

ESTRATIFICACIÓN EN UN ESPACIO ACONDICIONADO POR MEDIO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN: PANEL RADIANTE SOLAR PASIVO.

M. Victoria Mercado^{1,4}; Alfredo Esteves^{2,4}; Celina Filippín^{2,5}, Silvana Flores Larsen^{3,6}

⁴Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV), (INCIHUSA)
 Centro de Ciencia y Técnica (CCT) (CONICET)
 Avda. Ruiz Leal s/n Parque General San Martín (5500), Mendoza, Argentina
 E-mail : mvmercado@lab.cricvt.edu.ar

⁵Universidad Nacional de La Pampa-CONICET-Spinetto 785-(6300) Santa Rosa, La Pampa

⁶Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales
 INENCO-Universidad Nacional de Salta-CONICET
 Avda. Bolivia 5150 (4400) Salta

RESUMEN.

Con anterioridad se ha estudiado el sistema e calefacción radiante solar pasiva para acondicionar locales sin disposición de una fachada hacia el ecuador. El presente trabajo analiza el efecto de estratificación cuando el sistema se encuentra en funcionamiento. Se presentan dos casos: la situación dentro del sistema, y la situación en el espacio de ensayo. De acuerdo al análisis bibliográfico se prevee que dentro del recinto cerrado, el movimiento de aire es bajo. En el espacio de ensayo, se realizaron mediciones in situ en cuatro situaciones: convección natural con y sin flujo de aire natural y convección forzada por un ventilador a baja y media velocidad. Los mejores resultados se obtienen con el flujo natural entrante desde la ventanilla inferior, esto nivela las temperaturas dentro del ambiente. Consecuentemente disminuye el ΔT entre pies y cabeza, siendo su máximo de 4.8°C, menor al máximo de la norma ISO 7730:1994 de 5°C.

Palabras Claves: Sistema de calefacción: panel radiante solare pasivo, Estratificación, Confort Térmico.

INTRODUCCIÓN

La mala calidad térmica de las edificaciones es una característica persistente en las construcciones destinadas a la vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina. Debido a esto se requiere un alto consumo energético para alcanzar niveles mínimos de confort en una zona de inviernos severos. En numerosas situaciones es difícil enfrentar el costo energético para climatizar los espacios. En consecuencia las temperaturas interiores se encuentran por debajo del nivel mínimo de confort y salubridad.

Se ha estudiado y experimentado un sistema de panel radiante utilizado para calefaccionar pasivamente locales sin disposición hacia el Ecuador (Figura 1).

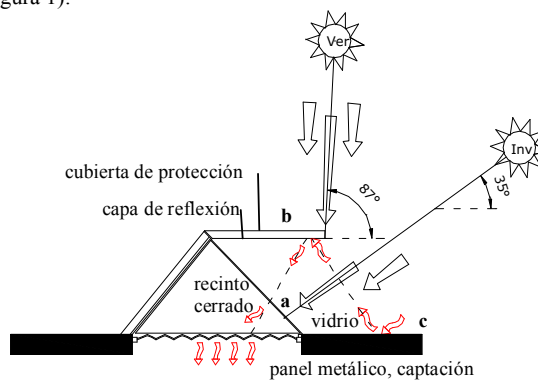


Figura 1: sistema de panel radiante, recinto sellado.

Se trata de un sistema solar pasivo, ubicado en la cubierta del espacio, la cuál en general está libre de obstrucciones. Es de forma piramidal alargada creando un recinto cerrado, tipo lucernario, de captación indirecta, sin acumulación de calor, el cual se ubica dentro de un recinto cerrado donde la disipación de calor se realiza principalmente por medio del intercambio radiante (Mercado y Esteves, 2005). La energía solar que absorbe un panel radiante es entregada al espacio interior por medio

¹ Becaria Doctoral Tipo II-CONICET

² Investigador Independiente- CONICET

³ Investigador Asistente- CONICET

de transferencia por radiación y por convección libre (Balcomb et al, 1986). En el caso particular del sistema en cuestión, el intercambio de calor se produce principalmente por radiación. En trabajos anteriores se ha demostrado que el sistema responde satisfactoriamente a las expectativas y lleva al espacio a condiciones de confort durante las horas de sol (Mercado et al, 2005, 2006, 2007).

El presente trabajo analiza el diferencial térmico vertical (estratificación) que se produce en un espacio de ensayo cuando el sistema se encuentra en funcionamiento.

CALEFACCIÓN CON SISTEMAS RADIANTES

En relación a los sistemas de calefacción convectiva, un sistema de acondicionamiento radiante presenta numerosas ventajas. En la calefacción radiante, el sistema intercambia calor con las superficies presentes en el espacio y con el cuerpo humano, generando una sensación de calor envolvente que percibirá el individuo. En relación al aire, al no ser utilizado como medio de transporte del calor, no se somete a la contaminación con gases producidos por la combustión como CO, CO₂, NO_x, SO₂, entre otros.

Frente a sistemas de calefacción convectiva que son muy utilizados y difundidos por su economía de adquisición, los sistemas de calefacción por intercambio radiante inciden con mayor efectividad en el confort térmico, además de ser energéticamente más eficientes y salubres para la calidad del aire interior.

Se considera importante el estudio de la estratificación térmica, debido a que es favorecido por el funcionamiento del sistema analizado.

CLIMA Y SITUACIÓN DE ENSAYO

Las experimentaciones del sistema de calefacción: *panel radiante solar pasivo*, se realizaron en la ciudad de Mendoza. Ésta se encuentra situada en la región cuyana, en el centro-oeste de la República Argentina (32° 40' latitud sur, 68° 51' longitud oeste y 827 m.s.n.m.), en una zona con características de tierra mediterránea, de clima árido a semiárido y con una fuerte amplitud térmica. En la figura 2 se presentan las temperaturas promedio mensuales y los niveles de radiación global incidente (HGLO, MJ/m²/día) sobre plano horizontal. Las precipitaciones son reducidas con un mayor porcentaje de incidencia en la época estival marcando 218 mm anuales.

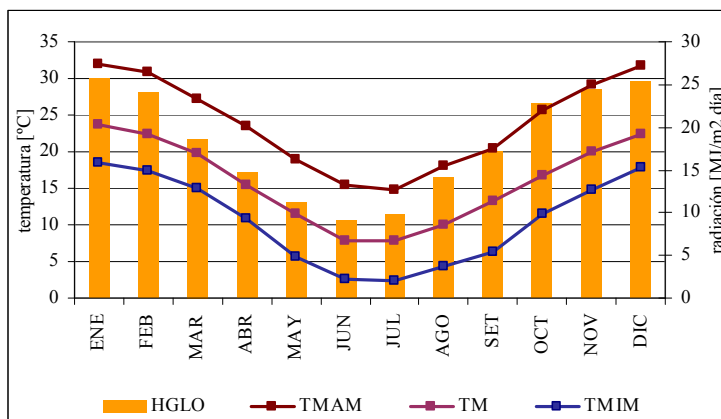


Fig. 2: Temperaturas medias mensuales y Radiación global (HGLO) sobre plano horizontal para la ciudad de Mendoza.

ASIMETRÍA RADIANTE VERTICAL: ESTRATIFICACIÓN

El gradiente de temperatura entre niveles de altura de un espacio se denomina estratificación. Esta condición advierte que se han producido celdas convectivas con diferentes densidades y con un funcionamiento individual e impermeable a la actividad molecular de las masas de aire que se encuentren por arriba y por debajo a ella. Esta condición impide la homogeneidad en las condiciones térmicas del ambiente.

Para la norma ISO 7730:1994, la diferencia de temperatura entre 0.25m y 1.55 tiene un valor límite de hasta 5°C para que una persona se sienta en condiciones de confort.

EL CASO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN: PANEL RADIANTE SOLAR PASIVO.

El estudio del sistema de calefacción: panel radiante solar pasivo presenta dos casos de estratificación para estudiar:

- La situación de estratificación dentro del sistema, es decir dentro de la cavidad triangular:

Es posible prever el comportamiento de los flujos internos en el interior del sistema. En recintos triangulares se produce el fenómeno convectivo de forma multicelular. Haese y Teubner (2002) demuestran que para cavidades triangulares de poca pendiente el flujo de aire se determina con mayor cantidad de células, debido al aumento de fricción entre las partículas, y comienzan a desplazarse hacia los vértices laterales a lo largo de la base. Por el contrario, a pendientes mayores (siendo el caso de la cavidad del sistema) se experimenta flujos unicelulares.

H. Asan y L. Nambi (2001) demuestran la relación de la formación de células de aire con el valor del número Rayleigh (Ra). Se establece que para números Ra altos, la actividad de flujos celulares de aire aumenta y se comienzan a producir células secundarias junto a una de mayor importancia denominada como célula primaria. En el trabajo de P. M. Haese y Teubner [2002], se diferencian las cavidades triangulares en relación a su dimensiones, indicando que para espacios tipo ático (semejantes al sistema de calefacción estudiado) los valores de este son comúnmente altos, del orden de 1×10^{10} - 1×10^{11} . Estos trabajos actualizan la hipótesis de Bejan [1993], donde expone que para espacios triangulares con el lado inferior caliente, se da como patrón un número Ra alto.

El valor obtenido para el prototipo es cercano a lo estipulado a la bibliografía antes mencionada, siendo $RA=1.11 \times 10^9$. Entonces, es posible prever que dentro del recinto cerrado del sistema, el movimiento de aire es particularmente bajo, lo que sugiere que la condición de estratificación es estable

- Situación de estratificación en el espacio de ensayo:
 Con el objetivo de evaluar la condición térmica de confort en relación a la estratificación térmica producida en el espacio por el sistema se realizaron mediciones *in situ* en el espacio de ensayo del prototipo (Figura 4), con un intervalo de 15 minutos para dos períodos en diferentes condiciones de flujo de aire.

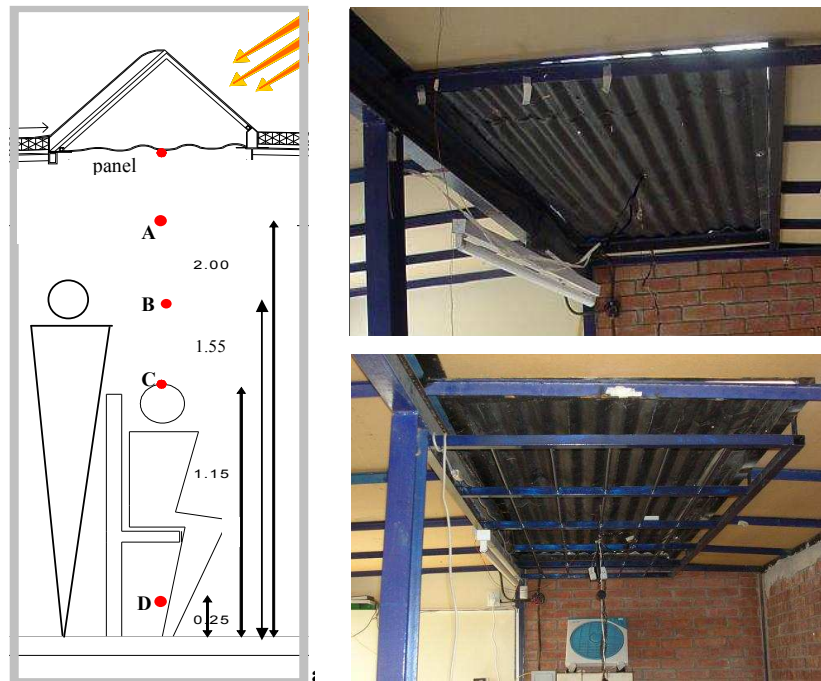


Fig. 4: a) Esquema de ubicación de los sensores de globo negro en el espacio de experimentación, b) fotografía del sistema y c) ubicación del ventilador para la experimentación de convección forzada.

El primer período comprende 12 días (01 de julio de 2008 hasta 12 de julio de 2008). En este período existe el ingreso de una corriente de aire de forma natural (no forzada) en el lado inferior norte del local por una ventanilla de 0.10 x 0.90m.

Con el propósito de acrecentar el este estudio se realizó un segundo período de mediciones, estas se realizaron sin presencia de corriente de aire natural, ya que se bloqueó la entrada de aire por la ventanilla. Posteriormente se agregó a la experimentación convección forzada en dos velocidades distintas: baja y media, por medio de un ventilador orientado hacia el panel con el propósito de barrer el calor y generar mayor convección. Se considera importante resaltar que en este caso el movimiento se realizó con el aire del recinto sin el ingreso de aire exterior. Estas mediciones se realizaron en un período de 26 días (del 3 de julio hasta el 29 de julio).

Se tomaron registros de temperatura de aire y temperatura de globo negro en el plano vertical, con esferas pintadas negras con un sensor data logger HOBO con termocupla tipo T dentro de ellas, según la metodología de globo negro de Fuller Moore (1982). Los sensores se ubicaron en relación dimensional con el espacio de desarrollo de actividad de una persona: a los tobillos (0.25m), a la altura centro de una persona parada (1.1m), a la altura centro de la cabeza de una persona parada (1.55m) y por último a 2.00m (Figura 4).

RESULTADOS

En la figura 5, se presentan los datos obtenidos de los globos A, C y D para el primer período de mediciones (correspondientes a la sensación térmica de la persona sentada). Se puede observar que la diferencia térmica de los puntos C

y D, que sentirá la persona entre sus pies y cabeza no sobrepasa el máximo recomendado por la norma ISO anteriormente mencionada (5°C).

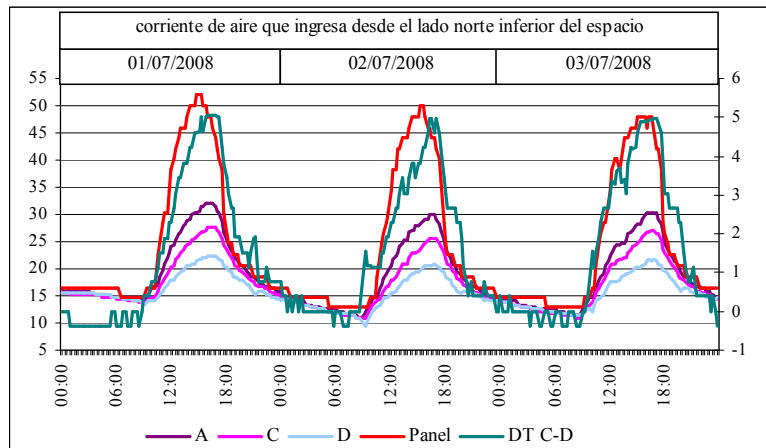


Fig. 5: Temperaturas registradas en el primer periodo de experimentación, temperatura de globo negro para los puntos A, C y piso, temperatura superficial panel radiante.

En el caso del segundo periodo de mediciones, los resultados obtenidos se presentan en la figura 6. Para el caso de convección natural sin corriente de aire exterior la diferencia térmica entre los puntos “B y D” asciende a 12°C. La situación de disconfort se repite para la situación de los puntos B y C en relación al punto D, debido a que superan los 5°C (máximo establecido por la norma) alcanzando diferencias de hasta 12°C.

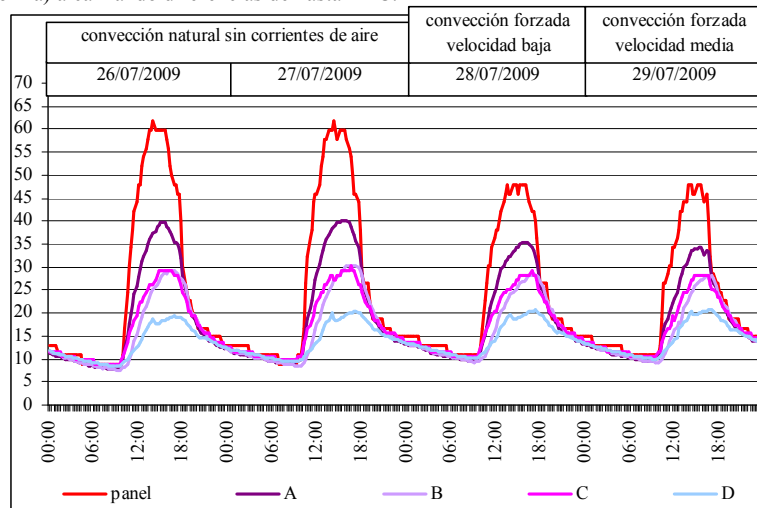


Fig. 6: Temperaturas registradas en el segundo periodo de experimentación, temperatura de globo negro para los puntos A, B, C y piso, temperatura superficial panel radiante.

Siendo que todos los días de experimentación presentados se registró un promedio de radiación solar diaria para el medio día solar de 510 W/m². El caso de las mediciones con ventilación forzada, sugiere una importante disminución en la temperatura del panel radiante para ambas velocidades. Esto implica que la corriente convectiva barrió el calor del panel como se esperaba. En relación a las temperaturas de globo para los puntos A, B, C y D se presentan dos situaciones diferentes en relación a la velocidad de la corriente.

Por una parte, en la misma figura se puede observar como con una corriente a baja velocidad, la temperatura del punto A, desciende 5°C. Esto supone un acercamiento a las temperaturas resultantes dentro de la altura del cuerpo humano (puntos B, C y D). Sin embargo los puntos B y C también presentan una disminución en su valor de 1.5-2°C. El punto D, por el contrario, asciende su temperatura sobre 1-2°C en relación a las experimentaciones sin corriente de aire.

Para el caso de la corriente forzada a media velocidad, la temperatura en el punto A desciende hasta 7°C, en relación a la registrada con convección natural. Los puntos B y C siguen la tendencia en 1.5°C disminuyendo hasta 1.5 a su par con corriente forzada de velocidad baja y hasta 3°C en relación al espacio en condiciones naturales. El punto D, tomado a 0.25m del piso presenta un leve aumento a su antecesor de hasta 1°C.

DISCUSIÓN

Debido a la presencia de niveles significativos de estratificación en el caso de convección natural, se comienza a considerar como alternativa válida la presencia de una corriente o una fuerza mecánica que movilice las moléculas de aire y descomponga este fenómeno.

La entrada de un flujo de aire desde la ventanilla en la parte inferior del espacio, movilizándolo la masa de aire y rompiendo con las capas estratificadas es positivo. Esto resulta en una disminución del ΔT existente entre la altura de los tobillos y la cabeza. Por otro lado las corrientes de aire forzada no cumplen exitosamente este cometido en la disposición que fueron probadas. Se puede observar en la figura 7 que el valor más cercano al establecido por la norma ISO 7730:1994, lo proporciona el espacio bajo las condiciones del primer ensayo: convección natural con corriente de aire natural.

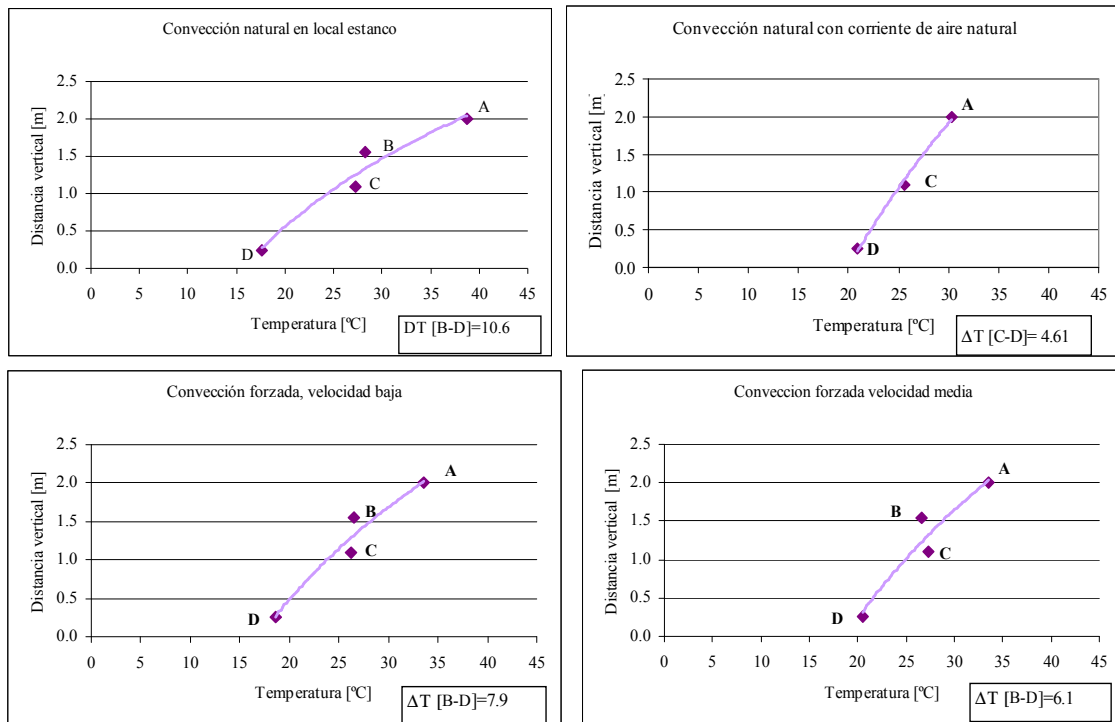


Fig. 7: Temperaturas de globo negro en el plano vertical del espacio para la hora de mayor temperatura (14:00hs) y ΔT entre los puntos de tobillo (D) y centro de la cabeza (B). Nota: para el cálculo en la situación de convección con corriente de aire natural el cálculo se realizó con el punto C.

Las corrientes de aire forzadas superior, cumplen con el propósito de barrer el calor del panel, homogeneizando la temperatura de las capas de aire y disminuyendo la diferencia de temperatura entre los puntos altos (A-B-C) y bajos (D).

Debido a los resultados mencionados anteriormente se evalúa la evolución del coeficiente de intercambio global U (Tabla 1), obtenido a partir de la suma de $h_{c\text{panel-espacio}} + h_{r\text{panel-espacio}}$. Una corriente forzada ubicada hacia el panel, como son los casos experimentados, enfría el panel, porque barre más fácilmente la energía del mismo. Esto calienta el espacio, consecuentemente las pérdidas de calor serán más bajas por tener el panel a menor temperatura.

| Tipo de Experimentación | U |
|--|-------|
| situación convectiva natural | 10.31 |
| situación convectiva forzada baja velocidad | 9.93 |
| situación convectiva forzada media velocidad | 9.2 |

Tabla 1: Valores del coeficiente de transferencia de calor global U, para cada tipo de experimentación entre el panel y el espacio interior de ensayo.

CONCLUSIONES

El sistema de calefacción: Panel radiante solar pasivo ha demostrado elevar la temperatura operativa y mantenerse en el área de confort en un espacio habitable durante las horas diurnas.

De acuerdo al análisis bibliográfico es posible prever que dentro del recinto cerrado del sistema, el movimiento de aire es particularmente bajo, lo que sugiere que la condición de estratificación es estable.

Por el contrario el fenómeno de estratificación en el espacio de ensayo se encuentra sujeto a las condiciones de flujo y movimiento de aire del interior del mismo. Por medio del movimiento de aire en forma mecánica se logra disminuir las diferencias que se presentan sin la presencia de esto hasta un 40%, dependiendo de la velocidad del mecanismo.

Los mejores resultados se consiguen con la presencia de un flujo natural entrante desde el lado inferior del espacio, esto moviliza las masas frías hacia arriba generando una corriente positiva que nivela las temperaturas dentro del ambiente. Consecuentemente disminuye el ΔT entre pies y cabeza siendo menor al máximo estipulado por la norma ISO 7730:1994. En efecto, el valor alcanza su máximo de 4.8°C para esta experimentación.

REFERENCIAS

- Adrian Bejan. (1993). Heat Transfer. Ed. John Willey & Sons Inc. Canadá.
- Balcomb, J.D., Barley, D., McFarland, R., Perry, J., Wray, W., Noll, S. (1982) Passive Solar Design Handbook. Vol.1,2 y 3. United States Department of Energy.
- Fuller Moore. (1982). Data Acquisition in Test Modules, Journal Passive Solar. Vol 1. N°4.
- S. Flores Larsen , L. Saravia, G. Lesino, M. Condori, R. Caso, H. Suligoy y C. Fernández. (2006). Simulación térmica bidimensional de un piso radiante. AVERMA, Vol. 10; pp. 3.97 – 3.103.
- Goulding (1994). Energy in Architecture". The Energy Research Group. School of Architecture. University of Dublin, IRL.
- Givoni B. (1976). Man, Climate and Architecture. Segunda Edición.
- H. Asan y L. Nambi. (2001). Numerical simulation of buoyant flow in a room of triangular cross-section under winter day boundary conditions. Energy and Building Vol. 33. pp. 753-757.
- P. M. Haese, H. D. Teubener. (2002) Heat Exchange in attic space. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 45. pp. 4925-4936.
- Mercado V., Esteves A. (2005) Sistema de calentamiento solar para viviendas de bajo costo sin fachadas hacia el Ecuador AVERMA, Vol. 9; pp. 3.49 – 3.54.
- Mercado V., Esteves A. (2006). Sistema de calefacción solar radiante - variables de diseño y mediciones experimentales. ENTAC.
- M. V. Mercado, A. Esteves y C. Filippin (2007). Sistema de calefacción solar radiante. Mediciones experimentales de invierno y evaluación con software de simulación térmica simedif. ENCAC.

ABSTRACT: We have studied the solar radiant heating system and put up passive premises without provision of a facade to Ecuador. This paper analyzes the effects of stratification when the system is in operation. Two cases: the situation within the system, and the situation in the rehearsal space. According to the literature review is anticipated that within the enclosure, the air movement is low. In the rehearsal space, measurements were performed in situ in four situations: natural convection with and without natural air flow and forced convection by a fan at low and medium speed. The best results are obtained with the natural flow coming from the window below, this equalizes the temperature within the environment. Consequently decreases the ΔT between feet and head, with its maximum of 4.8 ° C less than the maximum of ISO 7730:1994 to 5 ° C.

Key Word: Heating System: passive solar heating panel, Stratification, Thermal comfort