

**REHABILITACIÓN AVANZADA DE EDIFICIOS: FACHADA VENTILADA
INTELIGENTE CON APROVECHAMIENTO DE LA INERCIA TÉRMICA PARA
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA****ADVANCE REFURBISHMENT OF BUILDINGS: SMART VENTILATED FAÇADE
WITH THERMAL MASS UTILISATION FOR ENERGY STORAGE**

Alvaro Ruiz Pardo

José Sánchez Ramos

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad de Cádiz

Servando Álvarez Domínguez

Laura Romero Rodríguez

Grupo de Termotecnia, AICIA

Domingo Pérez Mira

Departamento I+D, AZVI

Resumen

La rehabilitación del parque edificatorio existente tiene un papel clave en la renovación del modelo energético de las ciudades, significando una manera importante de reducir la demanda energética. En este trabajo se presenta el desarrollo de un producto innovador de fachada ventilada especialmente diseñada para el clima mediterráneo, puesto que además de mejorar la envuelta en sus prestaciones para la estación de calefacción es un medio de aprovechamiento del frío nocturno en la estación de refrigeración. La solución ha sido diseñada y construida a nivel de prototipo en el marco de dos proyectos de investigación; el primero SINHOR (2012-2015) financiado por la Conserjería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía; y el proyecto SATAINTER (2015-2016) financiado por la Corporación Tecnológica Andaluza CTA.

La solución consiste en un elemento opaco, aislante e inteligente que se acopla a la fachada del edificio, dejando entre ambos una cámara de aire dotada con compuertas y ventiladores, de tal manera que se puede controlar en qué momento se permite la circulación de aire o no. Dicho aire puede ser tratado o no con un sistema evaporativo, que evacúa el calor contenido en la masa térmica de la fachada. La solución cuenta con la posibilidad de añadir elementos fotovoltaicos para eliminar el consumo de ventiladores, enfriamiento evaporativo para aumentar su potencial en la región mediterránea y un sistema de control que le da la inteligencia para establecer la mejor forma de operación de acuerdo a las condiciones climáticas e interiores de cada instante.

La solución ha sido probada durante los últimos 3 años en un prototipo experimental, incluso como solución de invierno sustituyendo el elemento opaco por un vidrio. Así mismo, se tiene prevista su instalación en un edificio real con un sobre coste admisible y a base de tecnologías existentes a finales de 2016 o comienzos de 2017.

Abstract

The refurbishment of existing buildings plays a key role in the renewal of the energy model of cities, signifying an important way to reduce Energy demand. This paper describe the development of an innovative façade solution, similar to a ventilated façade that has been designed for reducing cooling demand in Mediterranean countries. The main achievement is to exploit thermal energy storage of building applying smart night ventilation. In addition, the solution reduces u-value of envelope, so it improves performance of building in heating period. A prototype of this product has been built within the framework of two research projects; the first SINHOR (2012-2015) funded by the Concierge of Public Works and Housing of the Government of Andalusia; and SATAINTER (2015-2016) project funded by the Andalusian Technological Corporation CTA.

The facade solution consists of an opaque, insulated and intelligent element that attaches to the envelope of building, forming an air chamber, that it is equipped with dampers and fans, allowing airflow control. It is possible to incorporate photovoltaic cells to eliminate consumption of fans and evaporative cooling to increase its potential in the Mediterranean region. The control system gives the intelligence to establish the best way of operation according to weather conditions and interiors of every moment.

The solution has been tested over the last 3 years in an experimental prototype, even as winter solution replacing the opaque element by a glazing layer. Installation in a real building is being planned for late 2016 or early 2017, under costs restrictions and using existing technologies in the market.

Palabras clave: rehabilitación edificios; fachada inteligente; inercia térmica; elementos innovadores; Smart buildings

Área temática: Actuaciones sostenibles en la edificación.

1. Introducción

El objetivo 20-20-20 pretende reducir las necesidades de calor y frío, el consumo de energía primaria, aumentar la contribución de las energías renovables y crear estrategias de balance neto nulo con exportación de energía en edificios. En este contexto se sitúa la situación energética actual, dónde el 40% del consumo de energía y el 36% de emisiones de CO₂ pertenecen a edificios residenciales y comerciales. Lo que se espera es que el objetivo 2020 reduzca un 30% el consumo de energía primaria [1].

A su vez la Agencia Internacional de la Energía IEA en sus informes destaca la importancia del sector de edificios existentes en el cambio energético [2]–[4]. Una de las ideas es que Los altos costos de operación de los edificios existentes hacen que además de las tecnologías existentes sea viable implantar tecnologías emergentes. Esta idea es la que suscita el interés de tecnologías como las que en esta comunicación se presentan.

La publicación más reciente de Directiva europea (2012/ 27/EU) [5], en el considerando 17 cita: El ritmo de renovación de edificios tiene que aumentar ya que el parque inmobiliario existente constituye el sector con mayor potencial de ahorro de energía.

De acuerdo a los datos del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE), la edificación representa un 24% del consumo total de la energía del país. Por otro lado, el consumo energético relativo a la climatización de los edificios en Andalucía representa el 33% de su consumo (proyecto CEVIAN, Universidad de Sevilla), lo que representa el 8% del total. Este porcentaje, además, tiende a incrementarse.

Las estrategias nacionales y regionales para la Especialización Inteligente en Investigación e Innovación (RIS3) consisten en agendas integradas de transformación económica territorial. Más que una estrategia impuesta desde arriba, la Especialización Inteligente supone la colaboración entre empresas, centros de investigación y universidades donde se han identificado las áreas de especialización más prometedoras de cada región, así como los puntos débiles que obstaculizan la innovación.

Dentro de las prioridades de especialización se define la P7: Energías renovables, eficiencia energética y construcción sostenible y en concreto la Línea de Acción L76. Nuevos diseños y materiales para la construcción y los procesos sostenibles.

Adicionalmente, en su artículo 17 la Ley 1/2010 Reguladora del derecho a la Vivienda en Andalucía realza la importancia de la conservación, mantenimiento y rehabilitación: “la actuación de las Administraciones públicas andaluzas irá dirigida al fomento de la conservación, mantenimiento, rehabilitación, accesibilidad, sostenibilidad y efectivo aprovechamiento del parque de viviendas”.

El desarrollo y la utilización de las soluciones constructivas -cubiertas ventiladas, uso de materiales con cambio de fase, integración de paneles fotovoltaicos en la envolvente edificatoria y creación de sumideros de calor en la envolvente edificatoria- en edificios existentes y de nueva construcción se adecua a las necesidades recogidas tanto en la Directiva 2010/31/UE como en la Ley 1/2010 por los siguientes motivos:

- Presenta unos ahorros potenciales superiores al 50% con respecto a la construcción convencional.
- Es una medida que no requiere de grandes complicaciones en cuanto a su implementación, por lo que puede ser de aplicación en el corto plazo, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos en 2020. Adicionalmente, este punto permitirá una pronta llegada al mercado y, por lo tanto, un rápido retorno de la inversión.
- Puede ser de aplicación tanto a obra nueva como a edificios existentes sometidos a una rehabilitación energética (el proyecto propone el desarrollo de un catálogo de soluciones constructivas innovadoras que así lo permitan).

2. Objetivos

El objetivo principal es conseguir una tecnología inteligente con un nivel de madurez suficiente como para su fabricación en serie. Esta tecnología permite reducir la demanda energética de climatización de los edificios potenciando la inercia térmica existente en los mismos, con un funcionamiento autónomo e inteligente en función de las condiciones interiores y exteriores del edificio.

Este producto innovador consiste en una fachada para edificios terciarios cuya función principal es la reducción de la demanda de energía de los mismos con la consecuente reducción del coste energético en climatización. Para ello, dicho producto actuará como sumidero del calor generado en el edificio mediante varios mecanismos: movimiento del aire en el interior mediante una cámara de aire ventilada, masa térmica susceptible de ser activada por dicho aire, y el preenfriamiento del aire exterior mediante la micronización de agua en caso de ser necesario. Este objetivo principal conlleva comprender, analizar y parametrizar las variables fundamentales que caracterizan el comportamiento térmico de los edificios del sector terciario que presentan una tipología particular, cuando se emplean en ellos unas técnicas de almacenamiento energético y reducción del consumo específicas, para producir una guía de diseño de los mismos.

Las tecnologías específicas utilizadas son las siguientes:

- Potenciación del efecto sumidero de calor en la envolvente edificatoria mediante enfriamiento evaporativo directo en el aire de la cámara
- Integración de paneles fotovoltaicos en la envolvente edificatoria

En este trabajo se han estudiado soluciones que, acopladas al cerramiento existente de un edificio, permitan usar su inercia térmica para mejorar la eficiencia energética de los edificios en operaciones de rehabilitación. Con este fin, se ha construido y monitorizado un prototipo de aproximadamente 9 metros cuadrados que ha permitido caracterizar su comportamiento tanto en condiciones de verano (refrigeración) como de invierno (calefacción).

3. Tecnología

3.1. Fundamentos

En primer lugar el sistema integra los sistemas de almacenamiento de energía en la propia estructura del edificio, frente a los intentos que se han realizado donde se acude a depósitos u otros dispositivos externos. Para ello se emplea una serie de aspectos que no han sido cubiertos con anterioridad, a saber: La utilización de la estructura como elemento almacenador además de como elemento resistente es una propuesta que el Grupo de Termotecnia ha seguido en su línea de investigación conocida como "Técnicas de refrigeración natural" durante años. En concreto el Dr. Salmerón en su tesis doctoral proponía este tipo de técnicas y proponía la acumulación en la estructura interior. El mayor inconveniente que presenta este tipo de técnicas es la sollicitación desde el interior siendo necesario la introducción de grandes caudales de aire en el interior del edificio. En este sentido el proyecto que se propone supera esta dificultad mediante la ventilación del aire en la cámara, siendo mucho más accesible este espacio que los espacios habitables del edificio. En definitiva, los sistemas que se proponen presentan prestaciones más allá de los sistemas que han podido obtenerse hasta la fecha, puesto que admiten un almacenamiento en el núcleo del cerramiento tanto en fachadas como en forjados de cubierta. Este hecho también hace que la tecnología a desarrollar pueda adaptarse a una mayor variedad de situaciones y encuentre mayor número de posibles aplicaciones.

La alta demanda de energía derivada de las necesidades de enfriamiento se puede reducir empleando el frío de la noche. El sistema de refrigeración gratuita consiste en

almacenar el frío durante la noche, cuando las temperaturas son más bajas, utilizándolo posteriormente durante el día para enfriar el aire de entrada al edificio. Este concepto ha sido estudiado por diversos autores [6-10].

Adicionalmente, y en previsión del problema que puede presentarse cuando la temperatura de aire exterior no permita la disipación de la cantidad de calor requerida en un edificio, se añade como solución técnica la micronización de agua en el aire para preenfriarlo antes de introducirlo en la cámara. El uso de sistemas evaporativos directos mediante micronización de agua en la cámara ventilada potencia el efecto del enfriamiento natural al que se ha hecho referencia anteriormente.

Para ello se ha diseñado un sistema evaporativo directo fácil de integrar constructivamente en la entrada de la cámara. Se tendrán en cuenta la disposición de los conductos de agua así como la necesidad de instalar válvulas que abran y cierren la circulación del agua en función de la temperatura del aire.

Como puede verse en la siguiente figura, en un clima seco (humedad relativa inferior a 30%), el potencial de enfriamiento del aire por medio del proceso natural de evaporación del agua, llamado enfriamiento evaporativo, es muy grande. De esta forma, pueden alcanzarse condiciones de temperatura y humedad del aire aptas para el uso que se requiera, o en caso de no ser suficiente, el enfriamiento adicional a dar por el equipo de producción de frío convencional a usar sería menor.

		Humedad relativa																
		2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Temperatura del aire	24	12	13	14	14	15	16	17	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22
	27	14	14	16	17	17	18	19	19	20	21	22	22	23	23	24	24	25
	29	16	17	17	18	19	20	21	22	22	23	23	24	24	25	26	27	
	32	18	18	19	21	21	22	23	24	25	26	26	27	28	28	29	30	
	35	19	20	21	22	23	24	26	26	27	28	29	29	30				
	38	21	22	23	24	26	27	28	28	29	31	31						
	41	22	23	25	26	27	29	30	31	32								
	43	24	25	27	28	29	31	32	33									
	46	26	27	28	30	32	33	34										
	49	27	28	30	32	34	35											
	52	28	30	32	34	36												

Fuente: Arizona Almanac

Figura 1: Temperatura de salida del sistema evaporativo en función de la temperatura del aire de entrada y de la humedad [11]

Las técnicas más usadas se basan en enfriamiento evaporativo directo o indirecto [12], no existen en la actualidad sistemas evaporativos comerciales de fabricación en serie más allá de las soluciones de enfriamiento evaporativo directo para enfriamiento ligero de industrias (con recirculación) o de acondicionamiento de espacios abiertos (sin recirculación). En ambos casos su aplicabilidad queda comprometida por el clima (su potencial es muy pequeño para humedades relativas altas en el ambiente exterior).

Otro de los problemas que nos encontramos derivado de la tipología edificatoria objeto del proyecto es la presencia de elementos estructurales autoportantes de muy baja masa y, por tanto, muy poca inercia térmica. Para soslayar esto se pueden incluir de materiales de cambio de fase en la cámara de aire. Dichos materiales acumulan la energía de tal forma que aumentan la inercia significativamente.

3.2. Descripción del elemento innovador

El elemento de fachada innovador presentado en este artículo, tiene dos configuraciones: una para verano y otra para invierno. En la configuración de verano consta de dos hojas opacas y una cámara de aire de tal manera que se asemeja a una fachada ventilada tradicional. En su configuración de invierno consta de tres hojas, dos opacas y una semitransparente, y dos cámaras de aire (ver **Figura 2**).

El elemento masivo, es decir, el que tiene inercia térmica y en el que se almacenará la energía es la hoja interior.

El muro intermedio se encuentra aislado para reducir la cantidad de calor o “frio” que se pierde al exterior

Los ventiladores del muro intermedio permiten activar la convección forzada para transferir el calor solar en invierno a la hoja inerte y permitir la disipación de calor al aire exterior durante las noches de verano

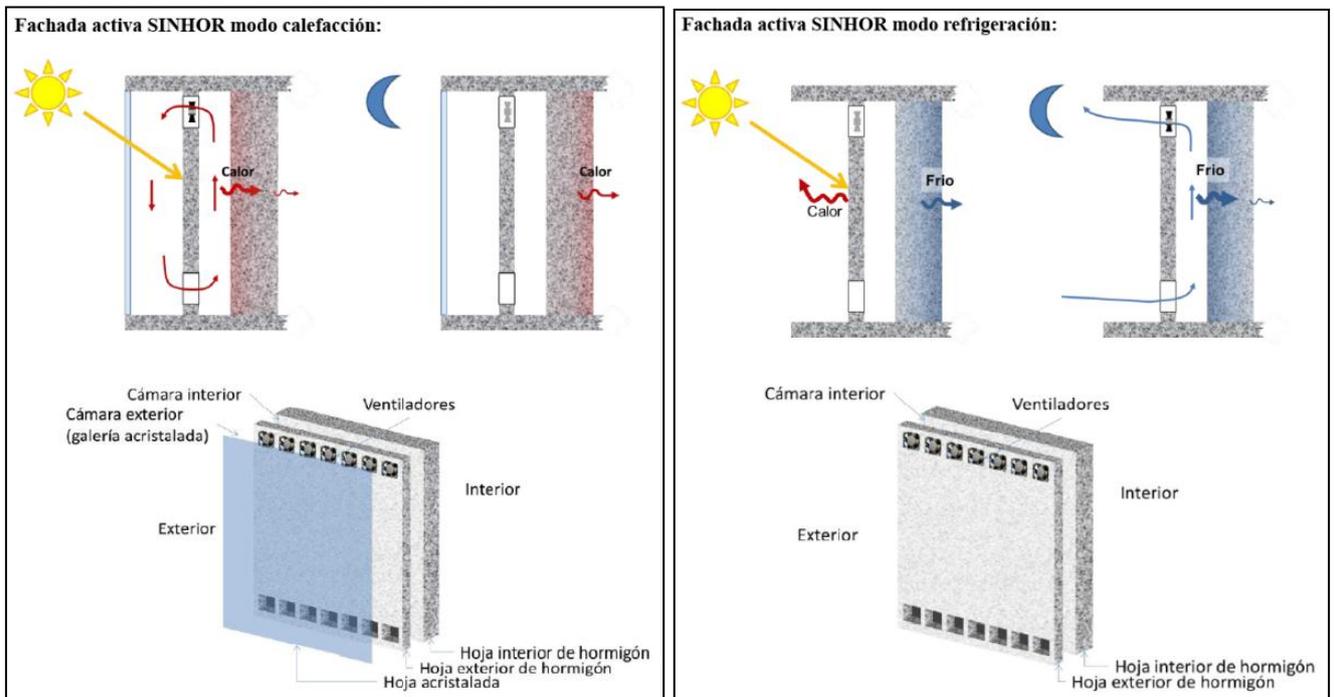


Figura 2: Esquema de la solución para invierno (izquierda) y verano (derecha)

La principal modificación que sufre la solución en el paso de invierno a verano es la eliminación de la cristalera que forma la hoja exterior de la cámara. En la práctica, no es necesario eliminar la cristalera, siendo suficiente ventilar dicha cámara para evitar el efecto invernadero. Este objetivo se puede conseguir de manera sencilla con un mecanismo de paneles plegables.

El modo de operación de este tipo de cerramientos en régimen de verano es el siguiente:

- Durante la noche se hace circular el aire por la cámara enfriando la hoja interior y simultáneamente combatiendo parte de la demanda de refrigeración. Debido a que la hoja interior baja reduce su temperatura, se puede decir que también acumula "frio".
- Durante el día el "frio" acumulado se libera hacia el interior y hacia el exterior de forma inevitable, para reducir al mínimo la pérdida de "frio" al exterior durante el día se paran los ventiladores.

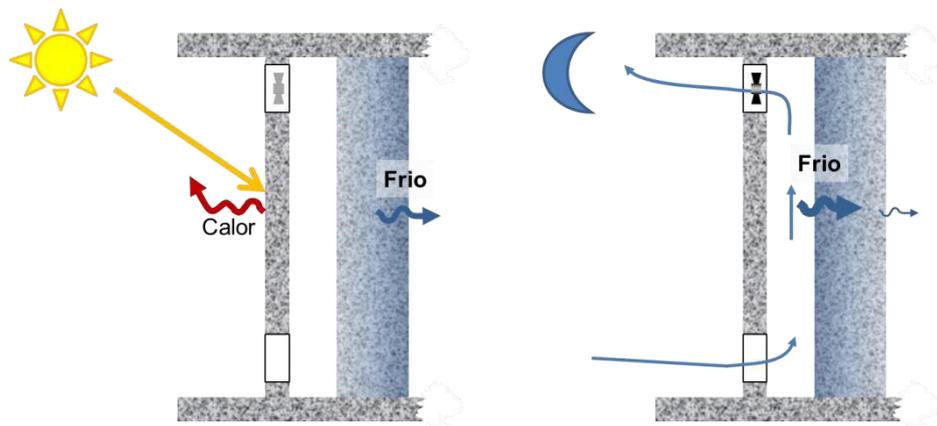


Figura 3: Modos de operación de la fachada en modo de verano

Una mejora que se le puede hacer a este elemento es la inclusión de un sistema evaporativo. Esta mejora tiene sentido en el caso de que las temperaturas nocturnas sean elevadas y que la humedad del aire sea suficientemente baja para permitir un descenso pronunciado de la temperatura por los efectos de la evaporación (ver **Figura 4**).

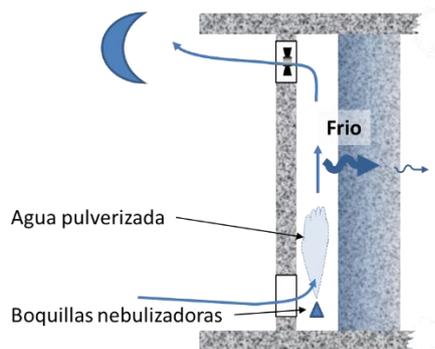


Figura 4: Sistemas evaporativos añadidos en el aire de refrigeración

4. Experimentación

4.1. Célula experimental

El prototipo se construyó en la fábrica de cemento de Alcalá de Guadaíra por cortesía del Grupo Cementos Portland Valderrivas.

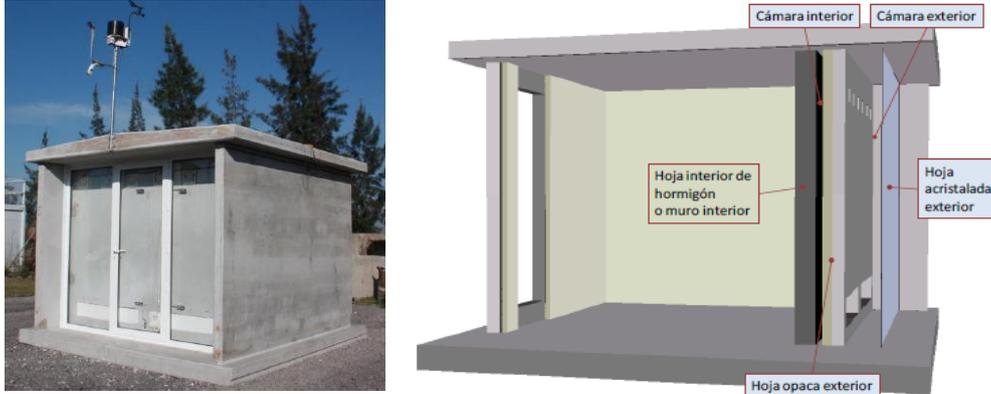


Figura 5: Prototipo enclavado en Alcalá de Guadaíra

El prototipo se compone de tres tipos de cerramientos: el cerramiento sur, se corresponde con el cerramiento especial ya descrito; los cerramientos norte, este y oeste, formado por una capa de hormigón y aislante interior; y la cubierta que está aislada en su interior y en mitad de las dos capas de hormigón que la forman. Además el prototipo se encuentra construido encima de una losa de hormigón. El único elemento no opaco que conforma la epidermis es una puerta metálica convencional que también se aísla por el interior con 8cm de poliestireno expandido como el resto de cerramientos a excepción del muro sur.

En cuanto a su geometría, sin entrar en el detalle, se puede asociar a un prisma de base cuadrangular de 3m y altura de 2.4m.

En lo referido a la sensorización de la experimentación, es necesario conocer los siguientes datos:

- Flujo de calor aportado o retirado de la caseta
- Flujo de calor aportado o retirado por el aire de la cámara
- Condiciones de confort generadas por la solución constructiva
- Condiciones de contorno de la solución constructiva
- Condición operacional de la solución constructiva

En general, el conocimiento de las variables anteriores no se puede determinar por medio de mediciones directas, sino principalmente por medio de sensores de temperatura, y de las propiedades térmicas de los materiales. Los sensores de temperatura durante esta etapa de la experimentación fueron:

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

- 1 sensor de temperatura exterior de la estación meteorológica. (se describe junto con la estación meteorológica)

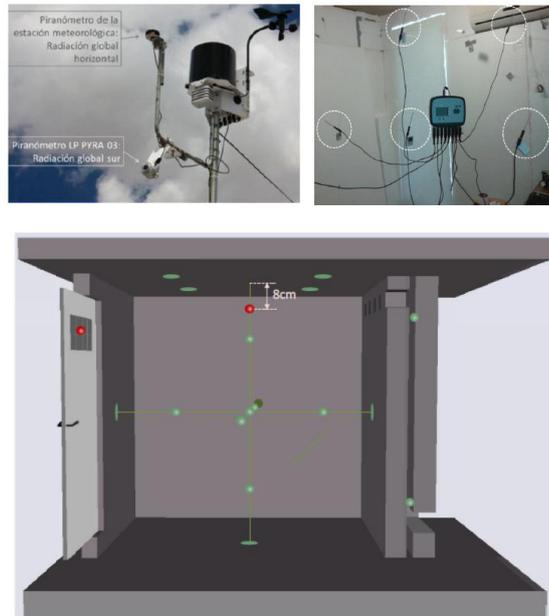


Figura 6: Sensores y esquema de monitorización del prototipo

La estación meteorológica, junto con el Piranómetro para la medición de la radiación sur, se ubicó en el extremo sur del techo del prototipo, dado que en este punto se minimizan los efectos indeseados de sombras externas al experimento y alteraciones en la temperatura y el viento.

4.2. Experimentos en modo invierno

El periodo de experimentación que se utilizará en este artículo se divide en dos periodos: uno realizado en enero de 2015 y otro en abril del mismo año. Se realizaron dos grupos de experimentos en los que se variaba la forma de operar de la fachada ventilada. El objetivo de este conjunto de experimentos era evaluar de forma comparativa el comportamiento de la fachada ventilada. Los dos grupos de experimentos fueron:

Experimento 1i: Fachada con cámara de aire cerrada y sin hoja exterior transparente (abril 2015)

Experimento 2i: Fachada en modo verano (enero 2015)

El experimento 1i consistió en mantener los ventiladores apagados de tal manera que la fachada se comportaba como un muro convencional con cámara de aire cerrada.

El experimento 2i consistió en activar la ventilación por medio de ventiladores cuando, por efecto de la radiación solar, la temperatura en la cámara de aire exterior era suficientemente alta para aportar calor al muro interior. La activación de la ventilación se daba cuando la temperatura del aire de la cámara era al menos 2°C superior a la temperatura interior de la caseta. La parada de la ventilación ocurría cuando la temperatura del aire en cámara era menos de 0.5°C superior a la del interior. Este modo

de control con histéresis permitía que la ventilación de la cámara funcionara de manera continua por largos periodos de tiempo evitando los arranques y paradas consecutivos. Por otro lado garantizaba que siempre que la ventilación estuviera funcionando, se aportara calor.

4.2.1. Resultados modo invierno

Para realizar el primer análisis del comportamiento de la fachada ventilada inteligente, se consideró que las variables más relevantes corresponden a las siguientes temperaturas: Temperatura del aire exterior (T_{air_ext}), Temperatura media de la superficie interior de la fachada (M.Sur (media)) y Temperatura media del aire en el interior de la caseta ($T_{media_interior}$). La explicación de cada una de estas temperaturas y su importancia se presenta a continuación:

- Temperatura del aire exterior (T_{air_ext}): Esta variable se tomará como indicador de las condiciones exteriores, y corresponde a la principal excitación a la que es sometida la caseta y la fachada ventilada inteligente. La radiación solar, aunque también ejerce un efecto importante, no resulta necesaria para realizar los análisis y entender el comportamiento de la caseta dado que durante prácticamente todo el periodo de experimentación el cielo estuvo despejado ocasionando que la radiación solar fuera muy parecida en todos los días de experimentación y por tanto no aporta un elemento diferenciador que permita extraer alguna conclusión. Por este motivo y por brevedad y claridad en el artículo, no se presenta el comportamiento de esta variable.
- Temperatura media de la superficie interior de la fachada (M.Sur (media)): En la superficie interior de la fachada ventilada inteligente, es decir, la superficie que limita con el interior de la caseta, existen cuatro sensores de temperatura; El valor de esta variable es la media de temperatura de estos cuatro sensores.

Esta temperatura media, se puede considerar como una de las variables más relevantes en el estudio del comportamiento de la fachada ventilada inteligente, dado que de este valor depende la cantidad de calor que es retirado del interior y además incide directamente sobre el valor de la temperatura operativa en el interior de la caseta.

- Temperatura media del aire en el interior de la caseta ($T_{media_interior}$): Esta es la temperatura promedio de todos los sensores de temperatura en el interior de la caseta. La importancia de esta variable es porque indica las condiciones en el interior de la caseta. Sin embargo, lo más importante es el valor de esta temperatura en comparación con el de la superficie interior de la fachada ventilada ya que indica en qué dirección fluirá el calor y la magnitud de este. A mayor diferencia de temperatura la magnitud del flujo de calor será mayor y si esta diferencia es que la fachada está a menor temperatura significará que el calor fluye del interior al exterior, siendo esto lo deseado en condiciones de verano.

A continuación se presentan en la Figura 7 y en la Figura 8, las temperaturas de tres días típicos de operación para cada uno de los dos experimentos descritos.

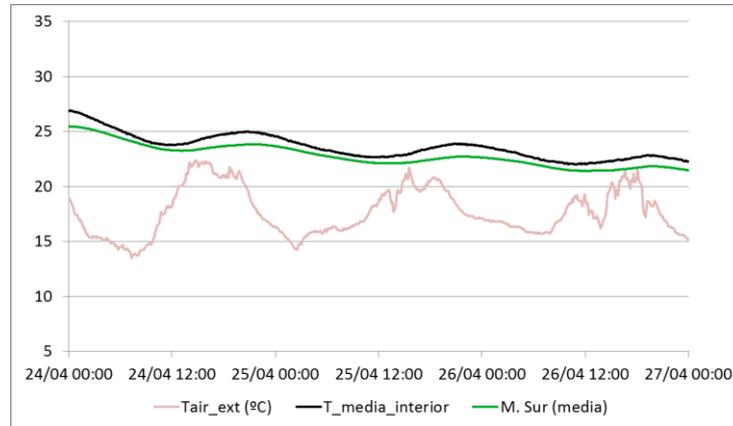


Figura 7. Temperaturas representativas de tres días seleccionados del EXPERIMENTO 1i

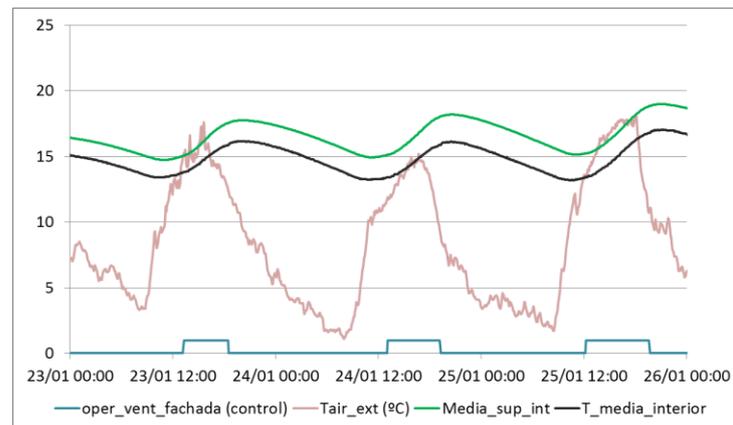


Figura 8. Temperaturas representativas de tres días seleccionados del EXPERIMENTO 2i

En el experimento 1i (Figura 7), con la cámara de aire cerrada se puede observar que la temperatura de la superficie interior de la fachada ventilada (M.Sur (media)) es un poco inferior a la del interior y presenta con una amplitud de oscilación menor a cualquier otra temperatura y con un retardo en sus máximos diarios de unas cuatro o cinco horas con respecto a la temperatura interior y de entre 7 y ocho horas con respecto a la temperatura exterior. Esto indica claramente que se trata de un elemento con mayor inercia térmica que la media de la caseta. Esta alta inercia térmica es lo que permite la acumulación de calor en este elemento.

En el experimento 2i (Figura 8), con la cámara de aire operando con ventilación forzada, se puede ver que la temperatura de la superficie interior de la fachada ventilada es superior a la del interior durante todo el periodo de tiempo lo cual indica claramente que aporta calor al interior de la caseta.

En general se observó que durante todo el periodo del experimento 1i, la temperatura media de la superficie interior de la fachada fue aproximadamente 1°C inferior a la del interior, lo cual indica que retiraba calor del interior de la caseta, siendo esta una situación no deseada pero normal en el invierno.

Por el contrario, con la fachada ventilada funcionando en modo invierno (experimento 2i), la temperatura media de la superficie interior fue de un poco más de 2°C superior a la del interior.

En términos de calor aportado, suponiendo un coeficiente convectivo de 2 W/(m²K) y uno radiante de 5.7 W/(m²K), se puede estimar que la fachada ventilada aporta de media aproximadamente 11 kWh/(m²·mes). Por otro lado, considerando que sin la operación de este elemento, lo normal es que por los cerramientos se pierda calor, el “ahorro” bruto de calor, es decir, la diferencia entre el calor aportado y el calor que se perdería de no ser por la operación de este elemento, sube a aproximadamente 15 kWh/(m²·mes).

4.3. Experimentos en modo verano

El periodo de experimentación para esta campaña inició el 03 de Junio de 2016 y terminó el 28 de Julio de 2016. Se realizaron tres grupos de experimentos en los que se variaba la forma de operar de la fachada ventilada. El objetivo de este conjunto de experimentos era evaluar de forma comparativa el comportamiento de la fachada ventilada. Los tres grupos de experimentos fueron:

Experimento 1v: Fachada con cámara de aire cerrada (03 Jun a 17 Jun)

Experimento 2v: Fachada ventilada con impulsión mecánica nocturna (17 Jun a 11 Jul)

Experimento 3v: Fachada ventilada con enfriamiento evaporativo (11 Jul a 28 Jul)

El experimento 1v consistió en mantener cerrada la compuerta de la fachada ventilada y los ventiladores apagados de tal manera que la fachada se comportaba como un muro convencional con cámara de aire cerrada.

El experimento 2v consistió en activar la ventilación por medio de ventiladores y abriendo la compuerta en horas de la noche para retirar el calor acumulado en el muro a lo largo del día. La activación de la ventilación se daba cuando la temperatura del aire exterior era al menos 2°C inferior a la temperatura en la parte superior de la cámara. La parada de la ventilación ocurría cuando la temperatura del aire en que circulaba por la parte superior de la cámara era menos de 0.5°C superior al aire exterior. Este modo de control con histéresis permitía que la ventilación de la cámara funcionara de manera continua por largos periodos de tiempo evitando los arranques y paradas consecutivos. Por otro lado garantizaba que siempre que la ventilación estuviera funcionando, se retirara calor, dado que sólo circulaba aire desde el exterior cuando éste se encontraba a menor temperatura que la cámara de aire y que el muro.

Debido a que durante el día, o más estrictamente, cuando no se cumplían los criterios para que en la cámara de aire funcionara la ventilación, lo cual ocurría cuando la temperatura exterior tendía a ser aproximadamente igual o mayor que la de la cámara de aire, se evitaba que el aire caliente del exterior agregara calor al muro, consiguiéndose de esta manera que casi todo el calor que calentaba al muro proviniera del interior de la caseta, es decir, el muro retiraba calor de la caseta.

El experimento 3v era muy similar al experimento 2 con la diferencia de que a la entrada del aire a la cámara ventilada se instalaron unos pulverizadores de agua con el objetivo de producir un enfriamiento evaporativo. Debido a que en este caso la temperatura del aire dentro de la cámara durante la operación de la ventilación podía ser inferior a la de

aire exterior debido justamente al enfriamiento evaporativo, (situación no permitida en el experimento²) el sistema de control se ajustó para que el arranque de la ventilación se diera cuando la temperatura exterior del aire fuera al menos 4°C inferior a la de la cámara de aire en su parte superior y la parada de la ventilación se estableció para que ocurriera cuando la temperatura de cámara fuera al menos 4°C inferior a la del exterior. Idealmente el criterio de parada debería haber estado relacionado con la temperatura de bulbo húmedo del aire exterior, pero como lamentablemente se carecía de un sensor disponible para el sistema de control que pudiera medir este dato, se optó por la regla mencionada anteriormente y que para las condiciones de Sevilla, se mostró suficientemente adecuada.

Resultados modo verano

Para realizar el primer análisis del comportamiento de la fachada ventilada inteligente, se consideró que las variables más relevantes corresponden a las mismas temperaturas señaladas en el apartado 4.2.1 más la Temperatura media de la cámara de aire (Media_cam_int). La explicación de esta última es:

- Temperatura media de la cámara de aire (Media_cam_int): La cámara de aire cuenta con cuatro sensores de temperatura, dos en la parte inferior y otros dos en la superior. El promedio de estas cuatro temperaturas es un indicador de la temperatura media en la cámara de aire y resulta útil para evaluar qué tan cerca del punto ideal se encuentra la operación de la fachada ventilada. Esto es porque se sabe que idealmente, cuando funciona la ventilación, la temperatura de la cámara idealmente debería ser la del exterior cuando no existe enfriamiento evaporativo y la de bulbo húmedo cuando existe enfriamiento evaporativo. Obviamente estas dos condiciones ideales no se alcanzan nunca debido a que el aire se calienta debido al calor que extrae.

A modo de representación y con fines ilustrativos acerca de la operación de la fachada ventilada, se han seleccionado tres días de operación de la caseta para cada uno de los experimentos realizados. Se muestran en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

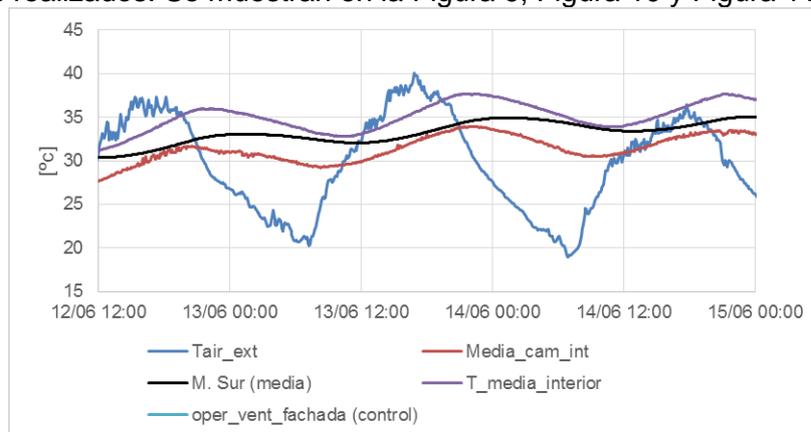


Figura 9. Temperaturas representativas de tres días seleccionados del EXPERIMENTO 1v

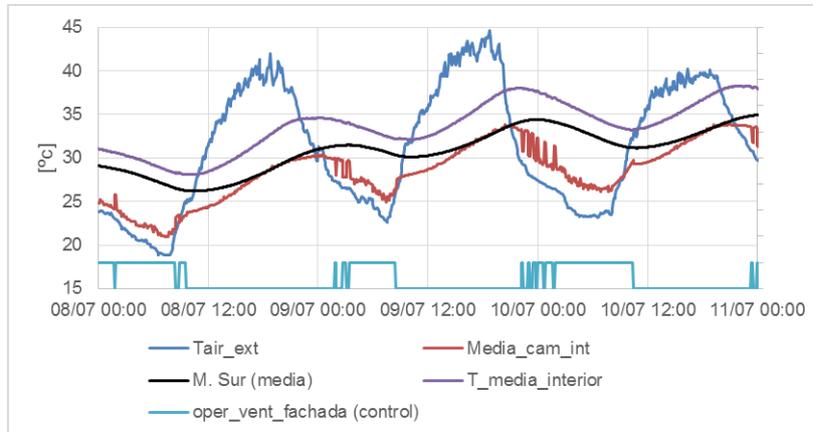


Figura 10. Temperaturas representativas de tres días seleccionados del EXPERIMENTO 2v

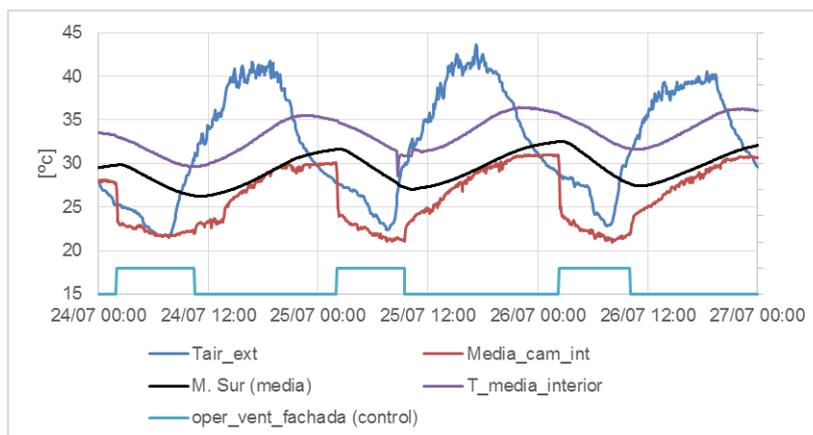


Figura 11. Temperaturas representativas de tres días seleccionados del EXPERIMENTO 3v

En el experimento 1v (Figura 9), con la cámara de aire cerrada se puede observar que la temperatura de la superficie interior de la fachada ventilada (M.Sur (media)) es un poco inferior a la del interior y presenta un comportamiento muy similar al señalado para el experimento 1i, esto es, con una amplitud de oscilación menor a cualquier otra temperatura y con un retardo en sus máximos diarios de unas cuatro o cinco horas con respecto a la temperatura interior y de entre 7 y ocho horas con respecto a la temperatura exterior. Esto indica claramente que se trata de un elemento con mayor inercia térmica que la media de la caseta. Esta alta inercia térmica es lo que permite la acumulación de calor en este elemento. La temperatura media de la cámara presenta un comportamiento similar a la del interior pero unos 3°C o 4°C menor. Sin embargo el aspecto importante aquí es que debido a las compuertas que cierran la cámara, resulta evidente que es depreciable el intercambio de aire con el exterior, dado que de otro modo, esta temperatura oscilaría de forma similar a la del exterior. Este punto resultó importante para evaluar la calidad de la instalación, la cual, a la vista de este comportamiento, resulta adecuada.

En el experimento 2v (Figura 10), con la cámara de aire operando con ventilación forzada por la noche, se puede ver que la temperatura de la superficie interior de la fachada ventilada es apreciablemente inferior a la del interior durante todo el periodo de tiempo lo cual indica claramente que retira calor del interior de la caseta. Por otro lado, la temperatura de la cámara de aire, cuando los ventiladores funcionan, se acerca a la del exterior quedándose a unos 2°C o 3°C por encima, lo que indica que el sistema opera bien, pero que al menos en teoría podría bajarse más aumentando el caudal de aire. Este último extremo no ha sido evaluado dadas las limitaciones del experimento, de tal manera que en este momento no es posible asegurar si un aumento del caudal del aire podría presentar un beneficio apreciable en la operación de la fachada ventilada.

En el experimento 3v (Figura 11), Con la fachada operando con sistema evaporativo, se puede ver que la temperatura de la superficie interior desciende aún más en comparación con los otros dos experimentos y que la temperatura de la cámara de aire es menor que la del exterior cuando los ventiladores funcionan como consecuencia del enfriamiento evaporativo.

Debido a que el resultado más importante es la diferencia de temperatura entre el interior y la superficie interior de la fachada ventilada, se han calculado las diferencias de temperatura medias diarias para todo el periodo de experimentación y de forma separada para cada uno de los tres experimentos. El resultado se muestra en la Figura 12. En dicha figura se puede apreciar cómo la entrada en operación de la fachada ventilada hace descender la temperatura de la superficie interior aproximadamente en 1.1°C con respecto al caso sin ventilación y la entrada del enfriamiento evaporativo baja la temperatura aproximadamente 1.2°C adicionales, para un descenso total de 2.3°C con respecto al caso sin ventilación y una diferencia respecto al interior de 2.6°C en el caso de ventilación sin enfriamiento evaporativo y 3.8°C con enfriamiento evaporativo.

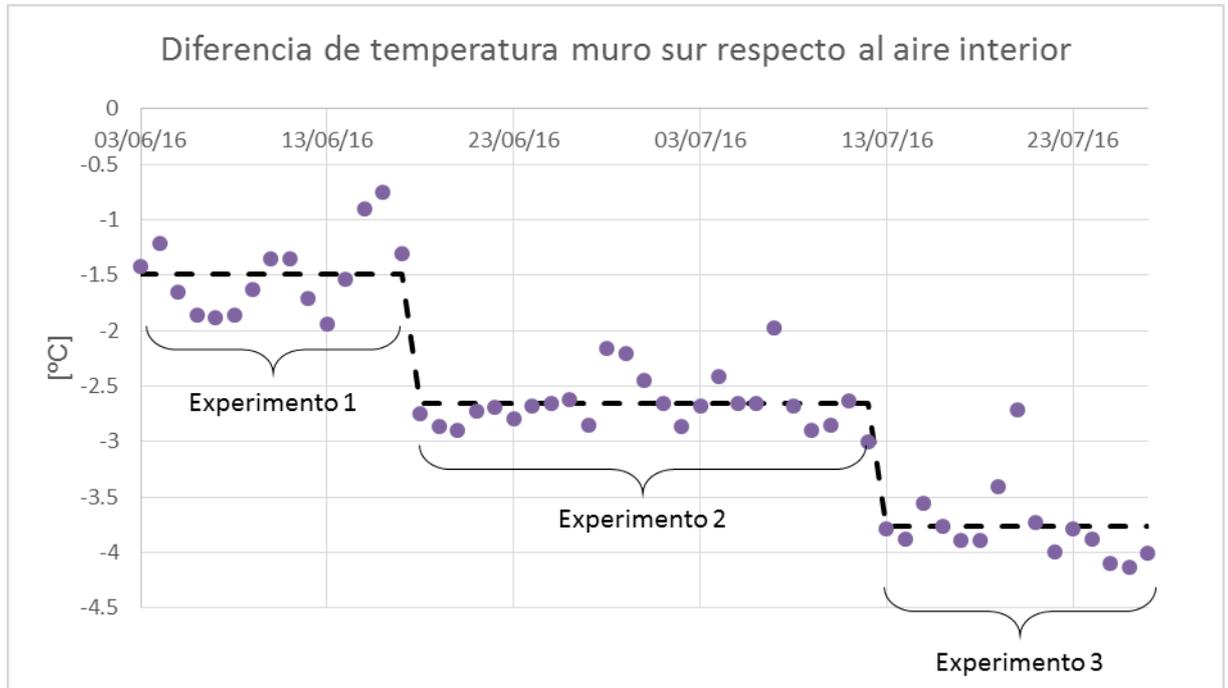


Figura 12. Diferencia media de temperatura entre el muro sur y el aire interior para los tres experimentos

En términos de calor retirado, suponiendo un coeficiente convectivo de $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y un radiante de $5.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, se puede estimar que la fachada ventilada retira de media aproximadamente $20 \text{ W}/\text{m}^2$ de fachada, cuando la ventilación es sin enfriamiento evaporativo y casi $30 \text{ W}/\text{m}^2$ cuando la ventilación es con enfriamiento evaporativo. Debido a que esta retirada de calor ocurre durante las 24 horas del día, si se acumula esto para un periodo de por ejemplo un mes, se tendría que la fachada ventilada podría evacuar entre $14 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mes})$ en el caso sin enfriamiento evaporativo y $21 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mes})$ si se hace la ventilación con enfriamiento evaporativo

5. Conclusiones

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se puede afirmar que la fachada ventilada inteligente propuesta cumple la función prevista, es decir, evacúa calor en verano y aporta calor en invierno.

En las condiciones en las que se desarrollaron los experimentos (clima de Sevilla) y para el diseño realizado, el ahorro de energía por metro cuadrado de fachada es, en invierno de aproximadamente $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mes})$ y en verano de entre $14 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mes})$ en el caso sin enfriamiento evaporativo y $21 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mes})$ si se hace la ventilación con enfriamiento evaporativo.

Agradecimientos

La solución presentada y los experimentos que aquí se presentan son resultados del proyecto "SATAINTER – Soluciones avanzadas de fachada y cubierta con tratamiento de

aire inercia térmica para climatización de edificios del sector terciario” (Ref.: PI-1450/2015) liderado y coordinado por el Grupo AZVI (www.AZVI.es), y financiado por la Corporación Tecnológica Andaluza (CTA). Este proyecto es una continuación del proyecto “Análisis del comportamiento energético de los cerramientos de hormigón en base a la maximización de las ventajas derivadas de su inercia térmica” lidera y coordinado por el instituto IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones), y financiado a través del “Programa operativo FEDER de Andalucía 2012-2014”, por lo que los autores quieren agradecer también a la Agencia de Obra Pública de la Conserjería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

6. Referencias

- [1] E. Commission, “Web Oficial H2020,” 2013. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>.
- [2] IEA, “Technology Roadmap.- Energy efficient building envelopes and Technology Roadmap,” 2014.
- [3] IEA, “Technology Roadmap. - Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment,” 2014.
- [4] IEA, “Energy Efficiency in Europe: Overview of policies and good practices,” 2014.
- [5] E. Commission, *Regulation No. 244, Commission Delegated Regulation (EU) N.º 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology fram.* 2012, pp. L81/18–L81/36 (2012).
- [6] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Harald M. (2004). Free cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration* 27 (8) 839–849.
- [7] Zalba B. (2002). Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase, Procedimiento experimental. Ph.D. Thesis, University of Zaragoza (Spain).
- [8] Kondo T., Ibamoto T. (2003). Research on using PCM for ceiling board. *Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage – Futurestock’2003*, Warsaw (Poland).
- [9] Takeda S., Nagano K., Mochida T., Shimakura K.. (2004). Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material. *Solar Energy* 77, 329-338.
- [10] Turnpenny J.R., Etheridge D.W., Reay D.A. (2000) Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Part I: testing and theoretical modelling. *Applied Thermal Engineering* 20, 1019-1037.
- [11] Guía técnica para la Prevención y Control de la Legionelosis en instalaciones, Capítulo 7. Sistemas de enfriamiento evaporativo, Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad http://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/7_leg.pdf
- [12] IDAE: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Guía Técnica Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización. Ahorro y Eficiencia Energética en la Edificación

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Álvaro Ruiz Pardo

Teléfono: +34954487471

E-mail: alvaro.ruiz@uca.es

Cesión de derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.