



MODELO ANALÍTICO PARA SISTEMA DE DESCARGA DE CALOR EN TECHOS

Víctor Hernández G., José Fernández Z., David Morillón G. y Alejandro Mesa *

Universidad Nacional Autónoma de México. E-mail: vichugo@servidor.unam.mx

*Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - INCIHUSA, CONICET.

CRICYT – Mendoza E-mail: amesa@lab.cricyt.edu.ar

RESUMEN: En el presente trabajo, se propone un modelo analítico que describe el comportamiento térmico de un sistema de descarga de calor en techo. Para validarlo, se empleó un prototipo experimental al cual se le realizó una prueba con exposición al sol y se comparó los resultados medidos con los calculados por un modelo analítico propuesto por los autores. Se encontró variaciones de error entre los datos tomados en la prueba experimental y en el modelo analítico de 6.5 °C como máximo para la placa de aluminio (o almacenadora de calor) y de 4.6 °C como máximo para la temperatura en la superficie del vidrio. Se considera que el modelo analítico propuesto puede ser empleado para conocer el comportamiento de un sistema de descarga de calor en techos definiendo las dimensiones del sistema para las condiciones ambientales del lugar donde se va a utilizar.

Palabras clave: Sistema pasivo, techo escudo, sistema de descarga de calor, ventilación natural.

INTRODUCCIÓN

Entre los sistemas pasivos con los que se cuenta actualmente, se tienen los sistemas de descarga de calor (SDC), los cuales son sistemas que permiten captar el flujo de calor que recibiría la envolvente de una edificación, la cual originaría un incremento en la temperatura en el aire interior, para descargarlo al medio ambiente y así acercar las condiciones de confort térmico en el interior de la edificación. Los SDC se pueden clasificar en función de su colocación en la envolvente de la edificación y pueden ser SDC en muros y SDC en techos. Los SDC en techos pueden ser empleados en diferentes condiciones climáticas, lo importante, es considerar la interacción de estos sistemas y el medio ambiente con la edificación a climatizar, por lo cual es muy importante considerar su diseño. Estos sistemas están formados por dos placas separadas que forman una cavidad por donde se permite el flujo de aire, mediante aberturas en la parte superior e inferior. Dependiendo de los materiales con los que esté conformado, el SDC en techos, se pueden clasificar de dos formas: los que cuentan con dos superficies opacas y los que cuentan con una superficie translúcida y una opaca.

En una revisión bibliográfica del tema, Shih, et al (1987); presentaron un estudio experimental sobre muros ventilados y techos de "casa-fría"; éstos consisten en interponer cubiertas adicionales a muros y techos, entre la envolvente tradicional del edificio y el ambiente exterior; la cubierta está separada de la envolvente del edificio para permitir la circulación de aire ambiente. El objetivo de esta construcción es eliminar o reducir drásticamente los efectos de la carga térmica solar, en la envolvente del edificio. Por ello, los autores presentaron recomendaciones para el diseño de nuevos edificios y la readecuación de las estructuras existentes.

Nelson y Wood (1989); presentaron un estudio numérico de la transferencia combinada, de calor y masa, por convección natural en flujo completamente desarrollado entre placas paralelas inclinadas con condiciones de frontera simétricas y asimétricas. El movimiento del fluido es generado por el efecto de flotación, debido a la diferencia de temperaturas y concentraciones entre el canal y el fluido. Los resultados muestran las correlaciones de los números locales de Nusselt y Sherwood para ambas paredes.

Sámano et al. (1990); presentan un estudio, experimental y teórico, del flujo de aire dentro de la cavidad formada por las bovedillas con las que están contruidos los techos de los cubículos del Centro de Investigación en Energía en Temixco, Morelos; esta cavidad se mantiene ventilada para descargar el calor que recibe la placa superior del techo debido a la radiación solar. Se presentan los resultados del planteamiento analítico, tablas y gráficas de las mediciones efectuadas en el prototipo así como datos meteorológicos de temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa del lugar donde se desarrollo el estudio.

Morales (1993); presentó el estudio teórico-experimental de los techos de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar, contruidos con vigueta y bovedilla. En este sistema, la placa superior del techo esta en contacto con la radiación solar periódica y el aire ambiente, y la placa inferior (que forma el plafón) está en contacto con el aire del interior del cubículo. Entre las placas se permite la circulación del aire para lograr la descarga del calor. Morales presentó el análisis del flujo de calor y un estudio numérico para determinar la temperatura y velocidad del aire en el interior del canal, así como las gráficas y tablas de las temperaturas medidas en distintos puntos del sistema.

Palomino (1995); presentó un estudio numérico de la convección natural para un techo escudo a la radiación solar inclinado, para dos tipos de condiciones de frontera: temperatura constante y flujo de calor constante. El modelo se resolvió para la región cercana a la placa superior del canal, donde las ecuaciones se determinaron por el método de diferencias finitas, para obtener los perfiles de velocidad y temperatura. Los resultados del modelo bidimensional al compararse con resultados experimentales de Al-Arabi (1969) en condiciones de temperatura constante, de Vliet (1979) en condiciones de flujo de calor constante, se observa una diferencia máxima de 12%, lo cual valida la solución y la posibilidad de usar las correlaciones de capa límite en techos y muros escudo.

Morillón et al. (1998); presentan los resultados experimentales de un doble techo, como escudo a la radiación solar, en una habitación para las condiciones climáticas de verano en Guadalajara, Jal. Los resultados permiten comparar el efecto del techo escudo en el amortiguamiento de la temperatura interna, así como el impacto de la ventilación natural en las condiciones de confort térmico, además del efecto de las ganancias térmicas que se obtienen a través de una ventana por su orientación, en la temperatura interna.

Jiang He et al. (2001); presentan una casa que fue diseñada con base al clima del lugar, empleando materiales constructivos propios del lugar. El diseño incluye doble muro y triple techo con el propósito de disminuir la ganancia de calor del interior. Presenta los resultados al monitorear por un año el comportamiento de la vivienda.

Zhai et al. (2005); propone dos modelos analíticos para un SDC en techos, cuando el calentamiento es de un solo paso y cuando es por doble paso. Compara ambos sistemas y obtiene una diferencia del 10 por ciento del sistema de doble paso con respecto al de un paso.

De los antecedentes antes mencionados se puede comentar que, los modelos analíticos encontrados no contemplan ni la temperatura del aire en el interior de la edificación a ventilar ni el almacenamiento de calor que se tiene en la placa de aluminio. En el primer caso consideran que el espacio a climatizar cuenta con una entrada de aire del medio ambiente y que es suficiente para reemplazar el aire caliente saliente del sistema y en el segundo caso, lo desprecian por ser pequeño o por considerar que el aire se lleva todo el calor de la placa interna. Con base en lo anterior proponemos un modelo analítico que considere tanto a la temperatura del cuarto diferente a la ambiental (ya que al inicio de su funcionamiento la temperatura interior es mayor a la ambiental) y el almacenamiento de calor en la placa almacenadora.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Radiación Solar G

Para determinar los valores de radiación solar que requieren los modelos analítico descritos en este documento, se empleó el método del ASHRAE (2005) como sigue:

La radiación solar que incide sobre una superficie se puede calcular con:

$$G = G_{\max} \cos \theta \quad (1)$$

donde G_{\max} es el valor máximo de radiación solar que incide sobre una superficie y se calcula con:

$$G_{\max} = 950 \left(1 - e^{-0.075h} \right) \quad (2)$$

Donde:

$$h = \text{arc sen} [(\cos\Phi \cos\delta \cos\omega) + (\text{sen}\Phi \text{sen}\delta)] \quad (3)$$

la declinación puede ser calculada mediante la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \text{ Sen} [(360/365) (284 + n)] \quad (4)$$

y $\cos \theta$ es una función del tiempo que depende de la orientación e inclinación de la superficie y se calcula con el método de Duffie (1989):

$$\cos\theta = \text{sen}\delta \text{ sen}\varphi \cos B - \text{sen}\delta \cos\varphi \text{ sen} B \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos B \cos\omega + \cos\delta \text{ sen}\varphi \text{ sen} B \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \text{ sen} B \text{ sen}\gamma \text{ sen}\omega$$

Benford y Bock (1939) simplifican las ecuaciones:

Para un muro vertical orientado al norte o sur:

$$\cos\theta = - \text{sen}\delta \cos\varphi \cos\gamma + \cos\delta \text{ sen}\varphi \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \text{ sen}\gamma \text{ sen}\omega$$

$$\text{Norte} \rightarrow \gamma = 0 \quad B = 90 \quad (5)$$

$$\text{Sur} \rightarrow \gamma = 180 \quad B = 90 \quad (6)$$

Para un muro vertical orientado al oeste o este:

$$\cos\theta = \text{sen}\delta \text{sen}\varphi \cos B - \text{sen}\delta \cos\varphi \text{sen} B \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos B \cos\omega + \cos\delta \text{sen}\varphi \text{sen} B \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \text{sen} B \text{sen}\gamma \text{sen}\omega \quad (7)$$

$$\text{Este} \rightarrow \gamma = 0 \quad B = 90 \quad (8)$$

$$\text{Oeste} \rightarrow \gamma = -90 \quad B = 90 \quad (9)$$

Para una superficie horizontal o techo:

$$\cos\theta = \cos\delta \cos\varphi \cos\omega + \text{sen}\delta \text{sen}\varphi \quad (10)$$

Temperatura ambiente t_a

La variación de la temperatura ambiente se calcula empleando la ecuación dada por Tejeda (1990):

$$T_h = T_{\min} + Y(T_{\max} - T_{\min}) \quad (11)$$

$$Y = a t^b \exp(ct) \quad (12)$$

Tejeda fabricó un software que permite establecer los valores horarios promedio mensual de una región en base a su situación geográfica. El software llamado "Mardia" emplea las ecuaciones 11 y 12 y también simula los valores de temperatura de bulbo húmedo y el índice de confort climático con una proximidad del 98%.

Los valores de temperatura máximo y mínimo promedio mensual se toman de las Normales climatológicas proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional y corresponden al promedio de 30 años (1951 – 1980).

Producto de la transmitancia del vidrio y la absorptancia de la placa interna $\tau\alpha$ (para el caso de techo con superficie translúcida)

Para cuantificar la radiación solar que absorbe la placa interna es necesario conocer el comportamiento del producto de la transmitancia del vidrio por la absorptancia de la placa interna, valor que se modifica dependiendo del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el vidrio.

De la radiación que atraviesa al vidrio (Figura 1) una parte es absorbida por la placa interna ($\alpha\tau$) mientras que una parte es rebotada al vidrio ($(1-\alpha)\tau$), dicha radiación al cambiar de longitud de onda es rebotada por el vidrio nuevamente a la placa interna, $((1-\alpha)\tau\rho)$, repitiéndose así sucesivamente.

La ecuación que cuantifica el valor del producto ($\tau\alpha$) esta dada por Duffie (1989) y es

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad (13)$$

También presenta una ecuación para calcular valores que no requieren de exactitud:

$$(\tau\alpha) = 1.01 \tau\alpha \quad (14)$$

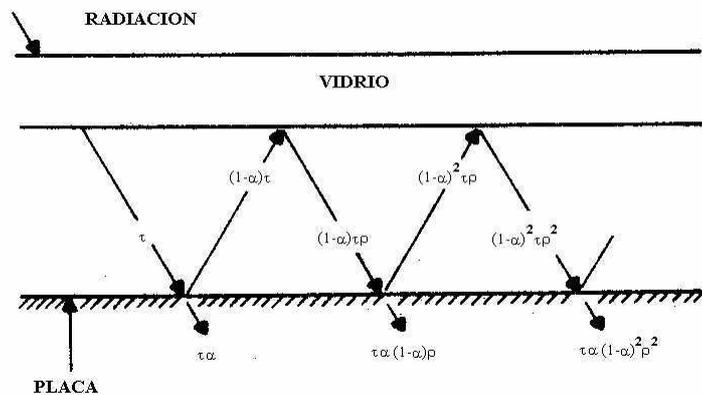


Figura 1.- Absorción de la radiación solar por la placa

CONSIDERACIONES

Para la aplicación del modelo analítico propuesto en este trabajo, se debe de considerar lo siguiente:

Se considera a la temperatura del interior del cuarto a climatizar diferente a la ambiental.

Se toma en cuenta la capacidad de almacenamiento de calor de la placa interna.

Se considera que el flujo de calor en el sistema es unidireccional.

El sistema coordenado empleado considera al eje de las "x" paralelo al SDC por lo cual para superficies horizontales el valor de la gravedad se considera como "g" mientras que para superficies con inclinación θ se considera "g cos θ " (Morales 1993).

Modelo Analítico

Para simular el comportamiento de un SDC en Techos, se realizó un balance térmico considerando dos placas paralelas inclinadas, de las cuales una de ellas permite el paso de la energía solar. El modelo resultante, ordenado por sus componentes (Figura 2) es:

Cubierta de vidrio:

$$G A \alpha_v = h_{\alpha} A (T_v - T_a) + h r_1 A (T_p - T_v) - h c_1 A (T_a - T_v) \quad (15)$$

Canal:

$$m C_p (T_a - T_c) = h c_2 A (T_p - T_a) - h c_1 A (T_a - T_v) \quad (16)$$

Placa almacenadora.

$$G A (\tau \alpha) - h c_2 A (T_p - T_a) - h r_1 A (T_p - T_v) - U_1 A (T_p - T_c) = (\rho c V_p T_p) / t \quad (17)$$

Flujo de ventilación natural:

$$m = \rho a C_d A_o [g H (T_a - T_c) / T_c]^{1/2} \quad (18)$$

Para calcular $h c_1$, $h c_2$, $h r_1$ y U_1 se requiere:

$$Nu = 0.68 + (0.67 Ra^{1/4}) / [1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/9} \quad (19)$$

$$Ra = Gr Pr \quad (20)$$

$$Gr = \frac{g \Delta T \beta L^3}{\nu^2} \quad (21)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad (22)$$

$$Nu = h L / K \quad (23)$$

$$h r_1 = \frac{\sigma (T_p^2 + T_v^2) (T_p + T_v)}{\left[\left(\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_v} \right) - 1 \right]} \quad (24)$$

$$U_2 = \frac{1}{\left[\left(\frac{e_{placa}}{k} + \frac{e_{aislante}}{K_{aislante}} + \frac{1}{h_{INT}} \right) \right]} \quad (25)$$

Prototipo experimental

Para la validación del modelo analítico propuesto, se empleó el prototipo experimental generado por Hernández (2006), el cual puede ser empleado para simular el comportamiento de SDC en muros y techos. Consta de dos placas (vidrio de 4 mm. y aluminio de $\frac{1}{16}$ pulg.) paralelas separadas por una cavidad por donde circula aire. (Figura 3) Cuenta con un metro de ancho por uno punto cero dos metros de altura y permite cambiar el ancho del canal de 3 cm. a 15 cm.

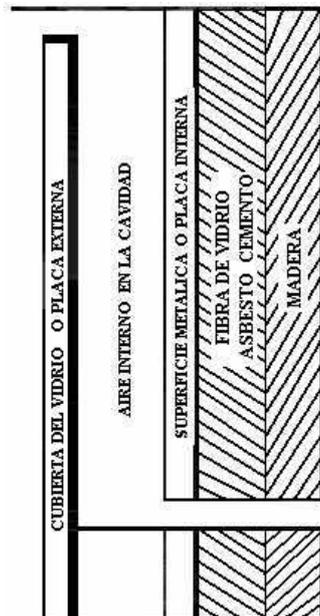


Figura 2.- SDC en techo con superficie translúcida

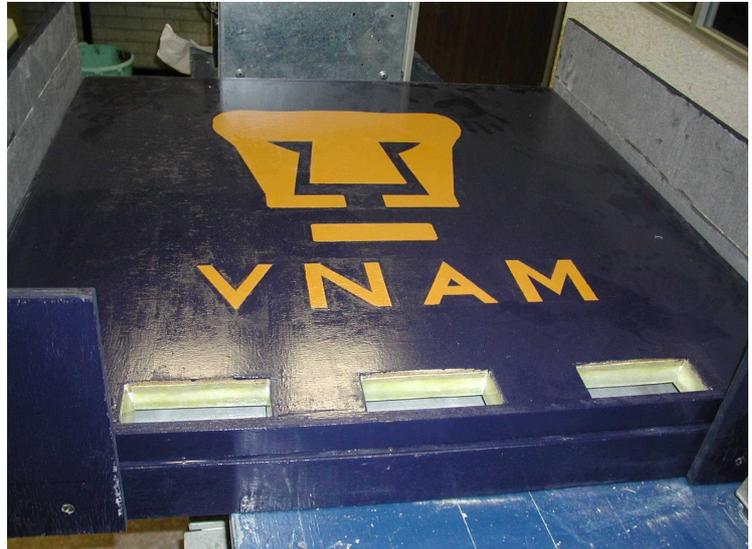


Figura 3.- Prototipo experimental

Para la simulación de las condiciones ambientales externas (radiación solar y temperatura ambiente) que se pueden tener debido a la variación de la latitud y orientación, cuenta con un arreglo de 20 resistencias eléctricas (empleadas en los calentadores eléctricos) que proporcionan un flujo de calor desde 0 hasta 1028 W a la placa de aluminio.

El objetivo de este estudio es conocer el comportamiento de la descarga de calor en techos, motivo por el cual, el modelo se colocó con una inclinación de 30 grados con respecto a la horizontal y se expuso a la radiación solar. Los equipos que se emplearon para la lectura de datos en la prueba experimental fueron:

- 11 Multímetros: medición del voltaje suministrado al prototipo experimental y medición de la resistencia de los sensores de temperatura.
- 1 Amperímetro de gancho: medición del amperaje suministrado.
- 1 Variac: regulador del suministro de voltaje entre el 0 y 120 %, al modelo.
- 2 Sondas de temperatura: medición la temperatura ambiental y de salida del dispositivo.
- 8 Sensores de temperatura de superficie.
- 2 Sondas de temperatura ambiental.
- 1 Piranómetro.

Resultados Experimentales

Se realizó una corrida experimental exponiendo el prototipo experimental a la radiación solar, bajo las condiciones ambientales de Cuautitlán, Estado de México. El comportamiento térmico obtenido del prototipo experimental se puede observar en la Figura 4 y 5.

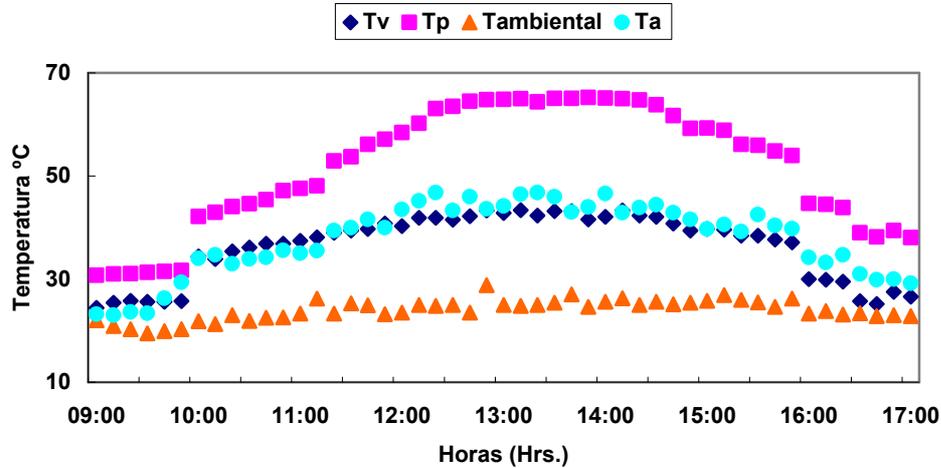


Figura 4.- Comportamiento térmico del prototipo experimental. Se observa la temperatura sobre la superficie del vidrio Tv, el promedio de la temperatura de la placa Tp y el aire que se encuentra en el interior del canal Ta.

A medida que se aumenta el flujo de calor sobre el prototipo experimental las temperaturas de la superficie del vidrio y placa interna aumentan, originando que el aire que circula por la cavidad absorba parte del calor aumentando su temperatura por arriba de la ambiental.

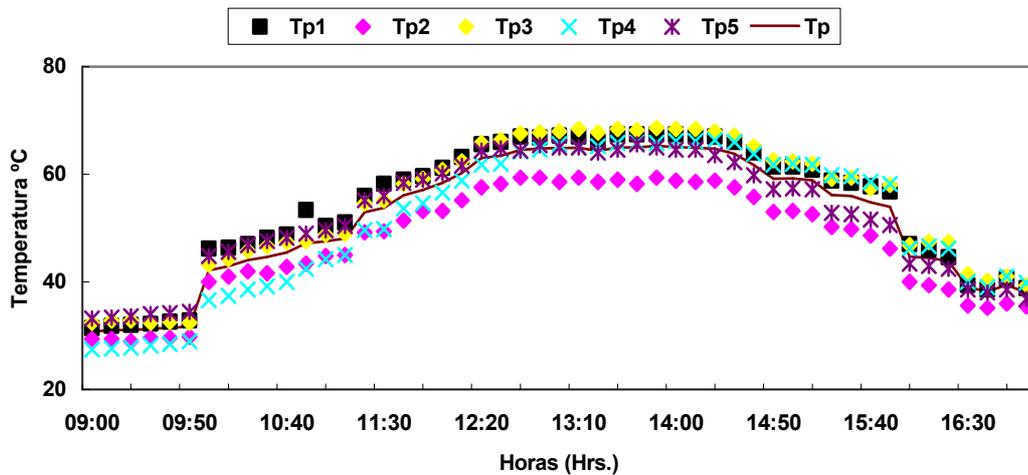


Figura 5.- Comportamiento térmico de la placa de aluminio. Se presentan los valores de temperatura de cada termopar Tp# y el promedio de todas Tp.

Se observa que al aumentar el flujo de calor con el paso del tiempo, la temperatura en la superficie de la placa aumenta casi uniformemente, presentando una variación de temperatura entre los termopares de 10 °C como máximo.

Validación

Con los valores de radiación solar y temperatura ambiental reportados en la corrida experimental, se alimentó al modelo analítico propuesto con estos valores, con la finalidad de comparar los resultados experimentales con los obtenidos con el modelo analítico. Para agilizar la resolución de las ecuaciones del modelo analítico, se empleó el programa Matemática versión 4 (diferencias finitas) al cual le fue alimentado las ecuaciones y los datos requeridos. La comparación de los resultados se presenta en la Figura 6.

En la Figura 6 se observa, que el comportamiento térmico del modelo analítico es similar al comportamiento térmico del prototipo experimental, en los resultados obtenidos se puede observar, una diferencia máxima de 4.6 °C para la temperatura de la superficie del vidrio, de 6.5 °C para la temperatura de la superficie de la placa de aluminio y de 5.4 °C para la temperatura del aire en el canal.

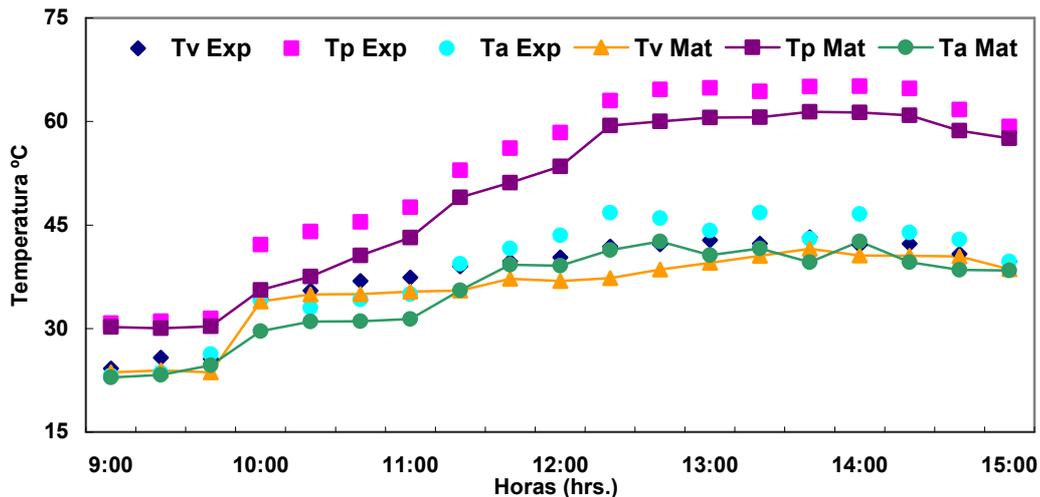


Figura 6.- Comparación de los resultados medidos con los calculados

CONCLUSIONES

Como se observó en la prueba en el prototipo experimental, su comportamiento es descrito por el modelo analítico. Presenta variaciones de error entre los datos tomados en la prueba experimental y en el modelo analítico no mayor a 6.5 °C para la placa de aluminio y de 4.6 °C para la temperatura en la superficie del vidrio.

Se considera que el modelo analítico propuesto puede ser empleado para conocer el comportamiento de un SDC en techos definiendo las dimensiones del SDC y las condiciones ambientales del lugar donde se va a utilizar. Además, es necesario evaluar el potencial de ahorro de energía que se puede tener con la aplicación de estos sistemas y puede emplearse el modelo analítico descrito en este trabajo.

REFERENCIAS

- A. Tejeda y T. Zacarías. (1990). Software Mardia.bas. versión 1.0 México.
- ASHRAE Handbook Fundamentals. (2005). American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning, New York.
- Benford F. y J. Bock. (1939). A time Analysis of Sunshine. Transactions of the American Illumination Engineering Society. 200.
- Cooper P. (1969). The absorption of solar radiation in solar stills. Solar Energy. 3.
- Hernández V., Morillón D., Best R., José Fernández, Rafael Almanza, Norberto Chargoy. (2006). Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system. Applied Thermal Engineering. 26 (2006) 2464–2469.
- John A. Duffie y William A. Beckman. (1991). Solar Engineering of thermal processes. 2ª Edition, Jhon Wiley & Sons, New York
- Nelson D. J. Y Wood B. D. (1989). Fully developed combined heat and mass transfer natural convection between parallel plates with asymmetric boundary conditions. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1789-1792.
- Jiang He, Akio Okumura, Akira Hoyano and Kohichi Asano. (2001). A solar cooling project for hot and humid climates. Solar Energy, Vol. 71, No. 2, pp. 135 – 145.
- Morales, D. (1993). Estudio de Techos de Edificios Construidos para Operar en Forma Pasiva. Tesis doctoral, Facultad de Arquitectura, UNAM, México.
- Morillón, D., Morillón, J. R., y De la Mora, A. (1998). Comportamiento del techo escudo a la radiación solar en Guadalajara, Jal., Memorias de la XXII Semana Nacional de Energía Solar.
- Palomino, D. (1995). Convección Natural en un Canal de Aire Inclinado con Calentamiento Superior. Tesis de maestría. DEPEFI, UNAM, México.
- Q. Zhai, Y. J. Dai, R. Z. Wang. (2005). Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors. Applied Thermal Engineering. Vol. 25. pp. 741 – 757.
- Sámamo, D. A., Alvarez, G.S., Vázquez, B. y Morales, J. D. (1990). Estudio experimental y numérico del flujo de aire en techos y paredes de edificios construidos para operar en forma pasiva., Proyecto No. P220CCOR 892381 patrocinado por CONACYT, Témixco, Mor.
- Shih, Jason C.; Fairey, Philip W. (1987). Experimental Analysis of Ventilated Walls and Ice House Roofs in Warm Climates. Architectural Science Review, p.p. 73-76, Baton Rouge, La.

NOMENCLATURA

Temperaturas

T_v = Temperatura en la superficie del vidrio, K
 T_p = Temperatura en la superficie de la placa interna, K
 T_a = Temperatura del aire en el canal, K
 T_α = Temperatura ambiental, K
 T_c = Temperatura del cuarto a climatizar, K

Dimensiones

A = Área del SDC en techos, m^2
 A_o = Área de la abertura de entrada del aire al canal, m^2
 V_p = Volumen de la placa de aluminio, m^3
Cavidad = ancho del canal, m
 H = Altura del prototipo experimental, m

Coefficientes

U_1 = Resistencia equivalente de la placa de aluminio al espacio a climatizar, $W/m^2 K$
 hr_1 = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre placa interna y vidrio, $W/m^2 K$
 $h\alpha$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el vidrio y el medio ambiente, $W/m^2 K$
 hc_1 = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el vidrio y el aire del canal, $W/m^2 K$
 hc_2 = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa de aluminio y el aire del canal, $W/m^2 K$
 K = Coeficiente de transferencia de calor por conducción, $W/m K$
 Cd = Coeficiente de descarga.

Propiedades

α = Absortancia del material constructivo
 ϵ_{cielo} = Emitancia del cielo
 ρ = Densidad de la placa de aluminio, kg/m^3
 ρ_a = Densidad del aire
 ϵ_v = Emitancia del vidrio
 $(\tau\alpha)$ = Producto de la transmitancia del vidrio por absortancia de la placa de aluminio
 α_s = Difusividad térmica, m^2/s
 β = Coeficiente de expansión volumétrica, K^{-1}
 c = Capacidad calorífica de la placa interna, $kJ/kg K$
 C_p = Calor específico del aire, $kJ/kg K$
 ν = Viscosidad cinemática del aire, m^2/s
 α_v = Absortancia del vidrio

Constantes

σ = Constante de Stefan - Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$
 g = Aceleración debido a la gravedad estándar = $9.81 m/s^2$

Coordenadas

θ = Angulo de incidencia entre la componente de la radiación directa y la superficie
 B = Angulo entre la superficie y el plano (N - S) $0 \leq B \leq 180^\circ$
 δ = Declinación, la posición solar con respecto del ecuador, $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$
 Φ = Latitud, es la posición al norte o sur del ecuador.
 γ = Azimut, desviación de la proyección de la normal de una superficie y el meridiano local, cero al sur, este negativo y oeste positivo $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.
 ω = Desplazamiento angular del este al oeste del meridiano local, 15° por hora, mañana negativo, tarde positivo.
 n = Numero de día a calcular

Otros Datos

G = Radiación solar, W/m^2
 m = Flujo de aire, kg/s
 t = Tiempo, s

ABSTRACT

In this paper, an analytical model sets out that describes the thermal behavior of a discharge system of heat in ceiling. In order to validate it, an experimental model was used to which a test with exhibition to the sun was made to him and it compared the results measured with the calculated ones by the analytical model. Variations of error between the data taken in the experimental test and the analytical model, was $6,5^\circ C$ for the plate of aluminum and $4,6^\circ C$ for the temperature in the surface of the glass. It is considered that the proposed analytical model can be used to know the behavior a discharge system of heat in ceilings defining the environmental dimensions of the system and conditions of the place where is going away to use.