termopares tipo T

- PT100 clase A, en configuración de cuatro hilos para medidas de temperatura. Precisión  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ . Estos sensores se conectaron al datalogger Delta Ohm HD 32.7. Se utilizaron únicamente para la realización de mediciones de temperaturas de aire, dado que no eran aptos para realizar mediciones en las superficies. Se tomaron estos sensores como los de referencia por dos motivos: Según especificaciones, son los de mayor precisión y porque venían con un certificado de calibración del fabricante. En el momento de instalarlos en la caseta, eran sensores nuevos.

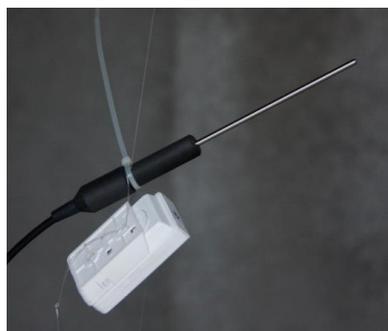


Figura 13 Sensor PT100 (lanza metálica). También se puede apreciar uno de los sensores Testo 174T (caja blanca)

- Termistores NTC Internos en los dataloggers Testo 174T, para medida de temperatura. Presición: +/-0.5°C.



*Figura 14 Imagen de unos termistores NTC.*

- Piranómetro LP PYRA 03, para la medición de la radiación global. Piránmetro de clase 2. La lectura de este sensor se realizó con el datalogger Delta Ohm HD 2102.2.



*Figura 15. Piranómetro LP PYRA 3*

Las especificaciones de este sensor son:

Technical Specification	LP PYRA 03
Typical sensitivity	10 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Impedance	33 $\Omega \div 45 \Omega$
Measuring range	0 $\div 2000 \text{ W}/\text{m}^2$
Viewing field	2 $\pi$ sr
Spectral field	305 nm $\div$ 2800 nm W/m <sup>2</sup> (50%)
Operating temperature	-40 °C $\div$ 80 °C
Working temperature	0. 45 Kg
ISO 9060 Specifications	
Response time	< 30sec
Zero Off-set	
a) Response to thermal radiation (200Wm-2)	25 W/m <sup>2</sup>
b) Response to temperature change 5K/h	<  $\pm$ 6 W/m <sup>2</sup>
3a) Non stability over 1 year	<  $\pm$ 2.5 %

3b) Non linearity	$< \pm 2 \%$
3c) Spectral selectivity	$< \pm 22 W/m^2$
3e) Response with regard to temperature	$< \pm 7 \%$
3f) Tilt-response	$< 8 \%$
3f) Risposta in funzione del Tilt	$< \pm 4 \%$

- Sensores de la estación meteorológica: No se posee información detallada ni del tipo de sensor utilizado para cada medición. Sólo se tienen los datos mostrados en la tabla de especificaciones de dicha estación.

## 2.2 Protección de algunos sensores a la radiación solar y de onda larga.

Los termopares que se ubicaron en la parte exterior de la caseta o que estaban expuestos a la radiación solar, fueron protegidos con elementos que garantizaban la correcta medición de la temperatura del aire.

### 2.2.1 Medición de la temperatura exterior

La medición de la temperatura exterior, se realizó con dos sensores: el de la estación meteorológica y con un termopar conectado al sistema de adquisición de datos CompactDAQ. El motivo de esta redundancia es que la medición de la estación meteorológica no se podía usar como señal de control.

El termopar fue ubicado en la fachada norte de la caseta con el fin de minimizar la cantidad de radiación solar a la que se veía expuesto, sin embargo, cierta cantidad de radiación sí podría incidir sobre él. Motivo por el cuál fue necesario diseñar e instalar una carcasa de protección a la radiación pero que permitiera la libre circulación de aire. La siguiente imagen muestra la carcasa dentro de la que se encontraba el termopar para la medida de la temperatura exterior.



Figura 16. Carcasa para la de protección para el sensor de temperatura exterior.

La carcasa mostrada está conformada por elementos bajo emisivos, que tienen poca interacción con la radiación y por tanto sus temperaturas se ven solo levemente alteradas por este fenómeno. Por otro lado, la carcasa goza de amplias aberturas que permiten la correcta ventilación interior que garantizan que la temperatura del aire en el interior de la carcasa será prácticamente la misma que la del exterior.

### 2.2.2 Medición de la temperatura del aire en la cámara

Cuando el elemento Senhor se configura en modo invierno, se tiene una cámara acristalada sobre la que incide la radiación solar. Con el fin de estudiar el comportamiento del elemento y para poder ejercer control sobre el mismo, es necesario medir la temperatura del aire en esta cámara. El reto de medir la temperatura del aire en esta zona está vinculado a la incidencia de radiación solar y al poco espacio disponible. La solución encontrada fue la de confinar a los sensores (Termopares tipo T) en el interior de un tubo aislado con una superficie bajo emisiva y promover la ventilación con unos ventiladores colocados en un extremo de los mismos, de tal manera que la radiación se vuelve despreciable en la toma de la medida de temperatura.

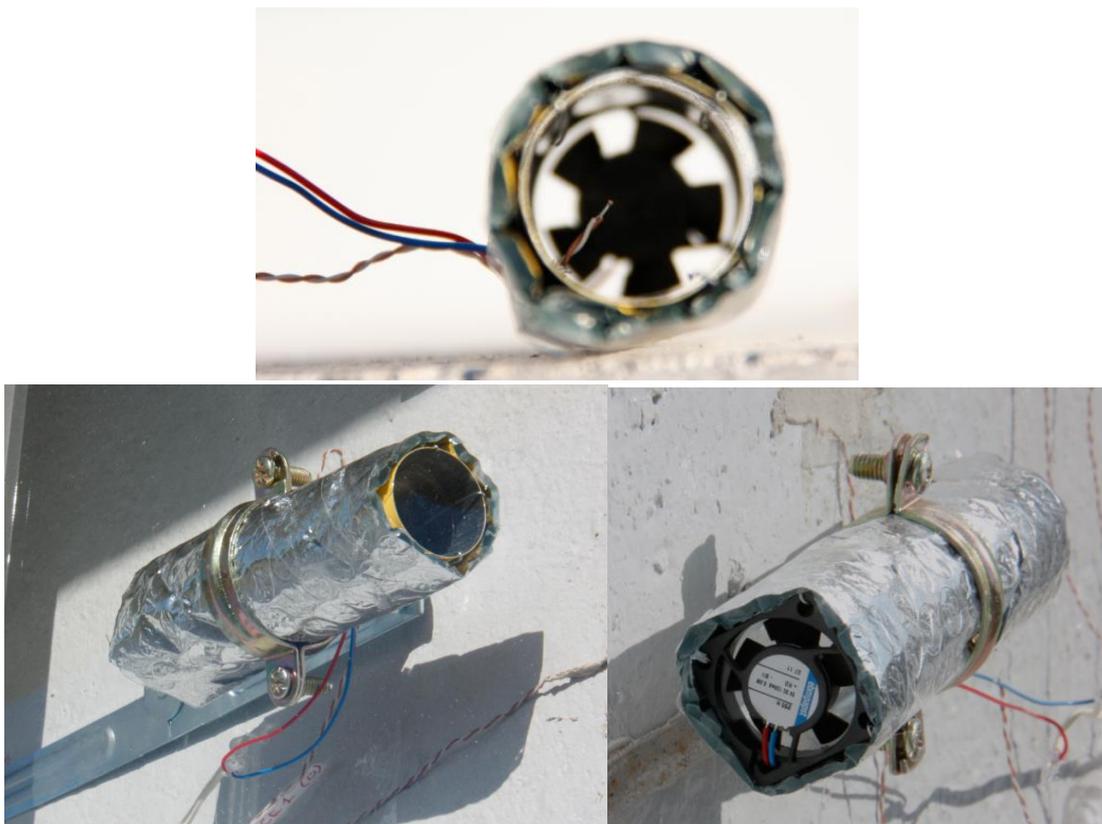
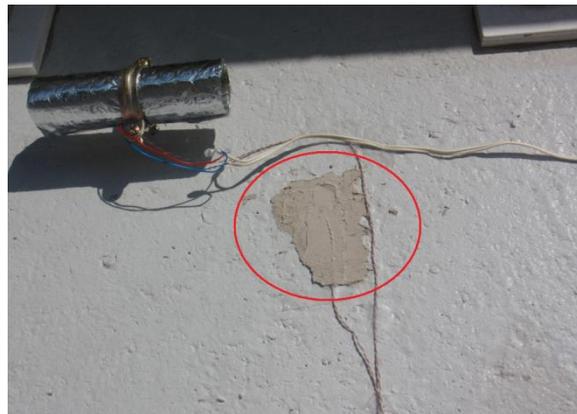


Figura 17. Dispositivo para la medición de la temperatura del aire de la cámara exterior

### 2.2.3 Medición de la temperatura superficial.

La medición de las temperaturas superficiales se realizó con termopares debido a que gracias a su reducido tamaño, éstos podían adherirse adecuadamente a la superficie de tal manera que su temperatura se igualaba la de la superficie y esta no se veía afectada por el sensor.

Consideración especial requiere la medición de la temperatura superficial de la cámara exterior, dado que se ve expuesta a la radiación solar, esto hace que el sensor debe ser protegido para que la radiación solar no lo afecte directamente, pero por otro lado, es importante que la protección que se haga del sensor no afecte a la temperatura del muro, esto implica que dicha protección debe tener las mismas propiedades que el hormigón, en particular aquellas relacionadas con las del intercambio radiante en la longitud de onda visible. El color es una propiedad que esta directamente relacionada con esas propiedades, por tal motivo, la protección utilizada para los sensores de temperatura fue masilla de color aproximadamente igual al hormigón tal como se muestra en la Figura 18



*Figura 18. Sensor de temperatura superficial de la hoja exterior de hormigón*

### **3 CONTROL SOBRE LA CALIDAD DE LAS MEDICIONES**

El control de la calidad de las mediciones se realizó por medio de distintas técnicas de acuerdo a la naturaleza de la variable medida. A continuación se hace resumen de las tareas desarrolladas sobre este particular.

#### **3.1 Temperatura del aire exterior**

Para la medición de la temperatura exterior se instalaron dos sensores: el de la estación meteorológica y un termopar tipo T ubicado en el exterior.

Debido a la discrepancia en las mediciones tomadas por los dos sensores se optó por tomar una referencia externa. Dicha referencia fueron los datos tomados en la estación meteorológica del aeropuerto de Sevilla que debido a su proximidad con la caseta, debe presentar valores cercanos.

La única desventaja de los datos de dicha estación, es que se tiene acceso a un registro únicamente de las mínimas y máximas diarias, sin embargo, tal como se ve en la Figura 19, esta información fue suficiente para establecer que la medición tomada por la estación meteorológica instalada en la caseta, es correcta, ya que presenta un grado de concordancia bastante elevado con los datos de la estación el aeropuerto.

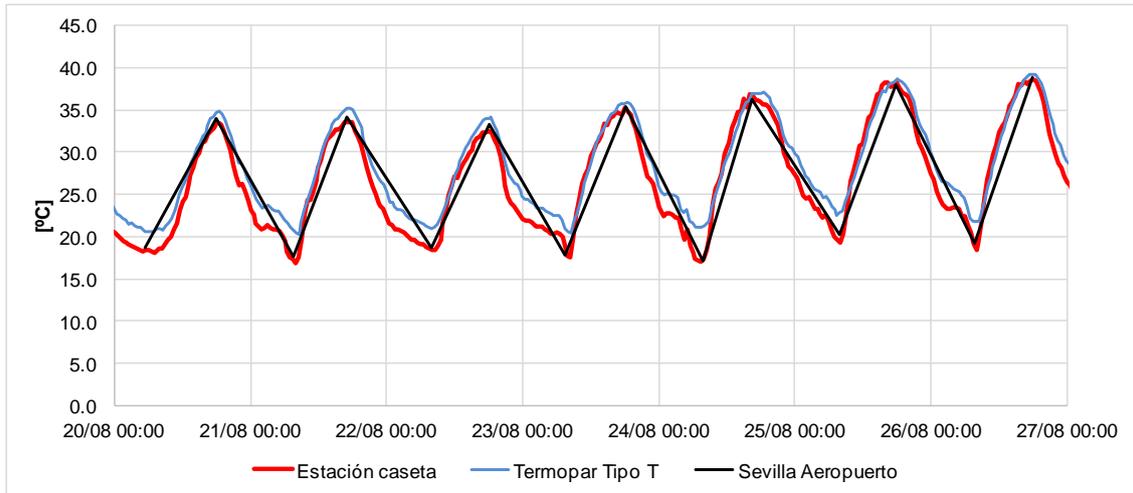


Figura 19. Comparación entre las temperaturas de aire exterior registradas por tres sensores distintos.

A partir de estos datos se estableció una ley de corrección de la temperatura exterior que da como resultado los datos que se muestran en la Figura 20.

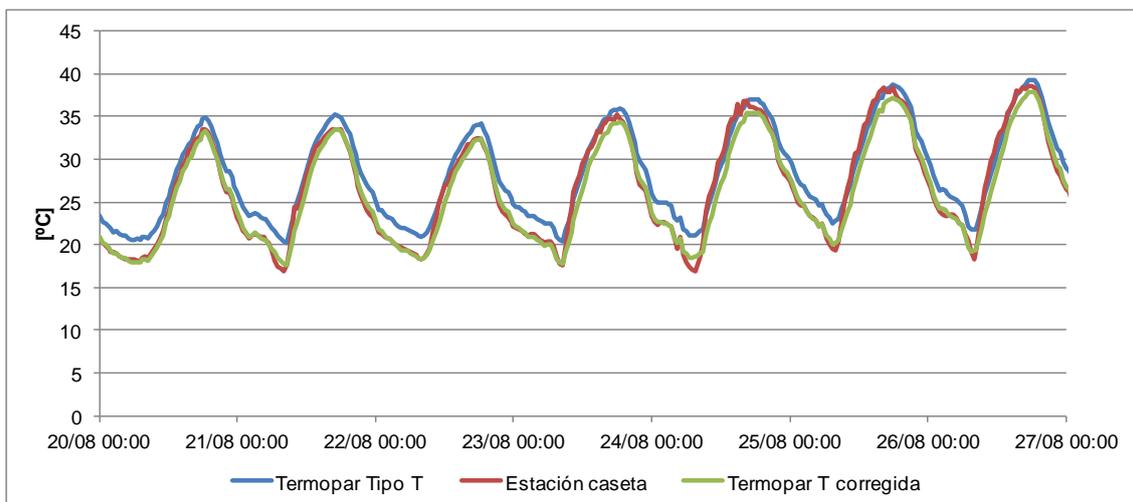


Figura 20. Temperatura exterior medida por el termopar tipo T, con la corrección aplicada.

### 3.2 Temperaturas interiores.

Para el caso de las temperaturas interiores, se contó con cuatro diferentes tipos de instrumentos: Sensores PT100 conectados al datalogger Delta Ohm HD 32.7, sensores NTC en los datalogger Testo 174T, termopares tipo T conectados a los datalogger YC-747 UD y termopares tipo T conectados a los módulos NI 9213 y NI 9214 de National Instruments.

Debido a que la combinación de sensores PT100 con el datalogger Delta Ohm HD 32.7 es la más precisa y viene con certificado de calibración del fabricante, se decidió tomar esta las lecturas de este instrumento para realizar la calibración de los demás sensores de temperatura. Adicionalmente, se mantuvo este sensor midiendo todo el tiempo que se mantuvo la experimentación, de tal manera que siempre existió redundancia en los datos tomados.

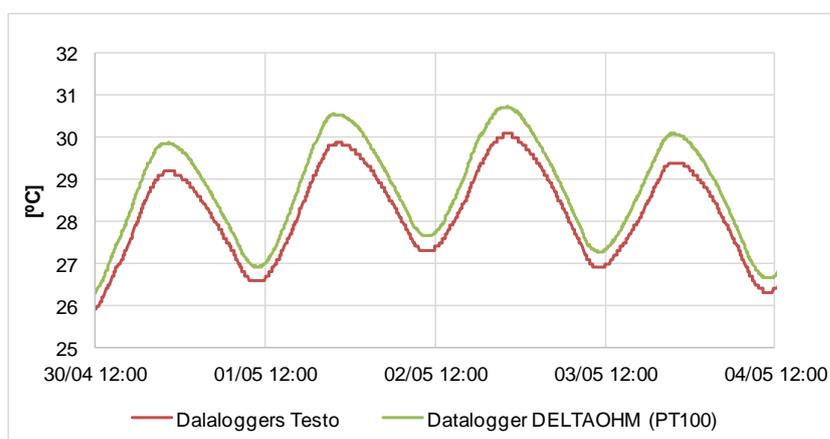


Figura 21. Comparación de las medida de temperatura tomadas por un sensor NTC de los dataloggers Testo y un PT100 conectado al datalogger DealtaOMN HD 32.7

En la Figura 21, se muestra un ejemplo en el que se se comparan las temperaturas registradas por un dos sensores distintos. Se aprecia que la diferencia es des aproximadamente 0.5°C que es una valor que se ubica dentro del margen de error de los dos sensores. Aún así, como referencia para cálculos y control, se ha tomado la de los sensores PT100 como la temperatura correcta.

### 3.3 Radiación solar

Para la medición de la radiación solar se dispuso de dos piranómetros (ver apartado 2.1). En la etapa inicial de experimentación (caseta en modo “Referencia”) estos dos piranómetros fueron montados en el mismo punto para medir la radiación solar global sobre superficie horizontal (ver Figura 15) de tal maera que fue posible comparar las mediciones de estos dos sensores para las mismas condiciones. El resultado obtenido fue que el sensor de la estación meteorológica registraba unos valores muy superiores a los del sensor delta OHM. Para determinar el valor

correcto de radiación solar, se compararon las mediciones con las que predice el modelo teórico para cielo claro presentado en ASHRAE FUNDAMENTASL<sup>i</sup>

Se seleccionó una secuencia de días despejados para hacer la comparación y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 22.

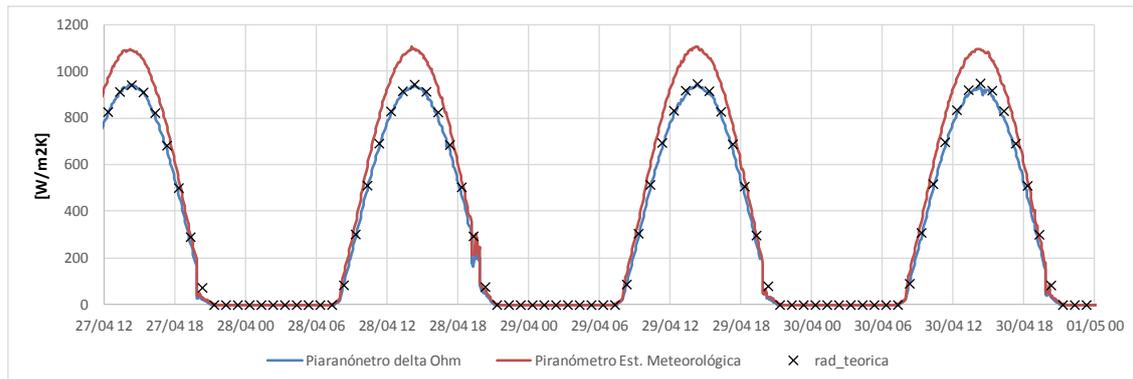


Figura 22. Comparación entre las mediciones tomadas por los dos piranómetros y los valores calculados por el modelo teórico para cielo claro.

Tal como se puede observar, el piranómetro delta OHM, presenta un elevado nivel de coincidencia con los resultados del modelo teórico, lo cual era de esperar para estos días despejados. Se pudo establecer con certeza que el sensor de la estación meteorológica sobreestimaba los valores registrados de la radiación solar.

Se determinó que el factor de calibración para el sensor de radiación de la estación meteorológica es 0.86.

## 4 INSTRUMENTACIÓN EN CADA ETAPA DEL PROYECTO

La posición de los sensores es de elevada importancia dado que se es imposible cubrir todos los espacios de estudio con sensores. Por tanto se deben seleccionar puntos de medida que resulten representativos y accesibles, con el fin de poder determinar, a partir de datos puntuales, el comportamiento general de la caseta.

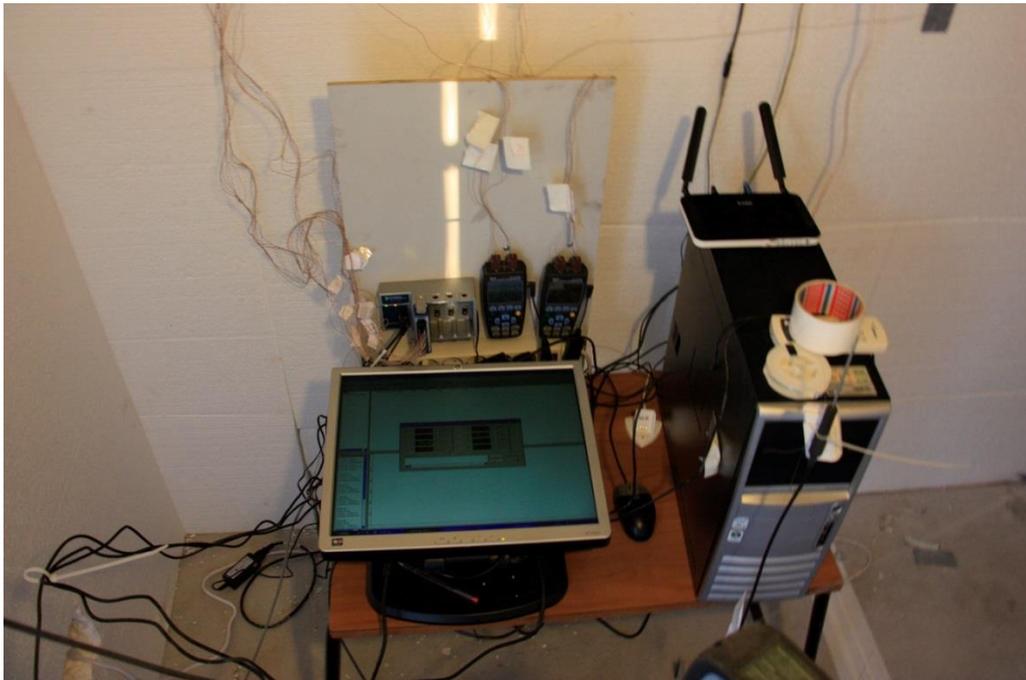
Por otro lado, debido a que se realizaron distintas etapas de experimentación. En cada una de ellas hubo cambios, unos por conveniencia en la ubicación de los sensores y otro por la disponibilidad de sensores de medición.

A continuación se describe la sensorización realizada en cada etapa de la experimentación.

## 4.1 Instrumentación en modo “Caseta de Referencia”

En esta etapa del proyecto los distintos sensores se instalaron tal como se describe en los siguientes apartados.

En la Figura 23 se muestra el estado del sistema de adquisición de datos durante esta etapa del proyecto.



*Figura 23 Vista del sistema de adquisición de datos, dos datalogger de temperatura, ordenador para la recolección de datos y router 3G.*

### 4.1.1 Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura durante esta etapa de la experimentación fueron:

- 24 termopares tipo T para la medición de temperaturas superficiales y de aire de la cámara
- 8 PT100 para la medición de temperatura del aire interior
- 8 sensores-datalogger Testo para temperatura de aire interior (redundantes con los PT100)
- 1 PT100 para lectura la temperatura exterior
- 1 sensor de temperatura exterior de la estación meteorológica. (se describe junto con la estación meteorológica)

Una descripción más detallada de los anteriores sensores es la siguiente:

#### 4.1.1.1 24 termopares tipo T

16 termopares para la medición de las temperaturas superficiales y de aire en el muro sur, el que posteriormente se convertiría en la fachada ventilada activa, Figura 24. Estos termopares conectados al sistema de adquisición de datos National Instruments CompaqDAQ Figura 25. La precisión típica de este conjunto es de 0.7°C

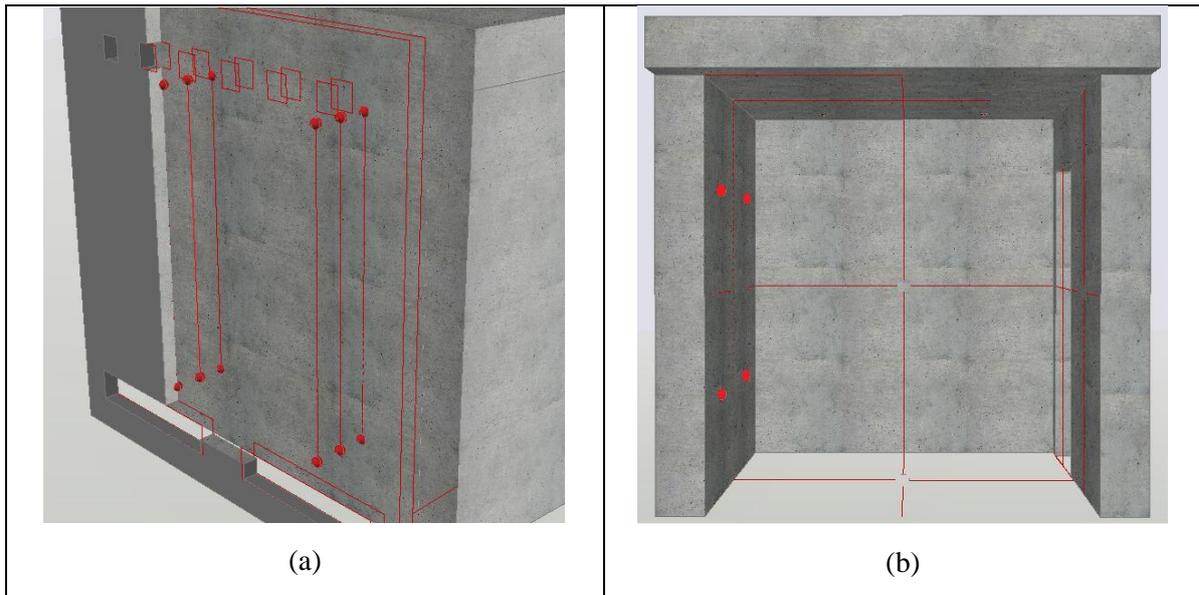


Figura 24. Puntos de medida de los 16 termopares conectados al sistema CompaqDAQ. El muro sobre el que se encuentran los sensores es el muro sur, el que posteriormente se convertiría en Fachada activa ventilada.

Se puede apreciar que existen dos conjuntos de “líneas imaginarias” de puntos de medidas, el conjunto de líneas del extremo izquierdo en la Figura 24(a), se encuentra alineado con uno orificios de ventilación superior. Por otro lado, el conjunto de la derecha de la misma figura, se encuentra ubicado entre dos agujeros de ventilación. EL objetivo de lo anterior, es el de realizar los registros de medidas en las dos condiciones principales que se presentan en la cámara de aire, esto es: un conjunto en la corriente de aire, y otro conjunto en la zona de remanso.

De exterior a interior (Figura 24(a) y (b)) la descripción de los puntos de medida es la siguiente:

- 4 puntos de medida de temperatura superficial de la cara interior de la hoja exterior
- 4 puntos de medida de la temperatura de aire de la cámara (entrada y salida)
- 4 puntos de medida de temperatura superficial de la cara exterior de la hoja interior.
- 4 Puntos de medida de temperatura superficial de la cara interior de la hoja interior.



Figura 25. Sistema de adquisición de datos CompaqDAQ, con un módulo para la lectura de 16 termopares.

Los restantes 8 termopares se emplean para la medición de las temperaturas superficiales de los muros interiores y el techo de la cubierta. Sensores conectados a dos datalogger YCT con entrada de 4 termopares cada uno Figura 26. La precisión de este conjunto es de 0.8°C

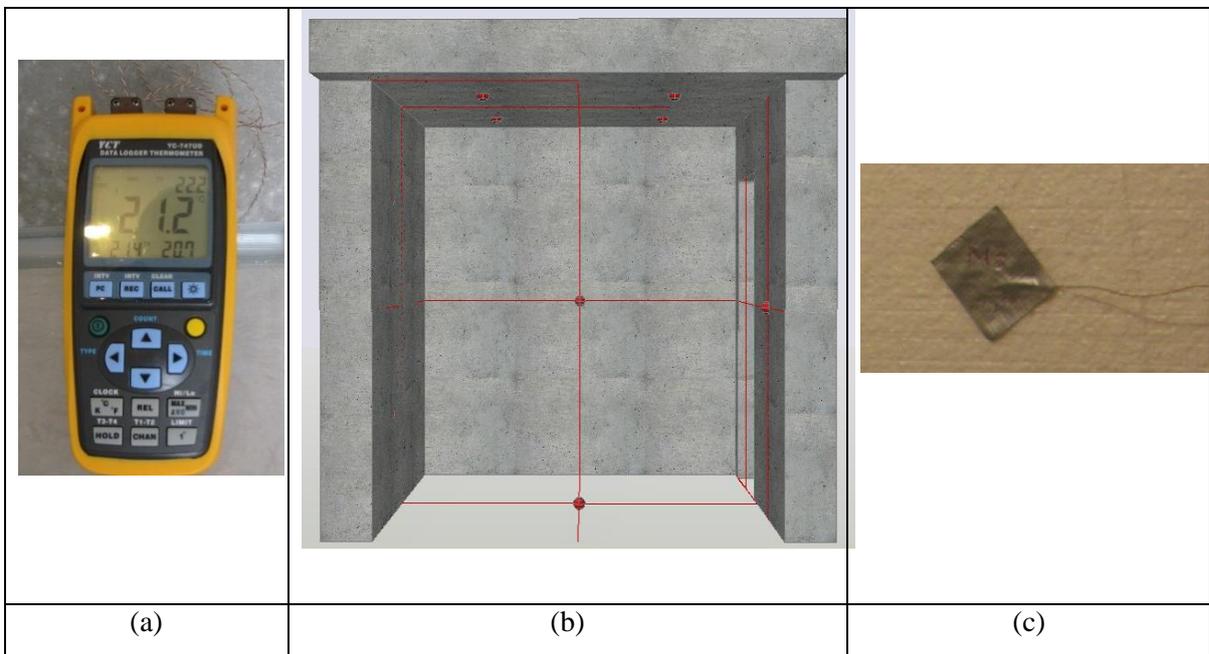


Figura 26 (a) Datalogger YCT, (b) Puntos de medida de estos sensores, (c) vista de uno de los sensores

#### 4.1.1.2 8 PT100 para la medida del aire interior

Estos 8 sensores se conectan a un datalogger DeltaOHM HD32.7 que es monitorizado por un software propio para la lectura de las mediciones realizadas, Figura 27. El conjunto de las PT100 con el datalogger tienen una precisión de 0.1°C.

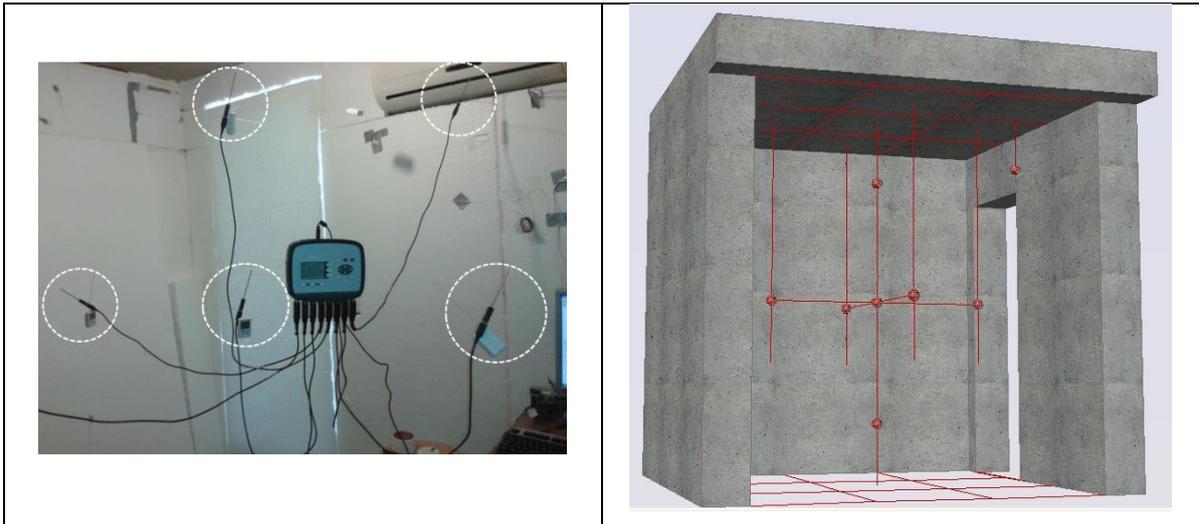
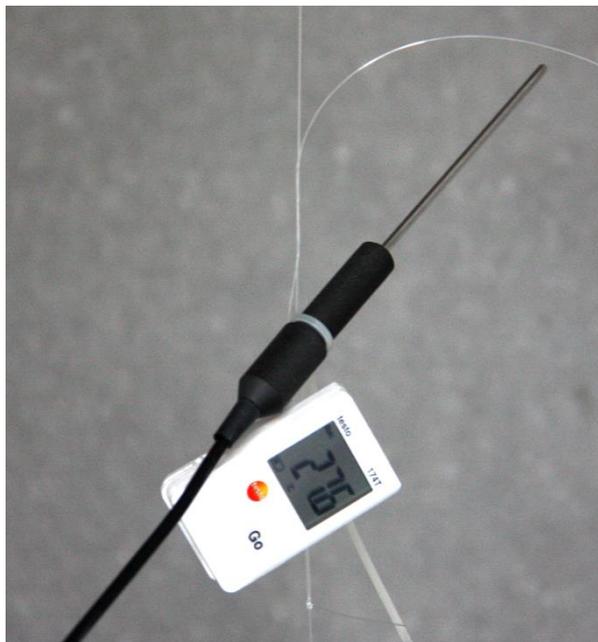


Figura 27. Vista de los sensores PT100 conectados al datalogger DeltaOHM HD32.7 y un esquema de la posición de los mismos.

Estos sensores se han ubicado en posiciones corresponden de manera aproximada al centro de los cuadrantes imaginarios que se obtienen al dividir el espacio interior en tres secciones en cada una de sus dimensiones (alto, ancho y largo), con excepción de uno de ellos que se ubica a la salida del fancoil del equipo de climatización.

#### 4.1.1.3 **8 Sensores TESTO 174T**

Los sensores de estos dataloggers son del tipo NTC con una precisión de 0.5°C. Se ubicaron en los mismos puntos que las PT100 con el fin de tener medidas redundantes de la misma temperatura.



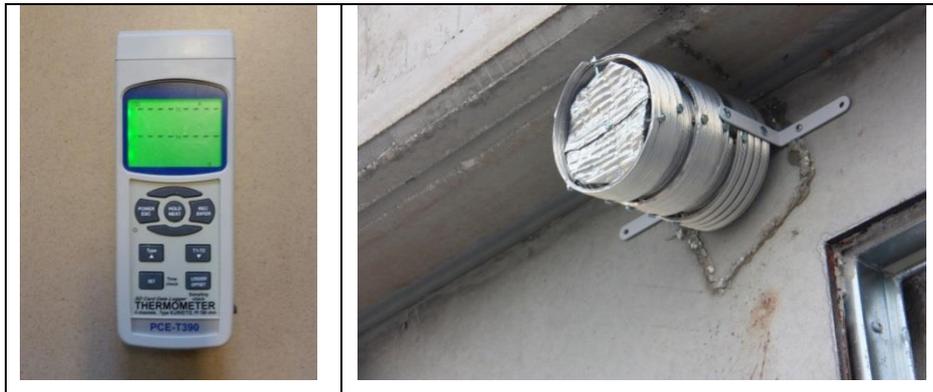
*Figura 28. Datalogger Testo 174T (caja blanca) y sonda PT100 (funda negra)*

A manera de prueba, estos sensores testo se ubicaron temporalmente en distintos cuadrantes de la caseta con el fin de encontrar posibles puntos de medida representativos que no estuviesen siendo registrados por la planificación inicial. Sin embargo, estos ensayos demostraron que los puntos de medida planificados inicialmente recogían adecuadamente toda la información de temperaturas de la caseta, por lo que fueron dejados en el mismo lugar en el que se había previsto inicialmente su ubicación.

#### 4.1.1.4 **1 PT100 para lectura de la temperatura exterior**

Se ubicó un sensor de temperatura con el fin de establecer una lectura redundante de la temperatura exterior. Este sensor se ubicó en la fachada norte cerca del voladizo de la caseta ( Figura 29) y se protegió con una carcasa.

Este sensor se conectó al datalogger PCE-T390



*Figura 29. Datalogger PCE-T390 y vista del contenedor de protección de la PT100 para la medición de la temperatura exterior.*

#### 4.1.2 Otros sensores

Los sensores adicionales utilizados fueron:

- Estación meteorológica
- Piranómetro

La estación meteorológica se ubicó en el techo de la caseta en el extremo sur, dado que en este punto se minimizan los efectos indeseados de sombras externas al experimento y alteraciones en la temperatura y el viento.



*Figura 30. Vista de la caseta en la que se aprecia la posición de la estación meteorológica*

El piranómetro se colocó cerca de la estación meteorológica, y contiguo al piranómetro propio de dicha estación (Figura 31). La posición de estos dos piranómetros se estableció en un punto tal que no se encontraban obstruidos por ninguna sombra, no recibían el efecto de las reflexiones de ningún objeto.

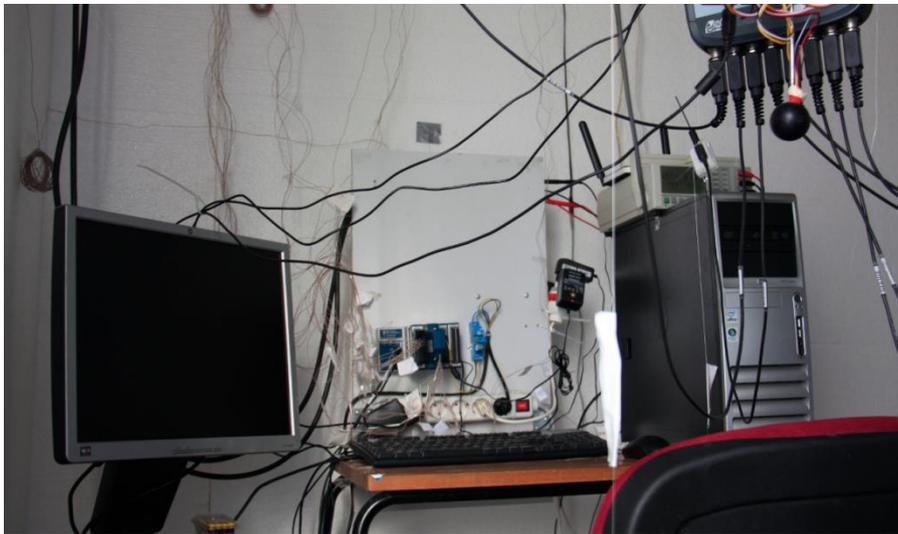


Figura 31 Posición de los piranómetros

## 4.2 Instrumentación en modo “Fachada activa, configuración verano” (Sinhor, modo verano)

Para este modo de operación, no se instalaron nuevos sensores sino que se realizó una modificación de algunos, con respecto a lo que se había puesto en el modo de caseta de referencia. El motivo de dichos cambios fue el de permitir el control de los ventiladores y el registro en línea de todas las variables medidas.

En la Figura 32 se muestra el aspecto del sistema de adquisición de datos y control durante esta etapa del proyecto.



*Figura 32. Vista del sistema de control y adquisición de datos, ordenador para la recolección de datos y analizador de potencia.*

La ubicación de los puntos de medida de temperatura, y de la estación meteorológica se mantienen sin variaciones con respecto a los ya mostrados para la caseta en modo de referencia (ver sección 4.1)

Las modificaciones realizadas para esta etapa de los experimentos es la que se describe a continuación:

### 4.2.1 Sistema de control y adquisición de datos CompaqDAQ

Debido a las ventajas que presenta este sistema para monitorización y control, en esta etapa de experimentación se amplió este sistema con la inclusión de un nuevo módulo para la lectura de termopares y un módulo de salida digital para la actuación sobre relés que permite el control de los ventiladores de la fachada ventilada activa, ver Figura 33.

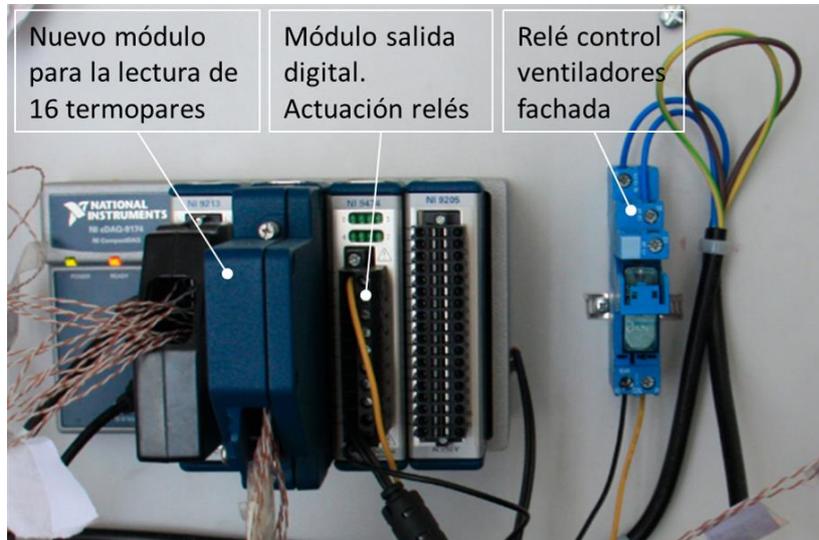


Figura 33. Sistema de control y adquisición de datos National Instruments Compaq DAQ, configurado en modo verano para el control de la fachada ventilada activa.

El nuevo módulo para la lectura de 16 termopares permitió que se reemplazaran varios dataloggers (Figura 34) consiguiendo con ello las ventajas derivadas de un sistema que está conectado en línea y que puede utilizar las señales leídas para establecer acciones de control.

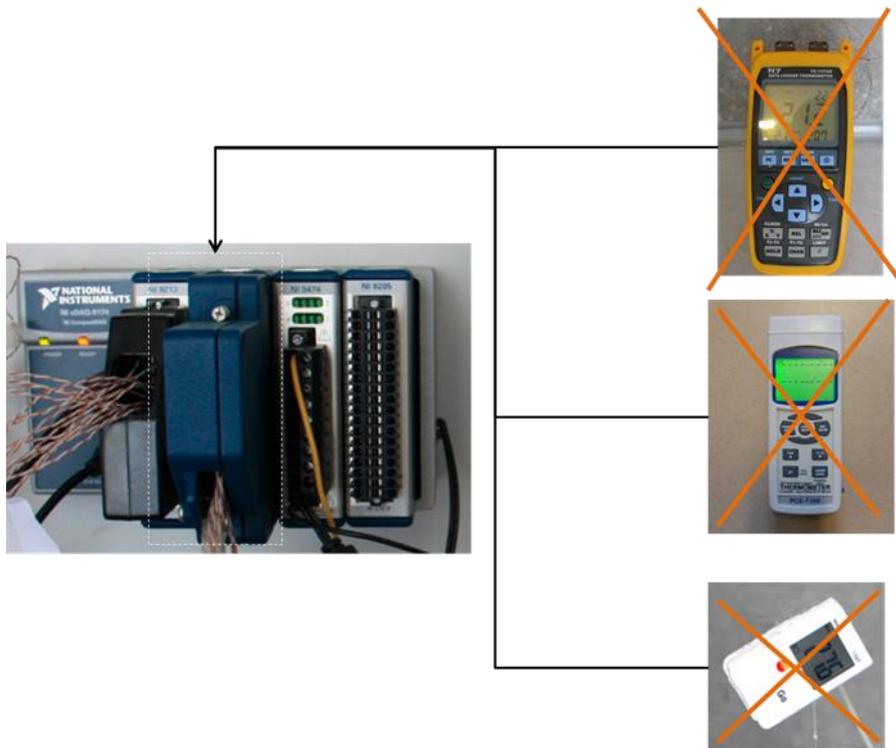


Figura 34. Dataloggers reemplazados por el nuevo módulo para la lectura de 16 termopares.

Los dataloggers reemplazados fueron:

- Dataloggers YTC para las lecturas de las temperaturas superficiales de los muros interiores y la cubierta. La ventaja que se obtiene es la monitorización en línea de los datos leídos, y además, estos datos se convierten en señales que se pueden ser usadas para el control.
- Datalogger PCE-T390 para la lectura de la temperatura exterior. El reemplazo de este datalogger implicó un cambio de sensor. Se quita el sensor PT100 y se reemplaza por un termopar tipo T. La ventaja vuelve a ser la monitorización en línea y la posibilidad de usar el valor de esta variable como una señal de control.
- Dataloggers Testo 174T para la lectura de la temperatura de aire interior. En este caso no es posible reemplazar los 8 puntos de medida en los que se encontraban, sólo se reemplazan los tres más representativos con termopares del sistema CompaqDAQ. Sin embargo sí siguen existiendo los 8 puntos de medida con las PT100 conectadas al datalogger DeltaOHM HD32.7. Esto implica que ya no se tiene redundancia en los 8 puntos de medida, sino solamente en 3.

No sobra aclarar que la retirada de estos 8 datalogger Testo, fue motivada también por la necesidad de desplazarlos a otro experimento.

Las ventajas que tiene el reemplazar estos sensores por termopares del sistema CompaqDAQ, son: la accesibilidad de estos datos en línea y el uso de estas señales para efectos de control.

#### 4.2.2 Cambio en la orientación del piranómetro LP PYRA 03

Una vez se verificó que con la correcta calibración del piranómetro de la estación meteorológica, todos los valores registrados por ambos piranómetros eran coherentes y muy parecidos entre sí, se decidió orientar el LP PYRA 03 hacia el sur con el fin de registrar la radiación que incide sobre la fachada activa.



Figura 35. Orientación de los piranómetros para el registro de la radiación global horizontal y radiación global sur

#### 4.2.3 Analizador de potencia PCE PA 6000

Para registrar el consumo eléctrico que se presenta en la caseta se incorporó este medidor (Figura 36). La conexión realizada de este sensor permite el registro de la energía total consumida por la caseta, es decir, incluye, todos los elementos de la instrumentación (incluyendo su propio consumo), el de los ventiladores y el del equipo de climatización. Registra el factor de potencia, con lo que es posible determinar las potencias activas y reactivas que se presentan.



Figura 36. Analizador de potencia PCE PA 6000

### 4.3 Instrumentación en modo “Techo refrescante”

En este modo de operación, se introducen nuevos ventiladores que se ubican en la puerta de la caseta y se establece una corriente de aire próxima techo. Por este motivo se introdujeron nuevos puntos de medida, para registrar adecuadamente el nuevo campo de temperaturas.

En la Figura 37 de la página siguiente, se aprecia el aspecto del sistema de control y adquisición de datos para esta etapa del proyecto.

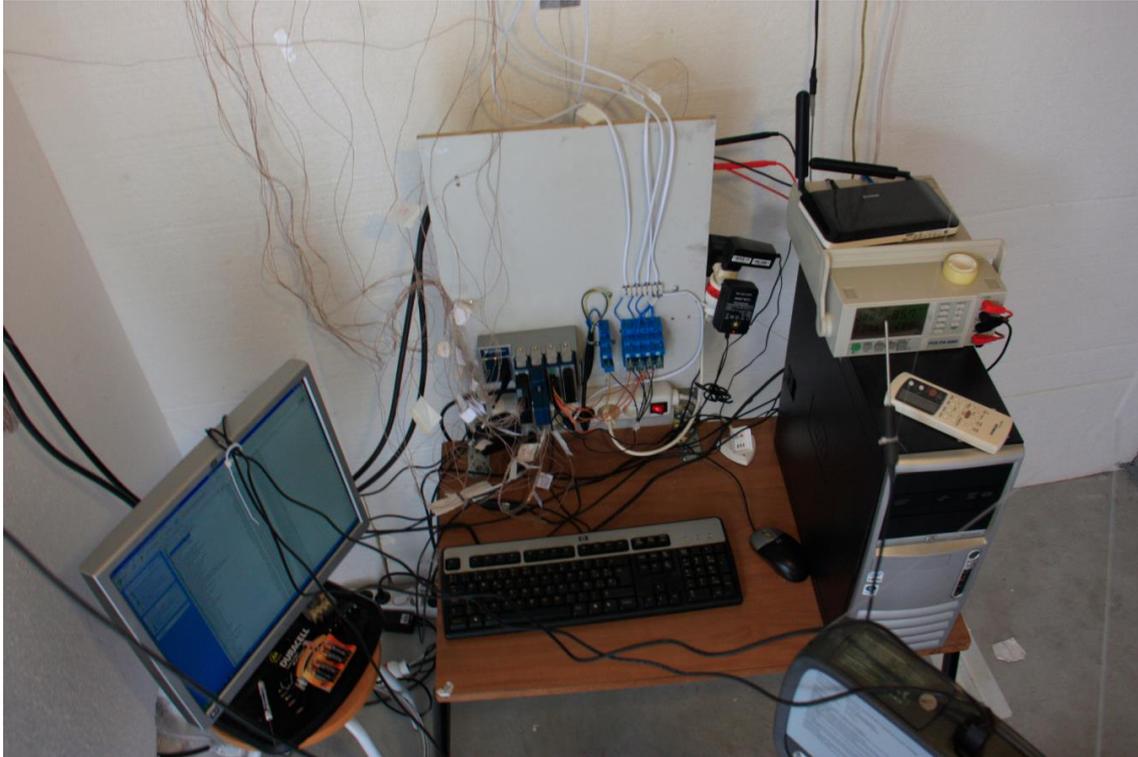


Figura 37. Vista del sistema de control y adquisición de datos, ordenador para la recolección de datos y analizador de potencia.

Los nuevos ventiladores, ubicados en la puerta de la caseta son controlados por una serie de relés, que son manejados por el módulo de de entradas y salidas digitales del sistema CompactDAQ. (Figura 38)



Figura 38. Modificaciones realizadas al sistema de control

En la Figura 32 se muestra el aspecto del sistema de adquisición de datos y control durante esta etapa del proyecto.

#### 4.3.1 Puntos de medición de temperatura

Debido a que se deseaba registrar la evolución de la temperatura de la corriente de aire, se instalaron dos sensores de temperatura nuevos, tal como se muestra en la Figura 39.

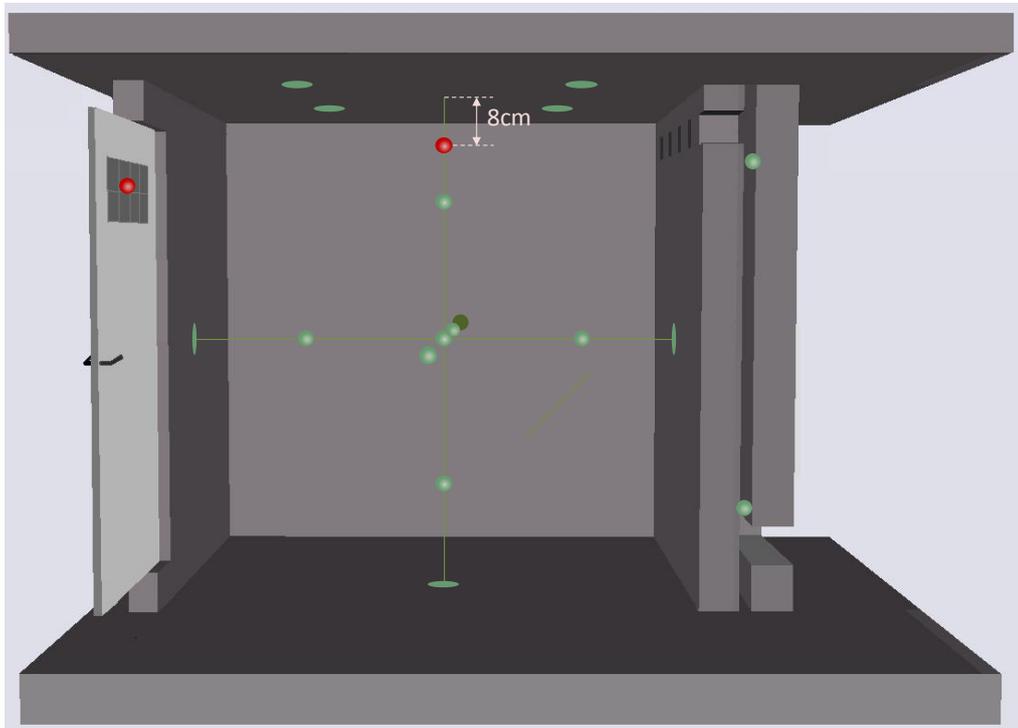


Figura 39. Puntos de medición de temperatura. Los puntos verdes representan los puntos de medición existentes previamente y los puntos rojos, representan los nuevos puntos de medida.

El sensor ubicado en la zona superior permite registrar la temperatura de la corriente de aire en la zona central de la caseta. La temperatura de entrada a la caseta queda registrada por los sensores ya existentes ubicados en la cámara de aire y la temperatura de salida de la corriente de aire se registra en la justo a la entrada de los ventiladores ubicados en la puerta de la caseta.

#### 4.4 Instrumentación en modo “Fachada activa, configuración invierno” (Sinhor, modo invierno)

En la configuración de invierno, el elemento Sinhor está conformado por tres hojas y dos cámaras de aire tal como se muestra en la Figura 40. Esto hace que los requerimientos de instrumentación sean diferentes a los modos que se tenían anteriormente. No obstante, el sistema de adquisición de datos no ha sufrido ningún cambio con respecto a lo que se tenía de tal forma que presenta el mismo aspecto que el mostrado en la Figura 37.

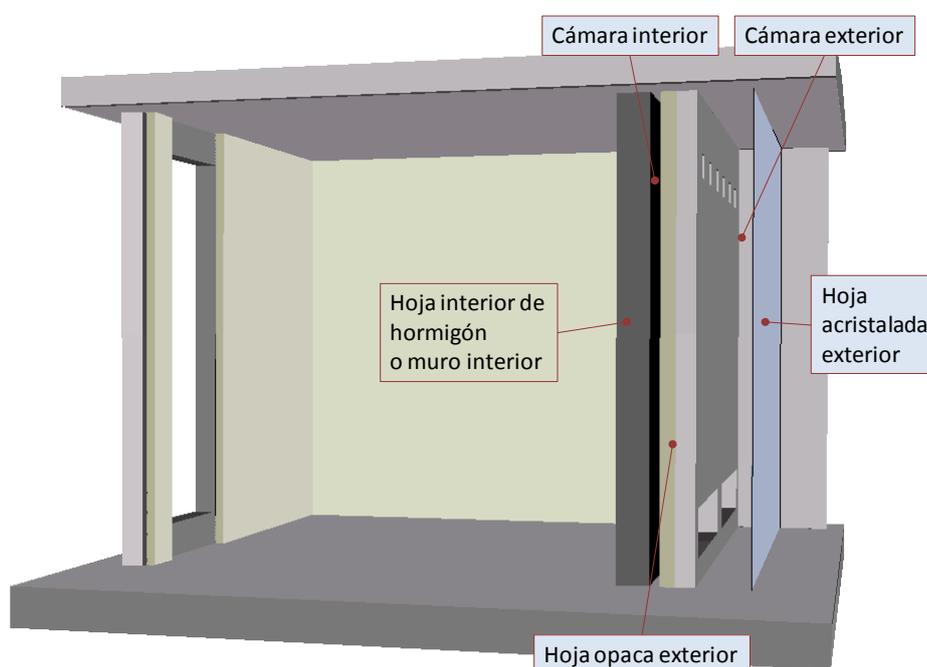


Figura 40. Elemento sinhor en configuración de invierno

Los nuevos puntos de medida en esta configuración obligaron a prescindir de los sensores menos representativos dentro de la caseta, a fin de despejar puertos de conexión de termopares en el sistema de adquisición de datos. Por tal motivo se retiraron los sensores de temperatura superficial dentro de la cámara de aire (Figura 41) y se desplazaron hacia la cámara exterior.

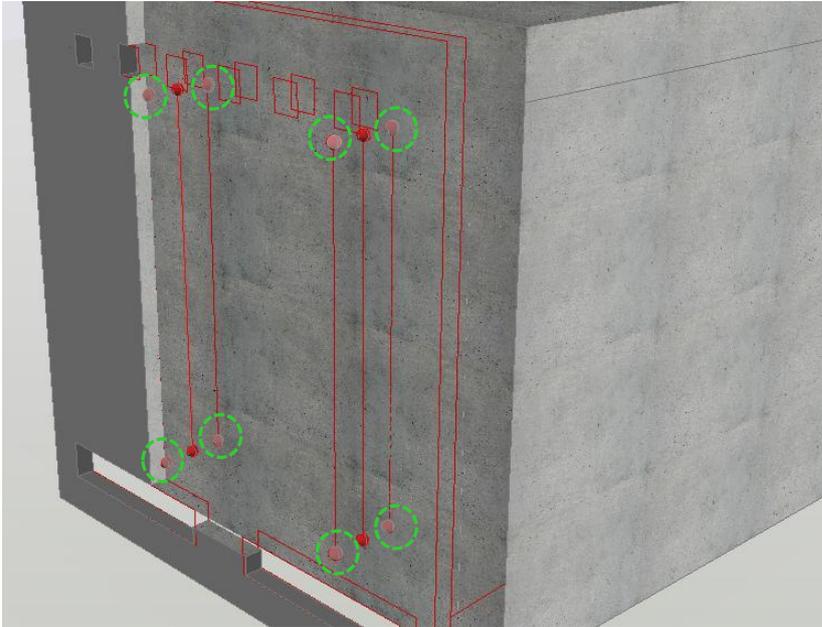


Figura 41. Los círculos verdes indican los sensores de temperatura removidos a fin de dejar puertos libres para los nuevos puntos de medida requeridos.

Los nuevos puntos de medida se ubicaron en dos líneas imaginarias, una alineada con la corriente de aire y otra en la zona de remanso tal como puede verse en la Figura 42 y en la Figura 43.

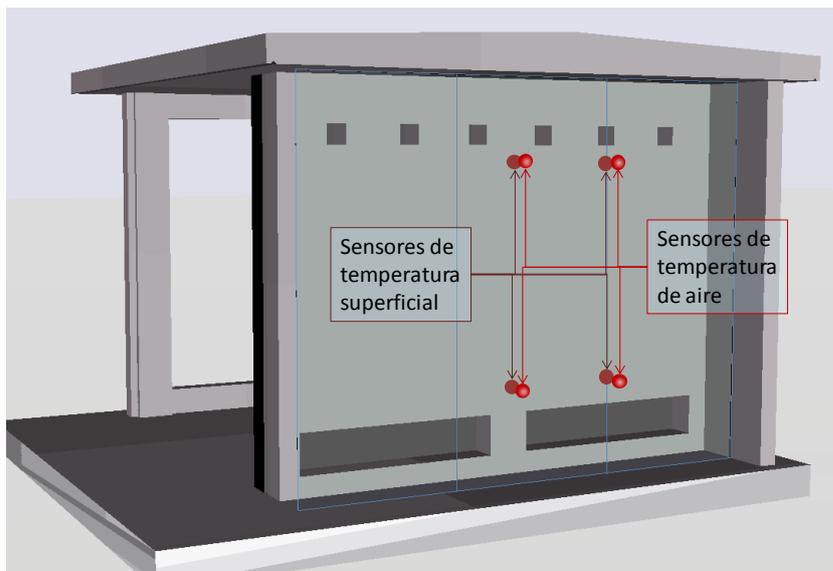


Figura 42. Esquema de la posición de los sensores de temperatura en la cámara de aire exterior para el elemento sinhor en modo de invierno



Figura 43. Vista del elemento sinhor configurado en modo invierno, Se pueden ver los puntos de media de temperatura

Se tienen en total 8 sensores de temperatura en la cámara de aire:

- 4 sensores de temperatura de aire para registrar la temperatura de entrada y la de salida de la cámara.
- 4 sensores de temperatura superficial en las “mismas posiciones que los de temperatura de aire”

## 5 RESUMEN FINAL

Los protocolos seguidos para la realización de instrumentación y calibración de los sensores se realizó siempre buscando minimizar los errores debido a excitaciones factores que pudieran afectar las mediciones y haciendo siempre dentro de lo posible medidas redundantes y que se pudieran comparar con mediciones externas o de sensores de referencia.

La instrumentación de la caseta a lo largo del proyecto fue cambiando debido a las necesidades particulares de cada modo de operación, pero manteniendo siempre dentro de lo posible los puntos de medida de los experimentos anteriores con el fin de conseguir valores que sea comparables entre una prueba y la otra.

Por último es importante mencionar que a pesar de no contar con instrumentos de calibración para los sensores de temperatura, sí se contaba con una sensor de buena precisión y que estaba calibrado, por lo que este fue utilizado para la realización de la calibración de los sensores de temperatura de tal manera que todas las temperaturas registradas son comparables entre sí.

---

<sup>i</sup> ASHRAE HANDBOOK. FUNDAMENTALS 2001.



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA



# INFORME DE LOS EXPERIMENTOS

**Análisis del comportamiento energético de los cerramientos de hormigón en base a la maximización de las ventajas derivadas de su inercia térmica**

Universidad de Sevilla (Grupo Termotecnia)  
Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)  
Estudio de Arquitectura SAMLER



1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	ENSAYOS COMO CASETA DE REFERENCIA .....	6
2.1	ENSAYOS EJECUTADOS .....	6
2.1.1	Oscilación libre (15-04-2014 a 08-05-2014) y (20-05-2014 a 23-05-2014) ..	7
2.1.2	Temperatura controlada (08-05-2014 a 20-05-2014) .....	7
2.2	SENSORIZACION .....	9
2.2.1	Sensores de temperatura .....	9
2.2.2	Otros sensores.....	13
2.2.3	Dataloggers y equipos adicionales .....	15

## 1 Contenido

2	INTRODUCCIÓN.....	5
3	ENSAYOS COMO CASETA DE REFERENCIA .....	6
3.1	ENSAYOS EJECUTADOS .....	6
3.1.1	Oscilación libre (15-04-2014 a 08-05-2014) y (20-05-2014 a 23-05-2014) ..	7
3.1.2	Temperatura controlada (08-05-2014 a 20-05-2014) .....	7
3.2	SENSORIZACION .....	9
3.2.1	Sensores de temperatura .....	9
3.2.2	Otros sensores.....	13
3.2.3	Dataloggers y equipos adicionales .....	15
4	ENSAYOS EN REGIMEN DE VERANO .....	17
4.1	ENSAYOS EJECUTADOS .....	17
4.1.1	Oscilación libre, ventiladores funcionando según esquema de control (06-06-2014 a 29-06-2014) y (02-09-2014 a 08-09-2014) .....	18
4.1.2	Oscilación libre, ventiladores apagados las 24 horas (14-08-2014 a 18-08-2014).....	19
4.1.3	Temperatura controlada, ventiladores funcionando según esquema de control (16-07-2014 a 31-07-2014) y (25-08-2014 a 02-09-2014) .....	19
4.1.4	Temperatura controlada, ventiladores apagados las 24 horas (01-07-2014 a 16-07-2014) y (18-08-2014 a 25-08-2014).....	21
4.1.5	Ensayos en régimen de verano. Techo refrescante (08-09-2014 a 06-10-2014).....	22
4.2	SENSORIZACION .....	29
5	ENSAYOS EN RÉGIMEN DE INVIERNO.....	34

5.1	ENSAYOS EJECUTADOS .....	35
5.1.1	Modo sin circulación de aire .....	35
5.1.2	Modo con circulación de aire .....	40
5.2	SENSORIZACION .....	49
6	VALIDACIÓN .....	52
6.1	Condiciones de contorno .....	52
6.1.1	Temperatura de aire exterior .....	53
6.1.2	Temperatura radiante exterior .....	53
6.1.3	Radiación solar .....	54
6.1.4	Factor de sombra de la radiación directa $f_{sD}$ .....	56
6.1.5	Factor de sombra de la radiación difusa $f_{sd}$ .....	58
6.1.6	Radiación incidente sobre la fachada .....	59
6.1.7	Temperatura del aire interior .....	61
6.1.8	Temperatura radiante interior .....	61
6.2	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES .....	62
6.2.1	Propiedades del poliestireno expandido .....	62
6.2.2	Propiedades del hormigón .....	67
6.2.3	Ajuste de parámetros y variables del modelo .....	70
6.2.4	Coefficientes de transferencia de calor convectivo y radiante exterior .....	71
6.2.5	Coefficiente de transferencia de calor por convección en la cámara de aire y conductividad del hormigón .....	72
6.2.6	Coefficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la caseta .....	73
6.3	Resultados de la validación .....	74
6.3.1	Periodo del 12 al 28 de Junio 2014 .....	74
6.3.2	Periodo del 01 al 09 de Julio 2014 .....	76
6.3.3	Periodo del 20 al 29 de Julio 2014 .....	77
6.3.4	Periodo del 14 al 28 de Agosto 2014.....	78
6.4	Conclusiones de la validación .....	80
3.1	ENSAYOS EJECUTADOS .....	17
3.1.1	Oscilación libre, ventiladores funcionando según esquema de control (06-06-2014 a 29-06-2014) y (02-09-2014 a 08-09-2014) .....	18
3.1.2	Oscilación libre, ventiladores apagados las 24 horas (14-08-2014 a 18-08-2014).....	19
3.1.3	Temperatura controlada, ventiladores funcionando según esquema de control (16-07-2014 a 31-07-2014) y (25-08-2014 a 02-09-2014) .....	19
3.1.4	Temperatura controlada, ventiladores apagados las 24 horas (01-07-2014 a 16-07-2014) y (18-08-2014 a 25-08-2014).....	21
3.1.5	Ensayos en régimen de verano. Techo refrescante (08-09-2014 a 06-10-2014).....	22
3.1.5.1	Modo sin deflector .....	24
3.1.5.2	Modo con deflector.....	26
3.2	SENSORIZACION .....	29

4	ENSAYOS EN RÉGIMEN DE INVIERNO.....	34
4.1	ENSAYOS EJECUTADOS .....	35
4.1.1	Modo sin circulación de aire .....	35
4.1.2	Modo con circulación de aire .....	40
4.1.2.1	Variaciones realizadas en estas pruebas.....	40
4.1.2.2	Descripción del comportamiento horario del elemento Sinhor .....	43
4.1.2.3	Análisis global del desempeño del elemento Sinhor .....	44
4.1.2.4	Conclusiones de la operación en modo invierno .....	48
4.2	SENSORIZACION .....	49
5	VALIDACIÓN .....	52
5.1	Condiciones de contorno .....	52
5.1.1	Temperatura de aire exterior .....	53
5.1.2	Temperatura radiante exterior .....	53
5.1.3	Radiación solar .....	54
5.1.4	Factor de sombra de la radiación directa $f_{sD}$ .....	56
5.1.5	Factor de sombra de la radiación difusa $f_{sd}$ .....	58
5.1.6	Radiación incidente sobre la fachada .....	59
5.1.7	Temperatura del aire interior .....	61
5.1.8	Temperatura radiante interior .....	61
5.2	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES .....	62
5.2.1	Propiedades del poliestireno expandido .....	62
5.2.2	Propiedades del hormigón .....	67
5.2.3	Ajuste de parámetros y variables del modelo .....	70
5.2.4	Coefficientes de transferencia de calor convectivo y radiante exterior .....	71
5.2.5	Coefficiente de transferencia de calor por convección en la cámara de aire y conductividad del hormigón .....	72
5.2.6	Coefficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la caseta .....	73
5.3	Resultados de la validación .....	74
5.3.1	Periodo del 12 al 28 de Junio 2014 .....	74
5.3.2	Periodo del 01 al 09 de Julio 2014 .....	76
5.3.3	Periodo del 20 al 29 de Julio 2014 .....	77
5.3.4	Periodo del 14 al 28 de Agosto 2014.....	78
5.4	Conclusiones de la validación .....	80



## 2 INTRODUCCIÓN

Este documento trata sobre los experimentos realizados dentro del marco del proyecto “Análisis del comportamiento energético de los cerramientos de hormigón en base a la maximización de las ventajas derivadas de su inercia térmica”

Estos experimentos han sido realizados sobre una celda o caseta de hormigón construida específicamente para los propósitos del proyecto ha sido instrumentada con una serie de sensores que permiten determinar el comportamiento térmico de esta caseta.

La estructura del presente documento sigue de manera aproximada el desarrollo cronológico de los experimentos realizados, describiendo para cada uno de ellos los procedimientos realizados, como los sensores utilizados.

En algunos casos, y donde se ha considerado relevante, se hacen comentarios y se presentan las conclusiones de los resultados y comportamientos observados.

En la parte final de este documento se presenta la validación efectuada para el modelo de simulación del elemento de fachada objeto de esta investigación.

El nombre que se le ha dado a este elemento de fachada y que se usa en este documento es “Sinhor”.

### 3 ENSAYOS COMO CASETA DE REFERENCIA



*figura 1 Aspecto exterior de la caseta configurada en modo “caseta de referencia”*

La primera fase experimental tiene como objetivo fundamental, el encontrar un modelo del comportamiento de la caseta sin el efecto de las soluciones constructivas especiales que se pondrán a prueba posteriormente. Lo que subyace detrás de dicho objetivo, es el poder comparar el comportamiento de la caseta con y sin las soluciones constructivas para evaluar el beneficio de estas últimas. Dicho de otra manera, se trata de poder establecer o estimar cómo, bajo unas condiciones determinadas, habría sido el comportamiento de la caseta, si no se hubieran instalado las soluciones constructivas especiales.

Objetivos secundarios fueron: probar la instrumentación, evaluar y corregir los puntos de medida, determinar posibles problemas futuros y corregirlos de ser el caso.

En este modo, el cerramiento que posteriormente se convertirá en una “fachada ventilada activa”, consiste de una capa exterior de hormigón, seguida por otra de aislamiento, una cámara de aire cerrada y finalmente, una capa interior de hormigón. Por tanto, este cerramiento, se comporta como un muro convencional con cámara de aire.

La caseta en este modo, no cuenta con ningún tipo de ventilación con el exterior, de tal manera que sólo las infiltraciones por la puerta y a través de pequeñas grietas entre elementos serían los que produzcan la renovación de aire con el interior.

#### 3.1 ENSAYOS EJECUTADOS

Los ensayos se ejecutaron entre 15-04-2014 y el 23-05-2014, y se dividieron en dos tipos de experimentos:

- a- Oscilación Libre
- b- Temperatura controlada

### 3.1.1 Oscilación libre (15-04-2014 a 08-05-2014) y (20-05-2014 a 23-05-2014)

Los experimentos de oscilación libre consisten en permitir que la temperatura de la caseta evolucione libremente, es decir, no se utiliza ningún tipo de equipo de climatización para controlar ninguna variable de temperatura, humedad o calidad del aire interior de la caseta.

Esta campaña de experimentos se dividió en dos segmentos, el primero del 15-04-2014 al 08-05-2014, en el que además de registrar todos los datos previstos en los diseños, se evaluaron puntos de medida alternativos y se colocaron algunos sensores adiciones (ver apartado 3.2) . La figura 2 muestra a modo de ejemplo los valores de temperatura interior y exterior registrados en este periodo.

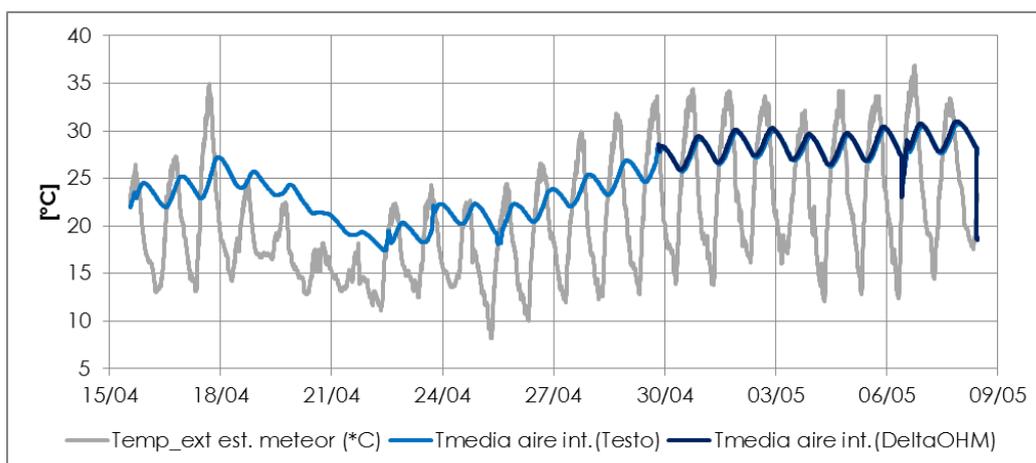


figura 2 Principales variables medidas durante el primer segmento de experimentos en modo de oscilación libre.

El segundo segmento de experimentos en modo de oscilación libre se realizó del 20-05-2014 al 23-05-2014. Este segundo segmento se realizó debido a que la temperatura exterior descendió a un nivel tal que no resultaba útil continuar con el modo de temperatura controlada realizado en el periodo precedente a este y porque sí resultaba útil para los efectos de caracterización de la caseta.

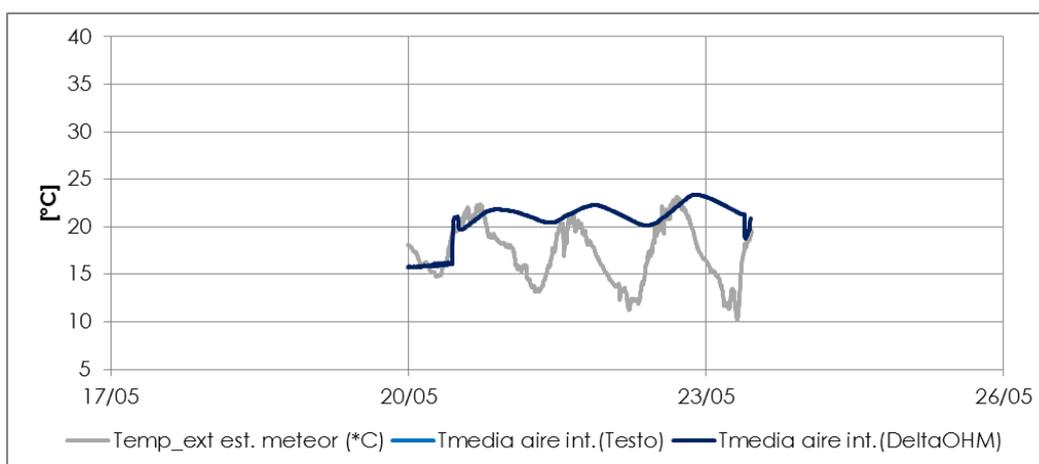


figura 3 Temperaturas interior y exterior durante el segundo segmento de experimentos en modo de oscilación libre

### 3.1.2 Temperatura controlada (08-05-2014 a 20-05-2014)

Los experimentos en modo de temperatura controlada consisten en el mantenimiento de la temperatura del aire interior de la caseta, dentro de un rango de temperaturas por medio de la

operación del equipo de climatización con el que cuenta la caseta. Idealmente la temperatura interior debería ser constante e igual al valor establecido en la consigna del equipo de climatización. Este ideal no se consigue debido a que el control de equipo establece un margen de temperatura en el que opera. Dicho de otro modo, el equipo se enciende si a la succión del fan-coil interior se detecta una temperatura superior a la de consigna más un cierto margen y se apaga cuando esta temperatura es menor a la de consigna menos cierto margen.

La temperatura de consigna establecida fue 15°C, que corresponde al valor más bajo permitido por el control del equipo de climatización. Con este valor de consigna se pretendía establecer el máximo diferencial de temperatura con el exterior, a fin de maximizar los fenómenos de transferencia de calor, que resultaban útiles para los efectos de caracterización de la caseta.

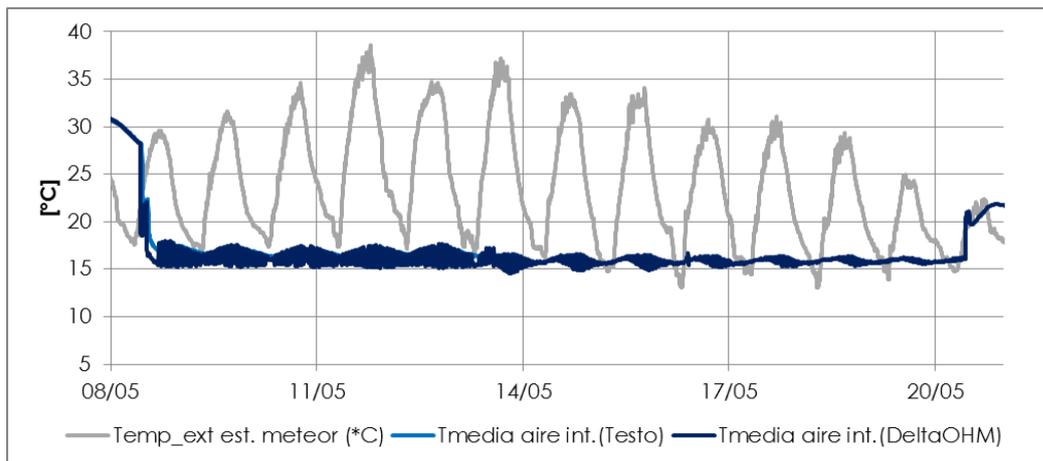


figura 4 Temperaturas interior y exterior durante el periodo de experimentos en modo de temperatura controlada

## 3.2 SENSORIZACION

La sensorización se compone de sensores de temperatura, de radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección de viento y un pluviómetro.

Todas estas medidas de los diversos sensores son recopiladas en dataloggers o directamente en un ordenador que centraliza todas las conexiones. A su vez, este ordenador se encuentra conectado a internet a través de un router con conexión 3G, para permitir el acceso remoto a las lecturas de los datos. En la figura 5 se pueden observar algunos de los elementos utilizados para la adquisición de datos.

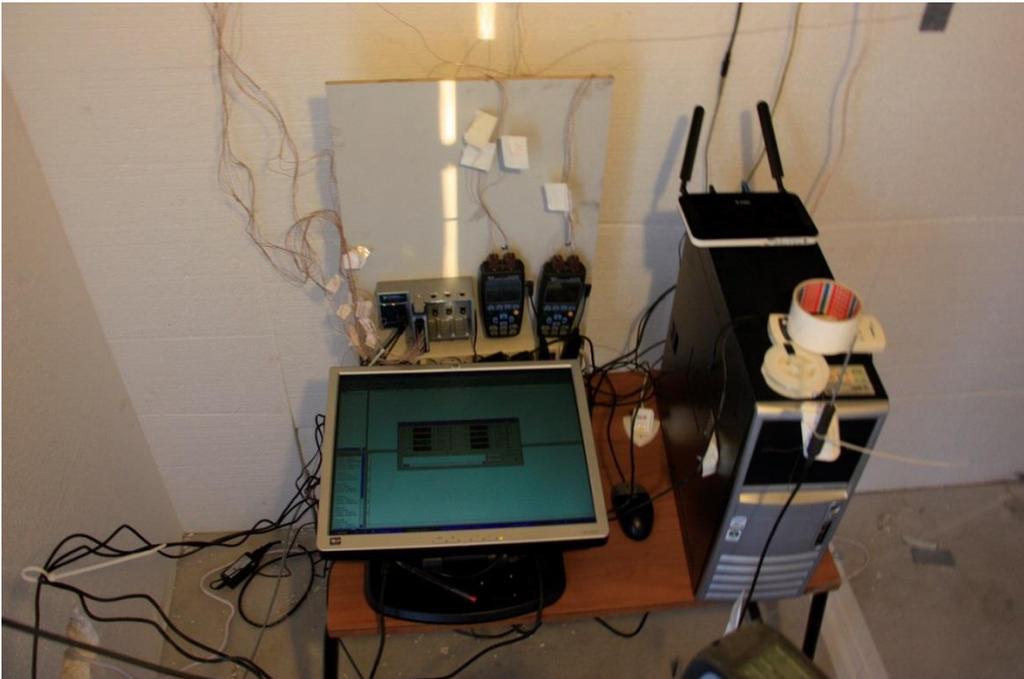


figura 5 Vista del sistema de adquisición de datos, dos dalogger de temperatura, ordenador para la recolección de datos y router 3G.

A continuación, se hace una descripción de los sensores instalados que se dividirán en dos apartados:

- Sensores de temperatura
- Otros sensores

### 3.2.1 Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura durante esta etapa de la experimentación fueron:

- 24 termopares tipo T para la medición de temperaturas superficiales y de aire de la cámara
- 8 PT100 para la medición de temperatura del aire interior
- 8 sensores-datalogger Testo para temperatura de aire interior (redundantes con los PT100)
- 1 PT100 para lectura la temperatura exterior
- 1 sensor de temperatura exterior de la estación meteorológica. (se describe junto con la estación meteorológica)

Una descripción más detallada de los anteriores sensores es la siguiente:

### 24 termopares tipo T

16 termopares para la medición de las temperaturas superficiales y de aire en el muro sur, el que posteriormente se convertiría en la fachada ventilada activa, figura 6. Estos termopares conectados al sistema de adquisición de datos National Instruments CompaqDAQ figura 7. La precisión típica de este conjunto es de 0.7°C

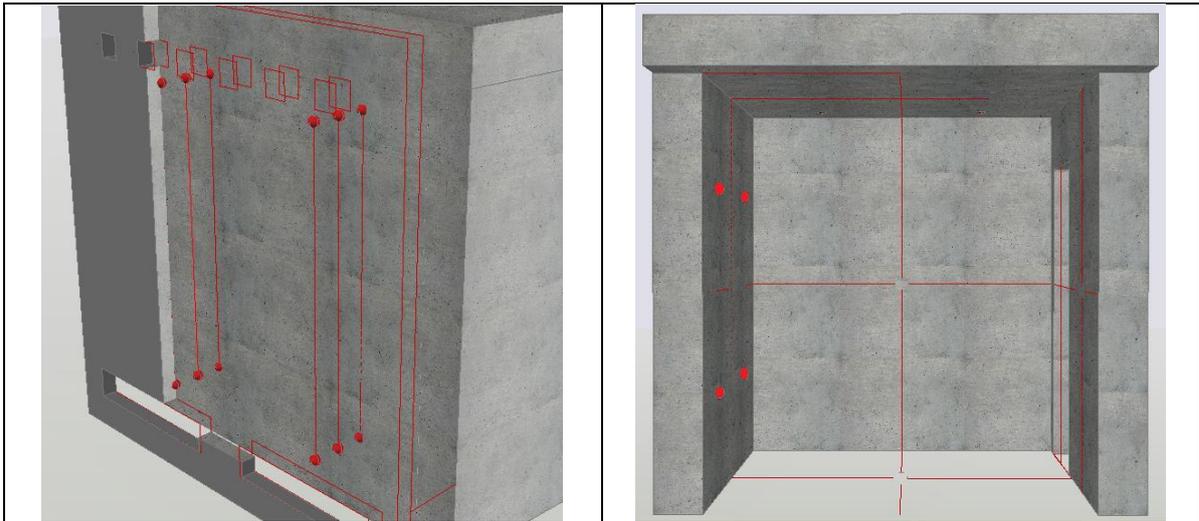


figura 6 Puntos de medida de los 16 termopares conectados al sistema CompaqDAQ. El muro sobre el que se encuentran los sensores es el muro sur, el que posteriormente se convertiría en Fachada activa ventilada.



figura 7. Sistema de adquisición de datos CompaqDAQ, con un módulo para la lectura de 16 termopares.

Los restantes 8 termopares se emplean para la medición de las temperaturas superficiales de los muros interiores y el techo de la cubierta. Sensores conectados a dos datalogger YTC con entrada de 4 termopares cada uno figura 8. La precisión de este conjunto es de 0.8°C

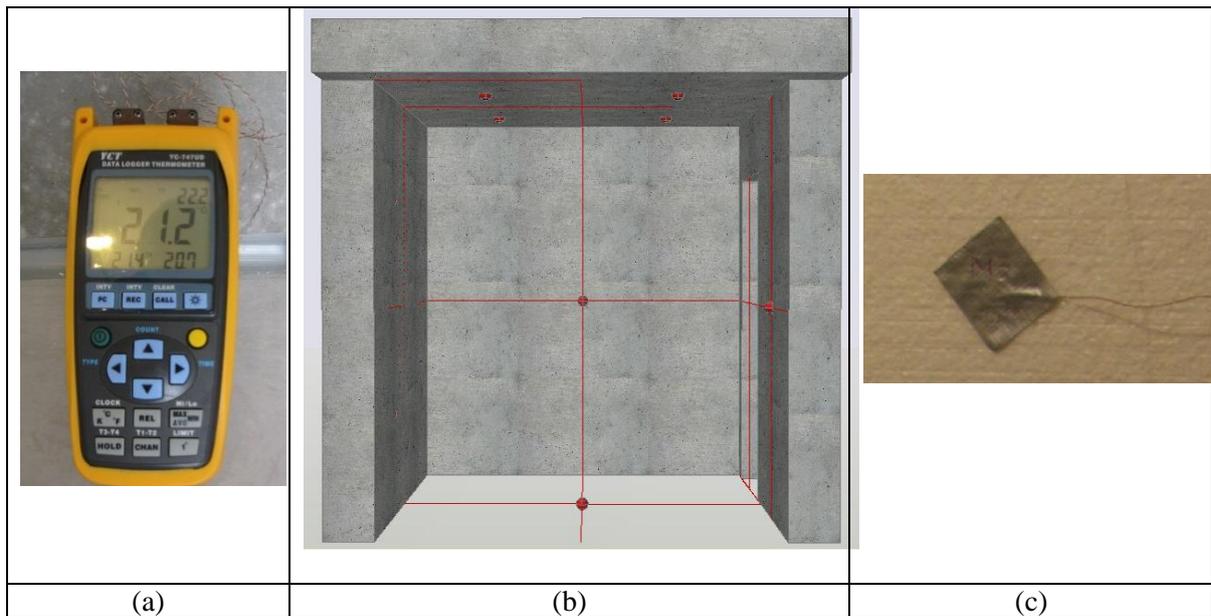


figura 8 (a) Datalogger YCT, (b) Puntos de medida de estos sensores, (c) vista de uno de los sensores

### 8 PT100 para la medida del aire interior

Estos 8 sensores se conectan a un datalogger DeltaOHM HD32.7 que es monitorizado por un software propio para la lectura de las mediciones realizadas, figura 9. El conjunto de las PT100 con el datalogger tienen una precisión de 0.1°C.

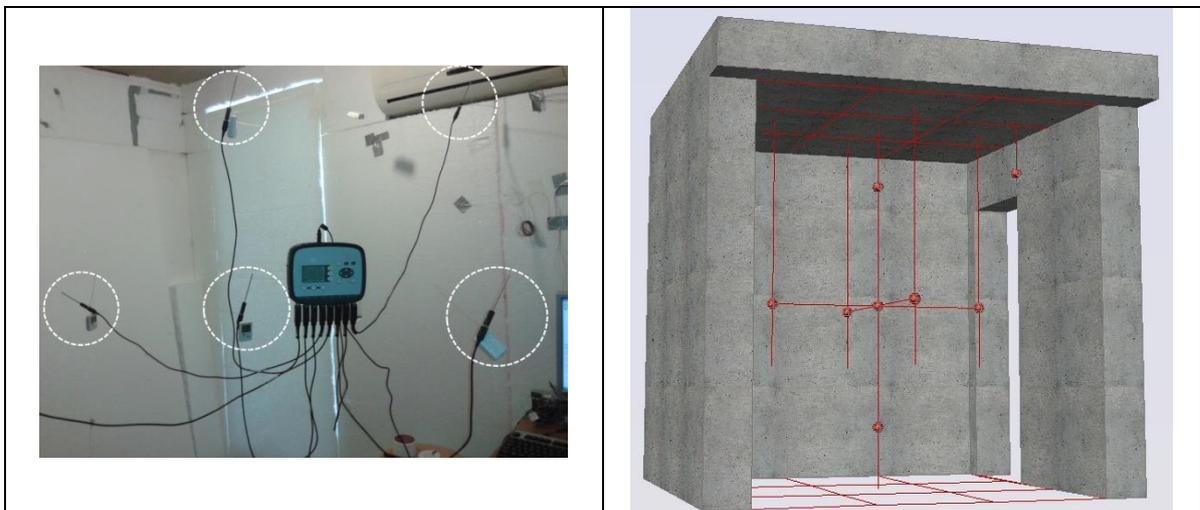


figura 9 Vista de los sensores PT100 conectados al datalogger DeltaOHM HD32.7 y un esquema de la posición de los mismos.

Estos sensores se han ubicado en posiciones corresponden de manera aproximada al centro de los cuadrantes imaginarios que se obtienen al dividir el espacio interior en tres secciones en cada una de sus dimensiones (alto, ancho y largo), con excepción de uno de ellos que se ubica a la salida del fancoil del equipo de climatización.

### 8 Sensores TESTO 174T

Los sensores de estos dataloggers son del tipo NTC con una precisión de 0.5°C. Se ubicaron en los mismos puntos que las PT100 con el fin de tener medidas redundantes de la misma temperatura

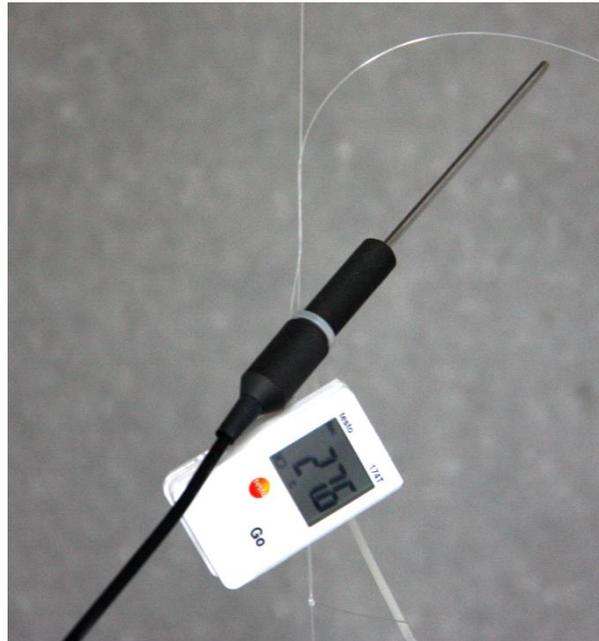


figura 10 Datalogger Testo 174T (caja blanca) y sonda PT100 (funda negra)

A manera de prueba, estos sensores testo se ubicaron temporalmente en distintos cuadrantes de la caseta con el fin de encontrar posibles puntos de medida representativos que no estuviesen siendo registrados por la planificación inicial. Sin embargo, estos ensayos demostraron que los puntos de medida planificados inicialmente recogían adecuadamente toda la información de temperaturas de la caseta, por lo que fueron dejados en el mismo lugar en el que se había previsto inicialmente su ubicación.

### 1 PT100 para lectura de la temperatura exterior

Se ubicó un sensor de temperatura con el fin de establecer una verificación de la temperatura exterior. Este sensor se conectó a una datalogger PCE-T390 que da una precisión de 1°C.



figura 11 Datalogger PCE-T390 y vista del contenedor de protección de la PT100 para la medición de la temperatura exterior.

Con el fin de evitar errores por incidencia de radiación solar se ubicó en la fachada norte, protegido por el voladizo de la caseta y se enclaustró en un contenedor permeable al aire como el mostrado en la figura 11.

### 3.2.2 Otros sensores

Los sensores adicionales utilizados fueron:

- Estación meteorológica
- Piranómetro

#### Estación meteorológica WatchDog 2000

Esta estación cuenta con los sensores que se describen en la Tabla 1. Se montó en la parte superior de la caseta con el fin de que las mediciones no se vieran afectadas por sombras, obstáculos próximos que modifiquen las condiciones del viento, etc. Un vista de la estación se puede apreciar en la

Tabla 1. Sensores de la estación meteorológica (tomado del manual de la estación)

Sensor	Rango de medición	Precisión
Velocidad del viento	0-175 mph	±5%
Dirección del viento	2° de incrementos	±7°
Temperatura	-20° to 70°C -4° to 158° F	±0.6°C ±1°F
Humedad relativa	Del 20% al 100% @5° a 50° C	±3%
Precipitaciones	0.01" (0.25cm) deresolución	±2%
Radiaciones solares	1-1250 W/m2	±5%



figura 12 Estación meteorológica montada sobre la caseta y vista cercana de la estación.

### Piranómetro LP PYRA 03

Se montó este sensor debido a que se evidenció que el sensor de radiación de la estación meteorológica registraba valores mayores a los máximos teóricos. Con los datos registrados por este sensor, fue posible calibrar el piranómetro de la estación meteorológica. La figura 13 muestra el montaje de este sensor.



figura 13 Piranómetro LP PYRA 03 (color metálico) montado junto al piranómetro de la estación meteorológica (color negro)

Este piranómetro funciona por el principio de termopila y no es selectivo a las distintas longitudes de onda que componen la radiación solar. Las especificaciones técnicas de este sensor se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2 Especificaciones técnicas del piranómetro LP PYRA 03

Sensibilidad típica: 10 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Rango de medida: 0-2000 $\text{W}/\text{m}^2$
Campo de vista: $2\pi$ sr
Campo espectral: 305 nm ÷ 2800 nm $\text{W}/\text{m}^2$ -50%
(transmisión de las cúpulas 335 nm ÷ 2200 nm $\text{W}/\text{m}^2$ -95%)
Temperatura de trabajo: $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ÷ $80\text{ }^\circ\text{C}$
Off-set del Cero:
a) respuesta a una radiación térmica de $200\text{W}/\text{m}^2$ : $<25\text{ W}/\text{m}^2$
b) respuesta a un cambio de temperatura ambiente de $5\text{K}/\text{h}$ : $< 6 \text{W}/\text{m}^2$
Inestabilidad a largo plazo: $<\pm 2.5\%$ (1 año)
No linealidad: $<\pm 2\%$
Respuesta según la ley del coseno: $<\pm 22\text{ W}/\text{m}^2$
Selectividad espectral: $<\pm 7\%$
Respuesta en función de la temperatura: $<8\%$

El datalogger utilizado para registrar los datos medidos fue el HD-2102 marca DeltaOhm, que permite conexión con el ordenador de registro de datos.



figura 14 Datalogger HD-2102 para el registra de la radiación solar global

### 3.2.3 Dataloggers y equipos adicionales

Para que toda la sensorización pueda ser registrada, en la caseta se instaló un ordenador de mesa. Algunos dataloggers y sistemas de adquisición permiten la conexión directa con el ordenador de tal manera que es posible monitorizar en tiempo real los valores que están siendo registrados. Otros por el contrario, sólo permiten un registro en la memoria interna del propio datalogger. Las principales características de los dataloggers se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de los sistemas de adquisición de datos y dataloggers instalados.

Datalogger /sistema de adquisición de datos	Variable registrada	Características de conexión y memoria interna	Uso para control
Sistema de adquisición de datos CompaqDAQ con módulo para la lectura de termopares	Temperaturas (termopares)	Conexión por USB a ordenador. Permite el registro y monitorización en tiempo real de las variables medidas. No tiene memoria interna	Sí se pueden usar las señales para control
Datalogger YCT	Temperaturas (termopares)	No permite lectura en tiempo real. Almacenamiento de los datos en memoria interna	No
DeltaOHM HD32.7	Temperaturas (PT100)	Conexión por USB (puerto serie simulado), permite el registro y monitorización en tiempo real de las	No

		temperaturas medidas. Posee memoria interna, de tal manera que almacena los valores medido tanto en el ordenador como en la memoria interna	
Testo 174T	Temperaturas (NTC)	No permite lectura en tiempo real. Almacenamiento de los datos en memoria interna	No
PCE-T390	Temperaturas (PT100)	No permite lectura en tiempo real. Almacenamiento de los datos en memoria interna	No
Estación meteorológica WatchDog 2000	Velocidad del viento Dirección del viento Temperatura Humedad relativa Precipitaciones Radiaciones solares	Conexión puerto serie, permite el registro y monitorización en tiempo real de las variables medidas. Posee memoria interna, de tal manera que almacena los valores medido tanto en el ordenador como en la memoria interna	No
Datalogger HD-2102	Radiación solar	Conexión por USB (puerto serie simulado), permite el registro y monitorización en tiempo real de las temperaturas medidas. Posee memoria interna, de tal manera que almacena los valores medido tanto en el ordenador como en la memoria interna	No

El ordenador de mesa utilizado es un HP Compaq dc7700p con procesador Inter® Core™ 2 CPU a 240 GHz, con 2.0 GB de memoria Ram.

Para hacer posible la monitorización remota de los datos recogidos por el ordenador, se instaló un router marca D-Link modelo DWR-921 4G LTE, mediante el cual ha sido posible observar las medidas de aquellos dataloggers que tienen conexión directa con el ordenador.

## 4 ENSAYOS EN REGIMEN DE VERANO



*figura 15 Caseta con la fachada activa ventilada configurada en modo verano.*

Estos ensayos corresponden a la segunda fase de experimentos. El objetivo fundamental, es la determinación del beneficio que se deriva de la utilización del elemento Senhor durante el periodo de refrigeración. Dicho beneficio se mide mediante distintos parámetros como son: Confort en oscilación libre, Consumo de energía para mantener una temperatura interior constante y mediante el calor extraído por la fachada Senhor.

En este modo, el cerramiento Senhor se puede describir como una “fachada ventilada activa”, que consiste de una capa exterior de hormigón, seguida por otra de aislamiento, una cámara de aire que puede estar cerrada o ventilada, según lo establezca el sistema de control en las condiciones dadas. Debido a las dos formas en las que la fachada de hormigón opera, el comportamiento de este elemento se aleja del de un muro o fachada ventilada convencional.

La caseta en este modo, no cuenta con ningún tipo de ventilación con el exterior, de tal manera que sólo las infiltraciones por la puerta y a través de pequeñas grietas entre elementos serían los que produzcan la renovación de aire con el interior.

La circulación de aire es forzada por seis ventiladores que de acuerdo con las mediciones realizadas con el analizador de potencia, consumen 108W.

### 4.1 ENSAYOS EJECUTADOS

Los ensayos se ejecutaron entre 06-06-2014 y el 08-09-2014, y se dividieron en cuatro tipos de experimentos:

- a- Oscilación libre, ventiladores funcionando según esquema de control
- b- Oscilación libre, ventiladores apagados las 24 horas
- c- Temperatura controlada, ventiladores funcionando según esquema de control
- d- Temperatura controlada, ventiladores apagados las 24 horas

#### 4.1.1 Oscilación libre, ventiladores funcionando según esquema de control (06-06-2014 a 29-06-2014) y (02-09-2014 a 08-09-2014)

En la figura 16, se muestra una gráfica donde se indican los dos periodos en los que se operó bajo la modalidad que se describe en este apartado. El segundo periodo de pruebas se realizó a modo de comprobación y con el objetivo de recoger más datos bajo unas condiciones climáticas distintas. En este modo se determinan las condiciones de confort que se obtienen en la caseta.

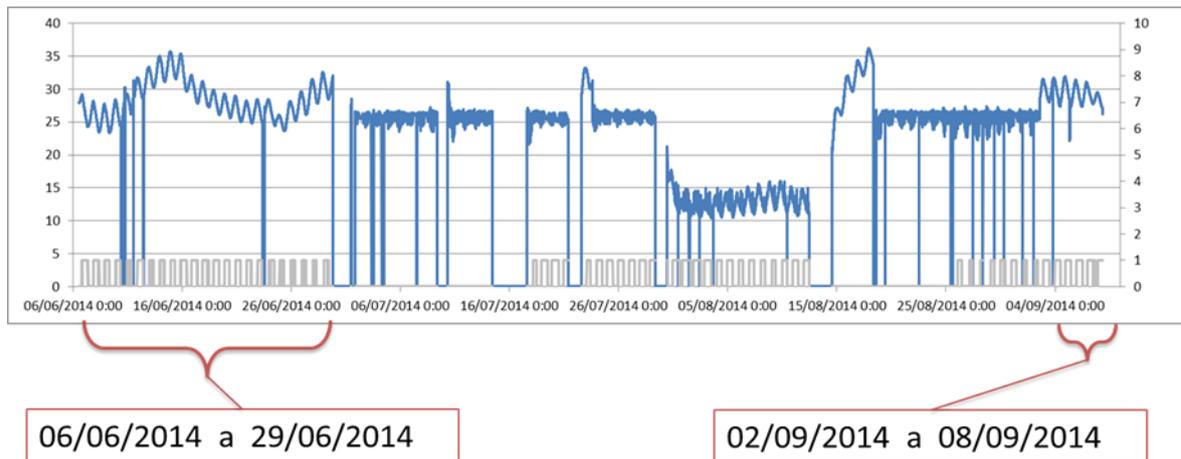


figura 16. Experimentos en modo de oscilación libre con los ventiladores funcionando según esquema de control. La línea azul es la temperatura interior media de la caseta y la línea gris (en forma de escalón unitario) representa los periodos de operación de los ventiladores.

Las estrategias de control utilizadas en este periodo se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Estrategias de control utilizadas durante el modo de operación en oscilación libre

Fecha	Modo de control	Observaciones
06-06-2014	si $T_{ext} < T_{media\_camara} \rightarrow Ventiladores = 0n$	El tiempo de operación de ventiladores es muy largo con lo que se tiene poco aprovechamiento de los mismos cuando la temperatura exterior es muy cercana a la de la cámara. Arranques y paradas sucesivas de los ventiladores debido a la oscilación de las temperaturas.
10-06-2014	Si $T_{ext} + 1 < T_{media\_camara} \rightarrow Ventiladores = on$	Se mejora (reduce) el tiempo de operación de los ventiladores pero persisten los arranques y paradas sucesivos.
11-06-2014	Si $T_{ext} + 1 < T_{interior\_caseta} \rightarrow Ventiladores = on$	Se elimina el problema de los arranques y paradas sucesivos, pero el tiempo de operación es muy prolongado y se ve muy poco aprovechamiento de los ventiladores, debido a que se presentan largos periodos de tiempo en los que se ventila la cámara cuando la temperatura

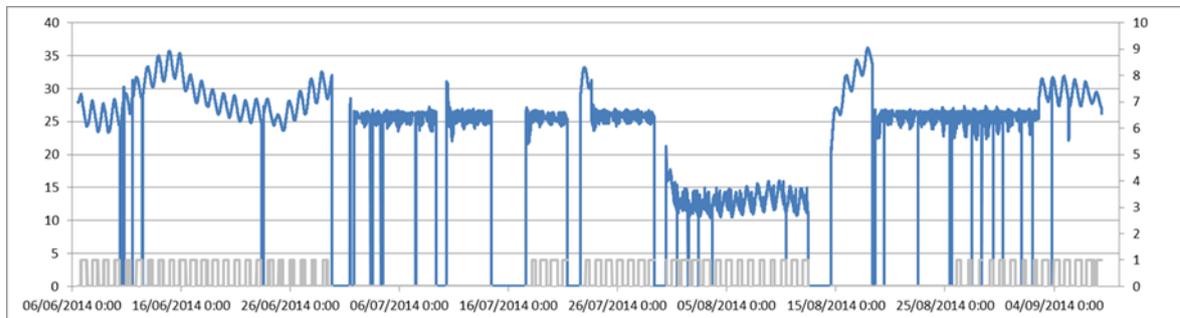
		exterior es superior a la de la cámara.
12-06-2014	<p>Funcionamiento con histéresis.</p> <p>Si <math>Text+1.5 &lt; T\_media\_camara \rightarrow Vent=on</math></p> <p>Si <math>Text+0.5 &lt; T\_media\_camara \rightarrow Vent=off</math></p>	Se reduce drásticamente el problema de arranques y paradas sucesivas y se observa que los periodos de operación son adecuados.

EN el segundo periodo de ensayos (2-09-2014 a 08-09-2014) con este modo de operación, es esquema de control utilizado fue:

Si  $Text < 24.0^{\circ}C \rightarrow Vent=on$   
Si  $Text > 24.5^{\circ}C \rightarrow Vent=off$

#### 4.1.2 Oscilación libre, ventiladores apagados las 24 horas (14-08-2014 a 18-08-2014)

Este modo de operación es similar al de oscilación libre de la caseta de referencia, con la diferencia de que la cámara se encuentra abierta. El objetivo de esta prueba era el de verificar la caracterización realizada a la caseta en el modo de referencia. La figura 17 muestra esquemáticamente el momento en el que se realizó este ensayo.



14/08/2014 a 18/08/2014

figura 17 Experimentos en modo de oscilación libre con los ventiladores apagados las 24 horas. La línea azul es la temperatura interior media de la caseta y la línea gris (en forma de escalón unitario) representa los periodos de operación e los ventiladores.

#### 4.1.3 Temperatura controlada, ventiladores funcionando según esquema de control (16-07-2014 a 31-07-2014) y (25-08-2014 a 02-09-2014)

Este modo de operación consiste en establecer una temperatura de consigna para el equipo de aire climatización y simultáneamente permitir que los ventiladores funcionen según un esquema de control. En este modo de operación, se puede ver el efecto que tiene sobre la demanda de energía la operación de la fachada ventilada activa.

La temperatura de consigna establecida en el equipo fue de 27°C, que es un valor cercano al límite superior en el que se pueden admitir condiciones de confort. Se estableció este valor dado que permite maximizar los efectos producidos por la fachada ventilada activa.

El esquema de operación de los ventiladores fue:

Si  $T_{ext} < 24.0^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{Vent}=\text{on}$   
Si  $T_{ext} > 24.5^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{Vent}=\text{off}$

En la figura 18 se destacan los periodos durante los cuales se llevaron a cabo las pruebas en este modo de operación.

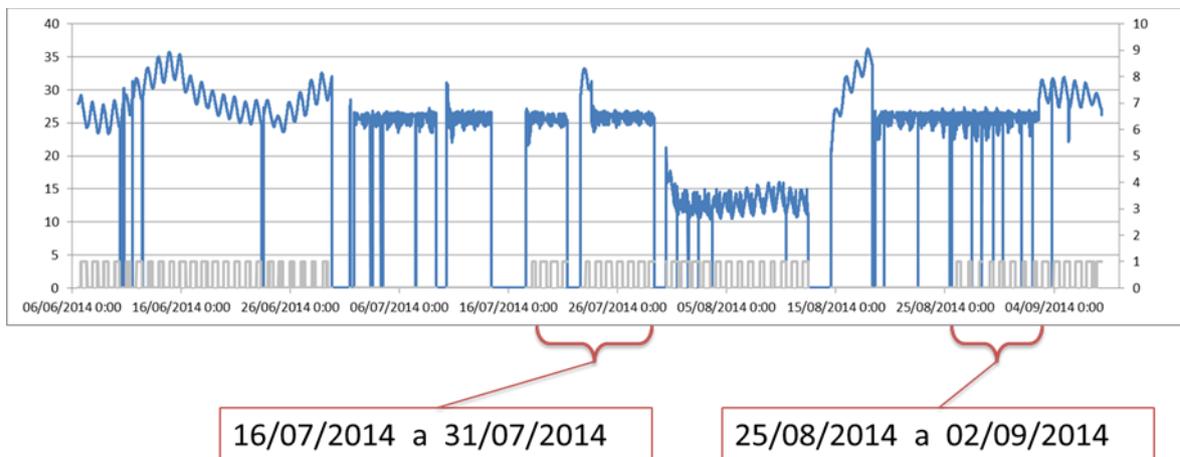


figura 18 Experimentos con temperatura interior controlada (Temperatura de consigna =27°C) y ventiladores operando según esquema de control. La línea azul es la temperatura interior media de la caseta y la línea gris (en forma de escalón unitario) representa los periodos de operación e los ventiladores

Dentro de este modo, también se realizó una prueba a la mínima temperatura de consigna que permite el equipo de climatización (figura 19), que resulta útil para la caracterización de la caseta ya que amplifica los fenómenos de transferencia de calor a través de los cerramientos.

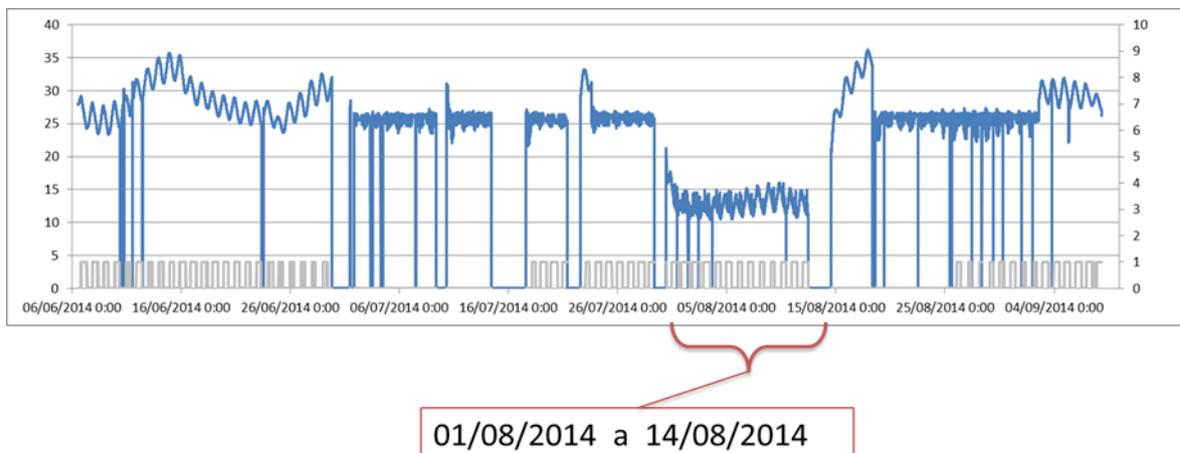


figura 19 Experimentos con temperatura interior controlada (Temperatura de consigna =15°C) y ventiladores operando según esquema de control. La línea azul es la temperatura interior media de la caseta y la línea gris (en forma de escalón unitario) representa los periodos de operación e los ventiladores

#### 4.1.4 Temperatura controlada, ventiladores apagados las 24 horas (01-07-2014 a 16-07-2014) y (18-08-2014 a 25-08-2014)

El objetivo de este modo de operación es el de permitir la comparación de la demanda de refrigeración de la caseta con y sin los ventiladores funcionando.

Tal como muestra la figura 20, se realizaron dos sesiones en este modo de operación; una en julio y otra en agosto. Una de las razones para la realización de la segunda sesión, fue la presencia de múltiples paradas y pérdidas de datos durante la sesión de julio. Sin embargo la segunda sesión de pruebas permite no sólo recoger más datos en este modo, sino que como opera bajo unas condiciones un poco distintas, resulta muy apropiado para efectos de caracterización y validación.

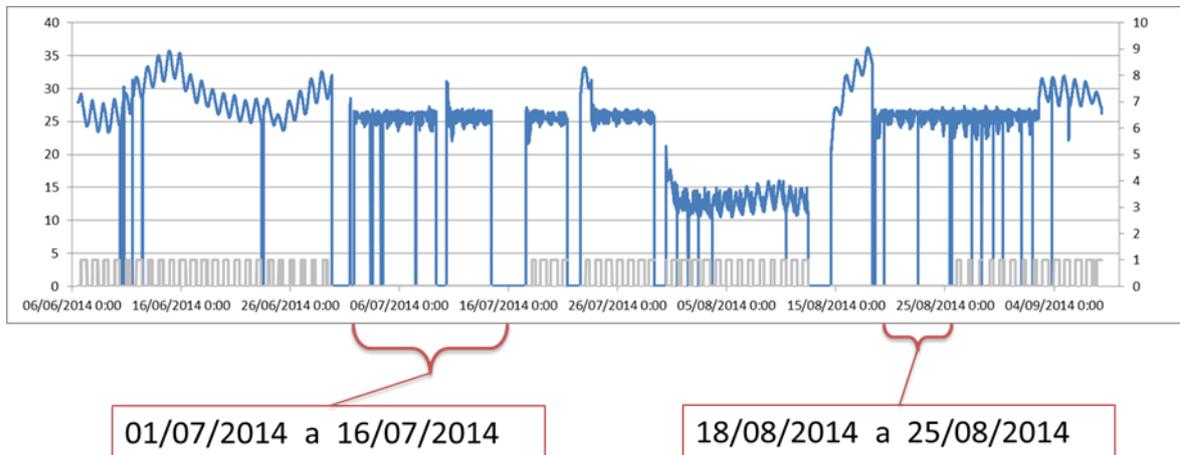


figura 20 Experimentos con temperatura interior controlada (Temperatura de consigna =27°C) y ventiladores oapagados 24horas. La línea azul es la temperatura interior media de la caseta y la línea gris (en forma de escalón unitario) representa los periodos de operación e los ventiladores

#### 4.1.5 Ensayos en régimen de verano. Techo refrescante (08-09-2014 a 06-10-2014)

Los ensayos se ejecutaron entre 08-09-2014 y el 06-10-2014, y consistieron en observar el efecto que tiene sobre la temperatura interior, la aplicación de un esquema de operación de ventilación nocturna enfocado a la acumulación de frío durante la noche en el techo de la caseta.

La ventilación se realiza mediante impulsión mecánica donde los ventiladores se ubican en la puerta de la caseta a manera de extractores. El consumo de estos ventiladores es de 140W. El aire proveniente del exterior, ingresa a la cámara de aire del muro sur a través de unos orificios ubicados en la parte inferior del mismo; posteriormente, el aire asciende por dicha cámara hasta unos orificios en la parte superior que comunican con el interior de la caseta, desde donde el aire recorre el interior de la misma saliendo por los ventiladores ubicados en la puerta trasera (fachada norte).



*figura 21. Ventiladores instalados a manera de extractores en la puerta de la caseta*

Los orificios de ventilación se han colocado en la parte superior de la caseta buscando que el aire frío refresque el techo que es donde se ubica la masa térmica.



figura 22. Orificios de ventilación para permitir la ventilación nocturna

En el diseño original se había planificado que los orificios de ventilación estuvieran inclinados hacia arriba con el objetivo de promover un patrón de flujo favorable al enfriamiento del techo. Sin embargo, durante la construcción de esta caseta, dichos orificios fueron realizados en forma perpendicular al muro, con lo que se obtiene un patrón de flujo en el que aire frío tiene un contacto pobre con el techo. Para subsanar esta situación se introdujo un deflector que fuerza el flujo de aire hacia el techo (figura 23).



figura 23. Deflector para forzar el aire hacia el techo de la caseta

Aunque la forma en la que se construyeron los agujeros de ventilación, no se correspondía con el diseño realizado, fue posible realizar dos tipos de experimentos: con deflector y sin deflector. ver figura 24.

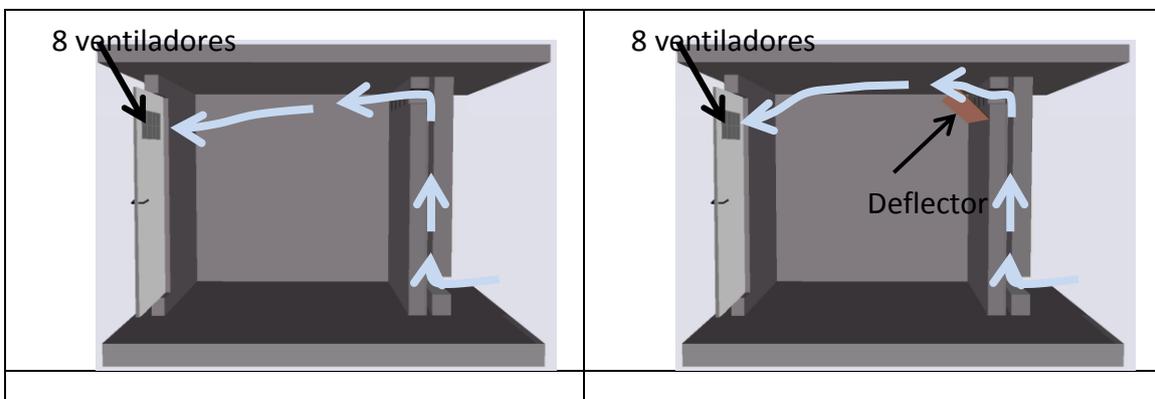


figura 24 Caseta con la fachada activa ventilada configurada en modo de techo refrescante.

La comparación entre los resultados obtenidos con los dos tipos de experimentos permitió evidenciar el beneficio que se obtiene al forzar un flujo favorable al contacto con la masa térmica del edificio.

Los experimentos sin deflector se realizaron entre el 08 y el 15 de Septiembre de 2014 y los experimentos con deflector, entre el 15 de septiembre y el 06 de octubre de 2014. (figura 25)

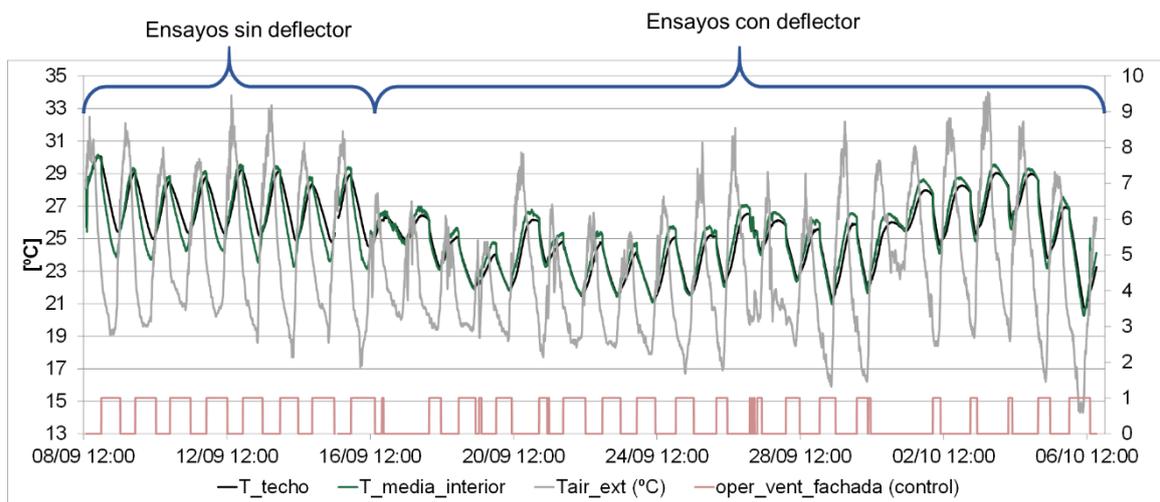


figura 25. Principales temperaturas y operación de los ventiladores durante los ensayos del techo refrescante

#### 4.1.5.1 Modo sin deflector

En el modo sin deflector se tiene un flujo de aire como el mostrado en la figura 26

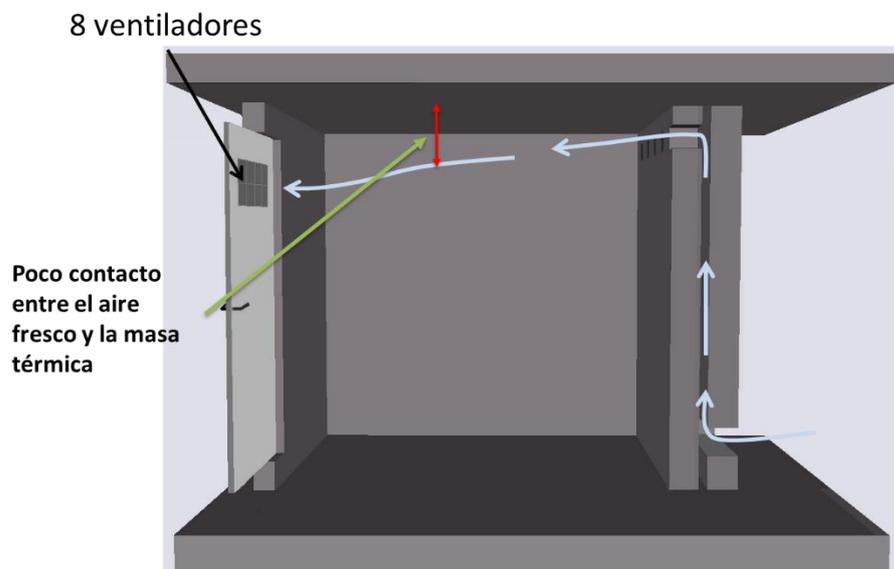


figura 26. Flujo de aire sin deflector.

El comportamiento de las temperaturas durante este periodo se ejemplifica en la figura 27. Se puede apreciar que cuando no hay circulación de aire, se presenta una estratificación del mismo debido a que el aire se encuentra en reposo, siendo el de menor densidad (mayor temperatura) el que se desplaza a la parte superior de la caseta

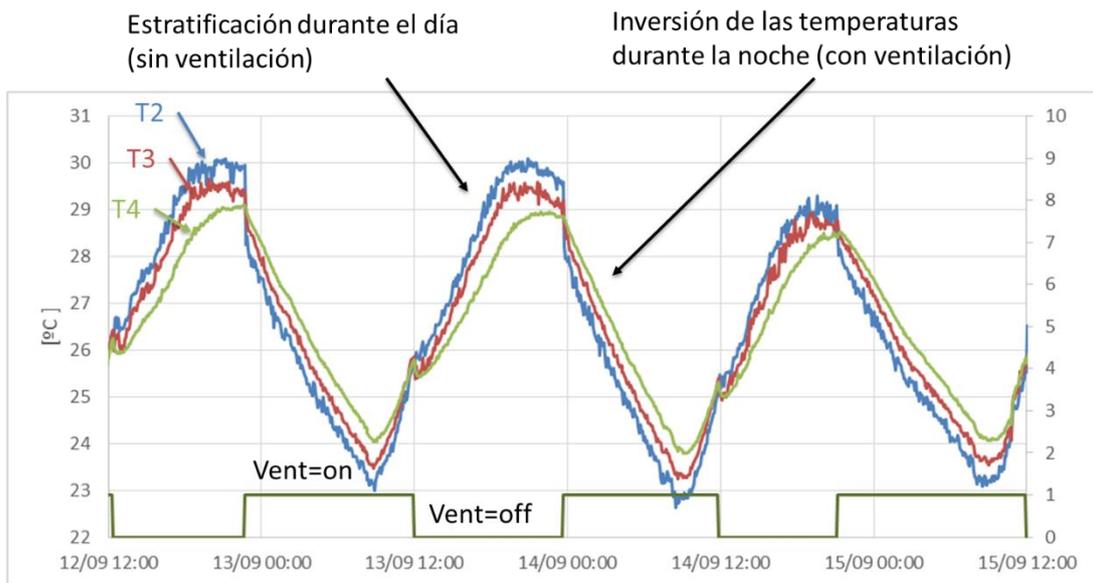
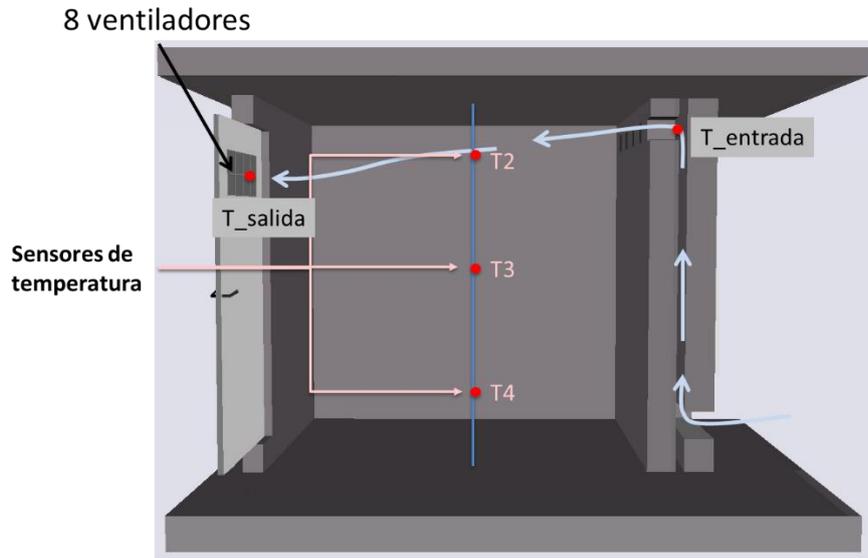


figura 27. Comportamiento de las temperaturas sin deflector

Por otro lado, la temperatura del techo no sufre un descenso importante debido a que la corriente de aire no entre en contacto íntimo con esta superficie. Este hecho se evidencia en la figura 28, donde se puede apreciar que durante la ventilación, la temperatura del techo, aunque desciende, lo hace en una medida inferior a la del aire interior y, cuando no hay ventilación, la temperatura del techo es del orden de medio grado Celsius menor que la del aire interior, lo que indica que el techo ha almacenado frío, pero con un potencial de absorción de calor bajo.

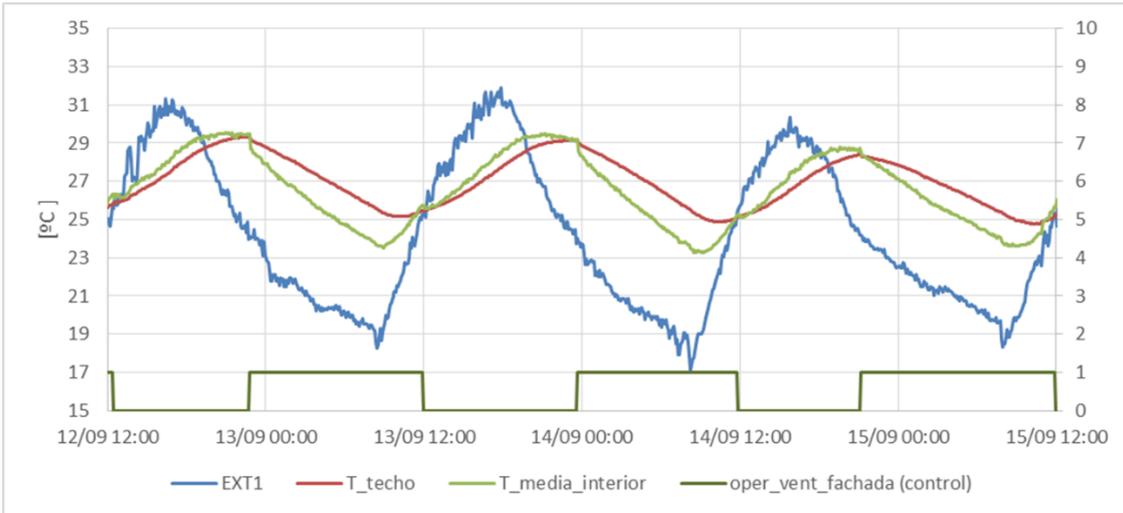


figura 28. Comportamiento de las temperaturas del techo y del interior de la caseta en el modo de operación sin deflector.

#### 4.1.5.2 Modo con deflector

El esquema que muestra la forma en la que el deflector se ha instalado se muestra en la figura 29.

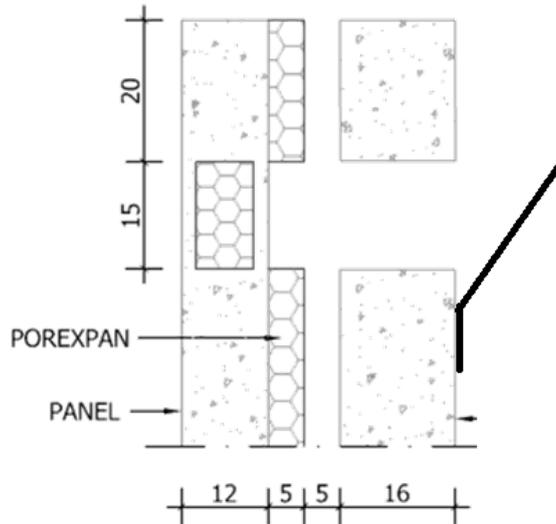


figura 29. Esquema de la instalación del deflector.

El flujo de aire que se obtiene con el deflector se representa en el esquema de la figura 30. En ella se aprecia que el aire es obligado a entrar en contacto con el techo.

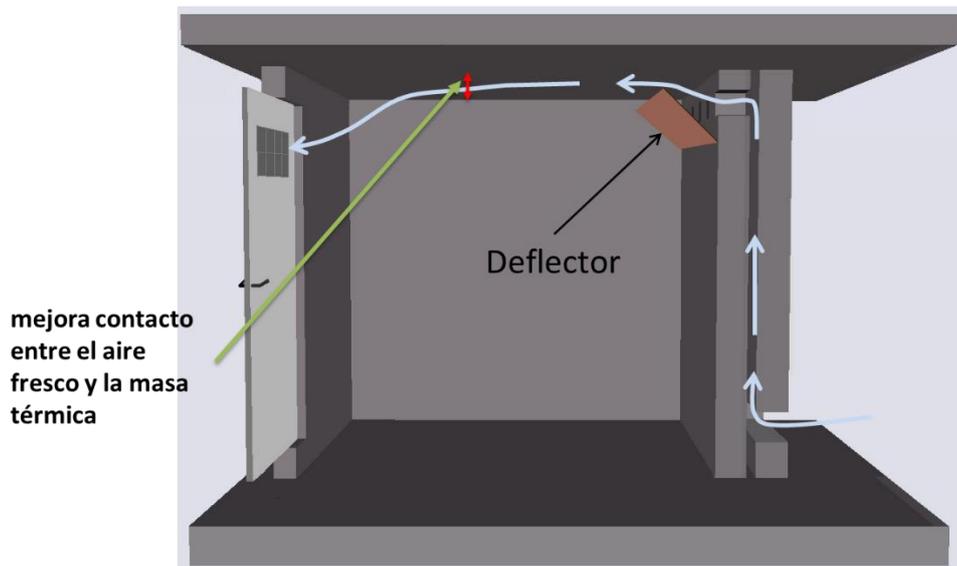


figura 30. Flujo de aire con deflector

Para realizar un correcta medición de las temperaturas con deflector fue necesario incorporar un sensor adicional (T1) en la parte superior tal como se muestra en la figura 31

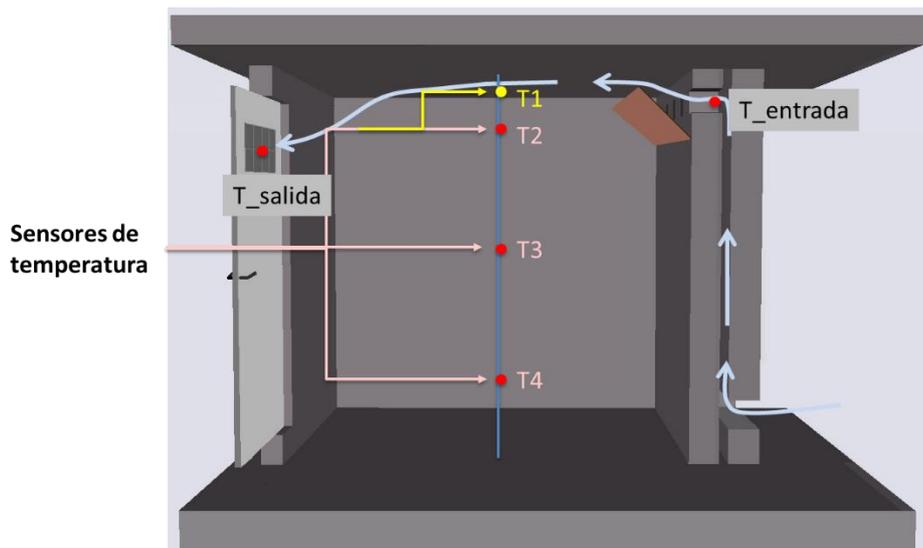


figura 31. Sensores de temperatura para medir correctamente el efecto del deflector

Para analizar los resultados obtenidos deflector es necesario hacer una comparación con los resultados obtenidos sin deflector. La figura 32 muestra el comportamiento de las temperaturas en la caseta en dos periodos de tiempo similares. En la figura 32(a) se muestra el comportamiento son deflector y en la figura 32(b), con deflector.

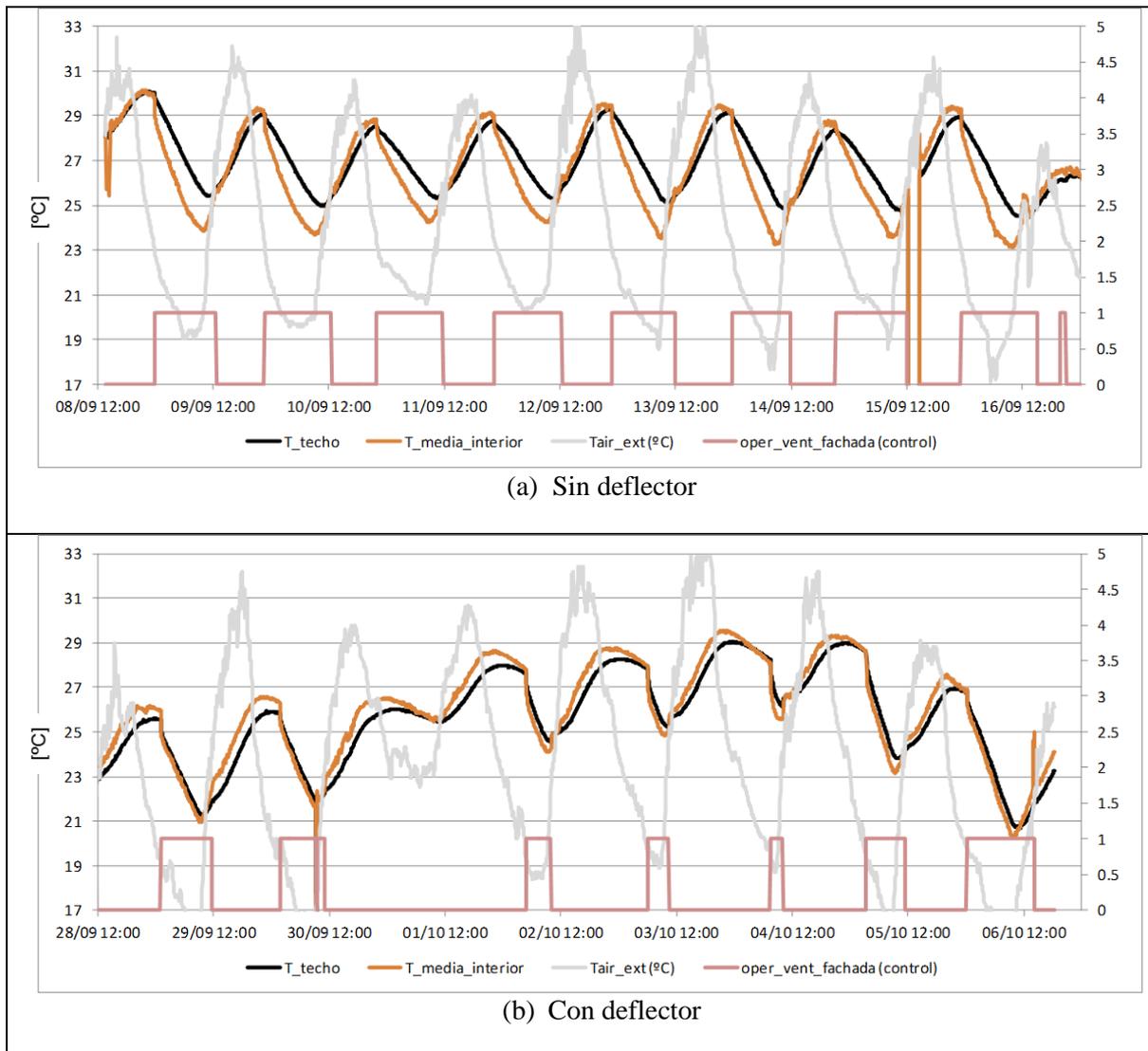


figura 32 Comparación en el comportamiento de la temperatura interior y del techo con y sin deflector

Las diferencias entre las dos curvas son claras:

- Menos amplitud de oscilación de las temperaturas en el caso con deflector. Esto indica que se está utilizando mayor inercia térmica dado que una alta inercia térmica implica bajas amplitud de oscilación de la temperatura ante las mismas excitaciones.
- Mayor diferencia de temperatura entre el aire en el interior y el techo cuando no hay ventilación en el caso con el deflector. Esto es una señal de que el techo almacena más frío con deflector que sin deflector.
- Menor diferencia de temperatura entre el aire en el interior y el techo cuando hay ventilación en el caso con el deflector. Este comportamiento revela que el foco frío (aire exterior) se utiliza de forma más apropiada en el caso con deflector, ya que extrae más calor del techo y menos del aire interior que el caso sin deflector. Como el techo es elemento que almacena el frío, este se emplea posteriormente para mantener fresco al edificio y no se pierde como sí ocurre en el caso sin deflector.

## 4.2 SENSORIZACION

Para esta etapa, de experimentos, el punto de partida fue la sensorización ya instalada en los experimentos correspondientes a la caseta de referencia (apartado 3.2), con algunos cambios para permitir el control de los ventiladores y el registro en línea de todas las variables registradas. En la figura 33 se puede apreciar una fotografía del ordenador y el sistema de adquisición y control configurado para la operación de la fachada ventilada activa.

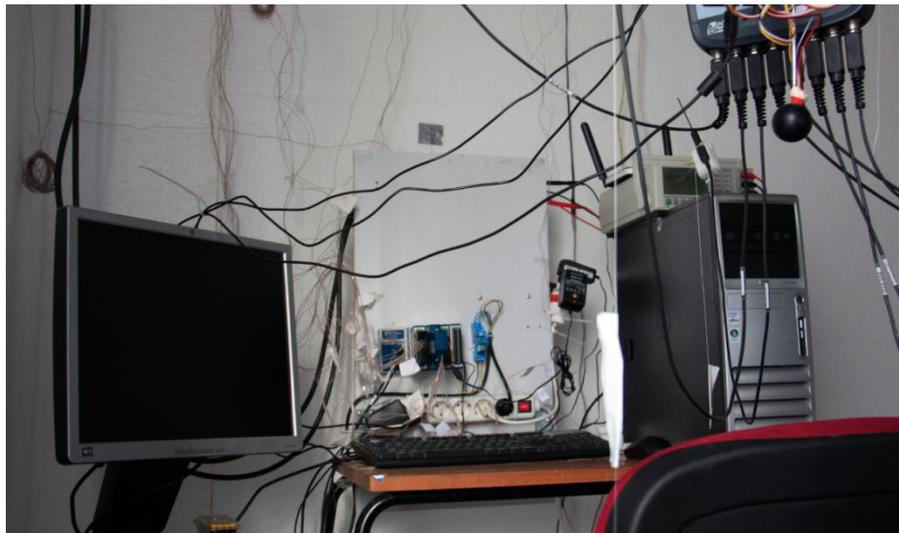


figura 33 Vista del sistema de control y adquisición de datos, ordenador para la recolección de datos y analizador de potencia.

Debido a que muchos de los elementos y sensores descritos en el apartado 3.2 se conservan en esta etapa, sólo se hará mención de las modificaciones realizadas.

### **Sistema de control y adquisición de datos CompaqDAQ**

Debido a las ventajas que presenta este sistema para monitorización y control, en esta etapa de experimentación se amplió este sistema con la inclusión de un nuevo módulo para la lectura de termopares y un módulo de salida digital para la actuación sobre relés que permite el control de los ventiladores de la fachada ventilada activa, ver figura 34.

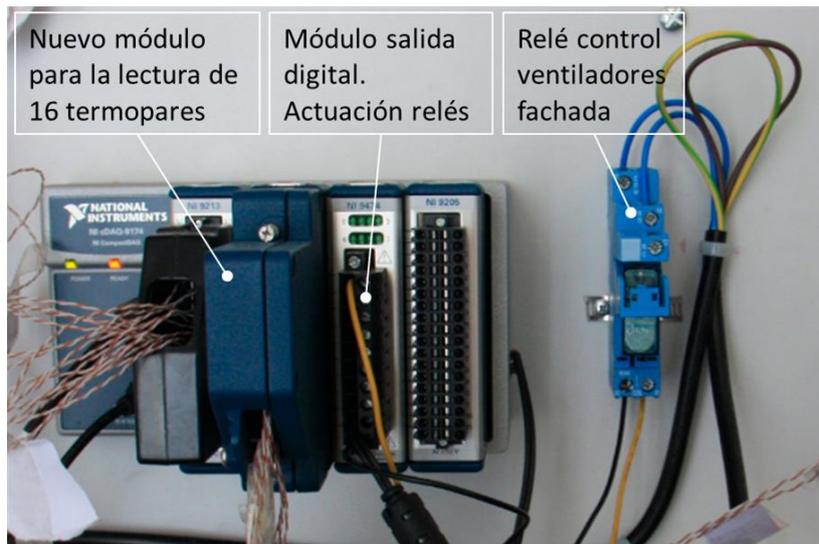


figura 34 Sistema de control y adquisición de datos National Instruments Compaq DAQ, configurado en modo verano para el control de la fachada ventilada activa.

El nuevo módulo para la lectura de 16 termopares permitió que se remplazaran varios dataloggers (

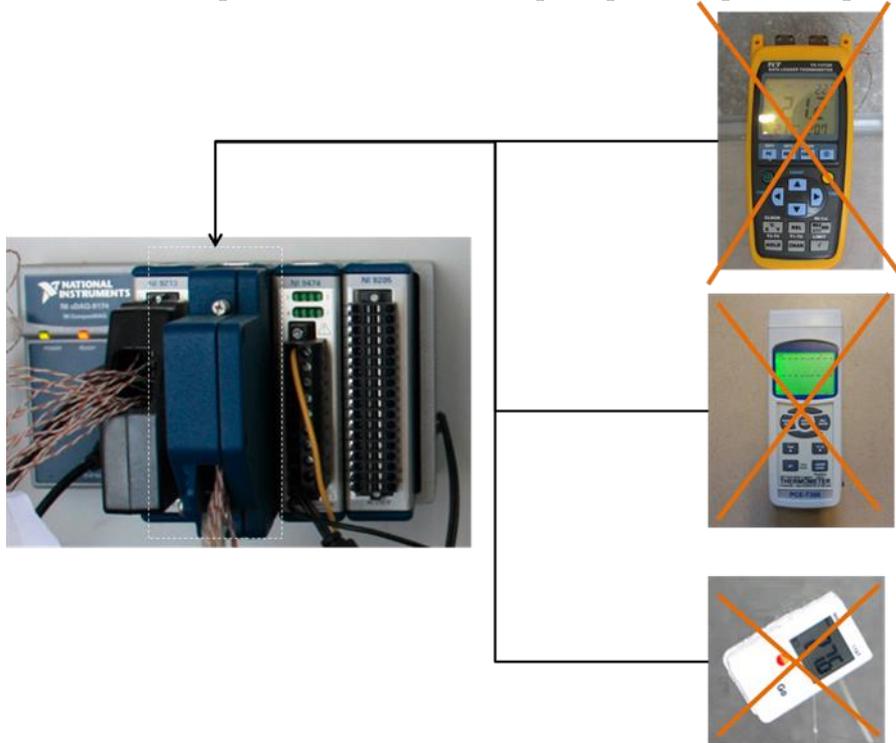


figura 35) consiguiendo con ello las ventajas derivadas de un sistema que está conectado en línea y que puede utilizar las señales leídas para establecer acciones de control.

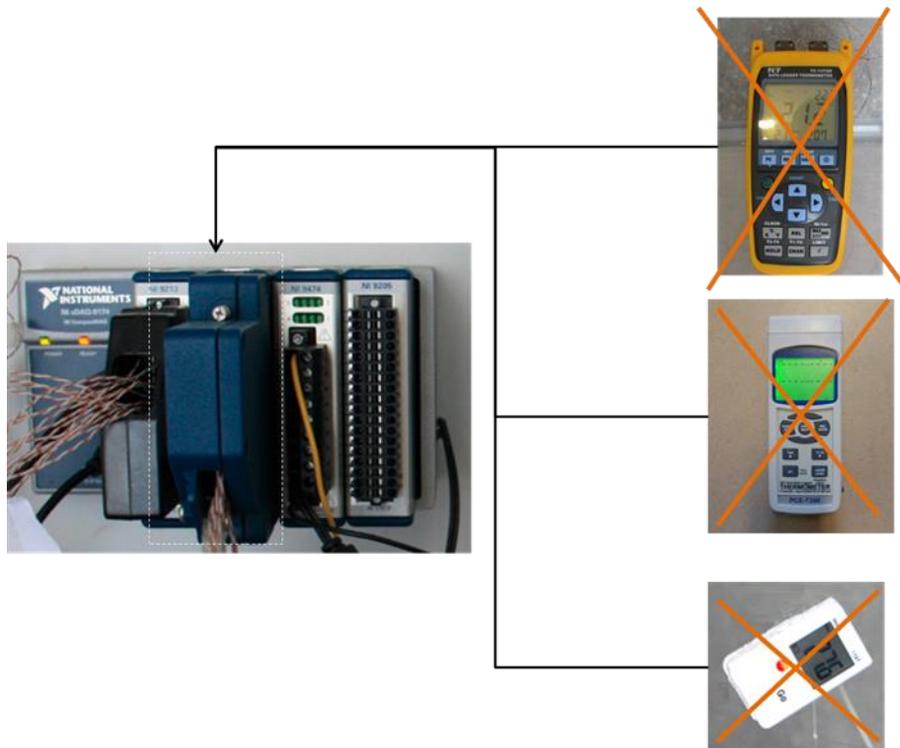


figura 35 Dataloggers reemplazados por el nuevo módulo para la lectura de 16 termopares.

Los dataloggers reemplazados fueron;

- Dataloggers YTC para las lecturas de las temperaturas superficiales de los muros interiores y la cubierta. La ventaja que se obtiene es la monitorización en línea de los datos leídos, y además, estos datos se convierten en señales que se pueden ser usadas para el control.
- Datalogger PCE-T390 para la lectura de la temperatura exterior. La ventaja vuelve a ser la monitorización en línea y la posibilidad de usar el valor de esta variable como una señal de control.
- Dataloggers Testo 174T para la lectura de la temperatura de aire interior. En este caso no es posible reemplazar los 8 puntos de medida en los que se encontraban, sólo se reemplazan los tres más representativos con termopares del sistema CompaqDAQ. Sin embargo sí siguen existiendo los 8 puntos de medida con las PT100 conectadas al datalogger DeltaOHM HD32.7. Esto implica que ya no se tiene redundancia en los 8 puntos de medida, sino solamente en 3.

No sobra aclarar que la retirada de estos 8 datalogger Testo, fue motivada también por la necesidad de desplazarlos a otro experimento.

Las ventajas que tiene el reemplazar estos sensores por termopares del sistema Compaq DAQ, son: la accesibilidad de estos datos en línea y el uso de estas señales para efectos de control.

### **Cambio en la orientación del piranómetro LP PYRA 03**

Una vez se verificó que con la correcta calibración del piranómetro de la estación meteorológica, todos los valores registrados por ambos piranómetros eran coherentes y muy parecidos entre sí, se

decidió orientar el LP PYRA 03 hacia el sur con el fin de registrar la radiación que incide sobre la fachada activa.



figura 36. Orientación de los piranómetros para el registro de la radiación global horizontal y radiación global sur

#### Analizador de potencia PCE PA 6000

Para registrar el consumo eléctrico que se presenta en la caseta se incorporó este medidor (figura 37). La conexión realizada de este sensor permite el registro de la energía total consumida por la caseta, es decir, incluye, todos los elementos de la instrumentación (incluyendo su propio consumo), el de los ventiladores y el del equipo de climatización. Registra el factor de potencia, con lo que es posible determinar las potencias activas y reactivas que se presentan.



figura 37 Analizador de potencia PCE PA 6000

Las principales especificaciones técnicas de este equipo son:

Función	Rango de medición ; Precisión ; Resolución
---------	--



Medición de potencia activa (AC, potencia con valor real), medición directa	1 W ... 6 kW; 1 W; $\pm 1,5$ % + 1 dígito
Medición de potencia aparente (AC)	0,01 VA ... 9,999 kVA; 0,01 VA; $\pm 1,5$ % + 1 dígito
Factor de potencia ( $\cos \varphi$ )	0,00 ... 1,00; 0,01; $\pm 1,5$ % + 2 dígitos
Contador kWh	0,001 Wh ... 9999 kWh; 0,001 Wh; $\pm 1$ % + 1 dígito
ACV TRUE RMS / DCV	0,1 V ... 600 V; 0,1 / 1 V; $\pm 1$ % + 1 dígito
ACA TRUE RMS / DCA	máx. directo 10 A; 10 mA, con punta de sonda por inducción máx. 1000 A; 1 A; $\pm 1$ % + 1 dígito
Conexión a PC	Puerto RS-232
Condiciones ambientales	máx. 80 % humedad relativa / 0 ... +50 °C

## 5 ENSAYOS EN RÉGIMEN DE INVIERNO



figura 38 Caseta con la fachada activa ventilada configurada en modo invierno.

Los ensayos en régimen de invierno corresponden a la tercera fase de experimentos. El beneficio que se deriva de la utilización de este modo de operación se mide en términos de temperatura en la caseta y del aporte de calor al interior de la misma.

Para describir el cerramiento Sinhör en este modo de operación, se puede hacer el símil con un muro Trombe, con la diferencia de que el aire no se introduce directamente al interior del edificio, sino que se impulsa a una cámara intermedia, donde el objetivo es calentar un muro de hormigón con la suficiente masa térmica para almacenar el calor y transmitirlo al interior con varias horas de retraso, de tal manera que el mayor aporte de calor se da en las horas de la noche.

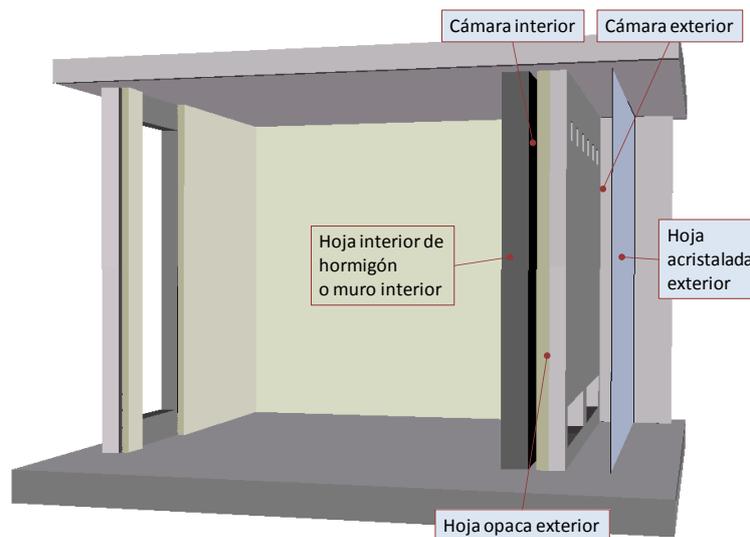


figura 39. Esquema del cerramieto Sinhör ensayado en la caseta

En la figura 39, se aprecia que el cerramiento Senhor configurado para invierno consiste de una hoja acristalada; una cámara de aire exterior; un cerramiento opaco exterior conformado por una capa de hormigón y otra de aislamiento; una cámara de aire interior y una hoja de hormigón interior. Las dos cámaras de aire están comunicadas por aberturas en la parte superior e inferior para permitir la circulación de aire a lo largo de toda su altura

La caseta en este modo, no cuenta con ningún tipo de ventilación con el exterior, de tal manera que sólo las infiltraciones por la puerta y a través de pequeñas grietas entre elementos serían los que produzcan la renovación de aire con el interior.

## 5.1 ENSAYOS EJECUTADOS

Los ensayos se ejecutaron entre el 18-11-2014 y el 10-03-2015<sup>1</sup>, y se dividieron en dos tipos de experimentos:

- e- Modo sin circulación de aire
- f- Modo con circulación de aire

### 5.1.1 Modo sin circulación de aire

Estos ensayos se realizaron entre el 18-11-2014 y el 12-12-2014, con el objetivo de establecer una referencia de operación de la caseta sin la circulación de aire en las cámaras del elemento Senhor. De esta manera es posible evaluar el efecto de la operación nominal, es decir, con circulación de aire ya que se puede contrastar ese resultado con el observado en esta primera etapa.

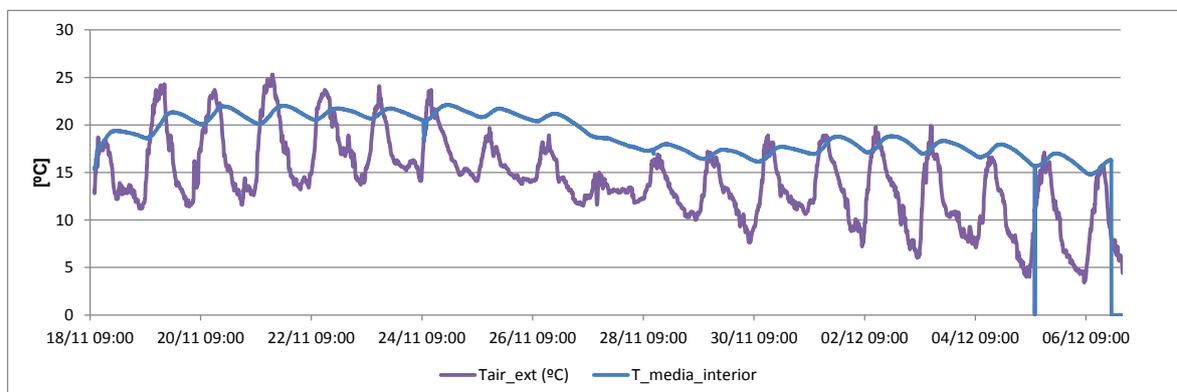


figura 40. Temperatura del aire exterior y del interior de la caseta durante las pruebas en modo de invierno sin circulación de aire por las cámaras.

En la figura 40 se observa la evolución de la temperatura interior en la caseta sin el efecto de la circulación de aire.

La temperatura interior es el resultado de los aportes y pérdidas de calor debidos a: las fuentes internas; transferencia de calor a través de los cerramientos (ganancias solares y pérdidas por transmisión); e infiltraciones de aire a través de las uniones entre los elementos de la caseta.

Vale la pena mencionar que las fuentes de calor internas tienen un valor medio aproximado de 100W que provienen de los equipos que constituyen la instrumentación de la caseta, entre los que

<sup>1</sup> Ensayos con este modo de operación continuaron realizándose posteriormente, pero en este informe sólo se documenta hasta esta fecha debido a que los siguientes ensayos no aportaron información relevante al proyecto.

cabe desatacar como principal fuente de ganancias al ordenador con el sistema de adquisición de datos. Este valor se determinó a partir de las mediciones realizadas con el analizador de potencia PCE PA 6000.

Las principales excitaciones que actúan sobre la caseta son la radiación solar y la temperatura del aire exterior. Los valores de estas variables se muestran en la figura 41.

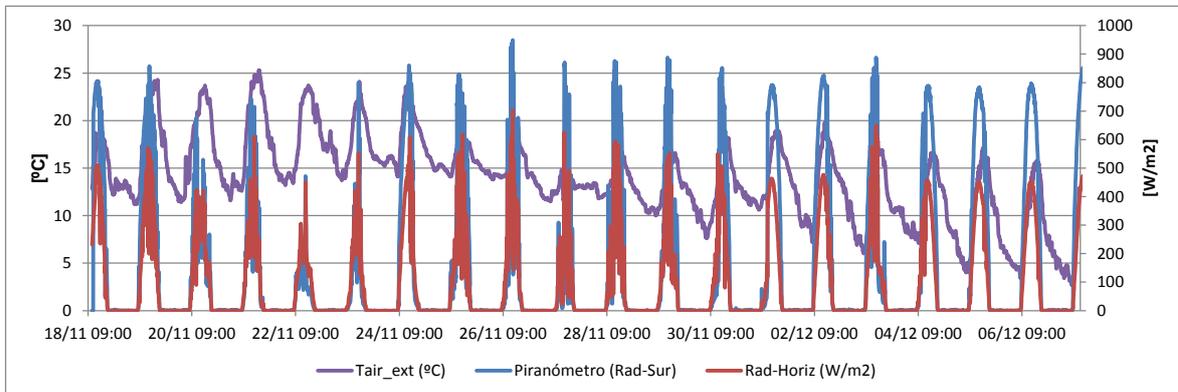


figura 41 Excitaciones sobre la caseta: Temperatura exterior, radiación global sobre superficie horizontal y radiación global sobre superficie sur.

Debido a las variaciones que a lo largo del día sufren los valores de estas variables, no resulta muy clara la tendencia que siguen estos valores. Por esta razón se ha calculado su valor medio diario, obteniéndose la gráfica mostrada en la figura 42. En ella se aprecia que existen dos periodos claramente identificables; uno comprendido por el periodo que va desde el 18 al 24 de noviembre de 2014 y el segundo periodo desde el 24 de noviembre hasta el 6 de diciembre.

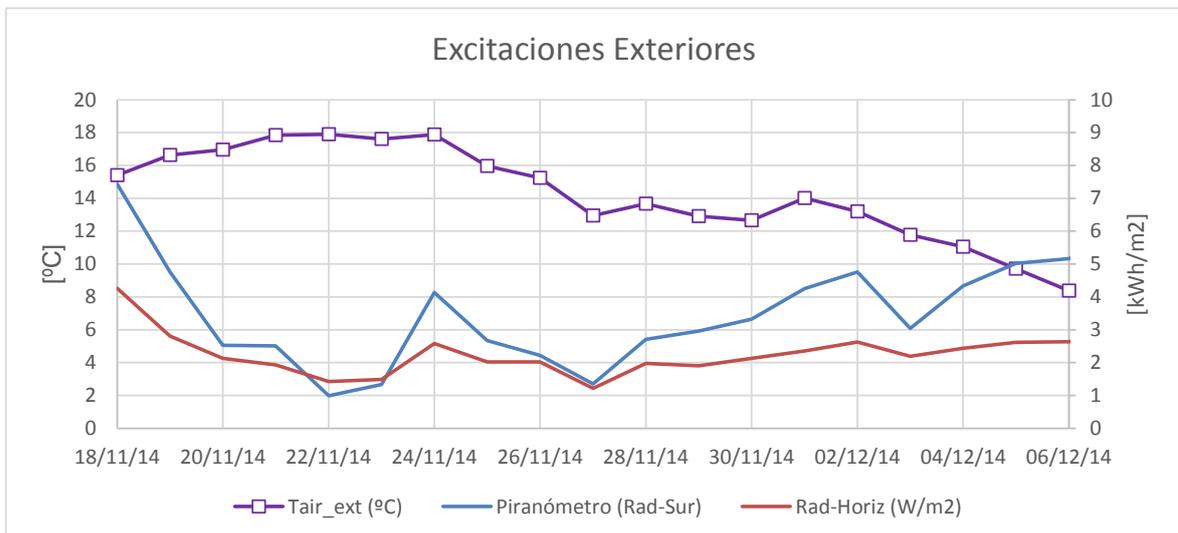


figura 42 Excitaciones sobre la caseta (valores medios diarios): Temperatura exterior, radiación global sobre superficie horizontal y radiación global sobre superficie sur.

En el primer periodo, las temperaturas medias exteriores tienen un valor en torno a los 17°C para descender a valores en torno a los 12°C para el segundo periodo.

Por otro lado, la radiación solar, especialmente la global incidente sobre superficie sur, presenta valores menores durante el primer periodo con una tendencia al alza al final del segundo periodo.

Las temperaturas superficiales interiores durante este periodo son las que se muestran en la figura 43. El muro sur, corresponde a la temperatura superficial interior del elemento Sinhor. En esta gráfica se aprecia claramente el efecto que tiene la disminución de la temperatura exterior durante el segundo periodo identificado anteriormente. En general, las temperaturas interiores de las distintas superficies se encuentran dentro de un rango de 2°C diferenciándose principalmente por la amplitud de su oscilación, la cual es dependiente de la inercia térmica de cada cerramiento, siendo menores para los casos del muro Sinhor, el suelo y el techo.

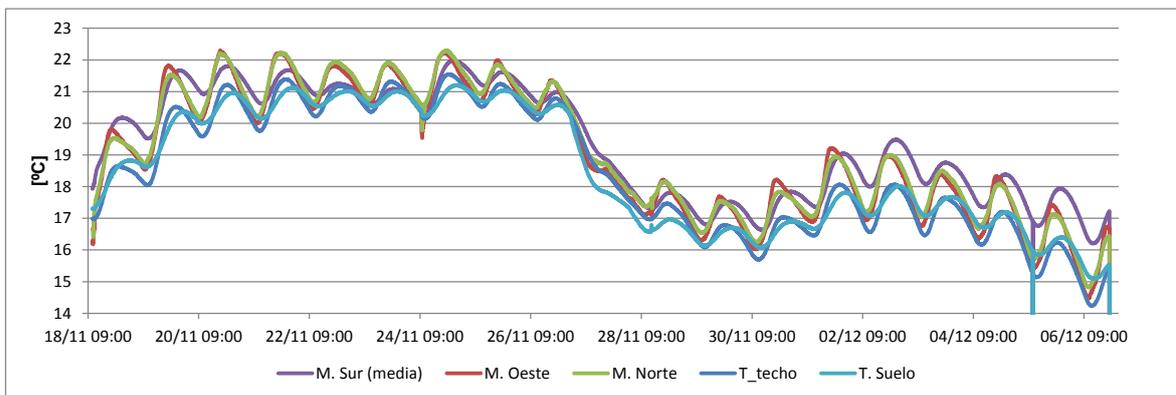


figura 43. Temperaturas superficiales interiores

Por otro lado, se puede apreciar que los valores más bajos de temperatura corresponden al suelo y al techo.

Si se realiza una temperatura media ponderada por las áreas de las superficies interiores y se compara con la media del aire interior se obtiene la gráfica mostrada en la figura 44.

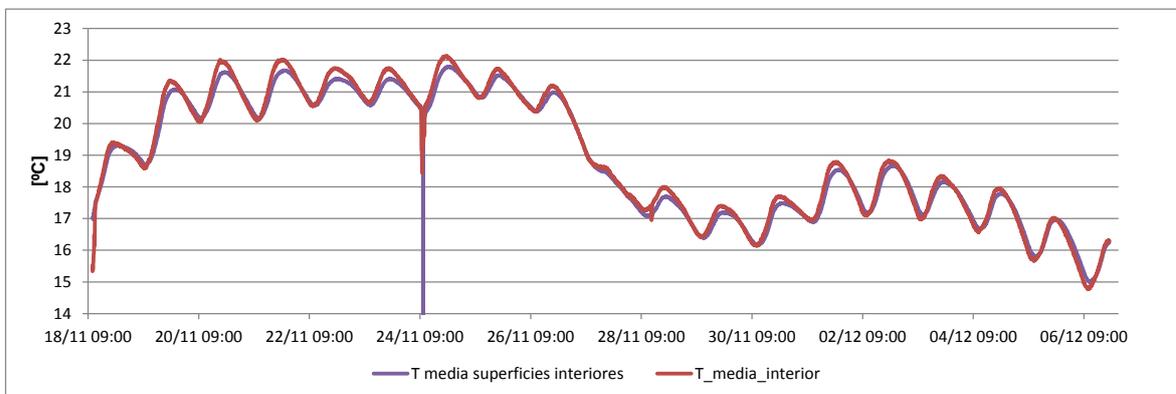


figura 44. Temperatura media de las superficies y temperatura media del aire interior

Se aprecia que estas dos temperaturas presenta un elevado grado de similitud, con diferencias máximas entre ellas inferiores a 0.5°C, es decir, dentro del rango de precisión de los sensores. Lo anterior es indicativo de que la transferencia de calor neta a través de los cerramientos es aproximadamente nula, de tal manera que las ganancias que se dan por fuentes internas, deben ser similares a las pérdidas por infiltraciones.

Por otro lado, es interesante destacar que las amplitudes de las medias de las temperaturas son iguales, y además se encuentran en fase. Esto es un indicador de que las mediciones realizadas son coherentes y por lo tanto correctas.

Las temperaturas medias en periodos de 24 horas muestran el comportamiento que se puede apreciar en la figura 45. En esta gráfica se ve de forma aún más clara la coincidencia entre la

temperatura interior y la de las superficies interiores. Además se puede ver cómo la temperatura media interior es superior a la media exterior.

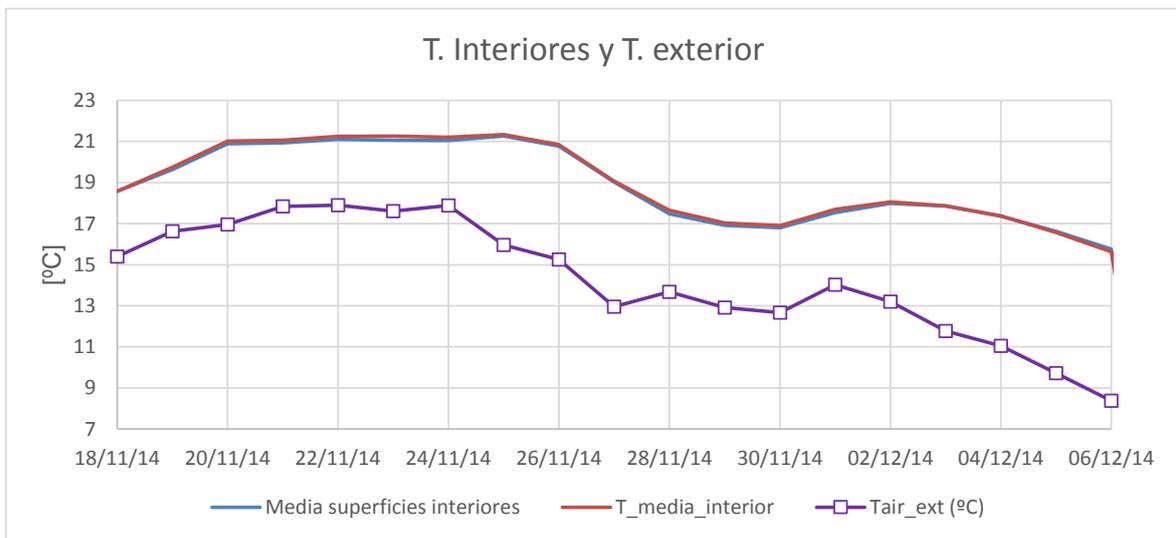


figura 45 Temperaturas medias diarias del interior de la caseta y del exterior de la misma.

Debido a que a partir de la figura 43 no resulta claro el comportamiento del elemento Senhor (muro sur), se ha realizado una media diaria de esta temperatura y se ha comparado con la temperatura media interior tal como se muestra en la figura 46. Se puede apreciar que la temperatura del elemento Senhor es ligeramente superior a la media interior cuando la radiación solar es alta (ver figura 42) y tiende a ser menor cuando dicha excitación es baja. A pesar de la anterior observación es importante aclarar que dichas diferencias son pequeñas, y que a excepción de los últimos días de este periodo de experimentación, se encuentran dentro de los rangos de precisión de los sensores, con lo que no se puede asegurar con total certeza que el comportamiento sea el descrito anteriormente, con la única excepción de tres últimos días en los que la media sí es claramente superior con una diferencia superior al rango de precisión de los sensores.

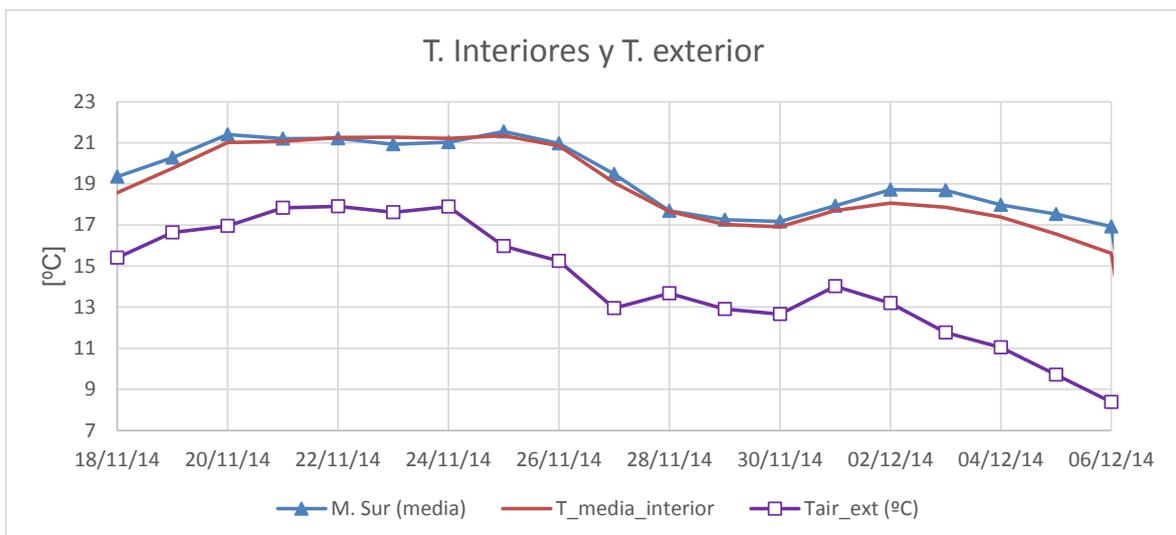


figura 46 Temperatura media del elemento Senhor (muro sur) en comparación con la media interior y la media exterior

Para ratificar el anterior comportamiento, en la figura 47, se muestra la diferencia de temperatura media diaria entre el interior de la caseta y el aire exterior. En esta gráfica se aprecian distintos periodos que se describen a continuación:

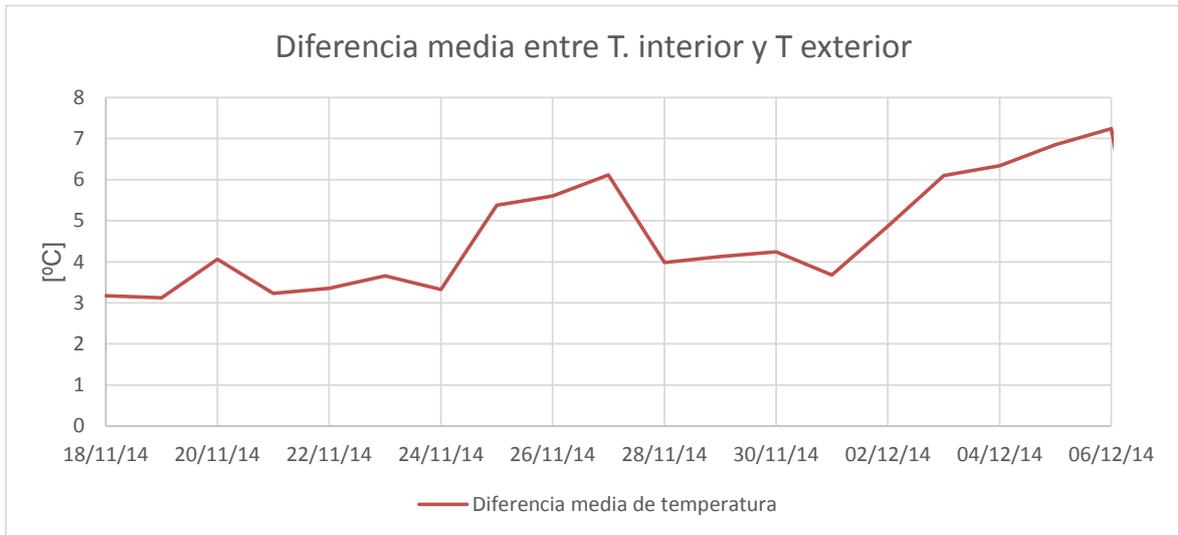


figura 47 Diferencia de temperatura media diaria entre el exterior y el interior de la caseta.

- Primer periodo (anterior al 24 de noviembre): La diferencia de temperaturas es de entre 3 y 4°C. En este periodo, la temperatura exterior es relativamente alta y la radiación solar baja.
- Periodo de transición (24 al 28 de noviembre): Las diferencia de temperaturas aumentan, sin embargo este aumento en la diferencia de temperaturas obedece únicamente a que la temperatura exterior desciende durante estos días y debido a la inercia térmica de la caseta, ésta presenta una diferencia de temperaturas mayores con el exterior. En otras palabras, la alta diferencia de temperaturas en este periodo no es debido ni al elemento Senhor, ni a ganancias de calor de ningún tipo, sino únicamente a la inercia térmica de la caseta.
- Periodo de estabilización (28 de noviembre al 01 de diciembre): en estos días, la temperatura exterior se estabiliza (a un valor más bajo que el que se tenía en el primer periodo) y la radiación solar es levemente superior, como resultado se observa que la diferencia entre la temperatura interior y exterior es levemente superior a la registrada en el primer periodo.
- Periodo de aumento de las ganancias solares (01 al 06 de diciembre): En este periodo la radiación solar aumenta a la par que la temperatura exterior desciende. Se observa claramente cómo la diferencia entre la temperatura interior de la caseta y el exterior crece. Este aumento de la diferencia de temperatura se debe a dos efectos: la inercia térmica, tal como en el periodo de transición y a las mayores ganancias solares que se presentan por los distintos elementos de la caseta. Tomando el comportamiento observado en la figura 46, se puede asegurar que el elemento Senhor, contribuye positivamente al incremento de esta diferencia de temperatura.

Las conclusiones de este modo de operación son:

- En periodos estables y con poca radiación solar, la temperatura media diaria de la caseta es entre 3 y 4°C superior a la media exterior.
- Cuando la radiación solar incidente sobre el muro Senhor es alta, la temperatura superficial de este elemento es de entre 0.5°C y 1°C superior a la de la media interior del aire y de las otras superficies.

## 5.1.2 Modo con circulación de aire

Estos ensayos se realizaron entre el 12-12-2014 y el 10-03-2015<sup>2</sup>. Este es el modo de operación nominal del elemento Sinhor en invierno. En este modo, el aire se calienta en la cámara exterior debido a la incidencia solar, este aire caliente es movido a la cámara interior en donde cede parte de este calor al muro interior, de tal manera que el calor se almacene en este elemento que lo cederá horas después en el interior del edificio. Cuando la radiación solar es insuficiente para calentar el aire de esta cámara, la circulación se detiene.

El movimiento del aire se produce por la acción de seis ventiladores situados en la parte superior de la fachada (los mismos ventiladores usados para régimen de verano) que presentaron un consumo medio de 110W cuando se encontraban en operación.

### 5.1.2.1 Variaciones realizadas en estas pruebas

En la figura 48, se muestra a modo ilustrativo, las evoluciones de las temperaturas interior y exterior durante el periodo de ensayos correspondientes a esta etapa.

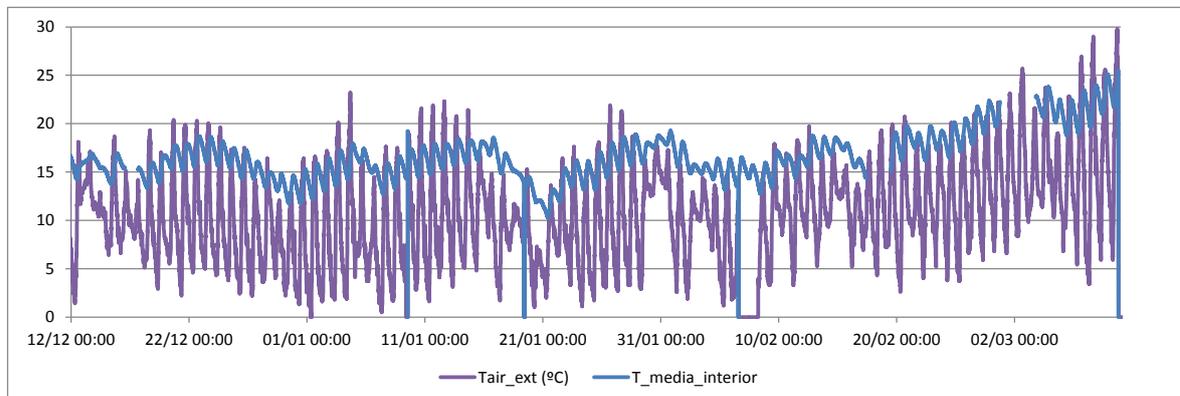


figura 48. Evolución de la temperatura interior durante el tiempo de operación del elemento Sinhor en modo invierno

Durante este periodo se ensayaron tres separaciones entre el elemento acristalado y la hoja exterior o elemento absorbente (figura 49 y figura 50), con el fin de determinar el efecto de esta variable en el desempeño del elemento.

- 7 cm de espesor, 12 dic 2014 a 10 ene 2015
- 21 cm de espesor, 10 ene 2015 a 20 ene 2015
- 43 cm de espesor, 20 ene 2015 a 28 feb 2015

<sup>2</sup> Ensayos con este modo de operación continuaron realizándose posteriormente, pero en este informe sólo se documenta hasta esta fecha debido a que los siguientes ensayos no aportaron información relevante al proyecto.

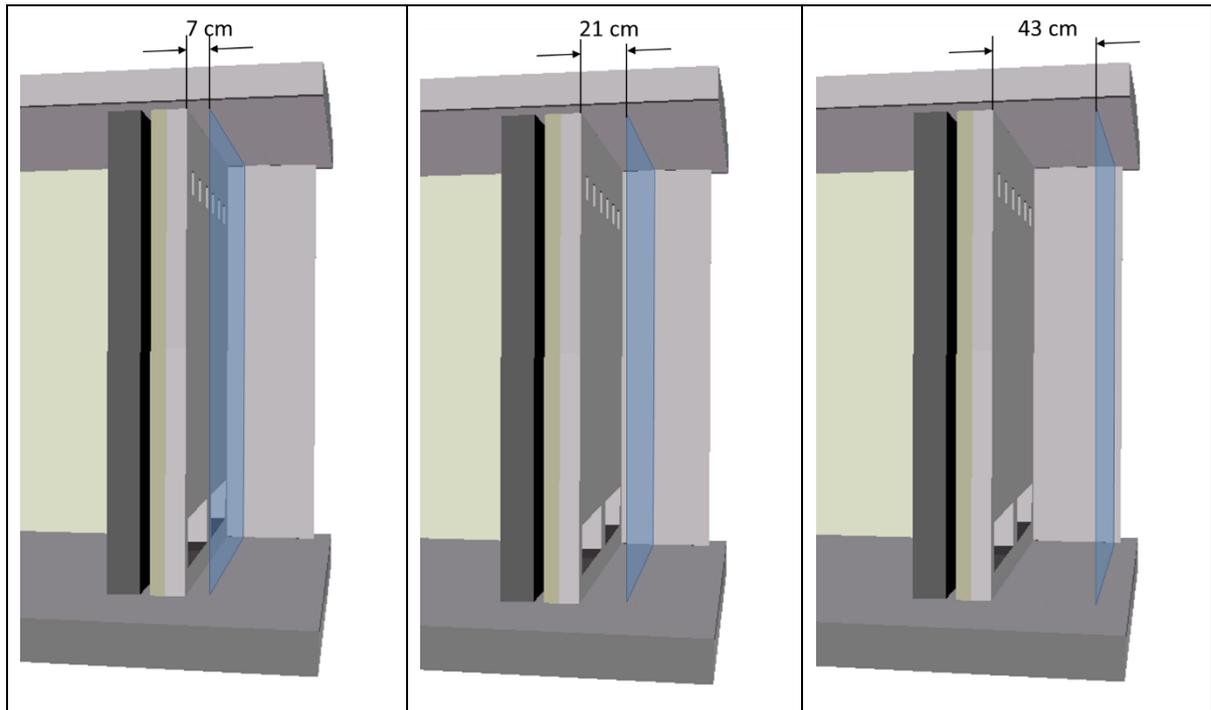


figura 49 Tres espesores de cámara exterior ensayados

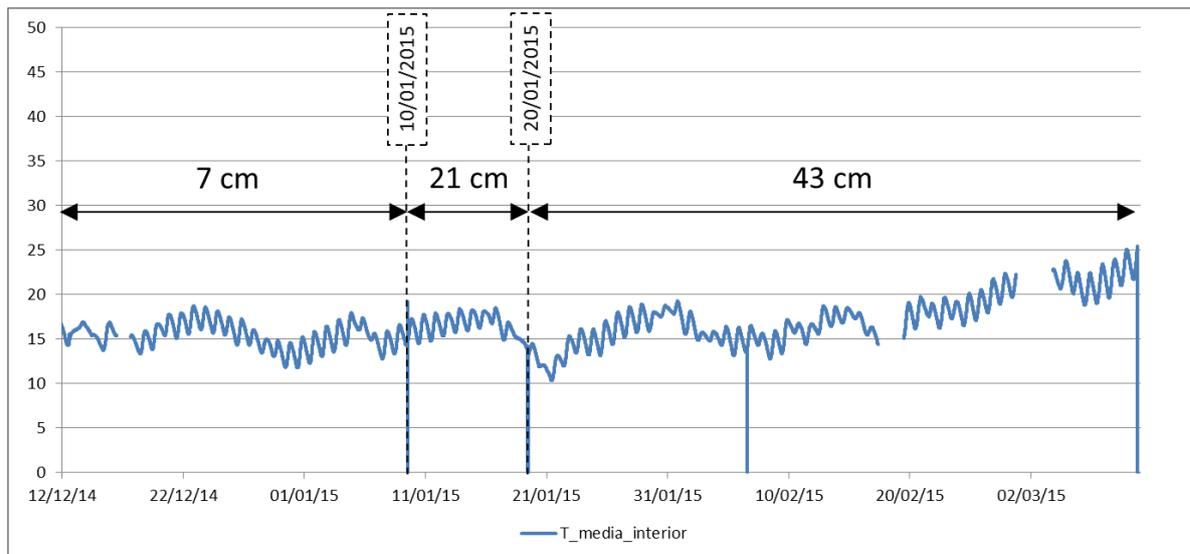


figura 50 Periodos de ensayo con cada uno de los espesores de la cámara exterior

Durante los ensayos realizados no se detectó una variación en el comportamiento del elemento Señor, por lo que en adelante no se hará referencia al espesor de la cámara para referenciar los resultados.

La activación y desactivación de la circulación de aire viene dada por los criterios que se establecen en el sistema de control. Se probaron dos estrategias:

- Estrategia 1: Se enciende la ventilación si la temperatura del aire de la cámara exterior es al menos 3°C mayor que la temperatura media del aire interior. La ventilación se apaga, si la temperatura de la cámara exterior es menos de 2.5°C mayor que la temperatura del aire interior de la caseta. Esta estrategia se utilizó entre el 12 y el 22 de diciembre de 2014.

- Estrategia 2: Se enciende la ventilación si la temperatura del aire de la cámara exterior es al menos 3°C mayor que la temperatura media de la superficie del elemento interior. La ventilación se apaga, si la temperatura de la cámara exterior es menos de 2.5°C mayor que la temperatura del aire interior de la caseta. Esta estrategia se utilizó a partir del 22 de diciembre de 2014.

El cambio de la estrategia 1 a la 2, es motivado por el hecho de haber detectado que de la primera forma, al final del periodo de operación de la ventilación, ya no se tenía un aporte calor al muro, sino que de hecho se retiraba, es decir, era el muro el elemento que aportaba calor al aire en circulación y no lo contrario como es lo deseado.

En la figura 51, se aprecia que en la operación con la estrategia 1, antes de que la ventilación se detenga, la temperatura del aire de las dos cámaras es inferior que la de la superficie interior del muro. Esto implica que el aire ya no le suministra calor al muro sino lo contrario. Con la estrategia de control 2, la ventilación se detiene antes de que la temperatura del aire de las cámaras llegue a ser inferior a la de la superficie interior. Esto representa un mejora en el modo de operación del elemento Senhor, más sin embargo, no garantiza completamente que al final del periodo de operación, no se esté presentando el fenómeno de que el aire tenga una temperatura inferior a la de la superficie exterior del muro.

Una ventaja adicional, y probablemente más importante, que se deriva del uso de la estrategia de control 2, es que el periodo de operación de la ventilación es menor y por tanto menor será el consumo energético de los ventiladores.

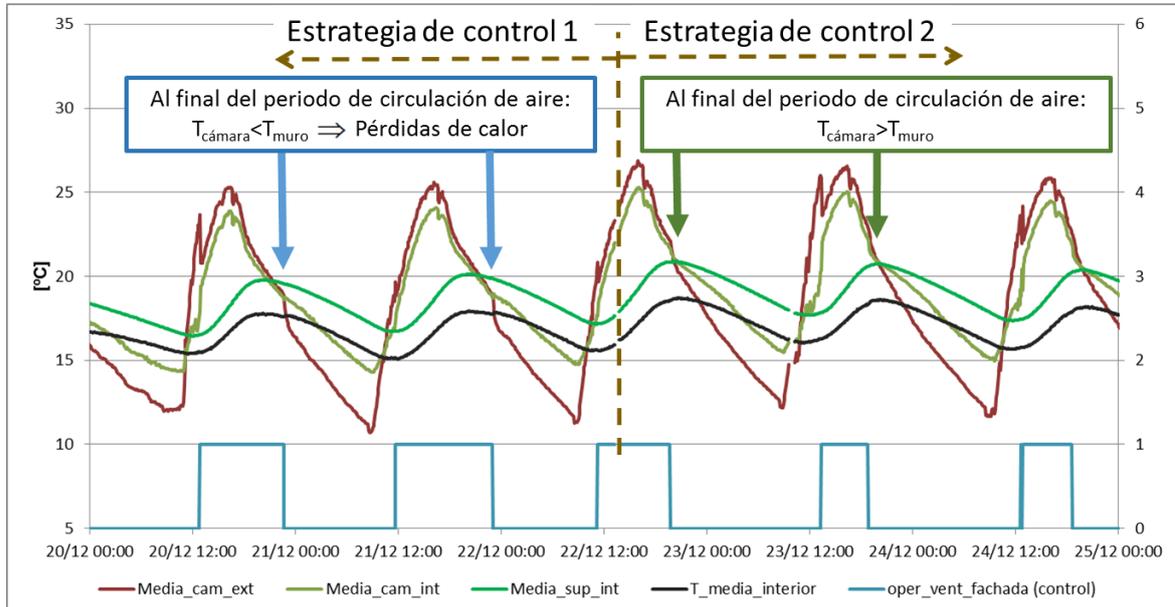


figura 51. Temperaturas medias de las dos cámaras de aire, de la superficie interior del elemento Senhor y del aire interior. Se ilustran los motivos por los cuales se cambió de la estrategia de control 1 a la estrategia 2.

### 5.1.2.2 Descripción del comportamiento horario del elemento Sinhor

Con el objetivo de ilustrar el comportamiento de las temperaturas del elemento Sinhor durante este periodo, se muestra en la figura 52, una serie de días en los que hay un periodo con baja radiación solar (02-feb-2015 a 04-feb-2015), con otros días de alta radiación solar.

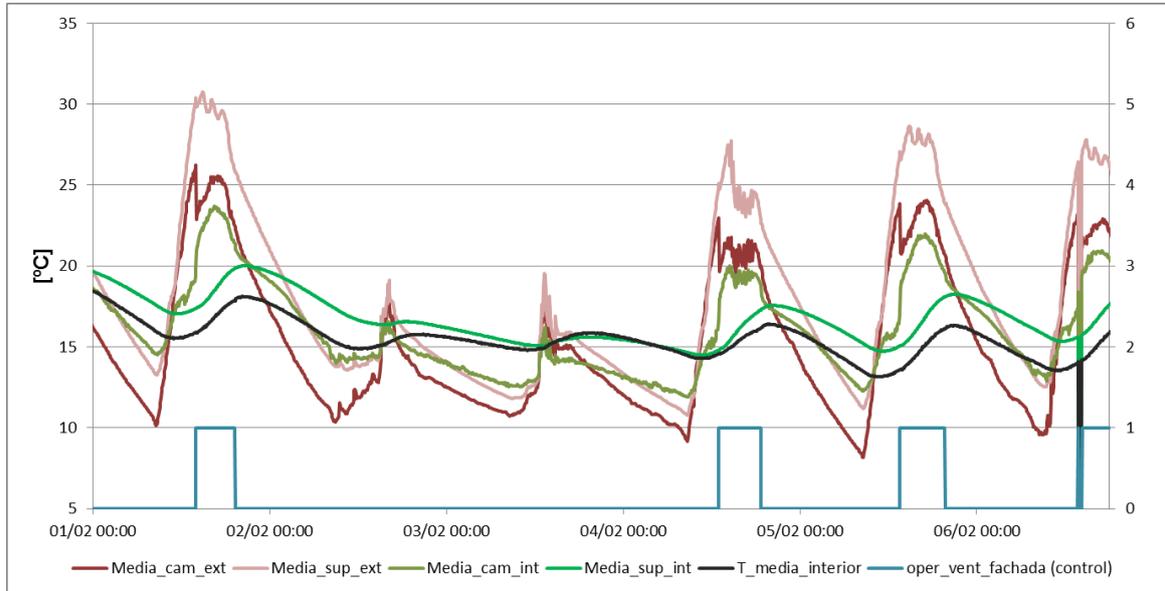


figura 52 Comportamiento típico de las temperaturas en el elemento Sinhor

Se observa que los dos días con baja radiación solar, la circulación de aire no se activa, debido a que la temperatura en la cámara exterior no consigue los valores mínimos necesarios para la entrada en operación de los ventiladores.

Por otro lado, la superficie exterior es la que obtiene los valores máximos de temperatura, tal como era de esperar debido a que es sobre esta superficie donde incide la radiación solar y es la encargada de calentar el aire de cámara exterior, que es la que está en segundo lugar desde el punto de vista de valores máximos de temperatura. Es también esta temperatura, la que alcanza los valores mínimos, debido a que está separada del exterior únicamente por el cristal, de tal manera que durante la noche este aire pierde calor al exterior. También resulta interesante observar que cuando arrancan los ventiladores, la temperatura del aire de la cámara desciende bruscamente algunos grados. La razón es que entra aire a más baja temperatura proveniente de la cámara interior. Este comportamiento indica que se está tomando calor de la cámara exterior para llevarlo al interior.

Se aprecia, también, que la temperatura de la cámara interior sigue a la de la exterior, con unos grados menos, cuando se encuentra encendida la circulación de aire, y se pierde este acople cuando se apaga la circulación. Esto es debido a que el aire de cada una de las cámaras queda aislado en buena medida uno del otro. Es este el motivo por el cual la temperatura de la cámara interior no desciende en la misma magnitud que el de la cámara exterior.

Otra observación importante, es que en los días en los que hay radiación solar, la temperatura de la superficie interior del elemento Sinhor, se mantiene unos dos grados Celsius por encima de la media interior, durante las 24 horas y no únicamente durante el día, lo cual quiere decir que se presenta un aporte de calor continuo durante el día y la noche.

Cuando no ya suficiente radiación solar, la diferencia de temperatura entre la superficie interior del elemento Sinhor y el aire interior desciende paulatinamente, hasta que en el segundo día estas dos temperaturas se igualan aproximadamente. Esto indica que el elemento Sinhor, gracias a su inercia térmica, puede suministrar una pequeña cantidad de calor en un día nublado, con la única condición de que en el día anterior sí haya habido radiación solar.

### 5.1.2.3 *Análisis global del desempeño del elemento Sinhor*

Para hacer un análisis global de los ensayos realizados, al igual que en el caso del modo de operación sin circulación de aire, los resultados en esta fase se mostrarán en términos de temperaturas medias diarias debido a que de esta forma resulta más fácil la comprensión de los mismos.

Las excitaciones exteriores (temperatura del aire exterior, radiación solar sobre superficie horizontal y radiación solar sobre superficie sur) a las que se vio sometido el elemento Sinhor y la caseta de ensayo durante este periodo de experimentos se muestran en la figura 53.

Se puede apreciar que desde el inicio de operación en este modo, la temperatura media exterior se mantuvo en torno a 10°C y sólo al final del periodo (desde el 25 de febrero aproximadamente) se aprecia un incremento de la temperatura exterior.

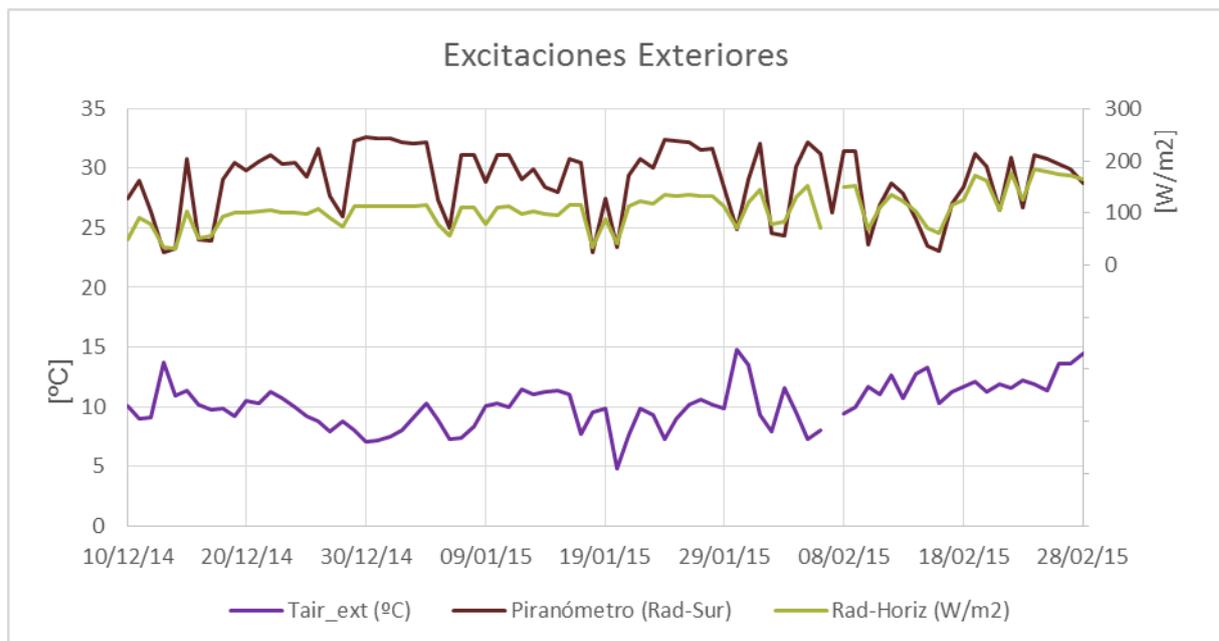


figura 53 *Excitaciones exteriores durante el periodo de ensayos del elemento Sinhor en modo de invierno, con circulación de aire.*

La temperatura interior media diaria coincide casi perfectamente con la media de las superficies interiores tal como se muestra en la figura 54. Este mismo comportamiento se observó en el modo de operación sin ventilación (figura 45), lo que sugiere una baja transferencia de calor neta entre la envuelta y el aire interior.

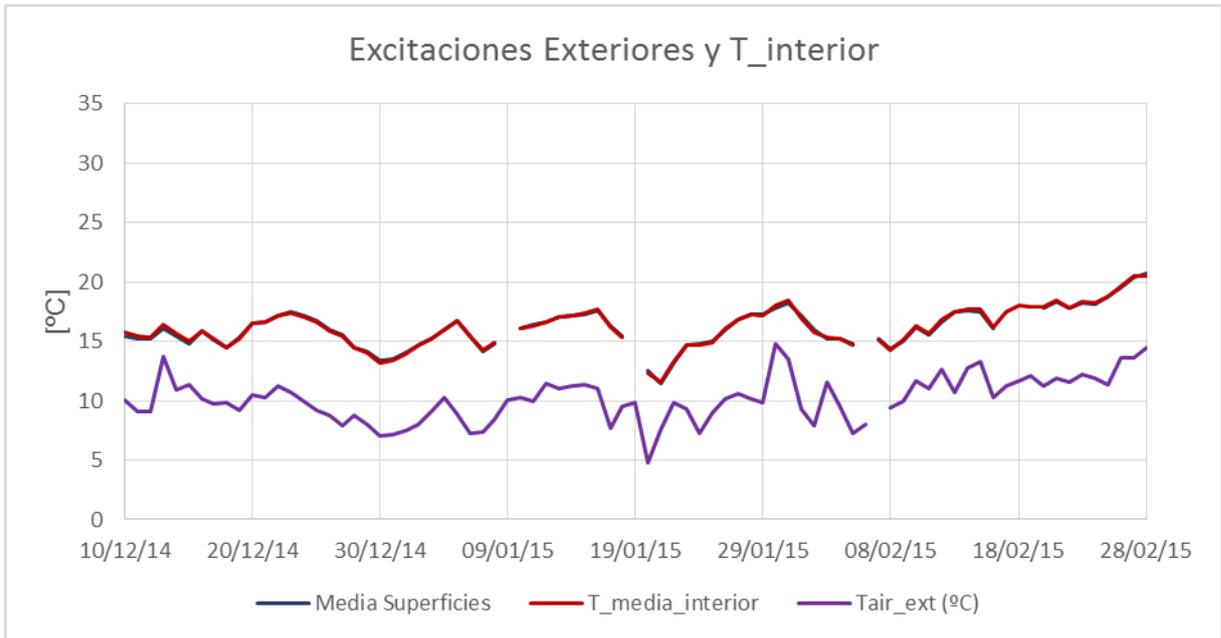


figura 54 Temperaturas medias diarias de: superficies interiores, aire interior y aire exterior.

El aporte de calor del elemento Senhor al interior se puede evidenciar por la diferencia de temperatura entre la superficie de este elemento y el aire interior. La figura 55 muestra que la temperatura del elemento Senhor tiene un temperatura media que es siempre superior o igual a la media del aire interior, con lo que se puede afirmar que se presenta una aporte de calor o como mínimo un comportamiento neutro, es decir, que no presenta pérdidas de calor.

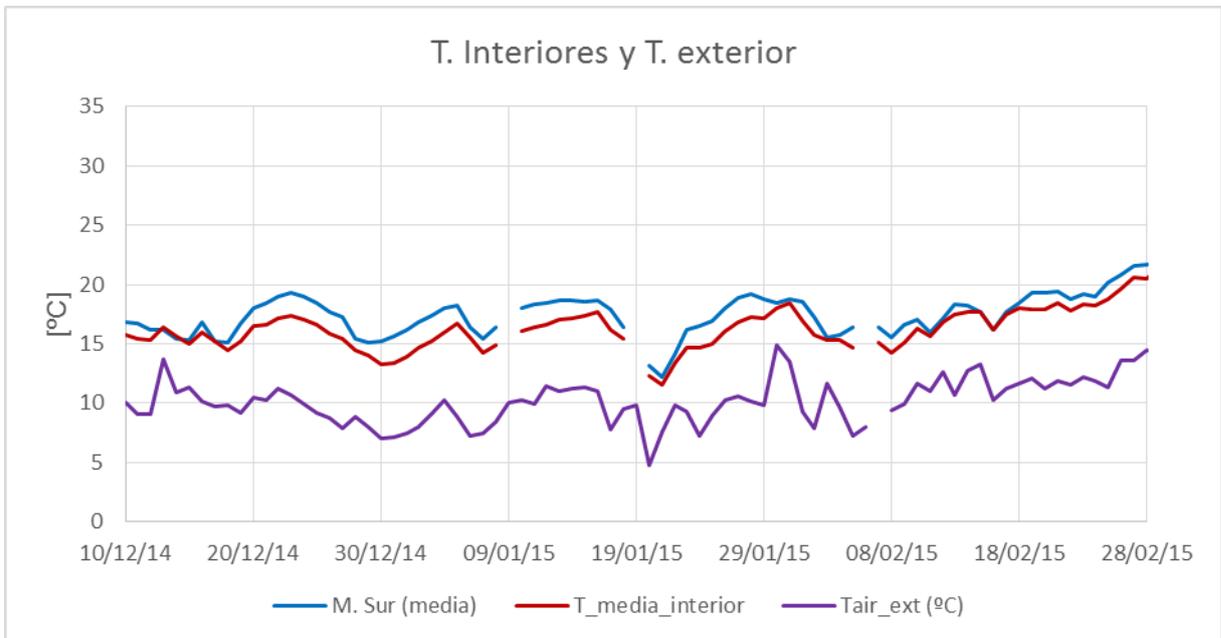


figura 55 Temperaturas medias diarias de: superficies sur interior (Sinhor), aire interior y aire exterior

La diferencia de temperatura entre la superficie interior del elemento Senhor y el interior de la caseta se muestra en la figura 56. Para explicar las variaciones de esta diferencia de temperatura, se compara este comportamiento con el de la radiación sur. Se observa que existe concordancia entre

estas dos variables, es decir, que cuando la radiación solar es alta, la diferencia de temperatura también lo es y cuando la radiación es baja, la diferencia de temperatura también es baja. Existe un desfase aproximado de un día entre las dos curvas, esto quiere decir, que los efectos de la radiación sobre la temperatura interior están retrasado casi un día.

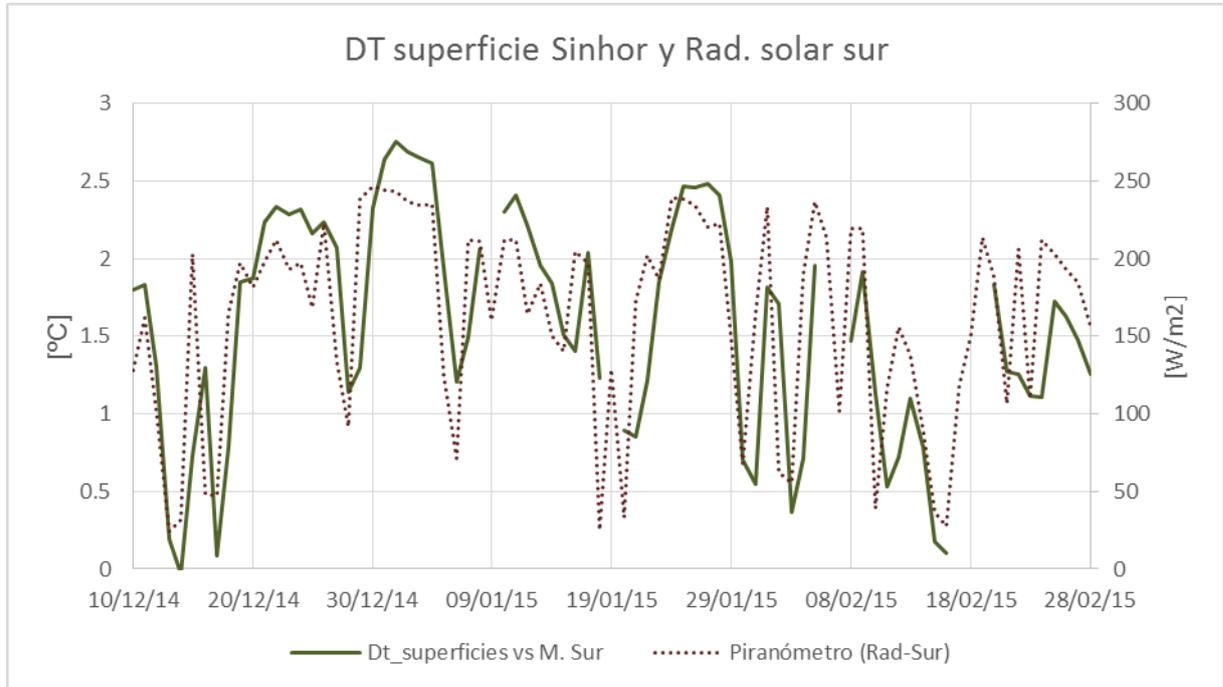


figura 56 Diferencia de temperatura entre la superficie del elemento Senhor y el aire interior, y Radiación Solar sobre superficie sur

La diferencia media de temperatura entre el elemento Senhor y el aire interior durante todo el periodo de cálculo es un poco mayor a 1.5°C, aunque cuando se presenta varios días claros, la diferencia puede subir a un poco más de 2.5°C

Finalmente, la diferencia media de temperaturas entre el interior y el exterior se muestra en la figura 57. El valor medio para todo el periodo de experimentación es aproximadamente 6°C con oscilaciones dentro del rango de 3° a 8°C. Se puede decir, que la caseta se encuentra de media, seis grados Celsius más caliente que el exterior.

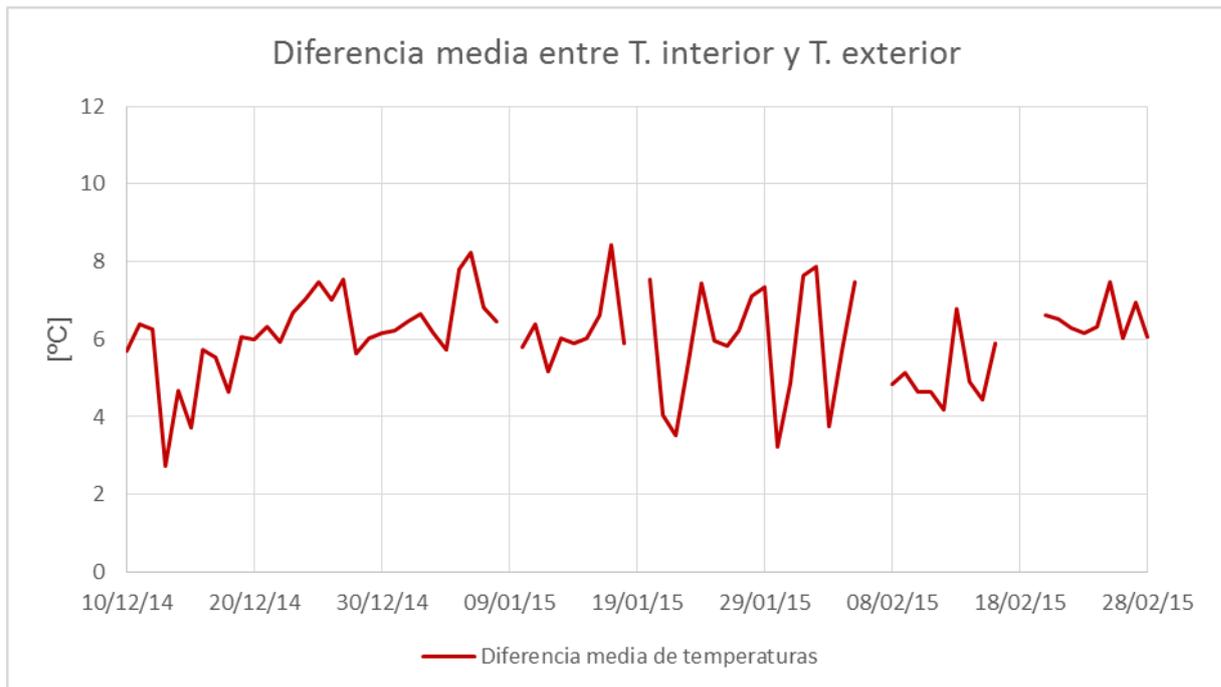


figura 57 Diferencia media de temperatura entre el interior de la caseta y el exterior

La comparación de este último resultado con el obtenido en el modo de operación sin circulación de aire, muestra que la diferencia de temperatura media de la caseta con respecto al exterior ha aumentado de 4°C (caso sin circulación de aire) a 6°C, es decir 2°C de aumento que es un valor similar a la diferencia de temperatura entre la superficie del elemento Sinhör y el aire interior.

Una estimación del calor medio que aporta el elemento Sinhör a la caseta en un día es el siguiente:

$$Q = A \cdot h(\Delta T_{sup-air}) \cdot t$$

Donde:

- Q Calor medio aportado por el elemento sinhör en un periodo de 24 horas
- A Área del elemento sinhör ( $A = 7 \text{ m}^2$ )
- h Coeficiente de película interior ( $h \approx 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- $\Delta T_{sup-air}$  Diferencia de temperatura entre superficie y aire ( $\Delta T_{sup-air} \approx 2^\circ\text{C}$ )
- t tiempo en segundos de un día ( $t = 86400\text{s}$ )

Se obtiene que el calor medio suministrado es 0.67 kWh al día.

Por otro lado, los ventiladores operan una media de 5 horas al día consumiendo aproximadamente 0.55 kWh al día.

El COP del muro Sinhör es aproximadamente 1.22.

Este valor de COP es bajo debido al consumo de los ventiladores. Existen en el mercado ventiladores de alta eficiencia que pueden realizar el mismo trabajo que los ventiladores actuales consumiendo entre 7 y 10 veces menos, con lo que es posible incrementar el valor de rendimiento del muro sensiblemente.

#### 5.1.2.4 Conclusiones de la operación en modo invierno

Las conclusiones de este modo de operación son:

- Es más adecuada una estrategia de control que tenga como referencia a la temperatura superficial del elemento Senhor, que una en la que la referencia sea la temperatura interior. Aun así, es de esperar que una estrategia en la que se tome la temperatura del elemento o muro interior en la cara que da a la cámara de aire interior, sería aún más adecuada debido a que se podría determinar claramente el momento en el que se está aportando calor al muro.
- La diferencia de temperatura entre el interior de la caseta y la superficie del elemento Senhor es aproximadamente proporcional, con un desfase aproximado de 1 día, a la radiación solar incidente sobre la fachada.
- La temperatura de la superficie interior del elemento Senhor se mantiene cerca de 2°C superior a la del interior de la caseta en días claros.
- La anterior diferencia de temperatura se mantienen aproximadamente constante durante 24 horas.
- La diferencia de temperaturas disminuye paulatinamente si la radiación solar es baja llegando a ser nula si la situación de baja radiación solar se prolonga por más de dos días
- La temperatura media diaria de la caseta se mantiene aproximadamente 6°C por encima de la media exterior.
- El incremento de temperatura interior por efecto de la operación del elemento Senhor se estima en 2°C.
- Es imprescindible que en una aplicación real, se utilicen ventiladores de alta eficiencia.

## 5.2 SENSORIZACION

En esta etapa de experimentos se utilizan los mismos instrumentos de medida y sistemas de adquisición de datos descritos en la sección 4.2.

Las únicas novedades son los sensores de temperatura que se instalan en la cámara exterior y la superficie exterior (superficie soleada).

Los nuevos puntos de medida se ubicaron en dos líneas imaginarias, una alineada con la corriente de aire y otra en la zona de remanso tal como puede verse en la figura 58 y en la figura 59

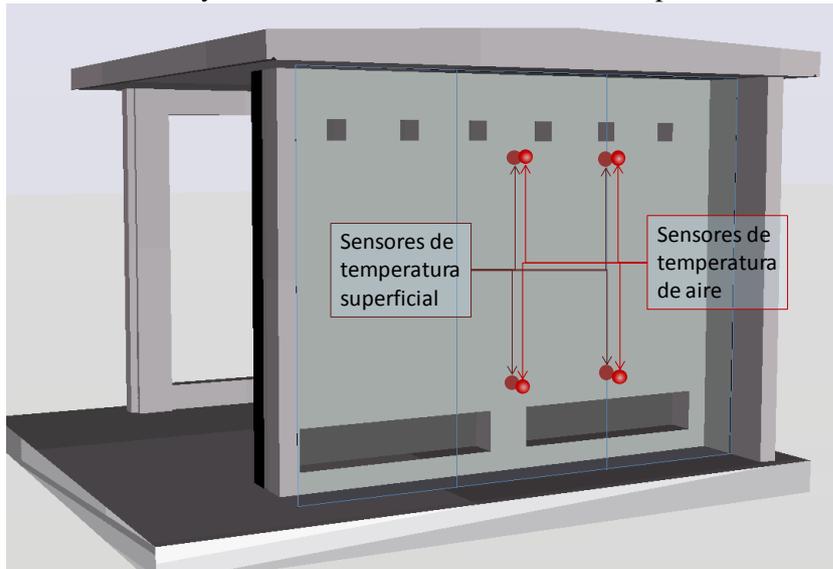


figura 58. Esquema de la posición de los sensores de temperatura en la cámara de aire exterior para el elemento sinhor en modo de invierno



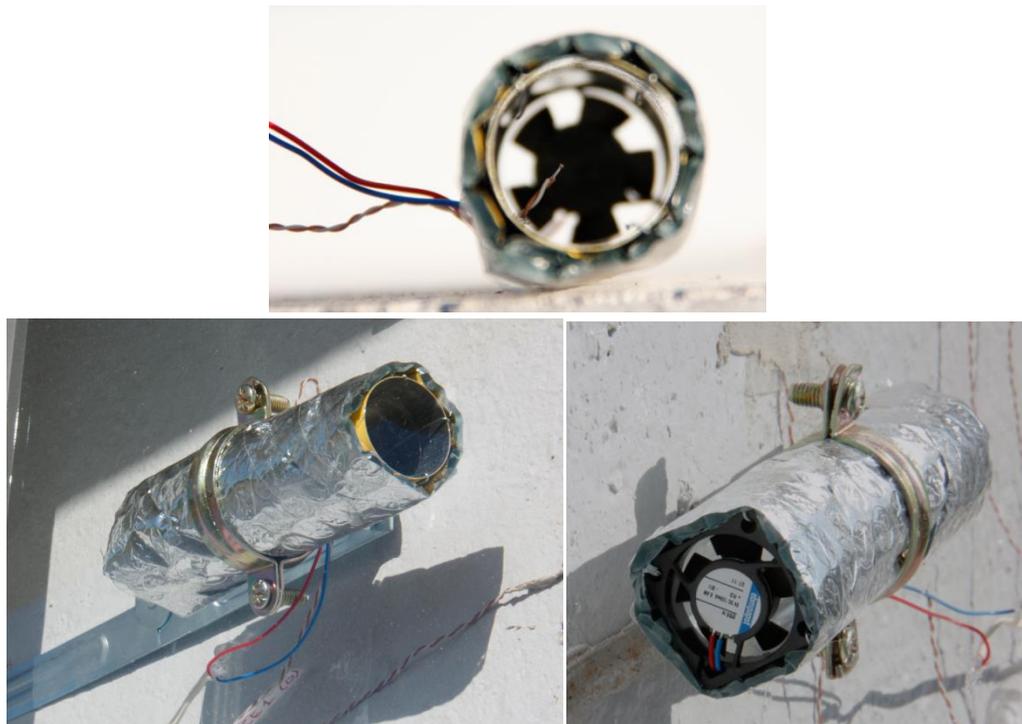
figura 59 Vista del elemnto sinhor configurado en modo invierno, Se pueden ver los puntos de media de temperatura

Se tienen en total 8 sensores de temperatura en la cámara de aire:

- 4 sensores de temperatura de aire para registrar la temperatura de entrada y la de salida de la cámara.

- 4 sensores de temperatura superficial en las “mismas posiciones que los de temperatura de aire”

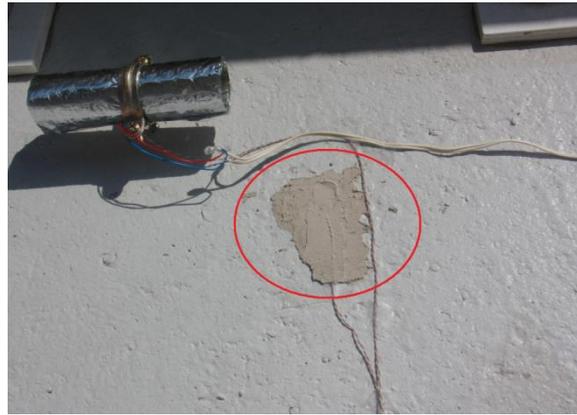
Los sensores de temperatura para el aire en la cámara se muestran en la figura 60. Se trata de termopares tipo T confinados en el interior de un tubo aislado con una superficie bajo emisiva, abierto por sus dos extremos y dotados con unos ventiladores colocados en un extremo de los mismos para promover un flujo de aire. Se consigue de esta manera que la radiación sea despreciable en la toma de la medida de temperatura.



*figura 60 Dispositivo para la medición de la temperatura del aire de la cámara exterior*

La medición de las temperaturas superficiales se realizó con termopares debido a que gracias a su reducido tamaño, éstos podían adherirse adecuadamente a la superficie de tal manera que su temperatura se igualaba la de la superficie y esta no se veía afectada por el sensor.

Consideración especial requiere la medición de la temperatura superficial de la cámara exterior, dado que se ve expuesta a la radiación solar, esto hace que el sensor debe ser protegido para que la radiación solar no lo afecte directamente, pero por otro lado, es importante que la protección que se haga del sensor no afecte a la temperatura del muro, esto implica que dicha protección debe tener las mismas propiedades que el hormigón, en particular aquellas relacionadas con las del intercambio radiante en la longitud de onda visible. El color es una propiedad que está directamente relacionada con esas propiedades, por tal motivo, la protección utilizada para los sensores de temperatura fue masilla de color aproximadamente igual al hormigón tal como se muestra en la figura 61.



*figura 61 Sensor de temperatura superficial de la hoja exterior de hormigón*

## 6 VALIDACIÓN

El modelo de simulación del comportamiento térmico de la fachada ventilada activa de hormigón, ha sido objeto de comprobación a partir de los resultados experimentales. Las primeras verificaciones realizadas fueron las concernientes a las principales hipótesis del modelo:

Hipótesis del modelo	¿Se acepta la hipótesis?
Temperaturas de las superficies uniformes	Si
Temperatura del aire variable en dirección vertical y constante en sentido horizontal	Si
Fuerzas de flotación despreciables cuando ventiladores apagados	No
Cámara estanca cuando ventiladores apagados	No
Flujo de aire constante y uniforme cuando funcionan los ventiladores	Si

Debido a que las fuerzas de flotación se han evidenciado no despreciables y a que la cámara de aire no es estanca cuando los ventiladores no funcionan, ha sido necesario aceptar cierto flujo de aire bajo esta condición. Este flujo de aire es variable y dependiente no sólo de las fuerzas de flotación sino del viento incidente sobre la fachada.

Lo anterior se encontró cuando se realizaron mediciones de la velocidad del aire dentro de la cámara con los ventiladores apagados. Los resultados de estas mediciones mostraron valores que oscilaban cerca del valor de 0.1 m/s. Esta medida, se realizó de manera puntual bajo unas condiciones específicas. El valor de este flujo que mejor ajusta los resultados del modelo corresponde a una velocidad de 0.05 m/s, no obstante, valores de 0.1 m/s no producen una variación importante en los resultados del modelo. Esto quiere decir, que es posible que el valor medio del flujo real no sea el de 0.05 m/s, pero sí es probable, que la media de dicho flujo, se encuentre entre el valor registrado en la medición y el que mejor ajusta al modelo.

Los pasos siguientes para la validación fueron los siguientes:

- Establecimiento de las condiciones de contorno
- Propiedades de los materiales
- Ajuste de parámetros y variables del modelo

Cada uno de los anteriores pasos es objeto de un apartado específico y que se enumeran a continuación.

### 6.1 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que afectan al modelo son:

- Temperatura del aire exterior
- Temperatura radiante exterior
- Radiación solar
- Temperatura del aire interior
- Temperatura media radiante interior

A continuación se trata cada uno de los anteriores puntos.

### 6.1.1 Temperatura de aire exterior

La temperatura del aire exterior se registró con el sensor de la estación meteorológica instalada en la caseta y un sensor propio instalado en la caseta. Los valores registrados por estos sensores se sometieron a verificación a partir de los obtenidos con las estaciones meteorológicas de la “Rinconada2 y del “Aeropuerto de Sevilla”.

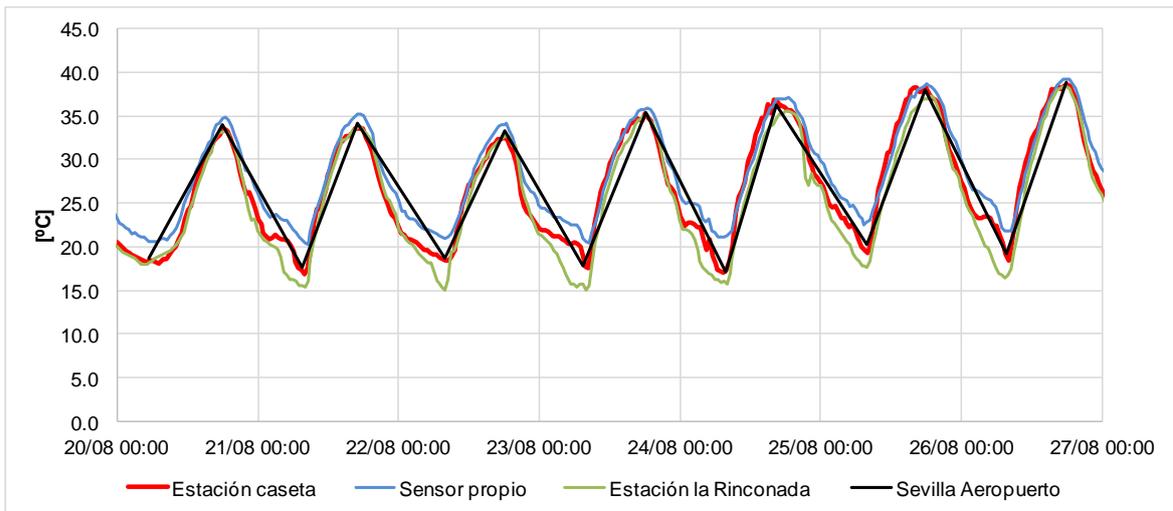


figura 62 Temperaturas de aire exterior registradas por distintas fuentes

Los resultados de estas mediciones se enseñan en la figura 62. Se aprecia que los valores máximos registrados por las tres estaciones meteorológicas coincide con una diferencia despreciable. Las temperaturas mínimas de la estación del aeropuerto (que es la más cercana a la caseta) y la de la estación de la caseta coinciden.

Con esta observación se decide aceptar la temperatura de aire registrada por la estación meteorológica de la caseta, como la correcta.

### 6.1.2 Temperatura radiante exterior

La temperatura radiante exterior es una temperatura media de todas las superficies que rodean a la fachada y una temperatura equivalente de cielo. Esta temperatura media está ponderada por el factor de forma de cada una de las superficies que la rodean. En este caso sólo se considera el suelo y el cielo, cada uno con un factor de forma de 0.5

$$T_{rde} = f_{1,2} T_{suelo} + f_{1,3} T_{cielo}$$

Donde:  $f_{1,2} = f_{1,3} = 0.5$  son los factores de forma fachada-suelo y fachada-cielo respectivamente

La temperatura del suelo se ha considerado igual a la temperatura del aire exterior y la temperatura de cielo se calcula según el procedimiento propuesto por Aubinet (1994)<sup>3</sup>

$$T_{\text{cielo}} = 94 + 12.6 * \ln(P_{\text{vapor}}) - 13 \cdot k_0 + 0.341 T_{\text{air}}$$

Donde:

$P_{\text{vapor}}$  Es la presión parcial del vapor de agua que puede ser decidida a partir de los datos de humedad relativa y temperatura de aire registrados por la estación meteorológica.

$k_0$  Es un factor de claridad del cielo y se calcula como la relación entre la radiación solar global medida y la radiación extraterrestre en un plano paralelo a la superficie del suelo en la posición que se está evaluando.

$T_{\text{air}}$  Es la temperatura del aire en [K]

### 6.1.3 Radiación solar

Aunque se instaló un sensor de radiación (piranómetro) orientado al sur, es decir, con la misma orientación que la fachada activa, no es posible utilizar directamente el dato medido, debido a que la caseta tiene un voladizo y unos laterales que generan sombra sobre la fachada. Por lo tanto se debe determinar un factor de sombras para modificar el dato medido.



Figura 63. Sombras producidas sobre la fachada. En los dos casos se tienen días claros y sin embargo la fachada se encuentra parcialmente o incluso totalmente sombreada.

El primer paso consiste en averiguar la reflectividad del terreno. Para ello se buscan días en los que la radiación global horizontal sea muy cercana a la radiación teórica. Revisando los datos se encuentra que es posible usar los datos de los días 7, 8 y 9 de Julio (figura 64).

<sup>3</sup> Aubinet, Marc, Longwave sky radiation parametrizations, Solar Energy, Volume 53, Issue 2, August 1994, Pages 147–154

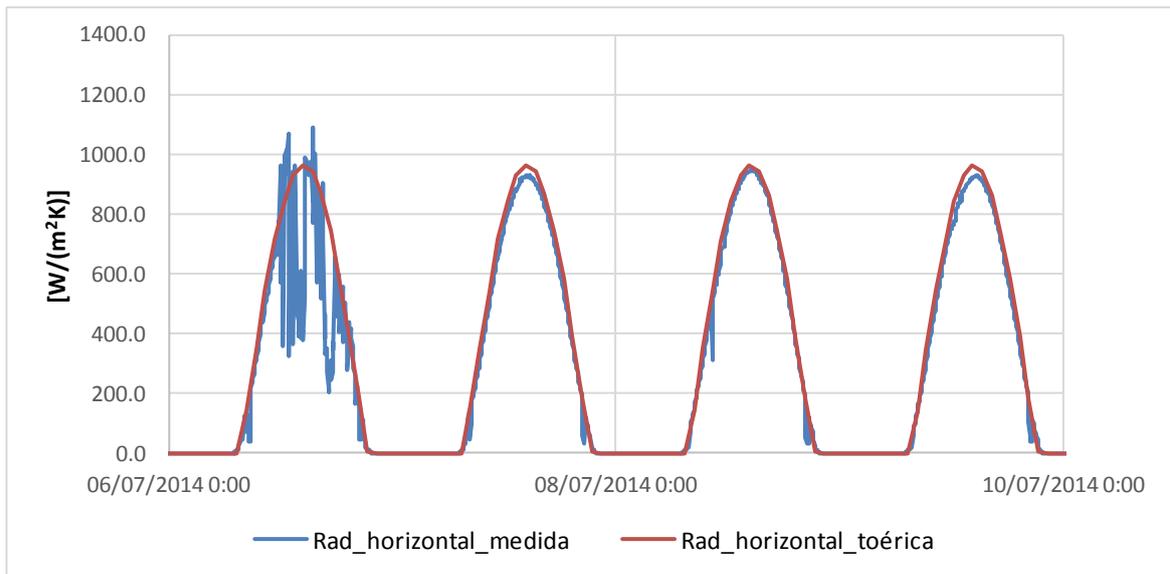


figura 64. Días en los que la radiación global horizontal medida es muy cercana a la radiación teórica

En un día de radiación teórica, si se conoce la reflectividad del terreno, es posible calcular la radiación difusa (difusa del cielo más la reflejada del terreno) que incide sobre una superficie vertical. Para ello existen varios modelos, como por ejemplo el presentado en ASHRAE FUNDAMENTALS<sup>4</sup>.

En este caso, no es la reflectividad del terreno lo que se conoce, sino la radiación difusa para algunas horas de un día con radiación teórica. Por tanto, haciendo el análisis inverso, es posible conocer la reflectividad del terreno a partir del dato conocido de radiación difusa.

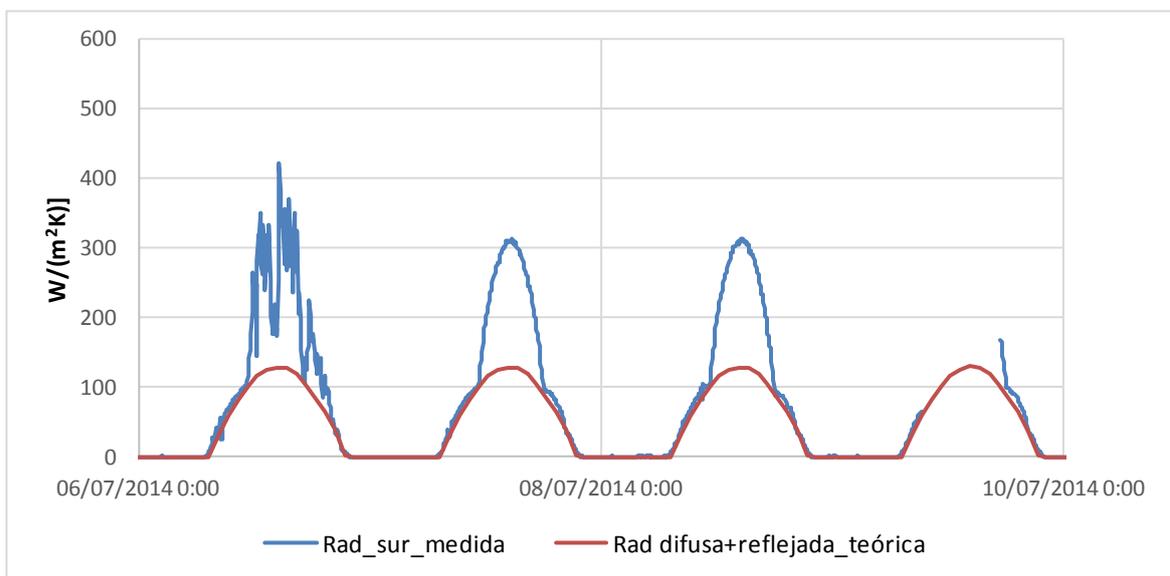


figura 65. Radiación difusa medida (primeras y últimas horas del día) y radiación difusa teórica incidente sobre una superficie vertical orientada al sur, con una reflectividad del terreno de 0.12

La figura 65 muestra la radiación solar medida por el piranómetro orientado al sur y la radiación teórica para un reflectividad del terreno de 0.12. Se aprecia que para las primeras y últimas horas de día, horas en las cuales no incide radiación directa sobre una superficie sur, el grado de ajuste

<sup>4</sup> ASHRAE Fundamental Handbook; ASHRAE: Atlanta, GA, 1981, 1997

entre el valor teórico y el medido es alto. Por tanto, se acepta el valor de 0.12 como valor “cierto” de reflectividad del terreno.

El sombreado que se produce se puede dividir en dos componentes: Sombras de radiación directa y sombras de radiación difusa. A continuación se enseñan los resultados para cada una de estas componentes.

### 6.1.4 Factor de sombra de la radiación directa $f_{sD}$

Para conocer las sombras generadas sobre la fachada, sólo es necesario conocer la posición solar y la geometría de los elementos que producen las sombras.

La posición solar, relativa a la fachada se determina por medio de las siguientes expresiones:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta$$

$$\cos \phi = \frac{\sin \beta \sin L - \sin \delta}{\cos \beta \cos L}$$

Donde:

$L$  es la latitud

$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360(284 + n)}{365} \right]$  es el ángulo de declinación, siendo “n” el día del año

$H$  es la hora solar aparente en términos de ángulo

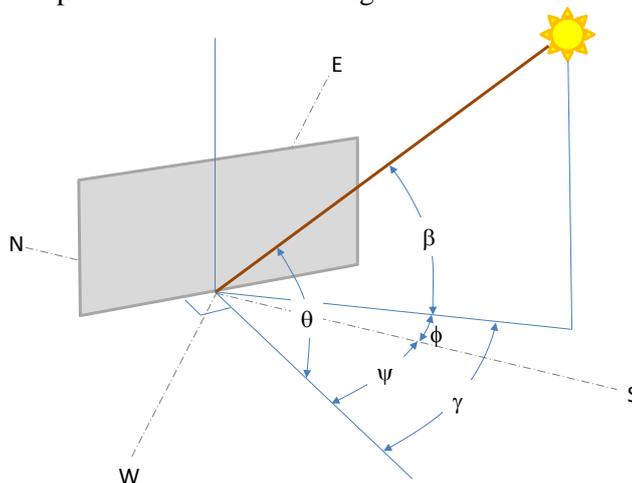


figura 66 Principales ángulos de posición solar para una superficie vertical

El ángulo de incidencia sobre la superficie vertical es:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma$$

De tal manera que las sombras generadas por lo laterales se puede calcular con:

$$S_{lateral} = L_{lateral} \tan(\psi + \phi)$$

Y la sombra proyectada por el voladizo será:

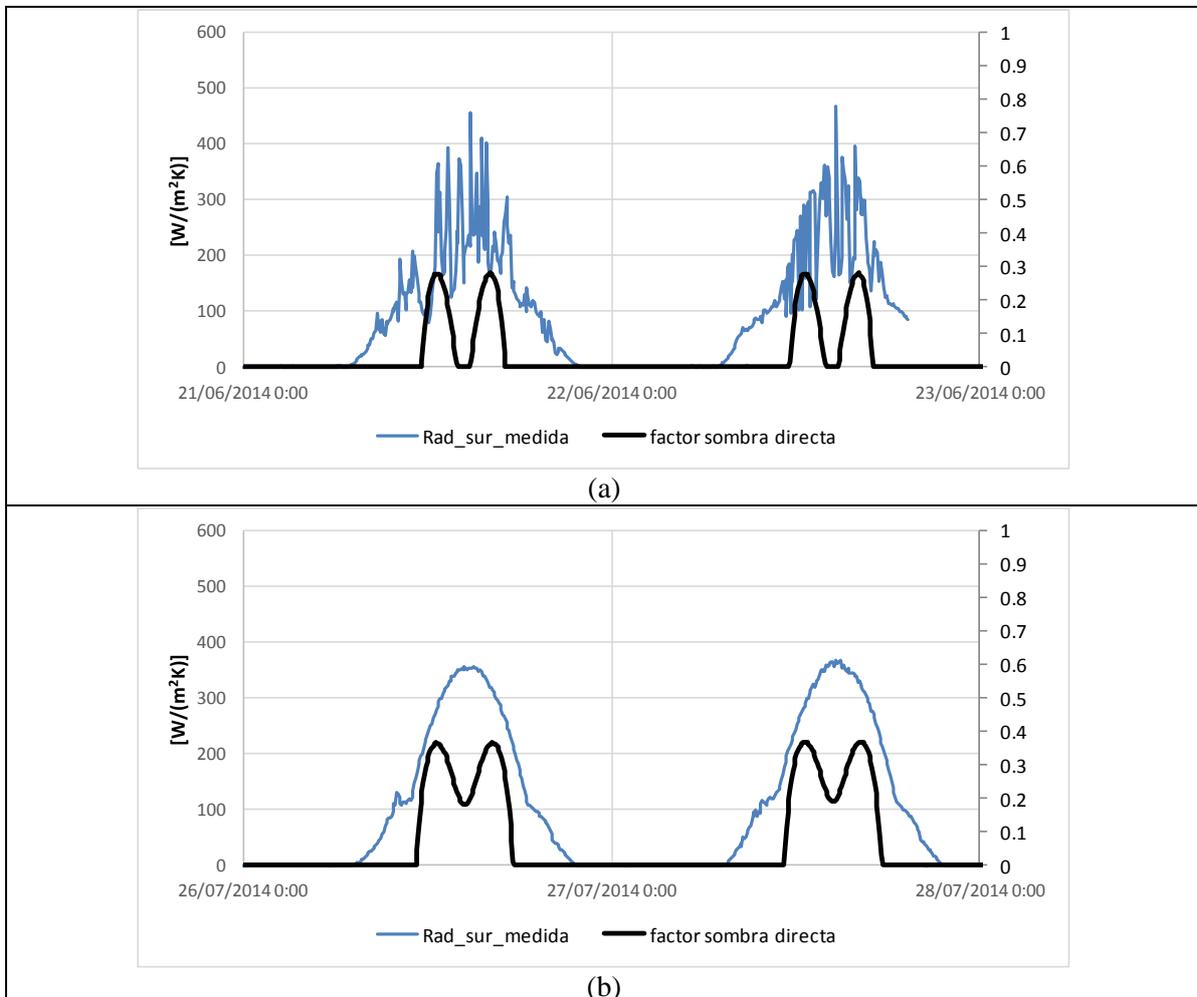
$$S_{voladizo} = L_{voladizo} \tan \beta$$

La fracción de muro iluminada será

$$A_{iluminada} = (W_{fachada} - S_{lateral})(H_{fachada} - S_{voladizo})$$

Y por tanto el factor de sombras para la radiación directa es:

$$f_{sD} = \frac{A_{iluminada}}{A_{fachada}} = \frac{(W_{fachada} - S_{lateral})(H_{fachada} - S_{voladizo})}{W_{fachada} \cdot H_{fachada}}$$



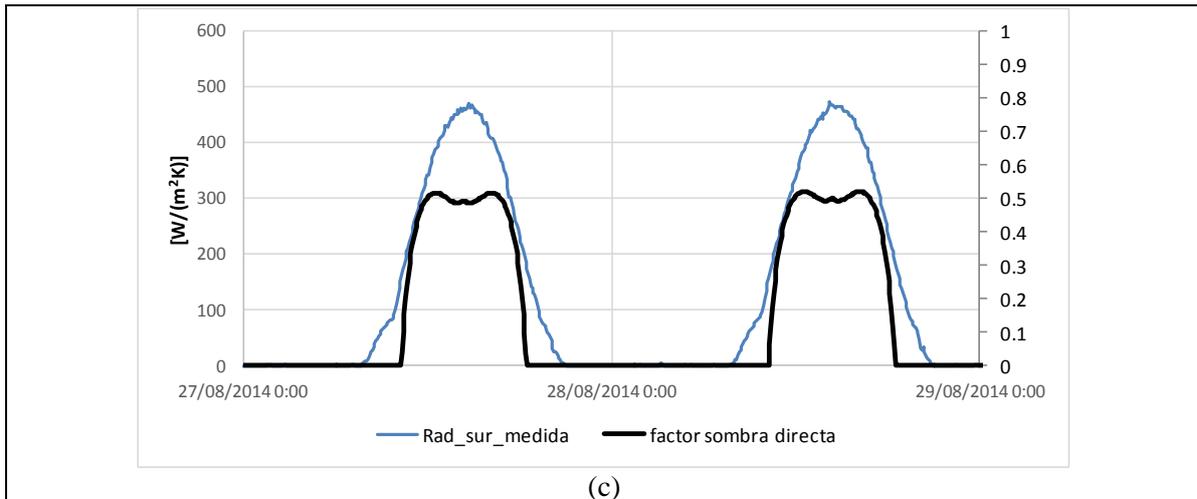


figura 67. Comportamiento del factor de sombras de la radiación directa en distintas fechas

La figura 67 muestra el comportamiento del factor de sombras de la radiación directa para la fachada de estudio. Se aprecia cómo para los días próximos al solsticio de verano, la radiación solar directa que incide en la fachada está fuertemente reducida, siendo nula para las primeras y últimas horas del día como consecuencia de los salientes laterales, al igual que será nula en las horas centrales del día como consecuencia del voladizo del techo. A medida que la fecha se aleja del solsticio de verano, el factor de sombras crece.

### 6.1.5 Factor de sombra de la radiación difusa $f_{sd}$

Los voladizos y los laterales también producen una reducción de iluminación difusa que es proporcional al factor de sombra entre la fachada y dichos elementos. En la figura 68 se aprecia el leve sombreado que general los laterales y el voladizo sobre la fachada.



figura 68 Sombreamiento de la radiación difusa. En la foto se puede apreciar, cómo, los laterales y el voladizo producen una ligera sombra sobre la fachada

Los factores de forma se pueden calcular analíticamente o gráficamente tal como se muestra en la figura siguiente:

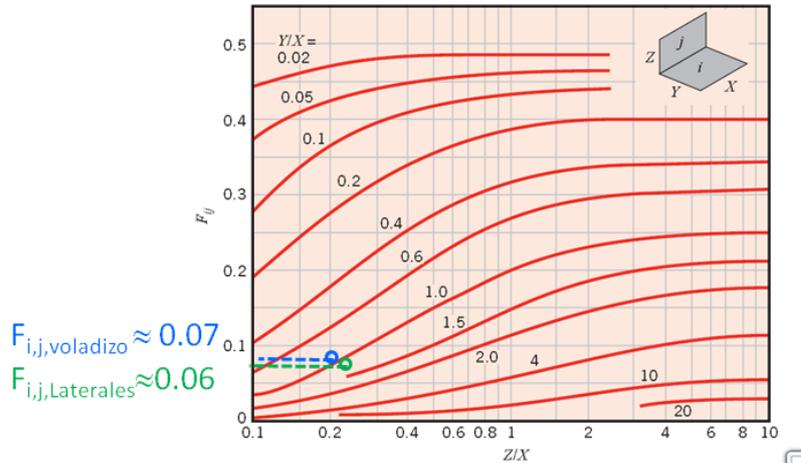


figura 69 Factores de forma entre la fachada de hormigón y los laterales y el voladizo

El factor de sombras para la radiación difusa es:

$$F_{s,d} \approx 1 - (0.07 + 2 * 0.06) + 0.2 * (0.07 + 2 * 0.06) \approx 0.96$$

reflejada de difusa

Cuyo valor es constante todo el tiempo ya que no depende de la posición solar.

### 6.1.6 Radiación incidente sobre la fachada

La radiación incidente sobre la fachada será la que se obtenga como la suma de la radiación directa afectada por su factor de sombras, más la difusa afectada por su factor de sombras.

$$I_{fachada} = f_{sD} I_D + f_{sd} I_d$$

La radiación difusa se calcula siguiendo el método teórico para cálculo de la radiación difusa excepto en los casos en los cuales la radiación global medida sea menor que la radiación difusa teórica, en cuyo caso, se tomará el valor medido.

La radiación directa se determina como la diferencia entre la radiación global medida y la radiación difusa teórica:

$$I_D = I_{medida} - I_d$$

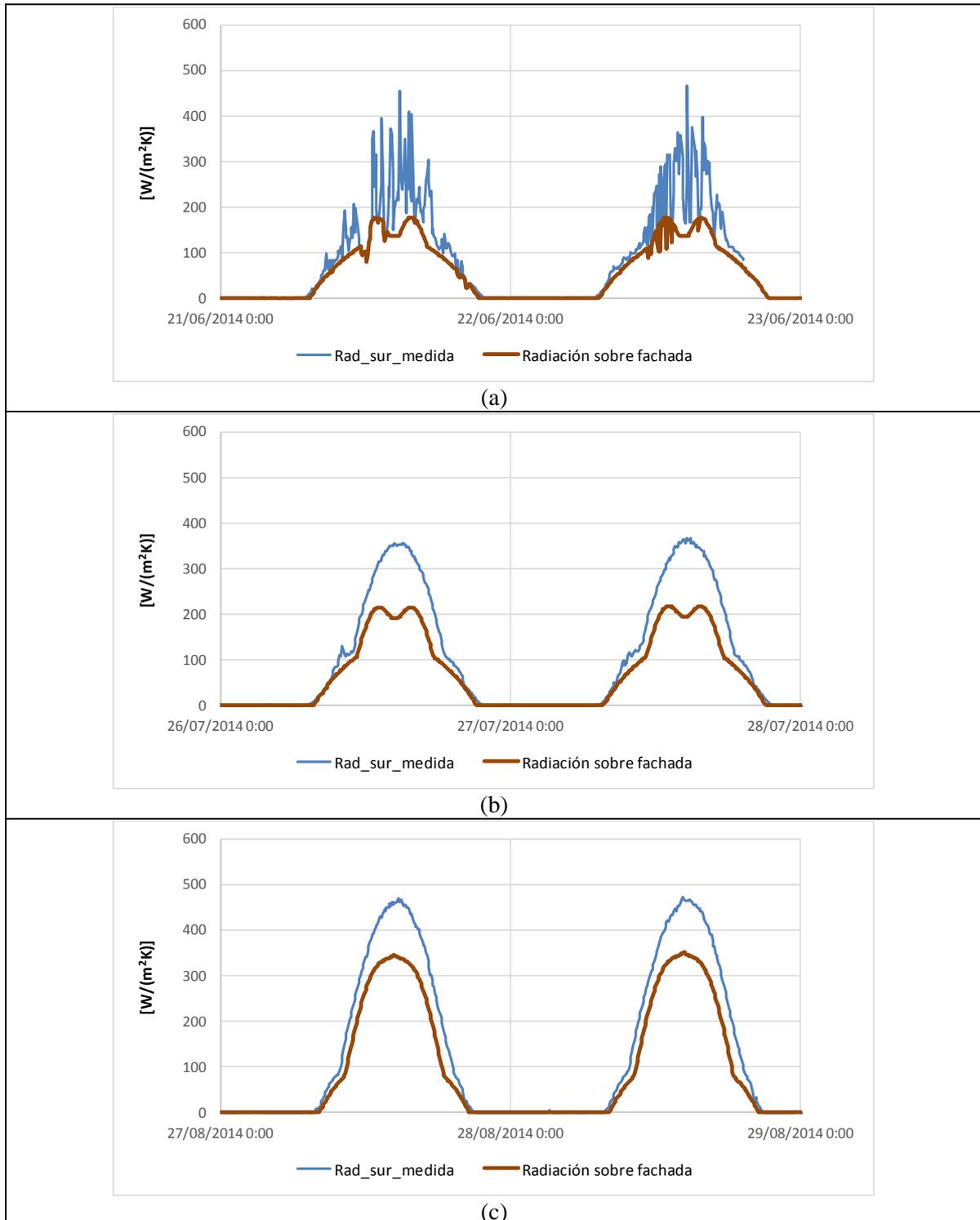


figura 70 Evolución de la radiación solar incidente sobre la fachada y radiación solar media en distintas fechas

La figura 70 muestra cómo evolucionan las radiaciones solares medidas y las incidentes sobre la fachada en distintas fechas correspondientes a los experimentos realizados.

### 6.1.7 Temperatura del aire interior

La frontera interior del modelo de simulación requiere conocer la temperatura del aire interior. Este dato ha sido medido cuidadosamente en siete puntos representativos (ver apartado 3.2), de tal manera que el valor de esta variable se calcula como la media ponderada de las mediciones realizadas.

### 6.1.8 Temperatura radiante interior

De la frontera interior, la otra variable que se debe conocer, es la temperatura radiante interior. Esta es la correspondiente a las temperaturas medias de las superficies interiores afectadas por sus correspondientes factores de forma. Las siguientes figuras muestran el cálculo de los factores de forma con cada una de las superficies interiores de la caseta.

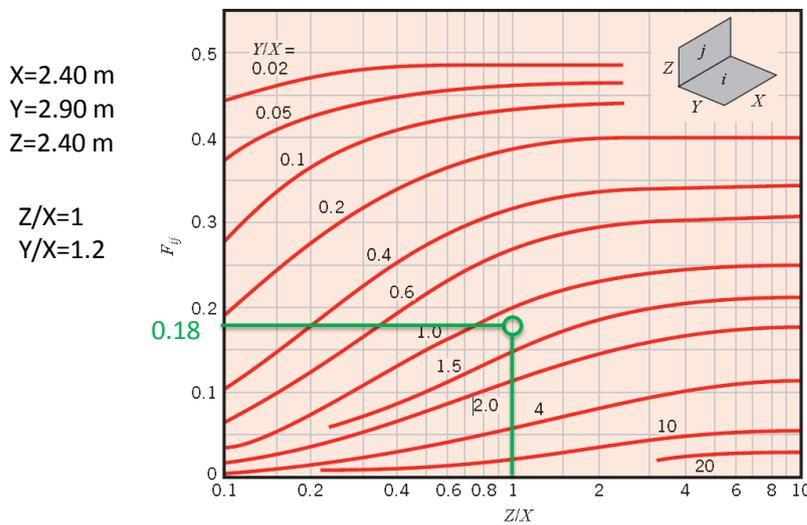


figura 71 Cálculo del factor de forma entre la Fachada activa ventilada y las paredes laterales (este y oeste)

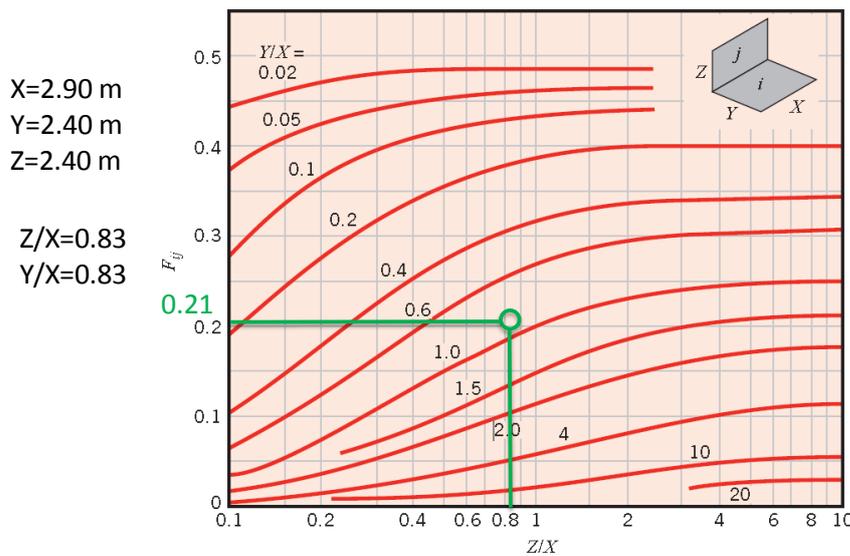


figura 72 Cálculo del factor de forma entre la Fachada activa ventilada y el techo y el suelo

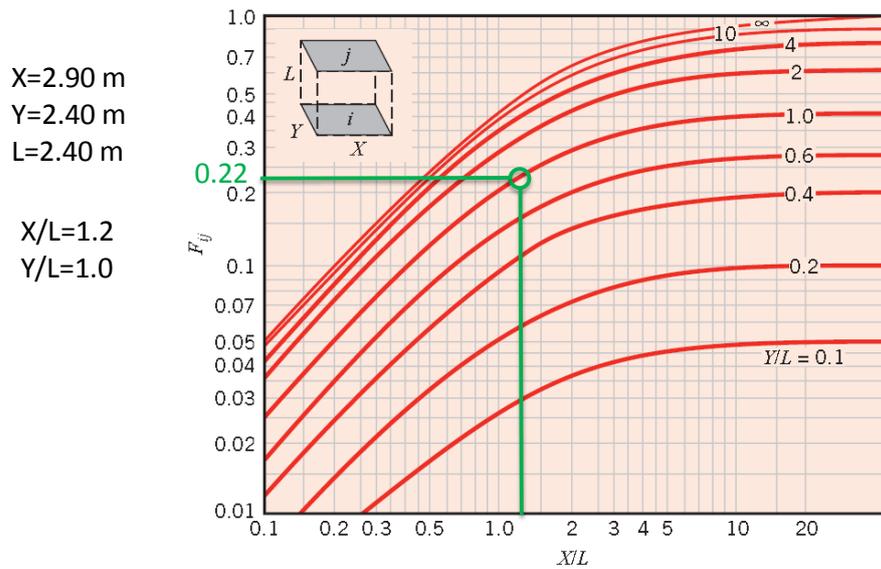


figura 73 Cálculo del factor de forma entra la fachada activa ventilada y el muro de enfrente (muro norte)

Por lo tanto, la temperatura media radiante interior se calcula como:

$$T_{rdi} = 0.18(T_{s, oeste} + T_{s, este}) + 0.21(T_{s, techo} + T_{s, suelo}) + 0.22 \cdot T_{s, norte}$$

Note que la suma de los factores de forma suma la unidad, teniendo en cuenta que los de las paredes laterales y el del suelo y techo se multiplican por dos.

## 6.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

El segundo apartado que afecta de manera importante el comportamiento de la fachada activa y por tanto, los resultados del modelo, se refiere a las propiedades térmicas de los materiales. Desafortunadamente no se cuenta con ensayos de laboratorio ni con información certificada por los fabricantes sobre todas las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la caseta. Por esta razón se ha recurrido a información obtenida en la bibliografía, de donde se ha intentado tomar los valores que a criterio de los investigadores de este proyecto se asemejan a los materiales con los que cuenta la caseta.

Los materiales que componen la fachada activa son sólo dos: hormigón y poliestireno expandido

### 6.2.1 Propiedades del poliestireno expandido

Según la página web “<http://cte-web.iccl.es/>” promovida por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el ICCL, Instituto de la Construcción de Castilla y León, las propiedades del poliestireno extruido son las que muestran en la figura 74.

## 08 Aislantes / Aislantes térmicos / Poliestireno Expandido (EPS) / Poliestireno Expandido (EPS)

Materiales	$\rho$	$\lambda$	$\mu$
Genérico	10-50	0.046-0.029	20-100
Knauf therm batiment SE	30-50	0.38	130
Knauf therm Th 39 SE	35-50	0.037	150
Knauf therm Th 37 SE	40-50	0.038	150
Knauf therm Th 35 SE	40-50	0.042	150
Knauf therm Th 34 SE	38-50	0.041	150

$\rho$  : Densidad, en Kg/m<sup>3</sup>

$\lambda$  : Conductividad térmica, en W/m·K

$\mu$  : Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, adimensional

figura 74. Propiedades térmicas del poliestireno expandido según Instituto Eduardo Torroja y Comunidad de Castilla y León, <http://cte-web.iccl.es/cteweb.php>

Según el catálogo de soluciones constructivas del código técnico<sup>5</sup>, las propiedades del poliestireno expandido son las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Propiedades térmicas del poliestireno expandido según el catálogo técnico de soluciones constructivas

Material o producto	Aislantes térmicos			
	HE			
	$\rho$ kg / m <sup>3</sup>	$\lambda$ W / m·K	$c_p$ J / kg·K	$\mu$
<b>Poliestireno Expandido (EPS)</b>	-	0,039 <sup>(1)</sup> – 0,029	-	20 -100
<b>Poliestireno Expandido Elastificado (EEPS)</b>	-	0,046 – 0,029	-	

<sup>(1)</sup> Valor recomendado. Existen tipos de poliestireno expandido con una conductividad de hasta 0,046 W/mK

Para el valor del calor específico, diversas fuentes consultadas ofrecen valores que proponen valores entre 1250 J/(kg K) y 1500 J/(kg K):

<sup>5</sup> Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPSCO y AICIA, Catálogo de Elementos Constructivos del CTE.

Thermal Properties		
Property	Unit	Value
Glass Transition Temperature	°C	100
Specific Heat Capacity	J/Kg-K	1250
Thermal Conductivity	W/m-K	0.14
Thermal Expansion (20°C to 100°C)	µm/m-K	120
Vicat Softening Temperature	°C	100

Fuente: <http://www.buzzle.com/articles/polystyrene-properties.html>

Properties and Related Standard	Values of EPS		
Minimum density (kg/m <sup>3</sup> ) (DIN 53420)	15	20	28
Building Material Classification (DIN 4102)	B1 Hardly flammable		
Heat Conductivity Lab. Value (W/mK) (DIN 52612)	0.036-0.038	0.034-0.036	0.031-0.033
Measurement value (W/mK) (DIN 52612)	0.040	0.034	0.033
Compression Strength at 10 % deformation (DIN 53421)	0.07-0.012	0.12-0.16	0.18-0.26
Compression Strength at deformation less than 2 % (DIN 53421)	0.012-0.025	0.002-0.035	0.036-0.0362
Shear strength (N/mm <sup>2</sup> ) (DIN 53427)	0.09-0.12	0.12-0.15	0.19-0.22
Bending Resistance (N/mm <sup>2</sup> ) (DIN 53423)	0.16-0.21	0.25-0.30	0.42-0.5
Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> ) (DIN 53430)	0.15-0.23	0.25-0.32	0.37-0.52
E – modulus (N/mm <sup>2</sup> )	0.16-1.25	1.0-1.75	1.8-3.1
Form Strength according to temperature for a short period (°C) (DIN 53424)	100	100	100
For a long period 5000 N/mm <sup>2</sup> (°C) (DIN 53424)	80-85	80-85	80-85
For a long period 20000 N/mm <sup>2</sup> (°C) (DIN 18164)	75-80	80-85	80-85
Thermal expansion coefficient (1/4)	5-7.10 <sup>-5</sup>	5-7.10 <sup>-5</sup>	5-7.10 <sup>-5</sup>
Specific heat capacity (J/kgK) (DIN 4108)	1500	1500	1500
Water absorption capacity at totally immersed in water (% volume)	7 days - DIN 53428	3.0	2.0
	1 year	5.0	4.0
Water vapor diffusion (g/m <sup>2</sup> .d) (DIN 53429)	40	35	20
Vapor diffusion resistance coefficient (µ) (DIN 4108)	20/250	30/250	40/250

Fuente: Yucel, K et al<sup>6</sup>

<sup>6</sup> K. T. Yucel, C. Basyigit, C. Ozel, Thermal Insulation Properties Of Expanded Polystyrene As Construction And Insulating Materials, <http://zenonpanel.com.mk/mk/wp-content/uploads/2009/06/Thermal-Insulation-properties.PDF>, 2014.

Properties		EPS	XPS
Thermal conductivity	[W/(m K)]	0.031* – 0.045	0.035 – 0.045
Density	[kg/m <sup>3</sup> ]	10 – 35	25 – 45
Compressive strength at 10 % deformation	[MPa]	0.07 – 0.26	0.15 – 0.70
Allowable compressive stress at pressure load (50 years, < 2 % deformation)	[MPa]	0.012 – 0.11	0.06 – 0.25
Heat capacity	[J/(kg K)]	1,500	1,500
Water vapor diffusion resistance	—	20 – 100	80 – 200
Building material class	—	B1 flame retardant (D) E (European classification)	

\* This low value applies to EPS with graphite content

Fuente: Wintelinh H et al<sup>7</sup>

CTE WEB




---

código técnico de la edificación

**08 Aislantes / Productos prefabricados con materiales aislantes / Bovedillas y casetones / Bovedillas y casetones de EPS mecanizado**

Materiales	$\rho$	$\lambda$	$C_p$	$\mu$
Genérico	10-35	0.069-0.033	1450	20

$\rho$  : Densidad, en Kg/m<sup>3</sup>

$\lambda$  : Conductividad térmica, en W/m·K

$C_p$  : Calor específico, en J/Kg·K

$\mu$  : Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, adimensional

Fuente: <http://cte-web.iccl.es/cteweb.php>

<sup>7</sup> Witerling Helmut, Sonntag Natalie, Rigid Polyestirene Foam (EPS, XPS), [http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en\\_GB/function/conversions:/publish/common/upload/technical\\_journals/plastics\\_trendreports/Rigid\\_polystyrene\\_foam.pdf](http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/function/conversions:/publish/common/upload/technical_journals/plastics_trendreports/Rigid_polystyrene_foam.pdf), 2014

Material ordenado por mejor difusividad térmica	Coef. Conductividad W/m·K	Calor específico KJ/kg·K	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Difusividad Térmica (α) x10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	Capacidad Calorífica (para un espesor de 4 cm) kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Thermocal-Q</b>	<b>0,048</b>	<b>1,670</b>	<b>375</b>	<b>0,77</b>	<b>25,50</b>
<b>Thermocal-V</b>	<b>0,063</b>	<b>0,950</b>	<b>376</b>	<b>1,77</b>	<b>14,29</b>
Corcho en Planchas	0,047	1,600	100	2,94	6,40
Vidrio celular	0,038	0,840	100	4,52	3,36
Panel rígido de lana de roca	0,034	0,840	70	5,78	2,35
Espuma de poliuretano	0,030	1,400	35	5,91	1,96
Poliestireno extrusionado	0,034	1,450	35	6,70	2,03
Poliestireno expandido	0,038	1,200	16	25,0	0,76

Fuente: <http://www.thermocal.es/es/normativa/informacion-medioambiental>

Tabla informativa de valores obtenidos a partir del cálculo de la misma capacidad calorífica y desde la resistencia térmica exigible para cumplir en todas las zonas climáticas según el CTE

Materiales	Espesor necesario	Coef. conductividad	Resistencia térmica (R)	Transmitancia térmica (U)	Capacidad calorífica	Difusividad térmica	Densidad	Calor específico
	mm	W/m·K	m <sup>2</sup> K/W	W/m <sup>2</sup> K	kJ/(m <sup>2</sup> ·K)	x10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	kg/m <sup>3</sup>	KJ/kg·K
Vidrio celular	67,24	0,038	1,769	0,565	5,65	4,52	100	0,840
Panel rígido de lana de roca	96,06	0,034	2,825	0,354	5,65	5,78	70	0,840
Espuma de poliuretano	115,26	0,030	3,842	0,260	5,65	5,91	35	1,400
Poliestireno EPS	111,30	0,034	3,274	0,305	5,65	6,70	35	1,450
Poliestireno XPS	177,05	0,031	5,711	0,175	5,65	9,72	22	1,450

Fuente: <http://www.foamlime.com/es/foamlime/garantia>

De acuerdo a las anteriores fuentes y dado que no se cuenta con información específica del material utilizado, se deciden tomar valores que se ubican en la mitad de los rangos para cada una de las propiedades, excepto para el calor específico que se decide tomar el valor que coincide en más fuentes. La Tabla 6 muestra los valores que se han adoptado para este análisis

Tabla 6. Propiedades seleccionadas para el poliestireno expandido

Material	Conduct. Térmica	Densidad	Calor Específico
	W/mK	kg/m <sup>3</sup>	J/kgK
Poliestireno expandido	0.033	30	1500

Análisis de sensibilidad realizados con el modelo de simulación, mostraron que los resultados son poco sensibles a variaciones de las propiedades de este material dentro de los rangos consultados

en la bibliografía. Por tal motivo no se considera necesario realizar análisis más detallados sobre las propiedades de este material en este estudio.

## 6.2.2 Propiedades del hormigón

Según el fabricante del hormigón, la densidad del material utilizado para la caseta es de 2500 kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, partiendo de esta información se ha buscado en diversas fuentes bibliográficas a fin de seleccionar las restantes propiedades térmicas.

Según la página web “<http://cte-web.iccl.es/>” promovida por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el ICCL, Instituto de la Construcción de Castilla y León, las propiedades del hormigón son las que se muestran en la



Materiales	$\rho$	$\lambda$	$C_p$	$\mu$
Genérico	2400	1.9	1000	120
Genérico	2300	1.72	1000	120
Genérico	2200	1.57	1000	120
Genérico	2100	1.44	1000	120
Genérico	2000	1.32	1000	120
Genérico	1900	1.2	1000	120
Genérico	1800	1.12	1000	120
Genérico	1700	1.03	1000	120
Genérico	1600	0.97	1000	120

$\rho$  : Densidad, en Kg/m<sup>3</sup>  
 $\lambda$  : Conductividad térmica, en W/m·K  
 $C_p$  : Calor específico, en J/Kg·K  
 $\mu$  : Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, adimensional

figura 75. Propiedades térmicas del hormigón según Instituto Eduardo Torroja y Comunidad de Castilla y León, <http://cte-web.iccl.es/cteweb.php>

El catálogo de soluciones constructivas del código técnico<sup>5</sup>, reporta, para el hormigón, las propiedades que se pueden ver en la

Tabla 7 Tabla 8 Propiedades térmicas del hormigón según el catálogo técnico de soluciones constructivas

Hormigones				
Material	HE			
	$\rho$ kg / m <sup>3</sup>	$\lambda$ W / m·K	$c_p$ J / kg·K	$\mu$
Hormigón armado	$\rho > 2500$	2,50	1000	80
	$2300 < \rho \leq 2500$	2,30	1000	80
Hormigón en masa	$2300 \leq \rho \leq 2600$	2,00	1000	80
	$2000 \leq \rho \leq 2300$	1,65	1000	70
Hormigón con áridos ligeros	$1800 \leq \rho \leq 2000$	1,35	1000	60
	$1600 \leq \rho \leq 1800$	1,15	1000	60

Wadsö L. et al<sup>8</sup>, investigaron los efectos de distintas composiciones del hormigón en sus propiedades térmicas con los resultados mostrados en

Tabla 9. Propiedades térmicas del hormigón para distintas composiciones (Wadsö L. et al). El índice de composiciones se encuentra en la Tabla 10

	$\rho$ / kg m <sup>-3</sup>	$\lambda$ / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>		$cv$ / MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>		$cv$ / J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
	Measured	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated
REF	2240	2.24	2.27	1.78	1.41	795	629
MAG	3650	2.57	2.00	2.68	2.48	734	679
GRA	1890	3.52	(1.85)	1.53	1.26	810	667
GAM	2810	3.85	(1.70)	2.46	1.84	875	655
ST1	2330	2.57	-	1.93	1.44	828	618
ST2	2441	2.95	-	2.02	1.46	828	598
BRA	2520	2.71	2.42	1.75	1.50	694	595
COP	2438	3.63	-	2.29	1.46	939	599
PEL5	1790	1.23	1.17	1.58	1.58	883	883
PEL50	1.23	1.70					
MIC5	1570	0.83	0.97	1.67	1.49	1064	949
MIC50	0.77	1.63					
DIS5	1900	1.47	1.31	1.30	1.56	684	821
DIS50	1.63	1.64					
PAS	1510	0.58	-	1.03	-	682	

Tabla 10. Glosario de la composición de hormigones para la lectura de la Tabla 9

	REF	MAG	GRA	GAM	ST1	ST2	BRA	COP	PEL	MIC	DIS	PAS
	Mass / kg m <sup>-3</sup>											
CementA	381	342	533	530	379	374	365	374	425	489	290	-
Water	190	170	315	318	189	187	182	187	218	342	58	-
Sand 0-8 mm	887	281	492	-	876	865	844	865	1062	791	674	-
Quartzite	443	-	246	-	434	429	418	429	-	-	337	-

<sup>8</sup> Lars Wadsö; Jonathan Karlsson; Kristian Tammo, Thermal properties of concrete with various aggregates, Cement and Concrete Research, Manuscript Draft.

8-12 mm												
Quartzite 12-16 mm	443	-	246	-	434	429	418	429	-	-	337	-
Other	-	517B	298D	956B	00E	197E	422F	223G	213H	176J	322K	-
Other	-	599C	-	974C	-	-	-	-	-	-	-	-
Other	-	-	-	296D	-	-	-	-	-	-	-	-
w/c	0.50	0.50	0.59	0.60	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.70	0.70	

Para la conductividad térmica Kim et al<sup>9</sup>, informan los valores mostrados en la

Tabla 11 Conductividad térmica del hormigón según Kim et al.

Effects of aggregate content, temperature, and humidity condition

Items	W/C (%)	S/A (%)	Type of cementitious materials	Aggregate volume ratio	Thermal conductivity (kcal/m h °C)					
					Wet condition			Dry condition		
					20 °C	40 °C	60 °C	20 °C	40 °C	60 °C
C-GC1	40	39	Type V	0.70	2.12	2.15	1.98	1.69	1.67	1.58
C-GC2	40	39	Type V	0.63	2.00	2.02	1.91	1.67	1.62	1.55
C-GC3	40	39	Type V	0.56	1.93	1.71	1.62	1.52	1.45	1.38
C-GC4	40	39	Type V	0.49	1.69	1.69	1.53	1.32	1.27	1.19
C-GC5	40	39	Type V	0.35	1.47	1.50	1.41	1.10	1.09	0.99
C-GC6	40	39	Type V	0.21	1.20	1.23	1.16	0.86	0.83	0.77
P-WC4	40	-	Type V	0.0	1.00	0.97	0.89	0.66	0.65	0.62

Con relación al calor específico, algunos de los valores encontrados en la literatura son los que muestran a continuación:

Material [Unidad]	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	CalorEsp. J/Kg °C	Conduct. W/m °C	Capacidad MJ/m <sup>3</sup> °C	Difusividad mm <sup>2</sup> /s
Hormigón armado	2400	1050	1.63	2.52	0.65
Hormigón en masa vibrado	2400	805	1.63	1.93	0.84

Fuente: <http://editorial.cda.ulpgc.es/ftp/icaro/Anexos/2-%20CALOR/4-Construccion/C.6.4%20Conductividad%20t%E9rmica%20y%20densidad.PDF>

Product	Specific Heat - c <sub>p</sub> -	
	(Btu/lb <sub>m</sub> <sup>o</sup> F)	(kJ/kg K)
	(kcal/kg <sup>o</sup> C)	
Concrete, stone	0.18	0.75
Concrete, light	0.23	0.96
Concrete		0.88

Fuente: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)

Substance	Specific Heat Capacity at 25°C in J/g°C
Concrete	0.880

Fuente: [http://www2.ucdsb.on.ca/tiss/stretton/database/Specific\\_Heat\\_Capacity\\_Table.html](http://www2.ucdsb.on.ca/tiss/stretton/database/Specific_Heat_Capacity_Table.html)

<sup>9</sup> Kook-Han Kim, Sang-Eun Jeon, Jin-Keun Kim, Sungchul Yang, An experimental study on thermal conductivity of concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) 363–371

Según todas las anteriores fuentes, se aprecia que para hormigones de densidades cercanas a 2500 kg/m<sup>3</sup>, las restantes propiedades térmicas pueden presentar gran variedad de valores. Por tal motivo, no es posible establecer un valor para dichas propiedades que se puedan aplicar al hormigón que se tiene en la caseta de ensayo con suficiente confiabilidad.

Las siguientes tabla muestra un resumen de las propiedades entre las que puede oscilar un hormigón de densidad 2500 kg/m<sup>3</sup>:

Tabla 12. Valores probables de conductividad térmica del hormigón

Material	Densidad	Conduct. Térmica
	kg/m <sup>3</sup>	W/mK
Mayor valor	2500	2.5
Valor intermedio		2
Menor valor		1.6

Tabla 13. Valores probables de calor específico del hormigón

Material	Densidad	Calor Específico
	kg/m <sup>3</sup>	J/kgK
Mayor valor	2500	1000
Valor intermedio		800
Menor valor		600

Las distintas pruebas realizadas mostraron que los resultados obtenidos con el modelo dependen de forma no despreciable de las propiedades que se elijan para el hormigón. En general, se puede apuntar que conductividades térmicas ubicadas en el rango superior y calores específicos en el inferior, producen resultados de ajuste entre el modelo de simulación y los resultados experimentales bastante buenos. Sin embargo, ante la incertidumbre de las propiedades de este material y con el fin de no intentar forzar las propiedades para que se ajusten al modelo, se ha decidido, tomar propiedades del hormigón en el rango intermedio mostrado en la Tabla 12 y la Tabla 13.

### 6.2.3 Ajuste de parámetros y variables del modelo

Una vez se han determinado las condiciones de contorno y propiedades de los materiales, en principio la única variable libre deberían ser los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación. Sin embargo, tal como se describirá posteriormente, debido a la incertidumbre en las propiedades del hormigón, fue necesario hacer una labor de ajuste también de estos últimos valores.

Los coeficientes de transferencia de calor por radiación no tuvieron que ser ajustados, ya que sus valores por defecto mostraron ser lo suficientemente buenos para tener que modificarlos. Esto no es un comportamiento inesperado, ya que el grado de incertidumbre para este caso es bajo.

Para ajustar estos valores se utilizaron una serie de días lo suficientemente representativos, es decir que contuvieran la mayor variedad de condiciones posibles. Se seleccionaron dos rangos de días:

Para la operación en convección libre se tomaron los datos de los días del 12 al 20 de Junio de 2014, debido a que cubre un buen espectro de temperaturas en pocos días y a que se tienen suficientes horas con ventiladores apagados y funcionando con sus correspondientes transiciones, tal como se puede ver en la figura 76.

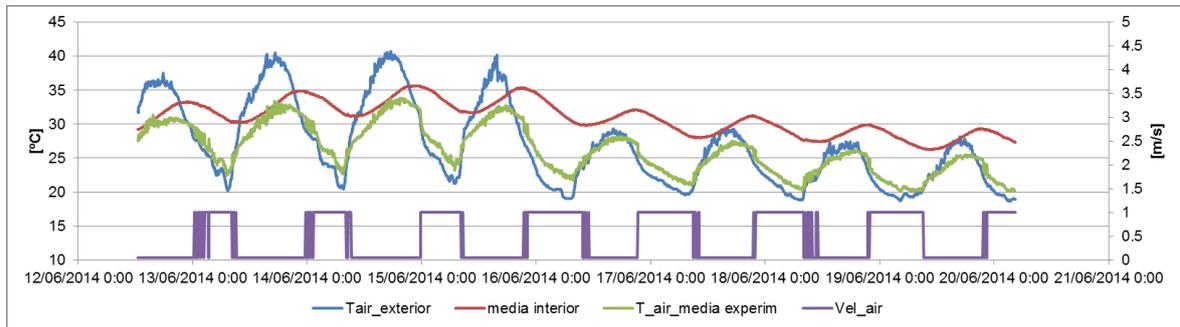


figura 76 Comportamiento de algunas temperaturas y flujo de aire para los días seleccionados en modo de oscilación para el ajuste de parámetros de la validación

Para la operación en modo de temperatura controlada, los días seleccionados fueron los comprendidos entre el 20 y 29 de julio de 2014.

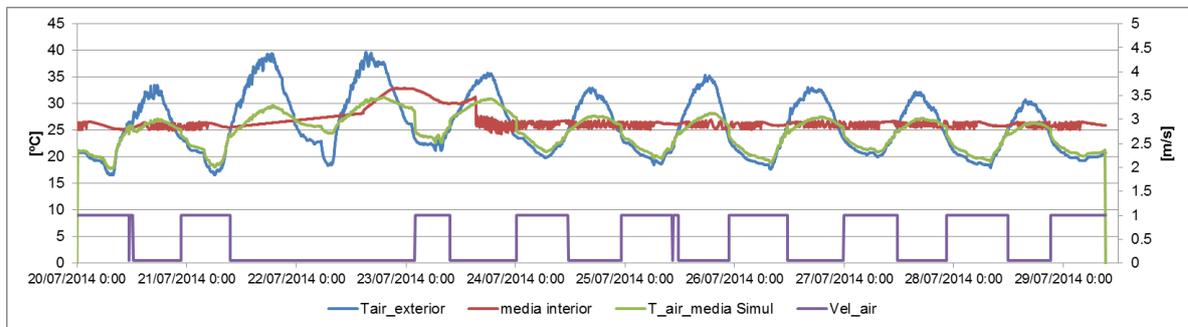


figura 77 Comportamiento de algunas temperaturas y flujo de aire para los días seleccionados en modo de temperatura controlada para el ajuste de parámetros de la validación

## 6.2.4 Coeficientes de transferencia de calor convectivo y radiante exterior

Las pruebas realizadas con el modelo revelaron que los coeficientes convectivos y radiantes exteriores ejercen poca influencia en el comportamiento del modelo. Esto se debe a que la hoja exterior de la fachada se encuentra aislada, de tal manera que variaciones dentro del rango de orden de magnitud esperable para estas variables, no logran producir cambios significativos en la transferencia de calor desde el interior o la cámara de aire al exterior, puesto que se encuentran dominadas por el valor de la resistencia térmica del aislante. Por lo tanto, los coeficientes

convectivo y radiante exterior se acepta que tomen el valor establecido por la normativa; esto es, 25 W/(m<sup>2</sup>K) para el coeficiente convectivo y 5 W/(m<sup>2</sup>K) para el radiante.

## 6.2.5 Coeficiente de transferencia de calor por convección en la cámara de aire y conductividad del hormigón

El coeficiente convectivo de la cámara de aire es el segundo valor a ajustar. Para ello se intentaron usar los datos de temperatura superficial de los sensores ubicados en la hoja exterior e interior y que limitan con la cámara de aire. Desafortunadamente, una inspección detallada de estos registros reveló que los valores medidos no eran correctos debido a un pobre contacto entre la superficie y el sensor. En consecuencia, fue necesario ignorar este dato.

Debido a lo anterior, el ajuste de este coeficiente tuvo que realizarse usando los datos de las excitaciones exteriores y la temperatura superficial interior del muro de hormigón. El inconveniente que se presenta con esta metodología, es que entre la cámara de aire y los datos de temperaturas conocidos, existe una capa de hormigón, cuyas propiedades, tal como se dijo anteriormente, no se encuentran plenamente determinadas. Las consecuencias de esto es que se hace necesario ajustar simultáneamente los valores de varias propiedades, lo que produce inevitablemente un conjunto de posibles soluciones que se ajustan prácticamente igual de bien.

El caso más evidente de este acople entre variables, es el de la conductividad térmica del hormigón y el coeficiente convectivo en la cámara de aire. Es fácil entender que cuanto más alto se asuma el valor del coeficiente convectivo, menor debería ser la conductividad del hormigón, para que se establezca el mismo flujo de calor. Este hecho se corroboró por medio de diversas simulaciones. Los resultados, obviamente no son iguales si se aumenta un valor y se disminuye otro en la magnitud correcta. Esto es debido a que están en juego variables que modifican el comportamiento en estado transitorio del muro. Sin embargo, sí se evidencia que para conseguir un buen ajuste entre el modelo y los resultados experimentales, es necesario disminuir el valor de una de estas variables y aumentar el de la otra.

Teniendo en cuenta lo anterior y las consideraciones hechas en el apartado 6.2.2, se han tomado los siguientes valores para el coeficiente convectivo en la cámara y la conductividad térmica del hormigón:

Variable	Valor
Coeficiente convectivo en la cámara de aire con los ventiladores funcionando:	8 W/(m <sup>2</sup> K)
Coeficiente convectivo en la cámara de aire con los ventiladores apagados:	3 W/(m <sup>2</sup> K)
Conductividad térmica del hormigón	2 W/(m K)

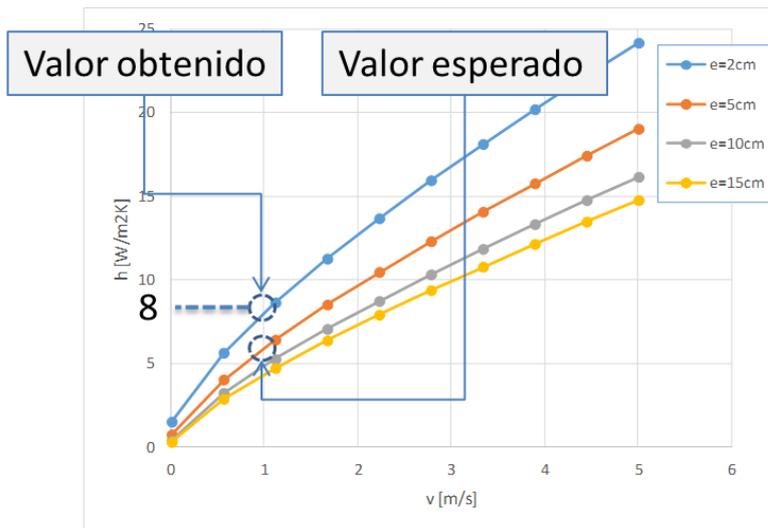


figura 78 Valor esperado y valor obtenido del coeficiente de película en la cámara de aire cuando los ventiladores funcionan

Los valores de los coeficientes convectivos son superiores a los esperados según las correlaciones usualmente utilizadas para su cálculo (figura 78). Sin embargo, están justificados debido a que tienen niveles de turbulencia superiores a los supuestos en las correlaciones, debido a que estas últimas suponen una entrada de aire limpia desde la zona inferior de la cámara de aire, cuando la realidad de la cámara utilizada es diferente; en esta cámara el aire entra por una zona lateral que producirá unos niveles de turbulencia mayores que si la entrada fuera limpia desde la zona inferior

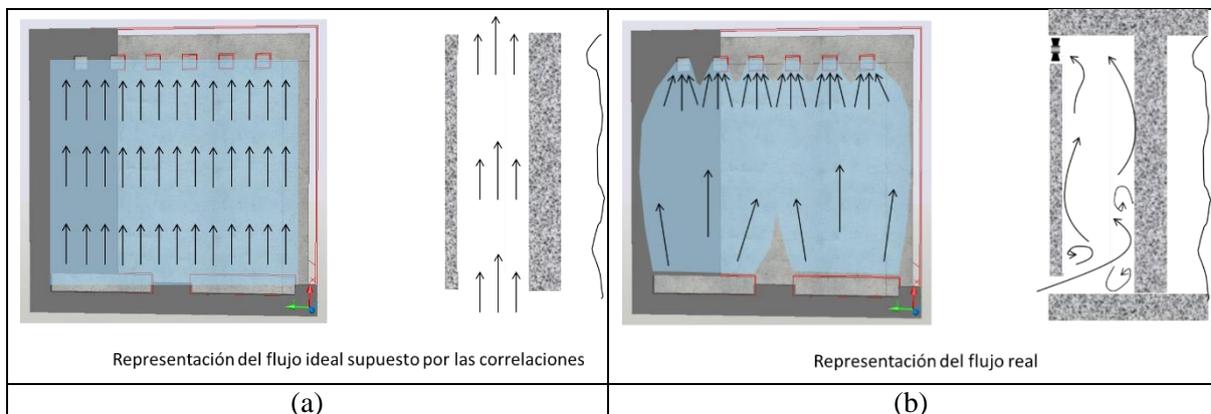


figura 79. Representación esquemática de los flujos de aire en el caso ideal considerado por la correlación y el flujo real. Debido a la mayor turbulencia del flujo obtenido en el caso real, es de esperar coeficientes convectivos mayores que los de la correlación.

## 6.2.6 Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la caseta

El último coeficiente de transferencia de calor que se debió ajustar es el convectivo interior. Se detectó que existen dos valores fundamentalmente; uno cuando el equipo de climatización está apagado y otro cuando está encendido. Esta diferencia se debe a que este equipo enciende el ventilador de la unidad interior, con lo que se presenta una agitación del aire en el interior de la caseta cuando el ventilador funciona.

Los valores que mejor ajustan al modelo fueron:

$$h_{\text{convectivo interior}} = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \quad \leftarrow \quad \text{Equipo de climatización apagado}$$

$h_{\text{convectivo interior}} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  ← Equipo de climatización encendido

### 6.3 Resultados de la validación

Los resultados de la validación, son los que se enseñan a continuación. La entrada de datos del modelo con todos los valores tomados se muestra en la figura 80.

Hoja Exterior		Capas				
Absortividades Solares	0.60	0.00				
Transmitancia Solar	0.00	--				
Absortividad Onda Larga	0.70	--				
Material	Espesor	Conduct. Térmica	Densidad	Calor Específico		
	m	W/mK	kg/m3	J/kgK		
1 Hormigón arr	0.10	2	2500	800		
2 Aislamiento	0.05	0.03	30.000	1500		
3						

Hoja Interior					
Absortividad Solar	0.00 --				
Absortividad Onda Larga	0.70 --				
Capas					
Material	Espesor	Conduct. Térmica	Densidad	Calor Específico	
	m	W/mK	kg/m3	J/kgK	
1 Hormigón arr	0.16	2	2500	800	
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Cámara de Aire	
Espesor Cámara	0.05 m
Altura Cámara	2.4 m
Otros	
Procedencia del Aire	<input type="radio"/> Interior <input checked="" type="radio"/> Exterior <input type="radio"/> Otro Elemento
Coefficientes de transferencia de calor	<input type="radio"/> Calcularlos <input checked="" type="radio"/> Datos en Tabla
Velocidad del Aire	<input type="radio"/> Calcularla <input checked="" type="radio"/> Dada en Tabla <input type="radio"/> Con
Control ¿Se permite contraflujo?	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No
Sobrettemperatura para permitir ventilación	<input type="text" value="0"/> °C

Controles Adicionales	
$A_{\text{transv}}/A_{\text{vent,in}}$	1.5
$A_{\text{transv}}/A_{\text{vent,out}}$	1.5
$k_{\text{in}}$	0.5
$K_{\text{in}} = \frac{1}{\rho_{\text{in}}} (1 + k_{\text{in}}) \left( \frac{A_{\text{transv}}}{A_{\text{vent,in}}} \right)^2$ $K_{\text{out}} = \left( \frac{A_{\text{transv}}}{A_{\text{vent,out}}} \right)^2$	
long. Elemento	5 mm
Time Step	30 s
Converg_Err	0.0001 --

figura 80. Imagen de los datos de entrada para el modelo de simulación.

Ahora, se enseñan las temperaturas representativas en los periodos utilizados para realizar las comprobaciones del modelo.

#### 6.3.1 Periodo del 12 al 28 de Junio 2014

En este periodo, el modo de operación fue: oscilación libre, ventiladores funcionando según esquema de control.

En la figura 81 se comparan las temperaturas medias del aire en la cámara obtenidas con el modelo de simulación y la medida experimentalmente. Se aprecia que el nivel de ajuste entre ñas dos curvas es alto, pero es un poco mejor cuando los ventiladores funcionan. El grado mayor de error cuando los ventiladores están apagados, se debe principalmente a que el flujo de aire en estos periodos de tiempo, no es constante y depende en gran medida del vienmto exterior. El modelo de simulación supone una velocidad constante igual a 0.05 m/s.

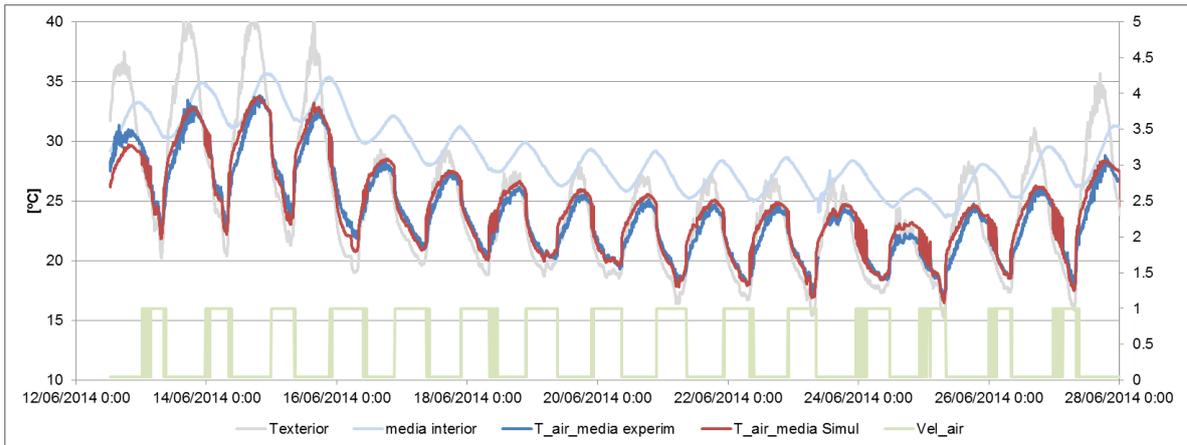


figura 81 Comparación de la temperatura media del aire en la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

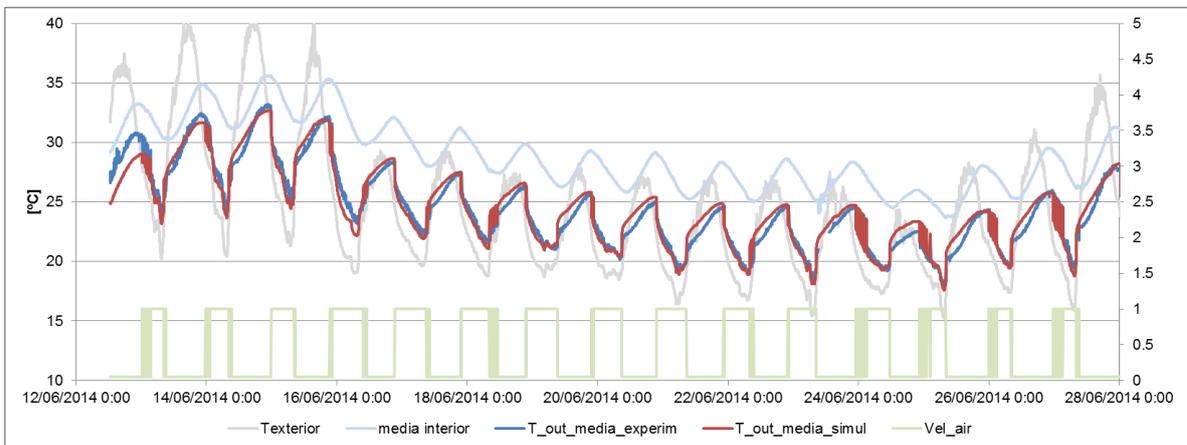


figura 82 Comparación de la temperatura de salida del aire de la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

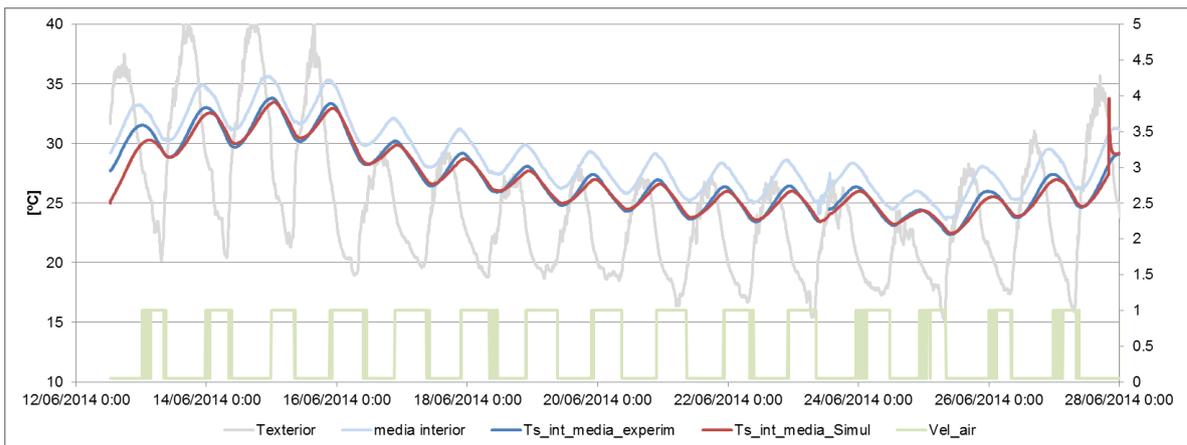


figura 83 Comparación de la temperatura de la superficie interior del muro de hormigón obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

En la figura 82, se comparan las temperaturas de salida de la cámara de aire. En este caso el comportamiento es análogo al descrito para la temperatura media del aire en la cámara.

En la figura 83 se comparan las temperaturas superficiales interiores del muro de hormigón. En este caso el modelo, aunque muestra un ajuste bueno, presenta una onda de temperatura ligeramente

más amortiguada y un poco desfasada con respecto a la obtenida experimentalmente. En este caso, este ligero desajuste, puede ser atribuible a que los valores de las propiedades del hormigón no sean exactamente las que se han utilizado en la simulación. Sin embargo, el error se encuentra por debajo del grado de error de los sensores de temperatura. Por tanto, buscar un mejor ajuste, no garantiza un menor grado de error entre el modelo y la realidad.

### 6.3.2 Periodo del 01 al 09 de Julio 2014

En este periodo, el modo de operación fue: Temperatura controlada (consigna en 27°C), ventiladores apagados las 24 horas.

Los resultados obtenidos en este periodo son útiles para observar cómo se comportan el modelo cuando los ventiladores están apagados todo el periodo de tiempo considerado, ya que los parámetros de caracterización, fueron obtenidos para una condición en la que los ventiladores sólo estaban apagados un periodo de tiempo limitados del día.

Los tres grupos de temperatura mostrados en la figura 84, figura 85 y figura 86 muestran unos bueno niveles de ajuste, mostrando en todos los casos errores menores a los de los sensores.

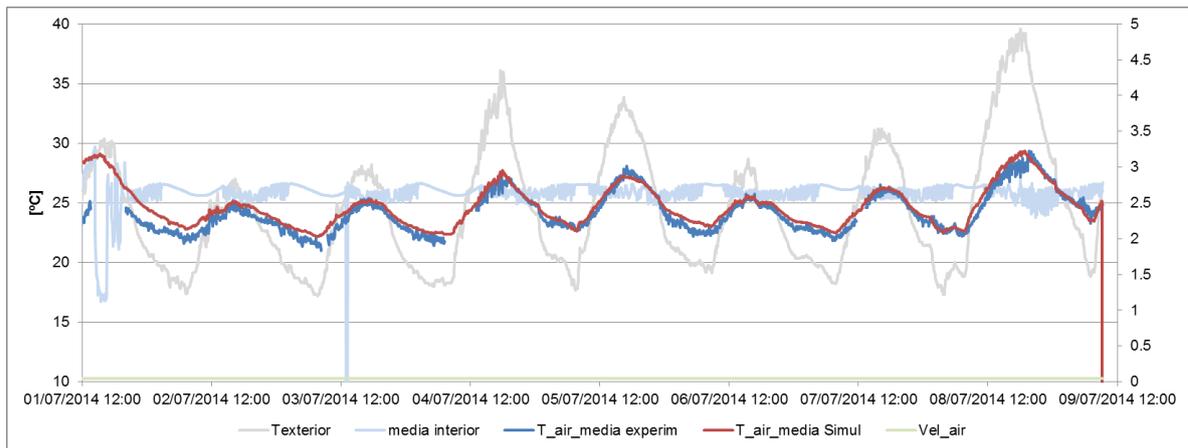


figura 84 Comparación de la temperatura media del aire en la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

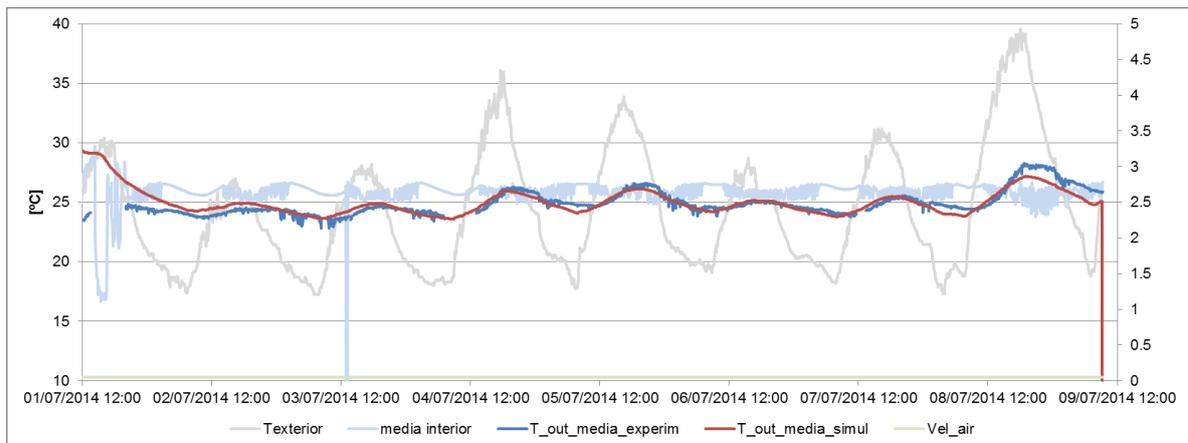


figura 85 Comparación de la temperatura de salida del aire de la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

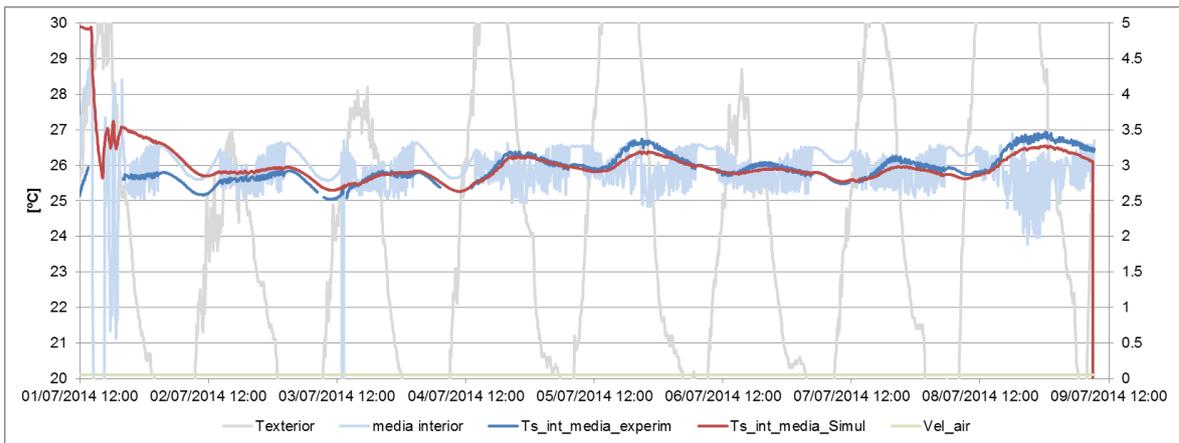


figura 86 Comparación de la temperatura de la superficie interior del muro de hormigón obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

### 6.3.3 Periodo del 20 al 29 de Julio 2014

En este periodo, el modo de operación fue: Temperatura controlada (consigna en 27°C), ventiladores funcionando según esquema de control.

Este fue uno de los periodos de tiempo para realizar los ajustes de las variables. En particular fue útil para determinar el coeficiente convectivo interior cuando el equipo de climatización funciona, por ello no sorprende el elevado grado de ajuste entre la temperatura superficial interior experimental y la del modelo mostrada en la figura 89.

Por otra parte, el comportamiento de las temperaturas en la cámara de aire mostrado en la figura 87 y la figura 88, presentan un comportamiento similar al comentado anteriormente, es decir, que se presenta un mejor ajuste cuando los ventiladores funcionan que cuando están apagados.

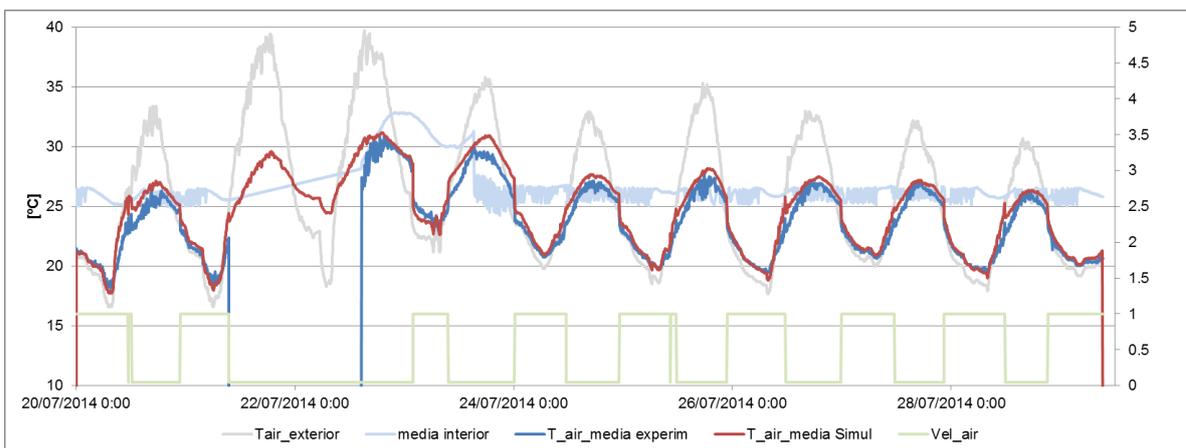


figura 87 Comparación de la temperatura media del aire en la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

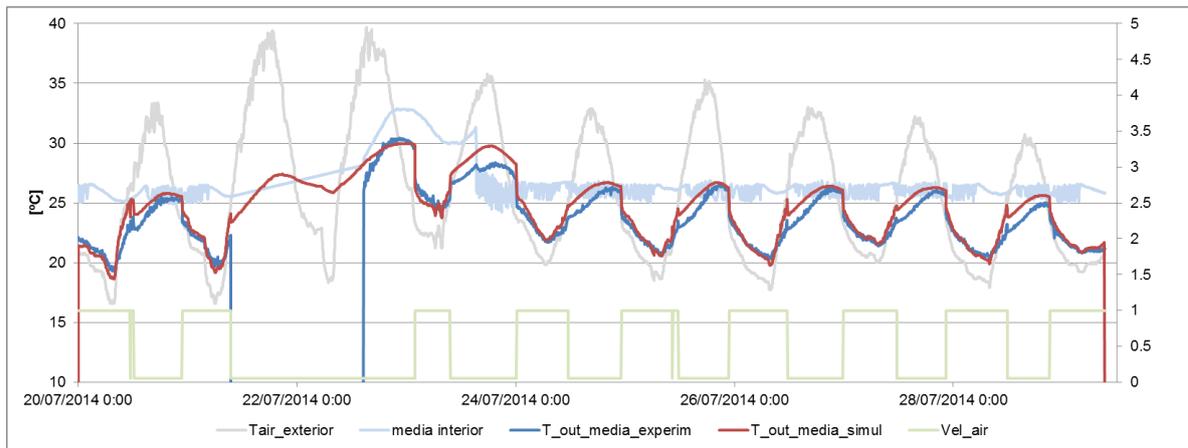


figura 88 Comparación de la temperatura de salida del aire de la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

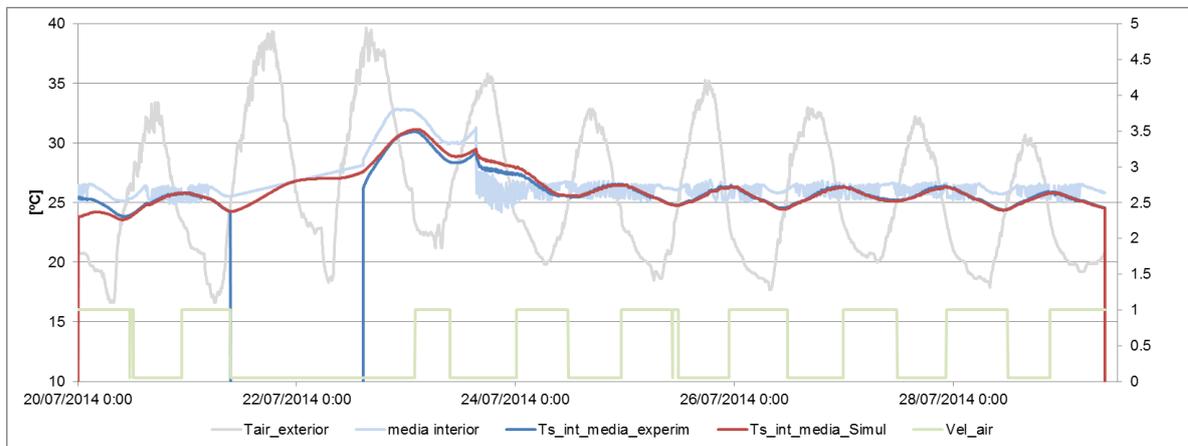


figura 89 Comparación de la temperatura media del aire en la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

### 6.3.4 Periodo del 14 al 28 de Agosto 2014

En este periodo, se presentan tres modos de operación que se suceden consecutivamente: 1-) oscilación libre con ventiladores apagados las 24 horas, 2-) Temperatura controlada (consigna en 27°C) con ventiladores apagados las 24 horas, 3-) Temperatura controlada (consigna en 27°C) con ventiladores encendidos según esquema de control.

Este periodo resulta importante para la verificación del modelo ya que al sucederse distintos modos de operación de forma secuencial, podrían haberse presentado fallos en el modelo, sin embargo, esto no ocurrió, lo que muestra la robustez del modelo ante cambios en los esquemas de operación.

Nuevamente se repite el comportamiento ya observado en los anteriores apartados. Esto es, que las temperaturas de aire en la cámara se ajustan mejor cuando los ventiladores funcionan (figura 90 y figura 91). Sin embargo, en este caso la temperatura media del aire en la cámara muestra un buen nivel de ajuste cuando se está operando en oscilación libre, no así, la temperatura de salida. Esto es debido a que el modelo asume un comportamiento del aire un poco diferente a que en realidad se está presentando, ya que el modelo asume que el aire siempre entra por abajo y sale por arriba. En la realidad, cuando los ventiladores se encuentran apagados, lo que se presenta es una recirculación de aire que hace que este entre y salga principalmente por la abertura inferior. La diferencia de temperatura observada experimentalmente, se debe principalmente a una estratificación del aire.

Por otra parte, el comportamiento de la temperatura superficial del muro de hormigón (figura 92) muestra un buen nivel de ajuste cuando la temperatura interior está regulada por el equipo de climatización. Hay un error no despreciable cuando opera en oscilación libre. Nuevamente este desajuste se puede deber a las propiedades del hormigón.

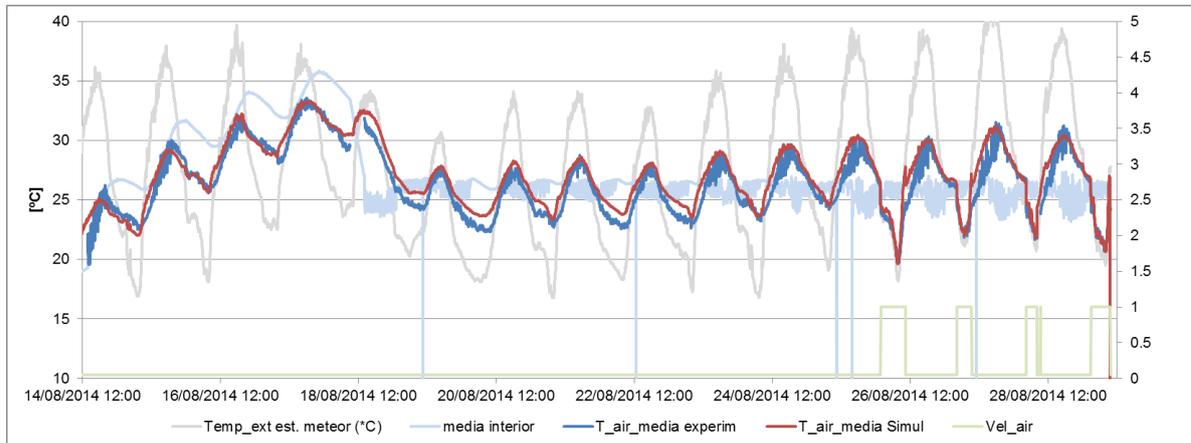


figura 90 Comparación de la temperatura media del aire en la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

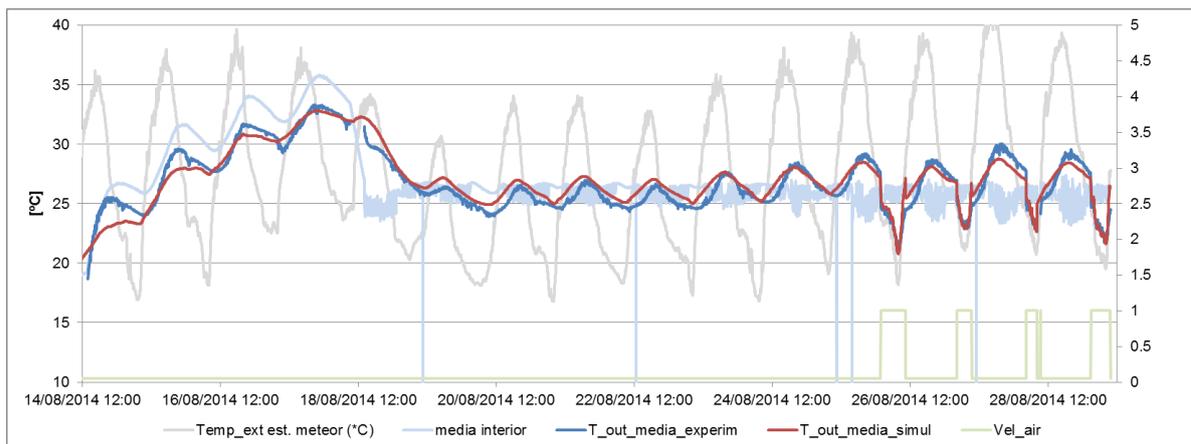


figura 91 Comparación de la temperatura de salida del aire de la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

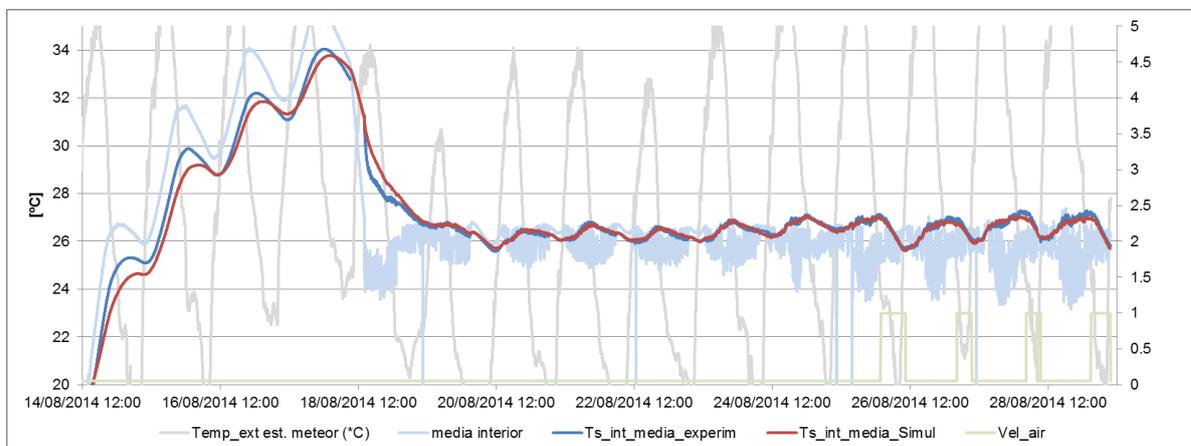


figura 92 Comparación de la temperatura media del aire en la cámara obtenida experimentalmente y la del modelo de simulación.

## **6.4 Conclusiones de la validación**

La primera y más importante conclusión de la validación; es que el modelo desarrollado se ajusta razonablemente bien a los resultados experimentales y por lo tanto es útil para la realización de cálculo y predicciones acerca de la forma de operación de un sistema de fachada ventilada activa.

Otra conclusión importante, es la de que es recomendable realizar ensayos sobre las propiedades del hormigón utilizado con el fin de reducir los niveles de incertidumbre en la selección de parámetros y variables que caracterizan al modelo de simulación.

Del procedimiento de validación desarrollado ha sido posible identificar que los coeficientes de película en la cámara de aire son mayores que los que se predicen en la literatura, debido a que la turbulencia generada por la geometría de la entrada de aire (y probablemente por la salida también). Este mayor coeficiente de película, favorece los procesos de transferencia de calor, lo cual es un efecto deseable en este caso. No obstante, no es posible concluir que esto sea positivo visto desde un punto más global, dado que una mayor turbulencia implica mayores pérdidas de presión y por lo tanto mayor consumo de los ventiladores. Es recomendable hacer un balance sobre este fenómeno, pero debido a que la instalación experimental de la caseta no permite modificaciones en la geometría de la entrada y la salida de aire, este estudio se encuentra fuera del alcance del presente proyecto.



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA**



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional

