

AHORRO DE ENERGÍA EN VIVIENDAS CON SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO; ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO

Eduardo González / Nastia Almao

1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura tiene como rol principal crear las condiciones de habitabilidad adecuadas para el desarrollo de la actividad humana. Por siglos, los pobladores de las regiones calientes y húmedas de Venezuela construyeron sus viviendas protegiéndose del sol y aprovechando la ventilación natural. Generar sombra y maximizar el enfriamiento fisiológico-convectivo han sido las acciones tradicionales para el acondicionamiento natural de las edificaciones en estas zonas.

En las regiones costeras, cálidas y húmedas, como Maracaibo, no es posible alcanzar los estándares de confort actuales haciendo uso tan sólo de la ventilación natural y de los criterios de diseño tradicionales (González, 1997). Por otro lado, la arquitectura de las últimas décadas ha sido incapaz de entablar un diálogo apropiado con el ambiente y ha desconsiderado los criterios de diseño bioclimático adecuados. Con la energía más barata de América, y quizás del mundo, y la falta de normas que regulen el desempeño energético de las edificaciones en nuestras ciudades, el uso de sistemas mecánicos de climatización se ha masificado, sin que la arquitectura haya evolucionado paralelamente. Se ha creado una problemática arquitectónica y energética caracterizada por: el deterioro de la calidad visual del espacio urbano; la pérdida de valores arquitectónicos; la falta de utilización de estrategias de climatización natural y criterios de diseño que consideren las condiciones climáticas del lugar; la incorrecta utilización de materiales de construcción y acabados exteriores desde el punto de vista térmico; el deterioro de las condiciones microclimáticas de los espacios públicos; un alto consumo de energía y una alta ineficiencia en el uso de la misma. El habitante promedio venezolano consume aproximadamente dos veces más energía eléctrica que el habitante promedio latinoame-

ABSTRACT
ENERGY
CONSERVATION ON
DWELLINGS WITH PASSIVE
COOLING SYSTEMS;
EXPERIMENTAL AND
NUMERICAL STUDY

The problematic about energetic and architectural design of the traditional housing in low, hot and humid zones of Venezuela is characterized by low thermal quality and the disregard of proper bioclimatic criteria. In this work, the results of an experimental and numerical study of two Passive Cooling Systems (PCS) for the conditioning of exterior air in buildings are presented. It has been established a methodology to characterize the PCS thermal performance. For this purpose, it has been built an experimental platform constituted by: two test cells at natural scale, a meteorological station and a computerized data acquisition system. The experimental data has been used to validate the application of the numerical model (EVITA). The experimental results are discussed in terms of the Average Cooling Potential and the Cooling Performance Index of each PCS. Two PCS have shown to be specially efficient: one, where cooling is achieved by nocturnal radiation combined with indirect evaporation; and the other one, where cooling is achieved by continuous evaporation.

RESUMEN

La problemática arquitectónica y energética de la vivienda tradicional de las zonas bajas, calientes y húmedas venezolanas está caracterizada por la desatención de criterios bioclimáticos apropiados, la baja calidad térmica y la ineficiencia energética. En este trabajo se reportan los resultados del estudio experimental y numérico de dos Sistemas Pasivos de Enfriamiento (SPE) para la climatización natural de viviendas. Se ha establecido una metodología de caracterización del comportamiento térmico de SPE. Para ello, se ha construido una plataforma experimental constituida por: dos edificaciones a escala real, una estación meteorológica y un sistema automatizado de adquisición de datos. La aplicación de un modelo numérico denominado EVITA, es validado a partir de resultados experimentales. Los resultados del estudio experimental son discutidos en términos del Potencial de Enfriamiento Medio (PEM) y del Índice de Performance de Enfriamiento (IPE) de cada SPE. Han resultado especialmente eficientes el sistema donde el enfriamiento evaporativo indirecto se combina con enfriamiento radiante nocturno, y el sistema donde el enfriamiento evaporativo indirecto es aprovechado en forma continua.

DESCRIPTORES:

Climatización natural, Confort térmico, Clima tropical húmedo, Enfriamiento pasivo, Experimental, Simulación numérica.

ricano, mientras que, en el sector residencial, la región zuliana presenta el mayor consumo por suscriptor residencial de toda Venezuela (Villanueva, 1994). En la ciudad de Maracaibo, el 36 por ciento de los suscriptores residenciales cuentan con aire acondicionado. Este sector de la población consume aproximadamente el 75 por ciento de la energía eléctrica del sector residencial, de la cual, entre el 70 y el 80 por ciento es utilizada para el funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado (Enelven, 1994).

Los objetivos de este trabajo se enmarcan en la búsqueda de alternativas viables para la climatización natural de viviendas y la economía de energía en el sector edificado. Se trata de contribuir al logro de diseños donde se integren la aplicación de SPE y la selección correcta de materiales para la construcción de viviendas: "eficientes" desde el punto de vista energético; "confortables" desde el punto de vista del ambiente térmico; "económicas" desde el punto de vista del costo global; "respetuosas del ambiente" desde el punto de vista del impacto ambiental; y "bioclimáticas" desde el punto de vista arquitectónico.

En Maracaibo, algunas de las técnicas basadas en el enfriamiento radiante nocturno, el enfriamiento evaporativo, la inercia térmica y el control solar, han sido experimental y numéricamente evaluadas por González (1989, 1990, 1994) y Almao (1993). Los resultados han mostrado importantes capacidades de enfriamiento y porcentajes de reducción de carga. Los SPE estudiados en este trabajo se basan en estas experiencias previas y en la utilización de los Depósitos Energéticos (DE) de mayor potencial de enfriamiento en nuestra región: el aire, el cielo y el agua (González, 1997). El techo juega el rol protagónico en estos sistemas. Está constituido por un recipiente metálico con agua que sirve como intercambiador de calor con los DE y es el almacenamiento térmico necesario para regular la temperatura del ambiente a enfriar. Si bien estas técnicas de enfriamiento han sido utilizadas en otros países, su aplicación en condiciones climáticas como las locales, y en viviendas con el sistema constructivo tradicionalmente utilizado en Venezuela, no ha sido estudiado.

Se ha concebido un programa de investigación para el estudio de los SPE a escala real. Para ello se ha establecido una metodología de caracterización, basada en los resultados experimentales obtenidos a partir de una plataforma experimental constituida por dos edificaciones de iguales características, una estación meteorológica de carácter urbano, una red de sensores y equipos de medición, y un sistema de adquisición y procesamiento de información que integra todo el conjunto.

Se presentan y analizan dos SPE, entre los estudiados en el marco del proyecto de investigación financiado por el Consejo de Desarrollo Científico de la Universidad del Zulia (LUZ) y la C.A. Energía Eléctrica de Venezuela

(ENELVEN). Así mismo, los resultados experimentales permiten validar el programa de simulación térmica EVITA que ha sido desarrollado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de LUZ como una herramienta de ayuda a la concepción, el estudio y la optimización térmica de viviendas.

2. METODOLOGÍA

2.1. El dispositivo experimental

Se ha concebido y construido una plataforma para la evaluación experimental de SPE. Ella está constituida por una serie de elementos que se encuentran espacialmente distribuidos en tres zonas definidas como: a) el área experimental, donde se localizan los módulos de referencia y experimental provistos de los sensores y equipos necesarios para conocer su comportamiento térmico durante el período de evaluación; b) el área meteorológica, donde se encuentran los dispositivos de medición de las variables ambientales requeridas para la evaluación de los SPE y la validación de modelos matemáticos y c) el área de control, donde se recibe, registra y procesa la información que proviene de las áreas experimental y meteorológica.

El dispositivo experimental ha sido concebido de acuerdo con una serie de criterios de diseño que aseguran la calidad de los resultados de las mediciones y la posibilidad de ser éstos utilizados para caracterizar el comportamiento térmico de los SPE estudiados. Entre sus características están las de: permitir la evaluación de los SPE bajo condiciones de operación muy próximas a las reales; mostrar la evolución, en tiempo real, del comportamiento de los SPE en relación con el ambiente exterior y con el módulo de referencia y disponer de las condiciones climáticas precisas a las que se ven expuestos los módulos de referencia y experimental durante los períodos de pruebas.

Módulos de referencia y experimental

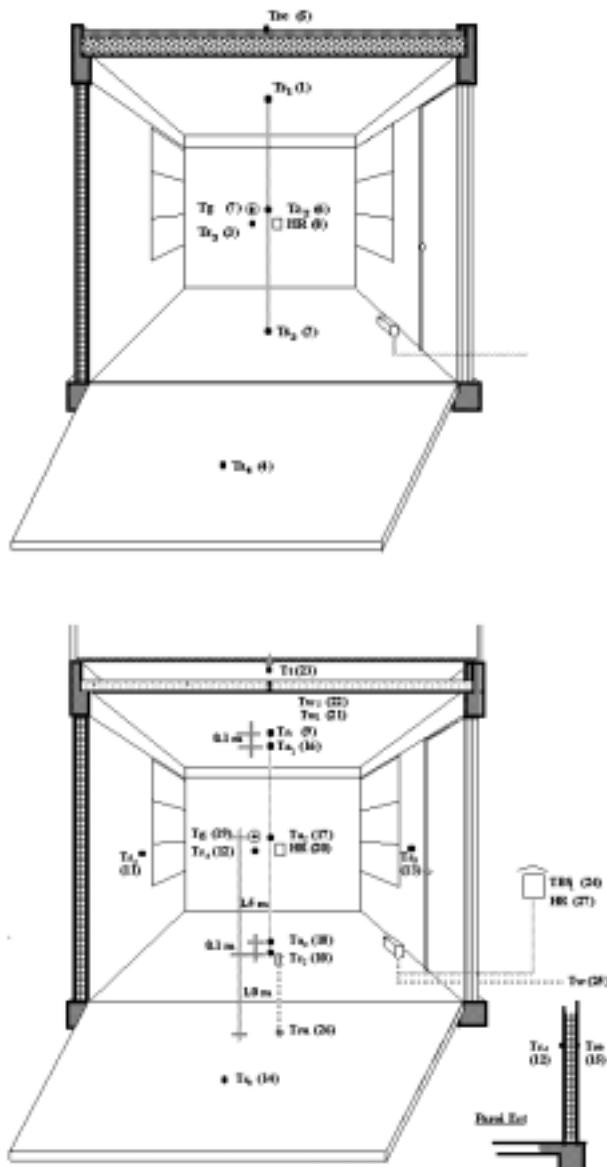
Para realizar el estudio en las condiciones requeridas, se han construido dos edificaciones idénticas denominadas "Módulo de Referencia" (MR) y "Módulo Experimental" (ME) (figura 1); únicamente el techo las diferencia. Tienen una superficie de piso de 9 m² (3m x 3m) y una altura interior de 2.45 m cada uno. Su estructura en concreto armado y sus paredes en bloques de arcilla de 15 cm de espesor, frisadas por ambas caras, representan las características típicas de una construcción tradicional del lugar.

La cubierta del módulo de referencia ha sido concebida, por razones metodológicas, como un elemento muy aislante a fin de limitar de manera importante la transferencia de calor a través del techo. En su composición, una capa de poliestireno de 25 cm de espesor y la superficie exterior pintada de color blanco, garantizan transferencia de calor a través del techo de magnitud despreciable [UA, (cal-

FIGURA 1
Módulos de Referencia (MR) y Experimental (ME)



FIGURA 2
Localización de sensores de temperatura y humedad en el MR y en el ME



culado) = 1.24W/K] con respecto al de las paredes.

El techo del módulo experimental, en los dos SPE aquí estudiados, está constituido por un contenedor de agua fabricado con láminas metálicas, de 1.2 mm de espesor, cubierto por dos paneles abatibles, de poliestireno, revestidos con fibra de vidrio y pintados de color blanco. Una cámara de aire, de 0,25 m de altura, separa la superficie del agua de los paneles aislantes. El conjunto está apoyado en la estructura perimetral de concreto y en tres vigas de acero tipo PTN 10, de la misma forma que el techo en el módulo de referencia.

El conjunto de sensores e instrumentos de medición instalados en los módulos puede observarse en forma esquemática en la figura 2. Cada sensor está identificado por un número que corresponde a uno de los canales de entrada del registrador YOKOGAWA HR2300, y por unas siglas que indican el parámetro medido. Para el Módulo de Referencia fueron reservados 8 canales de registro de información (1... 8) mientras que en el Módulo Experimental fueron dispuestos 15 sensores (9... 23).

Estación meteorológica

La Estación Meteorológica Urbana IFA-LUZ (figura 3) está ubicada sobre el techo del edificio donde funciona el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura, justo al lado del área experimental. Ella ha sido concebida con varios propósitos, siendo el primero, el de suministrar la información meteorológica precisa y confiable que permita el estudio de los SPE y la validación de modelos de simulación. En este lugar son medidas la temperatura y humedad del aire, la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la precipitación y la radiación solar global y difusa; otros parámetros requeridos se obtienen a partir de estas variables registradas.

FIGURA 3
Estación Meteorológica Urbana IFA-LUZ



El Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos

El Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos (SATD) comprende los equipos y programas de computación que hacen posible las tareas de control, registro y procesamiento de las señales emitidas por los sensores o instrumentos de medición. El funcionamiento del SATD se basa en la utilización de dos centrales de adquisición de datos (un Registrador Híbrido de 30 canales YOKOGAWA HR2300 y una Consola Meteorológica RainWise WS-1000) configuradas en torno de un computador PC-486 EPSON DX2, provisto de un sistema operativo multitareas y un computador PC-386 IBM. El sistema permite observar en pantalla la información de las últimas 24 h de los parámetros seleccionados, y seguir su evolución en tiempo real (minuto a minuto). También se tiene acceso permanente a los archivos de datos diarios que crean los programas en forma automática.

2.2. Método de determinación de performances

¿Qué cantidad de energía es capaz de retirar el sistema de enfriamiento? ¿Qué representa la utilización de estos sistemas, en términos de ahorro de energía? Dar respuesta a estas preguntas a partir del análisis del Potencial de Enfriamiento Medio (PEM) y del Índice de Performance de Enfriamiento (IPE) obtenidos experimentalmente en cada sistema (González, 1997), permite caracterizar el comportamiento térmico de los SPE seleccionados en este estudio.

El Potencial de Enfriamiento Medio (PEM) de un SPE es definido como la cantidad de energía retirada por el sistema por unidad de tiempo y de área, obtenido como valor medio durante un período de 24 h. El PEM puede ser calculado a partir del coeficiente global de transferencia de calor del módulo de referencia UA(p), de las diferencias entre las temperaturas promedios diarias del aire interior de los módulos de referencia y experimental, y de la superficie de enfriamiento del sistema.

$$PEM = \frac{UA_{(p)}(\bar{T}i_{MR} - \bar{T}i_{ME})}{A_t} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

donde: A_t = Superficie interior del techo (9 m²)
 $UA_{(p)}$ = Coeficiente global de transferencia de calor del MR, determinado experimentalmente (73.6 W/K).

La energía retirada por el sistema de enfriamiento, por unidad de área, en un período de 24 h, corresponde a lo que denominamos Energía de Enfriamiento Diario (EED). Esta representa al producto del potencial de enfriamiento medio por el intervalo de tiempo en segundos.

$$EED = PEM \times 8.64 \cdot 10^4 / 1000 \quad (KJ/m^2)$$

donde: $8.64 \cdot 10^4$ es la duración del período en segundos (24 x 3.600 s).

La eficiencia de los SPE estudiados es caracterizada también a partir del Índice de Performance de Enfriamiento (IPE). Este índice relaciona las temperaturas medias del MR y del ME con una temperatura de consigna, y puede expresarse como:

$$IPR = \frac{(\bar{T}i_{MR} - \bar{T}i_{ME})}{(\bar{T}i_{MR} - \bar{T}r)} \quad (2)$$

donde: $\bar{T}r = 25^\circ C$, por considerarse la temperatura neutral de la zona de confort y base para el diseño de los sistemas de climatización. Este índice expresa en cierta manera la economía de energía que representa el SPE sobre la total requerida. Puede ser entendido, porcentualmente hablando, como el porcentaje de reducción de carga de enfriamiento necesaria para mantener el sistema a la temperatura de consigna.

2.3. Descripción de los casos de estudio

El propósito general que se persigue con la aplicación de los SPE es reducir la temperatura del aire interior del ME respecto a la del MR y a la del ambiente exterior. Para ello es necesario que la temperatura del agua del techo sea lo más baja posible a efecto de que el flujo de calor, producto de la diferencia de temperatura entre el aire interior y el agua, sea lo más grande posible. De los SPE evaluados, dos se presentan en este trabajo; éstos corresponden a las series experimentales ESULIB.AC2 y ESULIB.SV.

En la serie ESULIB.AC2, realizada entre el 14 y el 27 de enero de 1997, se evalúa la superficie libre con el techo abierto durante la noche (19:00 h-07:00 h) y cerrado durante el día. En este SPE, el techo está constituido por un recipiente metálico lleno de agua hasta una altura de 15 cm y cubierto con dos paneles aislantes abatibles (figura 4). La operación diaria de abrir y cerrar el techo permite: enfriar el

FIGURA 4
ME en la serie ESULIB.AC2

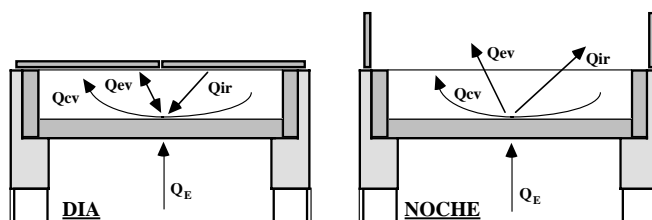


FIGURA 5
ME en la serie ESULIB.SV

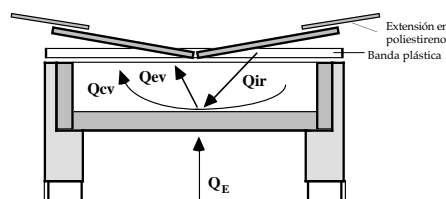
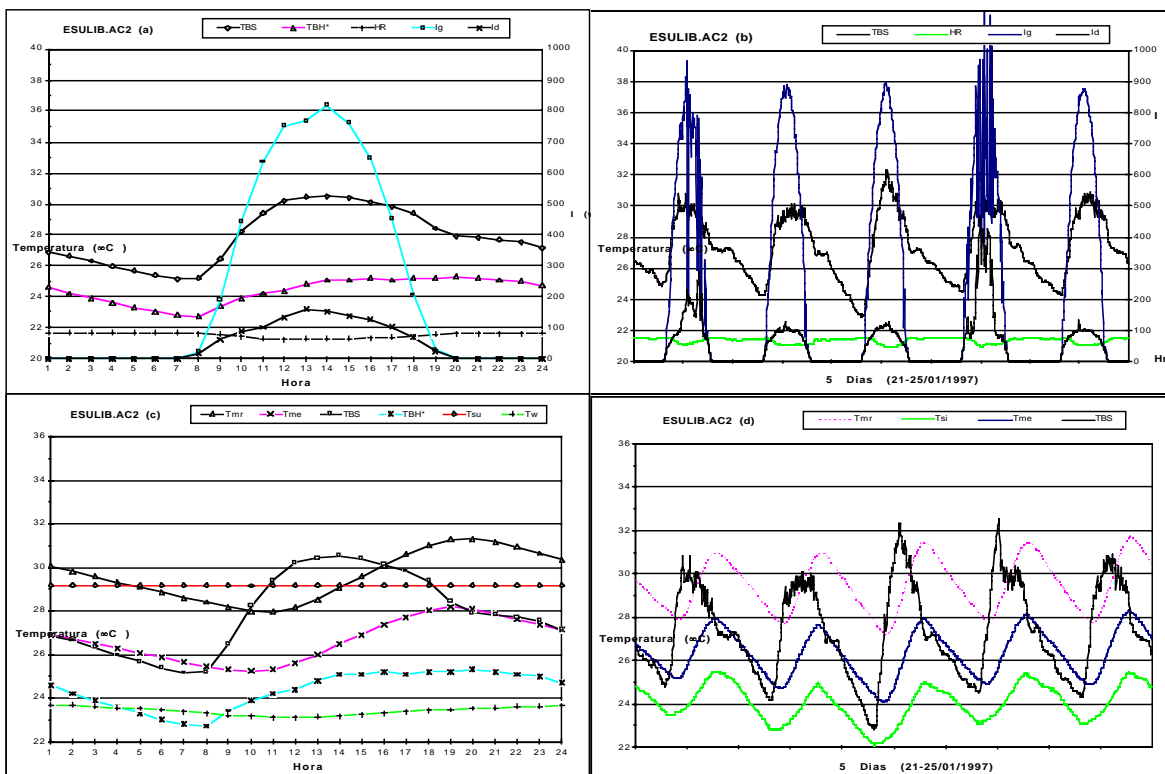


FIGURA 6
Evolución media diaria de las condiciones climáticas (a) y de los módulos (c) en la serie ESULIB.AC2. Secuencia de cinco días de registros climáticos (b) y de los módulos (d).



agua por evaporación y por intercambio radiante de onda larga con el cielo durante toda la noche, y aislarla durante el día, para reducir su calentamiento.

En la serie ESULIB.SV, realizada entre el 1 y el 24 de febrero de 1997, se evalúa el comportamiento térmico del ME provisto del estanque de agua con la superficie libre, ventilado de manera natural y protegido de la bóveda celeste, durante todo el día (figura 5). En este caso, gracias a la ventilación natural continua, se aprovecha el enfriamiento evaporativo las 24 horas del día, mientras que, el enfriamiento radiante nocturno queda eliminado debido a la presencia permanente de los paneles aislantes sobre el estanque de agua.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados de las series experimentales ESULIB.AC2 y ESULIB.SV. Las condiciones medias del ambiente durante la serie ESULIB.AC2, y una secuencia de cinco días de ese período (21-25/01/97) se observan en las figuras 6a y 6b. La evolución media de las temperaturas internas de los módulos, bajo estas condiciones climáticas, se observa en las figuras 6c y 6d. Un resumen de las temperaturas características se presenta en la tabla 1.

El SPE ha logrado mantener en 26,6°C la temperatura interna media del ME (Tme), 3°C por debajo de la

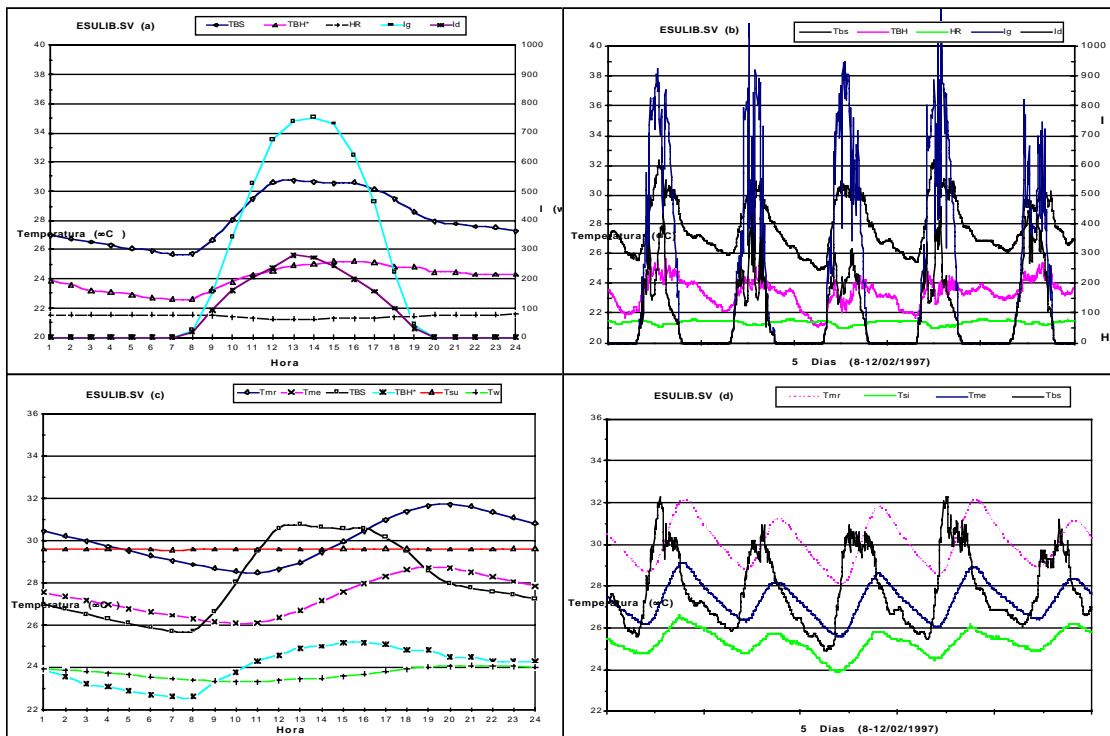
del MR y 0,9°C inferior a la temperatura media del ambiente (Ta, TBS). Durante la noche, la temperatura interna es prácticamente igual a la del ambiente, la cual se alcanza sin necesidad de ventilación nocturna. No se observa condensación en la superficie interior del techo. La temperatura del agua en el techo (Tw) es todo el tiempo inferior a TBS. Su temperatura mínima llega a ser de 23°C (2°C inferior a TBS).

La temperatura de la superficie interior del techo (Ts1) es inferior a TBS desde 1.5°C a 6.5°C, e inferior a la temperatura interior en 2°C. Esta “bomba de extracción de calor”, que representa el techo, permite que la temperatura interior permanezca casi continuamente inferior a TBS. Se constata que existe un flujo de calor permanente desde el aire interior hacia el agua. Es aconsejable ventilar natural o mecánicamente durante la noche con el doble propósito de aprovechar el enfriamiento convectivo y de disminuir los niveles de humedad internos.

TABLA 1
Temperaturas características en la serie ESULIB.AC2

| | ESULIB.AC2 (14-27/01/97) | | | | | | |
|------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| | Ta | Tmr | Tgmr | Tme | Tgme | Tmr-Tme | Ta-Tme |
| Max | 30,2 | 31,3 | 31,0 | 28,2 | 28,0 | 3,1 | 2,0 |
| Min | 24,9 | 27,9 | 27,7 | 25,2 | 25,0 | 2,7 | -0,3 |
| Écart | 5,3 | 3,4 | 3,3 | 3,0 | 3,0 | 0,4 | 2,3 |
| Moy | 27,5 | 29,6 | 29,3 | 26,6 | 26,4 | 3,0 | 0,9 |

FIGURA 7
Evolución media diaria de las condiciones climáticas (a) y de los módulos (c) en la serie ESULIB.SV. Secuencia de cinco días de registros climáticos (b) y de los módulos (d).



En relación con la serie ESULIB.SV, en las figuras 7a y 7b se presentan las condiciones medias del ambiente durante la serie y una secuencia de cinco días de ese período (08-12/02/97). La evolución de las temperaturas internas de los módulos bajo estas condiciones climáticas se observa en las figuras 7c y 7d. Un resumen de las temperaturas características se presenta en la tabla 2. Bajo este SPE se evidencia un menor enfriamiento de la masa de agua, sobre el techo, que en ESULIB.AC2. Esto se debe a la eliminación de la transferencia de calor por radiación durante la noche. Sin embargo, como en la serie anterior, se ha logrado un enfriamiento tanto respecto al MR como al ambiente exterior. La temperatura interna media es de 27,4°C, 2,6°C inferior al MR y 0,5°C inferior a TBS.

La Tme se mantiene durante la noche entre 0,5°C y 0,8°C superior a TBS; este valor podría reducirse al ventilar el interior del local cuando TBS sea menor que la

temperatura interna. Al mismo tiempo, la temperatura del agua del techo es de 2°C a 3,5°C inferior a la interior. Como en el caso anterior no se observan signos de condensación en la superficie interior del techo, cuya temperatura es entre 0,8°C y 6°C inferior a TBS, y entre 1,5°C a 2,5°C inferior a la temperatura del aire. Se constata también, que existe un flujo de calor permanente desde el aire interior hacia el agua.

El resumen de los valores de PEM y EED calculados para cada serie se presenta en las tablas 3 y 4. Se observan los mayores valores de PEM en la serie ESULIB.AC2, los cuales oscilan entre 21.3 y 27.8 W/m², y un valor medio de 24 W/m². Estos valores representan promedios diarios de energía retirada de 510 a 667 Wh/m²d. Otra serie realizada con el mismo SPE, bajo condiciones climáticas más desfavorables (agosto 1996), arrojó valores 20 por ciento inferiores a los anteriores. En la serie ESULIB.SV, los valores de PEM varían entre 19.6 W/m² y 23.7 W/m² y su valor medio de 22 W/m² es tan sólo 8 por ciento menor que en ESULIB.AC2. En este caso, la energía retirada diariamente varía entre 471 y 570 Wh/m²d.

Los IPE calculados a partir de los resultados experimentales indican, consecuentemente con las temperaturas características, que la eficiencia del sistema en la serie ESULIB.AC2 es superior a la de la serie ESULIB.SV. Los índices determinados con una temperatura de referencia de 25°C representan ahorros de energía promedio diario de 64 por ciento y 53 por ciento, respectivamente.

TABLA 2
Temperaturas características en la serie ESULIB.SV

| | ESULIB.SV (01-24/02/97) | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| | Ta | Tmr | Tgmr | Tme | Tgme | Tmr-Tme | Ta-Tme |
| Max | 30,6 | 31,7 | 31,5 | 28,8 | 28,5 | 2,9 | 1,8 |
| Min | 25,5 | 28,5 | 28,3 | 26,1 | 25,8 | 2,4 | -0,6 |
| Écart | 5,1 | 3,2 | 3,2 | 2,7 | 2,7 | 0,5 | 2,4 |
| Moy | 27,9 | 30,0 | 29,8 | 27,4 | 27,1 | 2,6 | 0,5 |

TABLA 3
Cálculos de PEM y EED en la serie ESULIB.AC2

| | ESULIB.AC2 | | ΔT (K) | UAg (W/K): | 73,6 |
|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| | Tm (Mr) | Tm (Me) | | PEM (W/m2) | EED (Wh/m2d) |
| Max | 30,00 | 27,30 | 3,40 | 27,80 | 667,31 |
| Min | 29,30 | 25,90 | 2,60 | 21,26 | 510,29 |
| Ampl | 0,70 | 1,40 | 0,80 | 6,54 | 157,01 |
| Med | 29,59 | 26,65 | 2,94 | 24,01 | 576,18 |

TABLA 4
Cálculos de PEM y EED en la serie ESULIB.SV

| | ESULIB.SV | | ΔT (K) | UAg (W/K): | 73,6 |
|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| | Tm (Mr) | Tm (Me) | | PEM (W/m2) | EED (Wh/m2d) |
| Max | 30,50 | 27,90 | 2,90 | 23,72 | 569,17 |
| Min | 29,40 | 26,70 | 2,40 | 19,63 | 471,04 |
| Ampl | 1,10 | 1,20 | 0,50 | 4,09 | 98,13 |
| Med | 30,05 | 27,36 | 2,69 | 22,03 | 528,83 |

4. VALIDACIÓN DEL MODELO EVITA

El código de cálculo EVITA "Evaluación de Viviendas Térmicamente Adaptadas" (Almao, 1997), desarrollado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Zulia, en Maracaibo, Venezuela, ha sido utilizado para simular el comportamiento térmico de los módulos de referencia y experimental bajo las mismas configuraciones y condiciones climáticas de las series experimentales ESULIB.AC2 y ESULIB.SV. Este código de cálculo, que fue concebido como un medio para evaluar y optimizar el diseño de viviendas desde el punto de vista térmico, ha sido preparado para tomar en consideración los fenómenos de enfriamiento radiante y evaporativo aplicados durante las experiencias.

4.1. El modelo matemático

Se trata de un modelo bidimensional basado en el método de los volúmenes de control, con malla no desplazada, y tratamiento acotado de alto orden para los términos convectivos, que permite resolver las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, bajo régimen transitorio. El dominio de cálculo es una sección rectangular de una edificación. Se construye la malla de tal forma, que considere cualquier composición de materiales para las paredes, techo y piso; bajo condiciones transitorias de contorno que incluyen la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar global sobre las superficies para el período de asoleamiento, intercambio radiactivo de onda larga entre las superficies externas y el cielo en el período de asoleamiento y no asoleamiento, temperatura del suelo y la velocidad del viento. Se utiliza la aproximación de Bousinesq para el tratamiento del movimiento convectivo del aire contenido en el interior de la sección.

Ecuaciones gobernantes

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

Cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} \tag{3}$$

Energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T + \frac{s}{\rho c_p} \tag{4}$$

Masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho = 0 \tag{5}$$

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

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] + s_\phi \tag{6}$$

donde: Φ = es la variable dependiente que puede ser u, v, h ó T , energía cinética turbulenta, etc.
 $\Gamma\Phi$ = es el coeficiente de difusión correspondiente a la variable f en consideración
 $S\Phi$ = es el término fuente.

El método de resolución, que utiliza la técnica de las diferencias finitas basada en la aproximación de los volúmenes de control, se encuentra descrito en el manual del usuario del código EVITA (Rincón, 1997).

Características del programa

El programa de computación EVITA está elaborado en lenguaje de programación FORTRAN. Utiliza el esquema computacional general descrito por Patankar (1991) que consta principalmente de dos partes: una parte invariable que es común a todas las aplicaciones, donde está el esquema de solución de las ecuaciones diferenciales gobernantes del fenómeno estudiado, y otra parte adaptable, de acceso al usuario, que depende del problema físico a resolver. Esta parte adaptable permite suministrar los datos geométricos de la sección; introducir las propiedades de los materiales y algunas constantes requeridas para la simulación de temperatura ambiente, irradiancia sobre techo y paredes, y presión del vapor de agua; introducir los valores iniciales de las variables principales e inicializar las condiciones de contorno; realizar los cálculos de las condiciones de

contorno que varían con el tiempo; organizar la salida de los resultados y determinar cualquier cantidad requerida por posprocesamiento de los resultados del programa; establecer el número de iteraciones e introducir los coeficientes de difusión, los coeficientes de los términos fuente y la información de las condiciones de contorno.

Condiciones en los límites del sistema

En los casos estudiados se tienen dos tipos de condiciones de bordes del sistema: flujos de calor (en todos los bordes excepto en el piso) y el valor conocido de la temperatura del suelo a 1 m de profundidad. En paredes y techo se tienen flujos de radiación solar, flujos de calor por convección debido al viento, intercambio radiactivo de onda larga entre las superficies y el cielo, y para el sistema pasivo implementado sobre el techo, transferencia de calor por evaporación o condensación de agua desde o hacia la superficie del estanque de agua. Por lo tanto, como sólo se está considerando la carga térmica a través de la superficie exterior y el piso, y el movimiento del aire interior por diferencia de densidades, las condiciones de contorno involucran: funciones dependientes del tiempo, de la temperatura ambiente y de la irradiancia global sobre la superficie horizontal y las verticales orientadas; valores medios horarios de la velocidad del viento y 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 y la temperatura del subsuelo a un metro de profundidad, correspondiente a los valores medidos en el periodo de experimentación de los módulos.

4.2. Simulación numérica

A continuación se compara la evolución de las temperaturas medias horarias registradas durante las series

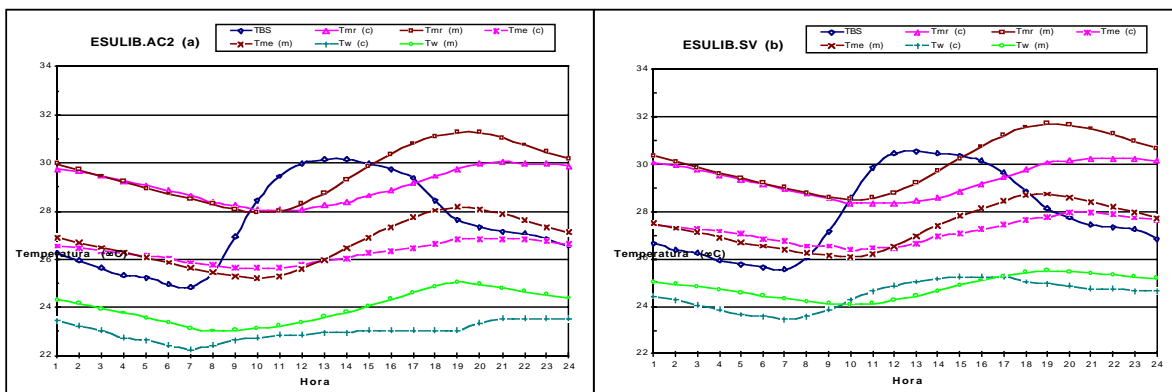
experimentales ESULIB.AC2 y ESULIB.SV, con las temperaturas calculadas con EVITA, correspondientes al tercer día de simulación cuando se alcanza la estabilización del sistema. Los ME de estas series han sido simulados bajo las mismas condiciones climáticas promedio de cada periodo.

En el caso ESULIB.AC2 (figura 8a) se ve que en las primeras 12 h del día los resultados calculados, tanto del MR como del ME, son prácticamente iguales a los valores medidos, mientras que el proceso de calentamiento es más lento que en la realidad. El error medio absoluto es de 0,35°C en el ME, y la amplitud calculada es de 1,7°C inferior a la medida. Estas diferencias se deben, en parte, a que en la simulación, la infiltración de aire atmosférico en el espacio sobre el estanque de agua, durante el día, se ha considerado nula, mientras que en realidad los paneles que cubrían el estanque de agua no cerraban herméticamente y el aire circulaba con cierta libertad. La temperatura del agua del estanque resulta inferior a la medida. Se observan errores medios aproximados de 1°C. Esto hace suponer una sobrestimación del enfriamiento radiante nocturno en el agua, que concuerda con el hecho de no haber considerado la nubosidad en el enfriamiento radiante neto a nivel del techo.

Un aspecto importante a retener es la diferencia entre las temperaturas medias de los módulos de referencia y experimental. Durante las mediciones, esta diferencia fue de 2,94°C y en la simulación de 2,75°C. Como puede verse, los resultados de la simulación se ajustan muy bien en condiciones de cielo claro y sin precipitación.

Puede concluirse que, aun cuando se trata de un modelo bidimensional, EVITA, concebido para estudios comparativos, simula de manera bastante acertada la evolución de la temperatura interna del ME de la serie ESULIB.AC2. Sin embargo, es notable el efecto de algunos de los criterios manejados en la simulación como son: la infiltración nula en

FIGURA 8
Evolución de temperaturas medidas y calculadas en las series: ESULIB.AC2 (a) y ESULIB.SV (b)



el interior del local y sobre el estanque de agua, y la no consideración de la nubosidad en el intercambio radiante de onda larga entre el techo y el cielo.

La simulación del ME en la serie ESULIB.SV se ha realizado partiendo de la misma discretización espacial que en el caso recién analizado. Para ello, se bloquearon los nodos de la superficie del techo, haciendo nula la radiación solar durante el día. Los resultados de esta simulación, en términos de la temperatura media diaria, son aún más cercanos a los medidos que los de la serie ESULIB.AC2 (figura 8b). El error medio es de tan sólo 0,19°C y el error máximo de 1,05°C. Un aspecto a remarcar es que las temperaturas del agua (medida y calculada) son casi iguales. La temperatura media calculada es tan sólo 0,3°C inferior a la medida, mientras que en ESULIB.AC2 la diferencia era de 1°C inferior a las medidas. Estos resultados parecen indicar que la estimación del enfriamiento evaporativo es bastante acertada, mientras que el enfriamiento radiante es sobrestimado.

Otras razones que podrían justificar las pequeñas discrepancias entre los valores calculados y los medidos son: la relación entre la superficie exterior y el volumen interior (S_{ext}/V_{int}) del modelo matemático es prácticamente la mitad del módulo de referencia (1,25 contra 2,31); la relación entre la superficie del techo y el volumen interior (S_t/V_{int}), es de 0,46 en el modelo matemático contra 0,52 en la realidad y, por último, debido a la latitud del lugar, durante los meses de enero y febrero la radiación sobre la fachada sur del ME es importante, sin embargo, ésta no es considerada en el modelo bidimensional dada su orientación este-oeste.

5. CONCLUSIÓN GENERAL

Las características físicas de la arquitectura desarrollada en las últimas décadas en ciudades como Maracibo, han creado un problemática arquitectónica y energética que reclama el desarrollo de nuevos modelos de construcción adaptados al medio y energéticamente eficientes.

Se ha puesto a punto una plataforma experimental para la evaluación de SPE. Esta infraestructura de investigación compuesta por dos módulos (MR y ME), una estación meteorológica y un sistema automatizado de adquisición y procesamiento de datos ha permitido observar la evolución de los sistemas estudiados en tiempo real y obtener la información necesaria para su caracterización.

Se ha observado la mayor capacidad de enfriamiento ($PEM=24W/m^2$), las temperaturas características más favorables y los mayores índices de performance de enfriamiento ($IPE=0.65$) en el SPE donde se combinan el enfriamiento radiante nocturno y el enfriamiento evaporativo indirecto (ESULIB.AC2). Se ha comprobado que, bajo las condiciones climáticas calientes y húmedas de esta región, es posible enfriar los espacios habitables por medios naturales, reduciendo la carga de enfriamiento hasta en 65 por ciento. Así mismo, se ha verificado que es más conveniente ventilar el estanque de agua durante el día que mantenerlo aislado. De este modo se puede optimizar la eficiencia del SPE de la serie ESULIB.AC2, aprovechando el enfriamiento evaporativo indirecto de manera continua.

La comparación de los resultados experimentales con los resultados numéricos respectivos han permitido validar el programa de simulación térmica EVITA. Con las limitaciones propias de un modelo bidimensional, EVITA es una herramienta de simulación del comportamiento térmico de alto nivel de precisión que puede ser utilizada en estudios de sensibilidad paramétrica, optimización térmica para el ahorro de energía en viviendas y aplicación de sistemas pasivos para el enfriamiento de edificaciones. Se recomienda introducir, en el código de cálculo, la consideración de la nubosidad y del intercambio radiante entre las superficies interiores, así como aplicar criterios más acertados, en cuanto a la infiltración de aire del ambiente, lo que debe traducirse en resultados más acordes a los observados experimentalmente.

La utilización de estos SPE en viviendas de una o dos plantas permite reducir el consumo de energía en el sector residencial, minimizando el problema de generación de electricidad a nivel nacional; favorecer las economías familiares al reducir el costo global de la edificación y contribuir con el desarrollo de una arquitectura bioclimática.

Las conclusiones antes señaladas permiten recomendar la concepción y construcción de un prototipo de vivienda de interés social (bajo costo) donde se evalúe de manera integral, además de la performance térmica, otros aspectos relacionados con: aceptación y conducta del usuario; la relación costo-beneficio; la optimización del SPE y del sistema constructivo y el mantenimiento del sistema.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto de investigación ha sido financiado por el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura, el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de LUZ y la C.A. Energía Eléctrica de Venezuela. Nuestro agradecimiento a estas instituciones y particularmente al equipo de colegas y auxiliares de investigación que han colaborado en el mismo a lo largo de esta experiencia.

SIMBOLOGÍA

| Símbolo | Magnitud | Unidad | | | |
|----------------|--|---------------------|----------------|---|-------------------|
| A_t | Superficie interior del techo | m^2 | T_g | Temperatura de globo en el interior del local | K, °C |
| C_p | Calor específico | J/kgK | T_r | Temperatura de referencia (25°C) | °C |
| DE | Depósito energético | | Trm | Temperatura radiante media | K, °C |
| EED | Energía de Enfriamiento Diario | Wh/m ² d | $T_{s_{1..n}}$ | Temperatura de la superficie | K, °C |
| HR | Humedad relativa | % | T_{su} | Temperatura del suelo a 1m de profundidad | K, °C |
| I_d | Radiación difusa sobre la superficie horizontal | W/m ² | $T_{w_{1,2}}$ | Temperatura del agua en el techo | K, °C |
| I_g | Radiación global sobre la superficie horizontal | W/m ² | UA_p | Coficiente de transmisión global de las paredes | W/K |
| IPE | Índice de performance de enfriamiento | | UA_t | Coficiente de transmisión global del techo | W/K |
| ME | Módulo Experimental | | ΔT | Amplitud o diferencia de temperatura | K, °C |
| MR | Módulo de Referencia | | ∇P | Gradiente de presión del fluido | |
| PEM | Potencial de Enfriamiento Medio | W/m ² | $\nabla^2 T$ | laplaciano de la temperatura | |
| Q_{cv} | Flujo de calor convectivo | W | \rightarrow | | |
| Q_E | Flujo neto de enfriamiento | W | g | Vector aceleración de la gravedad | |
| Q_{ev} | Flujo de calor evaporativo | W | \rightarrow | | |
| Q_{ir} | Flujo de calor radiactivo de onda larga | W | u | Vector velocidad del fluido | |
| $SATD$ | Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos | | α | Difusividad térmica | m ² /s |
| SPE | Sistemas Pasivos de Enfriamiento | | Φ | Variable dependiente, puede ser u, v, h, T, etc. | |
| $T_{a_{1..n}}$ | Temperatura interior del local | K, °C | $\Gamma\Phi$ | Coficiente de difusión correspondiente a la variable F | |
| TBH | Temperatura de Bulbo Húmedo | K, °C | λ | Conductividad térmica | W/mK |
| TBS | Temperatura de Bulbo Seco (ambiente) | K, °C | ρ | Densidad | Kg/m ³ |
| T_a | Temperatura ambiente | K, °C | $S\Phi$ | Término fuente (tasa volumétrica de generación de calor) | |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMAO, N.; RINCÓN, J. (1993). «Alternative Designs for Passive Cooling Homes for Venezuela». *ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 115, pp. 161-168.
- C.A. ENELVEN (1994). *Estadísticas de la empresa*. Maracaibo.
- CAVEINEL (1994). «Necesidad de programas de uso racional de la energía en países en vías de desarrollo». *XXVIII Mesa Redonda sobre la Industria Eléctrica*. Nov. 1994.
- GONZÁLEZ, E. (1989). *Hacia una vivienda climatizada por medios pasivos*. Informe de investigación. Facultad de Arquitectura, LUZ.
- GONZÁLEZ, E. (1990). *Evaluación de sistemas pasivos de enfriamiento y su aplicación en el diseño de viviendas. 1ra Parte*. Informe de investigación CONDES. Facultad de Arquitectura, LUZ.
- GONZÁLEZ, E. (1995). «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. Caracas, Venezuela.
- GONZÁLEZ, Eduardo (1997). *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 París. Diciembre, 1997.
- PATANKAR, S.V. (1991). *Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer*. Innovative Research, Inc.
- RINCÓN, J.; Almao, N. (1997). *EVITA, manual del usuario*. Manuscrito en preparación.
- VILLANUEVA M., L. A. (1994). «La política energética y el uso racional de la energía eléctrica». *XXVIII Mesa Redonda sobre la Industria Eléctrica*. Barquisimeto.