

## Tema A4 Termofluidos: Análisis térmico en viviendas

### "Simulación de la transferencia de calor en cavidades enfocado al análisis térmico en viviendas"

**Guillermo Efrén Ovando Chacon<sup>a</sup>, Sandy Luz Ovando Chacon<sup>b</sup>, Juan Carlos Prince Avelino<sup>a</sup>, Abelardo Rodríguez León<sup>a</sup>, Cesar García Arellano<sup>c</sup>, Guillermo Ibañez Duharte<sup>d</sup>**

<sup>a</sup>Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz, Departamento de Metal Mecánica, Calzada Miguel Angel de Quevedo 2779 Col. Formando Hogar, Veracruz CP 91860, México.

<sup>b</sup>Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, Departamento de Química y Bioquímica, Carretera Panamericana km. 1080, Tuxtla Gutierrez CP 29000, México.

<sup>c</sup>Universidad del Papaloapan, Instituto de Agroingeniería, Av. Ferrocarril s/n Cd. Universitaria, Loma Bonita CP 68400, México.

<sup>d</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables, Libramiento Norte Poniente 1150, Tuxtla Gutierrez CP 29039, México.

\*Autor contacto. Dirección de correo electrónico:ovachag@hotmail.com

---

## RESUMEN

---

En este trabajo se reporta la simulación de la transferencia de calor en el interior de una vivienda, con techo de concreto y paredes de ladrillo rojo, modelada como una cavidad abierta. El estudio se realiza para régimen turbulento  $Ra=1.5 \times 10^9$ . En las condiciones de frontera se imponen temperatura y flujos de calor por radiación reales medidas en la ciudad de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México; las cuales van cambiando conforme transcurre el día. En esta investigación se estudia el efecto de inclinación del techo a través de los campos de temperatura, perfiles de temperatura y coeficientes de transferencia de calor. Los resultados indican que la forma del techo puede influir significativamente en la temperatura del interior de la habitación debido al flujo de calor transportado principalmente desde el techo hacia el interior lo que puede impactar en el confort térmico de las personas que habitan la vivienda y contribuir al ahorro de energía al usar técnicas pasivas de enfriamiento.

---

*Palabras Clave: Transferencia de calor, Confort térmico, Simulación numérica.*

## ABSTRACT

---

In this work, simulation of heat transfer inside a building, with roof of concrete and walls of red brick, is modeled as an open cavity. The study is carried out for turbulent regime  $Ra=1.5 \times 10^9$ . On the boundary conditions actual temperature and radiation are imposed which varies through the day. These two data were recorded in the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico. In the present investigation, the effect of roof inclination through the temperature fields, temperature profiles and heat transfer coefficient is studied. The results show that the shape of the roof affect significantly the temperature inside the building due to heat flux transported from the roof to the inward, which impact the thermal comfort of the people inside the building and can contribute to save energy when using passive cooling techniques.

---

*Keywords: Heat transfer, Thermal comfort, Numerical simulation.*

---

## 1. Introducción

Desde la antigüedad el hombre a buscado diferentes formas de protegerse contra la inclemencias del clima a través de técnicas pasivas de enfriamiento tales como ventilación cruzada cuyas corrientes de aire permiten reducir la sensación térmica, techos más altos y con diferentes

configuraciones que reducen la radiación solar emitidas por estas estructuras, orientación de las viviendas de tal manera que no reciban directamente la radiación solar, protección contra radiación a través del uso de toldos o aleros, muros blancos, y el uso de vegetación o techos verdes en las edificaciones.

A partir de la invención del aire acondicionado en 1902 por Willis Carrier el uso de las técnicas pasivas de

enfriamiento comenzaron a dejarse a un lado y los arquitectos comenzaron a subestimar técnicas milenarias de enfriamiento pasivo. Sin embargo, en la actualidad debido a la preocupación por la contaminación provocada por los refrigerantes con los que trabajan los sistemas de enfriamiento y a su alto consumo de energía, ha habido un auge por retomar técnicas pasivas de enfriamiento las cuales no afectan al medio ambiente.

En México la mayoría de la población es de bajos recursos de tal manera que carecen del poder adquisitivo para instalar sistemas de aire acondicionado en sus viviendas. Por otro lado las altas tarifas eléctricas de Comisión Federal de Electricidad harían imposible pagar el consumo eléctrico y el mantenimiento de los equipos de aire acondicionado. Por lo tanto, es necesario que en México se haga investigación relacionada a la aplicación de técnicas de enfriamiento pasivo en zonas con climas cálidos que ayuden a la población más necesitada a tener espacios confortables donde puedan realizar sus actividades cotidianas. lo anterior contribuiría a que las personas económicamente activas tengan un periodo de descanso apropiado y los estudiantes tengan espacios confortables para realizar sus tareas lo cual se traduciría en un mejor desempeño laboral y un mejor aprovechamiento escolar. En nuestro país son pocas las instituciones que han realizado algún tipo de investigación relacionada con confort térmico en viviendas, sin embargo, la mayoría de estos trabajos se han realizado para localidades del centro del país en donde el clima es frío [1-4].

La literatura existente indica que diversos estudios se han realizado sobre ventilación cruzada inducida por el viento en cavidades. Karava et al. [5] investigaron los principales parámetros que afectan el diseño de ventilación natural, es decir, el número y tipo de ventanas y aberturas, así como el tamaño y ubicación de la fachada para ventilación cruzada del viento. Sus resultados les permitió determinar los valores de los coeficientes de descarga apropiados y los coeficientes de presión interna. Kobayashi et al. [6] analizaron las variaciones en la distribución de presión en el interior de una cavidad, basados en los campos de velocidades obtenidas computacional y experimentalmente. Para el caso con aberturas pequeñas la caída de presión en el lado de los vientos dominantes fueron de igual magnitud que para el caso sin aberturas. Para el caso con aberturas medianas la mayor parte de la caída total de la presión se localizó en la abertura de los vientos dominantes. Para el caso con grandes aberturas la presión en el interior del edificio decreció gradualmente. Cheung et al. [7] estudiaron mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales la forma en la que estructuras altas modifican el viento y la ventilación natural en un conjunto de viviendas cercanas a ellas. Para viviendas alineadas en forma regular la dirección del viento y su separación son variables independientes. A pequeñas separaciones la interferencia de las viviendas fue desfavorable. Ellos encontraron que la separación óptima es cinco veces el ancho de la vivienda. Kindangen et al. [8] reportaron simulaciones numéricas para calcular los

coeficientes de velocidad promedios en el interior de una vivienda y la uniformidad del flujo de aire para diversas configuraciones de techos. Ellos investigaron los efectos de la forma del techo en el patrón de flujo de aire interior mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales, encontrando que al incrementar el coeficiente de velocidad promedio inducido por la forma y su orientación ayuda a mejorar el flujo de aire en el interior de una vivienda. Mou et al. [9] calcularon los valores de la presión media del viento sobre y alrededor de varios edificios considerando el efecto de su dimensión. Los resultados evidenciaron que tanto la relación altura/ancho como la relación altura/espesor influyen significativamente en la ventilación de la edificación. Sin embargo el espesor por si solo tiene una menor influencia en alterar la presión positiva del viento. Guirguis et al. [10] estudiaron el efecto del ángulo de inclinación de un techo sobre la distribución de la presión estática, temperatura local y coeficiente de transferencia de calor en el exterior de un edificio. Ellos encontraron que techos con ángulos grandes de inclinación generan mejor transferencia de calor en comparación con techos con ángulos de inclinación bajos. Tian and Karayiannis [11] analizaron experimentalmente la convección natural turbulenta en una cavidad cuadrada llena de aire para  $Ra=1.58 \times 10^9$ . La cavidad tenía una relación de aspecto de dos en su profundidad de tal manera que se podía considerar un flujo bidimensional en el plano medio de la cavidad. Ellos obtuvieron los números de Nusselt locales y los esfuerzos cortantes en la pared. Tian and Karayiannis [12] reportaron resultados de la fluctuación térmica y de cantidad de movimiento debida a un flujo turbulento bidimensional en una cavidad cuadrada vertical con aire. Las componentes de temperatura y velocidad fluctuaron independientemente y solo se presentaron en la capa límite de la pared solida. Aounallah et al. [13] estudiaron la convección en régimen turbulento en una cavidad cuadrada bidimensional inclinada y con la pared caliente ondulada. Los resultados indicaron que la ondulación de la pared incrementa el número de Nusselt local debido a que la capa límite térmica aumenta o disminuye su espesor a lo largo de esta pared. La turbulencia solo se observó en la capa límite de la pared vertical y estuvo ausente en el centro de la cavidad donde se observó estratificación. Ampofo [14] reportó resultados experimentales de transferencia de calor turbulenta en una cavidad cuadrada llena de aire y con cinco particiones en su pared lateral izquierda la cual se mantuvo a alta temperatura. El calculó los números de Nusselt local y promedio para la superficie superior e inferior de cada partición ubicada a diferentes alturas.

La revisión bibliográfica anterior muestra la importancia del estudio de turbulencia en cavidades la cual puede usarse para modelar edificaciones, por otra parte, en regiones con climas cálidos y húmedos como los que predominan en amplias zonas del sur del país, la ventilación cruzada parece ser una alternativa viable como estrategia de diseño con ahorro de energía orientada a mejorar el confort térmico. Debido a la anterior en este

trabajo se analizan diferentes configuraciones de techo variando su ángulo respecto a la horizontal y se obtienen los coeficientes de transferencia de calor y temperaturas al interior de la vivienda. El objetivo es analizar el efecto del ángulo en el confort térmico de una vivienda para  $Ra=1.54 \times 10^9$  modelada como una cavidad con techo de concreto inclinada y sometida a condiciones de temperatura reales de la ciudad de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México. El número de Rayleigh anterior es un valor promedio de los valores obtenidos a diferentes horas del día el cual se obtiene sustituyendo las propiedades del aire y como longitud característica se considero el ancho de la cavidad.

## 2. Descripción física del problema

En el presente trabajo se reportan simulaciones numéricas bidimensionales de una cavidad cuadrada abierta que simula una vivienda sometida a un flujo de calor debida a los rayos del sol que inciden en su pared superior inclinada que simula el techo. El análisis considera dos configuraciones: techo plano de concreto y techo a dos aguas de concreto para diferentes horas del día, de 6:00 am a 20:00 pm. El estudio incluye la transferencia de calor conjugada en el techo y en las paredes laterales de ladrillo, dado que se considera el espesor de los mismos, ver Fig. 1. Los lados de la cavidad cuadrada se denotan por  $H=W$  y el espesor de la losa de concreto se denota por  $W_T$ . El ángulo de inclinación del techo se denota como  $\theta$ . La relaciones de la losa de concreto con respecto al tamaño de la cavidad se tomaron como  $W_T/W=0.05$ . La conductividad térmica del concreto se consideró como  $k_c=1.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  y la del ladrillo rojo como  $k_c=0.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Las simulaciones se realizaron considerando aire como fluido de trabajo para cavidades con dimensiones de  $W=4\text{m}$ . La tercera dimensión se considera suficientemente grande de tal manera que la suposición de flujo bidimensional es válida.

Para demostrar la precisión y validar los cálculos obtenidos se resolvió el problema de convección natural turbulenta en una cavidad cuadrada con aire como fluido de trabajo y con múltiples particiones la cual fue estudiada experimentalmente por Amporo [14]. En la tabla 1 se comparan los resultados de los números de Nusselt promedio en ambos lados de las cinco particiones, observándose para cada caso muy buena aproximación con diferencias menores a 1.2%. Por otra parte, se hicieron simulaciones en cavidades de  $1\text{m} \times 1\text{m}$  y se compararon con mediciones realizadas en prototipos con estas dimensiones los cuales forman parte del laboratorio de sistemas de generación de energía del Instituto Tecnológico de Veracruz, ver Fig. 2. En el prototipo con techo de concreto se realizaron mediciones de temperatura cada 30 minutos que se utilizaron como condiciones de frontera en el modelo de la simulación, las cuales incluyen: temperatura de la superficie superior de la losa de concreto, temperatura de la superficie inferior de la losa de concreto, y

temperatura de la pared lateral, en la Tabla 2 se comparan las temperaturas inferiores del techo obtenidas numéricamente y mediante medición en el prototipo para dos fechas del año, observándose que los resultados coinciden muy bien. En la simulación se incluyó el flujo de calor debido a la radiación solar la cual se midió mediante un piranómetro. Las mediciones hechas y utilizadas en la simulación para la validación del código numérico utilizado corresponden al 20 de mayo del 2015 y al 18 de junio del 2015 y fueron registradas en la cd. de Veracruz, México. En las simulaciones también se incluyeron las emisividades de los materiales:  $\epsilon_c=0.9$  para el techo de concreto y  $\epsilon_p=0.93$  para las paredes de ladrillo. Para el concreto se consideró una absorptividad de  $\alpha_c=0.65$ . En todas las paredes sólidas se impusieron condiciones de fronteras de no deslizamiento. Para las condiciones de frontera de transferencia de calor se consideraron valores reales de radiación solar en el techo de la cavidad y temperatura en las paredes laterales las cuales se registraron en una vivienda real ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México. La pared inferior de la cavidad se consideró con condición de frontera adiabática.

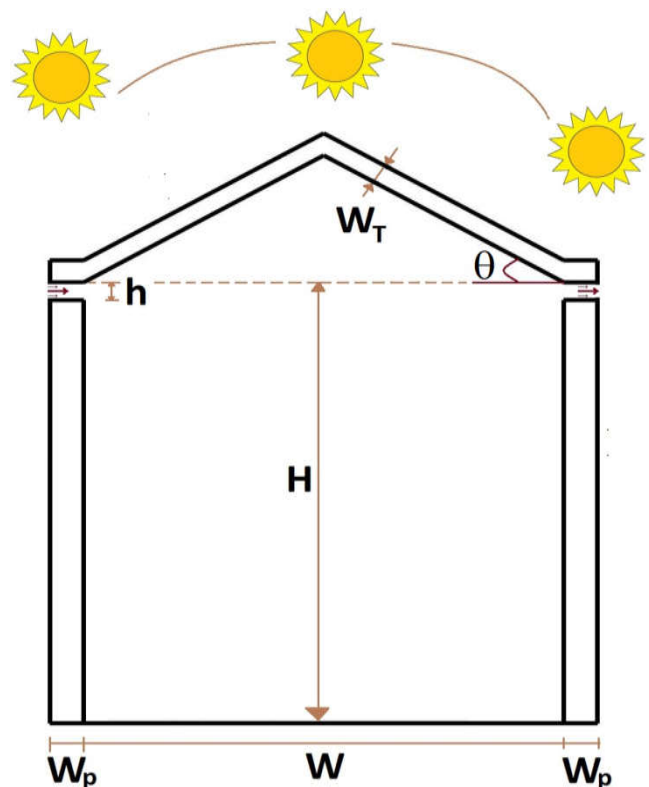


Figure 1 - Esquema de la vivienda analizada, la cual se simula como una cavidad abierta.

**Tabla 1 – Comparación de los números de Nusselt promedio para la validación de resultados.**

Altura de las particiones (adimensional)	Superficie inferior		Superficie superior	
	Presente trabajo	Ampofo [14]	Presente trabajo	Ampofo [14]
$Y=0.1667$	16.191	16.0	12.104	12.0
$Y=0.3333$	7.061	7.0	16.153	16.0
$Y=0.5000$	3.035	3.0	19.205	19.0
$Y=0.6667$	8.092	8.0	16.094	16.0
$Y=0.8333$	3.021	3.0	9.087	9.0

**Tabla 2 – Comparación de las temperaturas inferiores obtenidas numéricamente y medidas en el prototipo.**

Mayo 2015			
Tiempo (hrs)	$T_{ci}$ (°C)	$T_{ci}$ (°C)	%error
	Medición	Simulación	
6:00	26.57	26.74	0.64
9:00	33.92	34.30	1.12
13:00	45.61	46.23	1.35
15:00	45.95	46.52	1.24
18:00	31.21	31.54	1.06
Junio 2015			
6:00	25.29	25.47	0.71
9:00	40.02	40.48	1.15
13:00	55.27	56.03	1.37
15:00	58.95	59.64	1.17
18:00	43.22	43.63	0.95

La radiación solar se registró utilizando un piranómetro SP Lite 2 de la marca Kipp & Zonen, el cual tiene un rango espectral de 400 a 1100 nm y una irradiancia solar máxima de 2000 W/m<sup>2</sup>

El registro de las temperaturas se realizó con termopares tipo J (hierro/constantán) con una sensibilidad de ~52  $\mu$ V/°C, debido al medio salino altamente corrosivo en el caso del puerto de Veracruz, los termopares se aislaron en las puntas para medir la temperatura sobre la superficie interna y externa de la losa de concreto. los termopares se recalibraron utilizando una sonda termistor Lascar NTC-Probe-1900 de 10K como patrón y un baño térmico con temperatura regulable con incrementos de temperatura de 5°C, obteniendo errores menores al 2% con la respectiva curva de ajuste para cada termopar. La recalibración fue necesaria debido a la distancia entre el sistema de recopilación de datos y el prototipo. El error en la medición se calculó utilizando la temperatura del patrón  $T_{patrón}$  y la temperatura registrada por el termopar  $T_{termopar}$  por medio de la siguiente ecuación:

$$\%Error = \frac{T_{patrón} - T_{termopar}}{T_{patrón}} \cdot 100 \quad (1)$$



**Figure 2 - Prototipo de vivienda con techo de concreto de 1m x 1m x 1m utilizado para realizar mediciones de temperatura.**

La adquisición de datos se realizó mediante una tarjeta Arduino Mega 2560 con 16 entradas analógicas y se utilizó el software Matlab para la codificación de datos. Para estimar la incertidumbre debido a factores ambientales aleatorios, es necesario obtener la mayor cantidad de datos experimentales bajo las mismas condiciones, por esta razón para la validación se registraron datos durante los meses de mayo y junio de 2015 en intervalos de 3 min.

Es importante mencionar que la simulación presentada en este trabajo corresponden a un día en particular 31 de agosto del 2016 con condiciones ambientales de la ciudad de Tuxtla Gutierrez, Chiapas en horarios de 6 a 20 hrs y en intervalos de 30 min, así el mejor valor para una hora específica será determinado por la media aritmética de las temperaturas registradas  $T_i$  a través de la siguiente fórmula:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

Debido el costo computacional y considerando que la tercera dimensión es muy grande, las simulaciones numéricas se realizaron en un dominio bidimensional  $\Omega$  que contiene una cavidad abierta donde se estudio el comportamiento de la dinámica de fluidos y la transferencia de calor. Las ecuaciones de conservación que describen el problema de un flujo turbulento, incompresible y Newtoniano en el interior de una cavidad abierta son la ecuación de cantidad de movimiento, la ecuación de continuidad y la ecuación de energía:

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{U_i' U_j'} \right] + B_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{U_j' T'} \right] \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores  $U$  representa la componente de velocidad,  $\rho$  es la densidad,  $P$  es la presión,  $\mu$  es la viscosidad dinámica,  $B_T$  es la fuerza de cuerpo,  $T$  es la temperatura y  $Pr$  es el número de Prandtl. En la ec. 2, se aplica la aproximación de Boussinesq:

$$B_T = -\rho_{ref} g_i \beta (T - T_{ref}) \quad (6)$$

En la expresión anterior  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica. De acuerdo con el modelo de viscosidad de remolino a través de la hipótesis de Boussinesq, el tensor de esfuerzos de Reynolds y el flujo de calor turbulento se aproximan como:

$$\rho \overline{U_i' U_j'} = -\mu_t \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\rho \overline{U_j' T'} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (8)$$

Donde  $Pr_t$  es el número de Prandtl turbulento y  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta dada por:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

La energía cinética turbulenta  $k$  y la rapidez de disipación de energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ , se calculan resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + G_k) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

En las ecuaciones anteriores  $P_k$  es la rapidez de producción de energía cinética turbulenta y  $G_k$  es la generación o destrucción de turbulencia debido a las fluctuaciones de las fuerzas de cuerpo.

Para incluir el flujo de calor por radiación se consideró que la energía total de radiación que sale de una superficie está dada por:

$$q_{sal} = \varepsilon^* \sigma T + \rho^* q_{ent} \quad (12)$$

En la ecuación anterior  $\varepsilon^*$  es la emisividad,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $\rho^*$  es la reflectividad. La radiación térmica entrante o irradiación se calculó como:

$$q_{ent} = \int q_{sal} dF \quad (13)$$

Siendo  $F$  el factor de forma. Por lo tanto, la transferencia neta de calor por radiación absorbida en una superficie puede expresarse como:

$$q_{rad} = q_{sal} - q_{en} \quad (14)$$

### 3. Resultados

Los resultados de las simulaciones presentadas a continuación corresponden al 31 de agosto del 2016. En la Fig. 3 se muestran los campos de temperatura para una habitación con techo de concreto y paredes de ladrillo rojo modeladas como una cavidad cuadrada abierta con una entrada y una salida de flujo en la parte superior. Los resultados que se muestran son para las 13:00 hrs con diferentes ángulos de inclinación del techo de concreto. En todas las simulaciones se puede observar que el techo es la componente arquitectónica más caliente y por lo tanto es la que más contribuye a las cargas térmicas hacia el interior de la cavidad. Debido a lo anterior resulta importante contar con estrategias que permitan alejar ese componente del resto del espacio donde las personas habitan con la finalidad de alcanzar el confort térmico. Para las 13:00 hrs la pared izquierda de la cavidad se encuentra a una mayor temperatura que la pared derecha debido a que la pared izquierda ya estuvo expuesta a los rayos del sol desde el amanecer mientras que la pared derecha estuvo a la sombra, sin embargo conforme van transcurriendo las horas la situación se invertirá y en algún momento la pared derecha comenzara a recibir directamente los rayos del sol mientras que la pared izquierda quedara bajo la sombra disminuyendo gradualmente su temperatura. En general las altas temperaturas dominan en la parte superior de la cavidad donde aire caliente se estratifica, cerca de la pared derecha se presentan las temperaturas más bajas mientras que en los alrededores de la pared izquierda se presentan las temperaturas intermedias, lo anterior debido a las condiciones de frontera aplicadas para las 13:00 hrs. Durante la tarde la temperatura tiende a uniformizarse debido a que por una parte la pared izquierda queda bajo la sombra mientras que la pared derecha recibe menor energía conforme van transcurriendo las horas de la tarde debido a la puesta del sol. El interior de la vivienda se calienta por el calor que transfiere por radiación el techo hacia las paredes las cuales calientan por convección al aire de la cavidad. Por otra parte, el flujo de aire entrante también transporta energía hacia el interior de la cavidad. Resultaría impráctico tratar de controlar el movimiento del fluido sobre la superficie interior del techo y las paredes, sin embargo lo que sí se puede hacer al momento de construir una vivienda es elegir un ángulo adecuado de inclinación del techo de tal manera que se minimice la radiación emitida por el techo, lo cual reduciría el calor liberado por las paredes hacia el aire de la vivienda mejorándose el confort térmico de las personas.

**Tabla 3 – Temperaturas máximas alcanzadas y su posición en x para una altura de y=3.5m en la vivienda a las 8:00 hrs.**

$\theta(^{\circ})$	x (m)	T (C)
0	2.00	25.87
5	2.00	25.83
10	2.00	25.70

15	2.01	25.44
20	2.01	25.34
25	2.02	25.25
30	2.02	25.18
35	2.02	25.09
40	2.02	25.03
45	2.03	24.97
50	2.03	24.92
55	2.03	24.88

En la Fig. 3a se presenta el caso para un techo plano es decir el ángulo de inclinación es  $\theta=0^{\circ}$ . La máxima temperatura para este caso es  $T_{\max}=56.281^{\circ}\text{C}$  y la temperatura promedio en el interior de la cavidad es  $T_p=38.035^{\circ}\text{C}$ . La Fig. 3b muestra el campo de temperatura para un techo con un ángulo de inclinación de  $\theta=10^{\circ}$ , siendo su temperatura máxima  $T_{\max}=55.725^{\circ}\text{C}$ , y su temperatura promedio  $T_p=36.519^{\circ}\text{C}$ . El campo de temperatura para el techo con un ángulo de inclinación de  $\theta=30^{\circ}$  se muestra en la Fig. 3c con temperaturas máximas y promedios de  $T_{\max}=55.231^{\circ}\text{C}$  y  $T_p=35.215^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. La Fig. 3d muestra el comportamiento de la temperatura en una habitación con un techo inclinado  $\theta=45^{\circ}$ , siendo su temperatura máxima  $T_{\max}=54.757^{\circ}\text{C}$  y su temperatura promedio  $T_p=34.373$ , respectivamente. La máxima temperatura ocurre sobre la superficie superior del techo, es decir, sobre la superficie expuesta a los rayos del sol. Para las 13:00 hrs, la mínima temperatura se presenta en la pared derecha debido a la condición de frontera de temperatura impuesta. Con la información anterior se puede establecer que el ángulo de inclinación del techo influye en las temperaturas alcanzadas en el aire interior de la cavidad impactando directamente en el confort térmico de la vivienda ya que la reducción de la temperatura promedio del aire en el interior de la cavidad es de aproximadamente  $3.8^{\circ}\text{C}$  cuando el ángulo de inclinación se varía de  $\theta=0^{\circ}$  a  $55^{\circ}$ .

**Tabla 4 – Temperaturas máximas alcanzadas y su posición en x para una altura de y=3.5m en la vivienda a las 13 hrs.**

$\theta(^{\circ})$	x (m)	T (C)
0	1.50	46.73
5	1.36	44.99
10	1.35	44.46
15	1.30	44.00
20	1.25	43.61
25	1.21	43.28
30	1.15	42.93
35	1.12	42.71
40	1.10	42.48
45	1.07	42.27
50	1.04	42.17
55	1.02	41.92

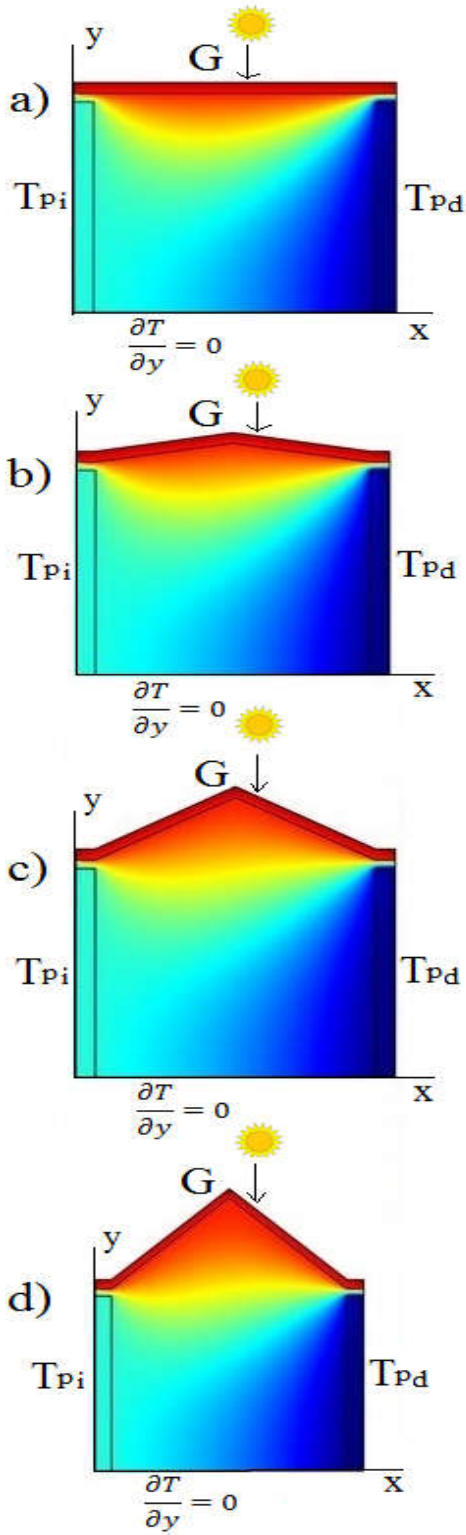


Figure 3 - Campo de temperatura para la vivienda simulada a las 13:00 hrs (a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=10^\circ$ ; (c)  $\theta=30^\circ$ ; (d)  $\theta=45^\circ$ .

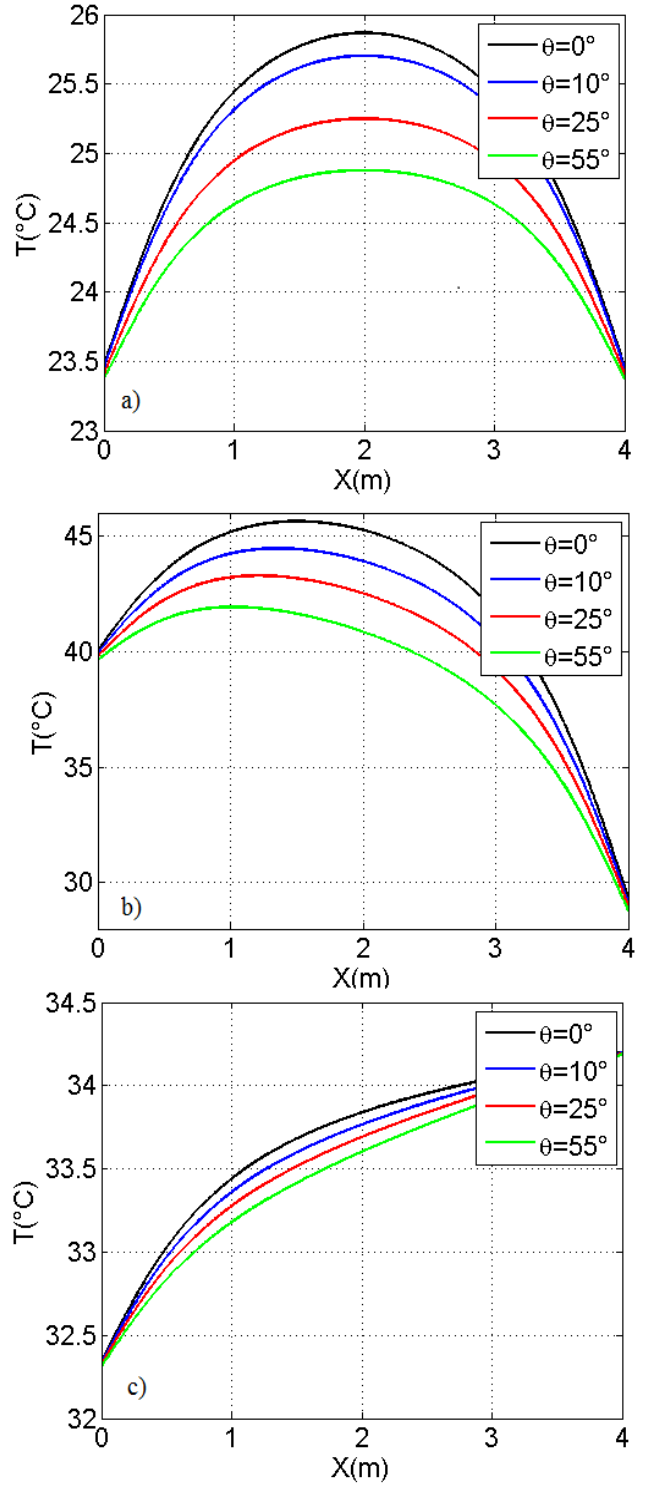


Figure 4 - Perfiles de temperatura a lo largo de una línea horizontal a una altura de  $y=3\text{m}$  (a) 8:00 hrs, altitud= $29.6^\circ$ , Azimut= $80.3^\circ$ ; (b) 13:00 hrs, altitud= $72.9^\circ$ , Azimut= $299.7^\circ$ ; (c) 18:00 hrs, altitud= $0.5^\circ$ , Azimut= $278.3^\circ$ .

En la Fig. 4 se muestran los perfiles de temperatura a lo largo de una línea horizontal a una altura de  $y=3$  m para tres diferentes horas del día y para viviendas con techos con diferentes ángulos de inclinación. En general se observa que las temperaturas al interior de la vivienda son menores conforme el ángulo de inclinación tiende a incrementarse. Para las diferentes horas del día el techo plano mantiene las temperaturas más elevadas al interior del espacio habitable, mientras que la vivienda con techo inclinado  $\theta=55^\circ$  alcanzó las temperaturas más bajas durante el transcurso del día. Lo anterior se debe a que el techo plano  $\theta=0^\circ$ , el cual contiene una gran cantidad de energía debido a su alta temperatura, se encuentra más próxima al espacio habitable, mientras que al aumentar el ángulo de inclinación el techo se aleja del espacio habitable reduciendo la temperatura al interior de la vivienda.

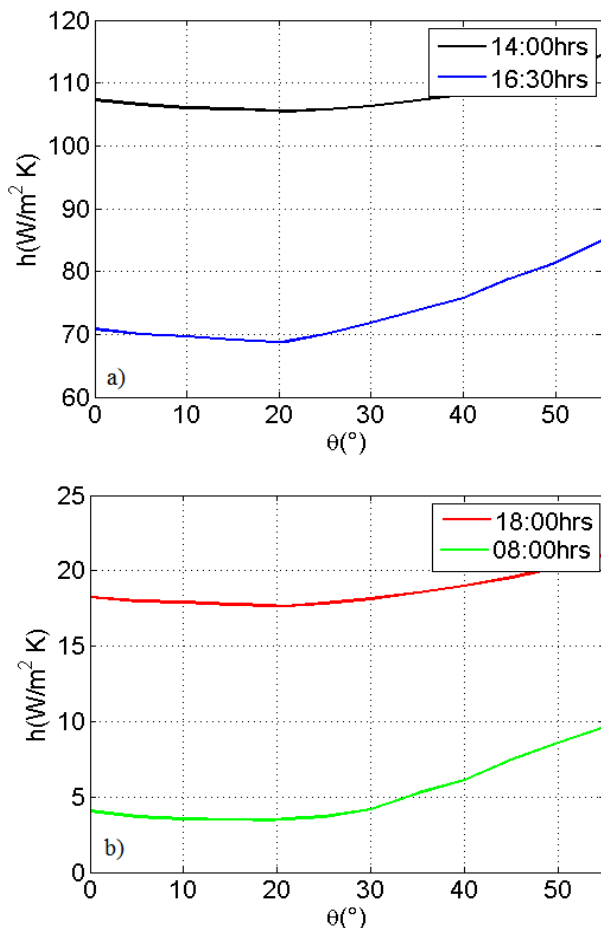


Figure 5 - Coeficientes de transferencia de calor en el interior del techo como función del ángulo de inclinación del techo (a) para las 14:00 y 16:30; (b) 8:00 y 18:00 hrs.

La Fig. 4a muestra los perfiles de temperatura a las 8:00 hrs. Para el techo plano  $\theta=0^\circ$ , la máxima temperatura es de  $25.8^\circ\text{C}$  y la mínima es de  $24.7^\circ\text{C}$  cuando  $\theta=55^\circ$ , habiendo una diferencia de  $1.1^\circ\text{C}$  al variar el ángulo de inclinación del techo. Los perfiles de temperatura para las 13:00 hrs se

muestran en la Fig. 4b, siendo la máxima temperatura de  $45.6^\circ\text{C}$  cuando  $\theta=0^\circ$  y la mínima de  $41.7^\circ\text{C}$  cuando  $\theta=55^\circ$ , en este caso la diferencia de temperatura al modificar el ángulo de inclinación del techo es de aproximadamente  $4^\circ\text{C}$ . La Fig. 4c muestra el comportamiento de la temperatura en el interior de la vivienda a las 20:00 hrs. Para esta hora del día el valor máximo de temperatura se presenta en la pared derecha de la vivienda debido a que estuvo expuesta a los rayos del sol durante la tarde del día mientras que la pared izquierda fue quedando gradualmente a la sombra. la diferencia máxima de temperatura en el interior de la vivienda es de  $0.4^\circ\text{C}$ . Lo anterior indica que el máximo efecto del ángulo de inclinación del techo se alcanza alrededor del medio día cuando las temperaturas son muy altas y se requeriría las máximas cargas de enfriamiento para mantener un espacio confortable en la vivienda. Por lo tanto, el hecho de construir viviendas con techos inclinados puede contribuir a reducir el consumo de energía y a conservar el medio ambiente. Durante las primeras horas del día y al atardecer los efectos del ángulo de inclinación del techo en la temperatura del interior de la vivienda son menores.

En la Tabla 3 se muestran las temperaturas máximas alcanzadas a una altura de  $y=3.5$  m para la vivienda a las 8:00 hrs los cuales confirman los valores del perfil de temperatura obtenido a esta hora. Los datos indican que a las 8:00 hrs el campo de temperatura es muy simétrico teniendo su máximo valor en  $x=2.0$  m, lo anterior se debe a que el aire en el interior de la vivienda se encuentra prácticamente en equilibrio térmico.

La Tabla 4 muestra las temperaturas máximas alcanzadas en  $y=3.5$  m para la vivienda a las 13:00 hrs. A esta hora del día las temperaturas alcanzadas al interior de la vivienda son muy altas y superiores a los  $40^\circ\text{C}$ . En este caso la simetría del campo de temperatura se pierde debido a los gradientes altos de temperatura en el interior de la cavidad provocada por la elevada temperatura del techo y las temperaturas registradas en las paredes derecha e izquierda de la vivienda.

Los coeficientes de calor en el techo para cuatro diferentes horas del día y diferentes ángulos de inclinación se muestran en la Fig. 5. En general se observa que el coeficiente de transferencia de calor tiene a reducirse ligeramente al aumentar el ángulo de inclinación sin embargo, para  $\theta>25^\circ$  el coeficiente de transferencia de calor comienza aumentar obteniéndose los valores más bajos para las 8:00 hrs y los valores más altos para las 14:00 hrs. El mínimo valor del coeficiente de transferencia de calor para las 6:00 hrs es de  $h=3.47\text{ W/m}^2\text{ K}$  y se obtiene cuando  $\theta=19.71^\circ$ . Para las 14:00 hrs el mínimo valor es de  $h=105\text{ W/m}^2\text{ K}$  y se obtiene cuando  $\theta=20.32^\circ$ . Para las 16:30 hrs el mínimo valor ocurre cuando  $\theta=20.51^\circ$  siendo su valor  $h=68.72\text{ W/m}^2\text{ K}$ . Para las 18:00 hrs el mínimo coeficiente de transferencia de calor es  $h=17.63\text{ W/m}^2\text{ K}$  y ocurre cuando  $\theta=20.86^\circ$ . A continuación se presentan las ecuaciones de los ajustes polinomiales que ajustan las curvas de la Fig. 5:

Para las 8:00 hrs



$$h = 0.00387\theta^2 - 0.10604\theta + 4.097 \quad (15)$$

Para las 18:00 hrs

$$h = 0.00227\theta^2 - 0.07463\theta + 18.287 \quad (16)$$

Para las 14:00 hrs

$$h = 0.00631\theta^2 - 0.23146\theta + 107.59 \quad (17)$$

Para las 16:30 hrs

$$h = 0.00994\theta^2 - 0.28331\theta + 70.896 \quad (18)$$

En las expresiones anteriores  $h$  esta dado en  $W/m^2 K$  y  $\theta$  esta dado en  $^\circ$ .

#### 4. Conclusión

En este trabajo se presentó la simulación numérica de la transferencia de calor en una vivienda con techo de concreto inclinado a diferentes ángulos, la cual se modeló como una cavidad abierta donde se presenta convección turbulenta. En las condiciones de frontera de temperatura se imponen valores de temperatura y radiación solar recopilados en la ciudad de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México para un día del mes de agosto del 2016. El uso de datos medidos experimentalmente permitió tomar en cuenta el movimiento del sol ya que durante las primeras horas del día una pared queda expuesta a la incidencia directa de los rayos sol mientras que la otra queda expuesta a la sombra, de tal manera que al transcurrir el día esta situación se invierte. La validación se realizó con resultados de convección turbulenta en una cavidad cuadrada reportada por otro investigador. Adicionalmente, se hicieron mediciones de temperatura en prototipos de vivienda con techo de concreto y se compararon contra las simulaciones numéricas, observándose muy buena concordancia. Las simulaciones numéricas permitieron obtener los perfiles de temperatura al interior de la cavidad para diferentes horas del día, así como los campos de temperatura, los coeficientes de transferencia de calor y sus correlaciones para diferentes ángulos de inclinación. Para la configuración estudiada, los resultados muestran que es posible reducir la temperatura promedio del aire en el interior de la cavidad hasta  $3.8^\circ C$  al inclinar el techo hasta  $\theta=55^\circ$ . Este efecto se debe principalmente a que al inclinar

el techo la fuente de calor se aleja del espacio habitable reduciendo su temperatura. Aunque las temperaturas alcanzadas  $T>34^\circ C$ , están por arriba de la zona de confort térmico la presente investigación es una motivación para seguir realizando investigación para utilizar técnicas pasivas de enfriamiento en vivienda que a su vez contribuyan al ahorro de energía y al cuidado del medio ambiente, además de que ofrece alternativas de solución a personas de bajos recursos que no tiene la capacidad económica de instalar sistemas de aire acondicionado.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen los apoyos otorgados por TNM-ITV, CONACYT, CONAGUA y PRODEP.

#### REFERENCIAS

- [1] N. A. Rodriguez, Z. C. Briceño, J. F. Hinojosa, Latin American Applied Research **43** (2013) 353.
- [2] M. Gijón-Rivera, J. Xamán, G. Alvarez, J. Serrano-Arellano, Building and Environment **68** (2012) 22.
- [3] T. Barahona, Evaluación de la tecnología de techos verdes como agentes ahorradores de energía en México. Tesis de licenciatura. UNAM (2011).
- [4] P. Trevisan, Utilización de técnicas alternativas en las viviendas sociales de Chiapas: Sistema Domotej + cubierta verde. Tesis de Maestría. UPC (2011).
- [5] P. Karava, T. Stathopoulos, A. K. Athienitis, Solar Energy **81** (2007) 20.
- [6] T. Kobayashi, M. Sandberg, H. Kotani, Leif Claesson, Building and Environment **45** (2010) 2734.
- [7] J. O. P. Cheung, C. Liu, Energy and Building **43** (2011) 1149.
- [8] J. Kindangen, G. Krauss, P. Depecker, Building and environment, Vol **32**, (1997) 1.
- [9] B. Mou, B. J. He, D. X. Zhao, K. W. Chau, Engineering Application of Computational Fluid Mechanics, Vol **11** (2017) 293.
- [10] N. M. Guirguis, A. A. A. El-Aziz, M. M. Nassief, Desalination, Vol **209** (2007) 190.
- [11] Y. S. Tian, T. G. Karayiannis, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol **43** (2000) 849.
- [12] Y. S. Tian, T. G. Karayiannis, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol **43** (2000) 867.
- [13] M. Aounallah, Y. Addad, S. Benhamadouche, O. Imine, L. Adjlout, D. Laurence, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol **50** (2007) 1683.
- [14] F. Ampofo, International Journal of Heat and fluid Flow, Vol **25** (2004) 103.