

SIMULACION TERMICA Y FLUIDODINAMICA DEL COMPORTAMIENTO DE UN MURO TROMBE APLICANDO EL METODO DE ELEMENTOS FINITO

S. Obregón, V. Molina¹, C. González, N. Salvo.

Universidad Nacional de Salta – Instituto de Energías no Convencionales (INENCO) – Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas – Avenida Bolivia 5150 - C.P. 4400 – Salta Tel. 54-387-4255424 – Fax 54-387-4255489

U.F.I.De.T Salta – Unidad de Formación e Investigación en Desarrollo Tecnológico Salta
Fragata Libertad 350

Tel: 54-387-4255888 Fax: 54-387-4252428

E-mail: obregon@inenco.net – molinav@inenco.net – gonzalec@inenco.net – nahuel@unsa.edu.ar

RESUMEN: El desarrollo y mejora de las técnicas de cálculo numérico, ha permitido desarrollar una serie de códigos numéricos que permiten la simulación de procesos donde el movimiento del aire se genere por variaciones de densidad. Tales programas deben considerar tanto la transferencia de energía como la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Si a este problema se le suma una situación de acumulación de energía en una parte del sistema, se contaría con una herramienta de diseño capaz de predecir fenómenos donde la conducción, acumulación y la dinámica de fluidos esten presentes. Este es el caso de por ejemplo, un muro “Trombe”. El presente trabajo muestra los resultados obtenidos de una simulación numérica de un muro colector-acumulador y predice una correlación para el coeficiente convectivo en el interior de un local.

Palabras clave: simulación, fluidos, convección natural, muro Trombe

INTRODUCCION

En el proceso de transferencia de energía entre un sólido y un fluido se denomina “convección”. Este fenómeno se caracteriza principalmente por el movimiento del fluido que es responsable de transportar la energía del sólido. El movimiento del fluido puede realizarse en forma natural o por acción de un agente externo. El primer caso se denomina “convección natural”, mientras que el segundo caso se llama “convección forzada”. La característica fundamental de los fenómenos convectivos, desde el punto de vista de las ecuaciones que lo rigen es que estas se encuentran acopladas. Por lo tanto el sistema de ecuaciones diferenciales que modelan el fenómeno resulta imposible de resolver mediante métodos analíticos, por tal motivo nos vemos en la necesidad de contar con otras herramientas que nos permitan obtener una solución de dichas ecuaciones.

Una forma de obtener una solución es aplicar métodos numéricos que brinden una solución aproximada al fenómeno. Un método que ha adquirido mucho auge en los últimos tiempos es el Método de Elementos Finitos (MEF). El MEF, es un método de aproximación de problemas continuos, donde el espacio físico se divide en un número finito de partes cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos, denominados nodos. Los nodos son los puntos de unión de cada elemento con su adyacente. El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante adecuadas funciones de interpolación. Por lo tanto un fenómeno de naturaleza continua se transforma en un modelo discreto.

Para implementar el MEF, básicamente se deben realizar tres operaciones básicas. En una primera etapa, se define la geometría y se la discretiza (pre-proceso), en esta etapa también se definen condiciones de contorno del problema como también las condiciones iniciales. Con respecto a las condiciones de contorno hay que tener en cuenta que estas pueden ser constantes o variables. Posteriormente se realiza una etapa de cálculo, donde se soluciona el sistema de ecuaciones resultantes de la etapa de discretización. Por último hay una etapa de post-proceso, donde se presentan los resultados.

Este método se aplicó al sistema constituido por un muro “Trombe” y una habitación. En la figura 1 se muestra un esquema del funcionamiento de un muro de este tipo. En la parte entre el vidrio y el muro propiamente dicho existe una cámara de aire, la que se calienta por acción del sol. Al calentarse el aire, disminuye su densidad y asciende, ingresando a la habitación por la ventana superior del muro. El aire de la habitación sale por la ventana inferior, estableciéndose una corriente ascendente en la parte del muro y una circulación descendente en la vivienda.

En la figura 2, se muestra la discretización realizada para aplicar el MEF. La malla de elementos finitos esta constituida por 7720 elementos triangulares y 3982 nodos. Además se consideró diferentes materiales de acuerdo a lo establecido en la leyenda de la figura. En la misma figura se muestran las zonas donde se aplicaron condiciones de contorno, identificadas por 1, 2 y 3.

¹ Docente e investigador de U.F.I.De.T – Salta.

Zona 1: Sobre la pared del muro Trombe, se impusieron condiciones de contorno variables en el tiempo, (ec. 1) esta zona tiene un aporte de energía proveniente del sol la que varía a lo largo del día.

Zona 2: Para el techo de la habitación se impuso ganancia y pérdida de energía, dependiendo de la hora de simulación (ec 2).

Zona 3: En la pared posterior se impuso una una pérdida variable en el tiempo (ec 3).

Zona 4: Para el piso de la habitación la condición es una pérdida variable que depende de la temperatura de la habitación (ec 4).

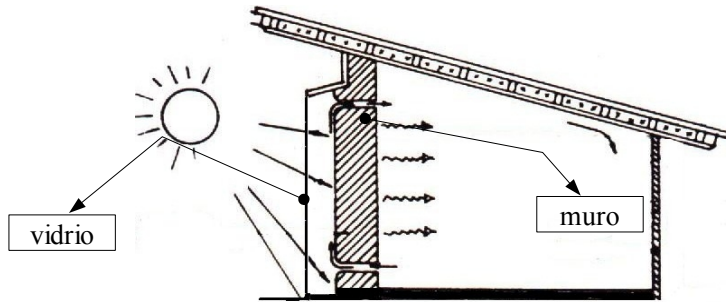


Figura 1: Esquema de funcionamiento de un muro "Trombe"

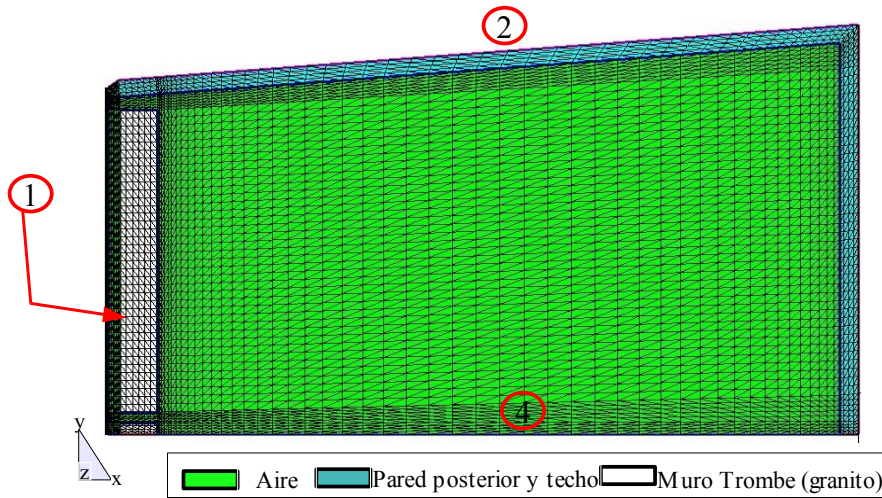


Figura 2: Malla de elementos finitos y condiciones de contorno.

Las condiciones de borde para el muro se representan con las siguientes ecuaciones:

$$t < 43200s \rightarrow [700w/m^2 * \text{sen}\left(\frac{\pi t}{43200}\right) - 2 W/m^2 T_m + 30 W/m^2 * \text{sen}\left(\frac{\pi t}{43200}\right) + 10W/m^2]$$

$$t > 43200s \rightarrow -2 W/m^2 (T_m - 5)$$

Ecuación 1: condición de borde sobre la cara exterior del muro Trombe

$$t < 43200s \rightarrow [300 W/m^2 * \text{sen}\left(\frac{\pi t}{43200}\right) - 1 W/m^2 T_m + 15 W/m^2 * \text{sen}\left(\frac{\pi t}{43200}\right) + 5 W/m^2]$$

$$t > 43200 \rightarrow -1 W/m^2 (T_m - 5)$$

Ecuación 2: condición de contorno sobre el techo de la vivienda

$$t < 43200 \rightarrow [-\left(\frac{1}{2}\right)W/m^2 T_m + 7,5 W/m^2 \text{sen}\left(\frac{\pi t}{43200}\right) + 2,5 W/m^2]$$

$$t > 43200 \rightarrow -\left(\frac{1}{2}\right)W/m^2 (T_m - 5)$$

Ecuación 3: condición de pérdida de energía en pared sin radiación

$$-(1/2)W/m^2 (T_m - 10)$$

Ecuación 4: perdida de energía en piso

El problema se representa por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales que sumadas las condiciones anteriores ,

suponiendo además como condiciones iniciales para la temperatura y velocidad de $T = 10^\circ \text{C}$ y $\mathbf{u} = 0$.

$$\begin{aligned}
 & \text{ecuacion de continuidad } \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \mathbf{u} \text{ campo de velocidad} \\
 & \text{Ecuacion de Navier Stoke} \\
 & \rho [\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + 2 \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}] - 2 \nabla \cdot [\boldsymbol{\tau}_R + \mu \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})] + \nabla P + \sigma \mathbf{u} + \rho \beta \mathbf{g} \vartheta = \rho \mathbf{f} \\
 & \mathbf{f} = \mathbf{g} + \beta \mathbf{g} \vartheta_0 \text{ fuerzas volumetricas} \\
 & \boldsymbol{\tau}_R = \mu_t \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \quad \mu_t = \text{viscosidad de remolino} \\
 & \vartheta \text{ Temperatura} \\
 & \text{Ecuacion de conservacion de Energia} \\
 & \rho C_p [\partial_t \vartheta + \mathbf{u} \cdot \nabla \vartheta] - \nabla \cdot [\kappa \nabla \vartheta] = S \quad S = \text{fuente o sumidero} \\
 & \text{Modelo de Viscosidad cinematica Turbulenta de Smagorinsky} \\
 & \nu_t = C h^2 \sqrt{2 \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \quad C \text{ Constante experimental} \quad h \text{ Tamaño del Elemento}
 \end{aligned}$$

La elección del modelo de viscosidad turbulenta de Smagorinsky se debe a los resultados obtenidos en un trabajo precedente sobre transferencia de calor en recintos cerrados publicado en ASADES 2005 en el cual se corroboraban resultados experimentales (Obregón et al 2005).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos sobre el comportamiento fluidodinámico y térmico del habitáculo se representan en valores de velocidad y temperatura. Los datos se analizan tanto en forma espacial como temporal. La simulación corresponde a un día completo iniciando a las 8 de la mañana ($t = 0\text{s}$) y finalizando a la misma hora del día siguiente ($t = 86400\text{s}$). En las figuras 3 (3 hs), 4 (12 hs) y 5 (24 hs) se puede observar la distribución de velocidad del aire para diferentes tiempos. Ellas muestran claramente núcleos de recirculación en toda la habitación a medida que avanza el tiempo. Es notable en las figuras 4 y 5 la influencia de la pared fría del otro lado del recinto que genera un enfriamiento abrupto del aire en las inmediaciones de la pared, haciendo que aumenta la velocidad de descenso del aire.

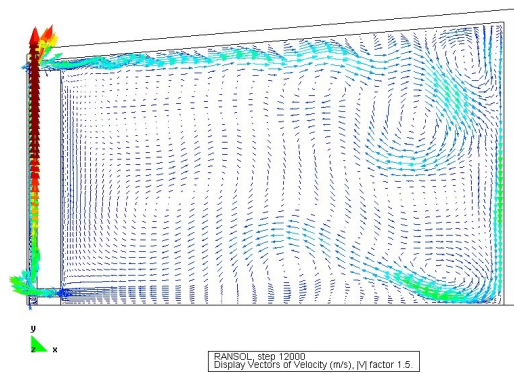


Figura 3: velocidad para $t = 12000 \text{ s}$ (3hs)

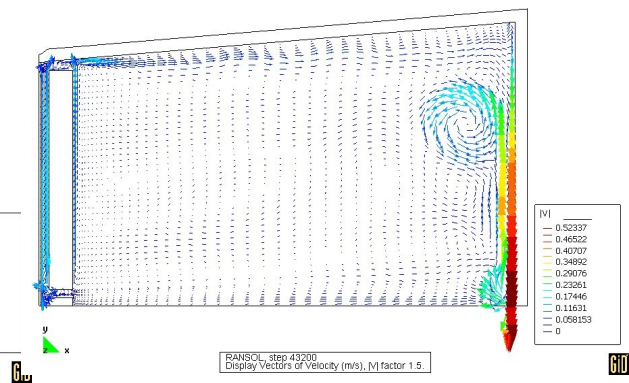


Figura 4: velocidad para $t = 43200 \text{ s}$ (12 hs)

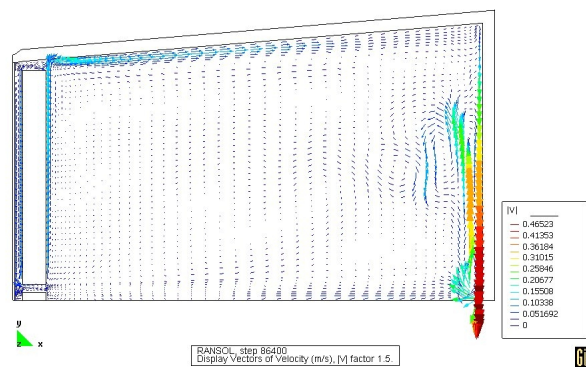


Figura 5: velocidad para $t = 86400\text{s}$ (24 hs)

Para los mismos tiempos de las figuras anteriores, se muestran en las figuras 6, 7 y 8 la distribución de temperatura dentro del recinto y en el muro Trombe propiamente dicho.

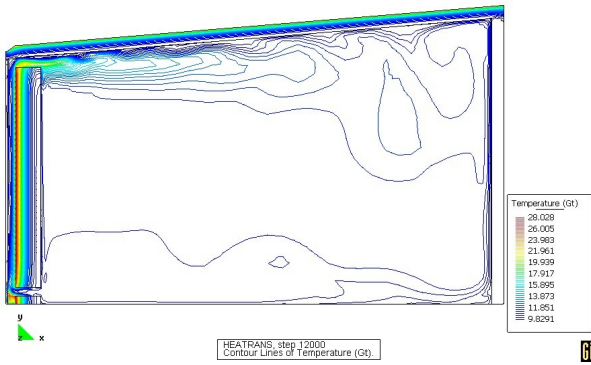


Figura 6: temperatura para $t = 12000$ s (3hs)



Figura 7: temperatura para $t = 43200$ s (12hs)

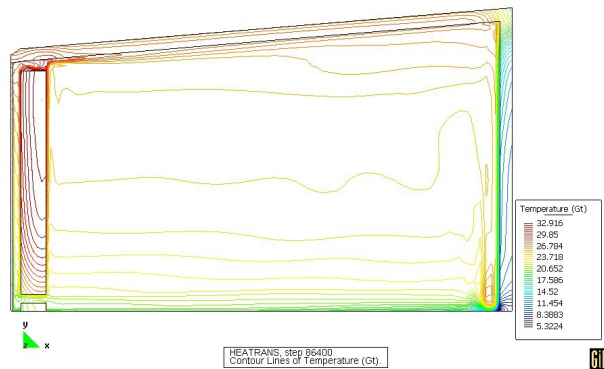


Figura 8: temperatura para $t = 86400$ s

Las diferentes gráficas que se muestran a continuación están referidas a diferentes nodos. Un esquema de la posición de estos se puede observar en la figura 9. En ella se representa el número del nodo de la malla de elementos finitos y las coordenadas de los mismos se detallan en la tabla 1. El origen del eje de coordenadas a las cuales estas están referidas se encuentra en la parte inferior izquierda del diagrama.

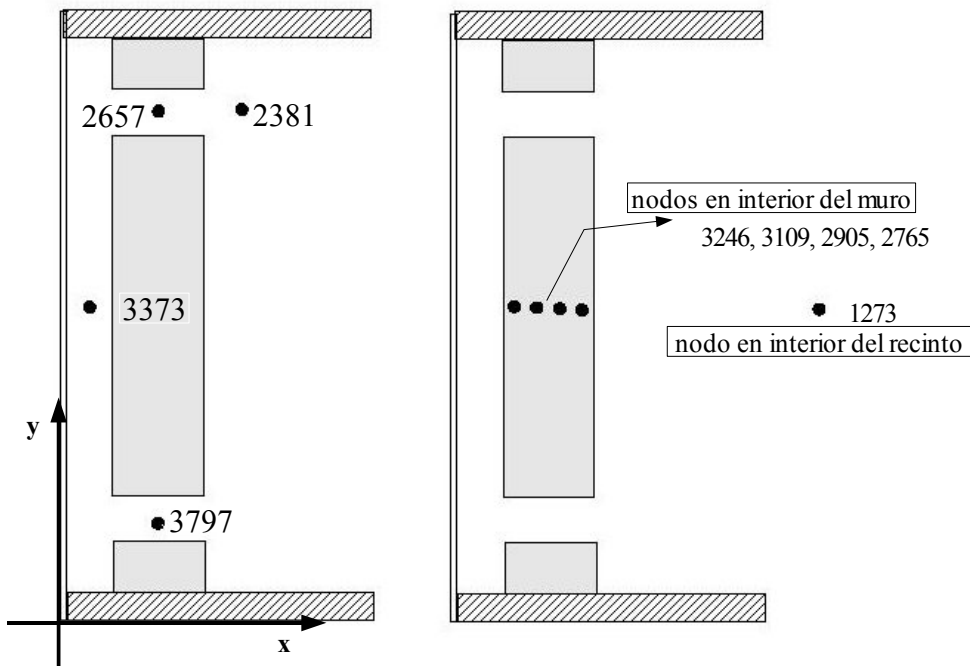


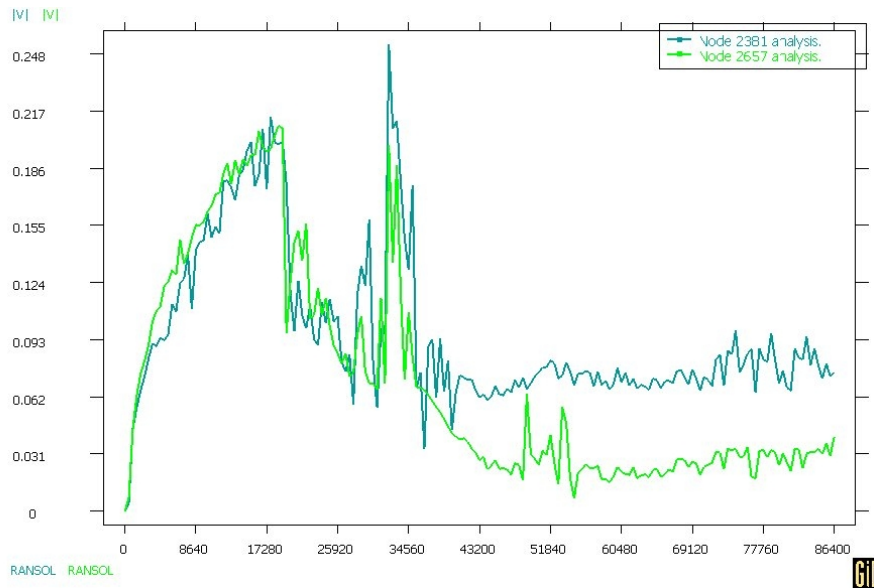
Figura 9: disposición espacial de nodos analizados, los números corresponden a los números de cada nodo en la malla.

Para todas la gráficas el origen del tiempo es el mismo que el de las figuras anteriores. Las unidades de los ejes verticales son m/s para velocidad y $^{\circ}\text{C}$ para la temperatura.

nodo	coordenada x [m]	coordenada y [m]	nodo	coordenada x [m]	coordenada y [m]
2381	0,585	2,977	3246	0,200	1,834
2657	0,35	2,96	3109	0,300	1,834
3373	0,157	1,621	2905	0,400	1,834
3797	0,350	0,140	2765	0,500	1,834

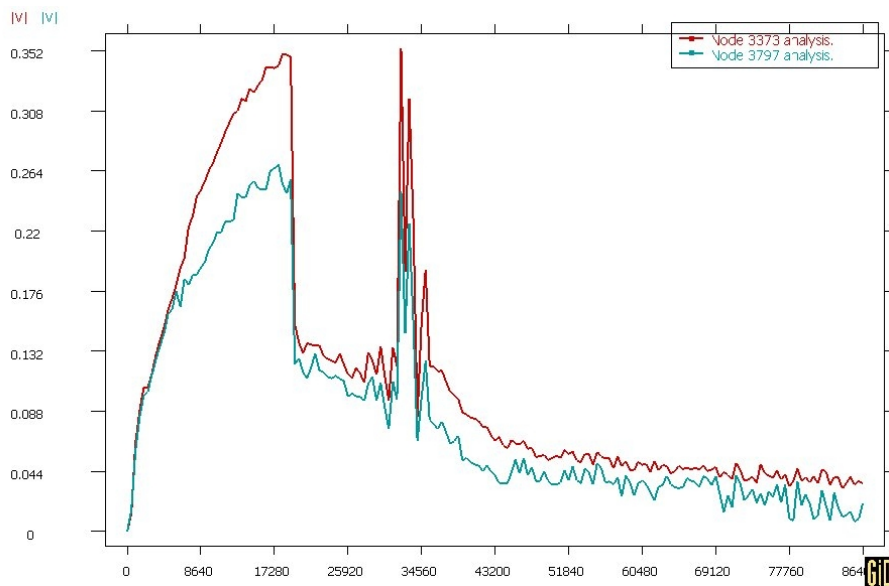
Tabla 1: coordenadas de nodos

En la gráfica 1 se muestra los valores de velocidad en función del tiempo para los dos nodos superiores; 2657 y 2381 y en la gráfica 2 las mismas variables para los nodos 3797 y 3373. El programa predice para todos estos nodos un aumento de la velocidad en estos puntos en los primeros instantes de tiempo, hasta los 17280 s (4 horas después de iniciado el proceso – aproximadamente las 12 hs del mediodía).



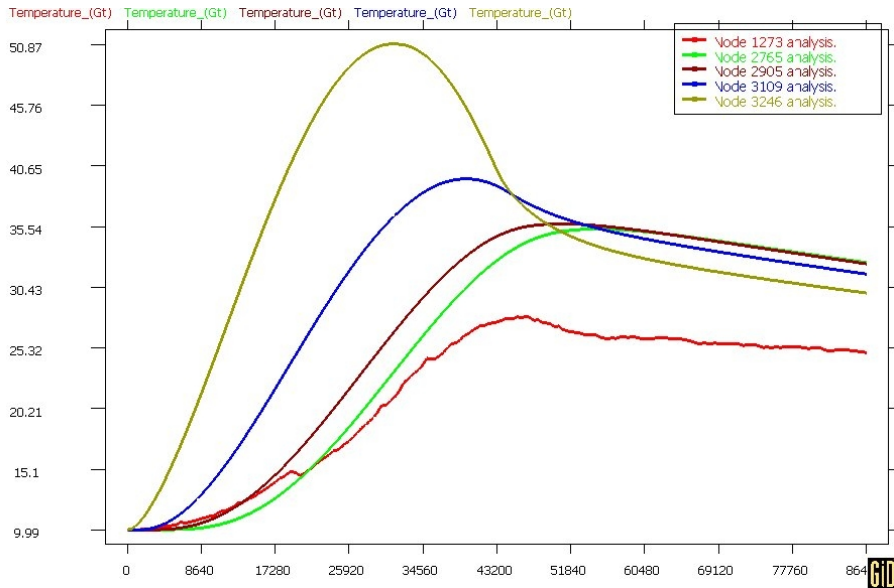
Gráfica 1: valores de velocidad en función del tiempo, nodos 2381 y 2657

Entre este tiempo y los 43200 s, (12 horas después de iniciado el proceso – aproximadamente las 20 hs) la simulación predice un cambio abrupto de las condiciones fluidodinámicas de estos nodos. tanto para el aire que ingresa al recinto como para el que ingresa por la ventanilla inferior del Trombe. Para este intervalo de tiempo (17280s y 43200s) el muro esta casi en estado estacionario o sea la onda térmica ya llego a la parte interior del muro (del lado de la habitación). Esto se puede apreciar correctamente e la gráfica 3, para este intervalo de tiempo.



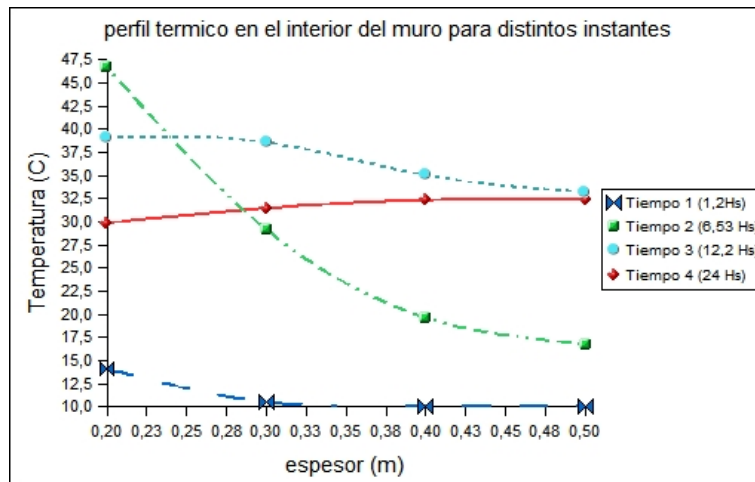
Gráfica 2: valores de velocidad en función del tiempo, nodos 3797 y 3373

Por otro lado después de esta situación transitoria en ambas gráficas se establece un estado casi estacionario. En el caso del nodo 2381 la velocidad mantiene un valor mayor que el nodo que esta en el interior de la ventanilla superior (nodo 2657). Esto se explica a partir de que como la onda térmica llega al interior del muro, las capas de fluido adyacentes comienzan a moverse, ascendiendo y por lo tanto aumentando la velocidad del fluido en el nodo en cuestión.

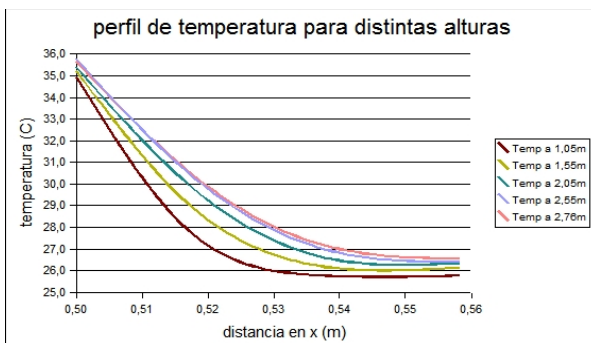


Gráfica 3: Valores de temperatura en función de t para diferentes puntos del muro y para el interior del recinto.

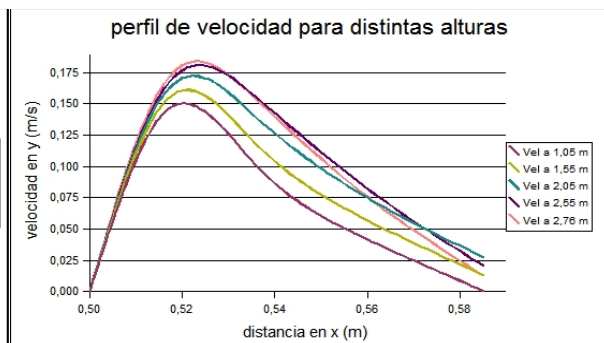
En las gráficas 4, se muestra como varía la temperatura en el interior del muro a medida que cambia el tiempo de simulación. El programa predice correctamente el comportamiento térmico de ellos. En este caso se consideraron los nodos mostrados en la figura 9 y queda claro el avance del flujo de energía.



Gráfica 4: Valores de temperatura en función del espesor para diferentes tiempos.

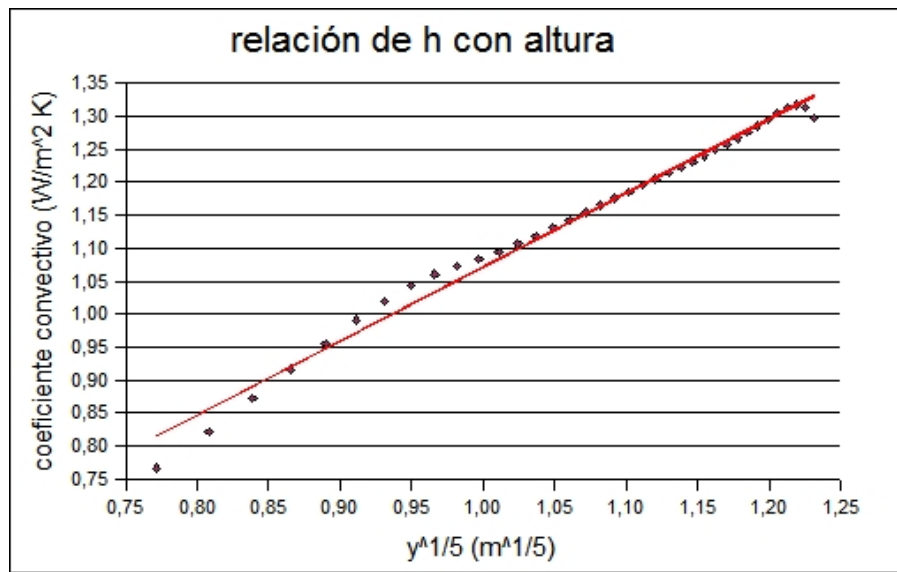


Gráfica 5: Temperatura en función del espesor para diferentes alturas



Gráfica 6: Velocidad en función del espesor para diferentes alturas

Las gráficas 5 y 6 muestran distribución de temperatura y velocidad para todos aquellos nodos que se encuentran pegados al muro pero dentro de la habitación para $t = 52320s$, aproximadamente 15 horas después de iniciado el proceso (durante la noche). Se aprecia claramente el calentamiento del recinto por efecto de la convección natural que se establece en el interior.



Gráfica 7: coeficiente convectivo del muro hacia el interior del recinto.

En la gráfica 7 puede observarse la variación del coeficiente convectivo h , en función de la altura. Para estimar h se utilizaron correlaciones para placas planas verticales, con convección natural. De acuerdo a la bibliografía consultada la correlación propuesta por Eckert (1950) es válida para:

$$Nu_L = 0,555 (Gr Pr)^{1/4} \text{ para } Gr Pr < 10^9$$

$$Nu_L = 0,0210 (Gr Pr)^{2/5} \text{ para } Gr Pr > 10^9$$

Para los datos que resultaban de la simulación $Gr Pr > 10^9$ por lo tanto operando con lo que representa cada número adimensional se obtiene para el coeficiente convectivo una relación con la altura elevada al exponente 1/5. De esta forma se ajustaron los valores para los nodos que se encuentran en el recinto, adyacentes al muro y a lo largo de toda su longitud vertical. Se obtuvo para la correlación la siguiente ecuación:

$$h = 1,122 y^{1/5} - 0,05$$

con un coeficiente de correlación de $R = 0,9939$. El coeficiente convectivo medio se calculó a partir de integrar la ecuación anterior obteniéndose un valor de:

$$\bar{h} = 1,09 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Este valor sería para todo el muro Trombe por unidad de superficie. Este valor del coeficiente convectivo deberá ser validado a partir de experiencias, pero da una idea de la energía entregada al recinto por unidad de tiempo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron diferentes resultados provenientes de una simulación numérica del comportamiento térmico y fluidodinámico de un muro “Trombe”. A través de un modelo sencillo se muestran las características del comportamiento del muro considerando la forma funcional de correlaciones para placas planas verticales con calentamiento uniforme y se obtiene una correlación no lineal para el lado del muro que mira al recinto en función del número de Nusselt y de número de Grashof. Las propiedades físicas de los materiales que constituyen el sistema, fueron tomadas de valores tabulados.

Los resultados obtenidos muestran que el programa predice la distribución de temperatura, tanto en el muro propiamente dicho como en el interior del recinto. Si bien el tiempo simulado alcanza un día completo (24 hs.) iniciando a las 8 de la mañana y finalizando a las 8 hs del día siguiente, este tiempo puede extenderse a varios días consecutivos a partir de cambiar las condiciones de inicio y finalización de la simulación. Cabe aclarar que el tiempo de simulación no es equivalente al tiempo simulado. Debe entenderse como tiempo simulado al espacio temporal en el cual se resuelven las ecuaciones y tiempo de simulación al tiempo que invierte la computadora en realizar todos los cálculos. Por lo general el tiempo simulado es mucho menor que el tiempo de simulación, sobre todo cuando se trata de modelizar fenómenos donde intervienen muchas variables como la presentada.

La simulación contempla condiciones de contorno variables con el tiempo (tiempo simulado) tanto para las pérdidas como para la ganancia de energía. Para la ganancia de energía se consideró la radiación que efectivamente recibe la pared del lado del vidrio.

En la definición del problema propiamente dicho, pueden suponerse valores diferentes tanto de las variables físicas como del diseño del habitáculo adyacente al muro, lo que permite obtener una aproximación del funcionamiento del sistema de calentamiento pasivo en una etapa de prediseño. Restaría considerar para trabajos futuros más de una habitación e intentar simular estos sistemas en su totalidad considerando calentamiento a partir de muros Trombe.

REFERENCIAS

Mermet A, Lesino G. "Modelización desarrollo y ensayo de calentadores solares de aire para ventilación en aulas. (Evaluación del confort bioambiental en aulas de escuelas primarias) Tesis Doctoral

ObregonS, Molina V, Salvo N. (2005) "Simulación de fenómenos de convección natural en recintos cerrados" Averma Vol 9. Capítulo 8 pp 08-85, 08-90.

Incropera F. De Witt D. (1999) "Fundamentos de transferencia de Calor" Pearson Educación SA – ISBN 970-17-0170-4

Welty J. (1996) "Transferencia de calor aplicada a la ingeniería" – Limusa S.A. ISBN 968-18-0628-X

ABSTRACT: The development and improvement of the technologies of numerical calculation, it has allowed to develop a series of numerical codes that allow the process simulation where the movement of the air is generated by variations of density. Such programs must consider both the transference of energy and the solution of Navier-Stokes's equations. If to this problem there adds a situation of accumulation of energy in a part of the system, one would possess a tool of design capable of predicting phenomena where the conduction, accumulation and the dynamics of fluids are present. This one is the case of for example, a wall "Trombe". The present work collector – accumulator shows the results obtained of a numerical simulation of a wall and predice a correlation for the coefficient of convection inside a place.

Keyword: simulation, fluids, natural convection, wall Trombe