

Estrategias de captación solar mediante colectores solares de aire en climas fríos

Energy efficiency in cold climate by solar collectors strategies

LUIS VELASCO ROLDAN*

Grupo de Investigación en Energías Renovables. Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía integrado.
Universidad de las Fuerzas Armadas (DECEM-ESPE), Quito (Ecuador).

Resumen

El proyecto ha sido construido y monitorizado como método de obtención de información real extrapolable a nuevos proyectos ubicados en un ámbito climático común. El proyecto incorpora un captador solar de aire móvil de 12 m² cuyo diseño se basa en el funcionamiento de modelos de menor dimensión y flujo laminar buscando una mayor transmisión de energía entre la superficie de absorción y el aire mediante la inducción de un flujo turbulento y una reducción de las pérdidas en su envolvente. La originalidad del proyecto se basa en la integración de conocimientos científicos en torno a estrategias de captación, acumulación y disipación de la energía solar en el proyecto arquitectónico. La combinación de todos los sistemas de captación solar pasiva y activa consigue una reducción del salto térmico a superar por el sistema de calefacción del 70% en días soleados de fechas cercanas al solsticio de invierno y el 100% de cobertura energética de calefacción en días soleados hasta el mes de diciembre y a partir de finales de febrero.

PALABRAS CLAVE: arquitectura sostenible, eficiencia energética, calentamiento solar, captador solar de aire.

Abstract

The project has been built and monitored as a valid method of getting real information to assess strategies, systems and components of solar heating and energy accumulation to new projects located in a common climate. The design include a solar air mobile collector that increases the solar efficiency of the wintergarden. The design of the solar collector is based on small conventional products based on internal laminar flow. The new prototype looking for a greater heat transmission between air and the absorption surface induces a turbulent flow by means of a labyrinthine path of air. The energy demand reduction reaches 70% of the heating needs of sunny days near the winter solstice and reaching 100% energy coverage from late February till December.

KEYWORDS: environmental architecture; energy efficiency; solar heating; solar air heater.

FECHA DE ENVÍO: 30-11-2015 | FECHA DE ACEPTACIÓN: 29-03-2016 | FECHA DE PUBLICACIÓN: JUNIO 2016
ESTA OBRA ESTÁ BAJO LICENCIA: LICENCIA CREATIVE COMMONS ATRIBUCIÓN-NO COMERCIAL-SIN DERIVAR 4.0 INTERNACIONAL 

* Arquitecto por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés, Universidad Politécnica de Cataluña (1999). Doctorado en Arquitectura y Eficiencia Energética en Edificios por el departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Ejercicio libre de la profesión desde Junio del 2000. Técnico asesor responsable de las áreas de construcción e instalaciones del Área Técnica del Colegio Oficial de Arquitectos de Baleares, España, desde junio 2004. Palma de Mallorca, España. Investigador de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía integrado en el Grupo de Investigación en Energías Renovables. Quito, Ecuador (20013/2016).

1. Estado del arte

1.1 Captadores solares de aire

Los captadores solares de aire dentro del campo de la edificación ofrecen un interesante potencial de ahorro energético al obtener, de una forma técnicamente sencilla, aire caliente a temperaturas potencialmente aprovechables para el acondicionamiento térmico de locales en invierno. Su posición en la cubierta del edificio reduce el número potencial de obstrucciones en entornos urbanos de gran densidad en cuyas fachadas se ve mermodado en gran medida el potencial de energía solar aprovechable (Morganti et al, 2012). En torno a los captadores solares de aire se han realizado principalmente estudios referidos a modelizaciones cuyo objetivo es la mejora del intercambio energético entre la superficie captadora y el aire circulante (Varun, 2010), (Karwa & Srivastava, 2013). Existen también una serie de estudios referidos al estudio del comportamiento de modelos construidos (Kurtbas, Turgut, 2006). La mayor parte de autores concluyen en la necesidad de mejorar la eficiencia por medio del incremento del coeficiente de convección mediante el diseño de la geometría del elemento absorbedor (Kurtbas, Turgut, 2006) y la reducción de las pérdidas de energía que tienen lugar en la envolvente del captador (Lalji, 2011), (Karwa, Srivastava, 2013). La gran sencillez técnica de esta estrategia de captación solar permite su incorporación a sistemas constructivos de la envolvente de la edificación, sin necesidad de recurrir a costosos componentes de producción industrial. El conocimiento científico de los procesos de transmisión de calor de dichos elementos por parte de los técnicos redactores permitiría una sencilla implantación al proyecto arquitectónico. Ya existiendo ejemplos de interés (desgraciadamente ninguno de ellos modelizados ni monitorizados) como es el caso del Gimnasio escolar de Barberà del Valles de AH arquitectes o el edificio @22 de los arquitectos Pich y Aguilera (Aguilera, 2009)

1.2 Acumulación de energía en el interior de la envolvente aislada del edificio

Toda estrategia de captación o refrigeración debe ir asociada a sistemas de acumulación que permitan almacenar la energía captada o amortiguar las puntas diurnas o estacionales de captación (Velasco Roldan, L, 2009). Cuando se trata

de convección natural el coeficiente de convección depende de la diferencia de temperatura entre el aire circulante y las superficies interiores de los canales del captador solar, de la forma del elemento acumulador, su dimensión y su posición.

Puede cuantificarse según la fórmula 1 la energía transferida por convección (Chávez Mora, M et al, 2012):

$$\text{Fórmula 1: } Q_{cv} = H_c(T_p - T_a)A$$

Siendo:

Q_{cv} : energía transferida por convección

H_c : el coeficiente de convección ($W/m^2\text{ }^\circ C$)

T_p : temperatura superficial de la placa absorbadora del colector en $^\circ C$

T_a : temperatura del fluido circulante dentro del captador en $^\circ C$

A : Área absorbadora del colector

Para velocidades de aire reducidas superficies horizontales y grandes dimensiones, el régimen se supone laminar y este puede determinarse por la fórmula 2. (Chávez Mora, M et al, 2012)

$$\text{Fórmula 2: } H_c = 1,31 (Dt)^{0,33}$$

Siendo:

H_c el coeficiente de convección

Dt : el diferencial de temperatura entre la placa absorbadora del colector y la temperatura del fluido circulante dentro del captador.

En cambio, para velocidades de aire mayores y superficies que se enfrentan a la corriente de aire, el flujo se supone turbulento incrementándose la transmisión de energía según la fórmula 3 (Chávez Mora, Metal, 2012)

$$\text{Fórmula 3: } H_c = 1,52 (Dt)^{0,33}$$

Siendo:

H_c : el coeficiente de convección

Dt : el diferencial de temperatura entre la placa absorbadora del colector y la temperatura del fluido circulante en el interior del captador.

En el caso de convección forzada se aplicarán las fórmulas 4 y 5 (Chávez Mora, M et al, 2012):

Formula 4 $H_c = 7,2V_a + 0,78$ (Para velocidades del aire $< 5m/s$)

Siendo H_c el coeficiente de convección y V_a la velocidad del aire circulante en el interior del captador.

Fórmula 5: $H_c = 5,6 + 18,6 V_a$ (Para velocidades del aire $> 5\text{m/s}$)

Siendo H_c el coeficiente de convección y V_a la velocidad del aire circulante en el interior del captador.

Será por lo tanto el objetivo principal para el aumento de la eficiencia el incremento del diferencial de temperatura entre el aire circulante y la superficie captadora, así como el incremento del coeficiente de convección mediante la generación de un flujo turbulento.

Tradicionalmente la energía captada se acumula en la envolvente interior aislada del edificio (paredes y forjados). En la década de los 70 se investigó en torno a métodos alternativos que permitieran el incremento de la energía almacenada a través de grandes volúmenes de acumulación en rocas o depósitos de agua, estrategias ya abandonadas dado su escaso rendimiento (Virote, Neves-silva, 2013)

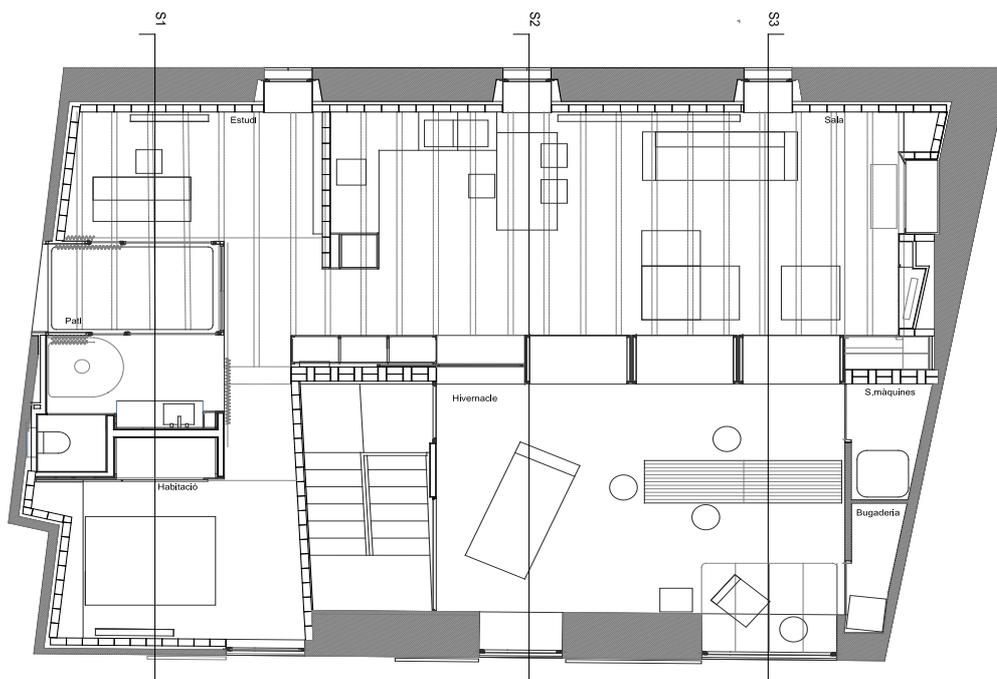
Actualmente las investigaciones se centran en la acumulación de energía en materiales de cambio de fase. Estas se basan en el aprovechamiento de la energía liberada o absorbida por la fluidificación o solidificación de ciertas sustancias cuya temperatura de cambio de fase se sitúa entre los 15 y los 25°C. La estrategia se basa en fomentar que la sustancia (generalmente parafinas) absorba la energía solar de forma directa, a través del aire procedente de los

sistemas de captación solar o mediante un colector solar y esta cambie de fase (Camaño, M. González, 2004). Al cambiar de fase la sustancia conserva en forma latente la energía absorbida. Esta será cedida posteriormente, cuando la sustancia regrese a su estado original al descender la temperatura interior. El principal problema asociado a dichas sustancias es el limitado potencial que hasta el momento atesoran en sus aplicaciones en al edificación. Limitando sus posibles aplicaciones al mantenimiento de la estabilidad térmica interior, no pudiendo acumular gran cantidad de energía procedentes de estrategias de captación solar (Neila González,J, et al, 2008), (Oliver et al, 2011), (Sharma et al, 2009)

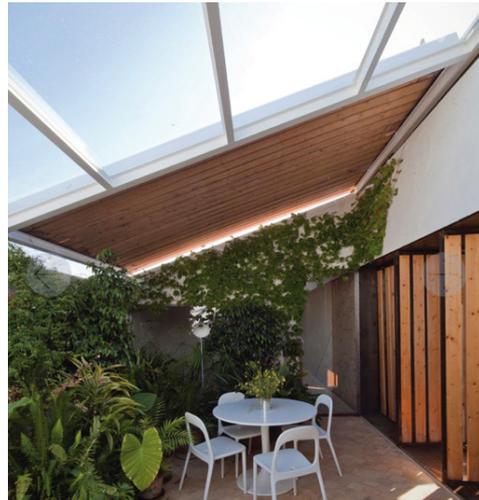
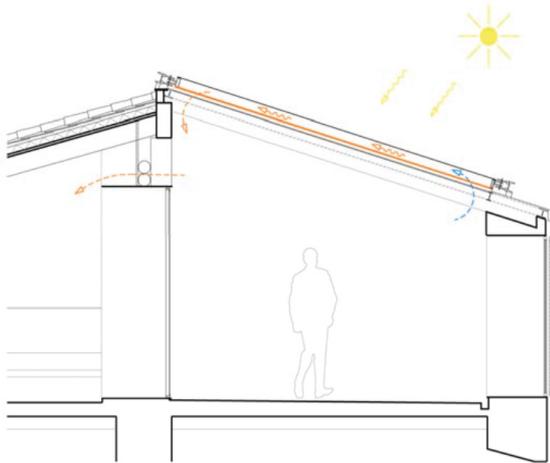
2. Descripción del edificio

El proyecto se sitúa en el hemisferio Norte, en España, concretamente en las Islas Baleares (39°45'10"N, 2°53'54"E altura 400 metros sobre el nivel del mar) y consiste en la reforma integral de la planta situada bajo la cubierta de un edificio de viviendas. Como puede observarse en la figura 1, el ático se distribuye en torno a dos espacios abiertos (patio e invernadero) concebidos como espacios intermedios entre interior y exterior, de uso y apertura adaptables en función de la época del año.

Figura 1. Planta de la vivienda.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 y 3: Esquema y fotografía del invernadero y el captador solar de aire.

Fuente: elaboración propia

El invernadero (ver figura 2 y 3) cuenta con una cubierta móvil que se desplaza lateralmente sobre guías de acero. De esta forma, además de mantener durante el invierno el invernadero relativamente sellado, es posible disponer los 12 m² de panel móvil hacia el sureste sobre la cubierta de teja, quedando el invernadero convertido en una terraza soleada.

2.1. Estrategias de aislamiento térmico y captación de energía

Aislamiento térmico

Durante la reforma la envolvente de la vivienda se aísla por completo. Las características constructivas de los distintos elementos son: Muros interiores de la vivienda compuestos por 50 cm de mampostería de piedra, 8 cm de lana de roca y ladrillo macizo de 12 cm de espesor. Conductividad 0,39 W/m²°K. Muros interiores del invernadero compuestos por mampostería de piedra de 50 cm revestidos interiormente con 5 cm mortero aislante para la eliminación de la inercia térmica en el interior de este espacio y la minimización de pérdidas hacia el exterior de la energía captada por efecto invernadero previo a su conducción al interior de la vivienda. Conductividad térmica: 0,45 W/m²°K. Cubierta formada por rasilla cerámica, 8 cm de poliestireno expandido bajo 4 cm de mortero y teja árabe. Conductividad térmica: 0,38 W/m²°K.

Suelo formado por capa de compresión de 8 cm de hormigón aligerado con arcilla expandida (Arlita) sobre rasilla cerámica y pavimento de ma-

dera de pino de 20 mm sobre rastreles de 20 mm. Conductividad térmica: 0,51 W/m²°K. Carpinterías formadas por perfiles de acero con espuma de poliuretano en su interior. Vidrios dobles bajo emisivos con gas argón en el interior de la cámara de aire de 20 mm de espesor. Conductividad térmica del vidrio: 1,2 W/m²°K. Conductividad térmica de los marcos 3,2 W/m²°K.

Ganancias directas

La apertura selectiva de ventanas en los muros existentes fomenta la captación de sol a lo largo del día (este, sur y oeste). La fachada y la medianera norte se mantienen cerradas para reducir las pérdidas de energía. La captación solar pasiva a través de las aberturas se complementa con la energía captada por el invernadero y el captador solar de aire. El invernadero está dotado de dos ventiladores de 300 m³/h de caudal libre que introducen el aire caliente en la vivienda siempre que el termostato detecte que la temperatura del invernadero supera la temperatura del interior de la vivienda.

Captador solar de aire

Debido a la orientación del edificio, la incidencia de los rayos solares en los muros y el suelo del invernadero (orientación SE) es limitada, lo cual reduce el potencial de captación de energía. Para multiplicar la captación se convierte la cubierta móvil del invernadero en un captador solar de aire que calienta el aire del invernadero y este, a su vez, el de la vivienda. Al situarse este elemento de captación sobre la cubierta aumentan en gran medida

los ángulos solares que son interceptados por el elemento absorber multiplicándose la captación solar por efecto invernadero. Se generan tres circuitos de aire en su interior, coincidentes con las tres partes en las que se divide el captador solar para facilitar su construcción, transporte y montaje sobre la cubierta. Mediante tres ventiladores de caudal libre de 200 m³/h y un consumo de 5W se fuerza al aire del invernadero a recircular por el interior del panel. Como se observa en la figura 4, la estructura resistente del panel de cubierta, formada por perfiles de 100x10mm de chapa de acero galvanizado de 1mm de espesor genera una serie de canales de aire arriostrados por chapas plegadas de 1mm de espesor del mismo material que se interponen al paso del aire, obligándolo a pasar alternativamente por su parte superior y por la parte inferior. El objetivo es potenciar el intercambio de energía mediante un flujo turbulento que incremente el coeficiente de convección entre el aire y las chapas calientes. Todas las chapas de acero se encuentran pintadas de colores tierras (colores seleccionados entre los tonos más oscuros que permite la normativa urbanística local para la integración de edificaciones en entornos rurales) para reducir la reflexión de rayos solares y permitir una mayor integración en un entorno de cubiertas de teja.

Un lámina de acero de 1,5 mm de espesor en la parte inferior y una lámina de metacrilato de

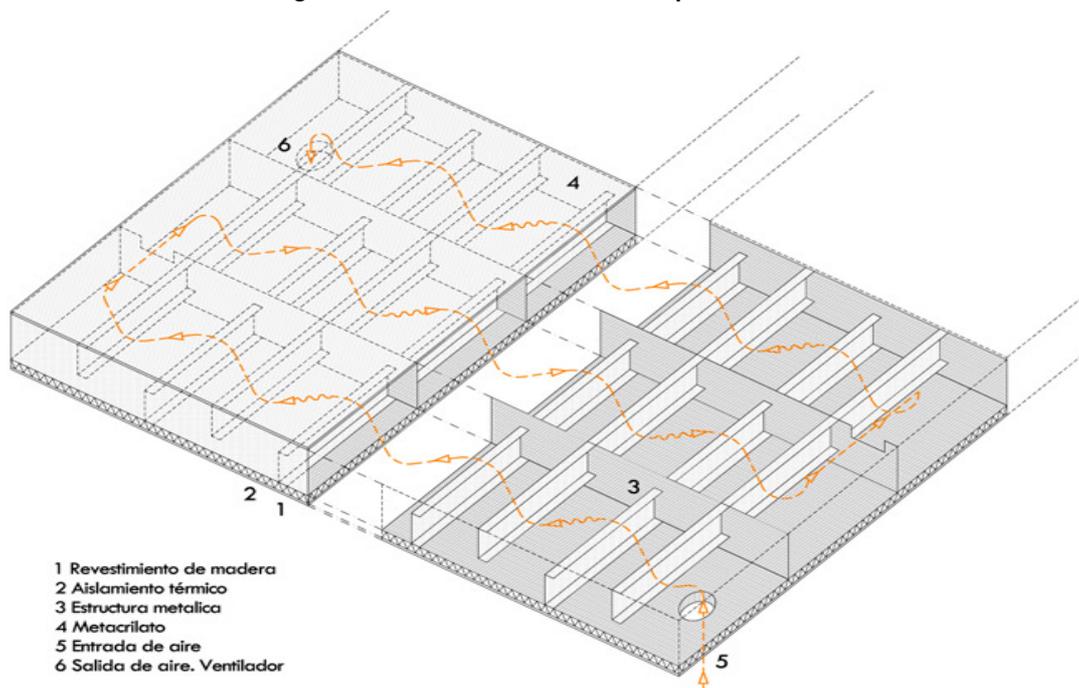
5mm en la parte superior cierran el paralelepípedo formado por 9 canales de aire interconectados de 10x27cm. Bajo la chapa de acero, para limitar la pérdida de energía a través de la parte inferior del captador, así como evitar la radiación de la chapa sobre las terrazas en verano, se dispone un aislamiento formado por una manta cerámica de aluminio y sílice de 0,5 cm y una conductividad térmica de 0,06 W/m²C, así como un revestimiento de madera de 12 mm y una conductividad de 0,16W/m²C.

El coeficiente de dilatación del metacrilato es 12 veces mayor que la del acero, lo cual provoca dilataciones de hasta 60 mm en verano. Es por ello que las placas de metacrilato no se atornillan o fijan a la estructura metálica. Estas se disponen solapadas 10 cm entre ellas y libres en los laterales de forma que puedan dilatarse y contraerse a la vez que se evacuan el agua de lluvia sin peligro de infiltraciones. Para su sujeción se disponen sobre el metacrilato tensores planos de acero inoxidable cada 20 cm. De esta forma se evitan perforaciones o fijación que generen tensiones internas que rompan el material.

Sistemas convencionales de calefacción

La estrategia complementaria de calefacción se basa en la captación solar mediante 5 m² de paneles solares de agua y un gran volumen de

Figura 4. Detalle de una sección del captador solar



Fuente: elaboración propia

acumulación (500l) y una chimenea, con un poder calorífico de entre 7 y 9 Kw (en función del potencial energético de la biomasa aportada) y dotada de un sistema de convección forzada mediante un ventilador centrífugo regulable de caudal libre 450 m³/h. La calefacción fue inhabilitada durante las mediciones para evaluar las estrategias de captación solar sin dicho aporte de calor.

3. Equipo de monitorización

Para el análisis empírico de las distintas hipótesis de funcionamiento es indispensable registrar de una manera precisa y continua las variables de temperaturas interior y exterior, humedad relativa y velocidad de las corrientes de aire interiores.

Temperatura seca. Es necesario repartir un número mínimo de sensores de temperatura para la toma continua de datos que serán complementados con los instrumentos de medición instantánea. El sistema Testo Savieris permite la toma y almacenamiento de valores así como la interpretación gráfica inmediata de los datos recibidos hasta un máximo de 5 sondas. De esta forma es posible variar durante el proceso de medición las estrategias planteadas para su ajuste o comprobación de planteamientos alternativos. Los aparatos de medición continua complementarios empleados son data loggers Testo 175 con un rango de medición de entre -35 y 70C y una precisión de $\pm 0,5$ °C y un rango de medición de entre -35 y +55°C). Todos los aparatos de medición se colocaron en su posición 24 horas antes de inicio de la toma de datos para permitir su aclimatación convenientemente, protegidos de la radiación solar y del agua o el viento para evitar posibles distorsiones.

Velocidad y temperatura de la corriente de aire: Se utilizó el instrumento TESTO 435 cuya

sonda de bola caliente es capaz de detectar velocidades de entre 0 y 20 m/s con una temperatura de servicio de entre -20 y 50C y una exactitud de (± 0.03 m/s $\pm 5\%$ del v.m.).

Temperatura radiante: Se empleó un termómetro de infrarrojos Hibok-73 con un rango de temperaturas de entre -20 y 270°C y una resolución de 0,1°C y una precisión de $\pm (4\%) + 2^\circ\text{C}$.

Durante todo el periodo de medición se realizó un diario de anotaciones con referencia a todo lo que pudiera afectar o alterar la medición o la comprensión de esta: véase apertura del invernadero o de la separación de este con la sala, apertura de ventanas, encendido de la calefacción o chimenea, nubosidad, lluvia, etc.

3.1. Descripción del entorno y microclima

El clima mediterráneo húmedo es el dominante en la Sierra situada al Norte de la isla de Mallorca (latitud 40^º) caracterizado por un verano seco y cálido y un suave invierno húmedo. Viene determinado por una pluviosidad media anual de 800 mm (pudiendo superar en algunos puntos los 1400mm) y las temperaturas medias más bajas de las islas Baleares con unos 13°C (“Agencia Española de Meteorología”, n.d.). En la tabla 1 pueden observarse el régimen anual de horas de sol y radiación solar (“Agencia Española de Meteorología”, n.d.).

3.2. Monitorización de la vivienda

Se ha pretendido evaluar la eficiencia de los sistemas de captación con las temperaturas mínimas y la menor radiación solar. Las fechas elegidas por lo tanto son las cercanas al solsticio de

Tabla 1. Media mensual de horas de sol y radiación solar del emplazamiento

Meses	E	F	M	A.	M	J	Julio	A	S	O	N	D
Horas de sol	185	189	250	248	346	343	332	236	232	147	177	151
Radiación global Kwh m ² día	1.3	1.91	2.77	3.94	4.25	2.33	2.19	2.18	1.88	1.44	1.02	0.82
Radiación difusa Kwh m ² día	0.96	1.22	1.69	1.92	2.43	5.17	5.36	4.45	3.16	2.16	2.45	1.23

Fuente: Agencia Española de Meteorología

invierno. La similitud de los registros que se observan en la figura 5, durante días similares nos permite elegir el 29 de enero como día tipo sin captación solar con los mayores requerimientos de calefacción. En la figura 9 se muestran las temperaturas registradas durante un día tipo con el cielo completamente nublado es decir sin captación solar directa y bajos niveles de radiación difusa. Dicha situación permitirá evaluar el rendimiento de las estrategias de captación comparando el régimen de temperaturas con el registrado durante días soleados siempre que se registren las mismas condiciones exteriores de temperatura y presencia de viento.

La temperatura media exterior diaria se sitúa en torno a los 9,1 °C mientras que la temperatura media diaria interior se sitúa en torno a los 11 °C. La temperatura media diaria del invernadero es de 10,5°C.

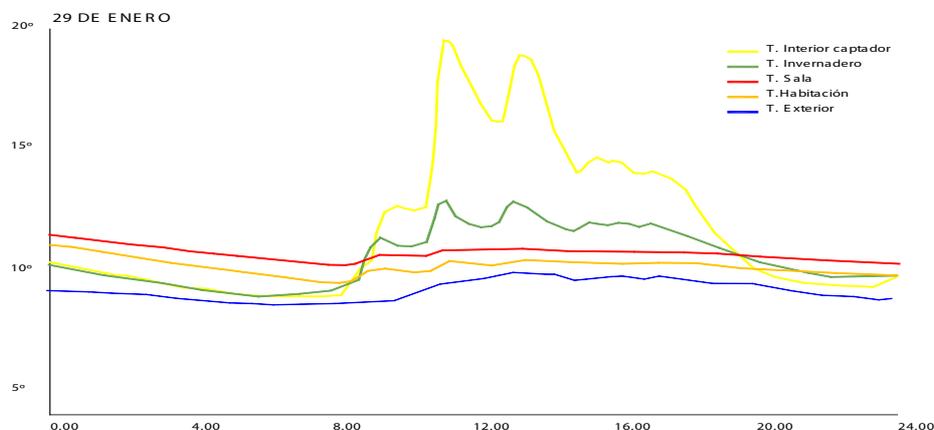
Las mediciones referidas a la temperatura media radiante de los paramentos del edificio dan unos resultados de 14,5°C (por lo que se detecta energía acumulada en jornadas anteriores). La temperatura operativa del interior de la vivienda (con humedad relativa en torno al 75% y la velocidad del aire interior despreciable) es de: 11,8°C. Las temperaturas registradas en el captador se deben al incremento de temperatura producido en su interior por la radiación difusa. En cualquier caso los ventiladores del captador se mantienen detenidos por lo que su influencia del captador en la temperatura interior del invernadero o la vivienda es nula. La

conclusión es que los sistemas de calefacción convencionales deberían incrementar la temperatura operativa 6,2°C para alcanzar la temperatura de confort de 18°C.

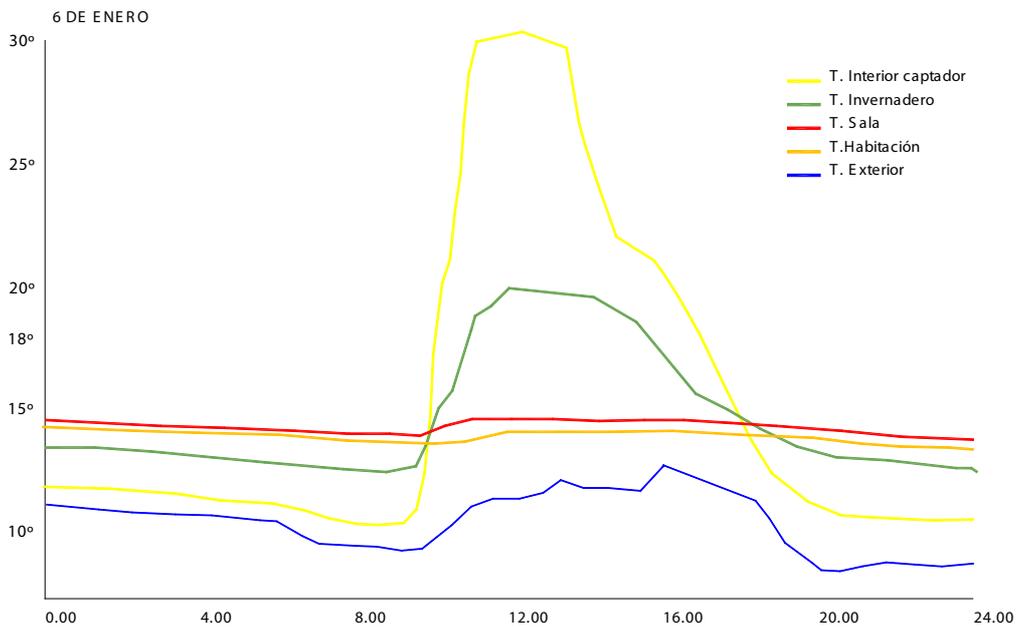
Comportamiento de la vivienda durante el invierno calefaccionada por captación solar directa e invernadero.

Pese a que las mediciones son continuas, se toma un día representativo del periodo de análisis elegido en el que las temperaturas sean similares a las registradas durante el día nublado. Puede observarse en la figura 6 que el invernadero supera la temperatura de confort durante al menos 5 horas. Por lo que entre las 11 y las 4 de la tarde el calentamiento de este espacio es gratuito pese a tener una orientación sureste lejos de la óptima. Una vez el sol deja de incidir en este espacio la temperatura desciende rápidamente. La temperatura media exterior registrada es de 10,7°C, mientras que la temperatura media interior de la vivienda (registrada en la sala y en la habitación) es de 14,5°C. La temperatura media del invernadero es de 15,6°C. La temperatura de radiación después de 4 días soleados se sitúa en 15,0°C. La temperatura operativa resultante es de 14,3°C. Cabe recordar la orientación Sureste del invernadero, por lo que dicha conclusión no es extrapolable a invernaderos con otras orientaciones. Los sistemas convencionales de calefacción ahora tan solo requerirían elevar la temperatura operativa 3,7°C. Habiéndose reducido el salto térmico a suplir por el sistema de calefacción de en torno al 45%.

Figura 5. Temperaturas registradas en día tipo (invierno) sin aportes pasivos.



Fuente: elaboración propia

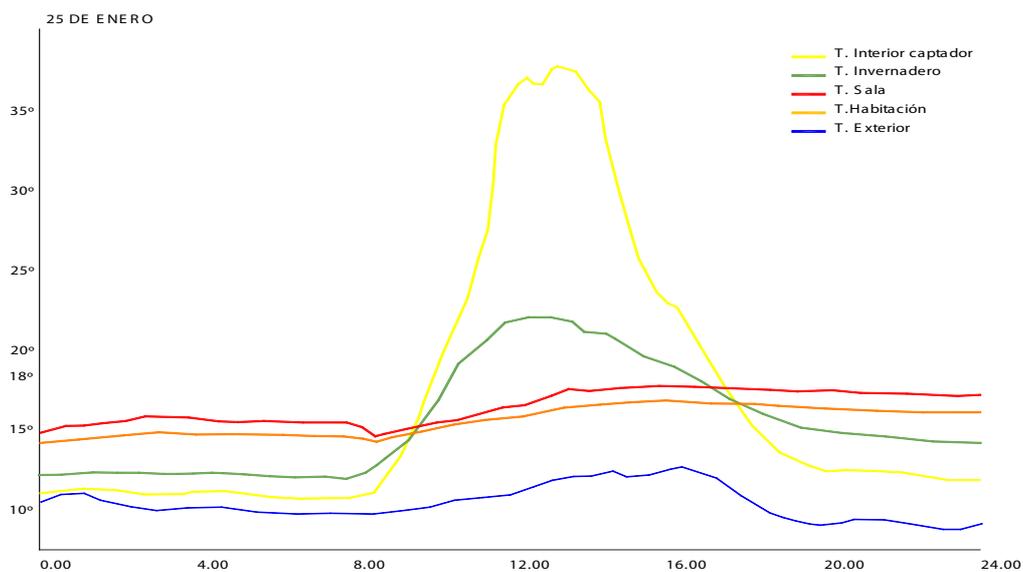
Figura 6. Temperaturas registradas en día tipo (invierno) con aportes pasivos.

Fuente: elaboración propia

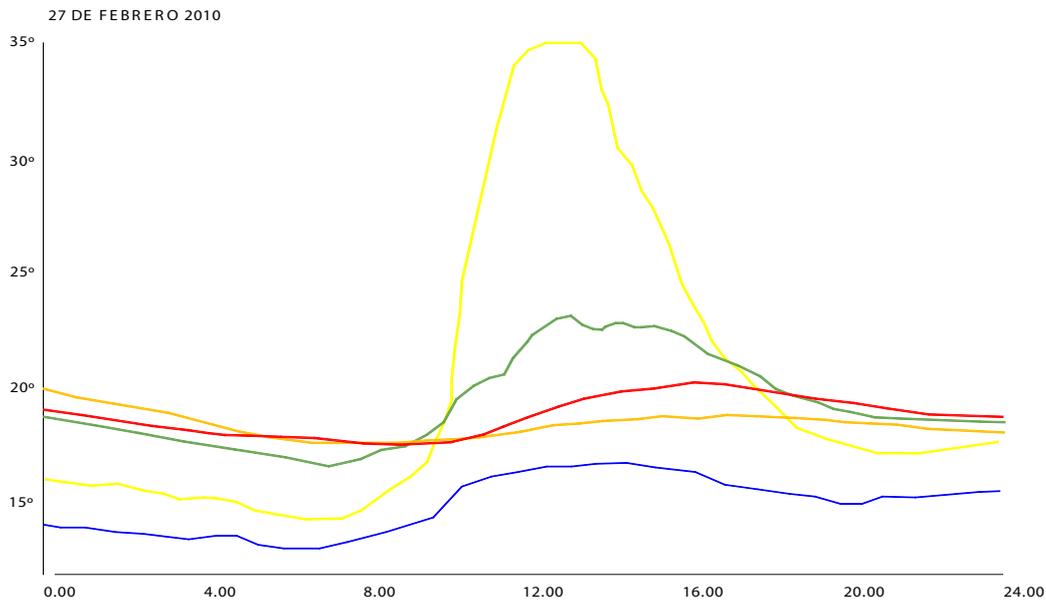
Comportamiento de la vivienda durante el invierno, calefaccionada por captación solar directa, invernadero y captador solar.

Se observa en la figura 7 un incremento de la temperatura interior de en torno a 5°C con respecto a un día nublado gracias a la energía obtenida mediante el conjunto de sistemas pasivos. La temperatura media exterior registrada es de

10,9°C, mientras que la temperatura media interior de la vivienda es de 16,2°C. La temperatura media del invernadero es de 15,6°C. La temperatura máxima de salida de aire del captador es de 37,2°C. El invernadero se encuentra por encima de 18°C desde las 10 de la mañana, manteniendo la temperatura de confort hasta las 17h. La temperatura media radiante asciende hasta los 16°C.

Figura 7. Temperaturas registradas en día tipo (invierno) con aportes pasivos y activos

Fuente: elaboración propia

Figura 8. Temperaturas registradas en día tipo (primavera) con aportes pasivos y activos

Fuente: elaboración propia

El valor de la temperatura operativa es de 16°C, lo cual supone una reducción del diferencial de temperatura que debe superar el sistema de calefacción convencional para alcanzar la temperatura de confort de apenas 2°C (comparando las temperaturas interiores de un día nublado con un día despejado de similares condiciones climáticas exteriores dentro de la misma semana). Puede observarse cualquier caso, la captación aportada no es suficiente para alcanzar la temperatura de confort interior. Por ello podemos concluir que la captación solar puede reducir considerablemente los periodos de calefacción convencional, pero no eliminar la necesidad de la instalación de un sistema de calefacción convencional.

Comportamiento de la vivienda durante primavera, calefaccionada por captación solar directa, invernadero y captador solar.

Evidentemente, a medida que nos alejamos del solsticio de invierno, la radiación solar se incrementa por lo que la captación de energía en el invernadero y el captador solar de aire aumenta, a la vez que las necesidades de calefacción se reducen al aumentar la temperatura exterior. El porcentaje de cobertura solar obtenido por los medios pasivos y activos irá en aumento hasta llegar al 100%, fecha a partir de la cual se producirán, en días soleados, excedentes de captación.

Durante un día tipo soleado de final de febrero observamos en la figura 8 se mantienen el interior de la vivienda y el invernadero medias superiores a los 18°C mediante métodos de acondicionamiento activos y pasivos.

3.3. Monitorización del captador solar de aire

Los ensayos de eficiencia del captador se observan en la figura 9 y 10, se realizan siguiendo las prescripciones establecidas en la norma ASHRAE 93-77 (ASHRAE, 1977). Dicha norma establece el proceso bajo condiciones de flujo de aire constante del rendimiento térmico a partir de la obtención de valores de eficiencia instantánea para unos valores de radiación incidente, temperatura ambiente y temperatura de entrada y salida del aire.

La eficiencia del captador basada en el área bruta del captador viene determinada por la siguiente fórmula (Nzabonimana, C) (Elbouchairi, 2002):

Fórmula 6.

$$E_{fc} = M C_p \frac{(T_i - T_f)}{I A_g}$$

Siendo

E_{fc} = la eficiencia energética instantánea basada en el área bruta del captador %

M = el flujo de masa circulante Kg/s

C_p = Calor específico del fluido J/Kg°C

T_i = Temperatura del aire a la salida del captador

T_f = Temperatura del aire en la entrada del captador

I = Energía solar incidente sobre el plano del colector W/m^2

A_g = Área Bruta del colector

Intervalo: 0 a $1750 W m^{-2}$ (0 a 350 mV). Error: 8%.
 Precisión: 2%. Las temperaturas de entrada y salida del aire en el captador solar durante e periodo de medición se observan en el siguiente gráfico:

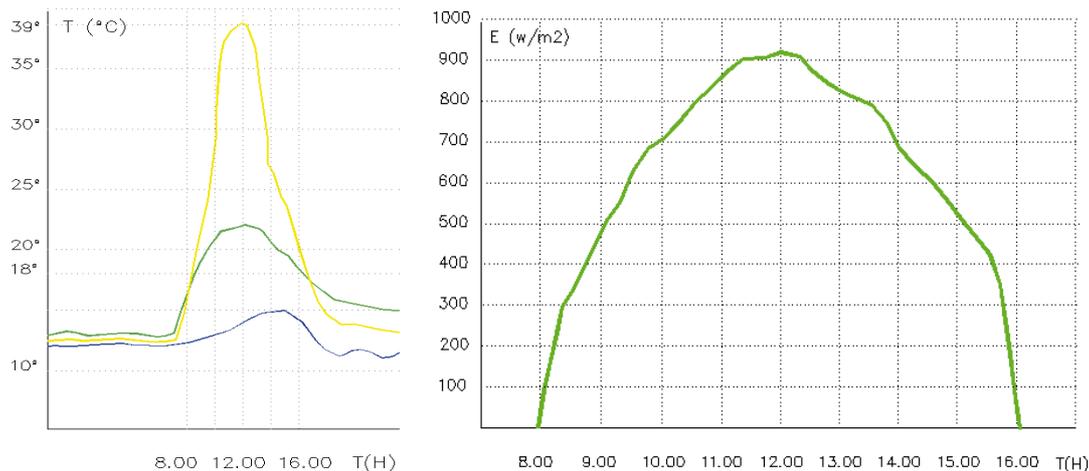
Los valores de eficiencia calculados según las mediciones de radiación y temperaturas registradas para un flujo másico de $54 m^3/h$ se describen en la figura 11.

Las mediciones de temperatura se realizaron durante el día 1 de marzo de 2015 con una velocidad de viento de 4 km/h mediante instrumentación descrita en el apartado 3. Para la medición de irradiancia global se empleó un piranómetro Kipp & Zonnen serie CMP con las siguientes características técnicas:

3.4. Distribución de la energía captada

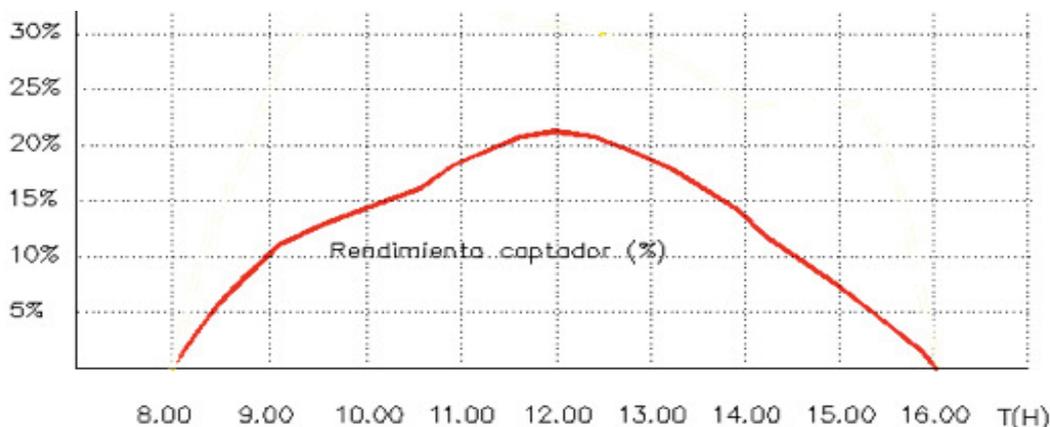
La gran capacidad de captación de energía mediante medios pasivos del invernadero hace necesaria una rápida distribución de esta en el interior de la vivienda para evitar que un rápido

Figura 9 y 10. Temperaturas de entrada y salida del captador y registro de la temperatura exterior y niveles de radiación registradas. 1° de marzo de 2015.



Fuente: elaboración propia

Figura 11. Rendimientos del para el 1° de marzo 2015



Fuente: elaboración propia

aumento de la temperatura eleva está por encima de la temperatura de confort en el interior de este espacio. De esta forma el aire caliente al incidir sobre la masa del perímetro aislado del interior de la vivienda incrementará la temperatura radiante, energía que durante la tarde noche será cedida al interior de la vivienda (Incropera F., 1996). Inicialmente la distribución de la energía captada por invernadero y captador solar de aire, estaba prevista mediante dos ventiladores axiales de 600 m³/h de caudal libre total, se pondrían en funcionamiento una vez la temperatura del invernadero superara la temperatura de 18°C (o cualquier otra temperatura de consigna determinada), distribuyendo la energía en la sala y la habitación. Mientras el cerramiento móvil existente entre la sala y el invernadero permanecía cerrado (de aproximadamente 15m² de superficie), este volumen de aire ha resultado del todo insuficiente, generándose durante el invierno temperaturas por encima de los 24°C en el interior del invernadero mientras la temperatura de la sala se mantenía en torno a los 16°C.

En el caso de encontrarse este elemento de separación (sala- invernadero) abierto, y los inyectores de aire en funcionamiento, la distribución de la energía captada no es completamente eficiente, manteniéndose diferenciales de entre 3 y 4°C en los períodos de mayor captación solar durante el invierno entre el invernadero y la sala. Una primera conclusión sería por lo tanto, que es imprescindible el movimiento de grandes caudales de aire para la distribución de la energía captada en un invernadero y que este movimiento de aire no puede ser asumido por las corrientes convectivas naturales teniendo que ser forzada por ventiladores de caudal suficiente.

Una vez se comprobó el insuficiente caudal aportado por los ventiladores murarios. Se incorporan dos ventiladores de 65 y 170 W de consumo a la vez que se mantiene las separaciones entre sala e invernadero abiertas. Los nuevos ventiladores aportan un caudal de aire de aproximadamente 3000 m³/hora. Evidentemente, estos ventiladores únicamente pueden ponerse en funcionamiento en ausencia de habitantes en la vivienda. Otro efecto observado en el invernadero es la estratificación del aire caliente en la parte superior por lo que durante las pruebas se añade otro ventilador en este espacio direccionado hacia la parte superior del invernadero para permitir la redistribución del aire caliente allí acumulado. Ha sido igualmen-

te necesaria la introducción de un ventilador de pie de reducida potencia en la habitación que recircule el aire para eliminar la diferencia de temperaturas entre la sala y la habitación. Todos estos ventiladores representan un gran consumo eléctrico que puede llegar a no justificar el accionamiento del sistema solar activo desde el punto de vista de la relación costo-beneficio demostrando la necesidad de la incorporación de sistemas mecánicos que complementen las corrientes convectivas naturales, que se han demostrado claramente incapaces de equilibrar las temperaturas en una vivienda de planta abierta.

3.5. Operatividad de los sistemas de captación empleados

El correcto funcionamiento de todos los sistemas depende de la ausencia de los habitantes de la vivienda lo cual dificulta la efectividad del sistema, si bien la captación solar del invernadero, el periodo de funcionamiento del captador así como la recirculación de los excedentes solares a través de los radiadores se encuentran automatizados. El fracaso de los sistemas de transferencia de aire al interior de la vivienda por medio de dos ventiladores de 300m³/h obliga a mantener abiertas la separación existente entre el invernadero y la sala y la incorporación de dos potentes ventiladores de pie para realizar la necesaria transferencia de energía en los periodos de captación. Ello permite la transferencia de energía al interior de la vivienda durante las horas de sol pero, de no cerrarse la comunicación entre el invernadero y la vivienda cuando llega la tarde-noche el flujo de energía puede invertirse, perdiéndose parte de la energía obtenida durante el día. La vivienda no dispone de un método que, de forma autónoma, permita mantener una temperatura adecuada en ausencia de ocupantes y días nublados.

Durante los días soleados pueden llegar a ponerse en funcionamiento hasta 7 ventiladores (dos de ellos de gran potencia). Este método tiene el importante inconveniente de producir corrientes interiores de velocidad excesiva y ruido, por lo que sólo será una opción válida en ausencia de los ocupantes. Se hace necesario para futuras experiencias la consideración de la incorporación a la vivienda de un sistema de conductos de aire que permitiera de forma efectiva la distribución de la energía captada.

4. Conclusiones

La monitorización de las estrategias implementadas demuestran que es posible proponer alternativas de moderada eficiencia energética dentro del campo de la rehabilitación o reforma de edificaciones complementarias a las soluciones convencionales o tradicionales así como la implicación de los profesionales del sector de la construcción en proyectos sostenibles. A pesar de la alta nubosidad acaecida durante el periodo de medición, en el año 2010, aproximadamente un 60% superior a la media ("Agencia Española de Meteorología," n.d.), los sistemas de captación solar se han demostrado eficaces en la reducción del consumo energético de la vivienda en invierno así como para limitar en gran medida el periodo de funcionamiento de los sistemas de calefacción convencionales. La reducción del salto térmico entre la temperatura interior y la temperatura de confort del interior de la vivienda se reduce de 6,2°C a apenas 2°C reduciendo considerablemente las necesidades de calefacción en días soleados de fechas cercanas al solsticio de invierno y alcanza el 100% de cobertura energética de calefacción de la vivienda en días soleados hasta el mes de diciembre y a partir de finales de febrero. Los colectores solares de aire son elementos de gran interés en estrategias arquitectónicas de captación solar en climas moderados dado su enorme potencial de integración, su economía y rendimiento energético.

Pese a ello los valores obtenidos durante las mediciones realizadas aportan un rendimiento máximo

del 21%, excesivamente bajo, por lo que en posteriores evoluciones del modelo debería incrementarse el flujo másico del captador, mediante un sistema de sellado más eficiente de las posibles entradas de aire perimetrales y la instalación de ventiladores de mayor potencia. Por otro lado, sería necesario pintar la superficie absorbadora de negro y reducir las pérdidas de energía que se producen a través de la superficie transparente mediante la incorporación de una cámara de aire intercalada en una segunda capa de metacrilato transparente.

Asimismo, es imprescindible una estrategia de distribución de la energía captada en proyectos que incorporen estrategias de captación solar que prevea el desplazamiento de grandes volúmenes de aire por métodos mecánicos. La inercia térmica se demuestra efectiva e imprescindible para mantener la estabilidad térmica en viviendas con sistemas de gran superficie y potencial de captación.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en conjunto con la Escuela Politécnica del Ejército, ESPE. Avenida General Ruminahui s/n. Sangolquí. Ecuador. 171-5-31B. La investigación fue posible gracias al apoyo institucional proporcionado por el proyecto "Becas Prometeo" del Gobierno de Ecuador, así como con las carreras de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)

BIBLIOGRAFÍA:

- Agencia Española de Meteorología. (n.d.). Retrieved from www.aemt.es
- Aguilera, P. (2009). Remodelación de edificio para oficinas en el distrito 22 de Barcelona. *Tectónica*, (28).
- ASHRAE. (1977). Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. *ASHRAE*. 93-77.
- Camaño Martín, E. y González, N. (2004). Viviendas Solares Autosuficientes. *Informes de La Construcción*, 56(3), 35-46.
- Chávez Mora Miriam, Díaz, A y Allison, Y (2012) Correlaciones para la convección forzada. Recuperado de: https://www.academia.edu/10169136/correlaciones_para_la_conveccion_forzada
- Elbouchairi, A. (2002). Eficiencia neta de un colector solar de aire de bajo costo. (Tesis Doctoral). Estudios de Calidad e Innovación. Universidad de Córdoba.
- Incropera F., D. D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. EEUU: John Wiley & Sons.
- Karwa, R., Srivastava, V. (2013). Thermal Performance of Solar Air Heater Having Absorber Plate with V-Down Discrete Rib Roughness for Space-Heating Applications. *Journal of Renewable Energy*, Vol. 2013, 1-13. Recuperado de <http://doi.org/10.1155/2013/151578>.

- Kurtbas, I., Turgut, E. (2006). Experimental Investigation of Solar Air Heater with Free and Fixed Fins: Efficiency and Exergy Loss, *International Journal of Science & Technology*, 1(1), 75–82.
- Lalji, M. K. (2011). Experimental Investigations on Packed Bed Solar Air Heater, *Current World Environment*, 6(1), 151–157.
- Morganti, M., Coch Roura, H. y Cecere, C. (2012). The effect of urban obstructions in Mediterranean climates: Built form typology, density and energy. *Architecture, City and Environment*, (19), 13–26.
- Nzabonimana, C. (1983). Testing and efficiency improvement of a solar air collector.
- Neila González, F. J., Acha Román, C., Higuera García, E. y Bedoya Frutos, C. (2008). Los Materiales de Cambio de Fase (MCF) empleados para la acumulación de energía en la arquitectura. Su aplicación en el prototipo Magic Box. *Materiales de Construcción*, 58, (291), 119–126. Recuperado de: <http://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.102>.
- Oliver-Ramírez, a., García-Santos, a., & Neila-González, F. J. (2011). Caracterización física y mecánica de placas de yeso con materiales de cambio de fase incorporados para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente. *Materiales de Construcción*, 61, (303), 465–484. Recuperado de: <http://doi.org/10.3989/mc.2011.53309>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, (2), 318–345. Recuperado de : <http://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- Varun, M. (2010). Heat transfer and friction factor characteristics of rectangular channel solar air heater duct having protusions ar roughness element. *International Journal of Energy and Environment*, 1(6), 861–870.
- Velasco Roldan, L. (2009). *El movimiento del aire como condicionante de diseño arquitectónico*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Virote, J., & Neves-silva, R. (2013). *Nearly Zero Energy Building Refurbishment*. Springer Link
Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-5523-2>