

## ENSAYO DE UN PISO RADIANTE HIDRÓNICO SOLAR

L. Cardon y F. Mendoza  
Laboratorio de Ciencia Computacionales, INENCO  
Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta  
e-mail: cardonluis2008@gmail.com

**RESUMEN:** Se ensayó un piso radiante solar como medio calefactor de una habitación situada en la zona norte de una vivienda familiar. El piso, a su vez, es calefaccionado por agua caliente proveniente de cinco colectores de placa plana dispuestos en el techo. El agua circula por una tubería de polímero empotrada en el piso. El serpentín de tubos calefactores del piso está dispuesto en serie con un segundo que calienta una pared radiante en otra habitación de la vivienda. Se describe la evolución de las temperaturas del piso durante el período de ensayo y en más detalle el comportamiento de la temperatura superficial del piso calefaccionado y la temperatura del aire en la cocina. Se estimaron también la temperatura radiante y la temperatura operativa. Los parámetros evaluados indican que las condiciones de confort alcanzadas son satisfactorias. Para un día típico soleado el piso entrega una potencia de  $30 \text{ W/m}^2$  y una energía diaria  $63.4 \text{ MJ}$ .

**Palabras Clave:** piso radiante, calefacción solar, temperatura radiante, temperatura operativa

### INTRODUCCION

Entre el 30% y el 50% de la energía producida, según el desarrollo de un país, se utiliza en calefacción o refrigeración de los edificios y viviendas. En su mayoría, esta energía se produce todavía a partir de combustibles fósiles. Las alternativas energéticas renovables, como la energía solar, pueden ser empleadas con ventaja para reemplazar el uso de combustibles fósiles en la calefacción de viviendas. Se han demostrado numerosas formas y sistemas de utilización de la energía solar, en sistemas pasivos, activos e híbridos, que permiten obtener niveles de confort adecuados en las viviendas. No obstante, en nuestro país, hasta hace pocos años, la penetración del uso de la energía solar ha sido escasa y lenta, y en nuestra opinión, la investigación orientada a la fabricación artesanal de equipos solares no ha contribuido a su difusión y aplicación masiva.

Entre las alternativas disponibles, el piso radiante, un antiguo sistema de calefacción, es hoy un sistema avanzado, con características tales que resultar energéticamente adecuado aún si se usa combustibles fósiles como fuente de energía. En un trabajo precedente (Hernández y Cardón, 2007) se demostró que para las características climáticas de la ciudad de Salta, es posible reemplazar la fuente de energía convencional con energía solar, reemplazando la caldera a gas por colectores solares. Al menos desde el punto de vista técnico, si bien no todavía del económico, dado que la tecnología de pisos radiantes hidrónicos está bien desarrollada, tiene respaldo de fabricantes de tubos y accesorios a nivel nacional e internacional, y existen empresas que la proveen e instalan. Esta tecnología podría ser un vehículo para introducir la energía solar en la construcción de viviendas y edificios con consumo medio y elevado.

En este trabajo se describe un ensayo realizado sobre un piso y una pared radiante hidrónico solar utilizado para calefaccionar una cocina-comedor y una habitación en una vivienda en la Ciudad de Salta. La descripción de los resultados referente a la pared fue publicada por Mendoza y Cardon (2011). En este trabajo se hace énfasis en el funcionamiento del piso radiante.

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ENSAYADO.

El sistema ensayado está compuesto de un piso radiante, en la cocina, en el norte de la vivienda y una pared radiante (Mendoza y Cardon, 2011) en una habitación orientada al sur. En ambos calefactores, conectados en serie, el agua caliente se distribuyó por tubos de polímero, y fue calentada por un conjunto de cinco colectores solares de tipo placa plana, uno de ellos con doble vidrio, con un total de  $10 \text{ m}^2$  de área de colección, orientados hacia el Norte, inclinados  $45^\circ$  con respecto de la horizontal, Figura 1.a. Los colectores, originalmente de muy buena calidad fueron repintados por accidente por lo que perdieron su pintura selectiva original. La pared radiante, que se ensayó simultáneamente, fue descrita y analizada en Mendoza y Cardon (2011). En este trabajo nos abocaremos al análisis del piso radiante.

La circulación del agua es forzada por una electrobomba centrífuga marca SALMSON Modelo NYL 53 de tres velocidades (Figura 1.b), con un consumo máximo aproximado de  $93 \text{ W}$ . El caudal de agua impulsado se midió con un rotámetro y se mantuvo en  $6.5 \text{ l/min}$  ( $0.108 \text{ kg/s}$ ). El esquema de circulación del agua se muestra en la Figura 2a.

El sistema de calefacción se instaló durante una ampliación de la cocina, ocasión en que se modificó el piso para instalar la tubería del piso radiante con las siguientes características. En todo el contrapiso, a aproximadamente  $4 \text{ cm}$  de profundidad, se instaló un serpentín de caño de polímero reticulado de  $2 \text{ cm}$  de diámetro exterior y  $1.6 \text{ cm}$  de diámetro

interior. El piso afectado por el serpentín tiene una superficie de área aproximada de  $24 \text{ m}^2$  ( $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ). Los caños están colocados de tal manera en el piso que están separados entre sí por una distancia de  $20 \text{ cm}$  aproximadamente. La cocina está ubicada al norte de la vivienda, bien aventanada por una puerta ventana. Aunque no ha sido cuantificada, la ganancia solar directa hace una contribución a la temperatura del piso.

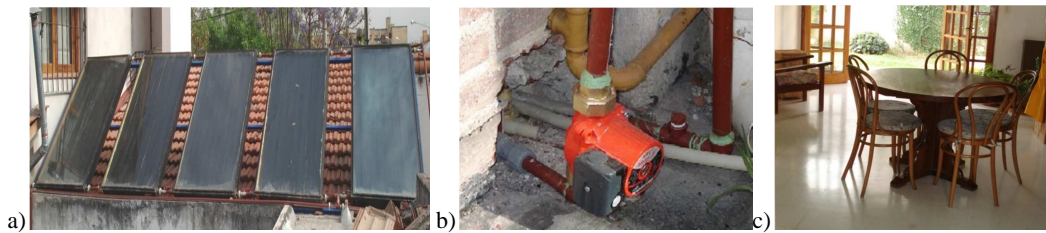


Figura 1: Vista de los colectores, la bomba de circulación y del ambiente calefaccionado.

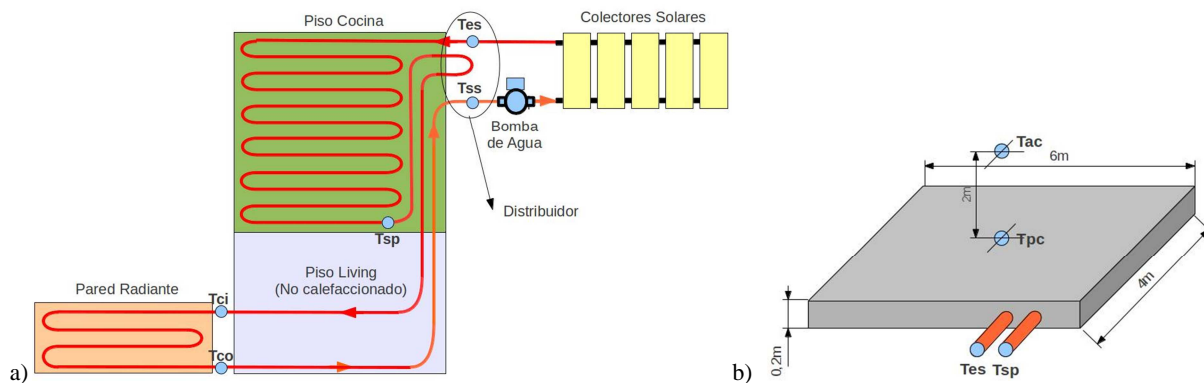


Figura 2: a) Esquema del circuito de circulación de agua. b) Disposición de los nodos de temperatura medidos en el piso radiante.

A los efectos de utilizar el mismo piso como acumulador de calor, a diferencia de los pisos radiantes hidrónicos convencionales, que para posibilitar el rápido control de temperatura requieren aislación térmica por debajo de la tubería, no se instaló aquí aislación inferior. La elección es consistente con la filosofía general de las aplicaciones de la energía solar bioclimática que apuntan a una utilización más natural de los recursos. Otros estudios (Chuangchid y Krarti, 2001) demostraron que la mencionada aislación no afecta el calor entregado hacia el ambiente. No obstante, nuestros estudios han mostrado que de existir podría limitar la capacidad de acumulación del suelo (Cardon y Alberto, 2007).

Para estudiar el comportamiento de piso se midió su temperatura superficial, aproximadamente en el centro de la cocina, y la temperatura del aire circundante a aproximadamente  $2 \text{ m}$  por encima de la locación anterior. Se midió además la temperatura de entrada y salida en la tubería y se midió indirectamente la temperatura de agua en la tubería en otras locaciones.

Se ensayó el sistema continuamente durante 17 días, del 8 al 24 de Septiembre del 2008 y se estudió la evolución de las temperaturas relevantes en todo el período y con más detalles en de un día particular. El ensayo se condujo en las siguientes etapas: a) puesta a prueba del funcionamiento del equipo, durante la cual se utilizó calefacción solar por un día, b) prueba de funcionamiento de referencia, sin calefacción solar durante diez días, c) prueba de funcionamiento con calefacción solar durante seis días. Se midió también la irradiancia solo a los efectos de detectar los días soleados y la hora de salida y puesta del sol.

La colección solar se inició cada mañana aproximadamente a hs 11:00, cuando todos los colectores reciben radiación directa. Se detuvo por la tarde alrededor de las 19:00 hs. El encendido matutino tardío obedece a que uno de los colectores, debido a la sombra proyectada por la construcción circundante, no recibe radiación directa antes de esa hora. El encendido manual, a cargo de los habitantes de la vivienda, no fue siempre sistemático.

La temperatura se midió con termocuplas de tipo T y los datos de se adquirieron con un módulo ADAM 4018. Los sitios de medición de temperatura se dispusieron como se muestra en la Figura 2b, designados como sigue:  $T_{es}$ , temperatura de agua a la entrada del sistema (piso y pared radiante),  $T_s$ , temperatura del agua a la salida del sistema.  $T_{ac}$ , temperatura del aire en el interior de la cocina.  $T_{pc}$ , temperatura superficial del piso de la cocina.  $T_{ae}$ , temperatura del aire ambiente exterior.

Como referencia se obtuvo también la irradiancia solar sobre superficie horizontal medida en el Laboratorio de Radiación de la Universidad Nacional de Salta, con por un Piranómetro KIPP and ZONEN CM3, con una frecuencia de muestreo de 5 minutos (Echazú, 2011). El sitio de la medición de la radiación y el de la experiencia dista menos de un kilómetro uno del otro. La irradiancia se muestra en la Figura 3 para el período comprendido entre el 8 hasta el 24 de septiembre. La figura 4 muestra la evolución de las temperaturas medidas en el mismo período.

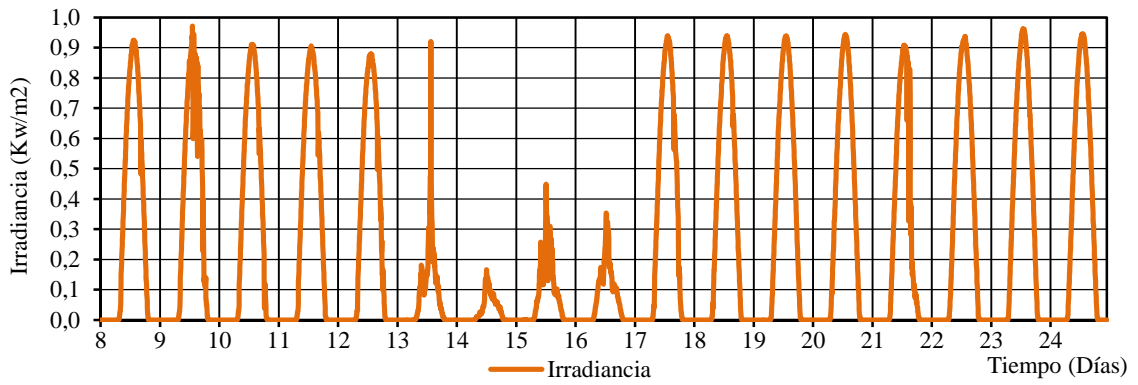


Figura 3: Irradiancia solar sobre un plano horizontal para Salta desde el 08 al 24 de Septiembre.

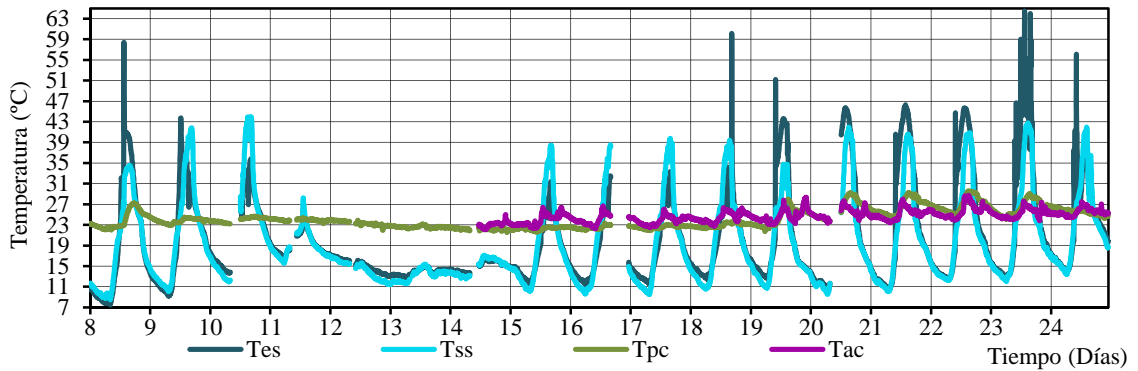


Figura 4: Evolución de las temperaturas en la cocina.

#### EVOLUCION DE LA TEMPERATURA MEDIA DIARIA.

En la figura 5 se muestra la evolución durante el período ensayado de la media diaria de la temperatura superficial del piso,  $T_{pc}$ , de la temperatura ambiente exterior,  $T_{ae}$ , y de la temperatura ambiente interior. A partir del día 17 y hasta el días 22, en que finalizó la etapa de calefacción solar continua, se observa que la temperatura superficial del piso asciende día a día, 4 C en total. Durante el mismo período, la temperatura ambiente media diaria subió 2 C, por lo que la mayor parte de este aumento de temperatura superficial puede atribuirse a la acumulación de calor ocurrida en el piso. Por otro lado, se ha determinado numéricamente (Cardon y Alberto, 2007) que la constante de tiempo para la acumulación de calor en un sistema con similares características, está en el orden de los tres días. Similares conclusiones pueden obtenerse de los comentarios de los habitantes de la vivienda, que observan que el piso se mantiene templado y el ambiente calefaccionado hasta dos días después de que comienza un período nublado.

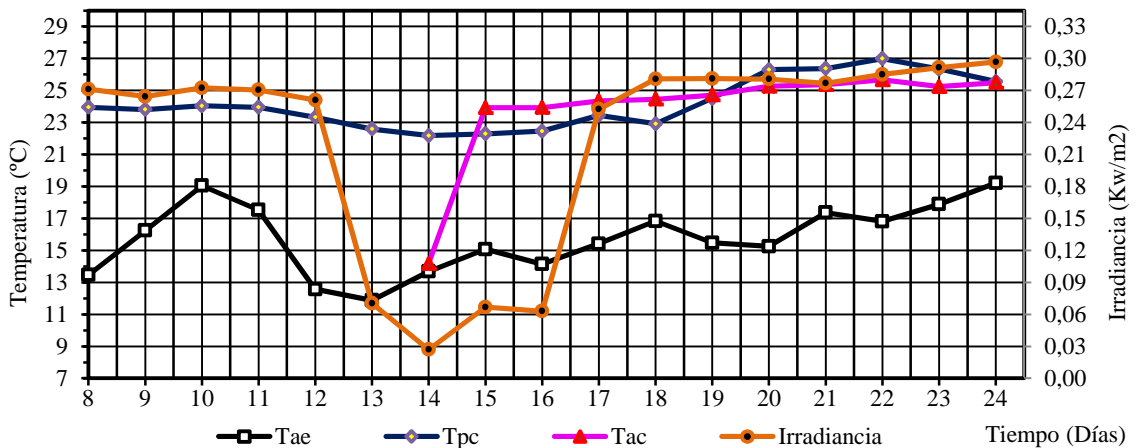


Figura 5: Evolución de la media diaria de la temperatura superficial del piso,  $T_{pc}$ , la temperatura ambiente exterior,  $T_{ae}$ , y la temperatura ambiente interior,  $T_{ac}$ .

## EVOLUCIÓN DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA PARA UN DÍA TÍPICO.

Si bien el propósito de este trabajo es enfocar el análisis en el piso radiante, para interpretar los valores relativos de temperatura registrados para un día típico e inferir a partir de ellos los flujos de calor que tienen lugar, es necesario analizar el sistema como un todo y considerar el piso y la pared radiante, así como también la trayectoria de los tubos de distribución de agua que se muestra en la Figura 2. Luego de un análisis global como el enunciado, analizaremos la evolución de la temperatura superficial del piso radiante y el aporte de calor que el mismo hace a la cocina.

### TEMPERATURA DEL AGUA EN LOS TUBOS.

El calentamiento del sistema en su fase inicial es fácil de interpretar (Figura 6). Desde las 10 de la mañana hasta las 13:15, el sistema que se encuentra en su estado más frío, comienza a calentarse. Sus distintas partes, el piso y la pared, lo hacen en el orden que establece la circulación del agua. Primero se calienta el piso y después la pared. Consecuentemente, el agua se enfría también en la dirección de la circulación y las temperaturas alcanzadas en los distintos puntos de control, para cualquier instante entre las 10 y las 13:15, se ordenan en valores monótonamente decrecientes a medida que nos acercamos a la salida del sistema ( $T_{es} > T_{ci} > T_{co} > T_{ss}$ ). Considerando solo la evolución de las temperaturas de entrada del agua al piso,  $T_{es}$ , y la temperatura de salida del mismo, que debe ser algo mayor que la temperatura de entrada a la pared,  $T_{ci}$ , la primera siempre mayor que la segunda, ( $T_{es} > T_{ci}$ ), el panorama es sencillo de interpretar e indica que durante todo el período de funcionamiento de la bomba, el agua transfiere calor al piso.

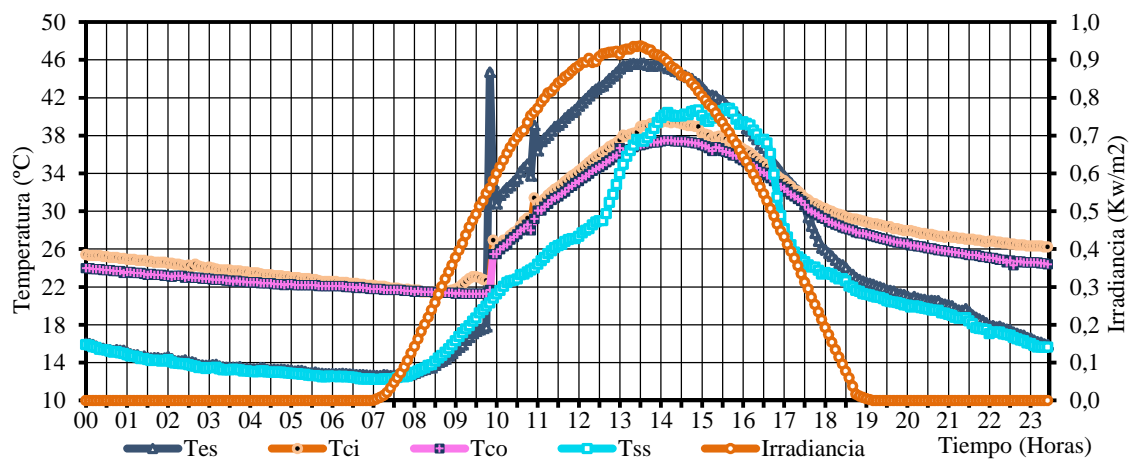


Figura 6: Evolución de la irradiación para el día 22 y de las temperaturas del agua en los tubos a la entrada y salida del sistema ( $T_{es}$  y  $T_{ss}$ ) y a la entrada y salida de la pared radiante,  $T_{ci}$  y  $T_{co}$ .  $T_{ci}$  puede interpretarse como una aproximación a la temperatura del agua a la salida del piso radiante.

Es interesante notar aquí, lo que se explica en términos de inercia, que la temperatura de salida del piso radiante, que como se dijo tomaremos como  $T_{ci}$ , alcanza su valor máximo una hora después que hace lo propio la temperatura de entrada,  $T_{es}$ . En cambio, la temperatura de salida del sistema,  $T_{ss}$ , alcanza su valor máximo dos horas después, valor que coincide con la temperatura del agua a la entrada del sistema a esa hora y notablemente, es mayor que las demás temperaturas del sistema, hecho que requiere un análisis más detallado.

En efecto, luego del mediodía y mientras dura el aporte solar, hasta las 17, la evolución relativa de las temperaturas es más compleja y en ella se imprime el efecto de otras partes menores o accesorias del sistema: el tendido de los tubos calefactores, que como se muestra en la Figura 2, hacen un lazo todo por debajo del piso de la cocina (un retorno al nudo de distribución) luego de salir del piso y antes de entrar a la pared. La razón de ser de este lazo obedeció a la necesidad de posibilitar distintas configuraciones de ensayo. Teniendo en cuenta la aparente anomalía notada en el párrafo precedente, ( $T_{es}=T_{ss}$  a horas 15:30), en el período pos-mediodía se distinguen dos etapas, de 13:15 a 15:30 y de 15:30 hasta el apagado del sistema.

El primer período dura hasta que la temperatura de salida,  $T_{ss}$ , alcanza un máximo, que coincide con la temperatura del agua a la entrada, a las 15:30. La temperatura del agua de salida,  $T_{ss}$ , es mayor aún que la temperatura de entrada de la pared radiante,  $T_{ci}$ . Esta última es la única referencia que disponemos para estimar el nivel de temperatura del agua a la salida del piso radiante,  $T_{sp}$ , que no ha sido medida. Estas dos temperaturas,  $T_{sp}$  y  $T_{ci}$ , no son iguales, debiendo ser la primera algo, pero no mucho, mayor que la segunda. Esta suposición se basa en la longitud relativamente pequeña del tubo y en que el lazo que describe pasa por el mismo piso radiante ya caliente.

La temperatura del agua de salida,  $T_{ss}$ , es mayor también que,  $T_{co}$ , la temperatura a la salida de la pared y la mínima temperatura del sistema, y esto indica, que la temperatura del piso radiante a la profundidad de los tubos es todavía suficientemente elevada como para recalentar el agua de retorno a los colectores, ya fría luego de pasar por la pared.

Después de las 15:30, hasta la hora y media siguiente, hora en que se interrumpe el calentamiento solar, la temperatura del agua a la salida,  $T_{ss}$ , es apenas superior su temperatura de entrada,  $T_{es}$ . Esto indica que la temperatura alcanzada en el interior del piso, debido al calentamiento precedente, es todavía alta, suficientemente como para recalentar el fluido ya frío

proveniente de la pared radiante, en su camino de salida, y que finalmente alcanza temperaturas mayores que las que puede producir el colector, que por la hora opera ya con irradiación disminuida.

El análisis precedente permite distinguir tres etapas en el funcionamiento del sistema. La primera, por la mañana, el aporte solar y los sistemas en frío, permite asegurar que toda la potencia colectada contribuye al calentamiento de todas las partes del sistema. En la segunda, después de mediodía, el sistema solar todavía aporta calor al sistema que se sigue calentando a un ritmo menor hasta alcanzar valores máximos de temperatura para luego descender suavemente. Durante este período puede decirse que el sistema en su conjunto (dominado por el piso radiante, más protegido y con mayor inercia) sigue calentándose hasta alcanzar una temperatura máxima a su final, mientras que la pared comienza su descenso de temperaturas. En el tercer período las temperaturas de entrada y salida se acompañan en su descenso, con un pequeño balance negativo en el flujo de calor. En este período puede suponerse que existe transferencia de calor del piso a la pared y un recalentamiento en el piso del agua que finalmente sale del sistema.

## EVOLUCIÓN DE LOS PARAMETROS AMBIENTALES PARA UN DÍA TÍPICO.

Se ha analizado en más detalle la evolución de los parámetros térmicos importantes para un día típico (22 de setiembre) dentro del período de ensayo con calefacción solar. Los principales resultados para cada uno de los parámetros considerados se discuten a continuación.

### TEMPERATURA DEL AIRE EN EL LOCAL CALEFACCIONADO

La temperatura del aire en la cocina permanece durante todo el día por arriba de los 24 C, valor mínimo que se alcanza apenas antes de que comience el ciclo diario de calefacción solar. Tiene un valor máximo de aproximadamente 28 a las 13:30 hrs y permanece por arriba de 26 C hasta las 24:00. La figura 8 muestra que los valores medios diarios de esta temperatura, han subido desde los 24 C a los 25,5 C en el período de ensayo continuo.

### TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL PISO RADIANTE.

El análisis de la temperatura superficial del piso radiante,  $T_{pc}$ , y de la temperatura ambiente en la cocina,  $T_{ac}$ , permite estudiar el comportamiento del piso radiante hidrónico solar como elemento calefactor. Su evolución se muestra en la Figura 7 para el día 22.

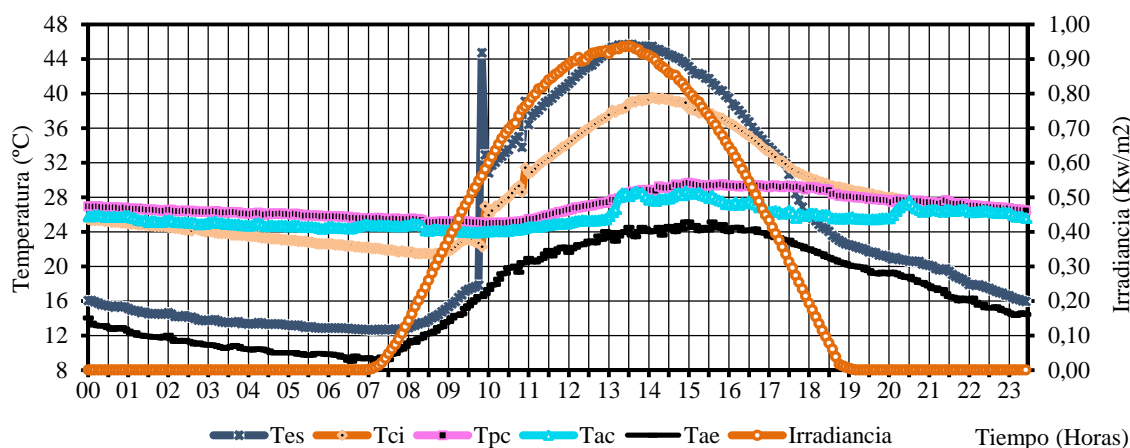


Figura 7. Evolución de la irradiancia para el día 22 y de la temperatura del agua a la entrada y salida del piso radiante ( $T_{es}$  y  $T_{ci}$ ), de la temperatura superficial del piso,  $T_{pc}$ , y de la temperatura del aire interior y exterior ( $T_{ac}$  y  $T_{ae}$ ).

La temperatura superficial del piso,  $T_{pc}$ , se mantiene confortable al tacto durante todo el día, con un valor mínimo de 24,9 C a la mañana, a las 9:45, en coincidencia con la puesta en funcionamiento del ciclo activo diario de calefacción solar. Nótese que los pisos pétreos como el del presente caso, se sienten templados al tacto cuando su temperatura se encuentra entre 25 y 30 C. Durante las siguientes cinco horas, hasta las 15:00, el piso sigue calentándose hasta alcanzar la temperatura superficial máxima de 29,6 C. La temperatura media diaria es de 27 C.

La Figura 8 muestra la diferencia de temperatura superficial del piso y el aire ambiente interior ( $T_{pc}-T_{ac}$ ). Esta diferencia es durante todo el día positiva, salvo durante media hora, de 13:15 a 13:45, intervalo en donde se manifiesta mayor actividad de los usuarios en la cocina y en el cual cabe la posibilidad de que se haya abierto la puerta ventana como control manual de la temperatura.

### POTENCIALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

La Figura 8 muestra la diferencia de temperatura entre el ambiente en la cocina y la superficie del piso ( $T_{ac}$  y  $T_{pc}$ ), relacionada con el flujo de calor aportado por el piso y la diferencia de temperaturas entre el interior el exterior ( $T_{ac}$  y  $T_{ae}$ ) relacionada a la pérdida de calor, principalmente por la ventana. Para evaluar el flujo de calor solo debe multiplicarse por el coeficiente adecuado de transferencia de calor.

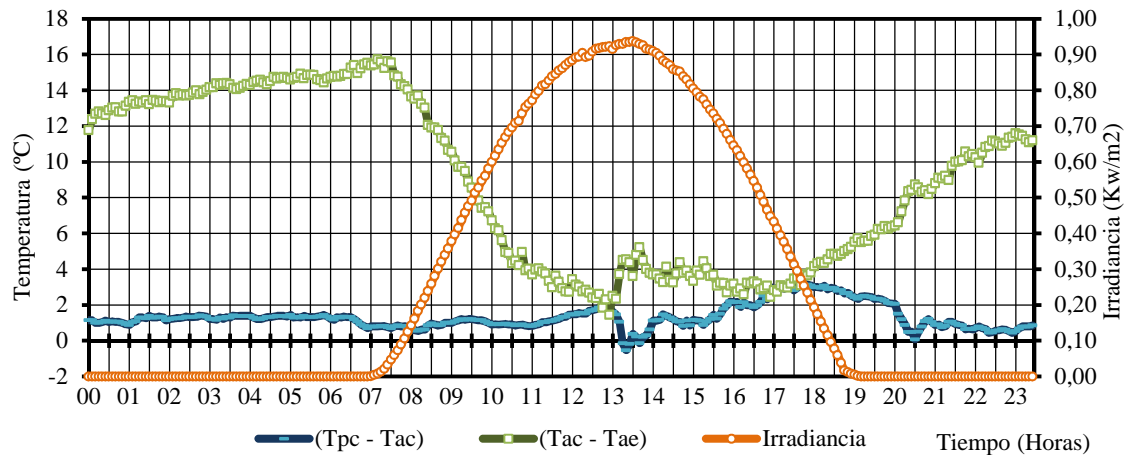


Figura 8: Evolución de la diferencia entre la temperatura superficial del piso,  $T_{pc}$ , y la temperatura del aire,  $T_{ac}$ , y la diferencia entre la temperatura del aire,  $T_{ac}$ , y la temperatura del aire exterior,  $T_{ae}$ , Día 22.

### ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES AMBIENTALES.

La descripción cuantitativa de las condiciones ambientales logradas, desde el punto de vista del confort, se hace mediante índices ambientales, entre ellos, la temperatura efectiva, que tienen en cuenta (y requieren para su evaluación) la velocidad del aire, la humedad relativa y la temperatura operativa, datos que no disponemos medidos. Para el período del ensayo el clima de la Ciudad de Salta es seco, con una humedad absoluta (media mensual) de aproximadamente  $0.007 \text{ kg/kg}$  que permanece constante durante todo el día.

En el caso de calefacción radiante, la calificación y cuantificación de las condiciones medioambientales que inciden en el confort requiere tener en cuenta otros aspectos además de la temperatura del aire. El aporte de calor radiativo, permite a la persona percibir el ambiente confortable con temperaturas más bajas que lo que ocurriría en su ausencia. Ello tiene ventajas no solo desde el punto energético sino también desde el punto de vista de la calidad del aire, que se percibe más agradable y sano a temperaturas más bajas.

Entre los índices ambientales se utiliza la temperatura operativa. Con los datos disponibles en la presente experiencia sólo es posible estimarla, basados en los siguientes supuestos: pequeña velocidad de aire y temperaturas superficiales acotadas por las temperaturas mínimas del aire interior y exterior. Bajo estas condiciones, de acuerdo a Olesen (2002) la temperatura operativa se puede considerar como el promedio aritmético entre la temperatura del aire y la temperatura media radiante. Esta última a su vez puede calcularse a partir de las temperaturas de las superficies y los factores de forma entre ellas y la persona. Los factores de forma se calculan a partir de las correlaciones conocidas (Kuehn et al, 1998, ASHRAE, 1989) para personas sentadas o de pie. Se calcularon aquí para una persona parada (2 m) en el centro de la habitación, (distancia a las paredes de 2 y 3 m). Para calcular la temperatura media radiante se consideraron: el piso, a la temperatura superficial medida,  $T_{pc}$ , la temperatura estimada de la ventana,  $T_w$ , y las temperaturas de las demás paredes (este, oeste, sur) y del techo, ( $T_{pe}$ ,  $T_{ps}$ ,  $T_t$ ) todas a la misma temperatura,  $T_p$ , estimada (o acotada) por el valor de temperatura mínimo en el recinto, la temperatura del aire,  $T_{ac}$ .

$$T_w = \frac{T_{ac} + T_{ae}}{2} \quad (1)$$

$$T_r = \sqrt[4]{T_p^4 \cdot (F_{po} + F_{pe} + F_{ps} + F_t) + F_p \cdot T_{pc}^4 + F_w \cdot T_w^4} \quad (2)$$

$$T_{op} = \frac{T_r + T_{ac}}{2} \quad (3)$$

Donde  $T_w$  es la temperatura de la ventana;  $T_p$  es la temperatura de las paredes;  $T_r$  es la temperatura media radiante; y  $T_{op}$  es la temperatura operativa, y los factores angulares calculados que fueron:  $F_{po} = 0,115$ ,  $F_{pe} = 0,115$ ,  $F_{ps} = 0,05$ ,  $F_t = 0,483$ ,  $F_p = 0,18$ ,  $F_w = 0,05$ .

Para estimar la temperatura de la ventana se tomó el valor medio entre la temperatura del aire interior y exterior,  $T_w = (T_{ac} + T_{ae})/2$ .

La temperatura media radiante y la temperatura operativa obtenida bajo estas suposiciones se muestran en la figura 9, con valores comprendidos entre  $23.5$  y  $28.2 \text{ C}$  y  $24$  y  $28 \text{ C}$  respectivamente. Durante la noche se observa la influencia de la

menor temperatura de la ventana en la temperatura media radiante, no obstante se obtiene una temperatura operativa por arriba de la temperatura del aire.

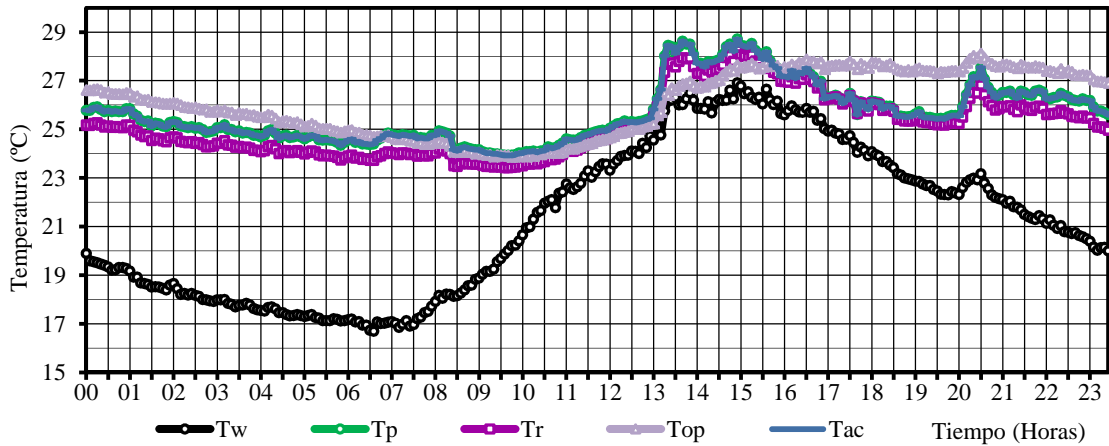


Figura 9: Temperatura de la ventana,  $T_w$ , de las paredes,  $T_p$ , operativa,  $T_{op}$ , radiante,  $T_r$ , y ambiente,  $T_{ac}$ .

### POTENCIA DIARIA DE CALEFACCIÓN.

El flujo de calor cedido por los serpentines al piso y a la pared se obtuvo considerando el cambio en la entalpía del fluido caloportador. El fluido, con un caudal  $\dot{m}$ , ingresa a los serpentines a una temperatura  $T_{ent}$  y sale de ellos con una temperatura  $T_{sal}$ . El balance de energía correspondiente es:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_{ent} - T_{sal}) \quad (4)$$

donde  $Q$  es la potencia (W),  $m'$  es el flujo másico, y  $C_p$  es el calor específico del agua (4184 J/Kg.C),  $T_{ent}$  la temperatura del fluido a la entrada de la tubería (C),  $T_{sal}$  es la temperatura del fluido a la salida de la tubería (C).

Los valores de potencia obtenidos calorimétricamente solo tienen validez cuando la electrobomba está encendida, dato que se obtiene por observación del pico de temperatura en el arranque. La determinación de la detención de la bomba es menos precisa.

La Figura 10 muestra la evolución de la potencia entregada al sistema ( $Q_t = \dot{m}C_p(T_{es} - T_{ss})$ ) y al piso ( $Q_p = \dot{m}C_p(T_{es} - T_{ci})$ ). Se puede apreciar un pico pronunciado para  $Q_t$  alrededor de las hs 10. Cerca del mediodía solar (aprox. 12:30 hs) se presenta un máximo de potencia aproximadamente de 6.4 KW para  $Q_t$ , mientras que la potencia entregada a la pared,  $Q_p$ , recién se tiene un máximo de 3.3 KW a las 13:30 hs. El máximo de  $Q_p$  aparece 1 hora más tarde que la correspondiente a la potencia entregada al sistema,  $Q_t$ .

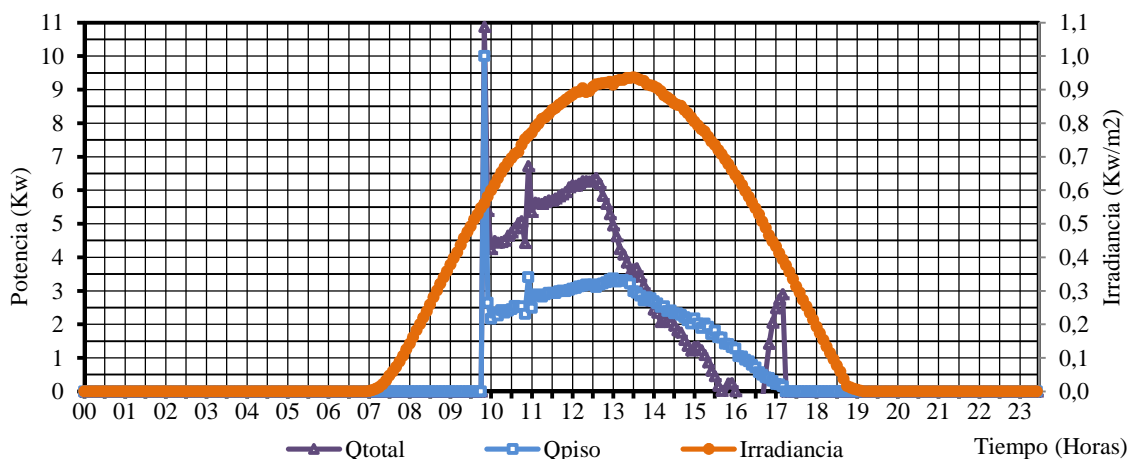


Figura 10: Evolución de la potencia transmitida hacia el piso-pared radiante ( $Q_t$ ), y hacia la pared radiante ( $Q_p$ ).

La energía diaria aportada se calcula con:

$$E = \int_0^t Q dt = \sum_{i=0}^N Q_i \Delta t \quad (5)$$

donde,  $E$  es energía entregada (J) ,  $Q_i$ : potencia entregada en el intervalo  $i$ , (W) ,  $\Delta t_i$ : intervalo de tiempo , (seg),  
N: número de medidas tomadas en el día completo.

De los datos medidos resulta que para el día 22 de setiembre, la energía entregada a la pared y al piso radiante es  $E_{total}=90.3MJ$ , y la entregada sólo a la pared es  $E_{piso}=63.4MJ$ .

Otro parámetro relevante para el usuario, desde el punto de vista energético, es la potencia media entregada al piso. Obteniéndose, para el día 22 de setiembre, una potencia media diaria de  $\bar{Q}_{total}=1044.8W$ , con un valor por metro de área superficial de  $30.6 W/m^2$ . La potencia entregada a la pared radiante fue de  $\bar{Q}_{pared} = 733.7W$ . La potencia total entregada al sistema fue de 1770 W, es decir 177 W por metro cuadrado de área de colector solar.

## CONCLUSIONES

Se ha estudiado un piso radiante hidrónico solar usado como elemento calefactor en una cocina-comedor en una vivienda de la ciudad de Salta. La vivienda permaneció habitada durante el ensayo y aunque varios de los parámetros del ensayo han estado fuera de nuestro control y capacidad de medición, los resultados representan situaciones reales que se encontrarán con frecuencia en situaciones similares. Se ha interpretado la evolución de las temperaturas de manera de identificar las causas de su variabilidad. Algunas de las conclusiones más importantes se resumen a continuación:

- 1) La percepción de los habitantes de la vivienda caracteriza las condiciones ambientales logradas en los períodos soleados como sumamente confortables. Caracterizan la temperatura del piso como agradable y la calidad del aire muy buena, resolviendo satisfactoriamente los períodos de calentamiento excesivo a mediodía mediante la apertura de la puerta ventana.
- 2) La evaluación cuantitativa de los parámetros ambientales que hacen al confort se hizo a través de la medición de la temperatura superficial del piso, la temperatura operativa, la temperatura radiante y la temperatura ambiente para un día típico.
- 3) La temperatura superficial del piso se elevó a razón de 1 C por día, subiendo 4 C en total. El valor máximo para un día típico fue de 29.6 C y un mínimo de 24.9 C ambos considerados como confortables al tacto.
- 4) La temperatura ambiente para un día típico permanece siempre en valores confortables, por arriba de los 24 C. A las 13.30 se alcanzan valores más elevados de temperatura consecuencia del uso del local.
- 5) La temperatura operativa se mantiene entre 24 C y 28 C durante todo el día y con valores mayores que la temperatura del aire durante la noche y las horas de poca insolación.
- 6) La potencia media aportada por el piso es de  $30 W/m^2$  y la energía diaria introducida en la cocina en un día típico es de 63.4 MJ.

## REFERENCIAS

- 2009 ASHRAE Handbook (2009). Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Cardón, L., y Alberto, D. (2007). Efecto de la aislación inferior y lateral de un piso radiante. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 8205 - 8212.
- Chuangchid, P., y Krarti, M. (2001). Foundation Heat Loss from Heated Concrete Slab-on-Grade Floors. *Building and Environment* , 36 (5), 637 – 655.
- Echazu, R. (2011) Comunicación personal.
- Hernández, A., y Cardon, L. (2007). Evaluación térmico energética de un piso radiante hidrónico acoplado a colectores solares para calentamiento de agua. *Energías Renovables y Medio Ambiente* , 20, 51 - 59.
- Mendoza, F y Cardon L. (2011). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*,
- Olesen B. W. (2002) Radiant floor Heating in theory and practice. ASHRAE Journal. July. ASHRAE,1989)
- Kuehn T.H, Ramsey J.W. and J.L. Threlkeld. (1998) Thermal Environmental Engineering. 3erd. Ed. Prentice Hall.

**ABSTRACT:** A hydronic solar radiant floor was built and tested as the heating element for a kitchen located on the north side of a family home. The floor is heated by hot water flowing through an embedded polymer piping. The heating coil tubes are arranged in series with another one that heats a radiant wall in another room of the house. The water is heated in a set of five solar collectors resting on the roof. This paper describes the evolution of temperatures on the floor during the testing time. The superficial temperature of the floor and the air temperature in the kitchen are analyzed in detail for a typical heating day. Radiant temperature, operative temperature were also estimated. The parameters evaluated show that satisfactory comfort conditions are reached. For a sunny day, the floor delivers  $30 W/m^2$  power and 63.4 MJ of daily energy.

**Keyword:** hydronic solar, radiant floor, radiant wall, radiant temperature, operative temperature.