

## EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS MIXTOS DE ENFRIAMIENTO DE EDIFICIOS<sup>1</sup>

Gea M., Salazar G. y Quintana J.

Universidad Nacional de Salta, Instituto de Energías No Convencionales (INENCO)  
Av. Bolivia 5150, CP 4400, Salta. Email: geam@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta un análisis del acoplamiento de técnicas de refrescamiento eficientes y de bajo costo con sistemas de aire acondicionado. Se estudió un edificio experimental que se encuentra ubicado en una región cuyo clima se caracteriza por una gran amplitud térmica diaria. Se encontró un modelo térmico mediante el ajuste de los resultados de una simulación computacional con datos medidos. Se determinó experimentalmente la dependencia del coeficiente convectivo con las renovaciones de aire producidas por la ventilación forzada. Se simularon sistemas de enfriamiento en un edificio en el que es necesario el uso de aire acondicionado y altas renovaciones de aire como ocurre en los criaderos de chinchillas. Se analizó sobre el modelo la contribución de la ventilación nocturna y de los tubos enterrados para la reducción de la energía de enfriamiento provista por el aire acondicionado para distintas temperaturas de termostato .

**Palabras clave:** enfriamiento de edificios, sistemas de modo mixto

### INTRODUCCION

Los criaderos de chinchillas de la ciudad de Salta en general realizan un gasto elevado de energía eléctrica para refrescar los ambientes durante los días cálidos de verano por el uso de equipos de aire acondicionado. Dadas las características del clima de la región, con importantes saltos térmicos diarios, una mínima media de 17 C para el mes más cálido y una temperatura media anual de 16.7 C, resulta racional el uso de la ventilación nocturna (Lesino y otros, 1986) y de los tubos enterrados como técnicas de refrescamiento.

Pero en días de alta radiación solar y altas temperaturas exteriores, los métodos pasivos pueden no llegar a generar las condiciones mínimas de confort y el aire acondicionado aparece como única solución. Sin embargo los métodos pasivos o híbridos pueden ser utilizados de manera combinada para reducir los requerimientos diarios de energía para el enfriamiento en aquellos días que el aire acondicionado es necesario.

El acoplamiento entre métodos pasivos y activos llamados tradicionalmente sistemas de enfriamiento mixtos fueron sugeridos por distintos autores según Blondeau, 1997. Se considera particularmente apropiada la combinación entre ventilación nocturna o tubos enterrados y aire acondicionado en ambientes con alto número de renovaciones de aire como es el caso de los criaderos.

Se realizó en este trabajo una evaluación de la incidencia de los distintos parámetros que participan en el refrescamiento de un edificio mediante ventilación nocturna y tubos enterrados. Se partió de un estudio experimental y se extendieron los resultados a través de un conjunto de simulaciones a fin de predecir el comportamiento térmico del edificio estudiado ante distintas configuraciones de los sistemas de enfriamiento. Con los resultados de las simulaciones se calculó la contribución de estos sistemas en la reducción de la energía térmica de aire acondicionado cuando funcionan acoplados.

#### *Ventilación nocturna*

Cuando un edificio es ventilado durante la noche su masa estructural es enfriada por convección desde su interior “puenteando” la resistencia térmica de su envolvente. Los parámetros relacionados con la ventilación nocturna se pueden clasificar en tres grupos: los parámetros climáticos, los parámetros del edificio y los parámetros técnicos del método.

Con respecto al primer grupo, se puede considerar a la amplitud térmica diaria como el índice del potencial climático. Para valores apropiados de este índice se procura “acumular” el enfriamiento producido por el aire nocturno en la masa estructural del edificio. El flujo de aire externo puede ser inducido naturalmente al interior del edificio o mediante ventiladores. Durante el día la masa enfriada mantiene la temperatura del ambiente interior por debajo de la temperatura exterior. Esta reducción de temperatura sólo puede ser conseguida cuando el edificio está aislado térmicamente y no es ventilado con aire caliente durante las horas del día.

En cuanto a las características del edificio requeridas para una eficiente ventilación nocturna es indispensable una inercia térmica mínima provista por la masa del edificio o por una masa externa. Debe tenerse en cuenta el concepto de *capacidad calorífica diurna* que está definida como la energía térmica acumulada en una masa que es devuelta al aire del ambiente interior por unidad de superficie por grado de temperatura. Según este concepto, la efectividad de la acumulación es

<sup>1</sup> Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

proporcional a la velocidad con que el calor es absorbido o extraído del aire interior y depende del área expuesta de los elementos de acumulación y de la conductividad térmica del material y, en general, no todo el espesor de la masa térmica es útil en la acumulación de energía durante un ciclo diario.

Los parámetros técnicos que definen la eficiencia de la ventilación nocturna inherentes al método están relacionados con la distribución del flujo de aire en el edificio y a la potencia del ventilador cuando la ventilación es forzada.

#### *Utilización del suelo como fuente fría.*

A partir de una cierta profundidad, que dependerá de las características del terreno, la temperatura de éste permanece prácticamente invariable con el tiempo. Esto es debido a que el calentamiento y enfriamiento del suelo provocado por las condiciones ambientales variables son amortiguados por la masa del terreno, no viéndose éste afectado por las variaciones diurnas de temperatura.

La temperatura de equilibrio que tiene el terreno a partir de esa profundidad es muy próxima a la temperatura media del terreno a lo largo del tiempo, y por lo tanto puede ser fácilmente estimada como aproximadamente igual a la temperatura ambiente media anual de la región que se trate.

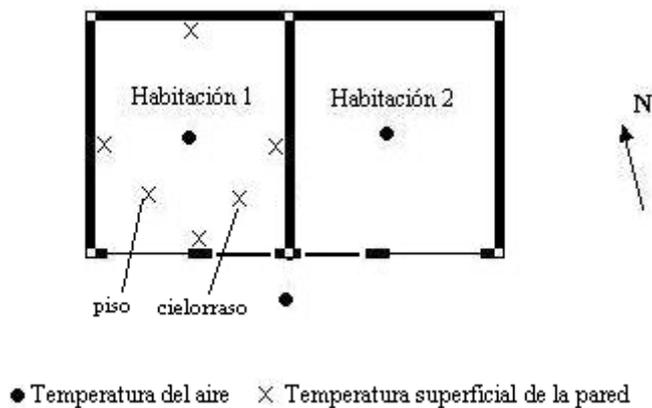
En particular, en Salta la temperatura del terreno se estabiliza con la profundidad a un valor próximo 16 C y a un metro de profundidad oscila levemente durante el día alrededor de 17 C en el lugar donde está ubicado el edificio (Hernández, 2001). Esta temperatura, sensiblemente inferior a la temperatura ambiente de un día caluroso de verano, induce a utilizar el terreno como fuente fría movilizándolo el aire a través de conductos enterrados.

Se han realizado simulaciones en base a una modelización teórica del comportamiento de tubos enterrados. Se han analizado los parámetros que influyen en el rendimiento del enfriamiento del aire a fin de encontrar una optimización.

Se encontró que el terreno debe ser lo más conductivo posible para maximizar la efectividad de la evacuación de calor del aire. Mientras menor es el diámetro del tubo, mayor es la transferencia de calor pero se necesitan más tubos para un determinado caudal de aire. Lo mismo ocurre para velocidades bajas del aire en el interior del tubo. La longitud de los tubos puede ser un parámetro de ajuste para conseguir el nivel térmico deseado, siempre que se cuente con lugar disponible para alargar los tubos lo que sea necesario.

### **MEDICIÓN Y MODELIZACIÓN TÉRMICA DE UN EDIFICIO**

El edificio prototipo se encuentra en el campo experimental del INENCO. Sus paredes están constituidas por paneles premoldeados de granulado volcánico aglutinado con cemento y rellenos con poliestireno expandido. El contrapiso es de cemento y se encuentra aislado térmicamente del suelo. El techo es de chapa galvanizada y el cielorraso es de metal desplegado salpicado con cemento y está aislado con poliestireno expandido. Consta de dos habitaciones contiguas de 3,7 m x 3 m de base (figura 1).



*Figura 1: Planta del edificio experimental y ubicación de los puntos de medida de temperatura*

Se tomaron medidas de temperaturas durante varios días en distintos puntos del edificio (figura 1) con termocuplas conectadas a un sistema de adquisición de datos de conexión seriada. El intervalo entre ciclos de medidas fue de 5 minutos y el error fue de 0,4 grados calculado en la calibración. También se tomaron las medidas de radiación solar y viento durante ese período. La figura 2 muestra la evolución de las temperaturas (promediadas cada media hora) del aire del interior de las habitaciones.

A fin de contar con un modelo en el cual sea posible reproducir distintas condiciones ambientales y distintas configuraciones de los sistemas de refrescamiento se realizaron simulaciones con el programa SIMUSOL. Las propiedades térmicas de los

materiales del edificio de tomaron de un estudio anterior (Hernández, 2001). Las aberturas de la habitación 1 permanecieron cerradas durante toda la experiencia y la puerta de la habitación 1 sólo se abrió para controlar los equipos de toma de datos que estaban allí ubicados. Se tomó una tasa de renovaciones horarias del aire por infiltraciones igual a 1 de acuerdo a estudios previos sobre el mismo edificio (Gea y Lesino, 1993). Se tomaron los valores de temperatura ambiente y radiación medidos con anterioridad al período de ensayo del edificio como condiciones de borde de la simulación. Se obtuvo un muy buen ajuste entre los valores teóricos y experimentales, con diferencias del orden de los errores de medición (figura 2).

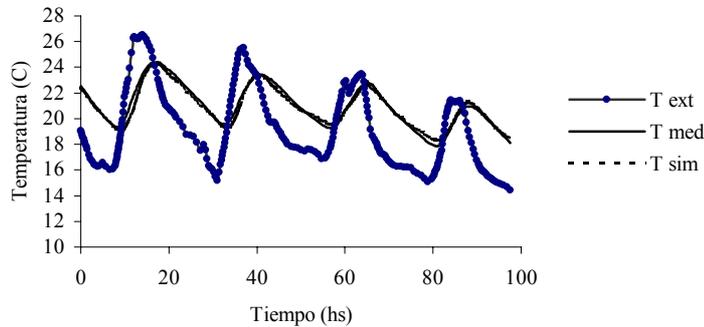


Figura 2: Temperaturas del aire en la habitación 1, medidas y simuladas

### El coeficiente convectivo en ambientes ventilados

Para que el modelo que simula el comportamiento del edificio pueda usarse en sistemas de refrescamiento con ventilación forzada fue necesario determinar el coeficiente convectivo de la habitación.

Hay estudios que demuestran la fuerte dependencia del efecto de la reducción de la carga térmica mediante ventilación nocturna con el valor del coeficiente convectivo y plantean la necesidad de crear métodos para determinarlo experimentalmente (Chandra, 1989). Atento a ello se realizó un estudio experimental a fin de encontrar la relación entre el coeficiente convectivo y el número de renovaciones de aire. En la parte alta de una pared exterior de la habitación 1 se instaló un ventilador que extrae el aire más caliente mientras por una rendija baja ubicada en la pared opuesta ingresa el aire más fresco. A partir de las medidas de temperatura y de flujo de aire se calculó el calor evacuado del edificio por el aire impulsado por el extractor. Se midieron además las temperaturas de las superficies de las paredes, piso y cielorraso y se calculó un promedio ponderando las áreas de cada elemento. En la figura 3 se esquematiza el ensayo.

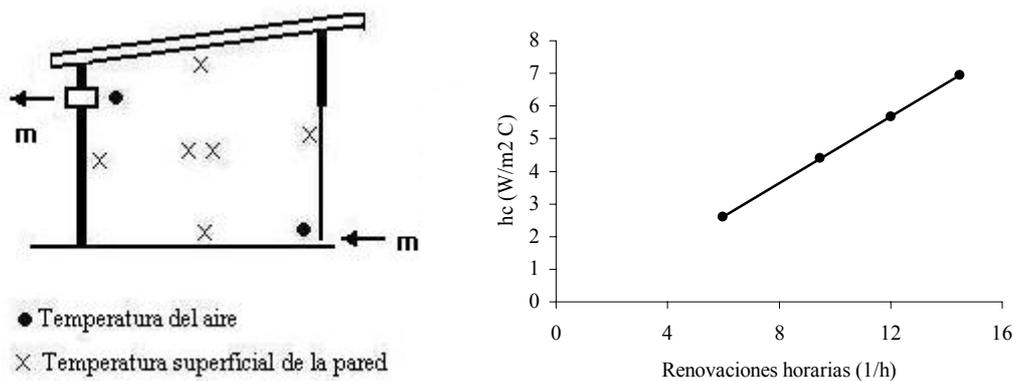


Figura 3: Esquema del ensayo para la determinación de y gráfica de  $h_c$  vs renovaciones horarias de aire

Se plantea el balance de calor en el volumen cerrado formado por la habitación que es atravesado por un flujo de aire. Se toman intervalos cortos de tiempos durante los cuales se comprueba que el estado del sistema es estacionario. Se obtiene:

$$h_c = m C_p (T_s - T_d) / (A (T_m - T_d))$$

- $h_c$  = Coeficiente convectivo global (W / m<sup>2</sup> C)
- $m$  = Flujo másico de aire (kg / s)
- $C_p$  = Calor específico del aire (J / kg C)
- $A$  = Área total de paredes, piso y cielorraso (m<sup>2</sup>)

$T_s$  = Temperatura del aire a la salida (C)  
 $T_e$  = Temperatura del aire a la entrada (C)  
 $T_m$  = Temperatura superficial media ponderada (C)

Variando las condiciones de los ensayos al cambiar los valores del flujo de aire se obtiene una relación lineal entre las renovaciones horarias y el coeficiente convectivo  $h_c$ . Esta relación se puede observar en el gráfico de la figura 3.

## EVALUACIÓN ENERGÉTICA

Una vez ajustado con los datos experimentales, el modelo del edificio fue utilizado para recrear otras condiciones en las variables externas, como la temperatura exterior y la radiación, y otras características propias del edificio y su sistema de enfriamiento, como el nivel de renovaciones de aire, el coeficiente  $h_c$ , la temperatura de la fuente fría, la incorporación de inercia térmica, etc. El soft utilizado para la simulación utiliza la equivalencia eléctrica de los procesos térmicos y permite actuar sobre los circuitos y obtener los resultados interactivamente. La temperatura exterior es equivalente a una fuente de tensión y la radiación solar es equivalente a una fuente de corriente. Los valores de ambas se incorporan mediante una tabla. Para la evaluación de la energía utilizada para el refrescamiento se utilizaron datos climáticos existentes correspondientes a días cálidos de verano. Con el objetivo de evaluar la contribución de la energía térmica de enfriamiento, provista por la ventilación nocturna y por los tubos enterrados en edificios con aire acondicionado, se acoplaron en el modelo módulos que simulan dichos sistemas.

Para la ventilación nocturna se conectó una fuente térmica de flujo másico (fuente de corriente) entre el nodo correspondiente a la temperatura exterior y la temperatura interior. Para sus valores se generó una tabla del flujo en función del tiempo que “arranca” el ventilador con un valor de flujo másico equivalente a 10 renovaciones horarias cuando el valor de la temperatura exterior es 1 grado menor que la temperatura interior.

Para los tubos enterrados se generó otro circuito equivalente, teniendo en cuenta la inercia térmica del suelo, su conductividad y tomando un tubo de 20 m de largo y 0,12 m de radio y un flujo de aire equivalente a 5 renovaciones horarias circulando durante todo el día. Se conectó el nodo de la temperatura exterior con el circuito que representa al tubo y luego con el nodo de la temperatura interior.

Para destacar la influencia de la masa térmica del edificio en la eficiencia de estos sistemas para el aprovechamiento de la amplitud térmica diaria se reemplazó en el modelo la capa interior de las paredes de granulado volcánico por paredes de ladrillo común. De esta manera la relación entre la masa del edificio y el área de planta es de 470 kg/m<sup>2</sup> frente a los 306 kg/m<sup>2</sup> del edificio real. Se corrieron las simulaciones para los dos sistemas de enfriamiento, sin uso de aire acondicionado, en los modelos de los edificios liviano y pesado. Las evoluciones de la temperatura interior del edificio sin ningún tipo de enfriamiento en contraste con la que corresponde al edificio refrescado con ventilación nocturna se presentan en la figura 4 para el edificio liviano y figura 6 para el edificio pesado.

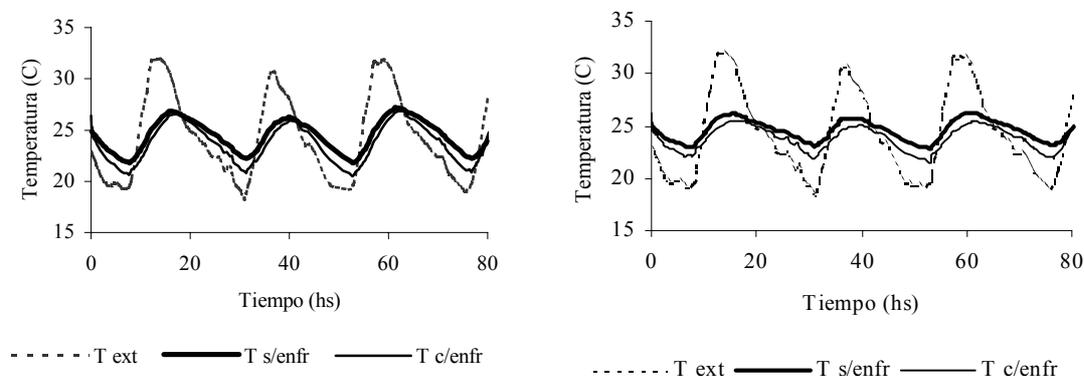


Figura 4: Temperaturas del aire de la habitación 1 sin enfriamiento y con enfriamiento mediante ventilación nocturna simuladas con el modelo de edificio liviano (izquierda) y el del edificio pesado (derecha).

Se observa, comparando las gráficas, el aplanamiento de la oscilación producido por la mayor inercia térmica del edificio pesado. Se destaca también en el gráfico del edificio pesado el descenso en el pico de la onda de la temperatura debido al efecto diferido del refrescamiento producido por la ventilación nocturna en la masa del edificio.

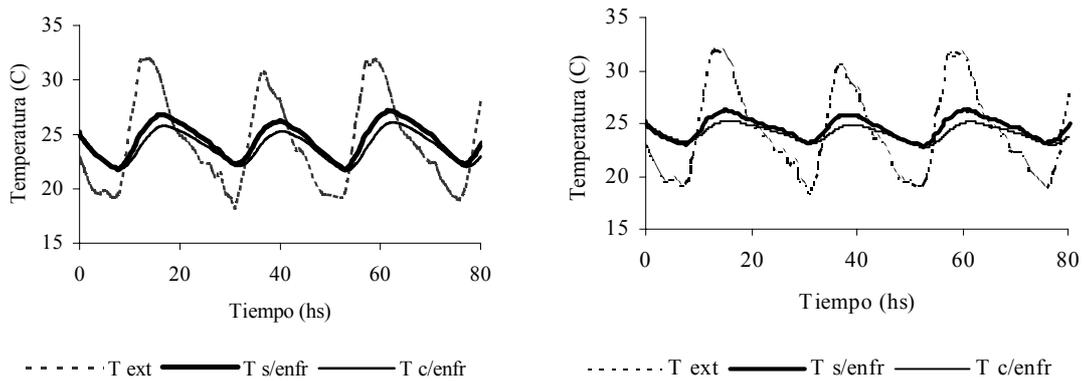


Figura 5: Temperaturas del aire de la habitación 1 sin enfriamiento y con enfriamiento mediante tubos enterrados simuladas con el modelo de edificio liviano (izquierda) y el del edificio pesado (derecha).

En el caso del refrescamiento mediante los tubos enterrados, se observa en las gráficas un amortiguamiento en las variaciones bruscas de temperatura en comparación con la ventilación debido al efecto de la masa del suelo que rodea al tubo. El enfriamiento mediante tubos es mayor que con ventilación nocturna ya que éstos funcionan durante todo el día.

Es común en criaderos de chinchillas el uso de aire acondicionado ya que la temperatura más baja incide directamente en la calidad de la piel. Para estudiar el efecto del uso combinado del aire acondicionado con los sistemas de refrescamiento acá estudiados se introducen en la modelización los termostatos. Éstos están constituidos por fuentes de temperatura (fuentes de tensión) que actúan para que no se supere una temperatura máxima. El flujo de calor que entrega esta fuente es igual a la energía térmica que evacua por unidad de tiempo el aire acondicionado para sostener la temperatura de termostato. El programa SIMUSOL permite elegir como resultado de la simulación los valores de potencia sobre cualquier elemento del circuito térmico. Se selecciona en este caso particular la potencia térmica en la fuente de termostato y la potencia térmica en las fuentes de flujo másico de los ventiladores. Por ejemplo, para una temperatura de termostato de 24 C el resultado que provee la simulación se presenta en las gráficas de la figura 6.

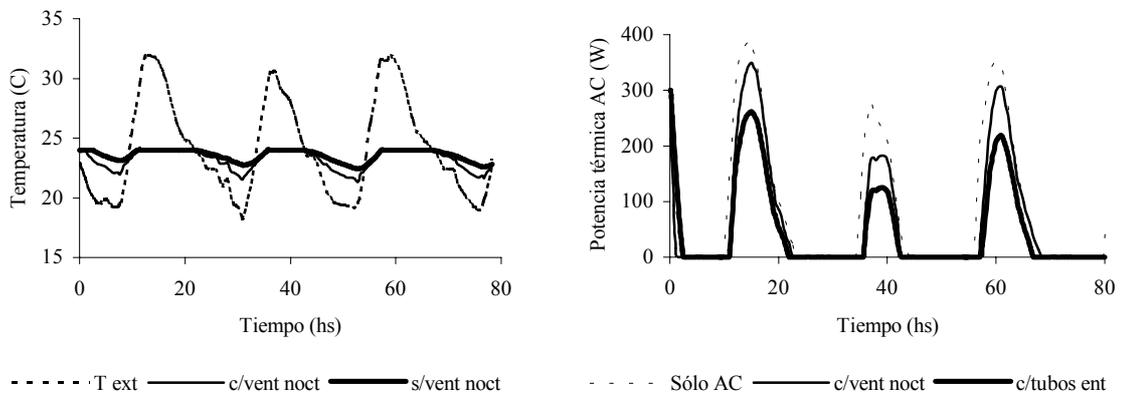


Figura 6: Evolución de la temperatura y de la potencia térmica para las distintas configuraciones de enfriamiento

Integrando los valores de la potencia en todo el período de la simulación se calcula la energía térmica extraída por cada sistema en las tres configuraciones de enfriamiento: sólo aire acondicionado, aire acondicionado con ventilación nocturna y aire acondicionado con tubos enterrados. Se estudió cómo cambia la contribución de cada sistema en la potencia térmica total para distintas temperaturas de termostato. Estas proporciones para el edificio pesado se muestran en la figura 7.

Se puede observar en las gráficas como disminuye la contribución de energética de la ventilación nocturna y de los tubos enterrados a medida que las necesidades de enfriamiento se incrementan .

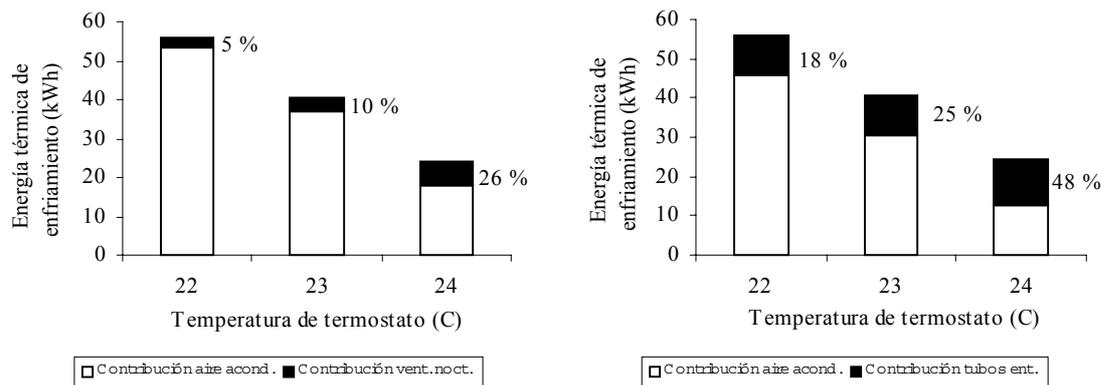


Figura 6: Proporciones de energía en los sistemas mixtos: aire acondicionado y ventilación nocturna (izquierda) y aire acondicionado y tubos enterrados (derecha).

## CONCLUSIONES

Los resultados de las simulaciones numéricas demuestran que, para las condiciones específicas climáticas y del modelo del edificio pesado en estudio, la energía útil de enfriamiento provista por la ventilación nocturna y los tubos enterrados participa en una proporción importante de la energía total. Cabe destacar que para iguales requerimientos de enfriamiento, la contribución de los tubos enterrados funcionando todo el tiempo es aproximadamente el doble que la contribución de la ventilación nocturna.

En el modelo del edificio liviano, la contribución porcentual de la ventilación nocturna no es significativa confirmando que es una técnica de enfriamiento que sólo resulta atractiva para edificios pesados. Los tubos enterrados, que refrescan directamente el aire durante el día sí son adecuados también para edificios livianos.

Se puede concluir en general que, para las condiciones climáticas de elevada variación diurna y en edificios masivos, donde sea imprescindible el uso del aire acondicionado es recomendable el modo mixto de enfriamiento mediante el acoplamiento de técnicas como las que se estudiaron en este trabajo.

En cuanto a las simulaciones se destaca que el programa SIMUSOL resulta una herramienta muy fuerte ya que además de su facilidad de manejo, permite la incorporación de una manera sencilla de sistemas de enfriamiento (y calefacción) activos o híbridos que pueden ser “controlados” con funciones o tablas que dependen de variables como el tiempo, la temperatura o el flujo de calor sobre cualquier elemento del sistema.

## REFERENCIAS

- Lesino G., Giménez E. y Chiarito G. (1986). Zonificación del NOA Según el Potencial de Distintos Métodos de Enfriamiento. Actas 11ª Reunión de ASADES, 103 – 112.
- Blondeau P., Sperandio M. y Allard F. (1997) Night Ventilation for Building Cooling in Summer. Solar Energy 6, 5, 327-335.
- Hernández A. (2001) Simulación Numérica de la Distribución de Temperatura de Suelo por Debajo de un Edificio. Memorias del 8º Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, 242-248.
- Hernández A. (2001) Simulación del Comportamiento Térmico de Edificios. Comparación de Métodos Micro y Macro Dinámicos. Tesis Doctoral. pp 53-54. Universidad Nacional de Salta.
- Gea M. y Lesino G. (1993) Medición de Infiltraciones. Actas 16ª Reunión de ASADES, 56-60.
- Chandra S. (1989) Ventilative Cooling en Cook J., Passive Cooling, The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, England pp 70-79.

## ABSTRACT

This paper presents an energy analysis of the coupling between passive cooling techniques and mechanical cooling. An experimental building with high airflow rate in arid climate has been studied. The experimental results were extended by a set of simulations in order to predict the thermal behaviour of the reference building in other configurations. Convective coefficient vs airflow rate dependence was determined with experimental test. Through the use of numerical simulations the useful cooling energy which is offered by night ventilation and buried pipes was evaluated when these are used in the frame of a mixed-mode cooling system

**Keywords:** building cooling, mixed-mode cooling system.