

**SISTEMA DE CALEFACCION SOLAR RADIANTE -
VARIABLES DE DISEÑO Y MEDICIONES EXPERIMENTALES****María Victoria Mercado y Alfredo Esteves**

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV-INCIHUSA)

CRICYT – Av. Ruiz Leal s/n – Parque Gral. San Martín – Mendoza

Tel. 43-261 4288797 int. 109 – Fax: 0261 – 4287370

e-mail: mvmercado@lab.cricyt.edu.ar

RESUMEN

Se presenta en este trabajo los resultados experimentales medidos al trabajar un modelo en escala 1:2. Se presenta la evaluación técnica de un sistema de calefacción solar radiante ubicado en el techo y destinado a vivienda de bajo recursos. Se compara su rendimiento con la situación sin sistema y se concluye con que el mismo permite elevar la TRM por encima de la temperatura del aire interior en hasta 5°C y a su vez elevar ésta por encima de la temperatura del aire exterior en +12°C para una vivienda con una conductancia térmica de muros y techo similares a la construida tradicionalmente.

Palabras Claves: calefacción solar radiante, sistemas pasivos, arquitectura solar

ABSTRACT

It is presented thermal evaluation of solar radiant heating system, placed on the roof of low income housing. Thermal performance it is studie experimtally and it is compared with and without system sistuation. Radiant mean temperature is result 5°C over interior temperature of air and in compared with ambient temperature, RT is 12°C high.

Keywords: solar radiant heating, passive solar system, solar arquitecture

1.1 INTRODUCCION

La crisis energética mundial de estos últimos años se ha hecho presente en la República Argentina cayendo con mayor crudeza en la franja poblacional con menores recursos. En Mendoza, particularmente donde reinan condiciones de clima árido continental, provoca que la vida sea particularmente dura, con condiciones de falta total de confort térmico mínimo, en la mayor parte de la época invernal. La causa de esto es variada: 1) la imposibilidad económica de hacer frente al costo del recurso energético para calefaccionar los ambientes interiores, esto es propio de zonas aledañas a las ciudades, donde adquirir la garrafa, kerosene o leña es posible (situación agravada por el elevado costo de energía fósil); 2) Falta de acceso a los recursos, que es propio de las zonas aisladas y remotas ubicadas en zonas de secano, donde la leña se encuentra cada vez más lejos del lugar. Se suma a esta situación, que las viviendas que habitan estas personas, no han sido construidas teniendo en cuenta la conservación de energía y aportes de recursos naturales. Además en el caso de las viviendas de la zona periurbana, no disponen en su mayoría de fachadas hacia el frente norte que permitan ganar energía directamente, lo que sería más eficiente.

La incorporación de sistemas solares pasivos a la vivienda, permite la utilización de la radiación solar para calefaccionar edificios en climas templados y fríos. Estos sistemas son en general, de construcción sencilla, fáciles de operar y si se los diseña apropiadamente, con bajo costo inicial. (Mercado et al, 2005)

Frente a esta situación, se ha desarrollado un sistema de calefacción solar pasiva, cuya ganancia es indirecta a través del techo. Consta de un elemento metálico que se calienta al absorber energía solar y sube su temperatura. Esta temperatura es suficiente para irradiar calor hacia el

interior. El sistema funciona de manera casi instantánea, es decir, no se pretende acumular energía, por lo tanto, se adapta perfectamente bien a techos metálicos sin cielorraso, lo cual es típico de las viviendas del lugar.

A continuación se presenta el estudio del sistema, las mediciones experimentales en un modelo 1:2 y las conclusiones para las variables de diseño.

2. CONFORT DEL SER HUMANO

2.1 Confort general

El confort general de una persona que se encuentra en un espacio interior depende de varios factores entre los que pueden mencionarse los siguientes:

Temperatura, humedad relativa, flujo y renovación de aire
Factores acústicos
Efectos del color y la visión
Factores de higiene
Factores conectados con la rutina diaria
Factores económicos

La adaptación del organismo humano a un ambiente es un proceso completo en donde estos factores actúan en forma conjunta y el organismo reacciona a este efecto conjunto más que a un efecto individual. En este sentido, y desde un punto de vista técnico es muy difícil analizar estos factores en forma global.

2.2 Confort térmico

La sensación térmica de un ambiente se capta mediante los sentidos y estos actúan a través de pautas socio-culturales. En 1973, Fanger establece que el confort térmico está influenciado por los varios parámetros que podemos indicar como:

- 1- Variables fisiológicas: Producción de calor interno del cuerpo y su transferencia al medio ambiente que lo rodea – Nivel de actividad.
- 2- Variables ambientales:
 - a. Temperatura del aire, su distribución en el espacio y su variación temporal – Temperatura de bulbo seco (TBS).
 - b. Temperatura de las superficies que rodean el espacio – Temperatura radiante media (TRM).
 - c. Contenido de vapor de agua del aire - Humedad relativa (HR).
 - d. Velocidad del aire circundante y su renovación (VA).
 - e. Radiación solar (RS).
- 3- Otras variables: Conductancia térmica de la vestimenta y su permeabilidad a la transferencia de calor – Nivel de vestimenta (NV).

La temperatura de bulbo seco tiene que ver con el intercambio convectivo y conductivo del cuerpo hacia el ambiente que lo rodea. Su valor tiene una importancia clave para el confort pero hay que tener claro que a igualdad de TBS, la sensación de confort puede ser modificada fuertemente por la influencia de otras variables: TRM, nivel de actividad, nivel de vestimenta, etc.

En ambientes interiores, se podría indicar que la humedad relativa se mantiene prácticamente constante (del orden de 50%) y dentro de los valores 20% y 80% mínimo y máximo de confort (Givoni, 1992).

La velocidad de viento en la época invernal en los ambientes interiores y cuando no existen sistemas de acondicionamiento centralizado, puede considerarse prácticamente nula.

La radiación solar tiene influencia cuando incide directamente en la persona. En este caso, provee una cantidad de energía adicional, que debe tenerse en cuenta en el balance térmico. En este trabajo, se considera que la fuente de radiación solar no incide dentro del espacio directamente. Sin embargo, una influencia indirecta de la radiación solar es su contribución al aumento de TRM y con ella a la temperatura de confort percibida al aumentar la temperatura de los elementos que rodean al ambiente interior.

Se define la temperatura operativa como la temperatura de confort que cubre el 80% de los casos en confort. Se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión (Audoïn et al, 1981):

$$To = \alpha TBS + (1-\alpha) \cdot TRM \quad (\text{eq. 1})$$

Donde:

- To = temperatura operativa [°C]
- α = coeficiente que depende de la velocidad de viento cuyo valor se indica en la Tabla 1.
- TBS = temperatura de bulbo seco [°C]
- TRM = temperatura radiante media [°C]

Tabla I: valor del coeficiente para la ecuación 1; V = velocidad del aire circundante

V [m/s]	0.05	0.10	0.20	0.30	1.00	4.00
α	0.43	0.51	0.58	0.63	0.74	0.84

Si nos referimos a una persona, ubicada en un ambiente cerrado podemos decir que existirá un intercambio de calor por radiación desde la superficie de la misma, directamente hacia las superficies de los elementos sólidos que la rodean, ya que el aire es transparente a este tipo de transferencia. Este intercambio de calor es muy significativo cuando las temperaturas son distintas, ya que es proporcional a la diferencia de las temperaturas elevadas a la cuarta potencia. Existirá también intercambio de calor por convección desde el cuerpo hacia el aire ambiente que nos rodea si la temperatura ambiente es menor y viceversa para los pocos casos en que la temperatura del aire es mayor que la del cuerpo. En el anexo I aparece las expresiones matemáticas que evalúan estas mecanismos .

2.3 Temperatura operativa

La temperatura media radiante, dependerá de la posición en que nos ubiquemos dentro de la habitación es decir, de la mayor o menor distancia a los elementos radiantes interiores. En este caso, la superficie del colector, que eleva su temperatura al incidir la radiación solar, genera una fuente térmica que intercambiará calor por radiación hacia la persona que se encuentra dentro del ambiente, aumentando la TRM en el punto donde se encuentra la persona.

La temperatura operativa, resultado de la combinación lineal entre la TBS y la TRM de acuerdo a la tabla I, se incrementará al aumentar la TRM.

La tabla II expresa la relación entre el nivel de actividad, el nivel de vestimenta y el rango de temperatura operativa para distintos tipos de actividad más comunes.

Tabla II: relación entre el nivel de actividad, nivel de vestimenta y temperatura operativa para el 80% de las personas en confort.

Actividad	Tasa de Metabolismo [met]	Vestimenta [clo]	Rango de Temperatura operativa [C]
Acostado	0.8	2.2	18+-3
Sentado quieto	1.0	1.5	20+-2.5
Trabajando:			
1- Liviano	2.0	1.0	16+-3
2- Pesado	3.0	1.0	10+-4
Higiene personal	1.4	0.0	27+-1
Preambulando	1.2	2.2	14+-4

Como se puede apreciar, para un nivel de vestimenta determinado, a mayor nivel de actividad menor es la temperatura operativa requerida. Al disminuir el nivel de vestimenta, el rango alrededor del cual puede fluctuar la temperatura operativa resulta menor y la temperatura operativa deberá ser mayor.

Normalmente se evalúa el grado de confort interior indicando los valores de TBS, sin embargo, cuando se trabaja con sistemas solares, la temperatura radiante usualmente resulta distinta que la TBS, resultando una temperatura operativa alejada de la TBS.

3. MENDOZA

La ciudad de Mendoza, se encuentra ubicada en el centro-oeste de la República Argentina ($32^{\circ} 40'$ latitud sur, $68^{\circ} 51'$ longitud oeste y 827 m.s.n.m.), ver Figura 1. La ciudad está emplazada en una zona con características de tierra mediterránea, de clima árido a semiárido, con una fuerte amplitud térmica. En el Gráfico 1 se puede observar las temperaturas máxima absoluta TMAA, temperatura media TM, y la temperatura mínima absoluta TMIA.

Las precipitaciones son reducidas con un mayor porcentaje de incidencia en la época estival marcando 218 mm anuales. Otra característica fundamental es la intensa radiación solar, (alta heliofania relativa, 62% media anual), con un cielo marcadamente sin nubes en la mayor parte del año. En el Gráfico 1 se indica la radiación global sobre el plano horizontal diario promedio mes a mes en MJ/m² día.



Figura 1: Ubicación de la ciudad de Mendoza en la República Argentina

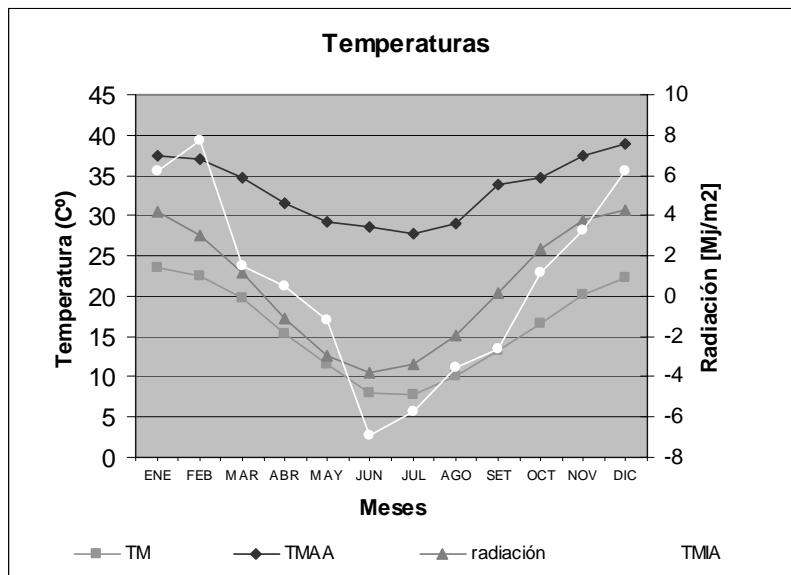


Grafico 1: Temperaturas anuales de la ciudad de Mendoza

3. SISTEMA SOLAR RADIANTE

En un trabajo anterior (Mercado et al., 2005) se ha presentado la conformación de un sistema de ganancia superior (a través del techo), para viviendas de un solo nivel que por sus características de inserción urbana, no cuentan con fachada norte disponible hacia el ecuador (por situación de apareamiento con otra), característica fundamental cuando se trata de aprovechar la energía solar en invierno.

El sistema produce una ganancia solar superior, que produce el aumento de temperatura de un panel metálico ubicado a nivel del cieloraso. Este panel alcanza temperaturas suficientemente elevadas como para entregar energía en forma radiante hacia las personas que se encuentran en el interior. Esto aumenta la temperatura operativa percibida por el usuario, al aumentar la temperatura radiante media del local. Permitiría además generar un ahorro energético del orden del 40%, dependiendo de su tamaño en relación con la superficie cubierta.

3.1 Construcción de un Modelo Experimental del Sistema Solar Pasivo Radiante

Con el propósito de experimentar el sistema solar pasivo radiante se construyó un prototipo para ser medido y evaluado en un modelo experimental cuyas características de conductancia térmica de los elementos muros y techo, fueron equivalentes a las de una habitación construida con materiales tradicionales, utilizados en la región: ladrillón (ladrillo de 0.18 m x 0.10 m x 0.28 m) con revoques en ambos lados (conductancia térmica $K=2.4\text{W/m}^2\text{C}$) y cubiertas liviana, sin aislación térmica ($K = 4.46 \text{ W/m}^2\text{C}$). El dispositivo simula un espacio correspondiente a una habitación con forma prismática, de cuatro lados iguales de 3m de lado por 2.5m de alto. Como la escala utilizada fue de 1:2, las medidas del dispositivo final fue de 1.5 m de lado y 1.25 m de altura y la conductancia equivalente a las anteriormente mencionadas, utilizando 3 capas de cartón corrugado. Se elige una escala menor dado que lo que se evalúa son fenómenos radiantes cuyo intercambio entre superficie son independientes del aire interior siendo solo necesario que el sistema experimental esté construido en escala proporcional a la real. Utilizar escala 1:2 permite una mejor manipulación del sistema.

El prototipo se construyó de acuerdo a las siguientes consideraciones: la superficie absorbadora de la radiación solar, es del 25% de la superficie cubierta del espacio a calefaccionar. Se estudió la inclinación del colector (plano vidriado) para el mayor rendimiento invernal, manteniendo una inclinación de 50° desde la horizontal. En la Figura 2, se muestra una vista del prototipo con la ganancia superior a través de la ventana inclinada 50° y el sistema propiamente dicho. El

absorbedor está construido por una chapa galvanizada de techo ondulado pintada con pintura negro mate (absortancia 0.95 y emitancia 0.9) sostenida en un bastidor de madera. Figura 2.

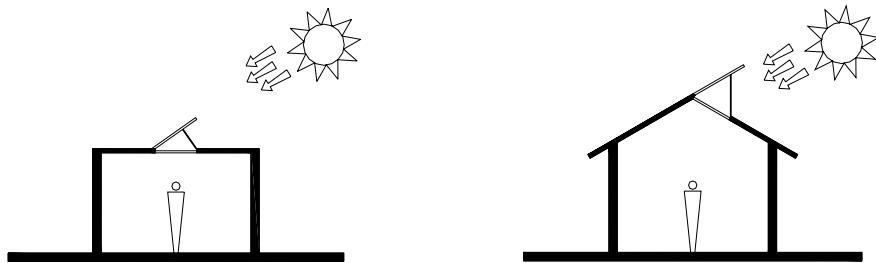


Figura 2: Esquemas de ubicación del sistema en espacios con diferentes cubiertas



Figura 2: Fotos, prototipo y sistema

absorbedor

Con el objeto de evaluar el comportamiento térmico de la propuesta y teniendo en cuenta que el intercambio radiante es entre superficies, se colocan sensores para registrar la temperatura de globo negro (Figura 3), que permite tomar en cuenta la TRM en 9 puntos del interior (Gráfico 2), todos correspondientes a la persona parada. También se registró los valores de TBS interior, TBS exterior y Radiación Solar sobre superficie horizontal.

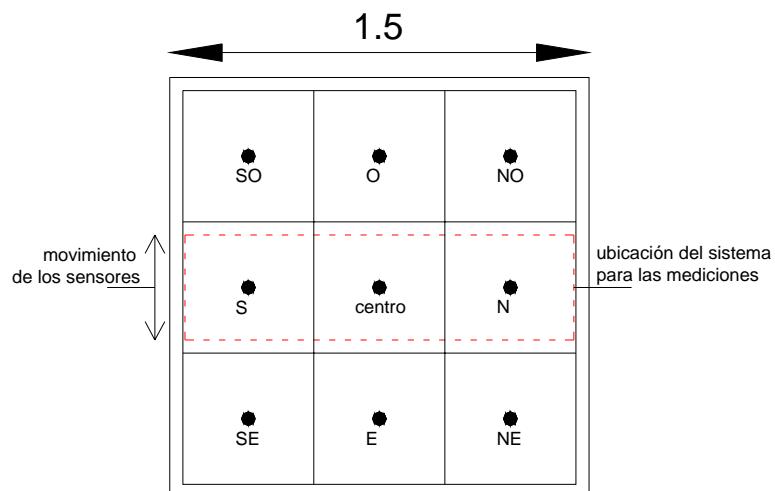


Gráfico 2: Esquema de la grilla interior de puntos de medición de TRM



Figura 3: vista de los sensores en el interior del prototipo

3.2 Mediciones experimentales en prototipo

Se realizaron mediciones para evaluar el comportamiento térmico del sistema. Las mismas se realizaron con y sin el sistema incorporado para tomar en cuenta el impacto derivado de la utilización del sistema.

Dado que las mismas se llevaron a cabo en días no muy fríos, se toma el intervalo de ensayos, durante aquellas horas en las cuales la altitud solar resulta equivalente a la incidencia solar en invierno. Esto permite contar con la evaluación equivalente de la absorción del sistema.

3.3 Resultados

En el gráfico 2 se puede observar las mediciones realizadas con el sistema radiante incorporado en el centro de la habitación. Como se puede advertir la temperatura del absorbéndor crece desde la temperatura ambiente al incidir la radiación solar. Aparece un límite que se establece alrededor de 75°C al llegar al equilibrio térmico.

La TMR varía de acuerdo a la posición siendo más elevada la correspondiente al centro de la habitación cuyo punto se encuentra directamente debajo del sistema. Se indica también la TMR del extremo sur-oeste (SO) de la grilla como ejemplo del resto de los puntos que se comportan de manera similar.

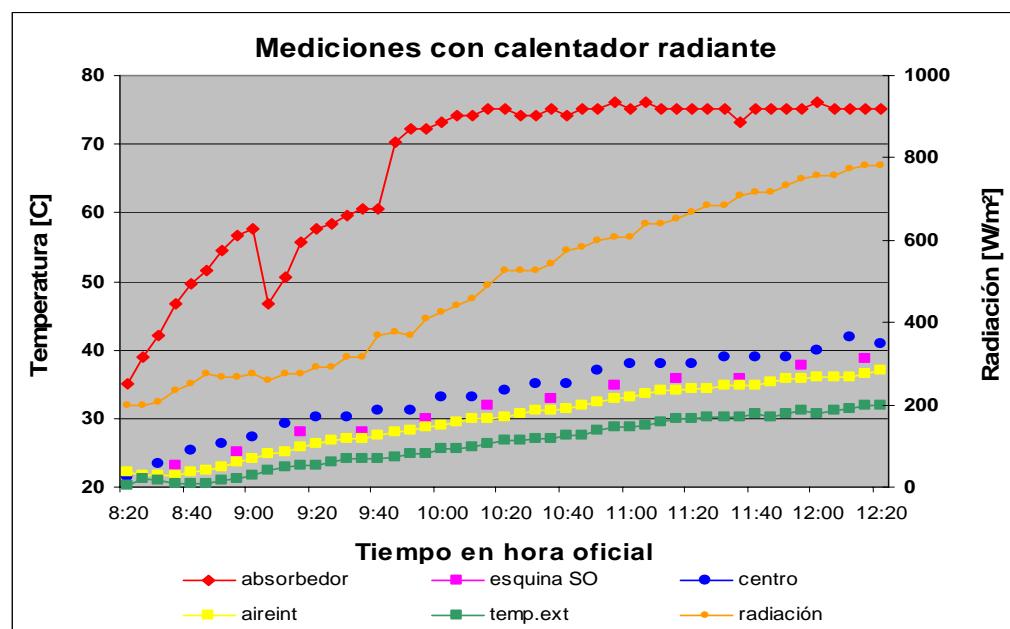


Gráfico 3: Mediciones con sistema; temperatura del absorbéndor, TMR, TBSi, TBSe y radiación solar.

A medida que transcurre el tiempo, el interior gana calor que hace subir la temperatura del aire interior. La temperatura de todo el sistema, muros, aire interior y aire exterior sube, dado la hora del día, sin embargo puede observarse comparando la situación con y sin sistema que las TMR en cada caso son muy diferentes.

Tomando en cuenta que la temperatura realmente percibida por el usuario es la T_o , en los gráficos 3 y 4 se evalúa la misma y se puede observar la diferencia sustancial en la temperatura resultante. Se indica también la temperatura del aire interior (T_{ai}) y la exterior (T_{ae}) para cada caso.

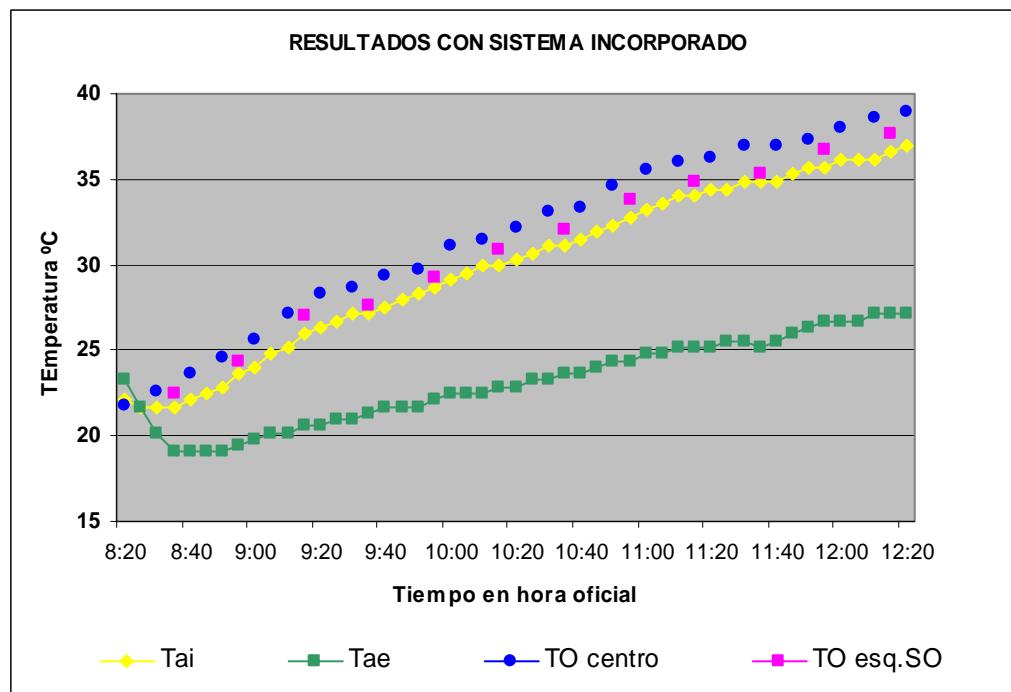


Gráfico 4: T_o , T_{ai} , T_{ae} para el espacio con sistema incorporado

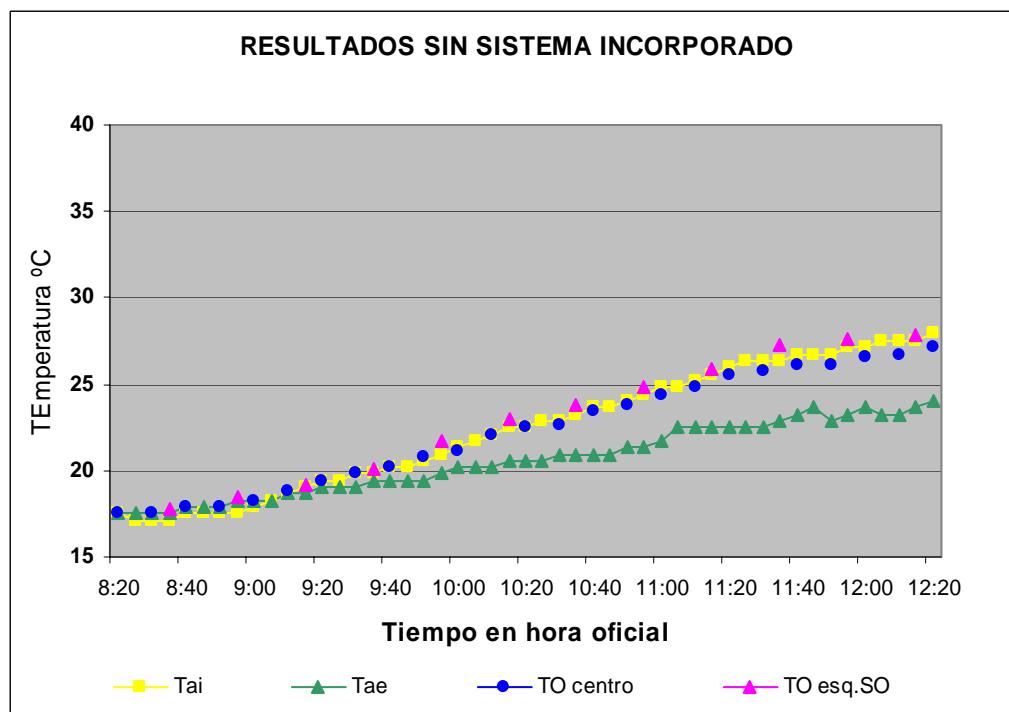


Gráfico 5: T_o , T_{ai} , T_{ae} para el espacio sin sistema incorporado

Como se puede observar en el gráfico 4, en un primer momento la Tae disminuye, fruto de exponer el sistema al ambiente exterior. A los veinte minutos comienza a crecer rápidamente tanto la To como la Tai provocado por el calentamiento del sistema radiante. Al final del intervalo de mediciones (12:20 hora oficial) la diferencia entre la temperatura del aire (Tai) y la temperatura del aire exterior (Tae) es de 10°C. La To en todo momento es superior a la Tai en aproximadamente 2.5°C al centro y 1.5°C en el extremo de la grilla.

Cuando el sistema no se ha incorporado la Tai crece lentamente y las To llegan a ser menores que la Tai, con lo cuál, se afirma el efecto positivo que produce el sistema propuesto. Gráfico 5.

Los resultados de las mediciones que se realizaron en el prototipo corroboran los primeros resultados obtenidos por cálculo (Mercado et al, 2005) “*El sistema propuesto de calefacción pasiva de los espacios logra un valioso ahorro energético. En el caso de una relación (sup. panel-sup. piso) del 50% permite un ahorro energético anual del 40%*”. De esta manera se destaca que la To en el centro del espacio sube hasta 12°C en un espacio con el sistema incorporado; mientras que en una habitación sin el sistema la To constituye un reflejo de las condiciones térmicas exteriores, separándose de esta en solamente +3°C.

4. CONCLUSIONES

La situación térmica-edilicia que sufre la franja poblacional de bajos recursos es insostenible, consecuentemente se ve agravado el estado de salud de la misma, empeorando aún su calidad de vida.

El sistema de calefacción solar pasivo radiante constituyen un recurso importante de mitigación de las crudas condiciones invernales de la Ciudad de Mendoza. La utilización del recurso solar disponible de la ciudad (alta heliofanía relativa) hace posible la incorporación de este sistema en viviendas de bajo costo. De esta forma se extiende su uso a la mayoría de las viviendas sociales. Aparejando, a su vez, como consecuencia un alcance de las condiciones mínimas de confort y un ahorro energético anual del 40% (FAS).

Los resultados indican que un ambiente sin el sistema, tiene una To de 3 a 4°C más que la exterior para el caso de muy bajas infiltraciones y sin aeventanamiento. Cuando se incorpora el sistema la To crece hasta 12°C en las mismas condiciones. Esto nos indica la posibilidad de otorgar un calentamiento natural, de mejor calidad aún en construcciones de baja técnica de su envolvente.

Dado que el mayor intercambio de calor es por radiación térmica y ella ocurre entre elementos sólidos se trata de un sistema apropiado para elevar la To, que la persona percibe convenientemente durante las horas diurnas en que el sol incide sobre el吸收edor y no de un sistema de calefacción para elevar la temperatura del aire interior.

Por último se concluye que el sistema presenta variables de diseño y construcción que aumentarían su eficiencia como sistema de calefacción radiante para viviendas de bajo costo, lo que estimula la continuación de su estudio.

Referencias

- Bánhidi, L. J. 1991. “Radiant Heating Systems” Desing and applications. PERGAMON PRESS.
Gran Bretaña.
- Balcomb, J. D. 1986. “Passive Solar Heating Análisis”
- Esteves A, 2000, “Curso de Confort Térmico”Mendoza, Argentina
- Fanger P. O.; 1970 “Thermal Confort” Denmark Copenagüe.
- Lesino, G., Flores Larsen 2000. SIMEDIF para Windows. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA) N° 3. Editor INENCO. Ed. En CD.

- Mercado M.Victoria, Esteves Alfredo. 2005. SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR PARA VIVIENDAS DE BAJO COSTO SIN FACHADA HACIA EL ECUADOR. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA) N° 3. Editor INENCO. Ed. En CD.
- Fanger P. O.; 1970 "Thermal Confort" Denmark Copenagüe.

Anexo I

AI.1 Intercambio de calor por radiación

El intercambio de calor por radiación entre el cuerpo humano y el medio ambiente que lo rodea, puede expresarse por la ley de Stefan-Boltzman:

$$R = A_{eff} \varepsilon \cdot \sigma (T_{cl}^4 - T_{MR}^4) = \quad (eq. 2)$$

Donde: A_{eff} = área de radiación efectiva del cuerpo vestido [m^2]

ε = emitancia de la superficie exterior del cuerpo vestido

σ = constante de Stefan-Boltzman $5.68 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$.

T_{RM} = temperatura radiante media [$^{\circ}K$]

T_{cl} = temperatura de la superficie exterior del cuerpo [$^{\circ}K$].

El valor del A_{eff} de la eq. 2, dependerá de determinados factores. El área de intercambio del cuerpo no es el área real del cuerpo vestido sino será menor a causa de la interradiación entre distintas partes del cuerpo. Es decir, que tal como vimos anteriormente, la temperatura de cada una de las partes del mismo es distinta y entonces habrá transferencia de calor desde algunas zonas que están a mayor temperatura y que ven otras zonas que se encuentran a menor temperatura, resultando así que el área de emisión de radiación al medioambiente será menor que el área exterior del cuerpo. Por lo tanto, en el cálculo se utiliza un área efectiva de radiación que se expresa en función de los siguientes factores:

$$A_{eff} = f_{eff} \cdot f_{cl} \cdot A \quad (eq. 3)$$

Donde:

f_{eff} : factor de área efectivo, es la relación entre el área de radiación efectiva y el área del cuerpo vestido y se considera igual a 0.71 (Fanger, 1973).

f_{cl} = relación del área superficial del cuerpo vestido y el área del cuerpo desnudo. Eso dependerá del nivel de vestimenta.

A = área exterior del cuerpo, calculada con la expresión de Du Bois.

La expresión de Du Bois, permite el cálculo de la superficie exterior de la piel del cuerpo en función de la altura y el peso de la persona y su expresión aparece en la eq. 4.

$$A = 0.203 (W)^{0.425} (H)^{0.725} \quad (eq. 4)$$

Donde: W = peso [kg]

H = altura [m]

Como ejemplo, para una persona de 50 kg y 1.70 m de altura, $A = 1.57 m^2$ y $1.82 m^2$ para una persona de 75 kg y 1.75 m de altura.

La emitancia ε de la piel humana es aproximadamente igual a 1, para la radiación que usualmente emite el cuerpo humano (infrarrojo lejano). La mayoría de la ropa tiene una $\varepsilon = 0.95$.

El factor f_{cl} puede obtenerse en función de la resistencia térmica de la ropa utilizada a través de la siguiente expresión:

$$F_{cl} = 1.025 + 0.093 \cdot I_{cl} \quad \text{para } I_{cl} \geq 2 \text{ cló} \quad (\text{eq. 5})$$

$$F_{cl} = 1 + 0.15482 (I_{cl})^{0.69334} \quad \text{para } I_{cl} < 2 \text{ cló} \quad (\text{eq. 6})$$

Con los valores indicados podemos calcular la cantidad de energía en la unidad de tiempo que intercambia el cuerpo humano con una determinada superficie. Esto se utilizará para determinar el intercambio de calor con el absorbedor del sistema.

AI.2 Intercambio de calor por convección

Resulta interesante conocer el intercambio de calor por convección hacia o desde el aire que circunda a la persona.

El mismo se puede evaluar como:

$$Co = A \cdot F_{cl} \cdot h_c (t_c - t_a) = \quad (\text{eq. 7})$$

Donde h_c = coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m².C]

T_{cl} = temperatura de la superficie exterior de la vestimenta [C]

T_a = temperatura del aire ambiente [C]

A = área exterior del cuerpo, evaluada por la expresión de Du Bois.