

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Tecnologías  
Industriales

Modelo de caracterización experimental de una  
solución innovadora de fachada

Autor: Juan Daniel Sánchez Ortiz

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

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

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en ingeniería de las Tecnologías Industriales

# Modelo de caracterización experimental de una solución innovadora de fachada

Autor:

Juan Daniel Sánchez Ortiz

Tutor:

Servando Álvarez Domínguez

Catedrático

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

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera: Modelo de caracterización experimental de una solución innovadora de fachada

Autor: Juan Daniel Sánchez Ortiz

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi madre, siempre en mi  
recuerdo.*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, agradecer todo el apoyo recibido durante estos años a mi familia, mi padre, mis tres hermanos y mis cinco sobrinos que son como cinco hermanos pequeños. Hoy en día, en los tiempos que corren, no es nada fácil conseguir que toda la familia permanezca unida, y por suerte la mía lo está. Agradecer por supuesto a mi madre, la cual tengo siempre presente y estoy seguro que sigue protegiéndome allá donde esté.

Agradecer el apoyo y la ayuda recibida por parte de mi tutor Don Servando Álvarez Domínguez, el cual me ha brindado la posibilidad de realizar este proyecto, así como a Álvaro Ruiz por su gran ayuda en la fase inicial de este proyecto y del que en pocos días he aprendido mucho.

Finalmente, acordarme de todos y cada una de las personas que ha formado parte de mi vida durante esta etapa universitaria, algunas se fueron y otras siguen a mi lado. En especial a los que hoy siguen siendo un pilar fundamental, mis amigos, muchas gracias.

*Juan Daniel Sánchez Ortiz*

*Sevilla, 2016*



Hoy en día, el ahorro energético se ha convertido en uno de los objetivos principales para la mayoría de los países desarrollados, especialmente en Europa. Es por ello que cada vez se buscan nuevas soluciones constructivas enfocadas a disminuir el consumo de energía.

En esta memoria, se trata de caracterizar el efecto que supone la introducción en una caseta de un elemento innovador, el cual es una versión del conocido Muro Trombe. Para ello, se realizan una serie de campañas de mediciones con el objetivo de agrupar la mayor cantidad de información sobre el comportamiento de la celda de ensayo variando algunas de sus condiciones. Estas campañas de mediciones se extienden durante los meses invernales de diciembre, enero y febrero.

Finalmente, con el objetivo de validar los resultados experimentales obtenidos, se realiza un modelo teórico de la celda de ensayo., a partir del cual, se realiza un breve estudio de sensibilidad para conocer la variación de algunos parámetros característicos de la celda cuando cambia por ejemplo el espesor del aislante o la tipología de vidrio que usa en el elemento innovador.



# Abstract

---

Nowadays, the energy efficiency has become an important objective for the most developed countries, especially in Europe. It is for this reason that people are looking for new structural solutions aimed at decrease the energy consumption.

This project tries to characterize the effect in a building, that implies the insertion of a new element in his façade. The element is a new version of the Trombe Wall. For this aim, several seasons of measurement were done to get the most information possible about the performance of test building. These measurements were collected for winter month (December, January and February)

Finally, a theoretical model of the test building was done for validate the experimental results. Then, a short sensitivity study was done in order to know the variation of some characteristic parameter of the test building when for example, we modify the insulation thickness.



<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>NOTACIÓN</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 DESCRIPCIÓN DE LA CELDA DE ENSAYO</b> .....	<b>5</b>
LOCALIZACIÓN .....	5
DIMENSIONES Y COMPOSICIÓN DE LA CELDA DE ENSAYO .....	6
EQUIPOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA .....	7
2.1.1 <i>Temperatura interior</i> .....	8
2.1.2 <i>Calor cedido por equipo de climatización</i> .....	8
2.1.3 <i>Temperatura superficies interiores</i> .....	8
2.1.4 <i>Temperaturas del elemento activo</i> .....	9
OTROS EQUIPOS .....	10
<b>3 CAMPAÑA DE MEDICIONES</b> .....	<b>13</b>
OSCILACIÓN LIBRE .....	13
TEMPERATURA IMPUESTA .....	14
FACHADA ACTIVA .....	15
<b>4 PRESENTACIÓN DE MEDIDAS OBTENIDAS</b> .....	<b>17</b>
OSCILACIÓN LIBRE .....	17
TEMPERATURA IMPUESTA .....	19
FACHADA ACTIVA .....	22
<b>5 ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA INTERIOR .....	25
DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA .....	26
CÁLCULO DEL ÁREA SOLAR INICIAL .....	27
<b>6 MODELO TEÓRICO</b> .....	<b>31</b>
DATOS DE PARTIDA .....	31
PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO .....	33
VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....	37
<b>7 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD</b> .....	<b>40</b>
7.1. ESTUDIO SOBRE EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA .....	40
ESTUDIO SOBRE EL CAMPO DE TEMPERATURAS .....	43
ESTUDIO SOBRE EL ÁREA SOLAR .....	45
<b>8 ANEXOS</b> .....	<b>47</b>

8.1	ANEXO A: DATOS EXPERIMENTALES .....	48
8.1.1	<i>Oscilación libre</i> .....	48
8.1.2	<i>Temperatura impuesta</i> .....	52
8.1.3	<i>Fachada Activa</i> .....	55
8.2	ANEXO B: MODELO TEÓRICO.....	58
8.2.1	<i>Coefficiente global de transferencia y área solar</i> .....	58
8.2.2	<i>Campo de temperaturas</i> .....	61
9	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>65</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

TABLA 1: EJEMPLO DE FICHA DE CALIBRACIÓN DE DIFERENTES SENSORES .....	7
TABLA 2: COEFICIENTES DE LA ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA INTERIOR .....	25
TABLA 3: COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DEL CALOR APORTADO.....	26
TABLA 4: COEFICIENTES RECALCULADOS DE LA TEMPERATURA INTERIOR SIN LA FACHADA ACTIVA .....	27
TABLA 5: RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LA TERCERA CAMPAÑA DE MEDICIONES .....	28
TABLA 6: RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LA TERCERA CAMPAÑA DE MEDICIONES .....	28
TABLA 7: RESUMEN RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	29
TABLA 8: PROPIEDADES DE LAS SUPERFICIES .....	32
TABLA 9: PROPIEDADES DEL VIDRIO SIMPLE .....	32
TABLA 10: VALORES DE LOS COEFICIENTES CONVECTIVOS .....	33
TABLA 11: NOMENCLATURA DE LAS TEMPERATURAS USADAS EN EL MODELO MATEMÁTICO.....	33
TABLA 12: RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	38
TABLA 13: COMPARACION RESULTADOS EXPERIMENTALES / Teóricos .....	38



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

FIGURA 1: EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE MURO TROMBE.....	3
FIGURA 2: VISTA DE LA FÁBRICA.....	5
FIGURA 3: COMPOSICIÓN DE LA CELDA DE ENSAYO .....	6
FIGURA 4: HORNO DE CALIBRACIÓN .....	7
FIGURA 5: SENSORES AIRE INTERIOR .....	8
FIGURA 6: SENSORES EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN.....	8
FIGURA 7: SENSORES SUPERFICIES INTERIORES .....	9
FIGURA 8: SENSORES ELEMENTO ACTIVO .....	9
FIGURA 9: PROTECCIÓN PARA SENSOR DE TEMPERATURA DE LA CÁMARA EXTERIOR .....	10
FIGURA 10: POWER METER PCE PA 6000.....	10
FIGURA 11: ESTACIÓN METEOROLÓGICA .....	11
FIGURA 12: SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ORDENADOR DE LA CELDA .....	11
FIGURA 13: CASETA EN MODO OSCILACIÓN LIBRE .....	14
FIGURA 14: CASETA EN MODO FACHADA ACTIVA.....	15
FIGURA 15: SUPERFICIES FACHADA SUR .....	31
FIGURA 16: LOCALIZACIÓN DE TEMPERATURAS .....	33
FIGURA 17: PUNTOS DE BALANCE DE ENERGÍA.....	34
FIGURA 18: BALANCE DE ENERGÍA CORRESPONDIENTE A LA EC. 1 .....	34
FIGURA 19: BALANCE DE ENERGÍA CORRESPONDIENTE A LA EC 2 Y 3 .....	35
FIGURA 20: BALANCE DE ENERGÍA CORRESPONDIENTE A LA EC.4.....	35
FIGURA 21: BALANCE DE ENERGÍA CORRESPONDIENTE A LAS EC.5 Y 6 .....	36
FIGURA 22: DIVISIONES DE LAS CÁMARAS DE AIRE .....	36



# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

GRÁFICA 1: COMPARACIÓN ENTRE PIRANÓMETROS .....	17
GRÁFICA 2: RADIACIÓN SOLAR / TEMPERATURA EXTERIOR .....	18
GRÁFICA 3: TEMPERATURAS INTERIOR / EXTERIOR .....	18
GRÁFICA 4: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA INTERIOR Y LA DE IMPULSIÓN .....	19
GRÁFICA 5: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA INTERIOR Y LA DE IMPULSIÓN (AMPLIADA) .....	20
GRÁFICA 6: EVOLUCIÓN DE TEMPERATURAS .....	20
GRÁFICA 7: FUNCIONAMIENTO CONTINUO DEL EQUIPO DE CLIMATIZACIÓN .....	21
GRÁFICA 8: EVOLUCIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y EL CALOR CEDIDO .....	21
GRÁFICA 9: EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS Y FUNCIONAMIENTO DE VENTILADORES .....	22
GRÁFICA 10: FUNCIONAMIENTO DE VENTILADORES .....	22
GRÁFICA 11: TEMPERATURAS DE LAS CÁMARAS DE AIRE .....	23
GRÁFICA 12: COMPARACIÓN DE LA ESTIMACIÓN CON LA REALIDAD .....	26
GRÁFICA 13: DIFERENCIA DE TEMPERATURA REAL / ESTIMADA .....	26
GRÁFICA 14: VARIACIÓN DE UA Y ÁREA SOLAR EN FUNCIÓN DE LAS SUBDIVISIONES .....	36
GRÁFICA 15: EVOLUCIÓN DEL CAMPO DE TEMPERATURAS .....	37
GRÁFICA 16: EVOLUCIÓN DEL U PARA DIFERENTES VELOCIDADES .....	40
GRÁFICA 17: EVOLUCIÓN DE U CON DIFERENTES VIDRIOS .....	41
GRÁFICA 18: EVOLUCIÓN DE U PARA DIFERENTES ESPESORES DE AISLAMIENTO (VELOCIDAD 1,5 M/s) .....	41
GRÁFICA 19: EVOLUCIÓN DE U PARA DIFERENTES ESPESORES (VELOCIDAD NULA) .....	42
GRÁFICA 20: EVOLUCIÓN DE U PARA DIFERENTES ESPESORES EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD .....	42
GRÁFICA 21: EVOLUCIÓN CAMPO DE TEMPERATURAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES .....	43
GRÁFICA 22: EVOLUCIÓN CAMPO DE TEMPERATURAS PARA DIFERENTES ESPESORES DE AISLAMIENTO (V=0 M/s) .....	44
GRÁFICA 23: EVOLUCIÓN CAMPO DE TEMPERATURAS PARA DIFERENTES ESPESORES DE AISLAMIENTO (V= 1,5 M/s) .....	44
GRÁFICA 24: EVOLUCIÓN CAMPO DE TEMPERATURAS SEGÚN TIPOLOGÍA DE VIDRIO .....	45
GRÁFICA 25: EVOLUCIÓN DEL ÁREA SOLAR PARA DIFERENTES VELOCIDADES .....	45
GRÁFICA 26: EVOLUCIÓN DEL ÁREA SOLAR CON DIFERENTES VIDRIOS .....	46
GRÁFICA 27: EVOLUCIÓN DEL ÁREA SOLAR PARA DIFERENTES ESPESORES EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD .....	46



$A_t$	Área total de la fachada sur
$A_{fs}$	Área solar de la fachada sur
$A_{f(X)}$	Área solar de la fachada X
$Q_{cv}$	Flujo de calor transmitido mediante convección
$Q_{rd}$	Flujo de calor transmitido mediante radiación
$E$	Espesor del material
$k$	Conductividad térmica del material
$\alpha$	Absortividad
$g$	Factor solar
$R_v$	Resistencia térmica del vidrio
$h_{crext}$	Coficiente convectivo – radiante con el exterior
$h_{ce}$	Coficiente convectivo en la cámara exterior
$h_{re}, h_{ri}$	Coficiente radiante en la cámara interior y exterior
$h_{ci}$	Coficiente convectivo en la cámara interior
$h_{crint}$	Coficiente convectivo – radiante en el interior
$T_{int}$	Temperatura en el interior de la celda de ensayo
$T_{sii}$	Temperatura de la superficie interior de la cámara interior
$T_{ai}$	Temperatura del aire de la cámara interior
$T_{sie}$	Temperatura de la superficie exterior de la cámara interior
$T_{sei}$	Temperatura de la superficie interior de la cámara exterior
$T_{ae}$	Temperatura del aire de la cámara exterior
$T_{see}$	Temperatura de la superficie exterior de la cámara exterior
$T_{ext}$	Temperatura del aire exterior





# 1 INTRODUCCIÓN

---

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.*

*- Isaac Asimov -*

**E**l cuidado por la energía y el confort ha estado ligado a la buena arquitectura desde tiempos inmemoriales. Las instalaciones, como consumidoras de energía y generadoras de confort han ido abarcando cada vez más elementos, y su demanda de energía y espacio no ha dejado de crecer.

Los romanos calentaban el suelo de las termas conduciendo el humo de la combustión de leña a través de cámaras situadas bajo el suelo. Este sistema será el precedente de lo que en la actualidad conocemos como suelos radiantes. En Irán, ya hacían uso del denominado “efecto botijo”, es decir, del enfriamiento adiabático del aire. Esto se conseguía mediante el uso de las corrientes de aire, por una zona baja se hacía pasar el aire fresco a través de una celosía de piedra por la cual caía agua, mientras que en la zona alta se colocaba una chimenea de una gran altura que permitía evacuar el calor del interior hacia el exterior.

Durante muchos siglos, el combustible era leña o carbón y se minimizaba su consumo mediante buenos planteamientos constructivos. Debido a las diferentes necesidades, según el clima del lugar, los sistemas fueron mejor o peor optimizados, por ejemplo, el rendimiento de la chimenea abierta, usual en climas mediterráneos, es bastante inferior a las estufas de tiros largos y serpenteantes que se usan en el centro y norte de Europa.

A lo largo del siglo XIX, tras el descubrimiento de la energía eléctrica, surgen una serie de inventos que facilitarían el confort humano, como lo son la bombilla incandescente, los ascensores, etc. A lo largo del siglo XX, las instalaciones van adquiriendo cada vez más importancia, mientras que las reglas básicas de buena orientación, aislamiento térmico adecuado, protección solar entre otros, se tienen cada vez menos en cuenta. Se establece el llamado “Estilo Internacional” que establece una arquitectura con planteamientos idénticos para cualquier parte del mundo, ignorando las peculiaridades climáticas de cada lugar. En esos años, con la energía derivada del petróleo a un precio muy bajo, se proyectaban los edificios dejando los espacios necesarios para instalar las diferentes máquinas que lo hicieran confortable, sin importar la potencia o el consumo energético.

A principios de los años setenta tiene lugar la primera crisis del petróleo, teniendo como efecto una mejora de las exigencias de aislamiento térmico de los edificios y aunque su impacto fue marginal aparece por primera vez el concepto de “Vivienda autosuficiente”, la cual incorpora tanto sistemas pasivos (mejores aislamientos, inercia térmica, etc) como activos (Muros Trombe, paneles solares térmicos, etc).

Hoy en día, donde el estándar de confort ha aumentado considerablemente en todos los niveles (climático, control de la iluminación, redes de comunicación, etc) han aparecido términos como “domótica” para expresar el control automático y a distancia de las instalaciones, por lo que el control de la energía se ha convertido en un factor estratégico, en especial para los países desarrollados con menores recursos energéticos derivados del petróleo como lo es Europa. Por eso, han sido pioneros en intentar racionalizar y minimizar el consumo y desarrollar las fuentes de energía renovables.

Para una optimización del consumo, la primera actuación será la arquitectónica en sus aspectos geométricos y materiales. Como ya hemos hablado anteriormente, se busca una orientación correcta, la posibilidad de ventilación natural eficaz, control solar adecuado, etc.

Es por todo ello, que hoy en día están vigentes diferentes técnicas enfocadas a la disminución del consumo energético. Por ejemplo:

- **Enfriamiento evaporativo:** Consiste en hacer circular una corriente de aire en contacto con una masa de agua, de modo que la evaporación del agua produce una disminución de las temperaturas de ambos. El aire enfriado contribuye a refrescar el edificio. La efectividad del enfriamiento evaporativo es muy alta, pero tiene grandes limitaciones: es necesario un ambiente suficientemente seco y exponer el agua a una corriente de aire. Dicha técnica puede materializarse de diversas formas: estanques y fuentes interiores o en patios, cubiertas inundadas, aspersión de agua en las cubiertas, etc.
- **Enfriamiento conductivo.** Se produce cuando los cuerpos pierden calor por conducción, para lo que es necesario contar con superficies frías en torno a alguno de los cerramientos.
  - Construcciones enterradas constituidas por muros fríos. Debido a que la temperatura del terreno está sometida a la influencia de las condiciones climáticas exteriores en las primeras decenas de metros y a la temperatura del centro de la tierra en las capas profundas. De las capas superficiales, las exteriores se ven afectadas por las variaciones diarias, mientras que las que se ubican a continuación sólo se ven perjudicadas por las variaciones anuales. Un edificio enterrado es el edificio bioclimático por excelencia, ya que se protege de las inclemencias del clima y de las fluctuaciones de temperatura y los consumos energéticos son significativamente bajos (las temperaturas son más favorables que las exteriores y estables); sin embargo, presenta un inconveniente, es difícil que se acepte un edificio que no se verá nunca
  - Conductos enterrados. Se basan en aprovechar la inercia del terreno y la temperatura baja y estable que se alcanza a poca profundidad. Se hace pasar una corriente de aire durante suficiente tiempo por un conducto enterrado, con lo que ésta alcanzará la temperatura del terreno y podrá impulsarse refrigerado al interior del edificio. Tiene una serie de limitaciones, como son la necesidad de un espacio exterior, en el cual enterrar el conducto, y un ventilador, que impulse el aire a una velocidad estable
- **Enfriamiento convectivo.** Se alcanza empleando directamente masas de aire frío. Un ejemplo es la entrada de aire en las grandes cuevas naturales que se embolsa y enfría espontáneamente y las poblaciones situadas sobre ellas, que toman ese aire frío a través de rejillas. Otro son los sistemas de enfriamiento nocturno que aprovechan, por un lado, el enfriamiento por radiación nocturna (originado por la radiación térmica de las superficies del edificio hacia el exterior) y, por otro, la menor temperatura del aire nocturno (ventilación inducida nocturna), o la combinación de ambos. Este sistema se usa para enfriar el edificio o una masa de almacenamiento térmico, de manera que estén preparados para aceptar parte del calor que se genere durante el día. La ventilación nocturna consigue el enfriamiento directo del aire, su acumulación en la masa del edificio e incluso la reducción de la sensación de calor de 2 grados centígrados (efecto de pared fría) con relación al muro convencional.
- **Enfriamiento radiante.** Puede obtener una fuente de enfriamiento natural gracias a la transferencia de calor por radiación. Puede producirse mediante techos fríos, cubiertas húmedas, patios y fachadas radiantes.

En este estudio se tratará de caracterizar experimentalmente una innovación del conocido Muro Trombe, el cual es una fachada radiante. La idea original de este principio fue explorada por Edward S. Morse, pero no fue hasta 1960 que el ingeniero Félix Trombe y el arquitecto Jacques Michel adaptaron el sistema a la edificación. De los apellidos de estos dos franceses procede el nombre completo de este sistema, Muro Trombe-Michel.

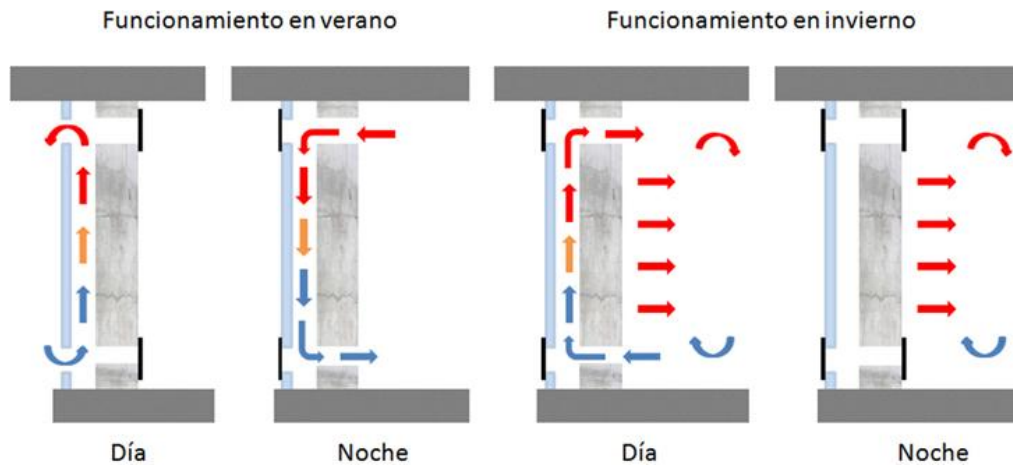


Figura 1: Ejemplo de funcionamiento de Muro Trombe

Durante el día, los rayos del sol atraviesan la lámina de vidrio calentando la superficie oscura del muro y almacenando el calor en la masa térmica de este. En la noche, el calor se escapa del muro tendiendo a enfriarse principalmente hacia el exterior. Pero como se encuentra con la lámina de vidrio (es semiopaca a la radiación infrarroja) el calor es entregado al interior del local. Debido a esto la temperatura media diaria del muro es sensiblemente más alta que la media exterior. Si la superficie vidriada es mejorada en su aislamiento térmico (mediante doble o triple vidrio) la pérdida de calor hacia el exterior es mucho menor elevando la temperatura del local a calentar.



## 2 DESCRIPCIÓN DE LA CELDA DE ENSAYO

---

*Si lo que quieres es encontrar los secretos del universo,  
piensa en términos de energía, frecuencia y vibración.*

*- Nikola tesla -*

**E**n este segundo apartado de la memoria se expondrá una breve descripción de la celda de ensayo, abarcando su localización, sus características constructivas, así como el lugar donde se sitúan cada uno de los diferentes sensores de temperatura instalados dentro de la celda con el objetivo de tener una mejor información de las temperaturas existentes en la celda en diferentes puntos de la misma.

### Localización

La celda de ensayo consiste en una caseta de hormigón situada en una fábrica de cemento, perteneciente al Grupo Cementos Portland Valderrivas, cercana a Sevilla, concretamente en la localidad de Alcalá de Guadaira.



*Figura 2: Vista de la fábrica*

Alcalá de Guadaira cuenta con un clima cálido, siendo los veranos calurosos y con pocas precipitaciones, y los inviernos suaves y relativamente húmedos. El clima es uniforme en todo el término municipal. La temperatura media anual puede estimarse en 17,7 grados con máximas que pueden llegar a alcanzar los 42 grados y mínimas de -2 grados. La media de las temperaturas máximas es de 36 grados y la de las mínimas de 4 grados.

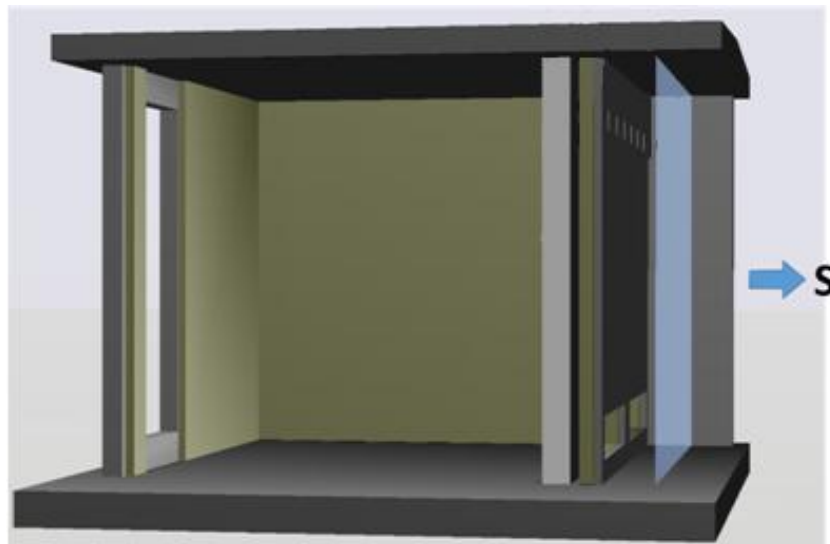
## Dimensiones y composición de la celda de ensayo

La celda de ensayo posee unas dimensiones de 2.90 m de ancho, 2.40 m de alto y 2.40 m de profundidad. Sus diferentes fachadas se encuentran orientadas según los cuatro puntos cardinales. En este ensayo, la fachada con el elemento activo se encuentra concretamente en la orientación sur.

Dividimos en tres grupos las diferentes fachadas según su composición. Los principales materiales de construcción por los que se encuentran formadas las diferentes capas de la celda de ensayo son hormigón de 2 500 kg/m<sup>3</sup> de densidad y poliestireno de 1.04 kg/m<sup>3</sup> de densidad.

- Fachada Norte, Este y Oeste: Estas fachadas se encuentran formadas por dos capas diferentes. La capa exterior consiste en una capa de hormigón de unos 12 centímetros de espesor. La capa interior es una capa de unos 8 centímetros de espesor de poliestireno.  
En la fachada norte además está situada la puerta de entrada a la celda de ensayo.
- Techo: Al igual que el anterior grupo, el techo está formado por dos capas de aislamiento. La capa exterior es de hormigón con un espesor de 12 centímetros. Mientras que la capa interior es de poliestireno expandido con un espesor de 5 centímetros.
- Fachada Sur: En esta fachada se encuentra situado el elemento activo cuyo beneficio se tratará de estudiar en esta memoria. Se nombran a continuación las diferentes capas que forman dicha fachada, empezando desde el interior hacia el exterior. La primera capa está formada por hormigón de unos 16 centímetros de espesor, seguido de una cámara de aire de 5 centímetros. A continuación, le siguen dos capas adicionales, una de poliestireno de 8 centímetros y una de hormigón de 12 centímetros. Estas dos capas poseen varios orificios, tanto en la parte superior como en la parte inferior, que comunican la cámara de aire exterior y la cámara interior. Finalmente, se encuentra la cámara de aire exterior de 5 centímetros de espesor y una hoja acristalada con vidrio simple.

A continuación, en la *figura 3*, podemos ver una vista general de cómo es la celda de ensayos que se ha descrito anteriormente.



*Figura 3: Composición de la celda de ensayo*

## Equipos de medida de temperatura

Para la obtención de las diferentes medidas experimentales, con el fin de evaluar el ahorro energético del elemento activo, la celda de ensayo cuenta con los sensores instalados en los puntos que se detallaran a continuación. Los sensores son termopares del tipo T. Estos termopares se conectan a un sistema de adquisición de datos CompaqDAQ de National Instruments con lo que se obtiene una precisión de 0.8°C.

Antes de comenzar con las campañas de mediciones, todos los termopares fueron calibrados mediante un horno de calibración de la marca Adler, como el que se puede ver en la *figura 4*. El proceso de calibración seguido consiste en registrar el valor que mide el termopar en varios puntos de temperaturas fijados mediante el horno, en un rango de cero a cuarenta grados centígrados, para posteriormente sacar la curva exacta del termopar. En la siguiente *tabla 1*, se pueden ver los resultados obtenidos para algunos de los sensores calibrados.

Temperatura fijada	1 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Sensor 1	0.76	9.73	19.71	29.70	39.60
Sensor 2	0.65	9.61	19.60	29.61	39.53
Sensor 3	0.58	9.55	19.55	29.55	39.47
Sensor 4	0.56	9.52	19.51	29.50	39.40
Sensor 5	1.92	10.86	20.84	30.80	40.77

*Tabla 1: Ejemplo de ficha de calibración de diferentes sensores*

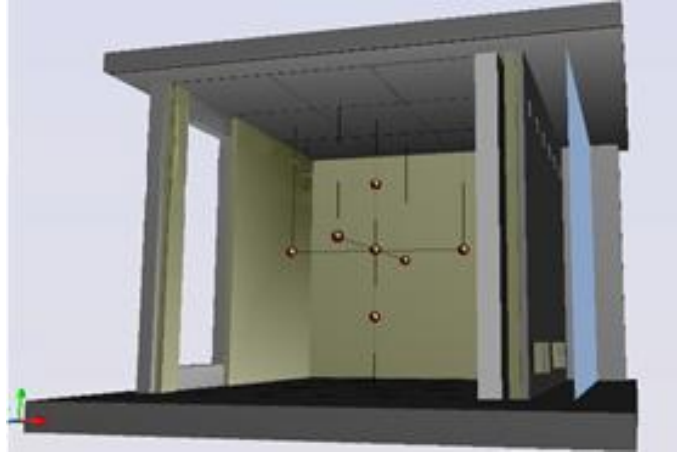


*Figura 4: Horno de calibración*

Una vez conocidos los parámetros de dicha curva, todos los datos registrados de las diferentes campañas de mediciones fueron corregidos mediante un ajuste lineal.

### 2.1.1 Temperatura interior

Para la determinación de la temperatura interior tenemos situados siete puntos de medida de temperatura, los cuales fueron distribuidos en la forma que se muestra en la *figura 5*, con el objetivo de registrar posibles diferencias de temperatura dentro del volumen de aire interior, favorecidas por diferentes fenómenos como la estratificación, de tal forma que se obtiene una temperatura media interior representativa.

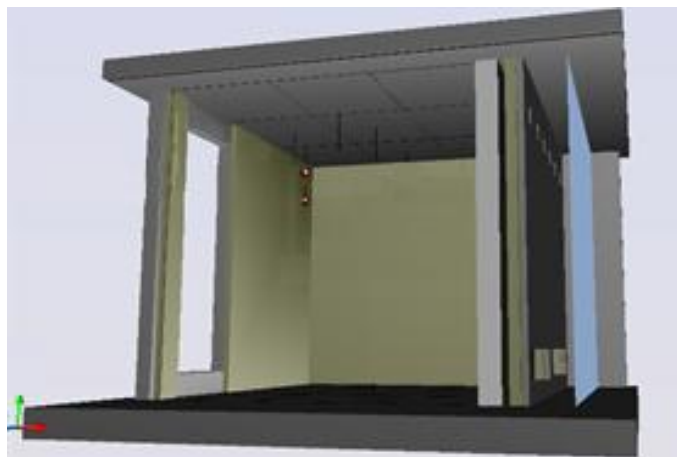


*Figura 5: Sensores aire interior*

Finalmente, se optó por utilizar únicamente tres de esos siete puntos de medidas, concretamente los tres puntos colocados sobre el eje vertical debido a que no se registraron diferencias importantes de temperaturas en el plano horizontal.

### 2.1.2 Calor cedido por equipo de climatización

Para evaluar el calor aportado por la bomba de calor, se colocó un punto de medida de temperatura a la entrada y otro a la salida del aire de dicho equipo, de tal forma que se midiese el incremento de temperatura que sufre el aire como consecuencia de su paso a través del equipo de climatización. Como se puede ver en la *figura 6*, el equipo de climatización se encuentra instalado en la esquina noreste de la celda de ensayo.



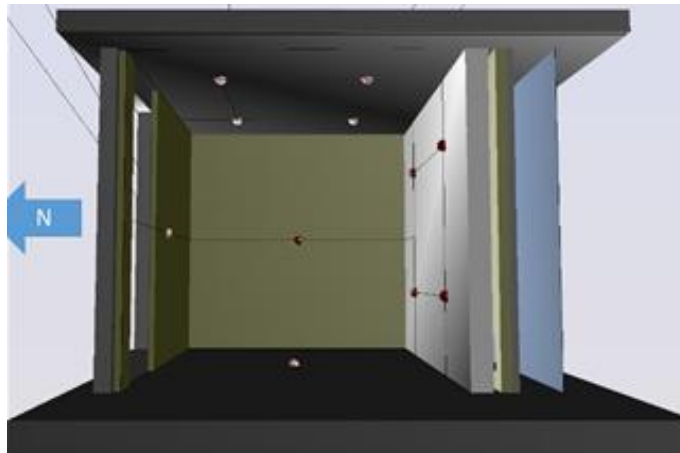
*Figura 6: Sensores equipos de climatización*

### 2.1.3 Temperatura superficies interiores

Las temperaturas superficiales de las paredes interiores fueron tomadas en los puntos mostrados en la *figura 7*. En el muro sur y el techo se colocaron cuatro sensores y en el resto de las superficies interiores, sólo uno. La diferencia en el número de sensores de temperatura en cada una de las superficies está motivada por los gradientes térmicos que se presentan en cada una de ellas. Estos gradientes térmicos fueron detectados por medio de termografías realizadas a cada una de las superficies. Se encontró que estos gradientes térmicos son apreciables en el muro sur y en el techo. La razón es que el muro sur limita con una cámara de aire que puede



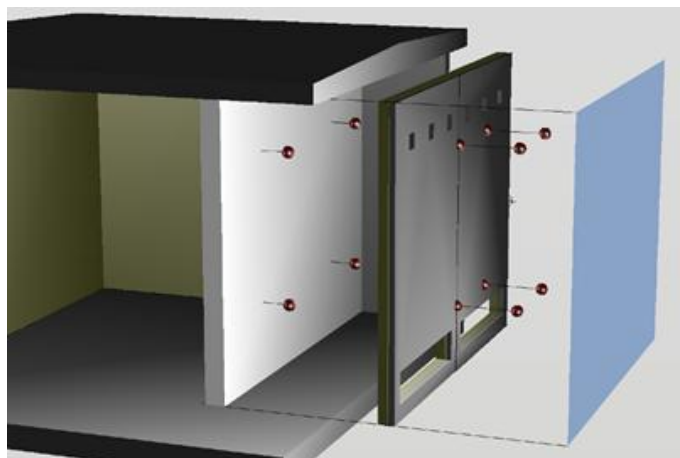
presentar un gradiente térmico importante, bien sea por estratificación del aire cuando este no circula, o por variación de temperatura en la dirección del movimiento del aire cuando este circula. En el caso del techo, se tiene que este presenta una ligera inclinación que lo hace no homogéneo. Por el contrario, las demás paredes son uniformes por lo que no presentan gradientes térmicos importantes.



*Figura 7: Sensores superficies interiores*

#### 2.1.4 Temperaturas del elemento activo

En el elemento activo, se colocaron cuatro sensores de temperatura en la cámara de aire interior, cuatro en la superficie opaca exterior y cuatro en la cámara de aire exterior (formada por la superficie opaca y el vidrio simple) tal como se muestra en la *figura 8*.



*Figura 8: Sensores elemento activo*

Debido a que los sensores de temperatura de la superficie exterior y los de la temperatura de aire en la cámara estarán expuestos a la radiación solar, se protegieron de la forma que se muestra en la *figura 9*.



*Figura 9: Protección para sensor de temperatura de la cámara exterior*

Los sensores de superficie fueron cubiertos por una fina capa de cemento de color similar al del hormigón con el fin de que las propiedades radiantes de esta capa protectora fueran los más parecidas posibles a la del hormigón.

Los sensores de temperatura de aire de la cámara exterior se colocaron dentro de un pequeño tubo de aluminio que se protegió con una capa de aislamiento reflectante (bajo emisivo) y se le colocó un pequeño ventilador en un extremo para conseguir un flujo de aire forzado. Con esto se consigue que la transferencia de calor entre el aire y el sensor de temperatura por convección sea mucho mayor que la transferencia de calor por radiación, además, la temperatura superficial interior del tubo de aluminio será cercana a la del aire, de tal manera que el efecto de la radiación solar sobre el sensor de temperatura es despreciable.

## Otros equipos

Dentro de la celda de ensayo se encuentran otros equipos con diferentes funciones. Por ejemplo, la circulación de aire entre la cámara interior y la cámara exterior se ve favorecida por la colocación de seis ventiladores en la parte superior, de tal forma que el flujo de aire circula de forma descendente en la cámara interior. Los ventiladores son modelos Sunon 2123HBL, los cuales tienen un flujo máximo de  $147 \text{ m}^3/\text{h}$ . La medición de los flujos y velocidades de aire tanto en la cámara ventilada como en la unidad interior de la bomba de calor, se realizó de manera puntual, es decir, no se hizo un registro continuo de esta variable, entre otras razones, porque estos flujos de aire tienen siempre casi el mismo valor, dado que son impulsados por ventiladores que trabajan casi en las mismas condiciones. Para esta medición se utilizaron dos anemómetros portátiles, uno de turbina y otro de hilo caliente.

Como se detallará en el apartado 3.2, para uno de los experimentos se necesitará de un equipo de calefacción. En concreto, en la celda de ensayo se encuentra instalado una bomba de calor tipo Split con una potencia de refrigeración de 900 a 3 000 W y con una potencia de calefacción de 900 a 3 600 W.

La medición del consumo de energía eléctrica se realizará con un power meter PCE PA 6000 como el que se muestra en la figura 10.



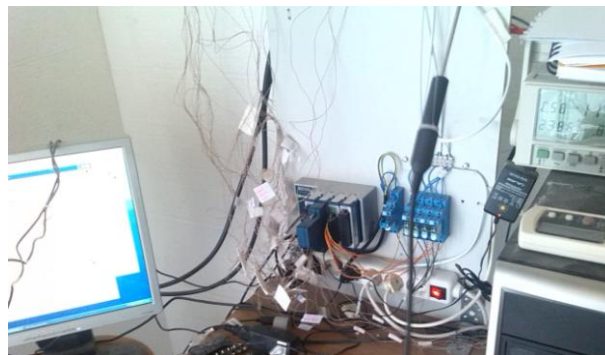
*Figura 10: Power meter PCE PA 6000*

Los datos de condiciones exteriores se registraron mediante una Weather Station WatchDog 2000, instalada en la parte superior de la caseta tal como se muestra en *figura 11*. En ella se puede ver como se dispone tanto de un piranómetro vertical orientado hacia el sur, como un piranómetro horizontal. Los datos que fueron registrados por esta estación meteorológica son: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad, dirección del viento, precipitación, radiación global sobre superficie horizontal y radiación global sobre superficie sur.



*Figura 11: Estación meteorológica*

El registro de todas las variables medidas se realizó mediante un sistema de adquisición de datos conectado directamente a un ordenador situado en el interior de la celda de ensayo. A dicho sistema de adquisición se conectaban todos los sensores anteriormente mencionados y sus valores se podían leer y almacenar de forma remota ya que el ordenador se encontraba también conectado a internet.



*Figura 12: Sistema de adquisición y ordenador de la celda*



## 3 CAMPAÑA DE MEDICIONES

---

*Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.*

*- Theodore von Karman -*

**D**urante la campaña de mediciones se tratará de caracterizar el comportamiento de la celda de ensayo. Estas campañas se desarrollarán entre los meses de diciembre y febrero, debido a que a pesar de que el elemento activo el cual es objeto de este estudio posee tanto un modo de funcionamiento para verano, como un modo de funcionamiento para el periodo de invierno, solo se tratará de caracterizar el elemento activo para el periodo invernal. Durante este periodo de adquisición de datos experimentales, se pueden distinguir tres campañas de mediciones diferentes, con el objetivo posteriormente de establecer los parámetros característicos pertenecientes a la celda de ensayo. Las diferentes campañas que nos vamos a encontrar se han denominado de la siguiente manera:

- Oscilación libre
- Temperatura impuesta
- Fachada activa

En este apartado sólo se enfocará en la descripción de las diferentes campañas antes mencionadas. Los resultados que fueron obtenidos durante estas tres campañas de mediciones serán presentados en el *apartado 4* de esta memoria, con sus respectivos comentarios. Una mayor recopilación de los diferentes datos recogidos de podrá ver en el *anexo A*.

### Oscilación libre

Durante esta campaña de ensayos la fachada sur, que posteriormente funcionará con el elemento activo en cuestión, se compone de un muro exterior, seguido de una pequeña cámara de aire de unos cinco centímetros de espesor, y finalmente un muro interior. Durante esta primera campaña de mediciones, esta fachada se comporta como un muro con una cámara de aire no ventilada en su interior de tal forma que actuará como un simple muro convencional. El aspecto que mantiene la celda de ensayo durante la campaña se puede apreciar en la *figura 13*.



*Figura 13: Caseta en modo oscilación libre*

Tanto los seis orificios situados en la parte superior de la fachada sur, en los cuales se encuentran instalados los ventiladores, que moverán el flujo de aire en la cámara interior durante la tercera de las campañas de mediciones, como los dos orificios inferiores que permiten la circulación de aire entre la cámara exterior e interior se encuentran sellados durante esta campaña de mediciones, por lo que la cámara de aire interior será completamente estanca.

El objetivo de esta campaña de mediciones es establecer el comportamiento de la caseta sin la acción del elemento activo que se pretende evaluar, de tal manera que se pueda establecer un modelo con el cual determinar la respuesta de la caseta bajo cualquier condición climática.

Esta campaña se inició el día 3 de diciembre de 2015 y permaneció activa hasta el día 20 de diciembre de 2015, es decir, estuvo recogiendo datos durante un total de diecisiete días consecutivos.

La adquisición de datos durante este periodo de tiempo se realizaba con un intervalo de tiempo de unos cinco minutos, recogándose un total de 5 243 mediciones de cada uno de los diferentes sensores instalados en la celda de ensayo. A la hora de trabajar posteriormente con estos datos serán procesados de forma que estarán en base horaria y en base diaria, para poder obtener los diferentes parámetros a calcular

## Temperatura impuesta

Esta campaña de medición se caracteriza por tener la temperatura del interior de la celda establecida en un valor fijo mediante el uso de la bomba de calor instalada en la celda. La temperatura elegida es de treinta y dos grados centígrados. En cuanto a la composición de la fachada sur, será exactamente igual a la comentada en la anterior campaña.

El objetivo de esta campaña, consiste en determinar el valor del coeficiente global de transferencia junto con el área total de la celda ( $UA$ ) con el fin de estimar las diferentes pérdidas de energía que se producen dentro de la celda de ensayo.

$$Q = UA \cdot \Delta T$$

Donde el calor cedido, es medido experimentalmente mediante los sensores colocados a la entrada y a la salida de la bomba de calor. El incremento de temperatura será el valor de temperatura fijado menos la temperatura que tendría la celda de ensayo si el aparato de climatización no estuviese en funcionamiento. Como obtener esta temperatura ficticia se explicará en los siguientes apartados de esta memoria.

Esta campaña se inició el día 20 de diciembre de 2015 y se mantuvo activa hasta el día 07 de enero de 2016,

abarcando un total de dieciocho días. Los datos durante este periodo se recogieron cada intervalo de treinta segundos, debido a que el periodo de arranque-parada del equipo de climatización es de ese orden de magnitud, por lo que para que quedasen reflejados dichos cambios de temperatura, se debía tener ese intervalo tan bajo de tiempo. En total, durante esta campaña de mediciones se recogieron unas 47 334 medidas para cada uno de los sensores. Como ya se ha comentado anteriormente, estos datos serán procesados y transformados a base horaria y diaria para posteriormente trabajar con ellos.

## Fachada activa

Finalmente, en esta tercera campaña de mediciones se instaló y se pusieron en funcionamiento los diferentes elementos que forman parte del elemento innovador con el objetivo de aumentar el área solar de la celda de ensayo. Los diferentes elementos que forman la fachada activa son una capa de vidrio simple, la cual forma una cámara de aire de unos cincuenta centímetros de espesor con el anterior muro exterior y unos seis ventiladores situados en la parte superior de la fachada sur que permite la circulación de aire entre cada una de las dos cámaras que ahora forman parte de la fachada sur. El aspecto final de la celda de ensayo se puede ver en la siguiente *figura 14*.



*Figura 14: Caseta en modo fachada activa*

El objetivo de esta campaña consiste en establecer una comparación de los parámetros característicos de la celda de ensayo, como lo es por ejemplo el área solar, con respecto a los obtenidos durante la primera de las campañas.

El periodo de esta campaña está comprendido entre el día 07 de enero de 2016 y el día 26 de febrero de 2016, abarcando un total de 50 días. Durante este periodo, al igual se hizo durante la primera campaña de mediciones, los datos fueron adquiridos en intervalos de cinco minutos, obteniéndose un total de 14 374 medidas para cada uno de los diferentes sensores instalados en la celda de ensayo.





# 4 PRESENTACIÓN DE MEDIDAS OBTENIDAS

*Lo mismo que el hierro se oxida por falta de uso y el agua estancada se vuelve putrefacta, también la inactividad destruye el intelecto.*

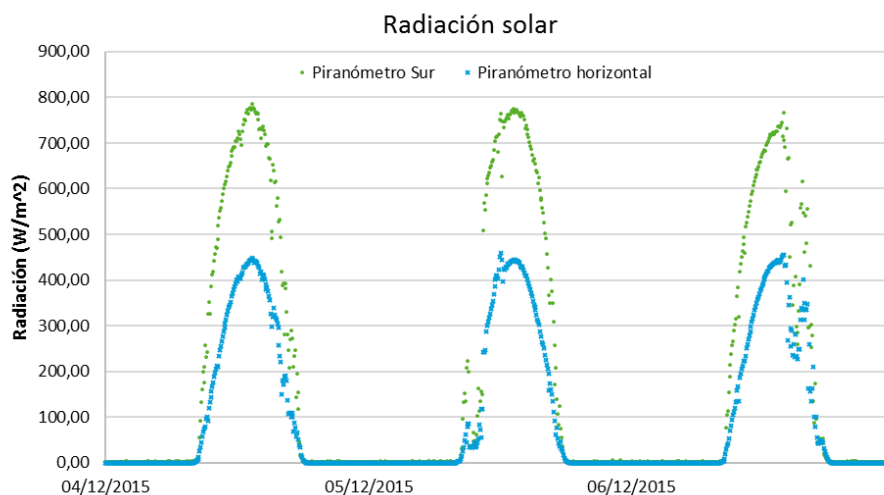
*- Leonardo da Vinci-*

En este apartado de la memoria, se realizará un breve análisis de los resultados obtenidos directamente de las mediciones experimentales, durante las tres diferentes campañas antes mencionadas. Por lo tanto, no será objeto de este apartado realizar los diferentes cálculos para la caracterización del modelo experimental del elemento innovador de la fachada.

Con el propósito de ampliar la información mostrada referida a las diferentes medidas obtenidas durante las campañas de mediciones, se recogen además en el *Anexo A*, donde se pueden ver las diferentes gráficas para un periodo de tiempo mayor.

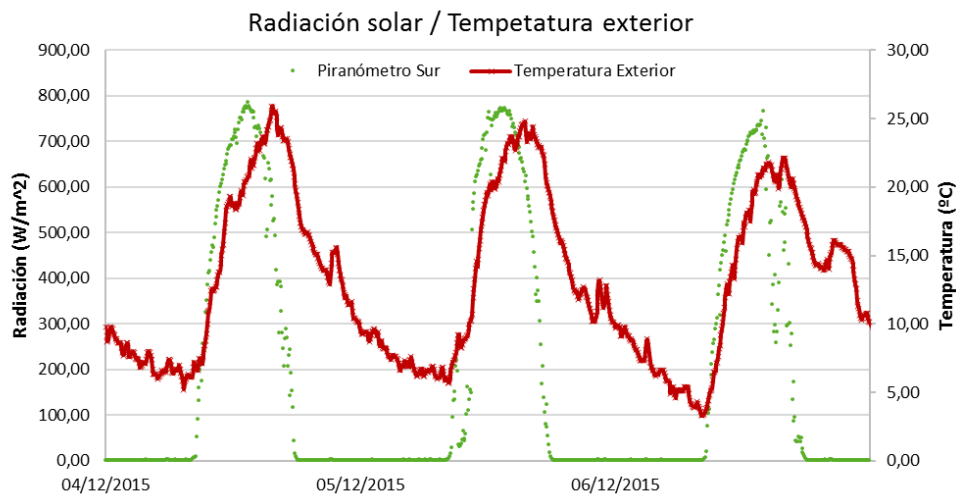
## Oscilación libre

En primer lugar, se quiso comprobar la correcta calibración de ambos piranómetros, uno situando según la orientación sur, y otro según la orientación horizontal. Para ello se comprobó que sendos piranómetros seguían el mismo patrón de radiación, difiriendo en el valor de radiación ( $W/m^2$ ) ya que, en el mes de diciembre, en el hemisferio norte, los rayos del sol inciden con mayor inclinación que durante el verano. Por ese motivo, el sensor de radiación colocado verticalmente, orientado hacia el sur, recogerá valores más altos de radiación que el sensor colocado horizontalmente, tal y como se puede apreciar en la *gráfica 1*.



Gráfica 1: Comparación entre piranómetros

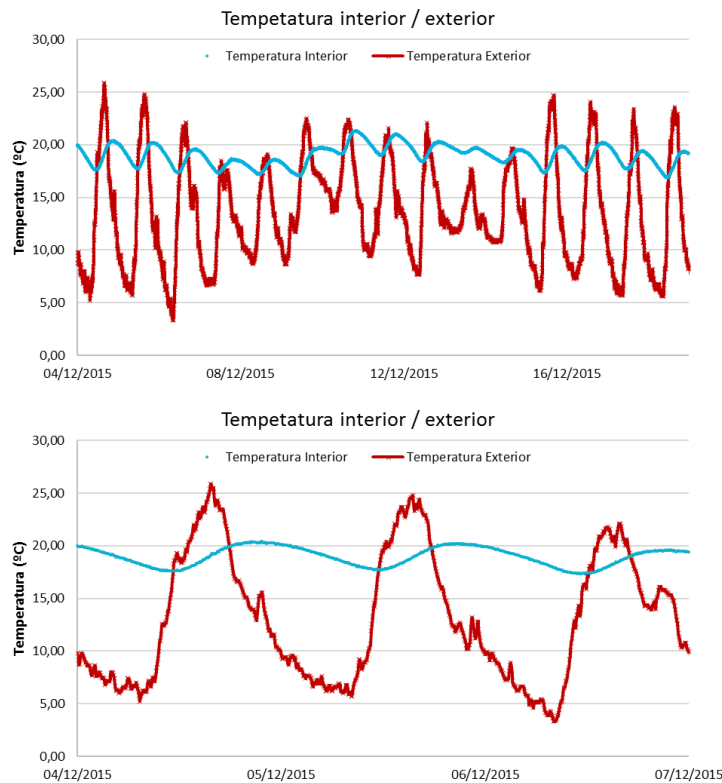
En la siguiente gráfica, en la cual se muestra la temperatura del aire exterior y la radiación solar que capta el piranómetro sur, con el fin de determinar el desfase entre el máximo valor de ambos parámetros.



**Gráfica 2: Radiación solar / Temperatura exterior**

Analizando los datos correspondientes a la *gráfica 2*, se observa que el máximo de radiación solar, según la orientación Sur, durante este periodo de diecisiete días se alcanza sobre las 13: 25 h, apreciándose el máximo de temperatura del aire exterior unas dos horas aproximadamente después, es decir sobre las 15: 30 h.

De igual forma, se tratará de determinar a continuación, el retraso que sufre el máximo de temperatura del aire interior respecto al máximo del aire exterior, el cual ya se ha determinado la hora aproximada a la que se produce. Para ello se muestra seguidamente la *gráfica 3*.

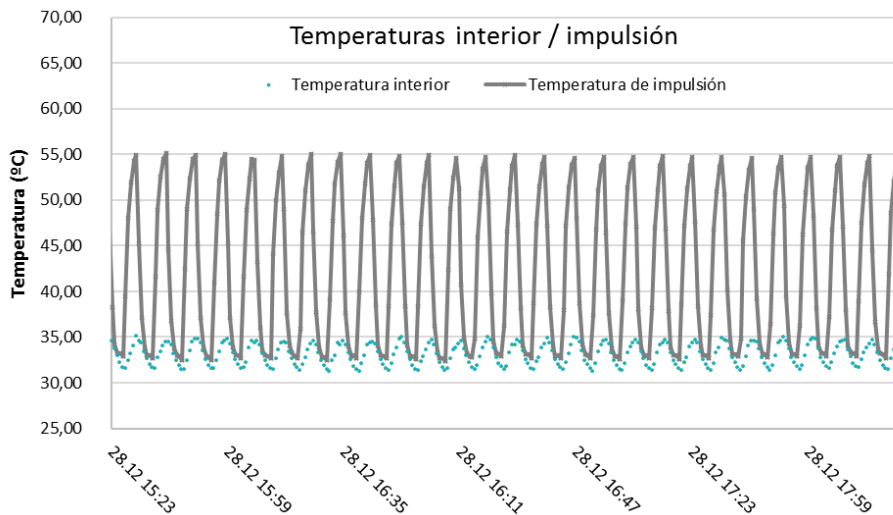


**Gráfica 3: Temperaturas interior / exterior**

Como se puede apreciar en la evolución de ambas temperaturas, la temperatura interior tiene una oscilación mucho inferior que la temperatura exterior, debido a la inercia térmica que presenta la celda de ensayo. El máximo de temperatura interior se suele producir aproximadamente sobre las 19:30 h, es decir, unas cuatro horas después del máximo de temperatura exterior y unas seis horas del máximo de radiación.

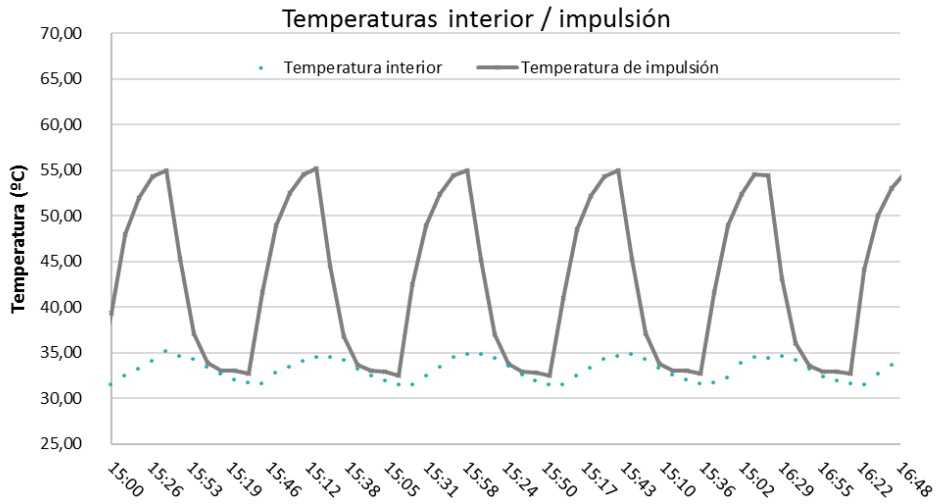
## Temperatura impuesta

En este periodo de tiempo que abarca desde el 21 de diciembre hasta el 07 de enero, al igual que se comentó en el apartado anterior, el desfase entre el máximo de radiación solar y el máximo de temperatura del aire exterior sigue siendo de unas dos horas aproximadamente, aunque ambos máximos se alcanzan un poco antes que en el periodo previo (alrededor de la 13:05 h y 15:10 h respectivamente). En cambio, la temperatura del aire de la celda de ensayo no tendrá ningún máximo absoluto durante el día, sino que su temperatura será prácticamente constante ya que se encuentra fijada por el equipo de climatización. Esta temperatura no es completamente constante debido a la pequeña histéresis que dispone la bomba de calefacción para evitar los continuos arranque-paradas del equipo. En la *gráfica 4* se puede apreciar este fenómeno, y ver como la temperatura interior sufre pequeñas oscilaciones.



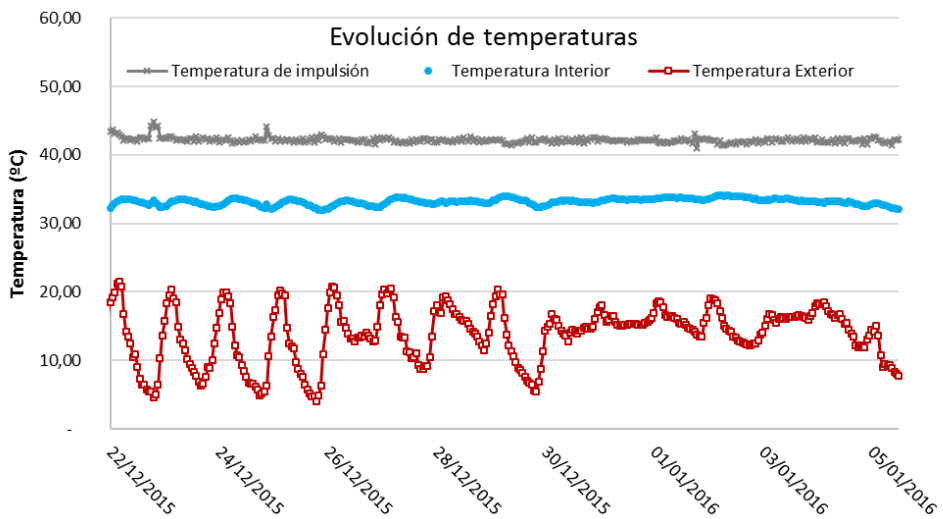
**Gráfica 4: Evolución de la temperatura interior y la de impulsión**

En la *gráfica 5* podemos apreciar un periodo de tiempo ampliado de la *gráfica 4*, observando que el desfase entre el máximo de la temperatura de impulsión y el máximo de la temperatura del aire interior es de aproximadamente unos treinta segundos, por lo que el tiempo de histéresis del equipo de climatización es de un minuto. También podemos observar como la temperatura de impulsión varía entre 33 °C, el equipo se encuentra parado y por eso se iguala a la temperatura del aire interior, y 55 °C que es la temperatura máxima que alcanza el equipo antes de volver a parar. Por otro lado, la temperatura del aire interior de la celda de ensayo varía entre los 31 °C como límite inferior y los 35 °C como límite superior, siendo de 33 °C la temperatura impuesta al equipo de climatización.



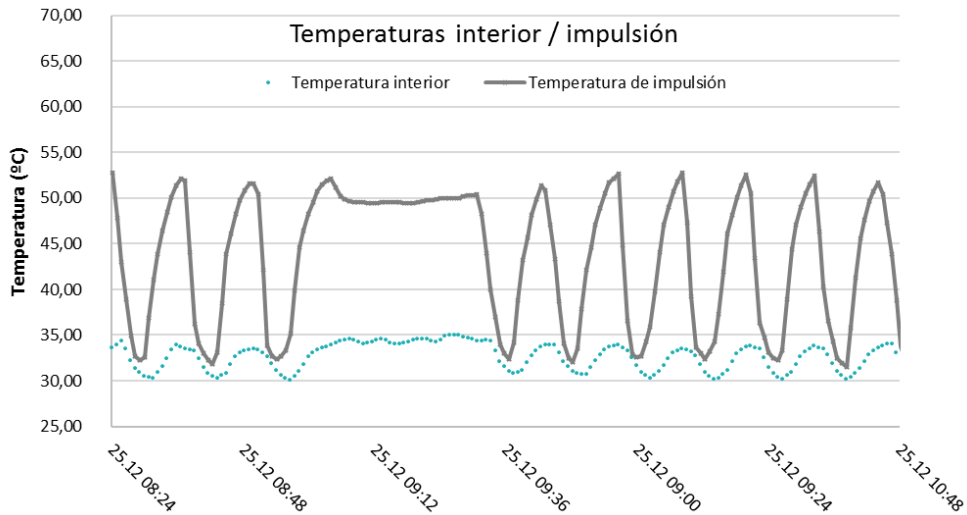
Gráfica 5: Evolución de la temperatura interior y la de impulsión (ampliada)

A continuación, se procede a presentar la evolución de las tres principales temperaturas de esta campaña de mediciones (interior, impulsión y exterior) en la *gráfica 6*. Debido a la gran cantidad de datos almacenados durante el periodo, se mostrarán una vez convertidos a base horaria.



Gráfica 6: Evolución de temperaturas

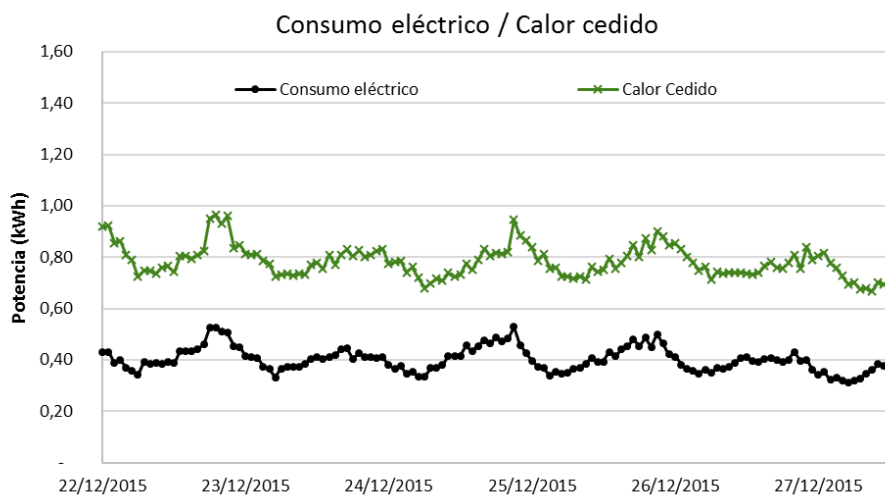
Cabe destacar, que las pequeñas desviaciones que se aprecian en la temperatura de impulsión son debidas a un mayor periodo de funcionamiento del equipo de climatización sin que este desconecte, resultando la temperatura promedio durante esa hora mayor al resto. Se puede ver con mayor claridad en la *gráfica 7*.



**Gráfica 7: Funcionamiento continuo del equipo de climatización**

Volviendo a la *gráfica 6*, se puede apreciar cómo tanto la temperatura interior y la temperatura de impulsión permanecen prácticamente constantes a lo largo del periodo de la campaña de mediciones. En cambio, la temperatura exterior sigue una evolución arbitraria en función de las condiciones climatológicas existentes, esto supondrá que el calor aportado por el equipo de climatización a la celda de ensayo no sea constante a lo largo del tiempo.

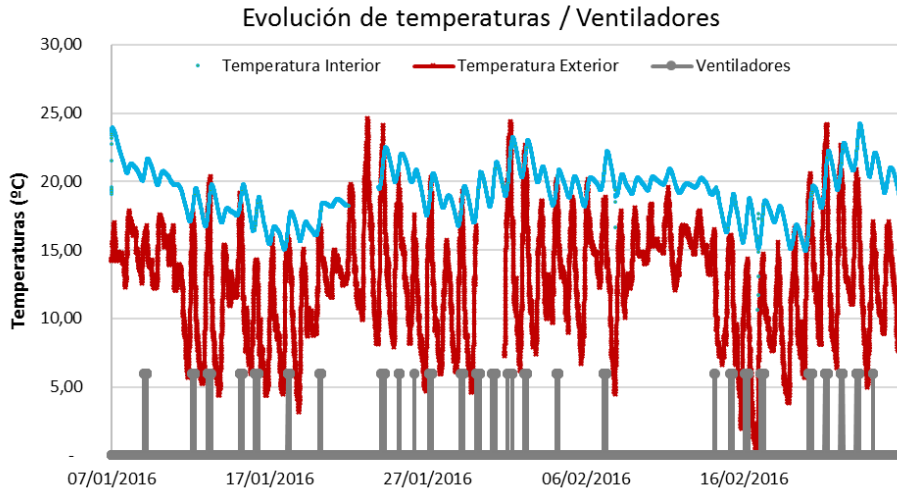
Se muestra en la *gráfica 8*, como varían tanto el consumo eléctrico medido del equipo de climatización y el calor aportado a la celda de ensayo durante uno de los periodos de tiempo de esta segunda campaña, siendo este último mayor debido a que el COP es mayor que la unidad. La evolución de ambos parámetros es similar, implicando que el COP de la máquina se mantiene prácticamente constante a pesar del cambio de las condiciones exteriores.



**Gráfica 8: Evolución del consumo eléctrico y el calor cedido**

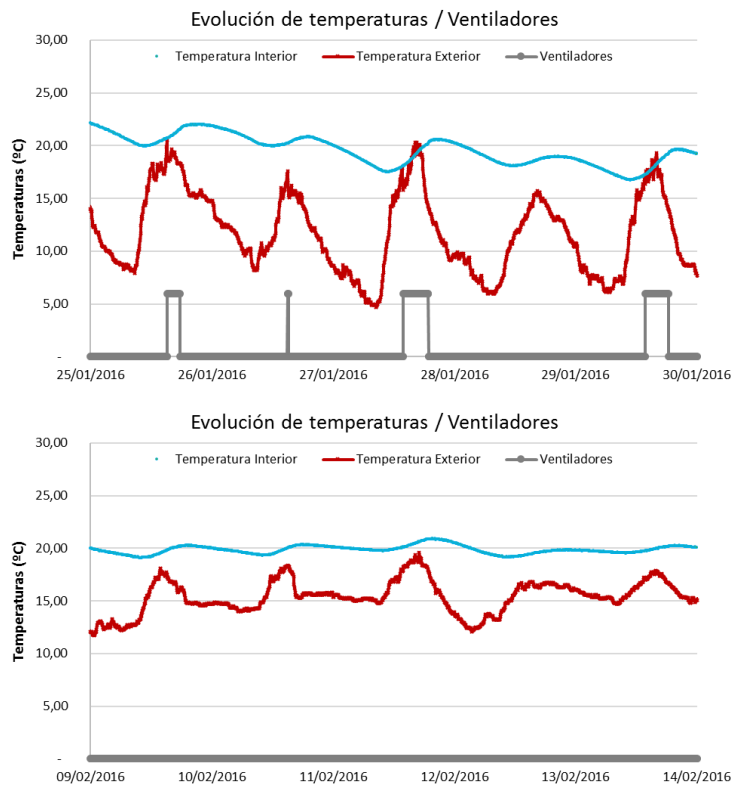
## Fachada activa

Finalmente, se procederá a exponer los resultados medidos durante la tercera y última campaña experimental. La principal característica de esta campaña consiste, además de la instalación del vidrio simple como una capa más de la fachada sur, en la activación de los ventiladores instalados entre las capas de dicha fachada.



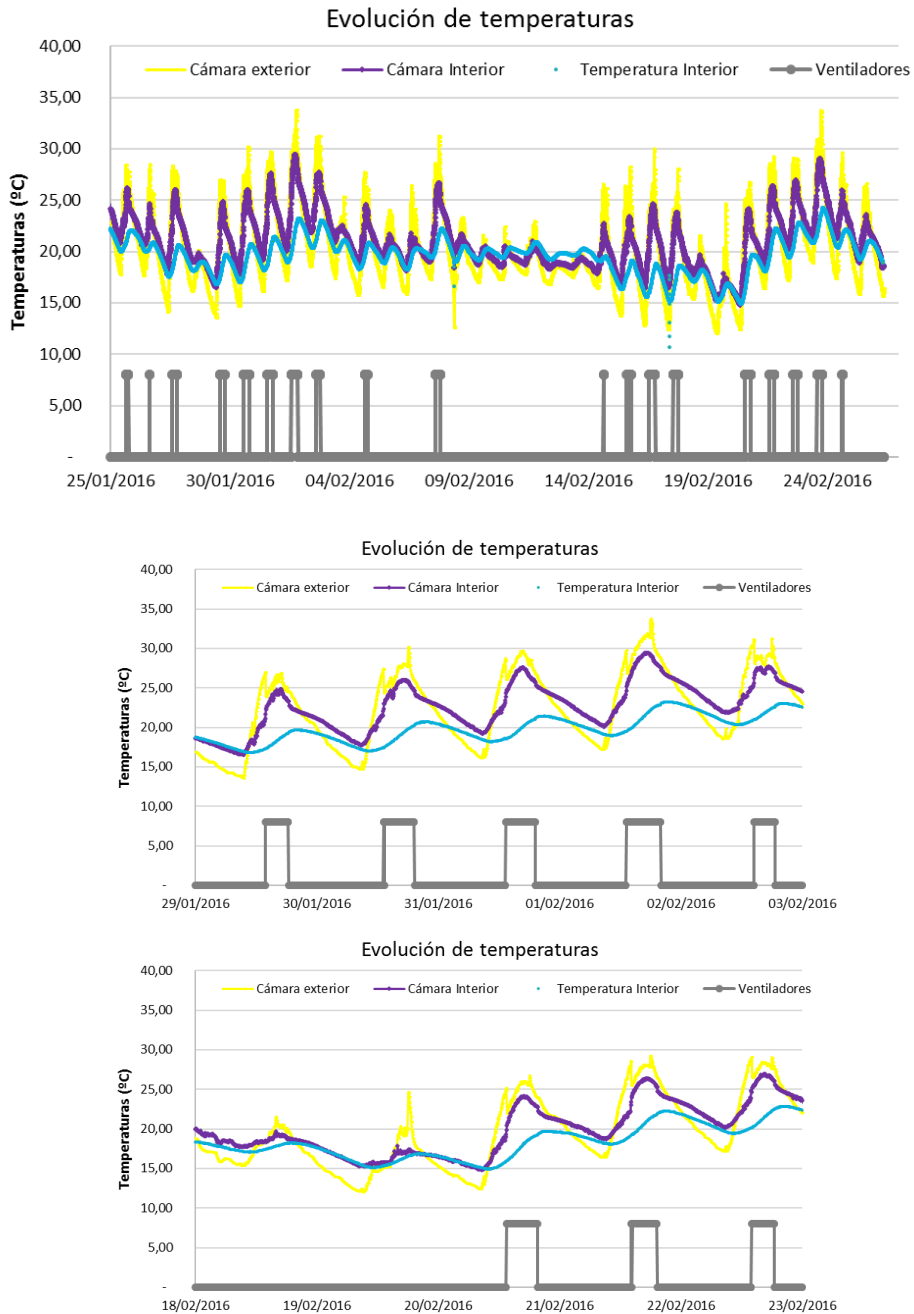
**Gráfica 9: Evolución de las temperaturas y funcionamiento de ventiladores**

En la *gráfica 9* ya se aprecia una cierta subida de la curva de la temperatura interior respecto a la curva de la temperatura exterior, en comparación a las curvas que se pueden ver en la *gráfica 3*. A continuación, se muestra en la *gráfica 10*, un periodo de tiempo más reducido, donde podemos ver como cuando la temperatura exterior alcanza cierto valor los ventiladores se ponen en funcionamiento, aunque como se explicara a continuación esto no es exactamente así.



**Gráfica 10: Funcionamiento de ventiladores**

Se puede apreciar en la gráfica anterior como los ventiladores se activan aun cuando la temperatura exterior es inferior a la interior. Esto se debe a que el control de los ventiladores se basa en la temperatura de las dos cámaras de aire que hay entre las diferentes capas de la fachada sur de la celda de ensayo. Como se puede ver en la *gráfica 11*, correspondiente a un periodo de tiempo de la campaña, los ventiladores comienzan a funcionar cuando existe una diferencia aceptable entre la temperatura de la cámara del aire exterior y la temperatura del aire de la cámara interior. A consecuencia del funcionamiento de los ventiladores se puede apreciar que justo al comenzar a funcionar la temperatura de la cámara exterior disminuye bruscamente, esto se debe a la introducción, en esa cámara, del aire de la cámara interior que se encuentra a menor temperatura.



**Gráfica 11: Temperaturas de las cámaras de aire**

Generalmente, los días en los que los ventiladores funcionan sin ningún problema, ese decir se alcanza suficiente temperatura en la cámara de aire exterior, los ventiladores suelen funcionar una media de cinco horas al día. La hora de arranque suele oscilar entre las 13:00 h y las 14:00 h mientras que la hora de parada varía entre las 18:00 h y las 19:00 h.



# 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

*Si tuviera mil ideas y sólo una resultase ser buena,  
estaría satisfecho.*

*- Alfred Nobel-*

El objetivo de este quinto apartado de esta memoria consistirá en calcular el valor numérico de los diferentes parámetros que forman la celda de ensayo, para finalmente evaluar el incremento de área solar que supone la introducción del elemento activo. Para ello hemos dividido cada paso de cálculo en los siguientes subapartados de esta memoria.

## Estimación de la temperatura interior

A raíz de estos resultados obtenidos, se procede a calcular analíticamente la ganancia de área solar que supone la incorporación del elemento activo a la celda de ensayo. Para ello, a partir de los resultados de la primera campaña de mediciones se estimará la temperatura interior que tendría la celda de ensayo, si durante la segunda campaña no se hubiese fijado la temperatura en unos 33 °C. Esta temperatura será una función dependiente de la radiación y de la temperatura exterior, así como de la inercia térmica de la celda de ensayo, quedando finalmente de la siguiente forma:

$$T_{int}(t) = a_1 \cdot T_{ext}(t) + a_2 \cdot T_{ext}(t - 1) + b_1 \cdot I(t) + b_2 \cdot I(t - 1) + d \cdot T_{int}(t - 1)$$

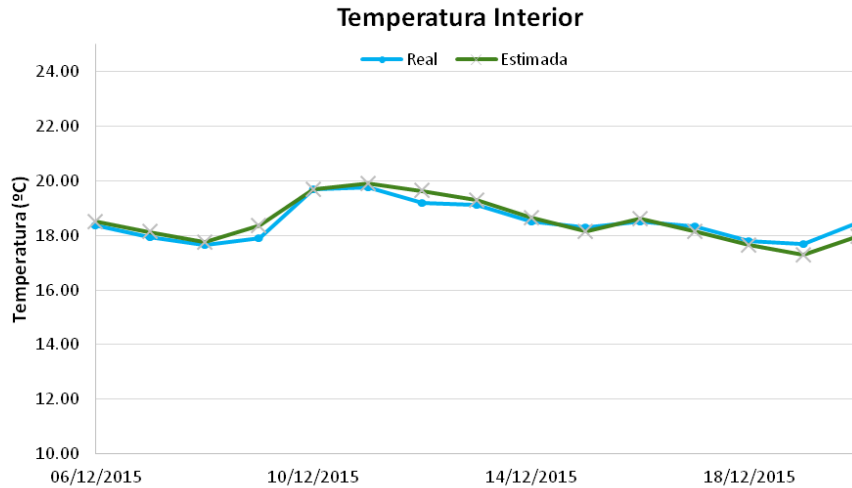
La unidad de tiempo se ha establecido en días, de forma que se puedan apreciar los efectos de las diferentes variables, mientras que la inercia térmica del edificio se ha estimado en un día de duración.

Aplicando esta ecuación a los diecisiete días que abarca la primera campaña de mediciones obtenemos los siguientes coeficientes recogidos en la *tabla 2*:

$a_1 = 0.3869$	$b_1 = -0.0018$	$d = 0.6389$
$a_2 = 0.0284$	$b_2 = 0.0151$	

*Tabla 2: Coeficientes de la estimación de la Temperatura interior*

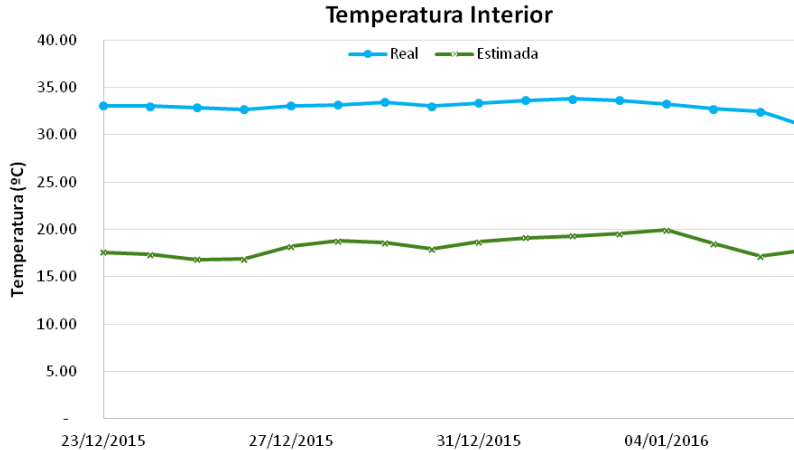
Para comprobar la exactitud de la estimación lineal, la cual tiene un coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.999853$ ), se representa en la *gráfica 12*, la temperatura interior real, medida durante la primera campaña de mediciones y la temperatura interior estimada.



Gráfica 12: Comparación de la estimación con la realidad

### Determinación del coeficiente global de transferencia

Una vez conocidos los parámetros que determinan la estimación de la temperatura interior de la celda de ensayo, podemos establecer el incremento de temperatura que es necesario que el equipo de climatización aporte a la celda para que la temperatura interior se mantenga en la temperatura prefijada. En la *gráfica 13* podemos observar la diferencia entre ambas temperaturas.



Gráfica 13: Diferencia de temperatura real / estimada

Una vez conocemos la diferencia de temperaturas entre la temperatura interior que habría si el equipo no estuviese en funcionamiento y la temperatura real de la celda de ensayo, podemos establecer la ecuación del calor aportado por el equipo de climatización, el cual será una función de dicha diferencia, quedando de la siguiente forma:

$$Q(t) = a_1 \cdot \Delta T_{int}(t) + a_2 \cdot \Delta T_{int}(t - 1) + d \cdot Q(t - 1)$$

Realizando nuevamente una estimación lineal obtenemos el valor de los diferentes parámetros en la *tabla 3*, con un valor del coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.996347$ ).

$a_1 = 1.4075$	$a_2 = -0.6852$	$d = 0.4140$
----------------	-----------------	--------------

Tabla 3: Coeficientes de la ecuación del calor aportado

Suponiendo una situación de régimen permanente podemos llegar a establecer una estimación del coeficiente global de transferencia por el área total de intercambio ( $UA$ ).

$$Q|_{rp} = a_1 \cdot \Delta T_{int}|_{rp} + a_2 \cdot \Delta T_{int}|_{rp} + d \cdot Q|_{rp}$$

$$Q|_{rp} = \frac{a_1 + a_2}{1 - d} \cdot \Delta T_{int}|_{rp} = UA \cdot \Delta T_{int}|_{rp}$$

Obteniendo finalmente un  $UA$  de:

$$UA = 51.35 \text{ W/K}$$

## Cálculo del área solar inicial

En el apartado 5.1, a la hora de estimar la temperatura interior, se ha fijado el término independiente de la ecuación como nulo. Realmente existe un término independiente debido a la aportación de energía por parte de las diferentes fuentes internas dentro de la celda de ensayo, como por ejemplo el ordenador encargado de recibir y almacenar todos los datos de los sensores de temperatura. Una vez hemos establecido el  $UA$  correspondiente a la celda podemos calcular este término independiente.

$$K = \frac{Q_{F_{internas}}}{UA} = 1.85 \text{ }^\circ\text{C}$$

Donde el consumo de las fuentes internas, que ha sido medido, es de unos 95 W.

De tal forma, ahora establecemos una nueva variable que es el resultado de restarle la constante debida a las fuentes internas a la temperatura interior de la celda.

$$T'_{int}(t) = T_{int}(t) - K$$

$$T'_{int}(t) = a'_1 \cdot T_{ext}(t) + a'_2 \cdot T_{ext}(t-1) + b'_1 \cdot I(t) + b'_2 \cdot I(t-1) + d' \cdot T'_{int}(t-1)$$

Siendo los resultados de esta estimación lineal, aplicada a los datos de la primera campaña de mediciones, resumidos en la tabla 4, con un coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.999835$ )

$a'_1 = 0.3733$	$b'_1 = -0.0023$	$d' = 0.5946$
$a'_2 = 0.0506$	$b'_2 = 0.0151$	

Tabla 4: Coeficientes recalculados de la Temperatura interior sin la fachada activa

A partir de estos coeficientes, se puede establecer el incremento de temperatura que aporta cada uno de los factores de los que depende a la temperatura interior de la celda. Para ello primero se deshará el cambio de variable.

$$T_{int}(t) = a'_1 T_{ext}(t) + a'_2 \cdot T_{ext}(t-1) + b'_1 \cdot I(t) + b'_2 \cdot I(t-1) + d' \cdot (T_{int}(t-1) - K) + K$$

Aplicando la condición de régimen permanente y agrupando términos, finalmente resulta:

$$T_{int}|_{rp} = \frac{a'_1 + a'_2}{1 - d'} \cdot T_{ext}|_{rp} + \frac{b'_1 + b'_2}{1 - d'} \cdot I|_{rp} + K = \Delta T_{T_{ext}} \cdot T_{ext}|_{rp} + \Delta T_r \cdot I|_{rp} + K$$

$$T_{int}|_{rp} = 1.0452 \cdot T_{ext}|_{rp} + 0.03141 \cdot I|_{rp} + 1.85$$

Donde  $\Delta T_{T_{ext}}$  y  $\Delta T_r$  son el incremento de temperatura aportado a la temperatura interior debido a la temperatura exterior y a la radiación incidente.

$$\Delta T_{T_{ext}} = 1.0452 \text{ [adim]} \quad ; \quad \Delta T_r = 0.03141 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$$

De tal forma, que, aplicando la ecuación de transferencia, podemos obtener el área solar equivalente de la celda de ensayo.

$$A_{s_0} \cdot I = UA \cdot (\Delta T_r \cdot I) \rightarrow A_{s_0} = \frac{UA \cdot 0.03141 \cdot I}{I} = 1.613 \text{ m}^2$$

Llegados a este punto, vamos a tomar dos opciones de cálculo diferentes para establecer una comparación de los resultados.

En primer lugar, para calcular el incremento de área solar que supone el elemento innovador debemos volver a aplicar la ecuación anterior, en este caso tomando los datos correspondientes a la tercera campaña de mediciones. En este caso asumimos que la inercia térmica de la celda de ensayo no cambia de forma significativa, esta hipótesis es aceptable ya que no existe un gran espacio temporal entre la primera campaña de mediciones y la tercera. De tal forma que los coeficientes asociados a la temperatura del aire exterior y a la temperatura interior quedan fijados, tal y como los calculamos durante la primera de las campañas de mediciones.

Así pues, para realizar el ajuste por mínimos cuadrados necesitaremos una nueva variable.

$$T''_{int}(t) = T_{int}(t) - K - a'_1 \cdot T_{ext}(t) - a'_2 \cdot T_{ext}(t-1) - d' \cdot T_{int}(t-1)$$

Quedando la ecuación a ajustar, la cual sólo es función de la radiación, queda de la siguiente forma:

$$T''_{int} = b''_1 \cdot I(t) + b''_2 \cdot I(t-1)$$

El coeficiente de determinación resulta ser ( $R^2 = 0.932334$ ), obteniéndose los siguientes valores para cada uno de los coeficientes.

$b''_1 = -0.00065$	$b''_2 = 0.1759$
--------------------	------------------

Tabla 5: Resultados correspondientes a la tercera campaña de mediciones

Al igual que hiciéramos anteriormente, se establece la condición de régimen permanente.

$$T_{int|rp} = \frac{a'_1 + a'_2}{1 - d'} \cdot T_{ext|rp} + \frac{b''_1 + b''_2}{1 - d'} \cdot I|_{rp} + K = \Delta T_{T_{ext}} \cdot T_{ext|rp} + \Delta T_r \cdot I|_{rp} + K$$

$$T_{int|rp} = 1.0452 \cdot T_{ext|rp} + 0.04179 \cdot I|_{rp} + 1.85$$

Obteniendo finalmente un nuevo área solar de:

$$A_{sf} \cdot I = UA \cdot (\Delta T_r \cdot I) \rightarrow A_{sf} = \frac{UA \cdot 0.04179 \cdot I}{I} = 2.131 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, la introducción del elemento innovador supone un incremento del área solar equivalente de aproximadamente  $0.518 \text{ m}^2$ .

La otra opción de cálculo, consiste en no fijar completamente la inercia térmica del edificio, por lo que se recalculan nuevamente todos los coeficientes que lo forman. Aplicamos la ecuación que estima la temperatura interior, pero en este caso, se aplica a los datos recogidos durante la tercera campaña de medición, es decir con la fachada activa.

$$T'_{int}(t) = a'_1 \cdot T_{ext}(t) + a'_2 \cdot T_{ext}(t-1) + b'_1 \cdot I(t) + b'_2 \cdot I(t-1) + d' \cdot T'_{int}(t-1)$$

Obteniéndose los siguientes valores para cada coeficiente, resumidos en la tabla 6, con un coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.999443$ ).

$a''_1 = 0.3152$	$b''_1 = 0.0006$	$d'' = 0.5638$
$a''_2 = 0.1352$	$b''_2 = 0.0181$	

Tabla 6: Resultados correspondientes a la tercera campaña de mediciones

Al igual que hiciéramos anteriormente, se establece la condición de régimen permanente.

$$T_{int|rp} = \frac{a'_1 + a'_2}{1 - d'} \cdot T_{ext|rp} + \frac{b''_1 + b''_2}{1 - d'} \cdot I|_{rp} + K = \Delta T_{T_{ext}} \cdot T_{ext|rp} + \Delta T_r \cdot I|_{rp} + K$$

$$T_{int|rp} = 1.0325 \cdot T_{ext|rp} + 0.04292 \cdot I|_{rp} + 1.85$$

Como podemos apreciar, los coeficientes que fijan la inercia térmica del edificio no varían de forma drástica, siendo durante la primera campaña de mediciones de un valor de 1.0452, mientras que durante la tercera se obtiene un valor de 1.0325. Por lo tanto, es realista la hipótesis formulada en el primer caso.

Obteniendo finalmente un nuevo área solar de:

$$A_{sf} \cdot I = UA \cdot (\Delta T_r \cdot I) \rightarrow A_{sf} = \frac{UA \cdot 0.04179 \cdot I}{I} = 2.204 m^2$$

Por lo tanto, la introducción del elemento innovador supone un incremento del área solar equivalente de aproximadamente  $0.591 m^2$ .

Como se puede apreciar, tanto mediante el primer planteamiento como mediante el segundo planteamiento, realizados los resultados experimentales obtenidos son muy cercanos en valor, por lo que, de aquí en adelante, se tomará como resultado final el obtenido mediante el primer planteamiento, el cual se resume en la *tabla 7* mostrada a continuación.

Área solar sin el elemento	Área solar con el elemento	Incremento de área solar
<b>1.613 m<sup>2</sup></b>	2.131 m <sup>2</sup>	0.508 m <sup>2</sup>

*Tabla 7: Resumen resultados experimentales*



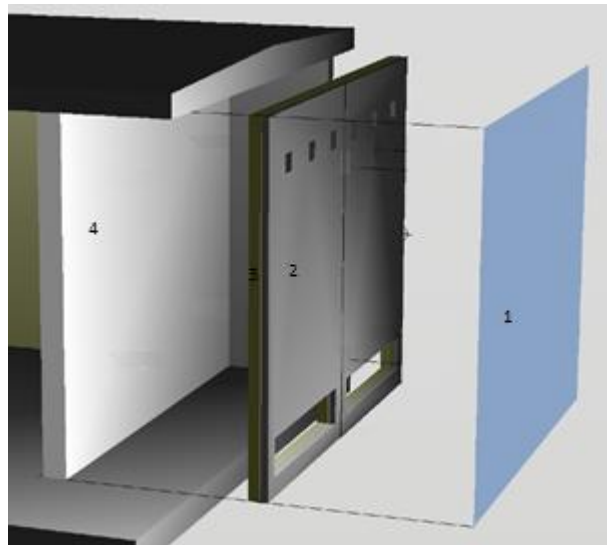
## 6 MODELO TEÓRICO

---

*No hay error más corriente que suponer que porque se hayan realizado cálculos prolongados y precisos, los resultados de éstos han de ser absolutamente ciertos.*

*- Alfred North Whitehead-*

Con el objetivo de validar los resultados experimentales obtenidos, se elabora a continuación un modelo teórico que refleje analíticamente cómo evoluciona la transmisión de calor a lo largo de las diferentes capas que componen la fachada sur de la celda de ensayo. Las diferentes superficies a través de las cuales se evalúa el modelo teórico se pueden ver en la *figura 15*.



*Figura 15: Superficies fachada Sur*

### Datos de partida

La nomenclatura seguida durante este modelo teórico establece que la superficie número 1 es el cristal, el cual está directamente en contacto con el aire exterior y el aire de la cámara exterior. La superficie número 2 es el muro de hormigón con un espesor de doce centímetros, estando en contacto directamente con el aire de la cámara exterior. La superficie número 3 está formada por ocho centímetros de poliestireno, siendo esta el aislante de la fachada. Está en contacto con el aire de la cámara interior. Finalmente, la superficie número 4 vuelve a ser un muro de hormigón con un espesor de dieciséis centímetros, el cual está en contacto con el aire interior de la celda de ensayo y el aire de la cámara interior.

Se recoge a continuación, en la *tabla 8*, las diferentes propiedades de cada uno de las superficies nombradas anteriormente.

Superficie	Material	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)
1	Vidrio	-	-
Cámara exterior	Aire	0.5	-
2	Hormigón	0.12	1.3
3	Poliestireno	0.08	0.035
Cámara interior	Aire	0.05	-
4	Hormigón	0.16	1.3

*Tabla 8: Propiedades de las superficies*

El cálculo de la resistencia térmica del vidrio se realiza a partir del conocimiento de su coeficiente de transferencia que tiene un valor de  $5.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  de tal forma que:

$$U_{\text{vidrio}} = \frac{1}{1/hcr_{\text{ext}} + R_{vs} + 1/hcr_{\text{int}}}$$

Donde:

- $hcr_{\text{ext}}$  Coeficiente convectivo – radiante con el aire exterior
- $R_{vs}$  Resistencia térmica del vidrio simple
- $hcr_{\text{int}}$  Coeficiente convectivo – radiante con el aire interior

Se resumen a continuación, en la *tabla 9*, las propiedades del vidrio simple.

Propiedad	Valor
$R_{vs}$ - Resistencia térmica	$0.00682 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
$\alpha$ - Absortividad	0.75
$g$ – Factor solar	0.80

*Tabla 9: Propiedades del vidrio simple*

Donde la absortividad refleja la relación entre la cantidad de intensidad que absorbe el vidrio y la cantidad de intensidad que recibe. Mientras que el factor solar consiste en la relación entre la energía total que entra en el interior del inmueble (suma de la que entra por transmisión directa, y la que se radia tras el calentamiento del vidrio por absorción) a través del vidrio, y la energía solar incidente en el mismo.

En este modelo teórico se tienen en cuenta unos cuatro flujos de aire, por lo que será necesario conocer el valor de los coeficientes convectivos en los distintos flujos anteriormente dichos. Los valores son mostrados a continuación en la siguiente *tabla 10*. Tanto el coeficiente convectivo dentro de la cámara exterior, como dentro de la cámara interior, toman valores obtenidos en otro experimento llevado a cabo por el departamento de Ingeniería Energética. Tanto para el valor de coeficiente convectivo – radiante en el interior de la celda como en el exterior se ha realizado una estimación.



Coefficiente	Valor ( $W/m^2 K$ )
$hcr_{ext}$ – Coeficiente convectivo – radiante con el aire exterior	20
$h_{ce}$ – Coeficiente convectivo en la cámara de aire exterior	4
$h_{re}, h_{ri}$ – Coeficiente radiante en la cámara exterior e interior	4.5
$h_{ci}$ – Coeficiente convectivo en la cámara de aire interior	8
$hcr_{int}$ – Coeficiente convectivo – radiante con el aire interior	8

Tabla 10: Valores de los coeficientes convectivos

Para los coeficientes convectivos en el interior de las cámaras se ha fijado una velocidad de flujo de 1.5 m/s en la cámara interior, siendo la velocidad en la cámara exterior de unos 0.15 m/s ya que su espesor es diez veces mayor a la de la cámara interior.

## Planteamiento del modelo matemático

Para una mayor comprensión de la nomenclatura usada a la hora de establecer las diferentes ecuaciones, se muestra a continuación un esquema gráfico de su posición y la tabla 11 donde se recoge su definición.

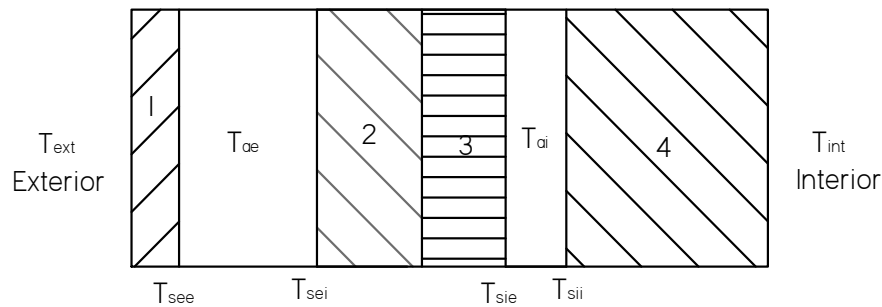
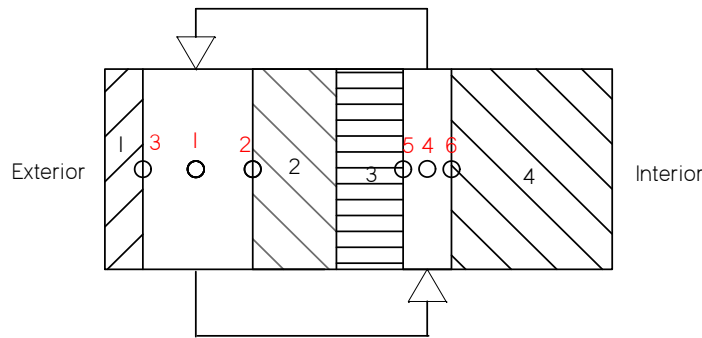


Figura 16: Localización de temperaturas

Nomenclatura	Definición
$T_{ext}$	Temperatura del aire exterior
$T_{see}$	Temperatura de la superficie exterior de la cámara exterior
$T_{ae}$	Temperatura del aire en la cámara exterior
$T_{sei}$	Temperatura de la superficie interior de la cámara exterior
$T_{sie}$	Temperatura de la superficie exterior de la cámara interior
$T_{ai}$	Temperatura del aire en la cámara interior
$T_{sii}$	Temperatura de la superficie interior de la cámara interior
$T_{int}$	Temperatura del aire interior de la celda de ensayo

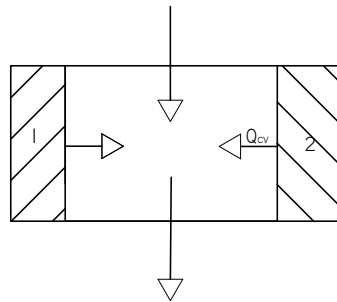
Tabla 11: Nomenclatura de las temperaturas usadas en el modelo matemático

A continuación, en la *figura 17*, se muestran los puntos en los cuales se ha planteado un balance de energía mediante los números rojos, mientras que los números negros hacen referencia a las diferentes superficies definidas anteriormente.



**Figura 17: Puntos de balance de energía**

Con el fin de facilitar la comprensión de los balances de energía se muestra, en la *figura 18*, los diferentes flujos que participan en el balance número 1. Estos son dos flujos de energía transmitidos por convección, uno desde la superficie 1 y el otro transmitido desde la superficie 2, y un flujo másico de aire que entra a la temperatura del aire de la cámara interior y sale a la temperatura del aire de la cámara exterior.



**Figura 18: Balance de energía correspondiente a la Ec. 1**

Quedando la ecuación de balance de la siguiente forma.

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ae} - T_{ai}) = Q_{cv_e}^e + Q_{cv_e}^i \quad (Ec. 1)$$

Donde,  $T_{ae}$  y  $T_{ai}$  son las temperaturas del aire de la cámara exterior e interior respectivamente. Ambos flujos de calor por convección en la cámara exterior (desde la superficie 1 nombrado como  $Q_{cv_e}^e$  y desde la superficie 2 nombrados como  $Q_{cv_e}^i$ ) se pueden expresar de la siguiente manera.

$$Q_{cv_e}^e = \frac{T_{see} - T_{ae}}{\frac{1}{h_{ce} \cdot A}} \quad ; \quad Q_{cv_e}^i = \frac{T_{sei} - T_{ae}}{\frac{1}{h_{ce} \cdot A}}$$

Seguidamente, se realizará el balance en los puntos 2 y 3. En la *figura 19* se muestran los diferentes flujos de energía que intervienen en los balances superficiales en los puntos anteriormente dichos.

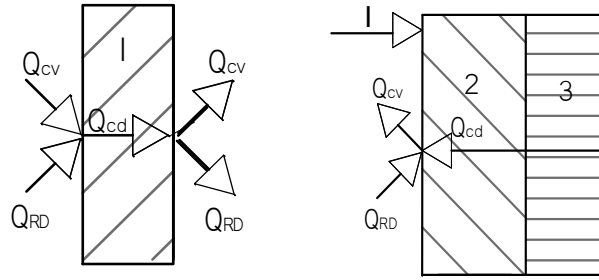


Figura 19: Balance de energía correspondiente a la Ec 2 y 3

$$\frac{T_{ext} - T_{see}}{\frac{1}{hcr_{ext} \cdot A} + \frac{R_v}{A}} = Q_{cve}^e + Q_{rdce} \quad (Ec. 2)$$

$$I \cdot g \cdot \alpha + \frac{T_{sie} - T_{sei}}{\frac{e_2}{k_2 \cdot A} + \frac{e_3}{k_3 \cdot A}} = Q_{cve}^i - Q_{rdce} \quad (Ec. 3)$$

Donde el calor por radiación intercambiado entre las paredes de la cámara exterior se puede expresar como:

$$Q_{rdce} = \frac{T_{see} - T_{sei}}{\frac{1}{h_{re} \cdot A}}$$

Al igual que hiciéramos en la ecuación número 1, se necesita hacer ahora un balance en el volumen de la cámara de aire interior como se muestra en la figura 20.

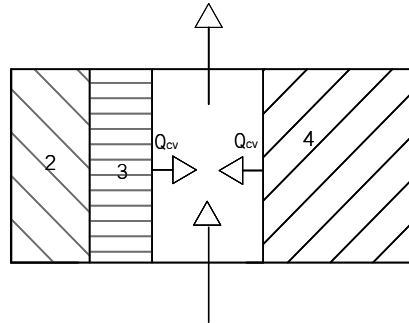


Figura 20: Balance de energía correspondiente a la Ec.4

Quedando la ecuación de balance de la siguiente manera.

$$m \cdot c_p \cdot (T_{ai} - T_{ae}) = Q_{cvi}^e + Q_{cvi}^i \quad (Ec. 4)$$

$$Q_{cvi}^e = \frac{T_{sie} - T_{ai}}{\frac{1}{h_{ci} \cdot A}} \quad ; \quad Q_{cvi}^i = \frac{T_{sii} - T_{ai}}{\frac{1}{h_{ci} \cdot A}}$$

Donde finalmente, para cerrar el problema necesitamos plantear los balances superficiales en los puntos 5 y 6, tal y como se muestra en la figura 21.

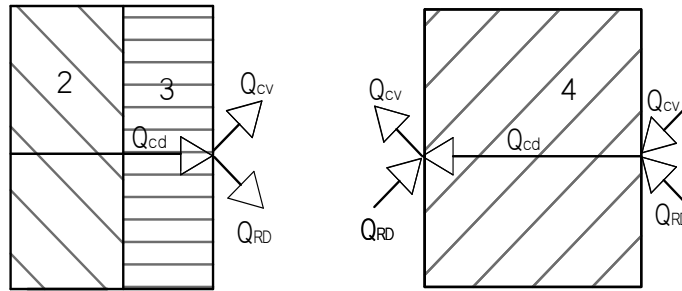


Figura 21: Balance de energía correspondiente a las Ec.5 y 6

A continuación, con el objetivo de tener una mayor fiabilidad de los resultados teóricos, se optó por hacer simulaciones discretizando, tanto la cámara de aire interior como la superior, en una, dos y cuatro partes como se muestra en la figura 22.

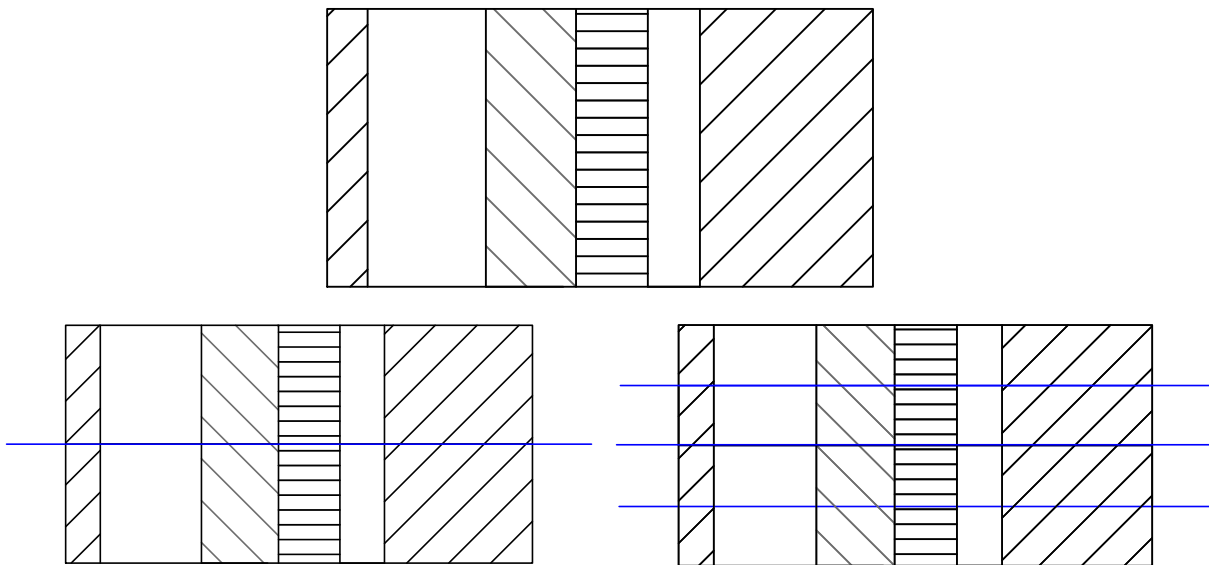
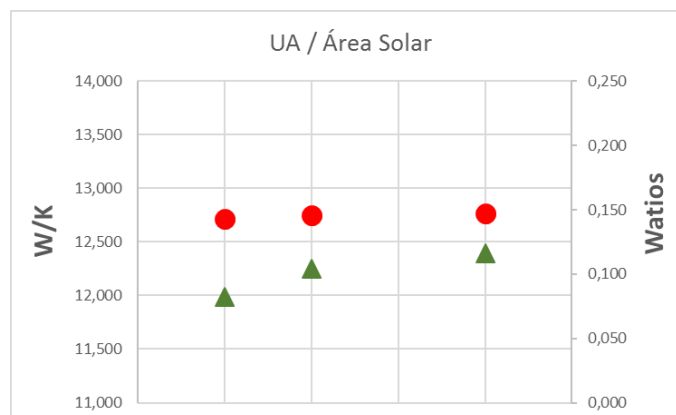


Figura 22: Divisiones de las cámaras de aire

Las diferentes subdivisiones se nombrarán de arriba hacia abajo, tomando la primera el nombre de subdivisión 1 y la última de subdivisión 4.

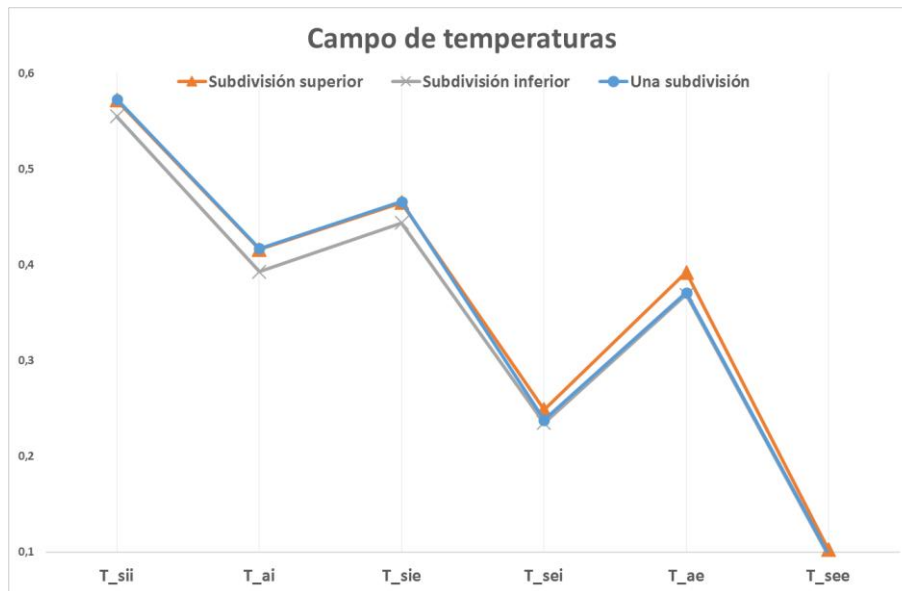
Para comprobar la fiabilidad del modelo de una sola subdivisión frente a una discretización mayor, se calcula para un caso genérico el valor del coeficiente global de transferencia por el área (UA) y el valor del área solar expresado en watos. Para el primer caso, se somete el conjunto de la fachada a una diferencia de temperatura de un grado, siendo la temperatura exterior de 0 °C y la temperatura interior de 1 °C. Para el cálculo del área solar, el modelo se somete a una excitación de un watio. Por definición, el área solar es la cantidad de energía que traspasa un determinado elemento cuando es sometido a una radiación total de un watio.



Gráfica 14: Variación de UA y Área solar en función de las subdivisiones

En el eje de la izquierda, se representa el coeficiente global de transferencia por el área mediante triángulos, estos valores se obtienen para unos parámetros constructivos como son vidrio simple, ocho centímetros de espesor del aislamiento y una velocidad de circulación del aire en la cámara interior de un metro y medio por segundo. Como se puede apreciar en la *gráfica 14*, conforme vamos aumentando el número de subdivisiones, ambos parámetros tienden a estabilizarse. Aún así, la diferencia porcentual entre el modelo de una subdivisión y el modelo de cuatro subdivisiones es del 3% suponiendo una diferencia de  $0.403 W/K$  en el caso del coeficiente global de transferencia por el área. Siendo algo menor en el caso del área solar.

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que, aunque no es totalmente exacto el modelo de una sola subdivisión es una aproximación bastante aceptable. A continuación, en la *gráfica 15*, se muestra la evolución del campo de temperaturas para el modelo de una subdivisión y para el modelo que tiene dos subdivisiones. En el segundo modelo, podemos apreciar que las temperaturas de la subdivisión superior son mayores a la de la inferior. Esto es debido a que el interior está a mayor temperatura que el exterior, y como es por la parte superior de la cámara exterior donde se introduce el aire de la cámara interior, esta temperatura es algo mayor. En cuanto al campo de temperaturas correspondiente al modelo de una única subdivisión, vemos como en la primera parte se superpone al campo de temperaturas de la subdivisión superior y en la segunda parte a la subdivisión inferior.



Gráfica 15: Evolución del campo de temperaturas

Posteriormente, en el *apartado 7* y en el *anexo B*, seguiremos haciendo hincapié en las diferentes simulaciones realizadas con los distintos modelos.

## Validación de resultados

El objetivo de plantear este modelo matemático residía en poder calcular un valor teórico del área solar que dispone la celda de ensayo para posteriormente compararlo con los obtenidos experimentalmente en el *apartado 5.3* de esta memoria.

Debido a que los ventiladores no se encuentran todo el tiempo funcionando, como ya se explicó anteriormente, el área solar experimental será un promedio del área solar cuando los ventiladores no funcionan, es decir, la velocidad de circulación del aire dentro de las dos cámaras es nula, y del área solar cuando los ventiladores fuerzan el flujo de aire en sendas cámaras.

Se vuelve a mostrar en la *tabla 12* el resumen de resultados obtenidos experimentalmente.

Área solar sin el elemento	Área solar con el elemento	Incremento de área solar
1.613 m <sup>2</sup>	2.131 m <sup>2</sup>	0.508 m <sup>2</sup>

**Tabla 12: Resumen de resultados experimentales**

En primer lugar, debemos saber que esta área solar es el correspondiente a todas las superficies de la celda de ensayo, siendo el incremento del área obtenido exclusivo de la fachada sur.

Como primera aproximación, podemos suponer que cada una de las superficies tiene la misma área solar. Esta aproximación no es totalmente cierta, ya que la fachada sur, durante los meses de invierno, es la superficie de la celda de ensayo que más área solar aporta. De tal forma, con dicha hipótesis el área inicial de la fachada sur quedaría:

$$A_{solar}^{inicial} = A_{fN} + A_{fS} + A_{fE} + A_{fO} + A_{fH} \approx 5 \cdot A_{fS} \rightarrow A_{fS} = 0.322 \text{ m}^2$$

Realmente, salvo la fachada sur, el resto de áreas se deberían corregir mediante un factor corrector, los cuales serán menores que 1, debido que al resto de fachadas le llega menor cantidad de radiación.

Como hemos comentado anteriormente, el hecho de que el elemento innovador se encuentre situado sólo en la fachada sur hace que el incremento de área obtenido experimentalmente se le atribuya a dicha fachada.

$$A_{fS}^{final} = A_{fS} + \Delta A_{solar} = 0.830 \text{ m}^2$$

Aunque hasta este punto de la memoria, al resultado obtenido experimentalmente se le ha llamado área solar, realmente por definición, el área solar es la cantidad de energía que atraviesa una superficie cuando recibe una excitación de un watio.

$$Q = A_{fS} \cdot \frac{I}{A_t}$$

Donde:

- $I = 1 \text{ W}$  Irradiación
- $A_t = 6.96 \text{ m}^2$  Superficie total de la fachada sur.

Finalmente, se resumen en la siguiente *tabla 13*, la comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los resultados obtenidos mediante el modelo teórico descrito anteriormente.

	Área solar experimental (W)	Área solar teórica (W)
Inicial \ Velocidad nula	0.046	0.049
Final \ Velocidad 1.5 m/s	0.119	0.143

**Tabla 13: Comparación resultados Experimentales / Teóricos**

Se puede ver, como los resultados obtenidos mediante las diferentes campañas de mediciones llevadas a cabo son prácticamente coincidentes con los valores que se han obtenido mediante el establecimiento del modelo teórico.

El resultado obtenido cuando la velocidad del aire entre cámaras es nula, es similar a la de la fachada sur sin el elemento innovador. En cambio, cuando los ventiladores funcionan el valor del área solar casi se triplica. El factor diferencial que caracteriza este elemento respecto a muros Trombe convencionales, consiste en que en el periodo de tiempo en el cual no funcionan los ventiladores el coeficiente global de transferencia es mucho menor debido a la capa de aislamiento que tiene entre ambas cámaras de aire. Como se verá en el estudio de sensibilidad, *apartado 7*, el hecho de introducir el elemento aislante supone una menos área solar, pero en cambio permite disminuir las pérdidas considerablemente durante el resto del tiempo.



# 7 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

*Quien obra puede equivocarse, pero quien no hace nada ya está equivocado.*

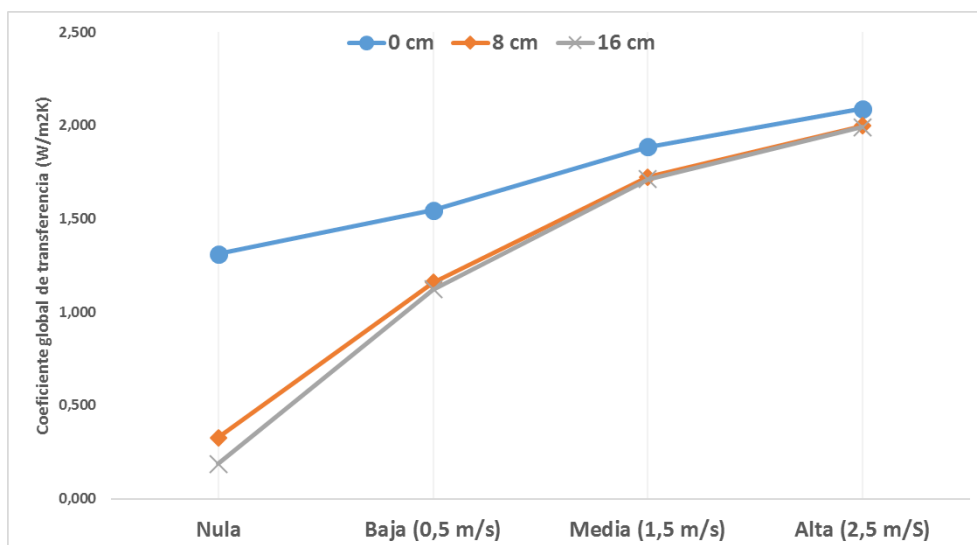
*- Santa Teresa de Ávila -*

En este séptimo y último apartado de esta memoria, se tratará de realizar un breve estudio de sensibilidad sobre el modelo teórico construido para validar los resultados obtenidos experimentalmente. Para ello, trataremos de ver cómo afecta al comportamiento de la celda de ensayo si variamos algunos parámetros constructivos del elemento activo, como puede ser el espesor del aislamiento o la tipología de vidrio que usamos para crear la cámara de aire exterior.

Para no exceder el tamaño de esta memoria, en este apartado sólo se expondrán algunos de los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones del modelo de una sola subdivisión por la mayor facilidad a la hora de exponer sus resultados ya que como se ha demostrado antes son resultados muy próximos al exacto, estando recogidos el resto de resultados, de los diferentes modelos en el *Anexo B*.

## 7.1. Estudio sobre el coeficiente global de transferencia

En primer lugar, vamos a estudiar la influencia de los diferentes parámetros constructivos en el coeficiente global de transferencia, para ello, se muestra en la *gráfica 16*, cómo evoluciona el coeficiente global de transferencia cuando variamos la velocidad de circulación del aire en la cámara interior para diferentes espesores de aislamiento.

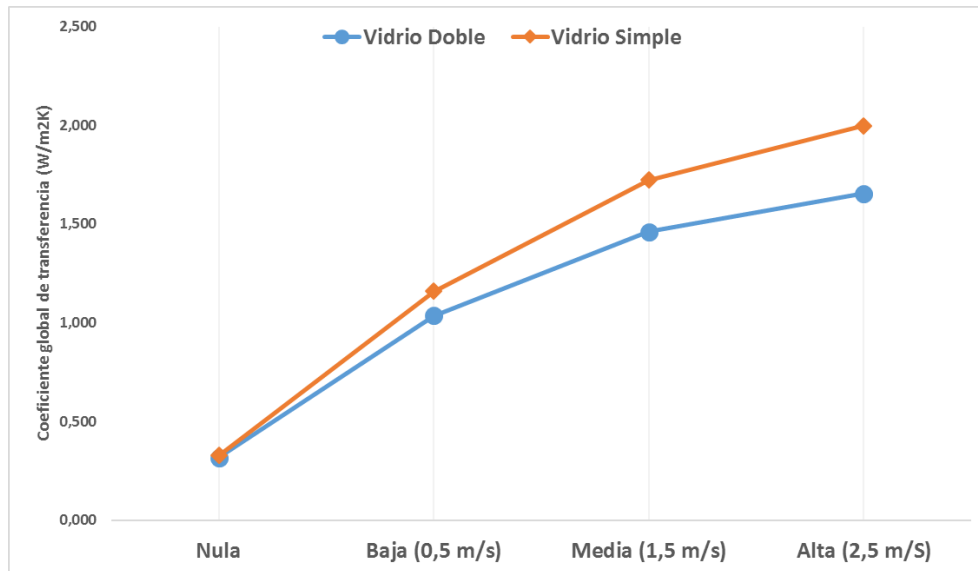


*Gráfica 16: Evolución del U para diferentes velocidades*



En esta gráfica podemos ver que cuanto mayor es el espesor del aislamiento mayor es el coeficiente global de transferencia. Este efecto, se ve disminuido drásticamente cuando la velocidad del aire es mayor, debido a que se está haciendo parar el aire de una cámara a otra anulando el efecto del aislante que separa ambas cámaras. También, se puede extraer como conclusión, que, a partir de un determinado espesor de aislante, el aumentarlo más no tiene mucho efecto sobre el coeficiente global de transferencia.

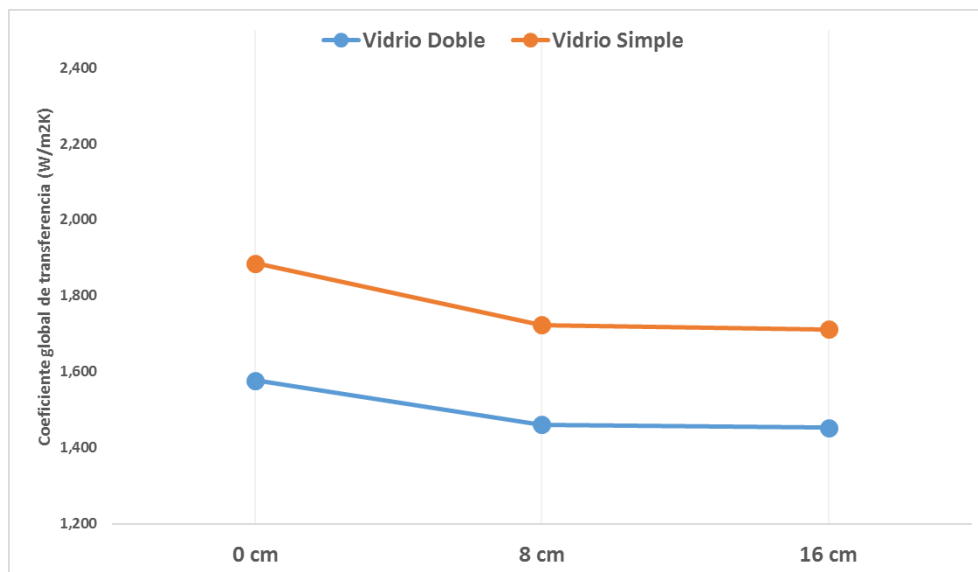
En la siguiente *gráfica 17*, se quiere mostrar la influencia que ejerce el uso de un vidrio simple, frente a un vidrio doble. Para ello se ha fijado el espesor del aislante, en este caso que se muestra en la gráfica es de ocho centímetros.



*Gráfica 17: Evolución de U con diferentes vidrios*

Se puede observar, como la diferencia entre ambos tipos de vidrios se hace más visible cuanto mayor es la velocidad de circulación del aire entre las cámaras. Esto se debe, a que cuando la velocidad de circulación es nula o muy pequeña, la variación en la resistencia térmica del vidrio no es determinante. En cambio, conforme se aumenta la velocidad de circulación, cada vez gana un mayor peso la resistencia térmica del vidrio en la determinación del coeficiente global de transferencia.

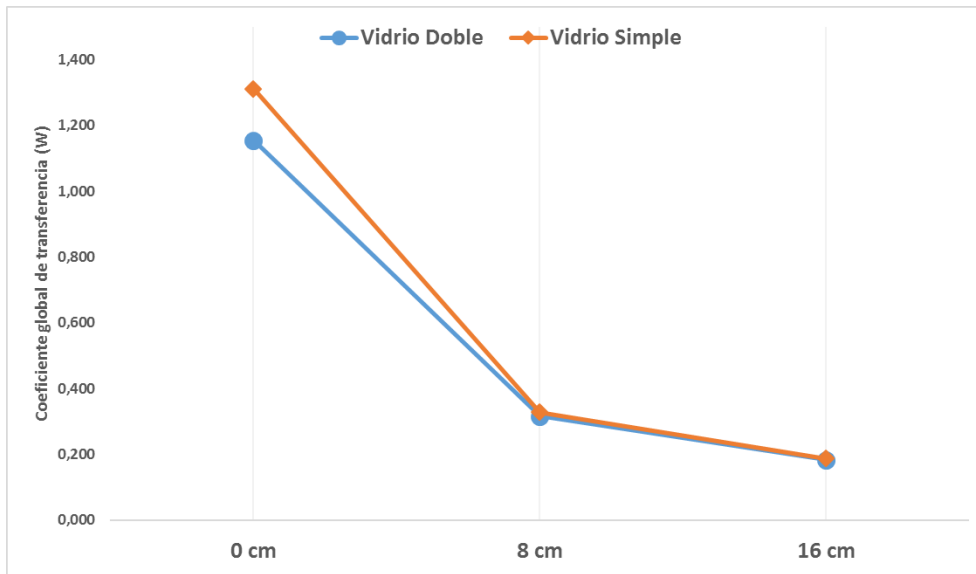
A continuación, se muestra en la *gráfica 18*, la influencia que ejerce el espesor del aislamiento, si fijamos la velocidad de circulación del aire entre cámaras, en este caso una velocidad de un metro y medio por segundo.



*Gráfica 18: Evolución de U para diferentes espesores de aislamiento (Velocidad 1,5 m/s)*

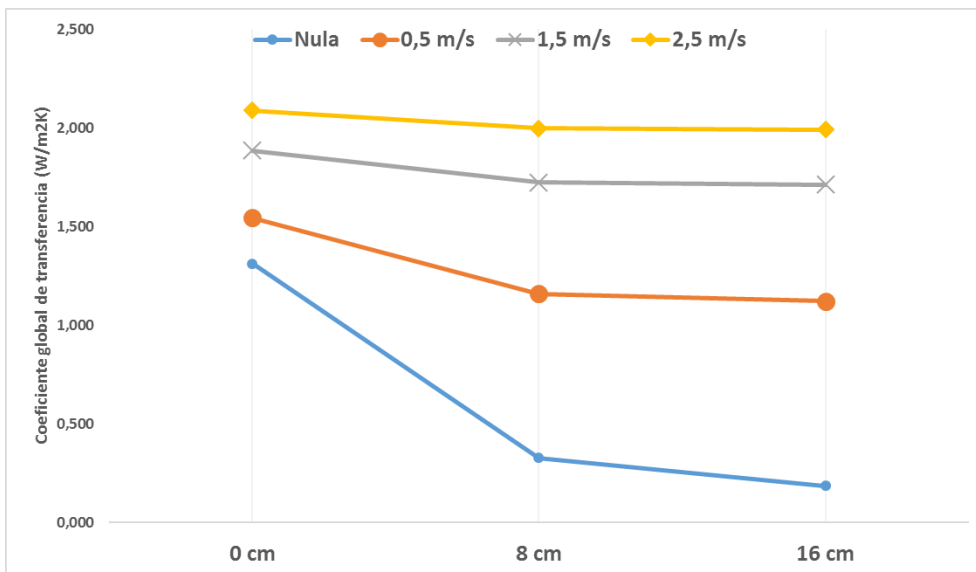
Como se comentó anteriormente, la influencia del tipo de vidrio elegido se hace notable conforme aumenta la velocidad del aire entre cámaras, en este caso, al ser un valor medianamente alto se puede apreciar que existe una diferencia entre una tipología y otra. La diferencia entre el valor del coeficiente global de transferencia entre un vidrio y otro es de entre  $0.25$  y  $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Además, conforme se aumenta el espesor del aislamiento, la diferencia anteriormente comentada se hace más pequeña, debido a que el aislante toma un mayor peso a la hora de la determinación del coeficiente global de transferencia.

Se quiere hacer notar, el caso en el que la velocidad fijada fuese una velocidad nula o muy baja. Como se puede ver en la gráfica 19, y ya se comentó anteriormente la diferencia entre usar un tipo de vidrio u otro es prácticamente nula. Es destacable, como el no usar aislamiento y usar uno de espesor ocho centímetros, supone una disminución en el coeficiente global de transferencia de casi  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  mientras que doblar el espesor de ocho centímetros a dieciséis, sólo supone una disminución en dicho coeficiente de aproximadamente unos  $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Gráfica 19: Evolución de U para diferentes espesores (Velocidad nula)

Finalmente, se pretende analizar en la gráfica 20, el efecto que tiene variar el espesor de aislamiento en función de las diferentes velocidades de circulación del aire entre cámaras.



Gráfica 20: Evolución de U para diferentes espesores en función de la velocidad

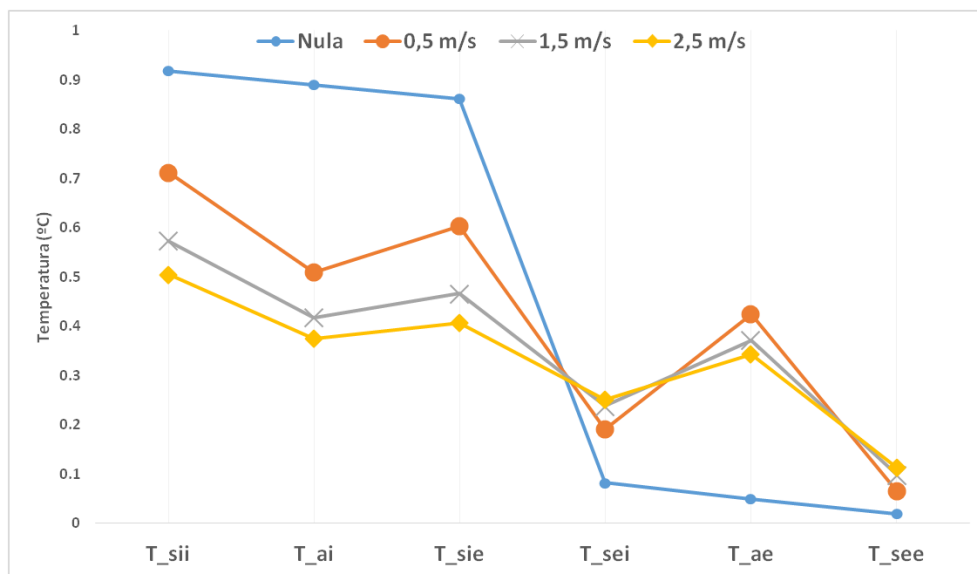
Se puede apreciar, que el hecho de aumentar la velocidad de circulación del aire entre cámaras aumenta el valor del coeficiente global de transferencia. Siendo el efecto del de aumentar el espesor del aislamiento cada

vez menos conforme se aumenta dicha velocidad.

## Estudio sobre el campo de temperaturas

En este apartado, se tratará de analizar, al igual que en el apartado anterior, como influyen los diferentes parámetros constructivos de la celda de ensayo en el campo de temperatura que se crea sobre la fachada sur. Para una mejor comprensión de las graficas mostradas en este apartado, se aconseja acudir al glosario de términos o a la *figura 16* presente en el *apartado 6.2* de esta memoria para tener localizados los puntos en los que se dan dichas temperaturas.

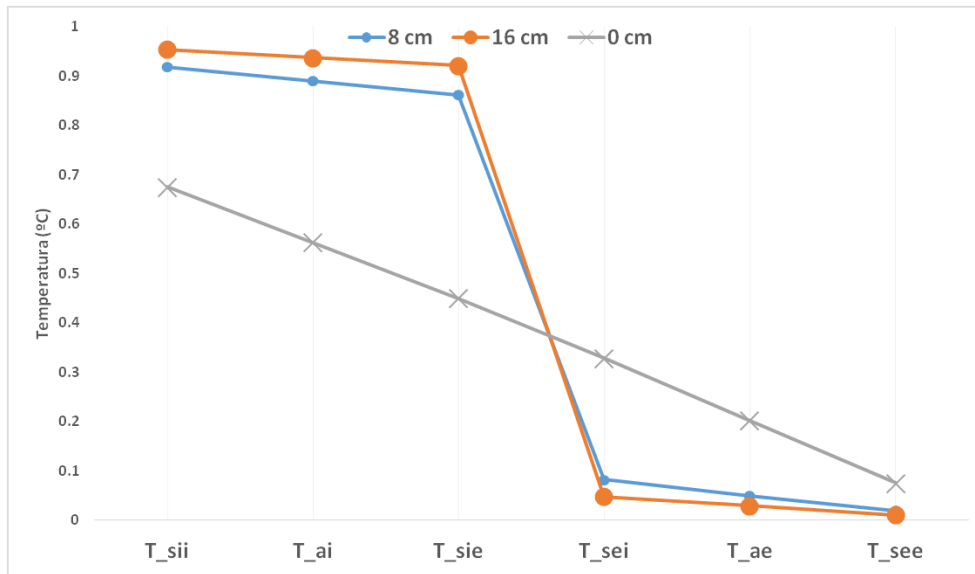
En primer lugar, se tratará de demostrar la influencia que ejerce la velocidad de circulación del aire entre ambas cámaras. Para ello se fijan tanto el tipo de vidrio como el espesor del aislante, en este caso en concreto se opta por vidrio simple y ocho centímetros de espesor del aislante.



*Gráfica 21: Evolución campo de temperaturas para diferentes velocidades*

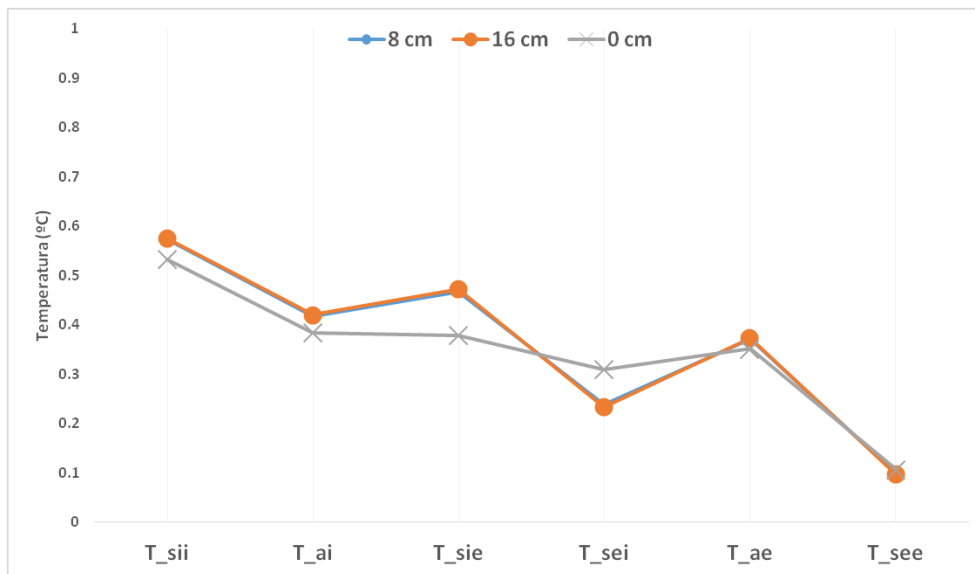
Como se puede apreciar, en la *gráfica 21*, el efecto del aislante es tanto mayor cuanto menor es la velocidad de circulación del aire entre cámaras. Esto es debido, como ya se comentó anteriormente, a que al pasar el aire de una cámara a otra, evitamos la resistencia térmica del aislante que se encuentra situado entre ambas cámaras. Esto propicia, además, que a mayor velocidad de circulación, menos será la temperatura del aire en la cámara interior, y mayor será la temperatura del aire en la cámara exterior.

Seguidamente, se comprueba la influencia que ejerce el espesor del aislante cuando se fija la tipología de vidrio y la velocidad de circulación del aire entre cámaras. En este caso se ha optado por un vidrio simple, y por representar en dos gráficas la influencia. Por un lado, la *gráfica 22*, representa una velocidad de circulación nula, mientras que la *gráfica 23*, se muestra para una velocidad de circulación del aire entre ambas cámaras de un metro y medio por segundo.



Gráfica 22: Evolución campo de temperaturas para diferentes espesores de aislamiento ( $V=0$  m/s)

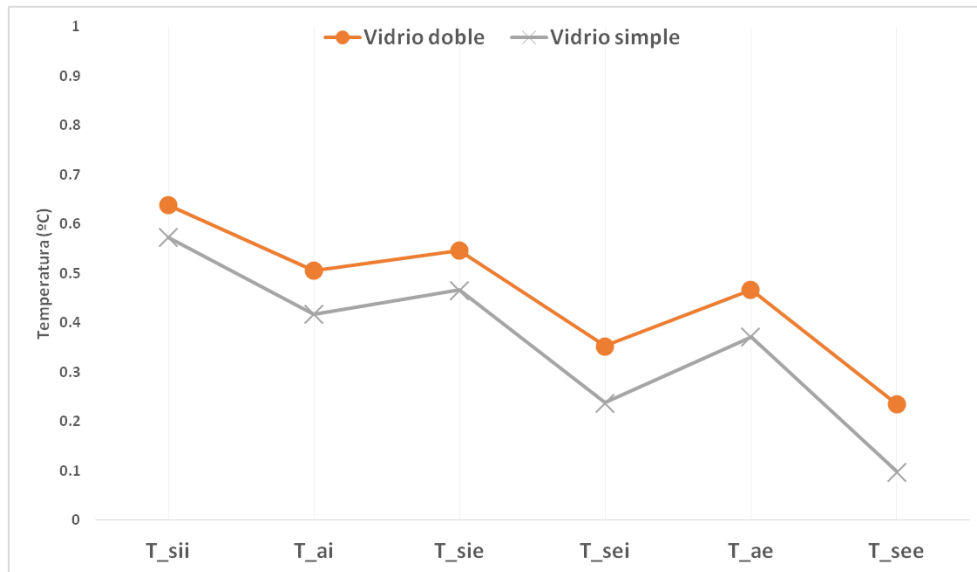
Cuando la velocidad de circulación es nula entre cámaras es nula, el efecto del uso de material aislante es claro, a mayor espesor de aislante, mayor será la diferencia de temperaturas entre las caras de ambas superficies, en este caso de  $T_{sie}$  y  $T_{sei}$ . Podemos sacar también como conclusión, que el efecto de duplicar el espesor del aislante, pasando de ocho a dieciséis centímetros, es mucho menor, que el de pasar de no tener aislante a tener ocho centímetros de espesor.



Gráfica 23: Evolución campo de temperaturas para diferentes espesores de aislamiento ( $V= 1,5$  m/s)

En el caso de que la velocidad de circulación del aire entre ambas cámaras no sea nula, hace que el efecto de duplicar el espesor del material aislante de ocho a dieciséis centímetros es prácticamente nulo, ya que como podemos ver en la *gráfica 23*, ambos campos de temperaturas son casi idénticos. También podemos concluir, que el efecto de introducir material aislante o no, cuando la velocidad de circulación no es nula es mucho menor que en el caso de que la velocidad sea nula.

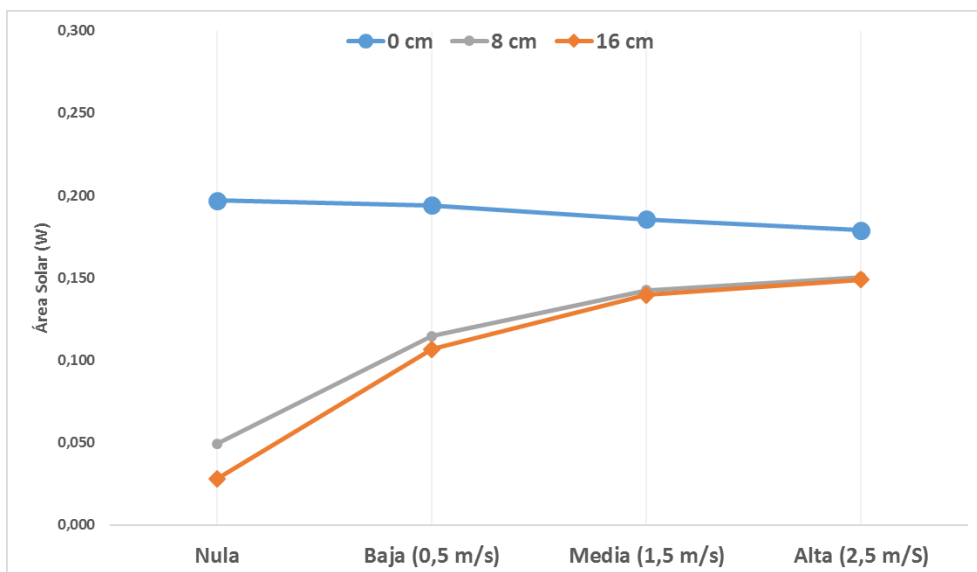
En cuanto a la influencia de la tipología de vidrio usado, podemos ver en la *gráfica 24*, una vez que se ha optado por fijar el espesor del aislante en ocho centímetros y una velocidad de circulación del aire entre cámaras de un metro y medio por segundo, como el efecto de usar la tipología de vidrio doble, supone un aumento de todas las temperaturas que intervienen en el análisis, siendo prácticamente constante la diferencia entre una curva y otra.



Gráfica 24: Evolución campo de temperaturas según tipología de vidrio

## Estudio sobre el área solar

Finalmente, vamos a estudiar cómo influyen los diferentes parámetros constructivos de la celda de ensayo sobre el coeficiente denominado como área solar, para ello, se muestra en la *gráfica 25*, cómo evoluciona el área solar cuando variamos la velocidad de circulación del aire en la cámara interior para diferentes espesores de aislamiento. En este caso, se ha fijado la tipología de vidrio como vidrio simple.

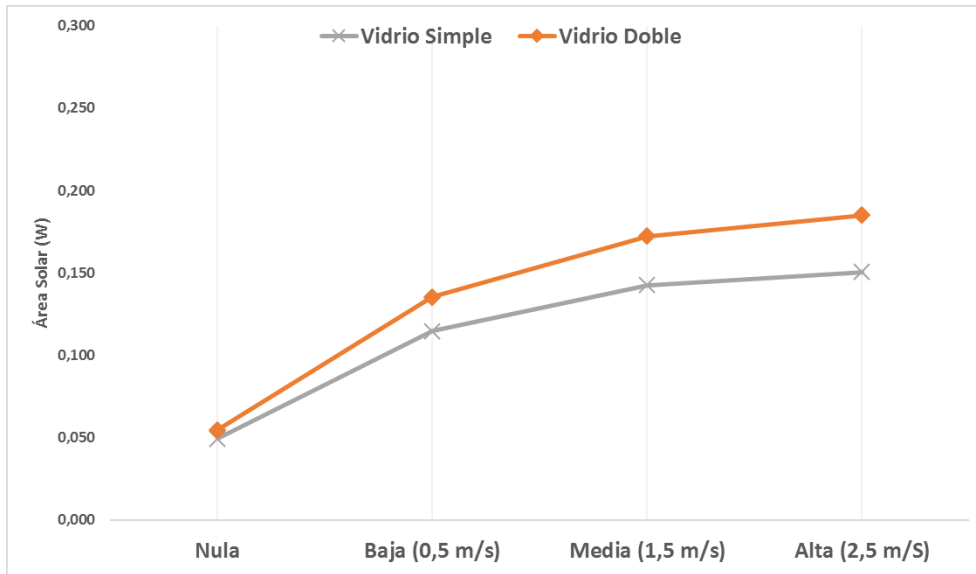


Gráfica 25: Evolución del área solar para diferentes velocidades

Como se puede apreciar, el caso de mayor área solar es aquel que no dispone de aislamiento, lo cual como hemos visto en el *apartado 7.1* de esta memoria tiene el aspecto negativo de que aumentan las pérdidas de energía de la celda de ensayo. En el caso de usar, un mayor o menor espesor de aislamiento no es claramente determinante, ya que los resultados muestran que ambas áreas solares son muy similares.

Respecto a la influencia de la velocidad de circulación entre ambas cámaras de aire, conforme se aumenta la velocidad el área solar de la celda de ensayo aumenta, siendo cada vez menor la variación del área solar.

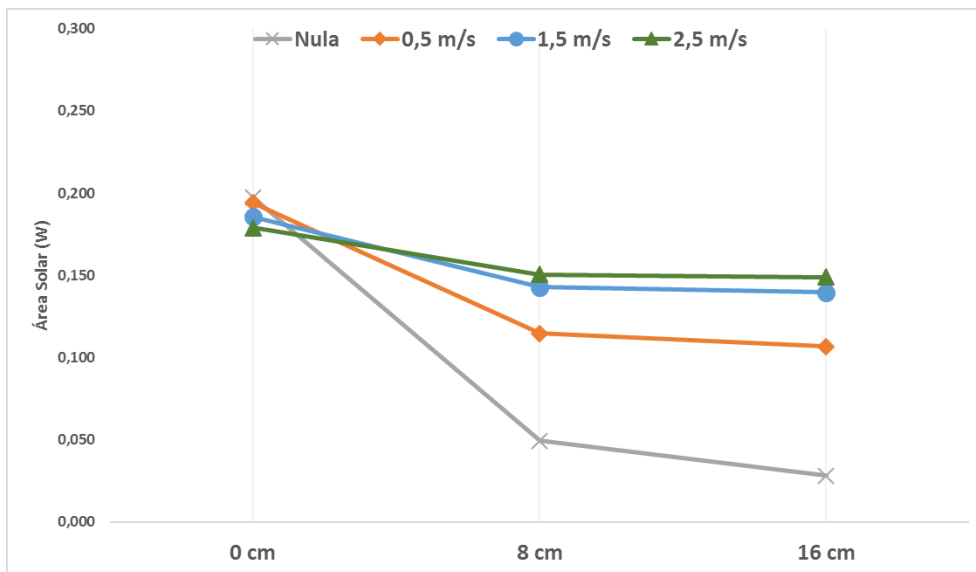
En la siguiente *gráfica 26*, se quiere mostrar la influencia que ejerce el uso de un vidrio simple, frente a un vidrio doble. Para ello se ha fijado el espesor del aislante, en este caso que se muestra en la gráfica es de ocho centímetros.



**Gráfica 26: Evolución del área solar con diferentes vidrios**

Como podemos ver, es bastante significativo el aumento de área solar de la celda de ensayo que supone la introducción de un vidrio de tipología doble con respecto a un vidrio simple. Siendo tanto más acentuado cuanto mayor es la velocidad de circulación del aire entre ambas cámaras existentes.

Finalmente, se pretende analizar en la *gráfica 27* el efecto que tiene variar el espesor de aislamiento en función de las diferentes velocidades de circulación del aire entre cámaras. Para ello se ha optado por fijar una tipología de vidrio simple.



**Gráfica 27: Evolución del área solar para diferentes espesores en función de la velocidad**

En esta gráfica, se vuelve a ver lo comentado anteriormente, conforme aumenta el espesor del aislamiento, menos es el valor del área solar obtenida, siendo su influencia muy leve cuando la velocidad de circulación del aire no es nula. Respecto a la velocidad de circulación del aire, apreciamos un gran salto cuantitativo cuando aumentamos de estar con velocidad nula a velocidad 0,5 m/s. Conforme seguimos aumentando, dicho efecto sobre el área solar se ve disminuido, siendo prácticamente nula la diferencia entre velocidad de circulación de 1,5 m/s y 2,5 m/s.

## 8 ANEXOS

---

*Y a quién te diga que está preparando un proceso de paz que se prepare para la guerra.*

*- Juan Carlos Aragón -*

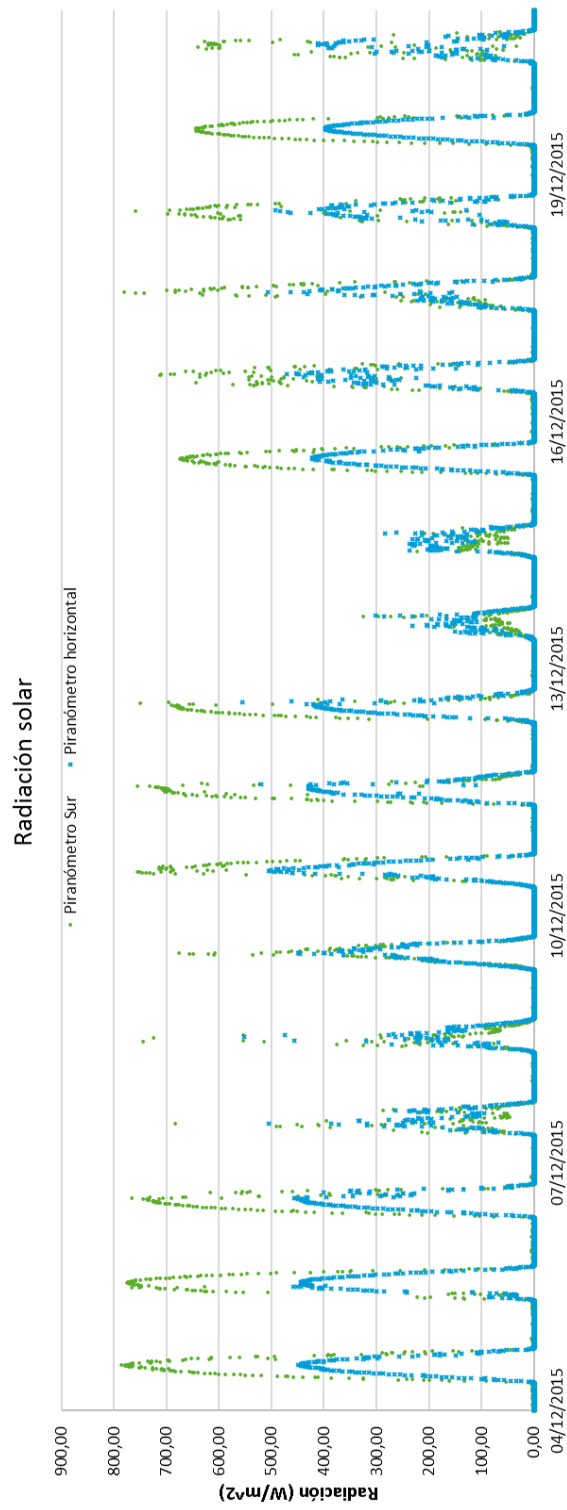
**E**n este último capítulo se pretende recoger parte de la información que se ha recopilado durante la ejecución de este trabajo fin de grado, y que por motivos de relevancia no son directamente presentados en los anteriores apartado de la memoria.

## 8.1 Anexo A: Datos experimentales

En este apartado se pretende profundizar en los diferentes datos recogidos que se consideran de interés, pero que por motivos de espacios no fueron directamente añadidos en la memoria.

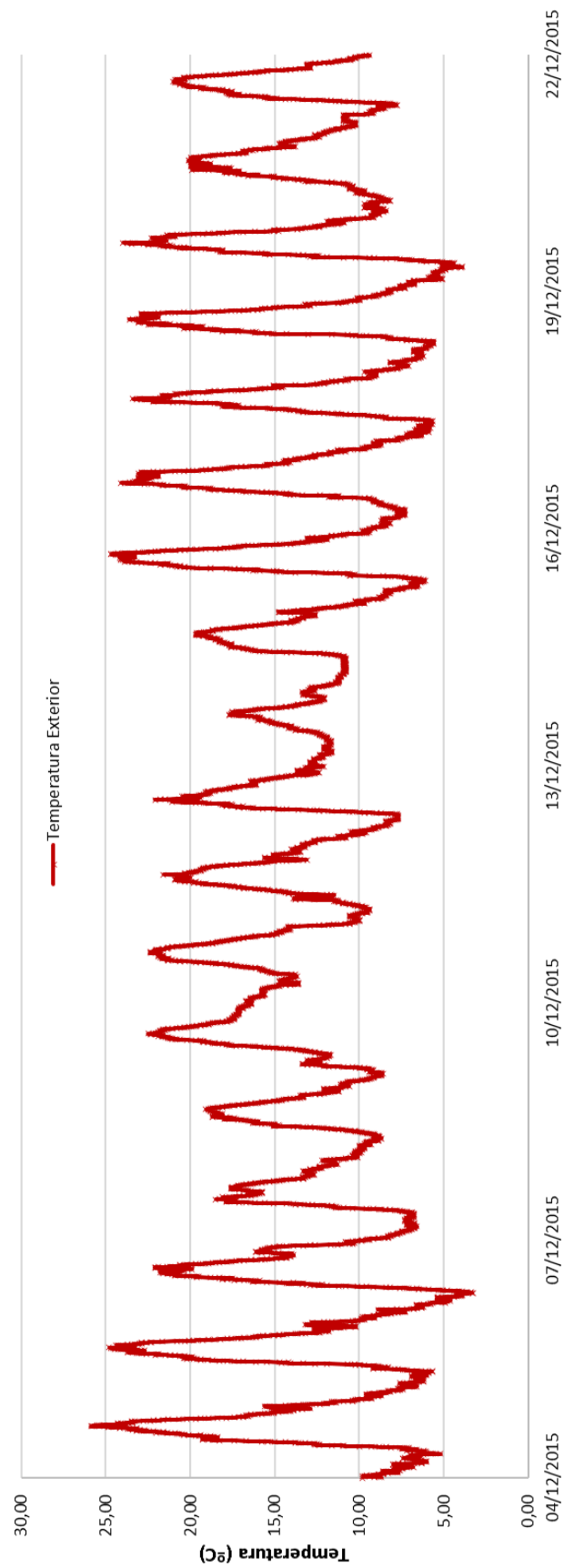
### 8.1.1 Oscilación libre

#### 8.1.1.1 Radiación Solar

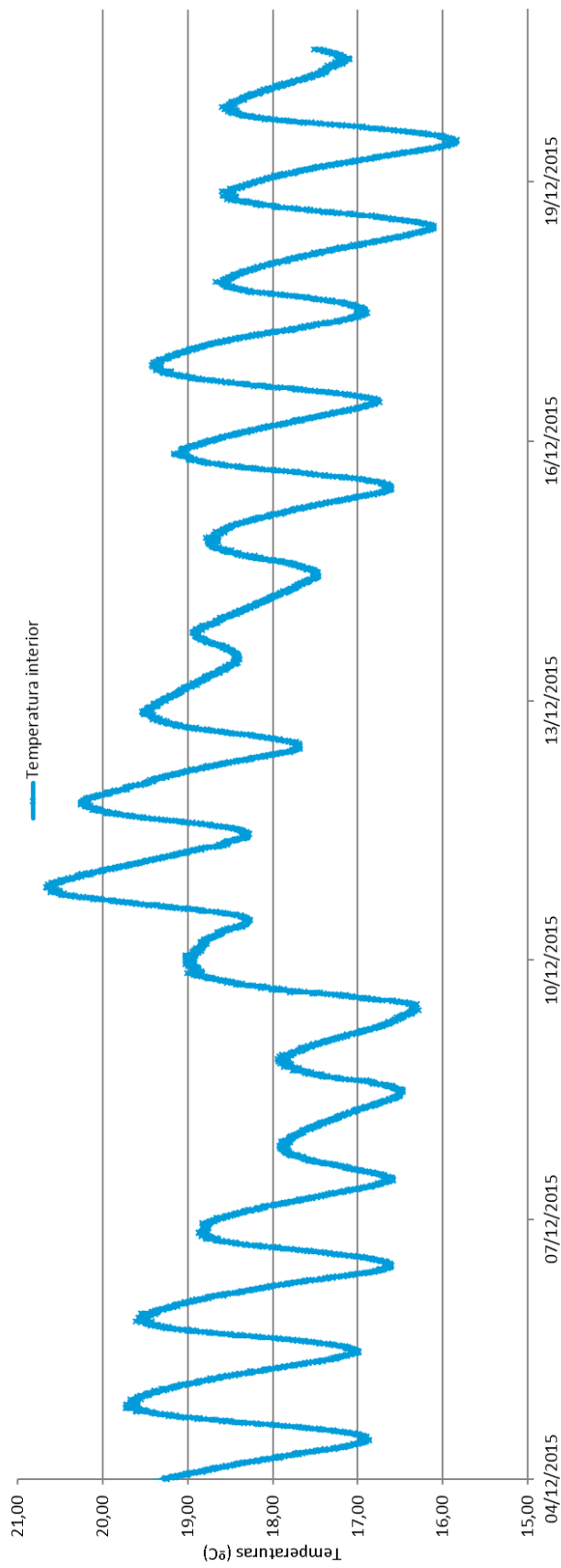




8.1.1.2 Temperatura exterior



### 8.1.1.3 Temperatura interior

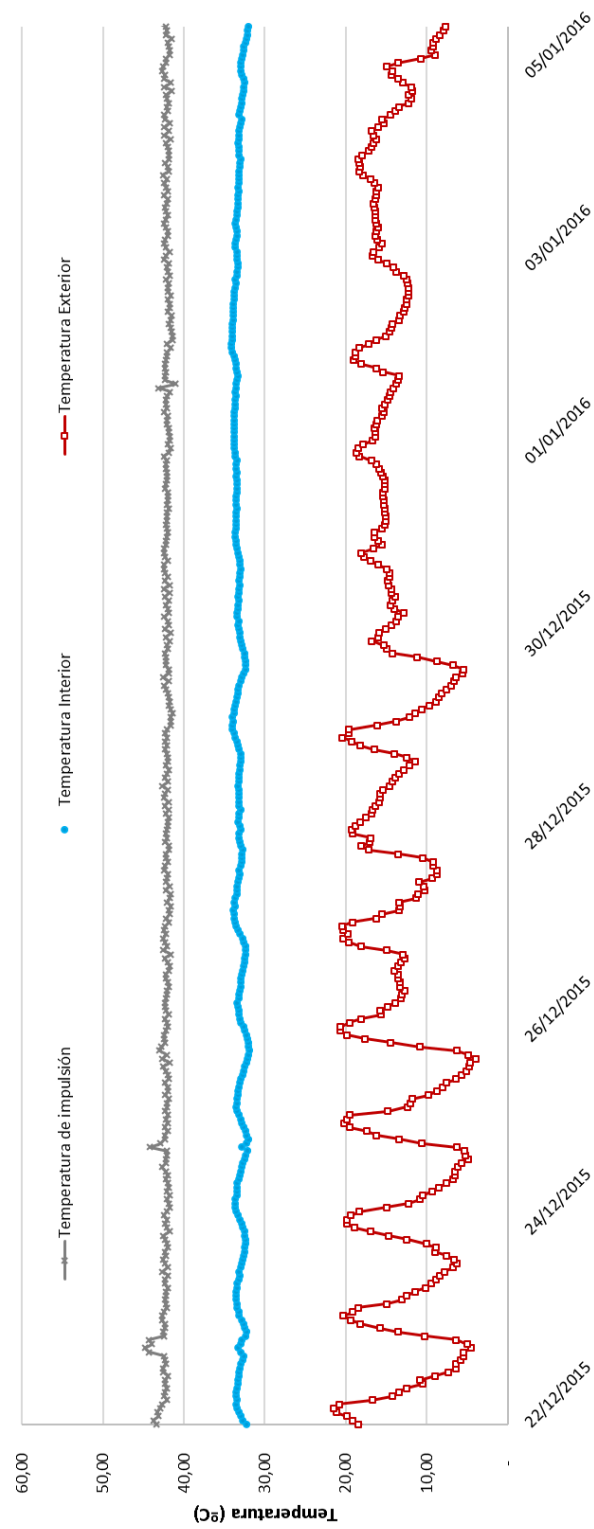


## 8.1.1.4 Datos promedios diarios

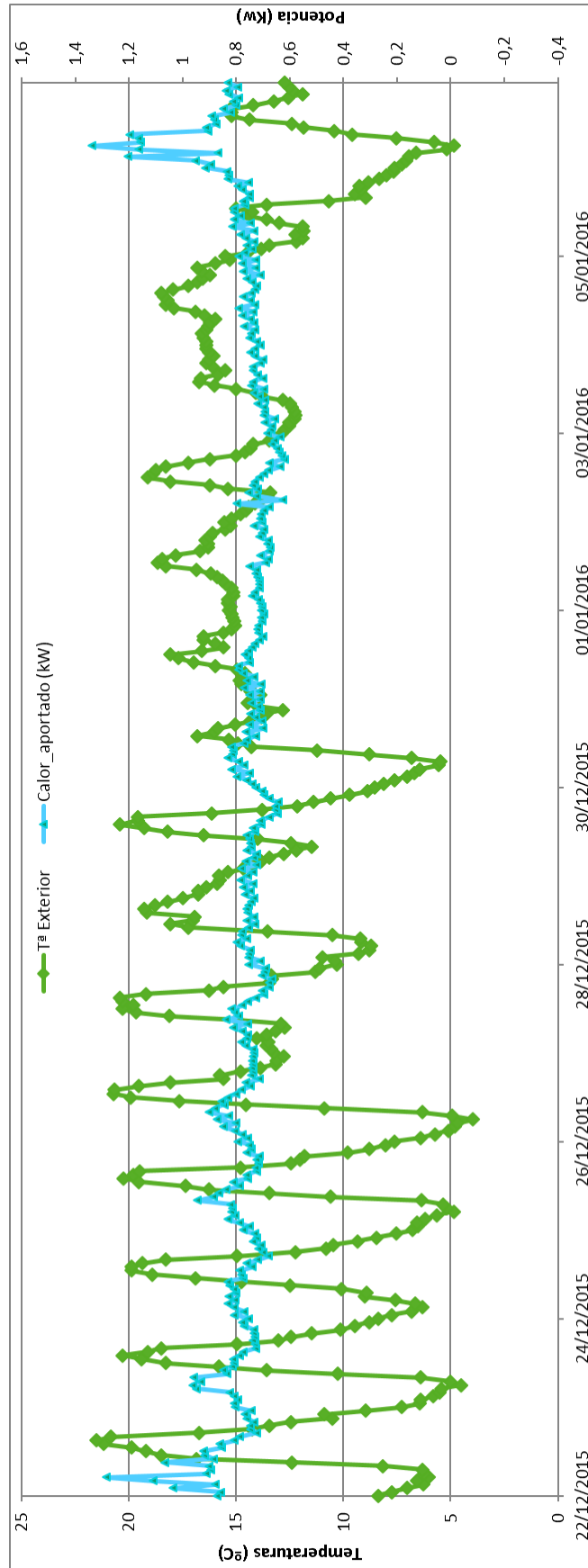
<b>Día</b>	<b>Piranómetro (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>T<sup>a</sup> Exterior (°C)</b>	<b>T interior (°C)</b>
04/12/2015	202,91	13,55	18,76
05/12/2015	189,89	13,17	18,81
06/12/2015	175,15	12,34	18,37
07/12/2015	52,93	11,72	17,93
08/12/2015	50,39	12,94	17,65
09/12/2015	89,18	15,45	17,90
10/12/2015	149,38	16,93	19,69
11/12/2015	147,20	14,54	19,76
12/12/2015	130,60	13,65	19,18
13/12/2015	24,99	13,37	19,12
14/12/2015	31,58	14,03	18,50
15/12/2015	169,64	13,47	18,29
16/12/2015	146,21	13,80	18,50
17/12/2015	116,65	11,84	18,34
18/12/2015	135,26	12,18	17,78
19/12/2015	170,61	11,74	17,67
20/12/2015	88,36	13,69	18,49
21/12/2015	172,51	13,58	0,37

## 8.1.2 Temperatura impuesta

### 8.1.2.1 Temperatura interior, exterior y de impulsión



8.1.2.2 Calor aportado y temperature exterior

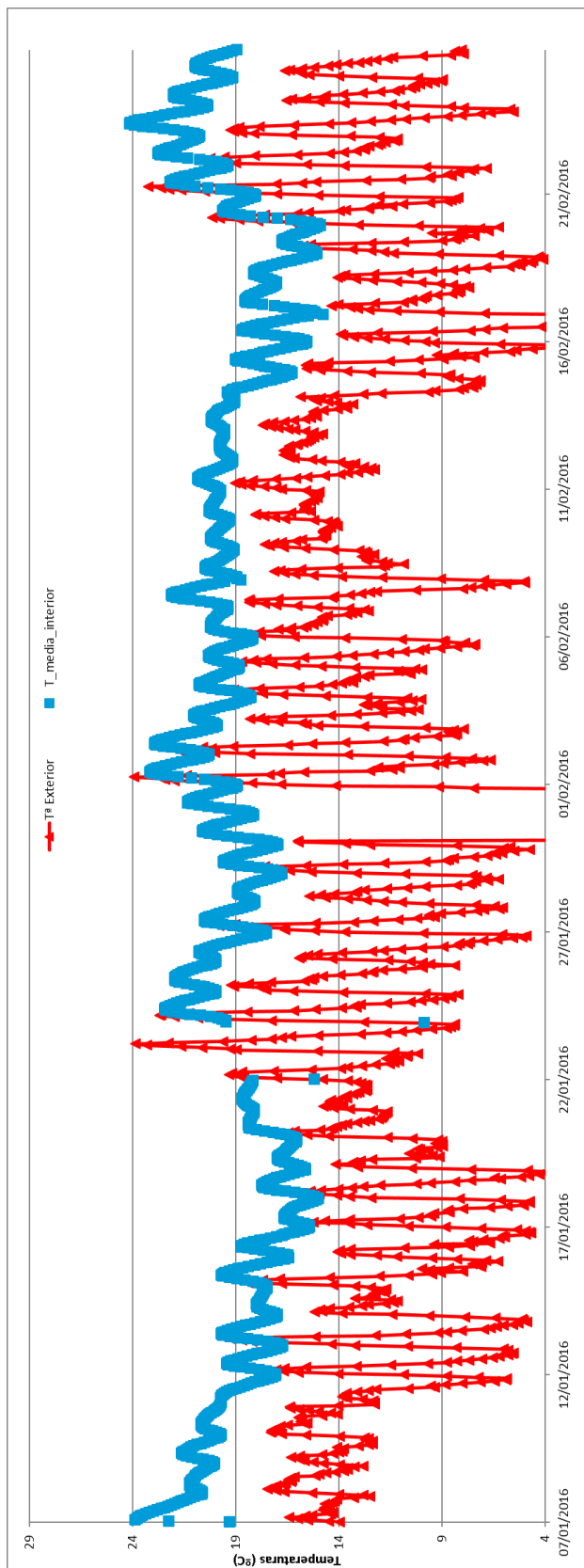


## 8.1.2.3 Datos promedios diarios

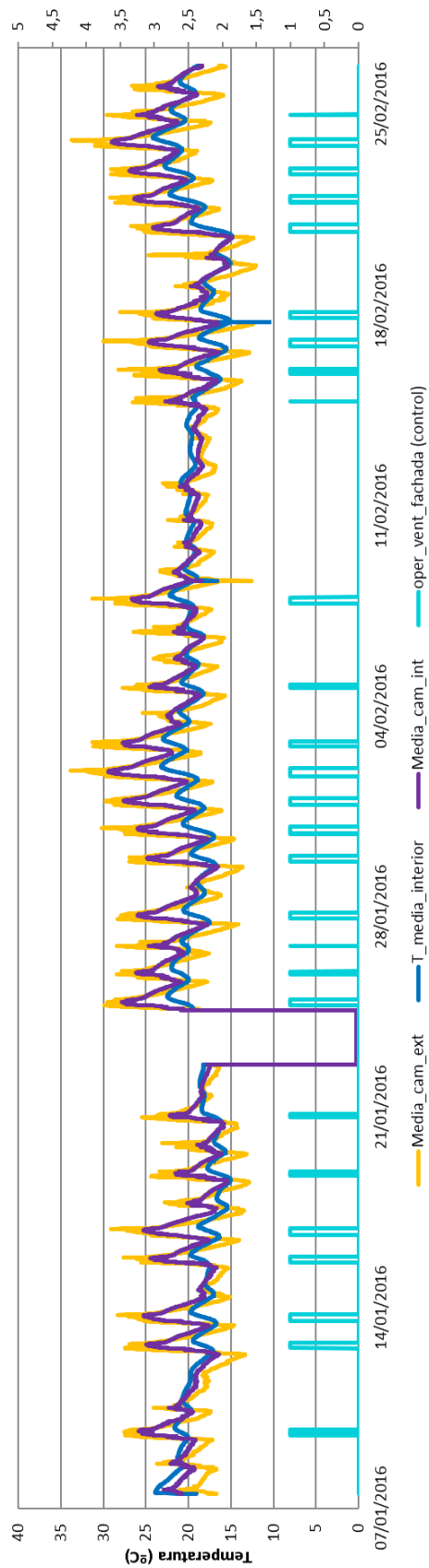
Fecha	Piranómetro (W/m2)	Tª Exterior (°C)	T interior (°C)	Consumo (kw)
22/12/2015	174,28	12,64	32,80	21,22
23/12/2015	141,21	11,19	33,07	19,42
24/12/2015	120,48	11,97	33,02	18,47
25/12/2015	157,87	11,15	32,90	18,88
26/12/2015	135,62	11,92	32,71	19,05
27/12/2015	143,01	15,38	33,10	17,94
28/12/2015	28,53	14,17	33,15	18,06
29/12/2015	149,51	14,73	33,44	17,30
30/12/2015	84,64	11,18	33,02	18,21
31/12/2015	17,40	15,47	33,34	17,72
01/01/2016	33,70	16,21	33,62	16,98
02/01/2016	108,88	15,61	33,77	16,58
03/01/2016	20,78	14,30	33,63	16,92
04/01/2016	29,11	16,92	33,26	17,88
05/01/2016	102,14	12,06	32,72	18,60
06/01/2016	102,70	10,33	32,43	22,68
07/01/2016	18,61	13,98	30,83	17,17

### 8.1.3 Fachada Activa

#### 8.1.3.1 Temperatura interior, exterior



### 8.1.3.2 Temperatura interior y de cámaras





## 8.1.3.3 Datos promedios diarios

Fecha	Piranómetro (W/m2K)	Tª Exterior (°C)	T interior (°C)
07/01/2016	18,61	13,98	23,12
08/01/2016	46,87	15,40	21,25
09/01/2016	140,33	14,60	20,83
10/01/2016	49,52	14,97	20,42
11/01/2016	17,33	14,03	19,84
12/01/2016	154,24	10,58	18,26
13/01/2016	147,33	10,74	18,18
14/01/2016	30,38	9,74	17,85
15/01/2016	108,65	13,05	18,27
16/01/2016	188,35	9,63	17,78
17/01/2016	70,97	8,84	16,40
18/01/2016	104,62	10,19	16,29
19/01/2016	71,14	8,97	16,57
20/01/2016	96,53	12,07	16,94
21/01/2016	14,12	13,16	18,40
22/01/2016	-	-	-
23/01/2016	-	-	-
24/01/2016	-	-	-
25/01/2016	102,69	13,84	21,11
26/01/2016	85,33	12,05	20,66
27/01/2016	151,87	11,16	19,05
28/01/2016	29,75	10,68	18,84
29/01/2016	137,87	10,87	18,13
30/01/2016	157,65	11,37	18,62
31/01/2016	158,04	12,09	19,66
01/02/2016	167,98	17,26	20,73
02/02/2016	121,72	13,53	21,74
03/02/2016	60,54	12,43	20,85
04/02/2016	120,87	14,05	19,51
05/02/2016	61,48	13,74	19,69
06/02/2016	74,82	13,32	19,32
07/02/2016	138,60	14,91	20,41
08/02/2016	56,11	11,15	20,11
09/02/2016	34,12	14,45	19,70
10/02/2016	31,99	15,53	19,85
11/02/2016	42,11	16,22	20,20
12/02/2016	14,41	14,93	19,63
13/02/2016	20,71	15,95	19,83
14/02/2016	103,35	12,82	19,31
15/02/2016	145,04	10,78	17,59
16/02/2016	184,68	8,22	17,13
17/02/2016	170,23	7,21	16,91
18/02/2016	48,97	9,91	17,69
19/02/2016	56,35	9,14	16,19
20/02/2016	164,06	12,88	16,82
21/02/2016	132,82	14,86	19,75
22/02/2016	131,68	13,44	21,03
23/02/2016	151,60	14,52	22,14
24/02/2016	114,27	10,98	21,61
25/02/2016	105,99	12,71	20,32
26/02/2016	24,63	10,06	19,82

## 8.2 Anexo B: Modelo teórico

Se presentan en estos anexos, los resultados correspondientes a las diferentes simulaciones realizadas para los diferentes modelos obtenidos.

### 8.2.1 Coeficiente global de transferencia y área solar

#### 8.2.1.1 Una subdivision

Opciones experimentales		1 Subdivisión				
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	UA (W/K)	U (W/m <sup>2</sup> K)	Área solar (W)	Área Solar (m <sup>2</sup> )
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	9,132	1,312	0,197	1,372
		Baja (0,5 m/s)	10,75	1,545	0,194	1,351
		Media (1,5 m/s)	13,12	1,885	0,185	1,291
	Medio (8 cm)	Alta (2,5 m/S)	14,53	2,088	0,179	1,245
		Nula	2,284	0,328	0,049	0,343
		Baja (0,5 m/s)	8,075	1,160	0,115	0,798
		Media (1,5 m/s)	11,990	1,723	0,143	0,993
		Alta (2,5 m/S)	13,897	1,997	0,150	1,047
		Nula	1,305	0,187	0,028	0,196
Alto (16 cm)	Baja (0,5 m/s)	7,811	1,122	0,107	0,743	
	Media (1,5 m/s)	11,912	1,712	0,140	0,972	
	Alta (2,5 m/S)	13,861	1,991	0,149	1,036	
Doble	Bajo (0 cm)	Nula	8,036	1,155	0,199	1,388
		Baja (0,5 m/s)	9,264	1,331	0,203	1,415
		Media (1,5 m/s)	10,973	1,577	0,206	1,433
	Medio (8 cm)	Alta (2,5 m/S)	11,940	1,716	0,206	1,436
		Nula	2,208	0,317	0,055	0,381
		Baja (0,5 m/s)	7,206	1,035	0,135	0,943
		Media (1,5 m/s)	10,170	1,461	0,172	1,200
		Alta (2,5 m/S)	11,509	1,654	0,185	1,288
		Nula	1,280	0,184	0,032	0,221
Alto (16 cm)	Baja (0,5 m/s)	6,996	1,005	0,129	0,895	
	Media (1,5 m/s)	10,114	1,453	0,170	1,183	
	Alta (2,5 m/S)	11,484	1,650	0,184	1,279	

## 8.2.1.2 Dos subdivisiones

Opciones experimentales		2 Subdivisiones				
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	UA (W/K)	U (W/m <sup>2</sup> K)	Área solar (w)	Área Solar (m <sup>2</sup> )
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	9,132	1,312	0,197	1,372
		Baja (0,5 m/s)	10,85	1,559	0,194	1,350
		Media (1,5 m/s)	13,25	1,904	0,185	1,290
	Medio (8 cm)	Alta (2,5 m/S)	14,66	2,107	0,179	1,244
		Nula	2,284	0,328	0,049	0,343
		Baja (0,5 m/s)	8,363	1,202	0,118	0,821
	Alto (16 cm)	Media (1,5 m/s)	12,252	1,760	0,145	1,012
		Alta (2,5 m/S)	14,118	2,028	0,153	1,062
		Nula	1,305	0,187	0,028	0,196
Doble	Bajo (0 cm)	Baja (0,5 m/s)	8,123	1,167	0,111	0,770
		Media (1,5 m/s)	12,185	1,751	0,143	0,993
		Alta (2,5 m/S)	14,088	2,024	0,151	1,052
	Medio (8 cm)	Nula	8,036	1,155	0,199	1,388
		Baja (0,5 m/s)	9,338	1,342	0,204	1,417
		Media (1,5 m/s)	11,065	1,590	0,206	1,436
	Alto (16 cm)	Alta (2,5 m/S)	12,030	1,728	0,207	1,438
		Nula	2,208	0,317	0,055	0,381
		Baja (0,5 m/s)	7,436	1,068	0,139	0,970
	Media (1,5 m/s)	10,359	1,488	0,175	1,220	
	Alta (2,5 m/S)	11,661	1,675	0,187	1,303	
	Nula	1,280	0,184	0,032	0,221	
	Baja (0,5 m/s)	7,246	1,041	0,133	0,925	
	Media (1,5 m/s)	10,311	1,481	0,173	1,205	
	Alta (2,5 m/S)	11,641	1,673	0,186	1,296	

## 8.2.1.3 Cuatro subdivisiones

Opciones experimentales		4 Subdivisiones				
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	UA (W/K)	U (W/m <sup>2</sup> K)	área solar (W)	Área Solar (m <sup>2</sup> )
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	9,132	1,312	0,197	1,372
		Baja (0,5 m/s)	10,907	1,567	0,194	1,349
		Media (1,5 m/s)	13,326	1,915	0,185	1,290
		Alta (2,5 m/S)	14,733	2,117	0,179	1,243
	Medio (8 cm)	Nula	2,284	0,328	0,000	0,000
		Baja (0,5 m/s)	8,522	1,224	0,049	0,343
		Media (1,5 m/s)	12,391	1,780	0,147	1,022
		Alta (2,5 m/S)	14,233	2,045	0,154	1,070
		Nula	1,305	0,187	0,028	0,196
Alto (16 cm)	Baja (0,5 m/s)	8,295	1,192	0,113	0,784	
	Media (1,5 m/s)	12,328	1,771	0,144	1,004	
	Alta (2,5 m/S)	14,206	2,041	0,152	1,060	
	Nula	8,036	1,155	0,199	1,388	
Doble	Bajo (0 cm)	Baja (0,5 m/s)	9,380	1,348	0,204	1,418
		Media (1,5 m/s)	11,115	1,597	0,206	1,437
		Alta (2,5 m/S)	12,078	1,735	0,207	1,440
		Nula	2,208	0,317	0,055	0,381
	Medio (8 cm)	Baja (0,5 m/s)	7,562	1,087	0,141	0,984
		Media (1,5 m/s)	10,458	1,503	0,177	1,230
		Alta (2,5 m/S)	11,740	1,687	0,189	1,312
		Nula	1,280	0,184	0,032	0,221
		Baja (0,5 m/s)	7,383	1,061	0,135	0,941
Alto (16 cm)	Media (1,5 m/s)	10,413	1,496	0,175	1,216	
	Alta (2,5 m/S)	11,721	1,684	0,187	1,304	

### 8.2.2 Campo de temperaturas

#### 8.2.2.1 Una subdivisión

Opciones experimentales		1 Subdivisión								
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	T_sii	T_ai	T_sie	T_sei	T_ae	T_see		
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075		
		Baja (0,5 m/s)	0,617	0,428	0,413	0,323	0,379	0,088		
		Media (1,5 m/s)	0,532	0,384	0,378	0,309	0,351	0,107		
	Medio (8 cm)	Alta (2,5 m/S)	0,482	0,357	0,354	0,298	0,331	0,119		
		Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019		
		Baja (0,5 m/s)	0,712	0,51	0,604	0,191	0,425	0,066		
	Alto (16 cm)	Media (1,5 m/s)	0,573	0,417	0,466	0,238	0,371	0,098		
		Alta (2,5 m/S)	0,505	0,375	0,407	0,251	0,343	0,113		
		Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011		
	Doble	Bajo (0 cm)	Baja (0,5 m/s)	0,722	0,518	0,623	0,178	0,43	0,064	
			Media (1,5 m/s)	0,575	0,42	0,472	0,233	0,373	0,097	
			Alta (2,5 m/S)	0,506	0,377	0,41	0,248	0,343	0,113	
Medio (8 cm)		Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186		
		Baja (0,5 m/s)	0,67	0,507	0,494	0,417	0,465	0,214		
		Media (1,5 m/s)	0,609	0,485	0,48	0,422	0,457	0,253		
Alto (16 cm)		Alta (2,5 m/S)	0,574	0,471	0,469	0,423	0,451	0,276		
		Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051		
		Baja (0,5 m/s)	0,743	0,562	0,647	0,278	0,487	0,166		
Primera Subdivisión		Alto (16 cm)	Media (1,5 m/s)	0,638	0,506	0,547	0,353	0,467	0,235	
			Alta (2,5 m/S)	0,59	0,483	0,509	0,379	0,455	0,266	
			Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03	
		Baja (0,5 m/s)	0,751	0,568	0,662	0,264	0,49	0,162		
		Media (1,5 m/s)	0,64	0,507	0,551	0,349	0,467	0,234		
		Alta (2,5 m/S)	0,591	0,483	0,511	0,377	0,456	0,265		

## 8.2.2.2 Dos subdivisiones

Opciones experimentales		2 Subdivisión						
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	T_sii	T_iai	T_sie	T_sei	T_ae	T_see
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075
		Baja (0,5 m/s)	0,62	0,431	0,418	0,33	0,404	0,091
		Media (1,5 m/s)	0,533	0,384	0,381	0,315	0,367	0,111
		Alta (2,5 m/s)	0,482	0,356	0,356	0,303	0,343	0,122
	Medio (8 cm)	Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019
		Baja (0,5 m/s)	0,714	0,512	0,606	0,205	0,465	0,071
		Media (1,5 m/s)	0,572	0,416	0,465	0,249	0,392	0,103
		Alta (2,5 m/s)	0,503	0,374	0,405	0,26	0,356	0,118
	Alto (16 cm)	Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011
		Baja (0,5 m/s)	0,723	0,519	0,624	0,193	0,471	0,069
		Media (1,5 m/s)	0,574	0,418	0,471	0,245	0,393	0,103
		Alta (2,5 m/s)	0,504	0,375	0,408	0,258	0,357	0,118
Doble	Bajo (0 cm)	Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186
		Baja (0,5 m/s)	0,673	0,511	0,5	0,424	0,487	0,22
		Media (1,5 m/s)	0,611	0,486	0,483	0,429	0,471	0,259
		Alta (2,5 m/s)	0,575	0,472	0,472	0,429	0,461	0,281
	Medio (8 cm)	Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051
		Baja (0,5 m/s)	0,745	0,566	0,65	0,296	0,525	0,178
		Media (1,5 m/s)	0,638	0,506	0,548	0,367	0,486	0,244
		Alta (2,5 m/s)	0,59	0,483	0,509	0,39	0,469	0,273
	Alto (16 cm)	Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03
		Baja (0,5 m/s)	0,753	0,571	0,665	0,283	0,529	0,174
		Media (1,5 m/s)	0,64	0,508	0,552	0,363	0,487	0,243
		Alta (2,5 m/s)	0,591	0,483	0,511	0,388	0,469	0,273
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075
		Baja (0,5 m/s)	0,607	0,407	0,403	0,317	0,379	0,086
		Media (1,5 m/s)	0,522	0,368	0,367	0,303	0,35	0,106
		Alta (2,5 m/s)	0,472	0,343	0,345	0,293	0,33	0,117
	Medio (8 cm)	Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019
		Baja (0,5 m/s)	0,69	0,47	0,576	0,188	0,423	0,065
		Media (1,5 m/s)	0,555	0,393	0,444	0,235	0,369	0,097
		Alta (2,5 m/s)	0,49	0,357	0,39	0,248	0,34	0,113
	Alto (16 cm)	Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011
		Baja (0,5 m/s)	0,698	0,476	0,592	0,176	0,427	0,063
		Media (1,5 m/s)	0,557	0,395	0,449	0,231	0,37	0,096
		Alta (2,5 m/s)	0,491	0,358	0,392	0,246	0,341	0,112
Doble	Bajo (0 cm)	Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186
		Baja (0,5 m/s)	0,661	0,489	0,485	0,411	0,465	0,212
		Media (1,5 m/s)	0,601	0,472	0,471	0,417	0,457	0,252
		Alta (2,5 m/s)	0,567	0,461	0,462	0,419	0,45	0,275
	Medio (8 cm)	Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051
		Baja (0,5 m/s)	0,724	0,528	0,623	0,276	0,487	0,166
		Media (1,5 m/s)	0,624	0,487	0,53	0,352	0,466	0,234
		Alta (2,5 m/s)	0,579	0,469	0,496	0,379	0,455	0,265
	Alto (16 cm)	Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03
		Baja (0,5 m/s)	0,731	0,532	0,636	0,263	0,489	0,161
		Media (1,5 m/s)	0,625	0,488	0,534	0,348	0,467	0,233
		Alta (2,5 m/s)	0,58	0,469	0,498	0,376	0,455	0,265

8.2.2.3 Cuatro subdivisiones

Opciones experimentales		4 Subdivisión						
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	T_sii	T_aj	T_sie	T_sei	T_ae	T_see
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075
		Baja (0,5 m/s)	0,621	0,433	0,421	0,334	0,419	0,092
		Media (1,5 m/s)	0,534	0,385	0,383	0,318	0,375	0,112
		Alta (2,5 m/S)	0,483	0,356	0,357	0,306	0,349	0,124
	Medio (8 cm)	Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019
		Baja (0,5 m/s)	0,714	0,513	0,607	0,213	0,488	0,074
		Media (1,5 m/s)	0,571	0,415	0,464	0,256	0,403	0,106
		Alta (2,5 m/S)	0,503	0,373	0,405	0,265	0,364	0,12
	Alto (16 cm)	Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011
		Baja (0,5 m/s)	0,723	0,52	0,625	0,201	0,495	0,073
		Media (1,5 m/s)	0,574	0,417	0,47	0,252	0,405	0,105
		Alta (2,5 m/S)	0,504	0,374	0,407	0,263	0,365	0,12
Doble	Bajo (0 cm)	Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186
		Baja (0,5 m/s)	0,675	0,513	0,503	0,428	0,5	0,223
		Media (1,5 m/s)	0,612	0,487	0,485	0,432	0,479	0,262
		Alta (2,5 m/S)	0,576	0,472	0,473	0,431	0,467	0,284
	Medio (8 cm)	Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051
		Baja (0,5 m/s)	0,747	0,568	0,652	0,305	0,546	0,184
		Media (1,5 m/s)	0,638	0,507	0,548	0,374	0,496	0,249
		Alta (2,5 m/S)	0,59	0,483	0,509	0,395	0,475	0,277
	Alto (16 cm)	Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03
		Baja (0,5 m/s)	0,754	0,573	0,667	0,293	0,551	0,18
		Media (1,5 m/s)	0,64	0,508	0,552	0,37	0,497	0,248
		Alta (2,5 m/S)	0,591	0,483	0,511	0,393	0,476	0,277
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075
		Baja (0,5 m/s)	0,615	0,421	0,413	0,327	0,405	0,09
		Media (1,5 m/s)	0,528	0,376	0,376	0,312	0,367	0,11
		Alta (2,5 m/S)	0,477	0,35	0,351	0,3	0,343	0,121
	Medio (8 cm)	Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019
		Baja (0,5 m/s)	0,703	0,492	0,592	0,204	0,465	0,071
		Media (1,5 m/s)	0,563	0,404	0,454	0,248	0,39	0,103
		Alta (2,5 m/S)	0,496	0,364	0,397	0,259	0,355	0,118
	Alto (16 cm)	Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011
		Baja (0,5 m/s)	0,711	0,498	0,609	0,192	0,471	0,069
		Media (1,5 m/s)	0,565	0,405	0,459	0,244	0,392	0,102
		Alta (2,5 m/S)	0,497	0,365	0,399	0,257	0,356	0,117
Doble	Bajo (0 cm)	Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186
		Baja (0,5 m/s)	0,669	0,502	0,495	0,421	0,488	0,219
		Media (1,5 m/s)	0,606	0,48	0,479	0,426	0,472	0,259
		Alta (2,5 m/S)	0,572	0,467	0,468	0,427	0,461	0,28
	Medio (8 cm)	Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051
		Baja (0,5 m/s)	0,736	0,549	0,638	0,295	0,526	0,178
		Media (1,5 m/s)	0,631	0,497	0,539	0,366	0,486	0,244
		Alta (2,5 m/S)	0,584	0,476	0,502	0,389	0,468	0,273
	Alto (16 cm)	Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03
		Baja (0,5 m/s)	0,743	0,553	0,652	0,282	0,529	0,174
		Media (1,5 m/s)	0,633	0,498	0,543	0,362	0,487	0,243
		Alta (2,5 m/S)	0,585	0,476	0,504	0,387	0,469	0,273

Opciones experimentales		4 Subdivisión							
Vidrio	Aislante	Velocidad del aire	T_sii	T_ai	T_sie	T_sei	T_ae	T_sec	
Simple	Bajo (0 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075	
		Baja (0,5 m/s)	0,608	0,408	0,405	0,32	0,391	0,088	
		Media (1,5 m/s)	0,522	0,368	0,369	0,306	0,358	0,108	
	Medio (8 cm)	Alta (2,5 m/s)	0,472	0,343	0,345	0,295	0,336	0,119	
		Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019	
		Baja (0,5 m/s)	0,69	0,47	0,576	0,195	0,443	0,068	
	Alto (16 cm)	Media (1,5 m/s)	0,554	0,392	0,443	0,241	0,379	0,1	
		Alta (2,5 m/s)	0,489	0,356	0,389	0,253	0,347	0,115	
		Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011	
	Doble	Bajo (0 cm)	Baja (0,5 m/s)	0,698	0,475	0,592	0,183	0,448	0,066
			Media (1,5 m/s)	0,556	0,393	0,448	0,237	0,38	0,099
			Alta (2,5 m/s)	0,49	0,357	0,391	0,251	0,348	0,115
Medio (8 cm)		Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186	
		Baja (0,5 m/s)	0,663	0,49	0,488	0,414	0,477	0,215	
		Media (1,5 m/s)	0,601	0,472	0,473	0,421	0,465	0,255	
Alto (16 cm)		Alta (2,5 m/s)	0,567	0,461	0,463	0,422	0,456	0,277	
		Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051	
		Baja (0,5 m/s)	0,725	0,529	0,624	0,285	0,506	0,171	
Simple		Bajo (0 cm)	Media (1,5 m/s)	0,624	0,487	0,53	0,359	0,476	0,239
			Alta (2,5 m/s)	0,579	0,469	0,496	0,384	0,461	0,269
			Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03
	Medio (8 cm)	Baja (0,5 m/s)	0,731	0,533	0,637	0,272	0,509	0,167	
		Media (1,5 m/s)	0,625	0,488	0,534	0,355	0,476	0,238	
		Alta (2,5 m/s)	0,579	0,469	0,498	0,382	0,462	0,269	
	Alto (16 cm)	Nula	0,675	0,562	0,45	0,328	0,202	0,075	
		Baja (0,5 m/s)	0,601	0,394	0,396	0,312	0,379	0,086	
		Media (1,5 m/s)	0,516	0,359	0,361	0,299	0,35	0,105	
	Doble	Bajo (0 cm)	Alta (2,5 m/s)	0,467	0,336	0,339	0,29	0,329	0,117
			Nula	0,919	0,89	0,862	0,082	0,05	0,019
			Baja (0,5 m/s)	0,678	0,446	0,559	0,187	0,422	0,065
Medio (8 cm)		Media (1,5 m/s)	0,545	0,38	0,433	0,234	0,367	0,097	
		Alta (2,5 m/s)	0,483	0,347	0,381	0,247	0,339	0,112	
		Nula	0,953	0,937	0,921	0,047	0,029	0,011	
Alto (16 cm)		Baja (0,5 m/s)	0,685	0,451	0,575	0,175	0,426	0,063	
		Media (1,5 m/s)	0,547	0,381	0,437	0,229	0,368	0,096	
		Alta (2,5 m/s)	0,484	0,348	0,383	0,245	0,339	0,112	
Simple		Bajo (0 cm)	Nula	0,714	0,615	0,516	0,409	0,297	0,186
			Baja (0,5 m/s)	0,656	0,478	0,48	0,407	0,466	0,21
			Media (1,5 m/s)	0,596	0,465	0,467	0,415	0,457	0,251
	Medio (8 cm)	Alta (2,5 m/s)	0,563	0,456	0,458	0,417	0,45	0,274	
		Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051	
		Baja (0,5 m/s)	0,714	0,509	0,609	0,275	0,487	0,165	
	Alto (16 cm)	Media (1,5 m/s)	0,616	0,476	0,521	0,352	0,466	0,234	
		Alta (2,5 m/s)	0,573	0,462	0,489	0,378	0,455	0,265	
		Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03	
	Doble	Bajo (0 cm)	Baja (0,5 m/s)	0,719	0,512	0,621	0,262	0,489	0,161
			Media (1,5 m/s)	0,618	0,477	0,525	0,347	0,466	0,233
			Alta (2,5 m/s)	0,574	0,462	0,491	0,376	0,455	0,265
Medio (8 cm)		Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051	
		Baja (0,5 m/s)	0,714	0,509	0,609	0,275	0,487	0,165	
		Media (1,5 m/s)	0,616	0,476	0,521	0,352	0,466	0,234	
Alto (16 cm)		Alta (2,5 m/s)	0,573	0,462	0,489	0,378	0,455	0,265	
		Nula	0,954	0,939	0,923	0,065	0,047	0,03	
		Baja (0,5 m/s)	0,719	0,512	0,621	0,262	0,489	0,161	
Alto (16 cm)		Media (1,5 m/s)	0,618	0,477	0,525	0,347	0,466	0,233	
		Alta (2,5 m/s)	0,574	0,462	0,491	0,376	0,455	0,265	
		Nula	0,921	0,894	0,867	0,112	0,082	0,051	



## 9 REFERENCIAS

---

- [1] Enrique Azpilicueta. Hacia un óptimo energético. Instalaciones y energía. Tectónica. Nº 31
- [2] Ramón Araujo. El edificio como intercambiador de energía. Tectónica. Nº 28
- [3] Mazria, Edward. 1983. El libro de la Energía solar pasiva.
- [4] Guillermo Yañez. 1982. Energía solar, edificación y clima.
- [5] Ramón Araujo. La rehabilitación de la arquitectura moderna. Tectónica. Nº 33