

## **Caracterización experimental de fachadas activas**

Imanol Ruiz de Vergara Ruiz de Azua\*

*Laboratory for the Quality Control in Buildings of the Basque Government (LCCE)*

C/ Aguirrelanda nº 10, 01013 Vitoria-Gasteiz, Basque Country (Spain). E-mail:

[termica@ej-gv.es](mailto:termica@ej-gv.es)

*Department of Thermal Engineering, University of the Basque Country, Bilbao, Spain*

Alameda. Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Basque Country (Spain) E-mail:

imanolruizdevergara@gmail.com

**César Escudero Revilla**

*Department of Thermal Engineering, University of the Basque Country, Bilbao, Spain*

Alameda. Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Basque Country (Spain) E-mail:

Cesar.escudero@ehu.es

**Carlos García Gáfaró**

*Laboratory for the Quality Control in Buildings of the Basque Government,*

C/ Aguirrelanda nº 10, 01013 Vitoria-Gasteiz, Basque Country (Spain). E-mail:

[termica@ej-gv.es](mailto:termica@ej-gv.es)

Alameda. Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Basque Country (Spain) E-mail:

**Ivan Flores Abascal**

*Department of Thermal Engineering, University of the Basque Country, Bilbao, Spain*

Alameda. Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Basque Country (Spain) E-mail:

Ivan.flores@ehu.es

\*Corresponding author

## Caracterización experimental de fachadas activas

Este paper recoge los resultados experimentales de algunos sistemas de fachadas activas que han sido ensayados en condiciones exteriores y en escala edificio. El conjunto de soluciones evaluadas está compuesto por sistemas activos convencionales como el muro Trombe y sistemas de acumulación con materiales de cambio de fase (PCM's), hasta fachadas ventiladas fotovoltaicas. El ensayo caracteriza de forma fiable los mecanismos de transmisión de calor y el comportamiento de la energía de cada una de las soluciones, lo que proporciona modelos matemáticos para aplicaciones a nivel de edificio. Un ejemplo de lo anteriormente comentado es la caracterización del comportamiento convectivo en las cámaras ventiladas, la eficiencia de los paneles solares y las cargas térmicas intercambiadas con el espacio a calentar. Esta caracterización no solo permite conocer la eficiencia del diseño de los sistemas sino aspectos a mejorar de los mismos.

El objetivo del estudio experimental es que los resultados sean totalmente fiables y trazables, por lo que la metodología de ensayo es el punto más importante para lograrlo. Por esta razón, el equipo de ensayo utilizado es una celda de ensayos PASLINK desarrollada por la red Europea DYNASTEE (**DY**Namic **A**nalysis, **S**imulation and **T**esting applied to the **E**nergy and **E**nvironmental performance of buildings). El propósito de esta celda es lograr resultados trazables cuando el ensayo se está llevando a cabo. Se logra mediante tres objetivos: metodología de ensayo estandarizada, uso de importantes herramientas de identificación de parámetros para el análisis de los resultados, y por último participando en ensayos interlaboratorios para obtener las menores incertidumbres posibles durante el cálculo de los resultados.

Siempre que sea posible, se expondrán resultados de los ensayos con el permiso correspondiente del cliente.

Palabras clave: Ensayo en condiciones exteriores, caracterización dinámica, celda de ensayo PASLINK, eficiencia energética en los edificios.

## **1- Introducción**

Somos conocedores de la necesidad de obtener un mayor beneficio de la radiación solar para su uso en la edificación. Puede ser usada para refrigerar o calefactar. Encontramos que hay un gran número de sistemas de fachadas activas. Debemos optimizar y mejorar su comportamiento en función de la estación del año, geografía y climatología. Finalmente, para lograr este objetivo, es muy importante conocer las actuaciones de cada parte de las soluciones, siendo requerido un buen método de ensayo.

Para obtener una correcta caracterización de las fachadas activas ensayadas, es necesario 3 requerimientos: equipamiento fiable, una muestra totalmente representativa y finalmente un proceso de cálculo y análisis de los datos obtenidos preciso y fiable. Todos estos requisitos se logran trabajando con las celdas de ensayo PASLINK y su metodología. Para hacerlo más entendible, se muestra en el siguiente apartado un ejemplo práctico de una fachada activa, centrándose no solo en el ensayo de la muestra sino que también en la construcción de la misma.

Se mostrarán los ensayos realizados de diferentes sistemas de fachadas activas, empezando con fachadas ventiladas ligeras y pesadas, donde se podrá apreciar la variación en la eficiencia de las muestras por diferentes aspectos, tales como la inercia térmica de la capa externa y el espesor de la cámara ventilada. Después, soluciones activas con movimiento forzado de aire, otra con materiales de cambio de fase que acumulan calor, un muro Trombe con diferentes configuraciones y por último una fachada fotovoltaica ventilada analizando no solo su rendimiento eléctrico sino que también la ganancia solar en la cámara ventilada.

Se estudiará el comportamiento de las cámaras ventiladas en todos los casos, comparando la radiación solar y el calor absorbido en la cámara. La eficiencia y la ganancia de energía por día será expresada en kWh/m<sup>2</sup> para cada solución.

## 2- Ensayo & Muestra

### 2.1 Ensayo

#### 2.1.1 Inicios del proyecto

El proyecto Europeo PASSYS (Passive Solar Systems and Component Testing) cuyo principal objetivo era llevar a cabo ensayos en condiciones climáticas reales, en un entorno altamente estandarizado con una metodología de control de garantía de calidad, en relación con las medidas y el funcionamiento en el sitio del ensayo [10], fue desarrollado a partir de mediados de 1980 a mediados de 1990. El principal resultado de estas mediciones era obtener información en relación con: las pérdidas de transmisión (U-valor); el uso de las ganancias solares en condiciones climáticas reales; y su comportamiento dinámico: inercia térmica.

Para mejorar los procedimientos de calidad existentes para los ensayos y para contribuir a la normalización europea a largo plazo, un Grupo de Interés Económico Europeo fue creado en 1994: la AEIE PASLINK. Las actividades de este grupo fueron el desarrollo de diversos proyectos europeos de investigación, concursos de habilidades de identificación del sistema, inspecciones regulares de los sitios de ensayo y miembros de los sistemas de trabajo, participación en Comités de Estándares europeos y la organización de encuentros periódicos para la divulgación de la obra a través de reuniones o jornadas. Actualmente toda la experiencia del grupo PASLINK se ha integrado en la red Europea DYNASTEE (**DY**Namic **A**nalysis, **S**imulation and **T**esting applied to the **E**nergy and **E**nvironmental performance of buildings).

La celda de ensayos podría funcionar por una metodología en estado estacionario con el fin de determinar las principales características (estado de equilibrio) de uso: el coeficiente de transmisión térmica (UA - valor) y el factor de ganancia solar o transmisión solar (GA-valor) de un componente. Esto se logró mediante una medición

indirecta, del flujo neto de calor a través del edificio. El concepto original de esta celda de ensayo fue propuesto por Baker [1-2]

Básicamente, la celda de ensayos PASSYS [8] (figura 2.1) consistía en una estructura bien aislada de 8 x 2,7 x 2,7 m con dos espacios. Uno de 5,0 x 2,7 x 2,7 m llamado "test room" en el sur, y un espacio contiguo al norte llamado el "service room" que contiene equipos de adquisición y aire acondicionado. La fachada sur de la sala de ensayo es intercambiable por lo que es posible probar diferentes componentes de construcción (paredes o techos).

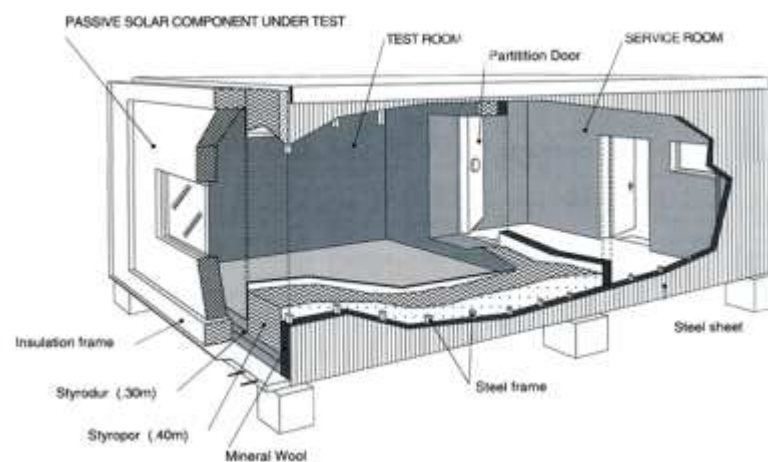


Figura 1: Estructura de la celda de ensayos PASSYS [10, p.18].

### 2.1.2. Celdas de ensayo del LCCE

El beneficio de las células PASLINK es que la transferencia de calor a través del recinto de la sala de ensayo se mide y se controla con alta precisión. De esta manera todo el calor que pasa a través del elemento (para ser ensayado) se puede evaluar correctamente sin la necesidad de largos períodos de estabilización. Dos métodos se han desarrollado para mantener el calor a través de la envolvente bajo control [5-6]: Pseudo-adiabático Shell (PAS) y los fluxímetros en forma de azulejos sensibles al calor (HFS Tiles) [9].

La técnica de PAS se compone de una lámina de calefacción eléctrica incrustada entre

las envolturas celulares interiores originales y una serie de capas de poliestireno y aluminio, utilizado para compensar la pérdida de calor a través de la envolvente de la sala de ensayo, manteniendo una diferencia térmica nula entre la capa de lámina de calentamiento y la más caliente superficie interior de la sala de pruebas. Por otro lado, la técnica de HFS consiste en medir el flujo de calor a través de la envolvente de la sala de ensayo por un número de sensores de flujo de calor en forma de baldosas.

Después de más de 10 años de operación en el grupo PASLINK con el PAS y soluciones técnicas HFS, parece que el método de HFS Tiles simplifica la operación, calibración y mantenimiento de la célula. Por lo tanto, el concepto de HFS Tiles ha sido elegida como la solución que se aplicará en las dos células de prueba PASLINK existentes en la LCCE (Laboratorio para el Control de Calidad en los edificios del Gobierno Vasco) (ver figura 2).



Figura 2: Instalación de las HFS Tiles.

En la actualidad hay dos celdas de ensayo PASLINK en las instalaciones del LCCE (ver figura 3). Una de ellas es denominada EGUZKI en la cual se pueden ensayar elementos verticales de 2,7 x 2,7 m, mientras que la segunda celda es llamada ILARGI en la cual cabe la posibilidad de ensayar tanto elementos verticales 2,7 x 2,7 m, como horizontales de 3,7 x 2,1 m.

Ambas celdas se trajeron de Oporto y antes de ser usadas fueron puestas a punto y actualizadas siguiendo las indicaciones del Dr. J.J. Bloem del European Institute DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability in Ispra-Italy.



Figura 3: Celdas de ensayo PASLINK en el LCCE. De izquierda a derecha: celda ILARGI con una fachada vegetal, celda EGUZKI con una muestra fotovoltaica ventilada.

### 2.1.3. Procedimiento ensayo PASLINK

La estrategia de ensayo se basa en una rutina de entrada de potencia de calefacción en la test room conocida como ROLBS. Antes de que comience el ensayo, es necesario asegurar un estado estacionario tanto en la celda de ensayo como en la prueba. Después de esto, la rutina de calentamiento puede comenzar. Los intervalos de entrada de calentamiento de esta rutina pueden ser de días, horas o treinta minutos. Esta variabilidad permite obtener la información necesaria con el fin de desconectar el comportamiento inercial térmico de la envolvente de la celda al de la muestra de ensayo. La entrada de potencia de calentamiento debe ser lo suficientemente adecuada para alcanzar la mayor diferencia posible en la temperatura entre la test room y las condiciones exteriores. En los ensayos, se busca llegar a diferencias entre los entornos alrededor de  $\Delta T \geq 20^\circ\text{C}$ . (ver figura 4). Esta condición y el alto aislamiento de la celda

proporcionan que se puedan medir los flujos de calor y las temperaturas a través de las muestras con precisión.

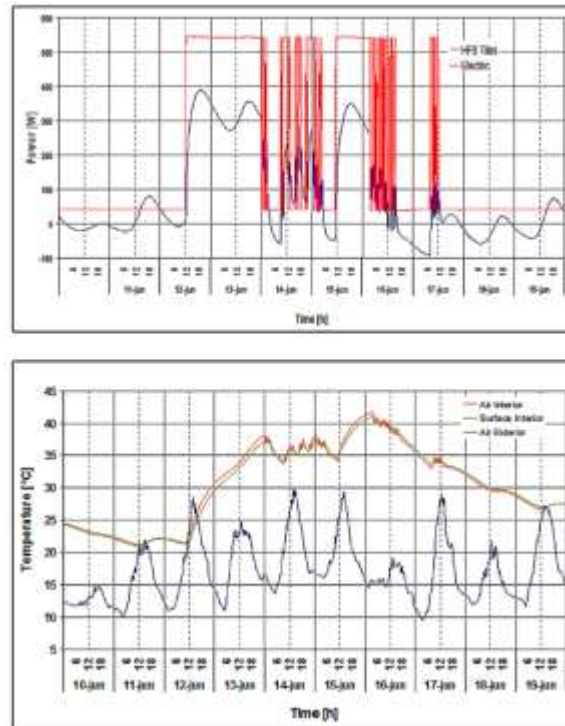


Figura 4: (Gráfico superior) Rutina de calefacción denominada ROLBS [6-7] durante 10 días y (gráfico inferior) las temperaturas del aire de la sala de ensayos, de la superficie de la sala de ensayos y del aire exterior durante el mismo periodo de ensayo.

La base del procedimiento de ensayo, y las posteriores validaciones del modelado y resultado del estudio son para garantizar un período de estado de equilibrio anterior en toda la celda, una diferencia de temperatura entre el ambiente interior y al aire libre, para obtener el máximo desacoplamiento de las principales variables del estudio.

La última parte del proceso de ensayo es la determinación de los principales parámetros y propiedades térmicas de la muestra de estudio. En general, los valores de interés para los componentes opacos son las resistencias térmicas,  $R$  ( $m^2K / W$ ) y las capacidades térmicas,  $C$  ( $J / km^2$ ), y para los componentes semitransparentes, además la ganancia solar. Las herramientas que se utilizan para determinar estas propiedades de la muestra son el LORD (lógica R-determinación), y la CTSM (Tiempo estocástico continua

Modelling). Ambos métodos utilizan los modelos de cajas grises donde los parámetros se determinan a través de ecuaciones diferenciales ordinarias del fenómeno de transmisión de calor aplicado a un modelo de parámetros concentrados.

Dos métodos se aplican [4-7] con el fin de determinar los valores de los parámetros de estudio en las funciones objetivo: la minimización de la suma al cuadrado y el método de máxima verosimilitud estimaciones.

La minimización de la suma al cuadrado método aplicado entre la función calculada y la función objetivo es el más directo. En el caso más simple con función de ajuste sólo una salida, la función para minimizar es,

$$N_t(\theta) = \sum_i [Y_{meas}(i) - Y_{calc}(i)]^2 \quad (1)$$

La función de probabilidad permite la determinación de densidades de probabilidad en función de las variaciones de los parámetros, siendo posible resolver secuencialmente mediante la aplicación de la regla de probabilidad dada por,

$$P(A \cap B) = P(A|B)P(B) \quad (2)$$

## **2.2. Muestra**

En este apartado, se definirá el sistema de portamuestras, el proceso de construcción de las soluciones a ensayar y una sección final con las características técnicas de la instrumentación adicional de la muestra.

### **2.2.1 . Portamuestras**

La célula PASLINK tiene un sistema de soporte de la muestra extraíble en la cara sur, lo que permite la ejecución de los ejemplares más pesados dentro de una pabellón industrial para garantizar la calidad de la construcción y la instalación de la instrumentación sin dañar el sistema de sensores de la celda.

El sistema de soporte de la muestra consiste en una estructura de metal, que ofrece propiedades mecánicas. Dentro de la estructura de metal se coloca un marco de aislante, y en su interior se fabrica el espécimen. El bastidor aislante está formado por un anillo lleno de poliestireno expandido con un espesor de 0,4 m, excepto en la base, en el que la espuma de vidrio se utiliza debido a su mayor capacidad de carga. En la Figura 5 se puede observar una sección transversal del soporte de la muestra instalada en la estructura de la célula PASLINK [3], donde se ve la sección de marco de aislamiento, y también la fabricación del marco.

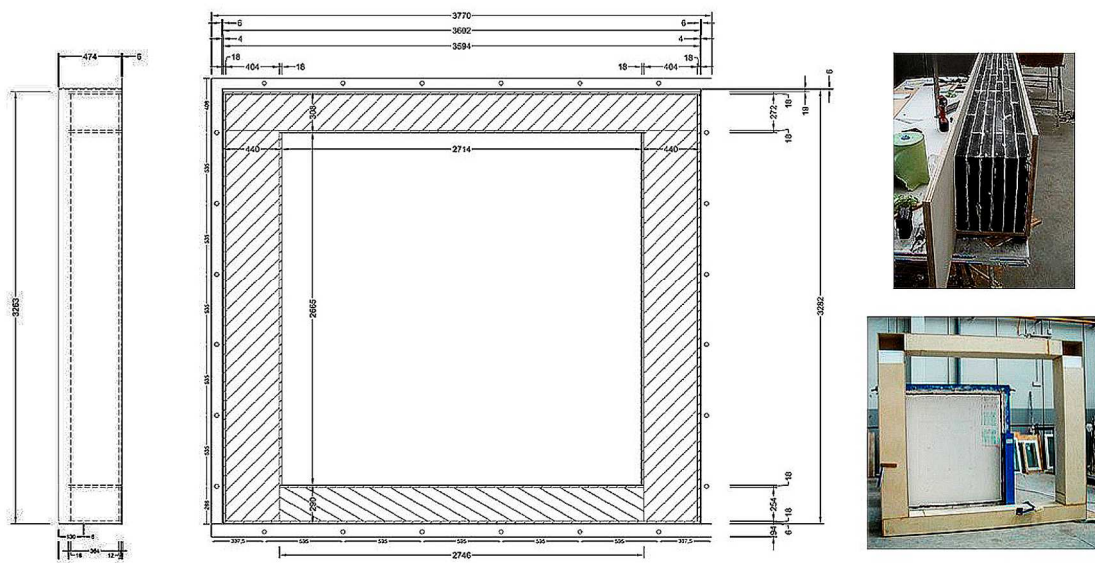


Figura 5 - Configuración del marco aislante

El proceso de anclaje del marco a la celda de ensayos PASLINK se logra mediante la disposición de pernos a lo largo del perímetro del marco metálico.

### 2.2.2 . Construcción de las muestras

El primer paso es la definición geométrica de la muestra y el diseño del sistema de anclaje en el soporte de la muestra. Como ejemplo, se muestra la implementación de una fachada de chapa con movimiento forzado de aire. En las imágenes de la Figura 6 se muestra el diseño propuesto para este ejemplo. Una vez definido el prototipo, la

siguiente tarea es el desarrollo de los planes de construcción de la muestra, con los detalles de fijación a la célula, ver Figura 7.

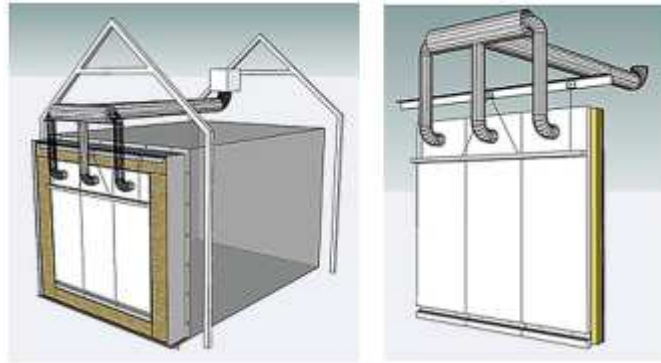


Figura 6 - Diseño del prototipo

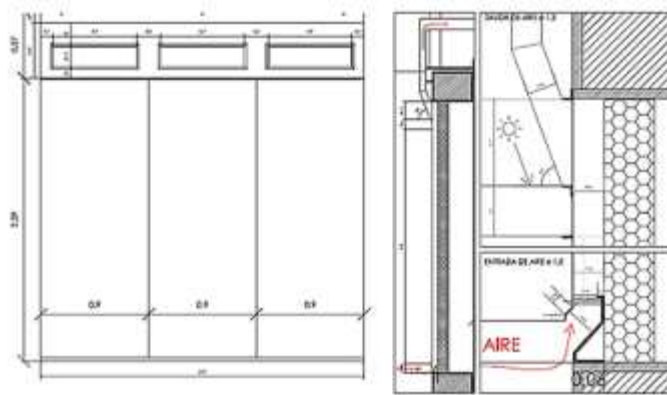


Figura 7 - Planos de construcción y detalles de anclaje

Una vez realizada la definición de la muestra, el siguiente paso es la construcción de la misma. Es llevado a cabo en el interior de un pabellón industrial. El trabajo se hace con el marco ubicado en un soporte, que ofrece control y seguridad a los técnicos, ver figura 8.



Figura 8 - Construcción de la muestra

Después de la construcción de la muestra, se instala en la celda de ensayo. En este proceso se utiliza una grúa, ver la Figura 9. Con el soporte de la muestra suficientemente protegido, se realizan los trabajos finales sobre la muestra tales como el sellado de todas las juntas perimetrales para reducir las infiltraciones. El sellado adecuado de las articulaciones se verifica mediante ensayo de presión, logrando el requisito de menos de 0,5 renovaciones/ h con 50 Pa de diferencia de presión.



Figura 9 - Movimiento de la muestra e instalación en la celda de ensayos

### 2.2.3 . Instrumentación específica de la muestra

La muestra es equipada con la instrumentación necesaria para lograr la

caracterización de:

- Propiedades térmicas de cada capa que forma la muestra
- Comportamiento de la cámara ventilada

Para la medición de estas dos propiedades, se recogen las siguientes variables:

- Temperatura de la superficie
- Flujo de calor de la superficie
- Temperatura del aire
- Diferencia de temperatura entre entornos
- Velocidad del aire
- Diferencias de presión del aire

En la tabla 1 se muestran las características técnicas de los instrumentos utilizados para medir en los diversos ensayos.

| Parameter             | Units             | Type of sensor                 | Uncertainty |
|-----------------------|-------------------|--------------------------------|-------------|
| Temperature           | °C                | PT100, A class, connect 4-wire | ± 0,2 °C    |
| Temperature           | °C                | T type thermocouple            | ± 0,4 °C    |
| Thermo pile           | °C                | K type thermocouple            | ± 0,01 °C   |
| Heat flux             | W/m <sup>2</sup>  | Ahlborn FQA-0801-H             | ± 5 %       |
| Thermo anemometer     | m/s               | Ahlborn FVA-605-TA-1           | ± 0,01 m/s  |
| Differential pressure | bar               | Ahlborn FD8612DPS/APS          | ± 0,5 mbar  |
| Airflow               | m <sup>3</sup> /h | Kimo CP300-ALETAS DEBIMO       | ± 3 %       |

Tabla 1 - Características técnicas de la instrumentación

Para la medición de las propiedades térmicas, la temperatura de superficie se recoge con sondas PT100 RTD superficie. Junto con la temperatura, el flujo bidimensional en el punto central de la superficie se registra mediante fluxímetros.

En la medida de las condiciones de cámara de aire ventilada se incluye el registro de la temperatura y la velocidad del aire en diferentes puntos. Para medir la ganancia total de calor que se produce en la cámara de aire ventilada se utiliza una

termopila de diez puntos de medición que puede grabar directamente la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del aire, con una alta precisión.

El último parámetro es la caída de presión y se registra por medio de sensores de presión diferencial.

### 3- Fachadas ventiladas

#### 3.1 - Fachada ventilada ligera

El primer punto del estudio es definir la solución constructiva de la fachada ventilada. Se elige un modelo de muro base ampliamente utilizado desde la década de 1970 a mediados de los años 90. Es una solución de doble hoja de ladrillo con una cámara de aire. Después de eso, el sistema de fachada ventilada está instalado sobre el muro base. Se muestra el esquema constructivo de la solución en la Figura 10.

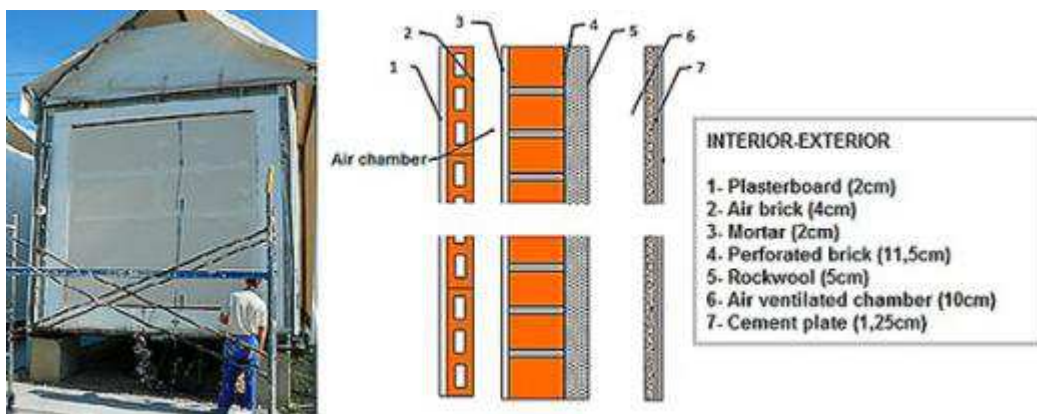


Figura 10 – Muestra en la celda de ensayos PASLINK (izquierda) y el esquema constructivo de la solución (derecha)

Las pruebas experimentales de las fachadas ventiladas, que es un proceso mucho más complejo que el muro base, se dividen en dos periodos diferentes. En el primer período, los datos se utilizan para desarrollar el modelo matemático del comportamiento de la cámara ventilada. El segundo período se utiliza para la validación o el contraste.

A continuación, los parámetros más importantes recogidos durante el período de prueba (aproximadamente 15 días) se describen, y la evolución de los principales parámetros de la muestra durante un día representativo se muestra.

La radiación solar y velocidad del viento a la altura de la muestra se recogen en la figura 11. Estas dos variables son fundamentales para el estudio del comportamiento de la fachada ventilada ya que son responsables para el movimiento del aire dentro de la cámara ventilada. Por un lado, la incidencia de la radiación solar en la hoja exterior de la muestra es la causa del movimiento de aire por convección natural, y el componente principal de analizar en el ensayo. Por otro lado, cuando hay altas velocidades de viento, el aire exterior produce un efecto de empuje que debe añadirse al componente de flotación en el movimiento del aire.

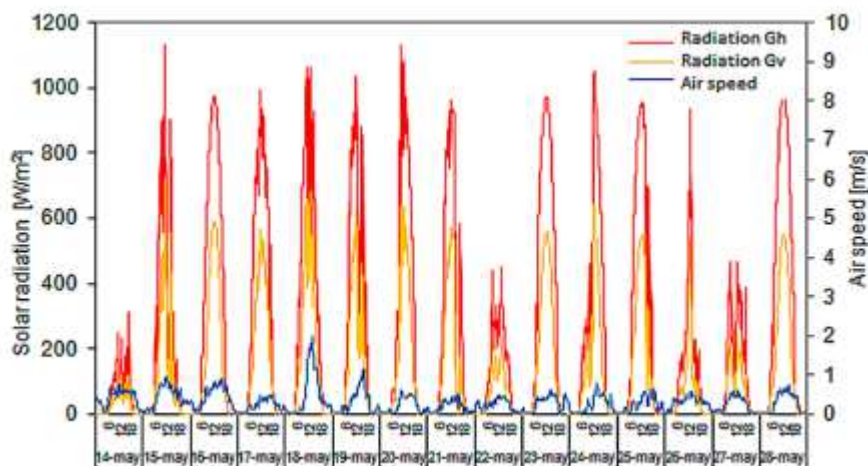


Figura 11 – Radiación solar incidente y velocidad del viento durante el periodo de ensayo en la muestra de fachada ligera

En la figura 12 se puede apreciar la evolución de las temperaturas de la sala de ensayos y del exterior de la celda. La diferencia entre ambas oscila entre los 18°C, manteniéndose unas temperaturas en el interior de la sala de ensayos homogéneas por debajo de 0,5°C de diferencia. La celda de ensayo puede considerarse como un espacio de trabajo muy estable.

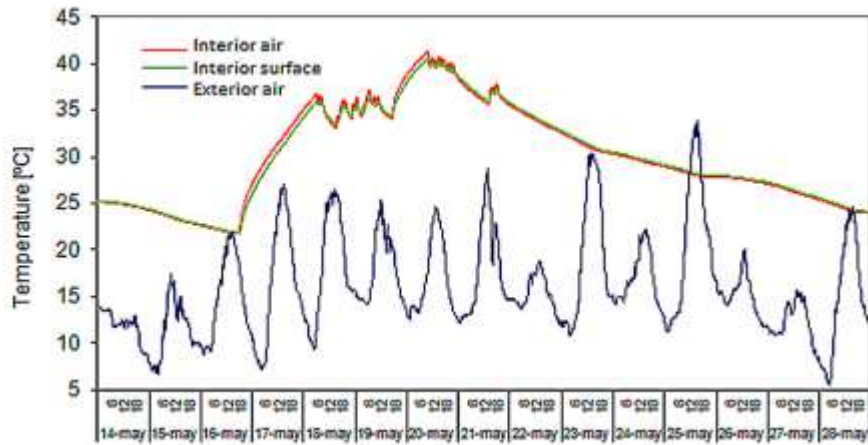


Figura 12 – Temperaturas del interior de la sala de ensayos y del exterior durante el periodo de ensayo

### 3.2 - Heavy ventilated facade

Después de estudiar el comportamiento térmico de una solución de fachada ligera ventilada, el siguiente objetivo es caracterizar una muestra que incluye el efecto de la inercia en la capa externa. Para ello, la hoja ligera de cemento se sustituye por una hoja de hormigón pesado (8,5cm). Otro parámetro que se cambia es la anchura de la cámara de aire (de 10cm a 3,5cm). Básicamente, todos estos cambios, permiten conocer el efecto que tienen sobre las velocidades y las tasas de flujo de aire en la cámara ventilada. La Figura 13 muestra la solución constructiva de la muestra pesada fachada ventilada.

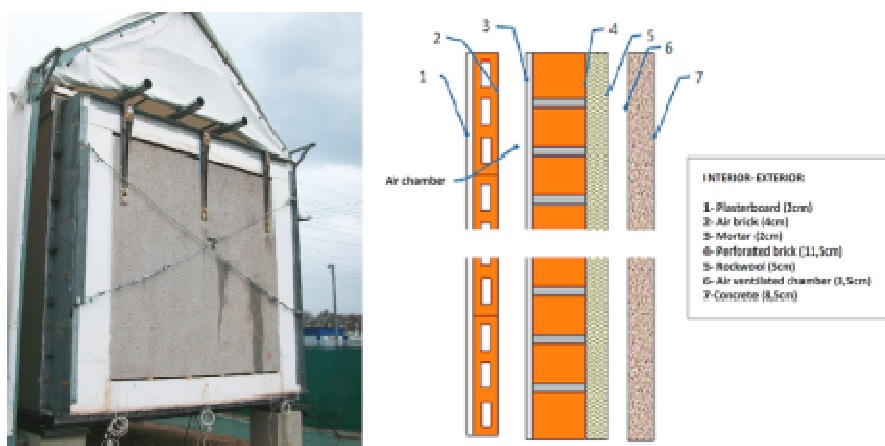


Figura 13 – Solución pesada en la celda de ensayos (izquierda) y esquema de su solución constructiva (derecha)

### 3.3 - Comparación entre la solución ligera y la solución pesada

Para un análisis más profundo del comportamiento de la fachada ventilada, se toman los datos de un día representativo. Se estudian el desarrollo de las principales variables, y el comportamiento de aire se evalúa dentro de la cámara dependiendo de las condiciones ambientales de temperatura y radiación solar. Por último se comparan las soluciones ligeras y pesadas.

El primer parámetro a ser estudiado es la temperatura. La Figura 14 muestra la variación de la temperatura a lo largo de las diferentes capas de las dos muestras (ligera y pesada) a 1,35 metros de altura.

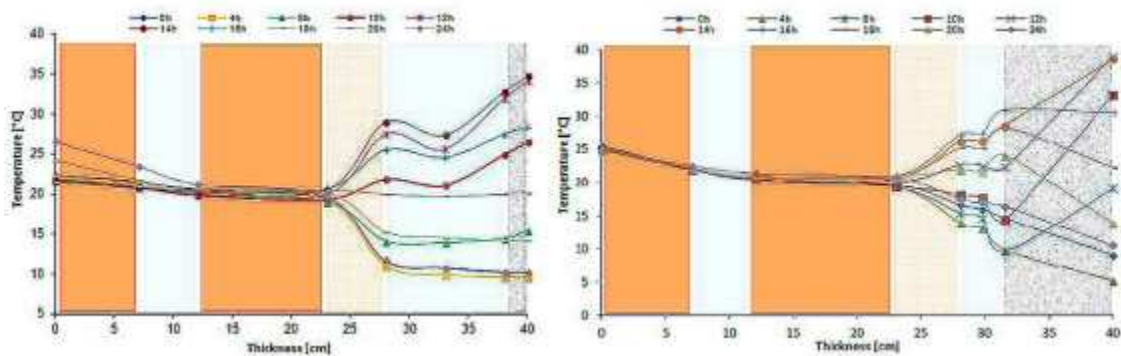


Figura 14 – Perfiles de temperaturas de la solución ligera (izquierda) y de la muestra pesada (derecha) a una altura de 1,35m.

El primer punto importante y que merece mencionar es que se puede apreciar que las temperaturas de ambas muestras antes de la capa aislante no sufren grandes variaciones del ambiente interior. Las temperaturas se mantienen muy estables a lo largo de todo el día. Por un lado, en la solución de fachada ligera, las temperaturas de la cámara ventilada no están vinculadas a las capas adyacentes, y su temperatura es generalmente menor que la temperatura de la capa aislante y la capa de cemento. La variación de la temperatura tiene un perfil parabólico. Por otro lado, en la solución de fachada pesada, la variación de la temperatura en la cámara ventilada está directamente relacionada a ambas capas, teniendo un perfil lineal. La zona más cercana de la cámara ventilada a la

capa aislante tiene temperaturas cercanas a esa capa, repitiendo el mismo fenómeno para las zonas cercanas a la capa de hormigón.

Para una mejor comprensión, en la siguiente figura 15, la variación de la temperatura de la cámara ventilada dependiendo de la hora y el espesor para ambos tipos de fachada puede ser visto.

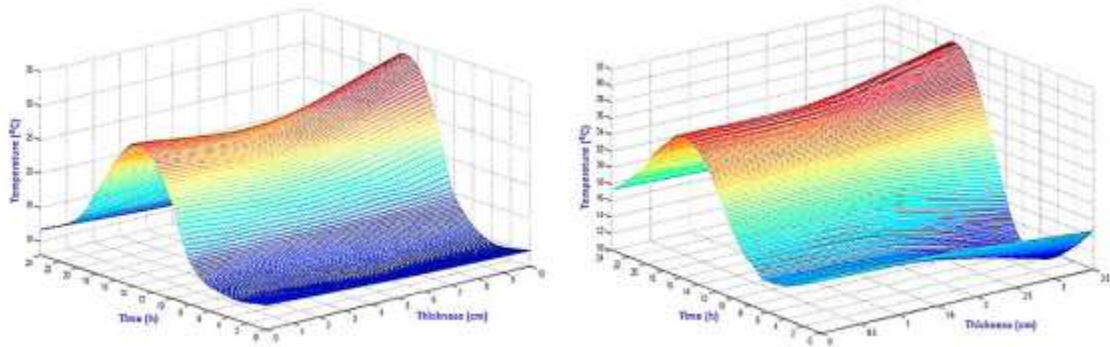


Figure 15 – Variación de la temperatura en la cámara ventilada dependiendo del espesor y el tiempo en la solución ligera (izquierda) y en la pesada (derecha)

Una vez se han evaluado las temperaturas, el siguiente parámetro importante para analizar es el comportamiento de la velocidad del aire en la cámara ventilada [11-13].

Participa directamente en la disipación del calor por el flujo de aire. La Figura 16 muestra la velocidad del aire en la cámara ventilada de ambas soluciones a diferentes alturas.

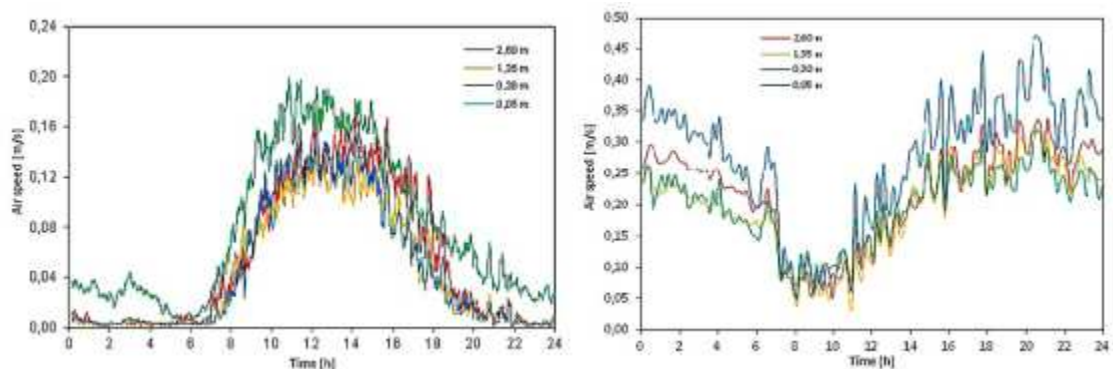


Figura 16 – Velocidad de aire en la cámara ventilada de la muestra ligera (izquierda) y de la pesada (derecha) a diferentes alturas

Como puede apreciarse en la solución ventilada ligera, la velocidad máxima alcanzada en la cámara ventilada no excede valores de 0,2 [m / s]. Hay un efecto de entrada, y se traduce en un aumento de la velocidad del aire, y se ve claramente en el sensor situado en 30 [cm]. De 50 [cm] a la parte superior de la muestra se estabilizan los valores de velocidad. La aceleración de aire tiene lugar durante la mitad del día, alcanzando un valor máximo. Durante la noche, se detienen esos valores.

A diferencia de la fachada ligera, el movimiento del aire en el interior de la fachada pesada es mucho más constante. De 0h a 7h hay velocidades medias alrededor de 0,2 [m / s], debido al calor acumulado en la hoja de hormigón. Entre las 7 y las 11 a.m. hay una ruptura, ya que las temperaturas del aire son iguales dentro de la cámara ventilada que el aire exterior. Y, por último, entre 11h y 16h hay una aceleración de aire para alcanzar valores alrededor de 0,3 [m / s], que se mantuvo hasta el final del día.

Es esencial conocer el comportamiento térmico de la cámara ventilada con el fin de obtener diseños adecuados de los sistemas activos, tales como los que se muestran en las siguientes secciones.

#### **4- Fachadas activas**

Se mostrarán diferentes ejemplos de fachadas que han sido ensayadas en la celda PASLINK en los últimos años. Se empezará con fachadas con extracción de aire forzado, tanto ligera como pesada, después un Muro Trombe y por último una fachada ventilada fotovoltaica.

##### ***4.1 - Fachada opaca ligera ventilada***

La Figura 17 muestra la solución de fachada ventilada ligera opaca. El objetivo de este ensayo fue determinar principalmente la captura de aire además de la capacidad

de energía solar combinada de impulsión como refuerzo para el equipo HVAC en instalaciones con altas cargas de renovaciones de aire. En invierno, el aire que pasa a través de la fachada entra en el edificio y en verano se devuelve al exterior. Para el estudio de este tipo de fachadas, la celda de ensayos tiene un ventilador de impulsión de aire de la captura de la cámara a través de la fachada de tres tolvas. Esta configuración permite un control adecuado y el flujo de aire estable, junto con una medición precisa del flujo de aire en todo momento [12].

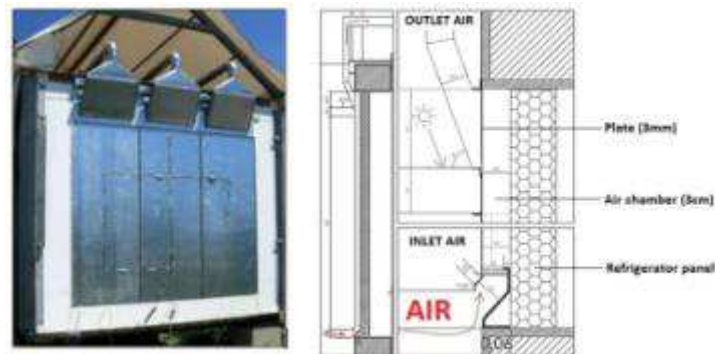


Figura 17 - Fachada ligera opaca ventilada y su esquema constructivo

Se puede llegar a temperaturas cercanas a los  $60^{\circ}\text{C}$  en la capa externa de la muestra cuando la máxima incidencia solar ocurre, consiguiendo al mismo tiempo una absorción de calor por la cámara ventilada. Se aprecia, que cuando se reduce la radiación solar, las temperaturas decrecen rápidamente. La figura 18 muestra un solo día lo que se ha dicho en este párrafo.

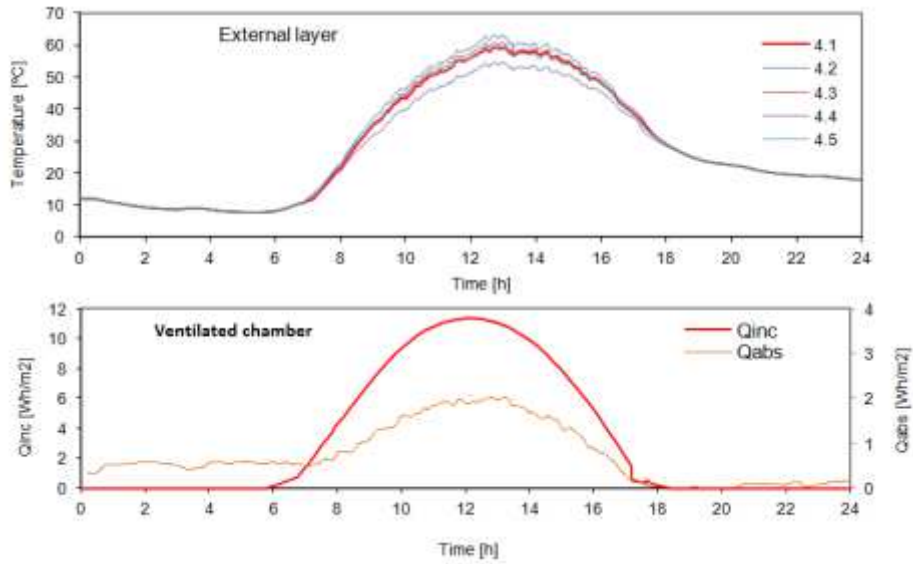


Figura 18 - Perfil de temperaturas (arriba) de la capa exterior y la radiación absorbida por la cámara ventilada a lo largo de un día (abajo)

La energía es absorbida sólo cuando hay radiación solar, debido a la ausencia de inercia térmica de la capa externa. Este hecho es una gran desventaja en el punto en que la producción de energía no tiene por qué coincidir con el momento de la demanda de energía. Se obtuvieron eficiencias cercanas al 22%, con un promedio de 0.9kWh / m<sup>2</sup> por día. La Figura 19 muestra la radiación solar y el calor absorbido por la cámara ventilada durante el periodo de ensayo.

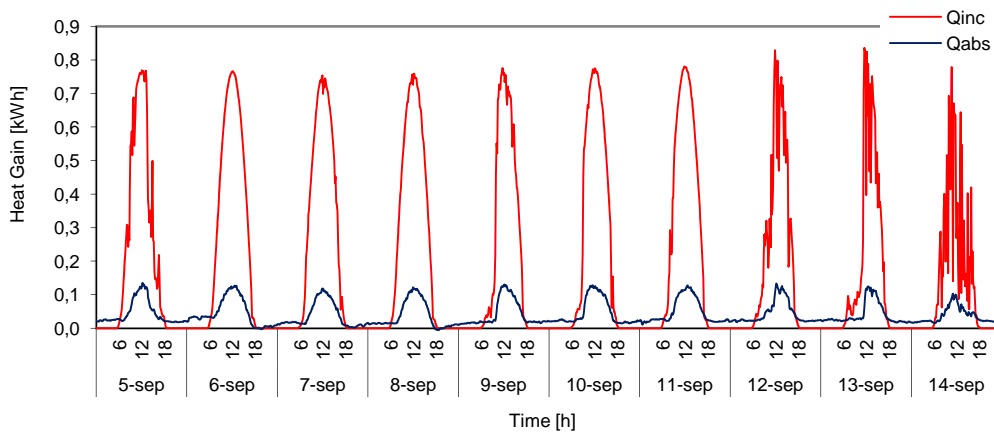


Figura 19 - Radiación solar y el calor absorbido por la cámara ventilada durante un periodo de ensayo de 10 días

## 4.2 - Fachada con Materiales de Cambio de Fase

El segundo ejemplo es una muestra de una fachada ventilada con el movimiento de aire forzado. La particularidad de esta fachada es el uso de materiales de cambio de fase (PCM) [19] en la capa exterior en lugar de la fachada ligera (ejemplo anterior), el aumento de la captación solar y empleando el calor residual para la calefacción en invierno, y para reducir la ganancia solar en verano. La figura 20 muestra el uso de un obstáculo para evitar la entrada de aire en la cámara de aire ventilada a fin de eliminar el efecto del viento en el estudio.



Figura 20 - Fachada con PCM's con movimiento de aire forzado

La ventaja de esta solución reside en la acumulación de calor por el PCM. Cuando se produce este proceso, el aumento de la temperatura es ralentizado, obteniéndose valores máximos de temperatura más bajos que en otras soluciones. Cuando se produce el proceso de enfriamiento, los PCM extienden el perfil de las temperaturas a lo largo del tiempo. La figura 21 muestra la evolución de las temperaturas en la capa de PCM en un solo día. Para determinar este perfil temperaturas, 15 sensores de temperatura se instalaron en los perfiles a diferentes alturas. Se puede apreciar que el proceso de absorber el calor por la cámara ventilada permanece en el tiempo a pesar de que no hay radiación solar.

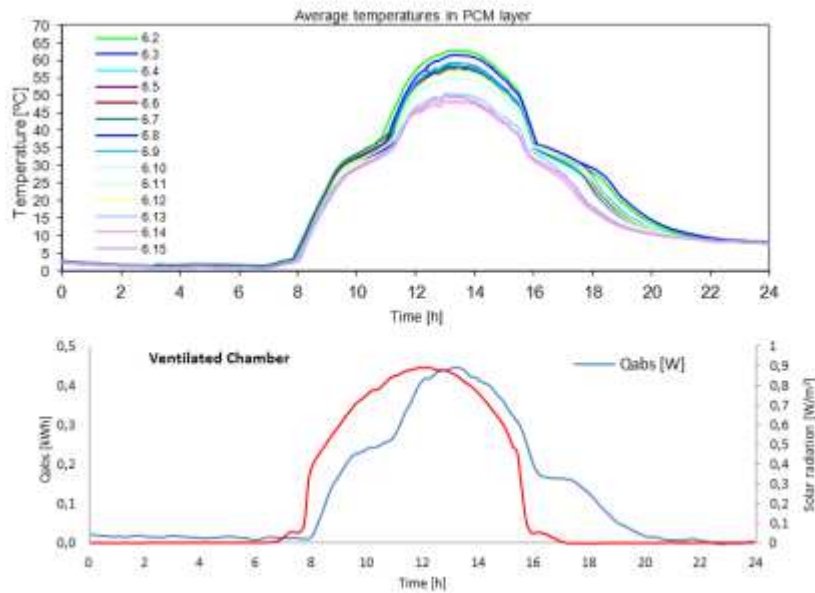


Figura 21 - Perfil de temperaturas (arriba) de la capa de PCM's y la radiación solar absorbida por la cámara ventilada (abajo) a lo largo de un día

La siguiente figura 22 muestra el calor absorbido por la cámara ventilada y la radiación solar incidente. Se aprecia que incluso cuando no hay radiación la cámara absorbe calor debido a los PCM's. Se estima de que se absorbe un 45% de la radiación solar, con una media de 1,35 kWh/m<sup>2</sup> por día.

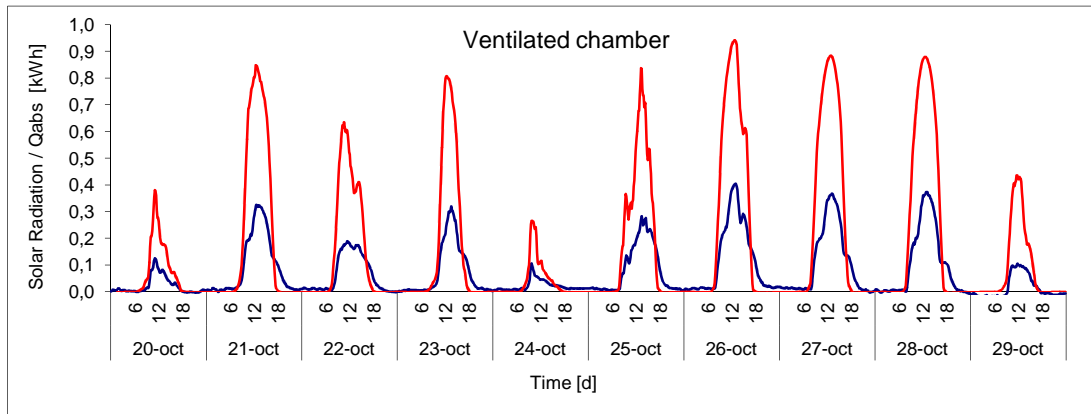


Figura 22 - Radiación solar y calor absorbido por la cámara ventilada durante un periodo de 10 días

### 4.3 - Muro Trombe

El siguiente ejemplo es sobre un muro Trombe [14-15-16-17]. El objetivo de este estudio fue el análisis de las diferentes formas para el uso de la radiación solar a

través de su captura y la acumulación en la masa de la pared. El calor captado por la pared y acumulada por el efecto invernadero del vidrio bajo emisivo-utilizado como un recinto de la cámara de aire, podría ser gestionado por ponerlo en un ambiente interior acondicionado durante el invierno a través de cortinas de aire con configuración interior-interior o exterior-interior. Del mismo modo, el potencial de refrigeración se puede analizar a través de una cortina de aire exterior-exterior o interior-exterior. Todas estas posibilidades se muestran en los siguientes párrafos. Esta versatilidad puede ser añadida a un sistema de control de red bayesiano para predecir la evolución de las condiciones climáticas, y a través de un modelo de comportamiento térmico de la fachada, para elegir la configuración de cortina de aire adecuada para el beneficio máximo de energía. La figura 23 muestra la fachada muro Trombe y la definición de la construcción de la muestra.

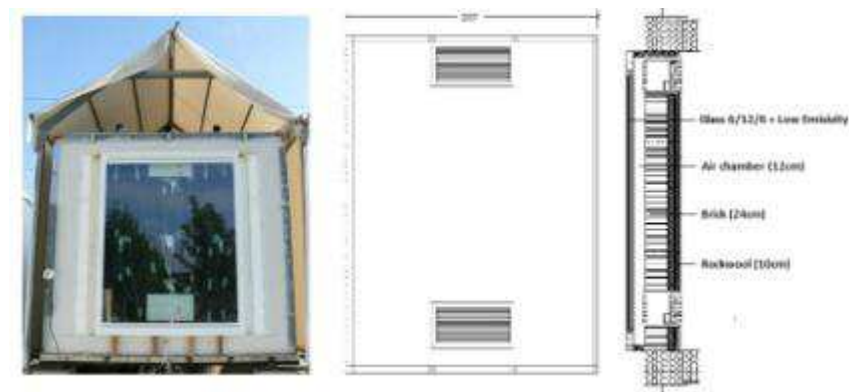


Figura 23 - Muro Trombe y el esquema constructivo del muro

En condiciones de verano la configuración de cortina de aire puede ser utilizado para obtener refrigeración. En la figura 24 se muestra la evolución del comportamiento de la cámara ventilada a lo largo del periodo de prueba, y se puede apreciar que el calor evacuado por la cortina de aire se mantiene constante durante todo el día, incluso cuando la irradiación solar fue menor debido al aumento de la nubosidad. Estos días permite reducir la energía contenida en la hoja de ladrillo y mejorar las condiciones de

partida para los días soleados. Se estima que se absorba aproximadamente el 57% de la radiación solar, con un promedio de  $1,8\text{kWh} / \text{m}^2$  por día.

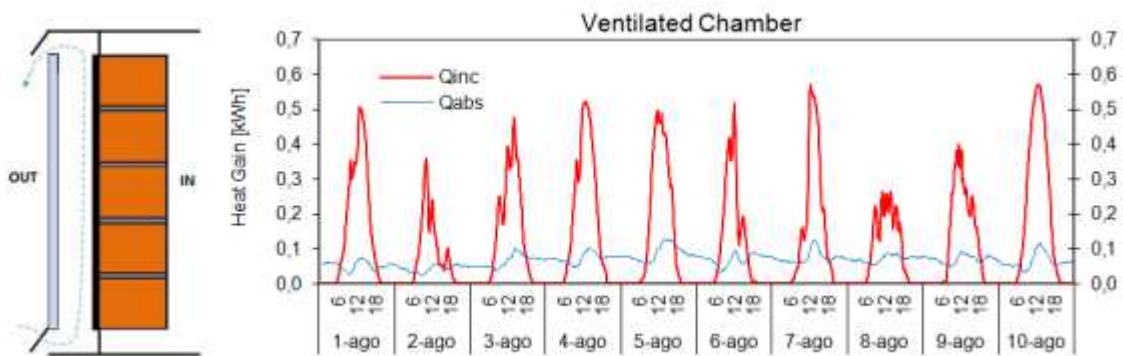


Figura 24 - Configuración de Cortina Out-out, radiación incidente y calor absorbido durante el periodo de ensayo

Utilizando una solución de Cortina de aire in-out, se puede observar que el efecto de calentamiento depende de la componente solar. Se generan picos más elevados de calor absorbido que en el caso anterior. Este comportamiento se muestra en la figura 25. Se estima que es absorbido cerca de un 36% de la radiación solar, con una media de  $1,4 \text{kWh}/\text{m}^2$  por día.

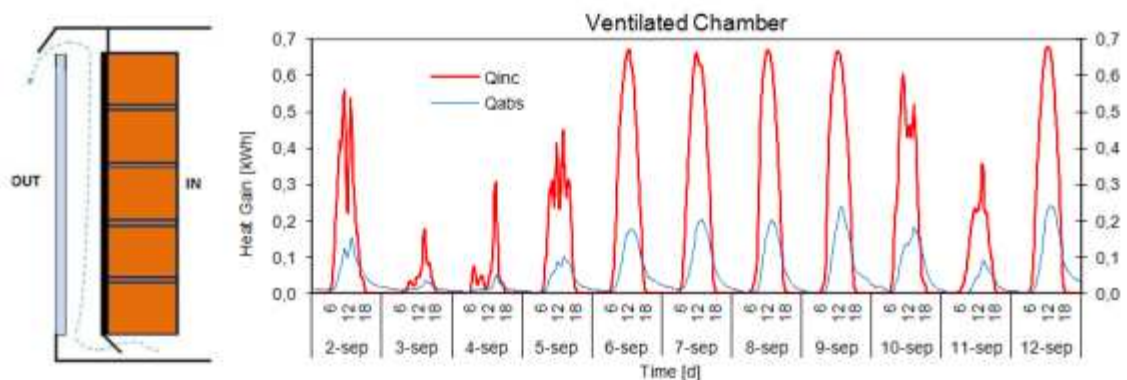


Figura 25 - Configuración de Cortina In-out, radiación incidente y calor absorbido durante el periodo de ensayo

En condiciones de invierno la solución de cortina de aire de interior tiene un objetivo claro: el calentamiento del edificio haciendo pasar el aire frío en el interior de la casa a través de la cámara de aire ventilada. El calor ganado en el proceso se muestra

en la figura 26. Se estima que se absorbe aproximadamente el 58% de la radiación solar, con un promedio de 1 kWh / m<sup>2</sup> por día.

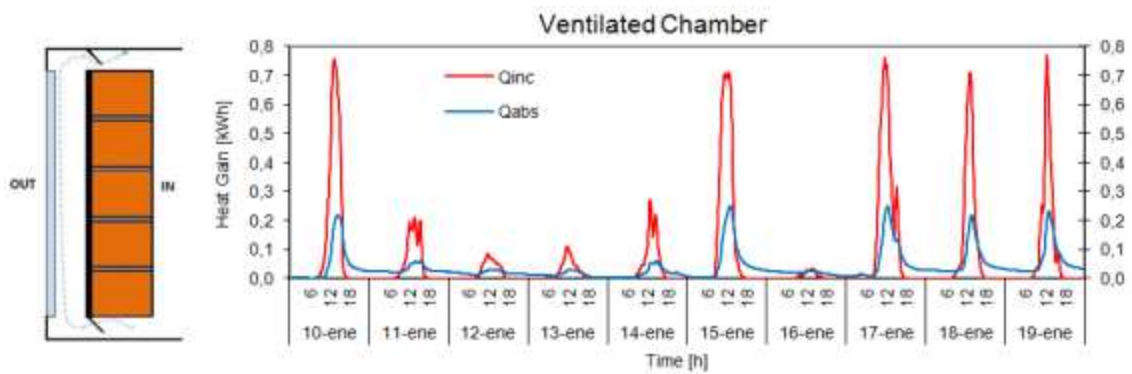


Figura 27 - Configuración de Cortina In-in, radiación incidente y calor absorbido durante el periodo de ensayo

La última solución de cortina de aire puede utilizarse en otoño, consiguiendo altos porcentajes de calor absorbido debido a la velocidad del aire en la cámara ventilada. Incluso en un día con poca radiación solar debido a la nubosidad, el calor absorbido mantiene constante o incluso superior a la radiación solar. La Figura 28 muestra el proceso. Se estima que se absorbe aproximadamente el 61% de la radiación solar, con un promedio de 2,6 kWh / m<sup>2</sup> por día.

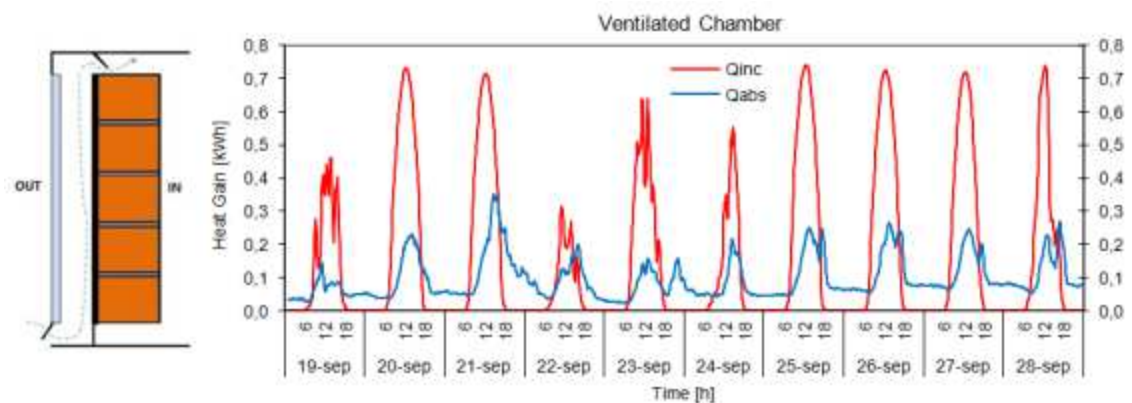


Figura 28 - Configuración de Cortina Out-in, radiación incidente y calor absorbido durante el periodo de ensayo

#### 4.4 - Fachada ventilada fotovoltaica

El último ejemplo es una fachada ventilada fotovoltaica. Esta solución es el tipo más común de sistemas activos en la construcción de envolventes, siendo la producción solar

la única parte importante, olvidando que el calor intercambiado dentro de la cámara ventilada aumenta la eficiencia energética edificio. En la mayoría de estas fachadas, la cortina de aire sólo se utiliza para la refrigeración de los paneles fotovoltaicos y mejorar el comportamiento higroscópico de la fachada. En este estudio se ensaya la solución comercial con la cortina de aire exterior analizando el comportamiento de la cámara ventilada con el fin de obtener un comportamiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos mucho más eficiente y utilizar el calor absorbido dentro de la cámara. Este tipo de fachada activo tiene un gran potencial para introducir un sistema de extracción forzada [18], como se ha demostrado en los ejemplos anteriores que podrían mejorar en gran medida la eficiencia energética global de la envolvente del edificio. En la figura 29, se muestra la fachada de la muestra en la celda PASLINK y el comportamiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos.

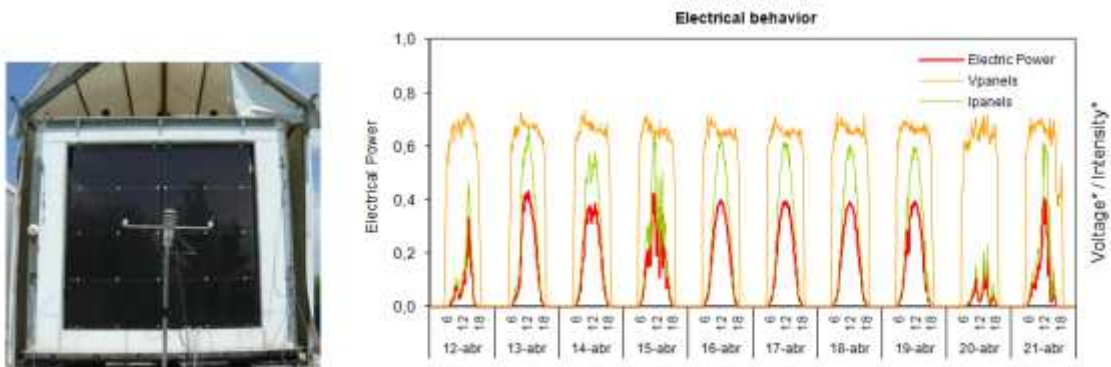


Figura 29 - Fachada ventilada fotovoltaica (izquierda) y las propiedades eléctricas de la muestra durante el periodo de ensayo \*Los valores mostrados son nominales

Como se ha mencionado anteriormente, un aspecto importante del estudio fue cuantificar el calor absorbido por el aire de la cámara ventilada en relación con la radiación solar incidente. Durante un período de prueba de 15 días, considerado plenamente representativo, el porcentaje de ganancia de calor estaba cerca de 30%, con un promedio de 1 kWh / m<sup>2</sup> por día. Podría ser utilizado para complementar en la

construcción de calefacción. La figura 30 muestra el calor absorbido en la cámara ventilada.

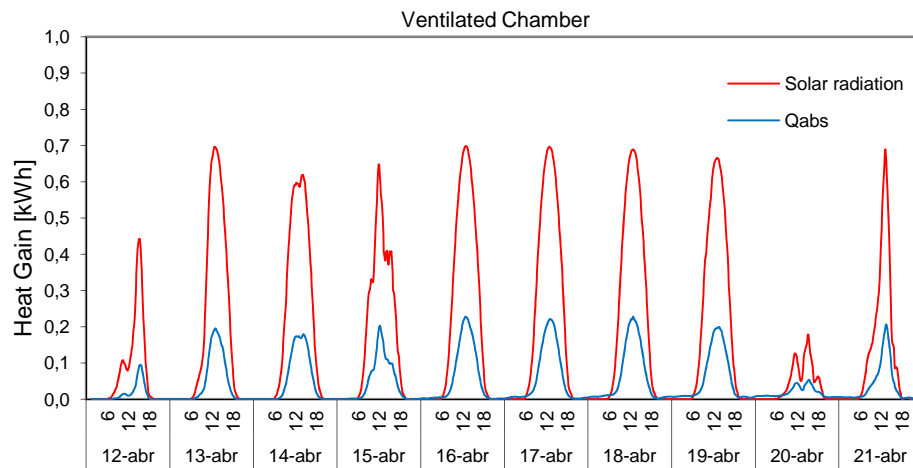


Figura 30- Radiación solar y calor absorbido por la Cortina de aire durante 10 días del ensayo

## **5- Resumen y conclusiones**

Ya nos hemos dado cuenta de que la célula de ensayo PASLINK nos permite caracterizar de forma fiable y precisa cualquier tipo de fachada ventilada. Además, somos capaces de conocer el comportamiento de las cámaras ventiladas y nos trae nuevas oportunidades para utilizarlas en condiciones óptimas en un futuro próximo.

En el análisis de los ejemplos que se muestran en el documento, y comenzando por las fachadas ventiladas, podemos ver cómo la inercia térmica de los materiales puede afectar en la absorción de calor de la radiación solar. Una capa externa con inercia térmica permite que la cámara ventilada para alcanzar altas temperaturas de aire, altas velocidades de aire y largos períodos de tiempo de absorción de calor (energía), incluso cuando no hay radiación solar. Esta energía puede ser utilizada para la refrigeración o la calefacción en función de las condiciones climáticas, la estación del año, la ubicación... Por esta razón, parece muy interesante el concepto de utilizar el movimiento de aire forzado para optimizar la ganancia solar → Fachadas activas

Dentro de las fachadas activas, se ha observado que para el mismo muro base, y existiendo sólo el cambio de la capa externa de la solución, la eficiencia de recolección de calor de la cámara ventilada está duplicado en el caso de materiales con inercia térmica (en este caso, los materiales de cambio de fase con almacenamiento de calor). Otro ejemplo muestra un muro Trombe, cambiando las configuraciones de cortina de aire para obtener grandes eficiencias en todas las estaciones del año. Por último, las fachadas ventiladas fotovoltaicas serían más útiles si aprovechamos el calor absorbido por la cortina de aire.

Si el objetivo principal es conseguir una NZEB (Casi Cero Energía), sólo hay una manera de conseguirlo, y se trata de trabajar con los datos experimentales y probar todas las diferentes soluciones con el fin de tener fachadas activas óptimas que generan energía y participar en la demanda de energía del edificio.

## References

- (1) Baker, P. H. and van Dijk, H. A. L. (2008) PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. *Building and Environment*, Volume 43, pp. 143-151.
- (2) Baker, P.H. (2008) Evaluation of round robin testing using the Paslink test facilities. *Building and Environment*. Vol. 43. Issue 2. pp 181-188.
- (3) Erkoreka, A., Escudero, C., Flores, I., Garcia, C., Sala, J.M. (2010). Upgrading and calibration of two PASLINK test cells. Evaluation through the "IQ-TEST" round-robin test. In: DYNASTEE workshop on Dynamic Methods for Building Energy Assessment Proceedings. Brussels: DYNASTEE.
- (4) Gutschker O. (2004) LORD – Modelling and identification software for thermal systems, user manual. Germany: BTU Cottbus.
- (5) Hahne, E. and Pfluger R. (1996) Improvements on PASSYS test cells. *Solar Energy*, Volume 58, Issues 4-6, pp 239-246.
- (6) J.J. Bloem, P. H. Baker, P. Strachan, H. Madsen, L. Vandaele. (2010) DYNASTEE – Dynamic Testing, Analysis and Modelling. In: Papaglastra and Wouters. Ed. 2010. Stimulating increased energy efficiency and better building ventilation. Leading actions coordinated by INIVE eeg and sources of other relevant information on EU level and IEA ECBCS projects. Brussels: INIVE EEIG. pp. 473-496.
- (7) Kristensen N. R. and Madsen H. (2003) Continuous time stochastic modelling -CTSM 2.3- User Guide. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- (8) Schreitmüller K. et al. (1985). Design of an advanced passive solar test facility. DFVLR Stuttgart. Report prepared for the Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development, Brussels.
- [9] Van der Linden, G.P., Van Dick, H.A.L., Lock, A.J., van der Graaf, F. (1995) Installation Guide for HFS Tiles for the PASSYS test cells, WTCB-CSTC, Brussels.
- (10) Wouters P. and Vandaele L. 1994. PASSYS, COMPASS, PASLINK: a European approach for the full-scale evaluation of thermal and solar performances of building components. *Proc. Of the European Conf. on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings*, Lyon, pp. 29-36
- (11) Therese K. Stovall. (2004) Airflow in the ventilation space behind a rain screen wall. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.
- (12) Viskanta R. (2002) Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades. Heat Transfer Laboratory, School of Mechanical Engineering, Purdue University.
- (13) Seferis P. (2011) Investigation of the performance of a ventilated wall. Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow.
- (14) Samar Jaber. (2011) Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region. Ilmenau University of Technology, Department of Thermal and Fluid Dynamics, Ilmenau, Germany.
- (15) Basak Kundakci Koyunbaba. (2012) The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels. Ege University, Solar Energy Institute, Izmir, Turkey.
- (16) Wei Sun. (2010) Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south façade design. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, China.
- (17) Zerrin Yilmaz. (2011) An approach for energy modeling of a building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system. Istanbul Technical University, Faculty of Architecture, Istanbul, Turkey.
- (18) Tin-Tai Chow. (2008) Potencial application of "see-through" solar cells in ventilated glazing in Hong Kong. Building Energy & Environmental Technology Research Unit, City University of Hong Kong, China.
- (19) Gonzalo Diarce. (2013) Ventilated active facades with PCM. ENEDY research group, Department of science materials, University of the Basque Country, Bilbao, Spain