

EVITA: Computational model for evaluating buildings thermal efficiency

Nastia Almao, José Rincón and Eduardo González*

*Laboratorio de Simulación Computacional, Departamento de Energía
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería*

**Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura, IFA
Universidad del Zulia, Apartado 526. Maracaibo 4011, Venezuela
e-mail jrincon@luz.ve*

Abstract

In this paper the details of a two-dimensional computational model named "EVITA" are presented. It has been developed to simulate and evaluate the thermal performance of a building section. The model is based on the finite volume approach, with a collocated arrangement of variables, and a bounded high order treatment of the convective terms. The algorithm used to solve the two-dimensional transient form of the coupled equations of Continuity, Momentum and Energy is a PISO-like scheme. The calculation domain is a rectangular section of a construction over which the grid is built, such that it considers any material composition for walls, roof and floor, under transient boundary conditions: ambient temperature, relative humidity, global irradiance on the envelope, long wave radiative exchange between external surfaces and sky, soil temperature and the average wind velocity. The convective motion of the air inside the section is simulated using the Boussinesq approximation. With the inherent restrictions of a two-dimensional analysis, this model has been validated, and therefore, it can be considered as a high precision tool to make building thermal performance simulations.

Key words: Thermal performance, building, passive cooling, computational model.

EVITA: Modelo computacional para la evaluación de viviendas térmicamente adaptadas

Resumen

En este trabajo se presentan los detalles del modelo computacional bidimensional AEVITA®, diseñado para simular y evaluar el comportamiento térmico de una sección de vivienda. El modelo está basado en el método de los volúmenes finitos, con un arreglo colocado de variables, y tratamiento acotado de alto orden para los términos convectivos. El algoritmo usado para resolver la forma transitoria bidimensional de las ecuaciones acopladas de Continuidad, Cantidad de Movimiento y Energía es similar al esquema PISO. El dominio de cálculo son secciones rectangulares de una edificación sobre la cual se construye la malla, de tal forma, que considere cualquier composición de materiales para las paredes, techo y piso; bajo condiciones transitorias de contorno, tales como, la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar global sobre las superficies (período de asoleamiento), intercambio radiativo de onda larga entre las superficies externas y el cielo (período de asoleamiento y no asoleamiento), temperatura del suelo y la velocidad promedio del viento. El movimiento convectivo del aire contenido en el interior de la sección es modelado utilizando la aproximación de Boussinesq. Con las limitaciones propias de un análisis bidimensional, este modelo ha sido validado, y por lo tanto, puede considerarse una herramienta de simulación de comportamiento térmico de alta precisión.

Palabras clave: Comportamiento térmico, vivienda, enfriamiento pasivo, modelo computacional.

Introducción

Evaluar el comportamiento térmico de una edificación bajo las condiciones fluctuantes del clima al cual estará expuesta, es de gran importancia cuando se está diseñando viviendas donde el bienestar térmico y el ahorro de energía son las premisas fundamentales. Una alternativa precisa para esta evaluación es el uso de modelos computacionales que tomen en cuenta los parámetros más importantes, que permitan, de una manera económica y rápida, estudiar las diferentes alternativas aplicables a una situación dada, y con los cuales se puedan realizar estudios paramétricos y de optimización. Los autores de este trabajo han venido trabajando desde hace algún tiempo en esta dirección. Se han realizado modelos computacionales [1] y experimentales [2], para tratar de demostrar que es posible reducir la temperatura interior de una edificación utilizando técnicas de enfriamiento pasivo, y tomando en cuenta las condiciones climáticas locales. El código computacional EVITA se presenta como el estado del arte en lo que se refiere a predicción de comportamiento térmico de edificaciones ya que se han incorporado los últimos avances computacionales en el área de dinámica de fluidos y transferencia de calor [3]. Es un modelo bidimensional basado en el método de los volúmenes finitos, con malla no desplazada, y tratamiento acotado de alto orden de los términos convectivos. Un algoritmo de solución similar al algoritmo PISO [4] es usado para resolver la forma transitoria bidimensional de las ecuaciones acopladas de Continuidad, Cantidad de Movimiento y Energía. Por otro lado, sus resultados han sido comparados con datos experimentales registrados en módulos construidos a escala natural, para la evaluación y caracterización de sistemas pasivos de enfriamiento "SPE" [5], obteniéndose en todos los casos considerados, una máxima desviación en temperatura interior del 6% (1.85 K) y un máximo error medio del orden del 2%, lo cual muestra una muy buena concordancia, a pesar de su naturaleza bidimensional. A diferencia de otros códigos de bajo nivel basados en correlaciones y aproximaciones unidimensionales que han venido utilizándose para evaluar la respuesta térmica de diferentes técnicas de enfriamiento pasivo [6,7,8,9], en EVITA se han introducido las ecuaciones y consideraciones necesarias para tomar en cuenta la implementación de las técnicas más usuales de enfriamiento pasivo. Como realiza simulaciones utilizando DFC (Dinámica de Fluidos Computacional), es posible determinar el campo de temperaturas y velocidades en cada instante de tiempo convenientemente especificado, así como los flujos de calor a través de las superficies exteriores u otras superficies de interés. Para propósitos de investigar acerca de las diferentes alternativas de SPE que podrían aplicarse en Venezuela, es más conveniente tener un código desarrollado en casa que utilizar un código comercial, donde no se tiene acceso a la parte central del mismo, ni puede permanentemente adaptarse a las nuevas situaciones.

ciones y consideraciones necesarias para tomar en cuenta la implementación de las técnicas más usuales de enfriamiento pasivo. Como realiza simulaciones utilizando DFC (Dinámica de Fluidos Computacional), es posible determinar el campo de temperaturas y velocidades en cada instante de tiempo convenientemente especificado, así como los flujos de calor a través de las superficies exteriores u otras superficies de interés. Para propósitos de investigar acerca de las diferentes alternativas de SPE que podrían aplicarse en Venezuela, es más conveniente tener un código desarrollado en casa que utilizar un código comercial, donde no se tiene acceso a la parte central del mismo, ni puede permanentemente adaptarse a las nuevas situaciones.

Detalles Numéricos del Código EVITA

Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones que gobiernan el problema conjugado de flujo de fluido y transferencia de calor son las ecuaciones transitorias bidimensionales de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, aplicadas a un fluido no isotérmico, viscoso e incompresible con propiedades físicas constantes, las cuales vienen dadas por:

Cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \bar{g} \quad (1)$$

Energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T + \frac{s}{\rho c_p} \quad (2)$$

Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \rho = 0 \quad (3)$$

Estas ecuaciones de conservación se pueden escribir como una ecuación diferencial general [10], de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \phi = \Gamma_\phi \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (4)$$

donde: ϕ es la variable dependiente de interés, Γ_ϕ es el coeficiente de difusión correspondiente a la

variable ϕ en consideración, y S_ϕ es el término fuente.

El método de solución está basado en la aproximación de los volúmenes finitos, y las ecuaciones se reducen a un conjunto de ecuaciones algebraicas discretizadas, cuya forma general es:

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5)$$

donde "a" son los coeficientes, ϕ la variable en cada posición nodal de la malla y "b", es el término independiente que incluye parte del término fuente linealizado y el valor de ϕ en el paso de tiempo anterior. El subíndice "nb" indica nodos vecinos. Esta ecuación establece que el valor de una variable ϕ_p es función de las magnitudes que pueda tener ϕ en los nodos vecinos que rodean al punto nodal p .

El dominio de cálculo es una sección rectangular de una edificación sobre la cual se construye la malla, de tal forma, que considere cualquier composición de materiales para las paredes, techo y piso; bajo condiciones transitorias de contorno.

Los términos convectivos son discretizados utilizando un esquema de alto orden, desarrollado con asistencia del diagrama de Variables Normalizadas. Este esquema asegura acotamiento, buena exactitud y estabilidad, y está bien descrito en Rincón [11]. Los términos difusivos son aproximados usando diferencias centrales. El método iterativo de solución de las ecuaciones algebraicas lineales utiliza el TDMA (Algoritmo de la matriz tridiagonal), combinado con un barrido línea a línea, un esquema de corrección en bloque [10], y un procedimiento completamente implícito de marcha en el tiempo.

Condiciones de contorno

En la evaluación de comportamiento térmico de edificaciones y SPE, se tienen como condición de contorno: flujos de calor en todos los bordes, excepto en el piso, donde se especifica el valor de la temperatura del suelo. En paredes y techo se tienen flujos de calor radiante solar, flujo de calor por convección debido al viento, intercambio radiativo de onda larga entre las superficies y el cielo, y para los sistemas pasivos consi-

derados, adicionalmente se tiene sobre el techo, transferencia de calor por evaporación o condensación de agua e intercambio radiativo entre dos placas paralelas.

Como el modelo computacional fue concebido básicamente para estudios comparativos, sólo se considera un modelo algebraico simple de turbulencia para el flujo de aire interior (Prandtl/van Driest), similar al usado por Patankar *et al.* [12]. No se toma en cuenta el intercambio radiativo entre las superficies interiores de paredes, piso y techo. El efecto de la infiltración y cambios de aire se puede introducir como una carga térmica por unidad de volumen, a través de los términos fuentes de los nodos ubicados en el espacio ocupado por el aire interior, o permitiendo entradas y salidas de aire a través de aberturas. En trabajos futuros se presentará el modelo 3D para estudios más detallados.

Como sólo se está considerando la carga térmica a través del piso y superficies exteriores, y el movimiento del aire interior por diferencias de densidades, las condiciones de contorno involucran:

- Funciones dependientes del tiempo de temperatura ambiente e irradiancia global sobre superficies horizontales y verticales orientadas, cuyo modelaje se realiza dependiendo de que existan o no datos promedio horarios medidos. En el primer caso, el programa interpola entre los valores dados para cada hora; y en el segundo caso, estas funciones se modelan de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Almao [13]. El valor instantáneo de estas variables sirven de base para el cálculo de los flujos de calor por convección, radiación y evaporación.
- Valores promedio de la velocidad del viento y valores promedio horario de la humedad relativa, correspondientes al mes o día durante el cual se realiza la simulación.
- Propiedades ópticas y térmicas constantes de los materiales de construcción.
- Temperatura del subsuelo.

Linealización de los flujos de calor

Tal y como se mencionó antes, en los contornos del dominio existen flujos de calor; por convección debido al viento, por radiación desde

el sol, y por radiación entre las superficies y el cielo, todos variando con respecto al tiempo; y en el caso de la evaluación de SPE puede existir, además de los tres flujos ya mencionados, transferencia de calor por evaporación de agua del pozo en el techo e intercambio radiativo entre superficies paralelas. De todos estos flujos de calor, el único que varía linealmente con la temperatura desconocida del contorno es el convectivo. Los otros flujos requieren ser linealizados con la misma estructura del término fuente, pero por unidad de área, y actualizados en cada iteración:

$$S = S_p \phi_p + S_c \quad (6)$$

donde S_p y S_c son coeficientes a determinar, dependiendo del modo de transferencia de calor a considerar. Para linealizar estos flujos de calor se aplica el método de la tangente a la curva de transferencia de calor vs temperatura, recomendado por Patankar [14].

Flujos de calor en la superficie del techo

Cuando no se está considerando un SPE, el flujo de calor en la superficie del techo viene dada por:

$$Q_B = Q_{conv} + Q_{sol} + Q_{rsc} \quad (7)$$

donde, Q_{conv} es la transferencia de calor por convección debido al viento, Q_{sol} es el flujo de calor radiante que absorbe la superficie expuesta, y Q_{rsc} es el intercambio radiativo superficie-cielo. Las expresiones para cada uno de estos flujos son, respectivamente:

$$Q_{conv} = h_w (T_{amb}(t) - T_B(t)) \quad (8)$$

$$Q_{sol} = \alpha I_2 \quad (9)$$

$$Q_{rsc} = \epsilon_s \sigma ((T_c^4(t) - T_B^4(t))) \quad (10)$$

siendo h_w el coeficiente convectivo debido al viento, determinado, según Clark [15] como:

$$h_w = 2.839 + 3.833 v, \quad (11)$$

siendo v la velocidad del viento en m/s, $T_{amb}(t)$ es la temperatura ambiente que varía con el tiempo, $T_B(t)$ es la temperatura de la superficie del contorno, αI_2 es la radiación solar instantánea absorbida por la superficie (α absorptividad), ϵ_s es la emisividad de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzman, y $T_c(t)$ es la temperatura del cielo en K. Esta última se determina como una función de la emisividad del cielo, que a su vez, depende de la temperatura de rocío TDP del aire atmosférico [16]:

$$T_c = T_{amb}(0.8 + ((TDP - 273.)/250))^{0.25} \quad (12)$$

El cálculo de la temperatura de rocío requiere conocer la presión parcial del vapor de agua en el aire atmosférico, la cual es función de la humedad relativa HR, que a su vez varía durante el día. Cuando se dispone de datos horarios medidos de humedad relativa, ésta se toma constante para cada hora, permitiendo determinar la presión parcial del vapor de agua en cada hora. Una vez obtenida, debe determinarse la temperatura de saturación correspondiente. Esto se realiza mediante un ajuste polinomial de los datos de saturación del vapor de agua P vs T, para un intervalo de temperaturas desde 19°C hasta 40°C, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$P = a + b T + c T^2 \quad (13)$$

donde,

$$a = 496.637 \text{ (kPa)}$$

$$b = -3.4998 \text{ (kPa/K)}$$

$$c = 0.006187 \text{ (kPa/K}^2\text{)}$$

siendo P_g la presión de saturación correspondiente a la temperatura del aire atmosférico, la cual puede determinarse con la ecuación anterior, y conociendo que la presión parcial del vapor en el aire atmosférico P_s , puede calcularse como:

$$P_s = HR (P_g) \quad (14)$$

la TDP se determina sustituyendo el valor obtenido de P_s en la ecuación 13.

Al escribir la ecuación 7 en términos de cada una de las expresiones de flujos de calor, se obtiene:

$$\dot{Q}_B = h_w (T_{amb}(t) - T_B^*(t)) + \alpha I_2 + \varepsilon_s \sigma (T_c^4(t) - T_B^{*4}(t)) \quad (15)$$

$$S_c = \alpha I_2 + HSC \quad (16)$$

$$S_p = -HTC \quad (17)$$

donde,

$$HSC = \varepsilon_s \sigma (3 T_B^4 + T_c^4) + h_w T_{amb}$$

$$HTC = h_w + 4\varepsilon_s \sigma T_B^{*3}$$

El supraíndice (*) se utiliza para indicar el valor de la variable en el paso de tiempo previo.

Para las paredes los coeficientes respectivos se expresan como:

$$S_p = -h_w + R_1 \quad \text{paredes 1 y 2} \quad (18)$$

$$S_c = \alpha I_1 + h_w T_{amb} + R_2 \quad \text{pared 1} \quad (19)$$

$$S_c = \alpha I_3 + h_w T_{amb} + R_3 \quad \text{pared 2} \quad (20)$$

donde R_1 , R_2 y R_3 son cero en caso de considerarse el intercambio radiativo de onda larga superficie-cielo sólo en el techo, por ser la superficie más expuesta, de lo contrario representan:

$$R_1 = -4 \varepsilon_s \sigma T_B^3 / (1 + \varepsilon_{s1}) \quad (21)$$

$$R_2 = \varepsilon_{s1} \sigma (3T_{B1}^4 + T_c^4) / (1 + \varepsilon_{s1}) \quad (22)$$

$$R_3 = \varepsilon_{s3} \sigma (3T_{B3}^4 + T_c^4) / (1 + \varepsilon_{s3}) \quad (23)$$

Cuando se esté evaluando un SPE, donde exista, además de enfriamiento por radiación nocturna, enfriamiento por evaporación de agua hacia la atmósfera, debe considerarse un flujo de calor adicional Q_{cv} que viene dado por [17]:

$$Q_{ev} = h_{ev} (P_{S@T_{amb}} HR - P_{S@T_B}) \quad (24)$$

donde,

$$h_{ev} = 0.622 h_w h_{fg @ T_{agua}} / (P_{atm} (C_p + \omega C_{ps})) \quad (25)$$

siendo $h_{fg @ T_{agua}}$ la entalpia de vaporización en KJ/Kg, a la temperatura del agua en la superficie del pozo; C_p el calor específico del aire; ω la humedad específica y C_{ps} el calor específico del vapor de agua.

Para determinar h_{fg} se realizó un ajuste de curva a los datos de entalpia de vaporización vs temperatura para el mismo intervalo que antes se tomó para obtener la ecuación 13, resultando:

$$h_{fg} = 3148.445 - 2.3696 T \quad (T \text{ en K}) \quad (26)$$

y por lo tanto,

$$h_{ev} = 5.986E-03 h_w h_{fg} \quad (27)$$

Al analizar un SPE con control solar, la sección presenta una configuración durante el período de asoleamiento diferente a la correspondiente al período nocturno, ya que existe un panel aislante en el día que debe ser removido durante la noche para permitir el intercambio radiativo nocturno y el enfriamiento evaporativo del agua del pozo. Por lo tanto, para utilizar la misma malla para ambos periodos, durante la noche se aplica el bloqueo de aquellos nodos correspondientes al aire sobre el pozo de agua y al panel aislante de poliestireno que tapa el pozo. Estos nodos se desactivan haciendo el coeficiente de difusión respectivo igual a cero, lo cual establece un flujo de calor nulo. El flujo dado Q_B , se suministra como un término fuente extra para los volúmenes de control adyacentes al contorno bloqueado, que finalmente son los que reciben la interacción. El flujo de calor evaporativo no es una función lineal de la temperatura en los bordes, y por lo tanto, debe tratarse de la misma forma como se hizo con el flujo radiativo en la ecuación 16, determinándose previamente, para el período nocturno, la temperatura en la superficie del agua T_B en función de la temperatura en el nodo vecino T_p , al igualar el calor neto transferido a través de la superficie de agua con aquel transferido a través de los volúmenes de control adyacentes al contorno bloqueado. La ecuación referente al calor neto transferido a través de la superficie del agua quedaría expresada como:

$$\mathbf{Q}_B = \mathbf{Q}_{conv} + \mathbf{Q}_{ev} + \mathbf{Q}_{rsc} \quad (28)$$

Al sustituir las expresiones para cada uno de los calores transferidos se convierte en:

$$\mathbf{Q}_B^* = h_w (T - T_B^*) + h_{ev} (P_{S@Tamb} HR - P_{S@TB}) + \epsilon_w \sigma (T_c^4(t) - T_B^{*4}(t)) \quad (29)$$

En estas ecuaciones aparecen términos que dependen de la temperatura ambiente, de la temperatura de la superficie y de la temperatura del cielo, que a su vez dependen del tiempo. Como se está evaluando \mathbf{Q}_B en términos de \mathbf{Q}_B^* , se requiere actualizar, para cada iteración el valor de T_B^* , que para la iteración siguiente será T_B^* . Durante el día, se activa la zona sombreada y los flujos difusivos se tratan igual como se describió para la superficie del techo.

Cuando se va analizar un SPE donde no se permita la evaporación de agua, una variable de control hace $h_{ev} = 0$; y cuando se trate de un SPE donde el pozo de agua esté ventilado, pero bajo sombra las 24 horas del día, una variable de control elimina el calor radiante solar sobre el techo, se bloquean los nodos sobre la superficie de agua y se considera el intercambio radiativo entre el agua y la superficie del panel que protege el pozo de agua \mathbf{Q}_{rwp} , de tal forma que:

$$\mathbf{Q}_{rwp} = \sigma (T_2^4 - T_1^4) / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1) \quad (30)$$

El subíndice 2 corresponde a la superficie inferior del panel de poliestireno, cuya temperatura se aproxima a la del aire del ambiente exterior; el subíndice 1 corresponde a la superficie del agua. Por lo tanto, en las ecuaciones antes descritas para el intercambio radiativo de onda larga con el cielo, se sustituye la emisividad del agua ϵ_w por la inversa del denominador de la ecuación anterior y la temperatura del cielo T_c por la temperatura ambiente. De este modo, la malla conserva las mismas dimensiones y cantidad de nodos. Finalmente, para el cálculo del movimiento convectivo del fluido en el espacio interior ocupado por aire, bajo la aproximación de Boussinesq, el coeficiente independiente del término fuente, cuando va a resolver la ecuación de momentum correspondiente a la componente vertical de la velocidad \mathbf{v} , se expresa como:

$$S_c = \rho_{ref} g \beta (T_p - 273.15) \quad (31)$$

donde, ρ_{ref} es la densidad de referencia del aire, g es la aceleración de gravedad, β es el coeficiente de expansión térmica y T_p es la temperatura absoluta en el punto nodal considerado.

Comparación de Resultados Numéricos con Experimentales

Los resultados numéricos obtenidos al simular el comportamiento térmico de tres SPE y un módulo de referencia se compararon con la data obtenida a partir de experimentos realizados en dos celdas a escala natural, especialmente diseñadas por González [5], para la evaluación y caracterización de SPE. De hecho, la validación de EVITA se logra utilizando parte de esta data [18]. Las dimensiones del volumen interior de las celdas son 3m x 3m x 2.45m. Los dominios de cálculo consideraron la misma configuración de las celdas experimentales, cuyas paredes y piso están construidos bajo el sistema constructivo tradicionalmente utilizado en nuestro país. Las celdas experimentales son denotadas como celda de referencia (CREF) y celda experimental (CEXP) y la diferencia entre ellas radica en el techo: la primera, tiene un techo constituido por 25 cm de poliestireno sobre una lámina de plycem, seguido por una capa de concreto ligero y un manto asfáltico, y la segunda, tiene como techo un estanque metálico lleno de agua hasta 10 cm de altura, separada de un panel aislante por 25 cm de aire.

Las Figuras 1 y 2 presentan los resultados correspondientes a un SPE con control solar, basado en enfriamiento por radiación nocturna y por evaporación, para los meses de agosto 1996 y enero 1997, denotados como ESULIB.AC (Por indicar superficie libre, abierto en el día y cerrado en la noche). Los valores de las variables climáticas y de la temperatura interior de los módulos, indicados como CREF y CEXP, son el resultado promedio de periodos continuos de medición de 21 días.

La Figura 3 muestra el comportamiento térmico de un SPE que permite ventilación las 24 horas pero bajo sombra, comparándose los valores numéricos con los experimentales correspondientes al mes de febrero, denotado como ESULIB.SV (Por superficie libre sombreada y ventilada).

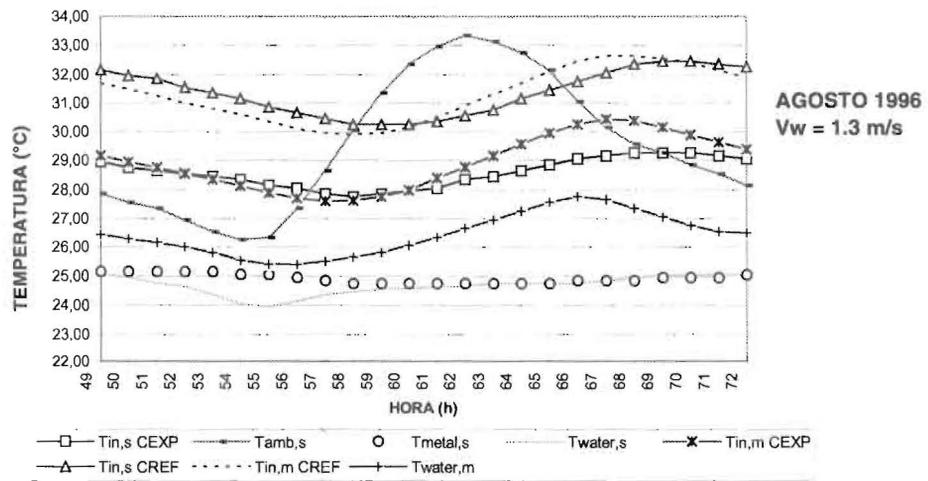


Figura 1. Comparación de las temperaturas simuladas y medidas en la CREF y la CEXF. ESULIB.AC Agosto 1996.

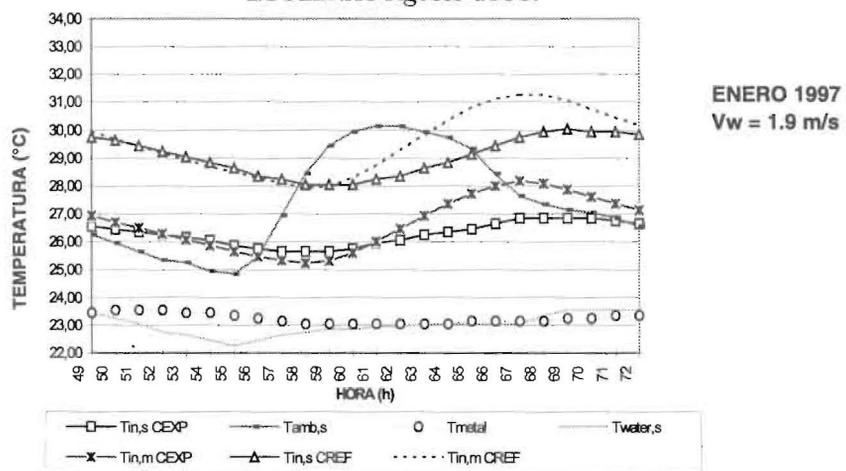


Figura 2. Comparación de las temperaturas simuladas y medidas en la CREF y la CEXF. ESULIB.AC Enero 1997.

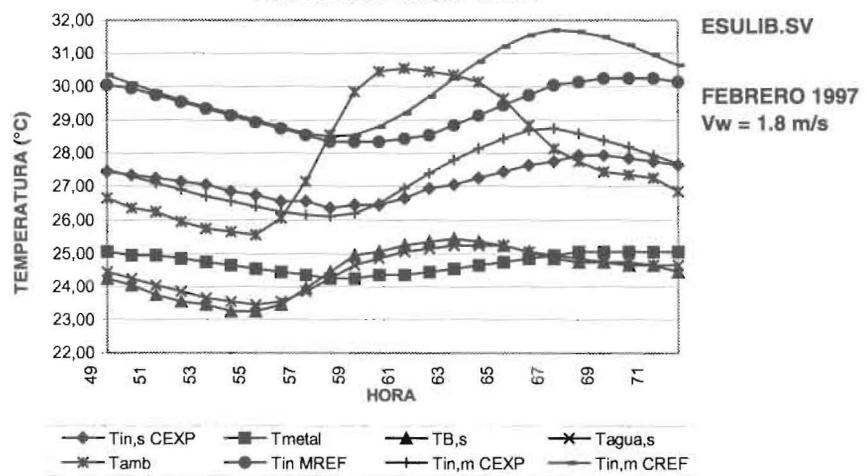


Figura 3. Comparación de las temperaturas simuladas y medidas en la CREF y la CEXF. ESULIB.SV Febrero 1997.

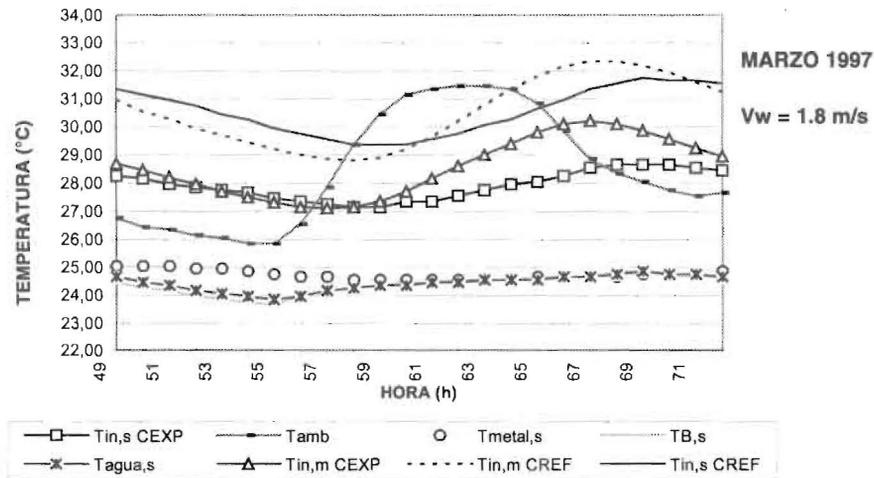


Figura 4. Comparación de las temperaturas simuladas y medidas en la CREF y CEXP. ESUSE.AC Marzo 1997.

Tabla 1

Comparación de los valores medidos y simulados de temperatura interior en °C

	CREF		CEXP		T _{amb}	UA _{techo} W-h K ⁻¹
	T _{in,m}	T _{in,s}	T _{in,m}	T _{in,s}		
ESULIB.AC Agosto	31.30	31.36	28.93	28.58	29.52	50.51
ESULIB.AC Enero	29.57	29.03	26.63	26.28	27.49	60.65
ESULIB.SV	30.05	29.35	27.36	27.17	27.88	74.41
ESUSE.AC	30.50	30.54	28.60	27.90	28.47	28.80

La Figura 4 muestra el comportamiento térmico de un SPE donde el enfriamiento se logra sólo con radiación nocturna, o sea, no se permite la evaporación. Se comparan los resultados numéricos con los experimentales correspondientes al mes de marzo y se denota como ESUSE.AC (por superficie sin evaporación, cerrada durante el día y abierta durante la noche).

Todos estos SPE fueron evaluados sin permitir infiltración de aire del exterior al espacio ocupado por el aire en el techo (excepto en el ESULIB.SV), ni al volumen interior de la sección, o sea, se modelaron considerando sólo convección natural. Esto último también se cumplió en las celdas experimentales para el volumen interior pero no para el techo. Este hecho, más la consideración de cielo claro en el cálculo del intercambio radiactivo nocturno son responsables de las desviaciones en el valor de la temperatura

del agua en los ESULIB.AC y ESUSE.AC. Sin embargo, puede observarse que las curvas correspondientes a la simulación presentan el mismo comportamiento obtenido experimentalmente, prácticamente el mismo valor promedio, y en las celdas experimentales, casi coincidentes durante las primeras 14 horas.

Los resultados de las temperaturas promedio diario medidas y calculadas, se muestran en la Tabla 1, junto con los valores de un coeficiente global de transferencia de calor promedio diario (UA) a través del techo, basado en la temperatura interior y obtenidos con la simulación de los modelos experimentales, el cual es una medida del potencial de enfriamiento de cada uno de ellos. Los errores absolutos respecto a los experimentales se muestran en la Tabla 2, junto con la máxima desviación en términos relativos (valor entre paréntesis). Esto indica muy buena concor-

Tabla 2
Errores absolutos de las temperaturas internas simuladas
con respecto a los valores experimentales, en K (% desviación)

	ESULIB.AC Agosto 96		ESULIB.AC Enero 97		ESULIB.SV Febrero 97		ESUSE.AC Marzo 97	
	CEXP	CREF	CEXP	CREF	CEXP	CREF	CEXP	CREF
Máx (%)	1.28 (4.2)	0.70 (2.2)	1.37 (4.9)	1.65 (5.4)	1.05 (3.7)	1.80 (5.7)	1.85 (5.8)	1.20 (3.7)
Minimo	-0.35	-0.60	-0.42	-0.15	-0.40	+0.05	-0.20	-0.80
Medio	+0.35	-0.09	+0.37	+0.52	+0.19	+0.70	+0.65	-0.02

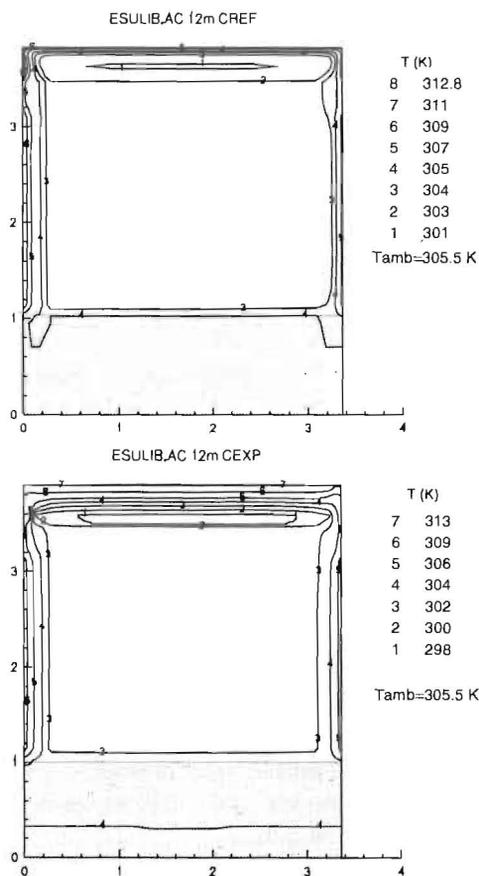


Figura 5. Distribución de temperaturas en la sección correspondiente a ESULIB.AC; CREF y CEXP (Agosto 1996).

dancia, si se toma en cuenta que es un modelo bidimensional.

La Figura 5 muestra la distribución de temperaturas en todo el dominio de cálculo, correspondiente a la hora 12, para ESULIB.AC. La superficie del piso comienza a la altura de 1.05 m,

ya que se simula desde 1m de profundidad del suelo, más las capas de concreto. Puede notarse como el techo de la CEXP (masa de agua) se mantiene a una temperatura 7 K por debajo de la temperatura del aire atmosférico.

Algunos Ejemplos de Predicción de Comportamiento Térmico

Efecto de la reflectividad de la superficie del techo

La Figura 6 muestra los resultados numéricos obtenidos de las temperaturas internas y de la superficie del techo cuando se tienen dos secciones con idénticas paredes y piso (misma configuración de las celdas experimentales) pero con el techo construido bajo el sistema tradicional (una losa nervada de concreto con bloques de arcilla como relleno, una capa de cemento y arena, y un manto asfáltico). Se consideraron dos valores de reflectividad: 0.35 (techo de color oscuro) y 0.8 (techo blanco). Puede observarse que la diferencia entre las temperaturas internas es del orden de 2 K, lógicamente el menor valor lo presenta la sección con techo blanco.

Ventilación controlada

Se selecciona el sistema ESULIB.SV como una de las mejores alternativas de enfriamiento pasivo para estudiar el efecto de permitir la ventilación con aire atmosférico del exterior, bajo el concepto de cambios de aire (ACH). Cuando la temperatura del aire interior sea mayor que la del ambiente $ACH=20$, y cuando la situación sea contraria ($T_{in} < T_{amb}$), o sea sólo infiltración de aire caliente, $ACH=0.5$. Los resultados se muestran en la Figura 7. Puede observarse, como era de espe-

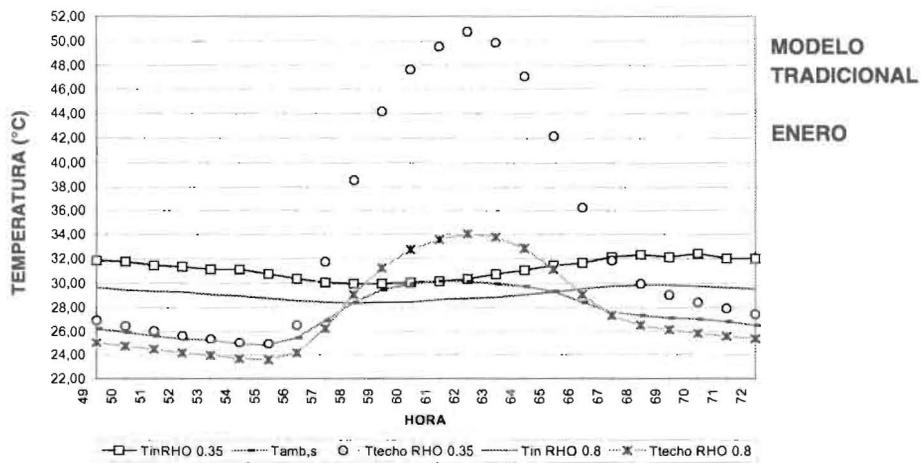


Figura 6. Efecto de la reflectividad de la superficie del techo sobre la temperatura interna de una sección con techo tradicional.

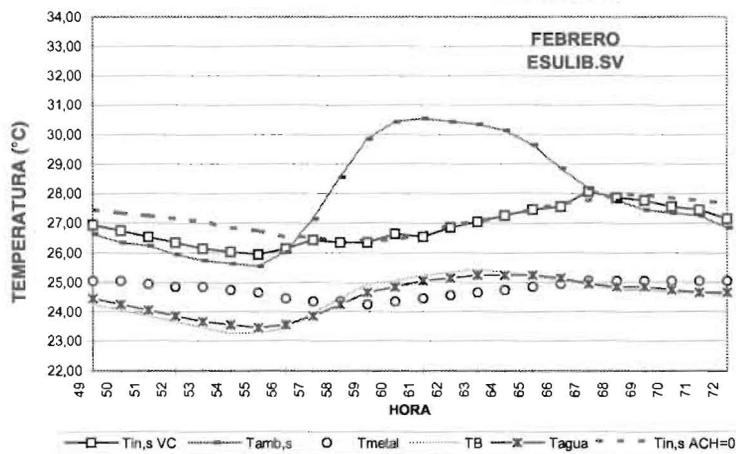


Figura 7. Comportamiento térmico de una sección con enfriamiento pasivo y ventilación controlada.

rarse, que a las horas de ventilación externa la temperatura interior ($T_{in,s}$ VC) disminuye tendiendo a alcanzar el valor de la temperatura del aire exterior, mientras que a las horas de sólo infiltración, los resultados prácticamente coinciden con aquellos obtenidos para $ACH=0$ ($T_{in,s}$ $ACH=0$), durante las 24 horas del día. Las pequeñas fluctuaciones en el valor de la temperatura interna se eliminan tomando un intervalo de tiempo menor.

Conclusiones

Se ha desarrollado un código computacional "EVITA", para la evaluación de viviendas térmicamente adaptadas. Este modelo ha sido validado, comparando los resultados numéricos con valores obtenidos experimentalmente en la evaluación de sistemas pasivos de enfriamiento, obteniéndose

se en todos los casos considerados, una máxima desviación en temperatura interior del 6% (1.85 K) y un máximo error medio del orden del 2%, lo cual muestra muy buena concordancia. Con las limitaciones propias de un modelo bidimensional, permite evaluar la respuesta térmica transitoria de una sección rectangular de una edificación, tomando en cuenta toda la composición de paredes, techo y piso, bajo las condiciones climáticas locales. Permite realizar estudios paramétricos y evaluar comparativamente diferentes técnicas de enfriamiento pasivo. Estas evaluaciones incluyen la respuesta térmica, la caracterización y optimización de las mismas, la determinación del porcentaje de reducción de carga térmica a través de las superficies exteriores, la determinación del potencial de enfriamiento y cualquier

otra cantidad relacionada con los procesos de movimiento de fluido y transferencia de calor. Al realizar las simulaciones utilizando DFC, permite obtener el campo de temperaturas y velocidades en un instante de tiempo determinado.

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Laboratorio de Simulación Computacional de la Escuela de Ing. Mecánica de La Universidad del Zulia "LUZ", el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico CONDES, LUZ y por la C. A. de Energía Eléctrica de Venezuela "ENELVEN". A ellos nuestro agradecimiento.

Referencias Bibliográficas

1. Almao de H. N. and Rincón J.: "Alternative Designs for Passive Cooling Homes for Venezuela", ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 115, (1993), 161-168.
2. González E.: "Passive Cooling Techniques: Experimental Results in the Hot-Humid Climate of Maracaibo, Venezuela". Proceedings of the III International Congress, "Energy, Environment and Technological Innovation", Vol. 1 (1995), 26-32, Caracas Venezuela.
3. Rincón J. and Elder R.: "A High-Resolution Pressure-Based Method for Compressible Flows". Computer & Fluids, Vol 26 No. 3 (1997), 217-231.
4. Issa R.: "Solution of the Implicit Discretised Fluid Flow Equations by Operator-splitting", J. Comp. Phys. 62 (1986), 40-65.
5. González E.: "Étude de Matériaux et de techniques du bâtiment pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide", Tesis Doctoral en Energética de la Escuela de Minas de Paris. Diciembre (1997).
6. Chandra K. and Chandra S.: "Solar Thermal Modelling of Building with a Roof Pond and Ventilation Control System", Building and Environment, Vol 17, No. 4 (1982), 273-284.
7. Verma R., Bansal N. and Garg H.: "The comparative performance of different Approaches to Passive Cooling", Building and Environment, Vol 21, No. 2 (1986), 65-69.
8. Tiwari G., Upadhyay M. and Rai S.: "A Comparison of Passive Cooling Techniques". Building and Environment, Vol 29, No. 1 (1994), 21-31.
9. Bansal N. and Bhandari M.: "Comparison of the Periodic Solution Method with TRNSYS and SUNCODE for Thermal Building Simulation", Solar Energy, Vol 57, No. 1 (1996), 31-37.
10. Patankar, S.: "A calculation Procedure for Two-Dimensional Elliptic Situations", Numerical Heat Transfer, Vol. 4 (1981), 409-425.
11. Rincón J.: "Improving CFD Calculations for Turbomachinery Flows". PhD dissertation (1994), Cranfield University, Cranfield Belfort MK43 OAL, United Kingdom.
12. Patankar S., Ivanovic M., and Sparrow E.: "Analysis of Turbulent Flow and Heat Transfer in Internally Finned Tubes and Annuli", J. Heat Transfer, Vol. 101 (1979), 29-37
13. Almao de H. N.: "Un Modelo de Temperatura Ambiente e Irradiancia sobre Superficies en Maracaibo", Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 117, No. 2 (1994), 83-98.
14. Patankar S.: "Computation of Conduction and Duct Flow Transfer". Innovative Research, Inc., (1991).
15. Clark G.: "Passive/Hybrid Comfort Cooling by Thermal Radiation". Proceedings of the International Passive and Hybrid Cooling Conference, 1981, pp. 682, Miami Beach, USA
16. Duffie J. and Beckman W.: "Solar Engineering of Thermal Processes". John Wiley & Sons Inc., New York, 1980.
17. W. F. Stoecker. Refrigeration and Air Conditioning. Mc Graw-Hill Book Company. Inc. 1958
18. Almao E., González E. y Rincón J.: "Estudio Numérico y Experimental de un Sistema Pasivo de Enfriamiento". Memorias del II Congreso de Ingeniería Mecánica. Mérida Venezuela. Julio 1997.

Recibido el 20 de Octubre de 1997
En forma revisada el 16 de Febrero de 1998