

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA PASIVO DE ENFRIAMIENTO POR TECHO ESTANQUE

### AN EXPERIMENTAL STUDY OF A ROOF-POND AS A PASSIVE COOLING SYSTEM

#### ANDYS PIÑATE

Arquitecto, aspirante al título de Especialista en Desarrollo Tecnológico de la Construcción del posgrado del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción.

#### LUIS ROSALES

Profesor Asociado del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción

#### ERNESTO LORENZO

Profesor Asistente del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción

#### RESUMEN

El artículo presenta los resultados experimentales de un sistema pasivo de enfriamiento radiante por techo estanque, construido en la ciudad de Caracas, Venezuela. El objetivo fue verificar si dicho sistema es capaz de reducir la temperatura del aire en espacios con cargas térmicas internas y en qué medida lo haría. Para ello fueron construidos dos prototipos, uno experimental y otro de control, ambos con aislamiento térmico diurno en techo, iguales condiciones climáticas y cargas internas, pero el primero con un techo estanque y el segundo con un techo de placa de concreto. Como parte de los resultados se muestra un comportamiento satisfactorio del prototipo con techo estanque, con temperaturas diurnas hasta 4°C menores que las del prototipo con techo de concreto.

#### Descriptor

Sistemas pasivos de enfriamiento, enfriamiento radiante, techo estanque, confort térmico, arquitectura bioclimática, ahorro energético, cargas térmicas, sostenibilidad.

#### ABSTRACT

*The paper presents the results of an experimental study of a roof-pond as a passive cooling system for buildings, carried on in Caracas, Venezuela. The aim was to verify if the system reduces the indoor temperature of spaces, and to what extent, taking into account the internal heat loads. Two prototypes were built, one experimental, one for control, both having daytime thermal insulation on the roof, the same climatic and internal heat loads conditions, but the first having a roof-pond and the second, a concrete slab roof. The roof-pond system produced drops of up to 4°C in indoor daytime temperature, compared to the concrete slab roof prototype.*

#### Descriptors:

*Passive Cooling Systems, Radiant Cooling, Roof-pond, Thermal Comfort, Bioclimatic Architecture, Energy Saving, Thermal Loads, Sustainability.*



## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA PASIVO DE ENFRIAMIENTO POR TECHO ESTANQUE

La Agencia Internacional de Energía señala que en el año 2010 la climatización representó 34% y 40% del consumo energético de las edificaciones residenciales y comerciales en el mundo, respectivamente (IEA, 2013). Estos sectores son a su vez responsables del 36% de la energía primaria que se consume mundialmente (OCDE, 2012). Según Pérez et al. (2007), en las naciones desarrolladas, la climatización representa la mitad de la energía consumida por los edificios, y entre la quinta y décima parte de la energía total consumida en el mundo. Sivak (2013), luego de evaluar la demanda de energía por concepto de aire acondicionado en 170 países, concluyó que debido a que el mayor número de países en vías de desarrollo se encuentra en climas cálidos, de seguir su crecimiento actual podría superarse en las próximas décadas 45 veces el consumo de Estados Unidos. A pesar de este panorama, como se deriva de una investigación basada en 80 estudios realizados en todo el mundo (Levine et al., 2007), existe el potencial para eliminar, de aquí al año 2030, el 31% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por el uso de energías no renovables en edificios. Los países en vías de desarrollo tienen en esto el doble del potencial de los países de la OCDE y los países con economías en transición juntos.

Venezuela, por su parte, tiene un consumo de energía alto si se compara con los países de América Latina y el Caribe: su consumo *per capita* anual es de 3.313 KWh (año 2011), mientras que el de la región es de 1.816 KWh (Banco Mundial, 2014). Según estadísticas de Caveinel (2007), los sectores industrial, residencial y comercial representan el mayor porcentaje de consumo eléctrico. En los últimos años, sin embargo, el país ha vivido una crisis en el sector eléctrico ocasionada por el déficit

de oferta. En busca de soluciones, el gobierno impuso cortes eléctricos programados, reducciones en los horarios de centros comerciales y exigió a los sectores residenciales e industriales disminuir 20% el consumo mensual de energía. Ello vino acompañado de inversiones rápidas orientadas a aumentar la oferta, basadas principalmente en la instalación de centrales termoeléctricas, que son altas generadoras de GEI. En la actualidad, la mayoría de las ciudades del interior del país sigue sufriendo las consecuencias del déficit, sin que las medidas tomadas en medio de la urgencia aporten soluciones sostenibles.

Estas situaciones problemáticas globales y locales generan en contrapartida la conciencia del ahorro energético en el consumidor, mientras que en los profesionales de la arquitectura impulsan la exploración de alternativas de diseño y construcción que apunten hacia el uso de energías renovables, con miras a cumplir con los preceptos básicos de la sostenibilidad. De ahí que una de las metas básicas de la arquitectura contemporánea sea desarrollar e implantar tecnologías de climatización basadas en energías renovables y/o de bajo consumo energético (climatización pasiva), entendiéndoseles como el medio sostenible para cumplir con el confort térmico, uno de los requerimientos de habitabilidad fundamentales en edificaciones.

Los sistemas de enfriamiento pasivo se ubican en este marco general de acción. Estos se basan en el principio según el cual el modo natural de fluir de la energía térmica es desde el foco caliente hacia el foco frío. Para que un edificio pierda calor de modo natural, debe estar en contacto con un foco frío que reciba ese calor. Si por el contrario se desea evitar la pérdida del calor, se debe aislar el foco frío. El foco frío puede ser una temperatura real (tem-

peratura del suelo a determinada profundidad) o una temperatura hipotética (temperatura aparente del cielo), siendo ésta la temperatura teórica mínima que puede alcanzar el fluido vector de calor a la salida del sistema (generalmente aire).

Los sistemas de enfriamiento pasivo de edificaciones más conocidos son los sistemas de enfriamiento por contacto con el suelo (por contacto directo o mediante tubos enterrados), los sistemas de enfriamiento evaporativo (directo o indirecto) y los sistemas de enfriamiento radiante, en especial los techos de gran masa térmica con aislamiento móvil y los techos livianos metálicos. Estos sistemas han sido ampliamente estudiados internacionalmente, destacándose los trabajos de Givoni (1994, 2004, 2009, 2011) y los trabajos reunidos en Santamouris et al. (1996, 2007), entre otros. Una línea de investigación descrita en esta última referencia tuvo continuación en Venezuela, en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDECE, de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela, en los trabajos orientados a determinar el potencial en el clima venezolano de varios sistemas de enfriamiento pasivo (Hobaica et al., 2001; 2007). En ese mismo instituto, Lorenzo (2007; 2011) y Lorenzo et al. (2008; 2010) abordaron el estudio experimental del sistema de conductos enterrados, con resultados satisfactorios para el clima venezolano. En la Universidad del Zulia, por su parte, en el Instituto de la Facultad de Arquitectura-IFA, se desarrolló por varios años una línea de investigación orientada a evaluar de manera experimental estos sistemas en el clima cálido-húmedo de Maracaibo (González, 1989; 1997a; 1997b; 1998; 2000; 2005; Bravo y González, 2014; González, 2010; La Roche, 2000; 2001). Entre los sistemas evaluados estuvo el techo estanque, el cual usa la masa térmica del agua como sumidero de las cargas térmicas, obteniéndose la disminución de los picos diurnos de la temperatura interior. Otro experimento con este sistema de enfriamiento

fue realizado en la ciudad de Colima, México, por Sánchez (1993). En estos experimentos llama la atención la no simulación de las cargas internas, limitándose el estudio a la evaluación de la extracción del calor que pueda de alguna forma penetrar desde el exterior durante el día. Al ser la función principal del agua almacenar las cargas internas sin aumentos bruscos de temperatura, se considera que un experimento sobre el sistema de techo-estanque debe necesariamente incluir dichas cargas.

En este punto se inserta el presente trabajo, el cual se centra en estudiar experimentalmente el potencial de enfriamiento pasivo de un techo estanque, con agua como masa térmica de almacenamiento de calor y aislamiento diurno, en el clima moderado a cálido húmedo de la ciudad de Caracas. Para el logro del objetivo se desarrolló un dispositivo experimental que consta de dos módulos de trabajo: un módulo de control (MC) y un módulo experimental (ME). Ambos módulos son idénticos en forma, dimensiones internas y materialidad. De esta manera la carga térmica es igual en cada uno de ellos, pudiéndose comparar el funcionamiento del ME frente al MC y determinar el potencial de enfriamiento comparativo. El análisis examina las temperaturas características y los grados-hora de malestar térmico.

## SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE POR TECHO ESTANQUE

El sistema de enfriamiento radiante por techo estanque es una variante de techo de gran masa térmica con aislamiento móvil, y consiste en un estanque de agua ubicado en el techo, no aislado del ambiente interior, que se cubre durante el día por fuera con material aislante para evitar que el calor del sol llegue al agua, al tiempo que se le expone por debajo al calor del espacio interior, para que éste se almacene en el agua. El agua, por su elevada masa térmica, no aumenta de manera significativa su temperatura al absorber ese calor inter-

no, manteniendo el espacio más fresco por más tiempo. Durante la noche, la cubierta de material aislante se remueve, dejando al descubierto el agua y permitiendo que el calor almacenado en el día se irradie hacia la bóveda celeste. Si el estanque es abierto, parte del calor almacenado será también disipado por evaporación del agua. De esa forma el agua está fría a comienzos del día siguiente, cuando se vuelve a cubrir con aislante (figura 1).

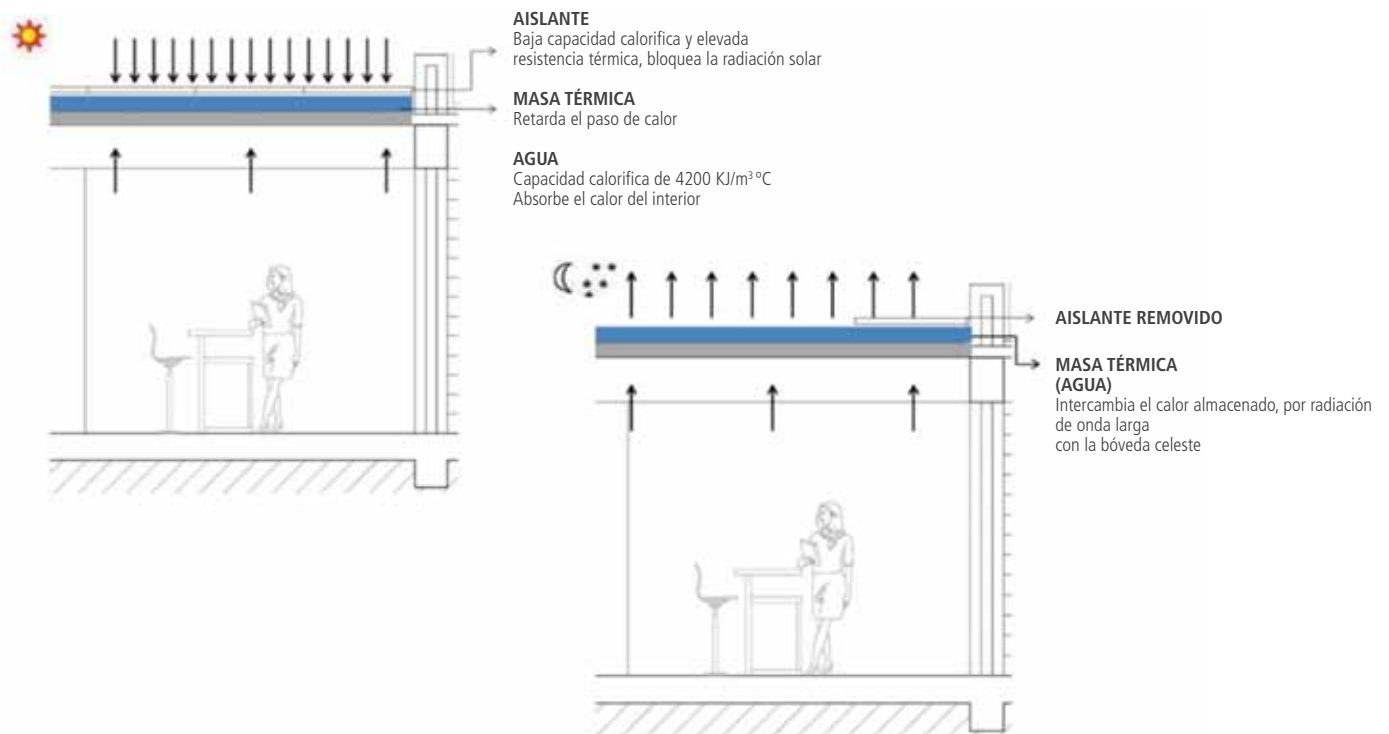
## DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Para esta investigación se siguió una metodología experimental en la que se obtuvieron dos series de datos: una primera serie (experimento 1) correspondiente al sistema de estanque de techo sin cargas internas, y una segunda serie (experimento 2), con dichas cargas. La incorporación de las cargas internas es fundamental para apreciar el potencial del sistema, puesto que su principio se basa en que las mismas se almacenan durante el día en el agua sin

ocasionar aumentos significativos en la temperatura resultante interior, en razón del elevado calor específico del agua (aproximadamente  $4.180 \text{ J/KgK}$ ).

Con este fin se diseñaron y construyeron dos módulos de trabajo: un módulo de control (MC) y un módulo experimental (ME). Ambos son de base cuadrada, con dimensiones de  $0,90 \text{ m} \times 0,90 \text{ m}$ . El MC tiene una altura de  $0,57 \text{ m}$  y el ME,  $0,72 \text{ m}$ . El ME es más alto porque tiene que abarcar la profundidad del estanque con miras a que el espacio interno en ambos módulos sea igual. El estanque es una bandeja metálica calibre 18, en la cual caben hasta  $15 \text{ cm}$  de altura de agua. El techo del MC es una losa de concreto reforzado de  $5 \text{ cm}$ . Las paredes de ambos módulos son de bloques de arcilla de  $10 \text{ cm}$ , con acabado de friso liso de  $2,5 \text{ cm}$ . Para que las transferencias de calor se den básicamente por el techo, se aislaron las paredes y el piso forrándolos con paneles de poliestireno expandido de  $5 \text{ cm}$ , obteniéndose al final un espacio útil de trabajo (espacio

Figura 1. Funcionamiento diurno y nocturno del sistema de techo estanque



interno) de 0,80 m x 0,80 m x 0,47 m, lo que da un volumen de 0,30 m<sup>3</sup> (figuras 2, 3, 4 y 5).

Durante la toma de datos se aisló el techo de ambos módulos con un panel de poliestireno expandido, desde las 6 a.m. hasta las 6 p.m., retirándolo el resto del tiempo, en la noche. El espesor de la parte de agua en el estanque fue en ambos casos de 10 cm (figura 6).

Los módulos experimentales se ubicaron en la terraza de la Quinta Esnujaque, en la urbaniza-

ción La Floresta, Municipio Chacao de la ciudad de Caracas. El clima de Caracas se puede catalogar como tropical de altitud media ( $\approx 950$  msnm), de amplitud anual pequeña (aproximadamente 4°C) y de sensación térmica entre moderada y cálido húmeda (Rosales, 2013). Las temperaturas medias mensuales oscilan entre 18°C-19°C en el mes más frío y 22°C-24°C en el más cálido, con amplitudes diurnas del orden de 10°C-12°C. La ciudad presenta dos estaciones bien definidas:

Figura 2. Construcción de los módulos



Figura 3. Esquema del módulo de control



Figura 4. Esquema del módulo experimental

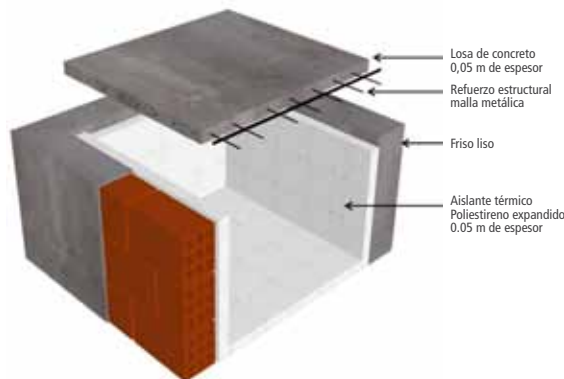


Figura 5. Aislamiento de los módulos con poliestireno expandido

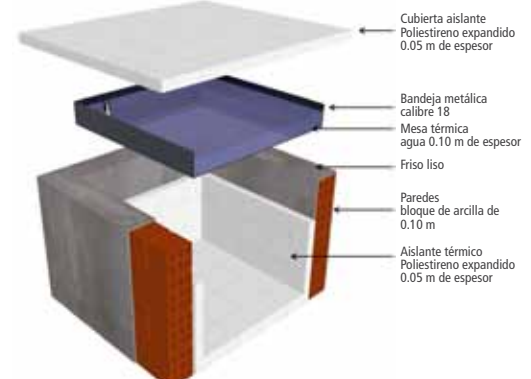


Figura 6. Los módulos antes de colocarle el agua al ME y el aislante por encima



la temporada seca (diciembre a mayo) y la temporada lluviosa (junio a noviembre). Las experimentaciones se realizaron en los meses de junio y julio, con una temperatura exterior promedio de 24°C y una humedad relativa promedio de 76%.

Para registrar la temperatura y la humedad, tanto dentro como fuera de los módulos, se utilizaron cuatro *data logger* tipo HOBO, marca ONSET, de diferentes modelos. Para la temperatura de globo al interior de cada módulo se utilizaron sensores de temperatura colocados dentro de bolas color negro mate. La temperatura exterior se midió protegiendo el sensor

de la radiación solar y la radiación del entorno (figura 7).

Los equipos fueron programados para registrar la temperatura y la humedad cada 30 minutos. Las variables que se midieron fueron: la temperatura del aire exterior, la temperatura del aire al interior en cada módulo, la temperatura de globo al interior de cada módulo, la temperatura superficial interior de los techos, la temperatura del agua y la humedad del aire al interior de cada módulo y al exterior (figura 8).

La carga interna planteada para el experimento 2 se basó en la tabla de cargas internas

Figura 7. Registradores de datos, dentro y fuera de los módulos

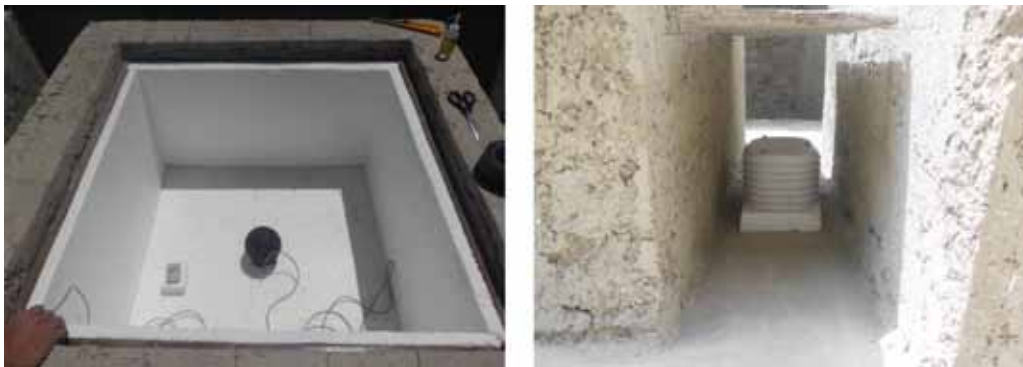


Figura 8. Datos tomados según la ubicación de los sensores



Figura 9 Cargas internas típicas en edificios. CIBSE Guide, 2006

Internal heat gains in typical buildings in W/m<sup>2</sup>

Building type	Use	Density of occupation person/m <sup>2</sup>	Sensible heat gain (W/m <sup>2</sup> )			Latent heatgain (W/m <sup>2</sup> )	
			People	Lighting	Equipment	People	Other
Education	Lecture theatres	1,2	67	12	2	50	-
	Teaching spaces	1,5	53	12	10	40	-
	Seminar rooms	3,0	27	12	5	20	-
Hospitals	Wards	14,0	57	9	3	4,3	-
	Treatment rooms	10,0	8	15	3	6	-
	Operanting theatres	5,0	16	25	60	12	-
Leisure	Hotel reception	4,0	20	10-20	5	15	-
	Banquet/conference	1,2	67	10-20	3	50	-
	Restaurant/dining	3,0	27	10-20	5	20	-
	Bars/lounges	3,0	27	10-20	5	20	-



típicas de la guía CIBSE (CIBSE, 2006) (figura 9). Se tomaron como referencia las cargas asociadas a restaurantes y se extrapoló, considerando el volumen interno de los módulos (0,3 m<sup>3</sup>), lo que arrojó una carga estimada del orden de 10 W. En cada módulo se introdujo luego un bombillo incandescente tipo vela de 15 W, suspendido en la mitad del espacio, que permaneció encendido las 24 horas del día (figura 10).

Figura 10. Cargas internas: bombillo incandescente de 15W



## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### Comparación de las temperaturas

En la figura 11 se presenta la evolución de las temperaturas del experimento 1, sin cargas internas (i.e., sin los bombillos). Las temperaturas de globo interiores del ME y el MC fueron similares, variando en un intervalo de 21°C a 28°C, mientras que la temperatura exterior lo hizo de 21°C a 29°C. Obsérvese que las temperaturas de ambos módulos difieren poco, de 1°C a 1,5°C: al no haber cargas internas, y en razón del aislamiento, el agua del ME no está en el día expuesta a una fuente de calor importante, por lo que no representa una variante influyente en relación con el MC en cuanto a temperatura interior. Por lo mismo, las temperaturas entre ambos techos (concreto reforzado en el MC y agua en el ME) tampoco difieren mucho (figura 12). Sin embargo, aunque no de mane-

Figura 11. Temperatura exterior y temperaturas de globo de ambos módulos Experimento 1: sin cargas internas

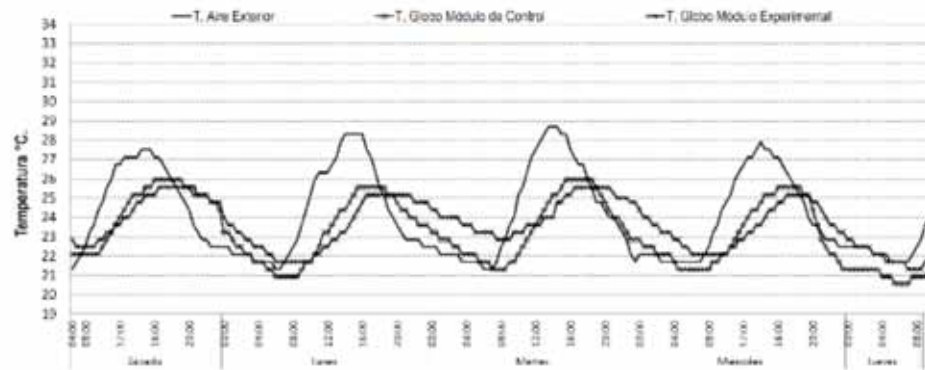
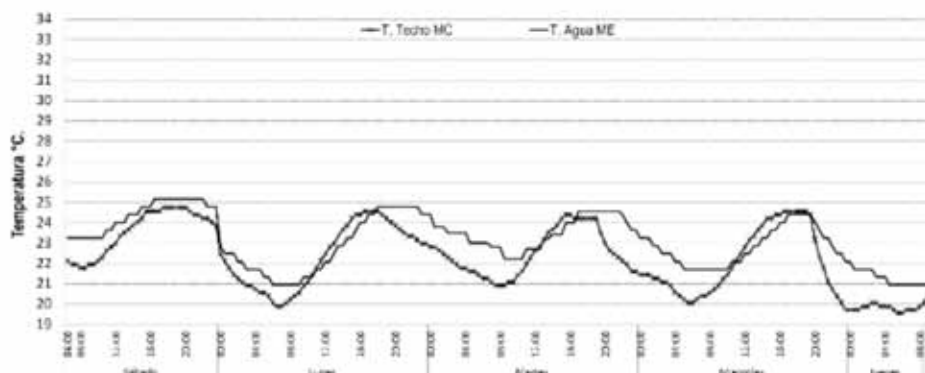


Figura 12. Temperatura superficial interior del techo de concreto reforzado y del agua del ME Experimento 1: sin cargas internas



ra importante, el agua actúa bajando un poco la temperatura del aire interior durante el día y subiéndola un poco en la noche, lo que ilustra el efecto de una mayor masa térmica en los ciclos diurnos de carga y descarga de calor de los prototipos, como respuesta a las fluctuaciones del clima. Debido al aislante, tanto el MC como el ME alcanzan sus temperaturas pico casi 4 horas después que el ambiente exterior. Por lo mismo, ambos módulos lograron temperaturas diurnas inferiores a la temperatura exterior, en un rango de 1°C a 3°C.

Al incorporarse las cargas internas (figura 13), las temperaturas de globo en ambos módulos suben en relación con el experimento 1, sin embargo, el ME presenta una mejora evidente en relación con el MC en términos de enfriamiento. Esto es debido a que parte del calor producido por la bombilla incandescente se almacena en el agua sin que ésta aumen-

te su temperatura de manera significativa, en tanto que en el MC, el concreto se calienta más rápido, y ese calor queda además *atrapado* por el aislante. Las temperaturas interiores del ME siempre fueron inferiores a la temperatura interior del MC, con diferencias que varían entre 1,5°C a 4°C. Incluso en las noches, cuando el aislante se retira y se disipa y evacua calor desde los dos módulos hacia el cielo nocturno, la temperatura de globo del ME se mantiene menor que la del MC: a pesar de que el techo de concreto reforzado del MC se enfría más rápido, no le basta la noche para compensar de forma clara las temperaturas más bajas registradas en el ME al retirarse el aislante. El efecto se corrobora cuando se compara la temperatura superficial interior del techo del MC y el agua en el ME (figura 14): en promedio, a lo largo del período de medición, el agua tiene 3,5°C menos.

Figura 13. Temperatura exterior y temperaturas de globo de ambos módulos. Experimento 2: con cargas internas

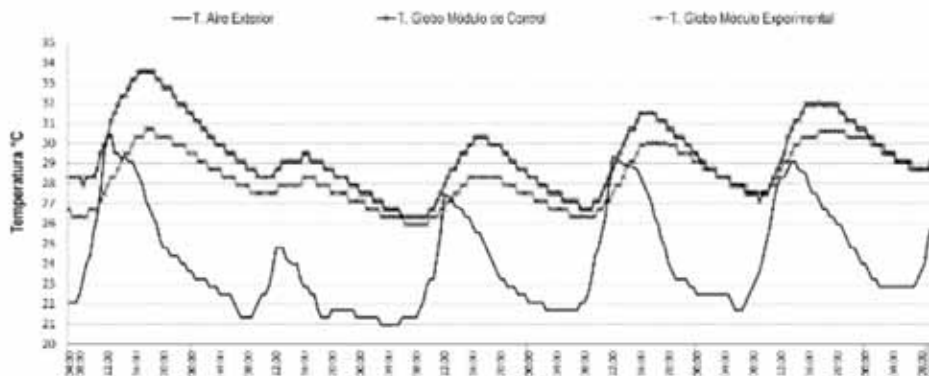
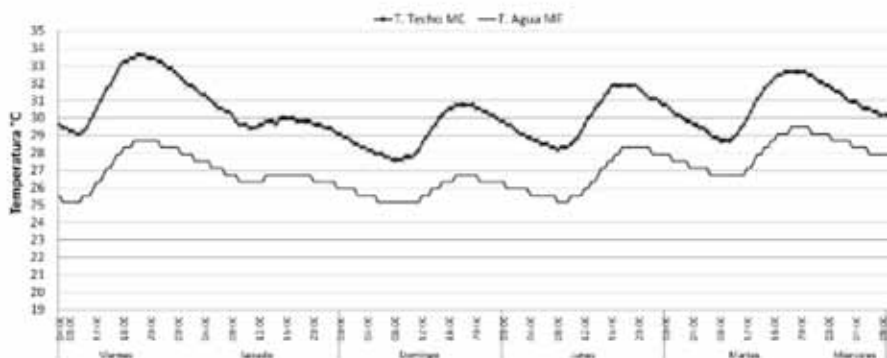


Figura 14. Temperatura superficial interior del techo de concreto reforzado y del agua del ME Experimento 2: con cargas internas





### Estimación de los grados-hora de malestar térmico

El criterio de confort escogido para calcular los grados-hora de malestar térmico es el de neutralidad térmica del modelo de adaptación de la norma ASHRAE 55 para edificaciones en climatización pasiva (ASHRAE, 2004; de Dear y Brager, 2002). De acuerdo con ese criterio, la temperatura de neutralidad térmica o de confort depende de la temperatura media mensual del clima, lo que significa que la sensación térmica se adapta al clima en que se vive. La relación entre ambas temperaturas es lineal y está dada por la expresión:

$$T_n = 17,8 + 0,31 T_{em}$$

Donde:

$T_n$  es la temperatura de neutralidad o de confort  
 $T_{em}$  es la temperatura media mensual del clima

Alrededor de esta temperatura se pueden establecer rangos dentro de los cuales la aceptabilidad variará en porcentaje. La norma Ashrae 55 habla de un rango de  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  para una aceptabilidad del 90% de las personas y de  $\pm 3,5^\circ\text{C}$  para una aceptabilidad del 80%. Para aplicar la ecuación anterior se utilizó el valor de la temperatura media medida durante el experimento ( $25,3^\circ\text{C}$ ), lo que da una temperatura de neutralidad térmica o de confort de  $25,6^\circ\text{C}$ . Si se asume el criterio de 90% de aceptabilidad, se tienen un umbral inferior de confort de  $23,1^\circ\text{C}$  y uno superior de  $28,1^\circ\text{C}$ .

Los grados-hora de malestar térmico ( $^\circ\text{h}$ ) se definen como la sumatoria de los grados en

que se sobrepasan estos umbrales en el período considerado, partiendo de una serie de datos: si el valor de la temperatura a una hora dada supera el umbral superior, se tiene una cantidad de  $^\circ\text{h}$  de malestar de calor igual a la resta entre ambos; si en cambio se encuentra por debajo del umbral inferior, se tiene una cantidad de  $^\circ\text{h}$  de frío igual a la resta entre ambos (negativo). Si la temperatura a esa hora se encuentra en el rango de confort, el valor no se contabiliza (se computa como cero).

En la figura 15 se grafican los grados-hora de malestar térmico por frío y por calor de ambos módulos, para el caso con cargas internas y para el período de 6 días de la serie (se desecharon los días incompletos). Adviértase la notable reducción de  $^\circ\text{h}$  de calor en el ME, cercana al 66% (recuérdese que a ambos se les coloca aislante en el día y se les retira en la noche). En cambio, los grados-hora por malestar de frío en ambos módulos se parecen, lo que se explica por la aproximación que se da entre las temperaturas en horas de la noche, que es cuando hace frío. En otras palabras, el sistema cumple con su objetivo de reducir las temperaturas máximas en el día. Como derivación de este cálculo se puede finalmente contabilizar, para el período considerado de seis días, qué porcentaje de tiempo se está en confort y qué porcentaje no: 70% del tiempo se tiene calor en el MC, mientras que en el ME ese porcentaje baja a 36% (figura 16), siendo el porcentaje de tiempo en confort de 58%.

Figura 15. Grados-hora de malestar térmico por frío y calor en el MC y el ME  
 Experimento 2: con cargas internas

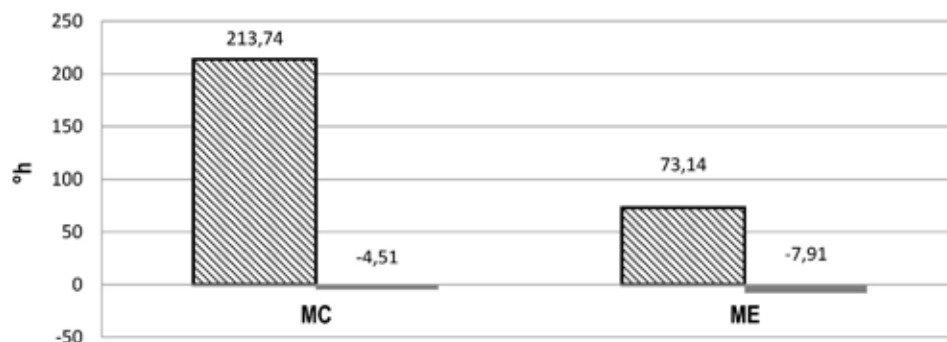
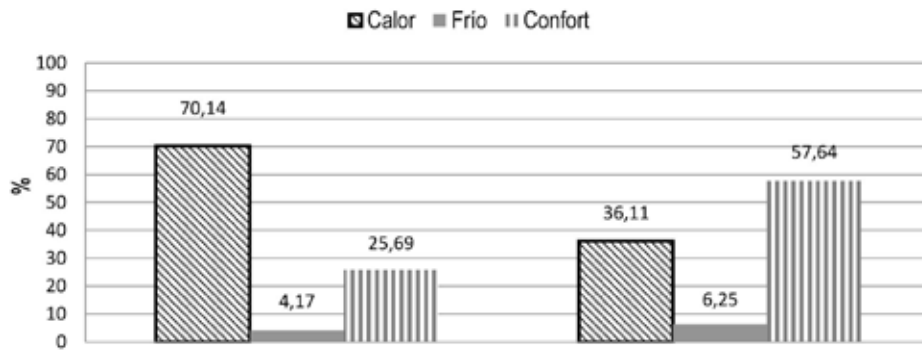




Figura 16. Porcentajes de tiempo de confort y malestar térmico  
Experimento 2: con cargas internas



## CONCLUSIONES

Mediante dos prototipos o módulos experimentales de paredes y pisos aislantes se estudiaron dos configuraciones de techo: un techo estanque con agua (módulo experimental, ME) y un techo de concreto reforzado (módulo de control, MC), ambos bajo las siguientes condiciones: aislamiento por encima en el día, el cual es removido en las noches. Se hicieron dos series de mediciones: una con cargas internas y otra sin ellas. El objetivo fue comprobar que el sistema pasivo de enfriamiento por techo estanque es capaz de reducir las temperaturas diurnas internas en comparación con un techo más liviano en iguales condiciones de funcionamiento.

En la serie realizada sin cargas internas se observó que las temperaturas interiores de ambos módulos son similares. Esto es debido a que al bloquear con aislante la llegada del calor del sol en ambos techos y al no haber cargas internas, se eliminan las dos principales fuentes de calor en edificaciones (*i.e.*, radiación solar y cargas internas), produciéndose ondas de temperaturas internas similares. La mayor masa térmica del agua queda parcialmente anulada, aunque no del todo, puesto que en el prototipo con agua la temperatura en el día, entre las 12:00 y 20:00 h, llega ser hasta 1°C menor, mientras que en la noche, hasta 1,5°C mayor, en comparación con el prototipo de techo de concreto reforzado.

En la serie de mediciones con cargas internas (producidas usando bombillos incandescentes de 15 W) se observó claramente el efecto de la masa térmica del agua, en cuanto a que ésta almacena el calor de la bombilla sin aumentar de forma importante su temperatura, provocando una disminución en la temperatura interior del módulo en comparación con el MC, cuyo techo tiene menos capacidad calorífica, al tiempo que el aislante *atrapa* el calor en el material y el espacio interior. Las temperaturas interiores en el ME fueron inferiores, incluso en las noches, cuando el aislante se retira y se evacua el calor por radiación hacia el cielo nocturno y se produce evaporación en el caso del agua. A pesar de que el techo de concreto reforzado se enfría más rápido, no le basta la noche para alcanzar las temperaturas más bajas registradas en el agua al momento de retirar el aislante.

El aumento del potencial de enfriamiento en el prototipo con techo estanque para la serie experimental con cargas internas se evaluó también calculando los grados-hora de malestar térmico por calor, tomando como referencia el criterio de confort térmico adaptativo de la norma ASHRAE 55 (1994). Estos grados-hora fueron 66% menores en el prototipo de techo estanque, logrando un 58% de tiempo en confort. Por lo tanto, la combinación de un techo estanque con masa térmica de agua y aislamiento diurno es una alternativa interesante para enfriar las edificaciones a través de una técnica pasiva, siendo aún más

efectiva en espacios que por sus características arquitectónicas dificulten la evacuación del calor por otros medios (p.ej., ventilación natural). Por sus características constructivas y de funcionamiento, este sistema de techo puede ser compatible con otras técnicas de climatización, tanto pasivas como activas, siempre que se adapten a los requerimientos propios de la edificación donde se aplique y se tengan en cuenta dos factores fundamentales: la función que realiza la cubierta aislante de bloquear la radiación solar durante el día, evitando que el agua se caliente, y el contacto de la masa térmica con el ambiente interior.

Gracias a los resultados de las investigaciones realizadas en la Universidad del Zulia y la Universidad de Colima, ya mencionadas, junto con los datos que aporta el presente estudio del sistema, en el que se incorporan las cargas internas, el enfriamiento por techo estanco puede contemplarse como una técnica pasiva con potencial en regiones de clima cálido húmedo. Sin embargo, las investigaciones futuras deberán examinar la viabilidad y aceptabilidad en edificaciones reales, antes de ser considerada como alternativa frente a los sistemas tradicionales de climatización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE Standard 55 (2004) *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- Banco Mundial (2014) *Consumo de energía eléctrica (kWh per capita)*. Data disponible en web: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC>
- Bravo, G.; González, E. (2013) *Thermal Comfort in Naturally Ventilated Spaces and Under Indirect Evaporative Passive Cooling Conditions in Hot: humid climate*. Energy and Building, v. 63, p. 79–86.
- Caveinel (2007) *Cámara Venezolana de La Industria Eléctrica. Estadísticas consolidadas*. Data disponible en Web: [www.caveinel.com](http://www.caveinel.com)
- CIBSE (2006) *Environmental criteria for design. Chapter 1 in CIBSE Guide A*. Chartered Institution of Building Services Engineers, London.
- de Dear, R. and Brager, G. (2002) *Thermal comfort in naturally ventilated building: Revisions to ASHRAE Standard 55*. Energy and Buildings, Vol. 34, No. 6 (2002) 549-561. Disponible en web: <http://www.sciencedirect.com/>
- Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons.
- Givoni, B. (2011) *Indoor Temperature Reduction by Passive Cooling Systems*. Solar Energy, v. 85, n. 8, p. 1692–1726.
- Givoni, B.; González, E. (2009) *Thermal Performance of Indirect Evaporative Cooling in a Tropical Climate*. In: Ases Conference, Buffalo, NY. Proceedings.
- González, E. (1990). *Evaluación de Sistemas Pasivos de enfriamiento y su aplicación en el diseño de Viviendas*. Informe de investigación CONDES. Facultad de Arquitectura. LUZ. Maracaibo.
- González, E. (1997a) *Étude de matériaux et des techniques du bâtiment pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide*. Thèse de Doctorat en Energétique de l'École des Mines des Paris, France.
- González, E. (1997b) *Técnicas de enfriamiento pasivo. Resultados experimentales en el clima cálido y húmedo de Maracaibo, Venezuela*. CIT, Información Tecnológica, Vol. 8 N°5, pp. 99-103. La Serena, Chile.
- González, E. (1998) *Evaluación experimental de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo*. Memorias de COTEDI 1998, Caracas.
- González, E. (2003) *Sistemas pasivos de climatización: Enfriamiento natural*. VII encuentro sobre confort del ambiente construido. ENCAC - COTEDI 2003. Maracaibo, Venezuela.

- González, E. (2005) *Enfriamiento evaporativo indirecto en clima tropical húmedo: dos casos de estudio*. Congreso Latinoamericano sobre Confort y Comportamiento Térmico de Edificaciones, COTEDI-2005, Ciudad de México. Memorias.
- González, Sabrina (2010) *Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido húmedo*. Trabajo de grado, de la maestría de energías renovables: Arquitectura y Urbanismo, La Ciudad Sostenible. Universidad Internacional de Andalucía.
- Hobaica, M.E. (2007) *Valoración del potencial de sistemas pasivos de enfriamiento en Venezuela y su factibilidad en la reducción del consumo energético en edificaciones*. Trabajo de Grado. IDEC – FAU – UCV. Caracas.
- Hobaica M.E. y Allard F. (2007) *Integración de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico en Venezuela*. Informe final del proyecto ISPAVEN. Universidad Central de Venezuela (UCV) y Leptab-Universidad de La Rochelle, Francia.
- Hobaica, M.E.; Belarbi, R. y Rosales, L. (2001) *Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo*. Revista Tecnología y Construcción 17-1. IDEC/UCV, Caracas, Venezuela.
- IEA (2013) *World Energy Outlook 2013*. Internacional Energy Agency. Disponible en web: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2013/>
- IPCC (2007) *IV informe de evaluación. El cambio climático. Adaptación y vulnerabilidad*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Paris , Francia.
- La Roche, P.; Givoni, B. (2000) *Indirect Evaporative Cooling with an Outdoor Pond*. Proc. of PLEA 2000, Architecture City and the Environment, Cambridge UK , pp. 310-311.
- La Roche, P.; Givoni, B. (2001) *Modeling Radiant Cooling Systems for Developing Countries*. Proceedings of ISES World Conference, Bringing Solar Down to Earth, Adelaide, Australia.
- Levine, M.; Urge-Vorsatz, D.; Blok, K.; Geng, L.; Harvey, D.; Land, S.; Levermore, G.; Mongameli Mehlwana, A.; Mirasgedis, S.; Novikova, A.; Rilling, J.; Yoshino, H. (2007) *Residential and commercial buildings, Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. & New York, NY, USA. Massachusetts, USA.
- Lorenzo, E. (2007) *Climatización Pasiva por Conductos Enterrados. Caso de aplicación: Almacenes L&G para bebidas alcohólicas y gaseosas*. Tesis de especialización no publicada. Caracas, Venezuela.
- Lorenzo, E. (2011) *Climatización pasiva por conductos enterrados dentro del contexto climático venezolano*. Ediciones de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UCV. Caracas, Venezuela.
- Lorenzo, E.; Hobaica, M. (2010) *Racionalidad energética en edificaciones industriales. Aplicación de sistemas pasivos de climatización*. Revista *Tecnología y Construcción* volumen 26 número II. Caracas, Venezuela.
- Lorenzo, E.; Hobaica, M. y Conti, A. (2008). *Desarrollo experimental de un prototipo del sistema de tubos enterrados*. Revista *Tecnología y Construcción* volumen 24 número I. Caracas, Venezuela.
- Pérez Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. (2008) *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings, Volume 40, Issue 3, 2008: 394-398.
- Rosales, Luis (2013) *Caracterización y clasificación del clima para el diseño bioclimático en Venezuela*. Memorias de las XXXI Jornadas de Investigación del IDEC. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Sánchez, Luis Humberto (1993) *Evaluación de un techo estanque como sistema de enfriamiento pasivo en un clima cálido sub-húmedo*. Trabajo de maestría. Universidad de Colima. Colima
- Santamouris, M. y Asimakopoulos, D. (1996) *Passive Cooling of Buildings*. James&James Science Publishers. Londres, Inglaterra.
- Santamouris, M.; Pavlou, K.; Synnefa, A.; Niachou, K. y Kolokotsa, D. (2007) *Recent progress on passive cooling techniques. Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households*, Energy and Buildings, vol. 39, nº 7: 859-866.
- Sivak, M. (2013) *Will AC Put a Chill on the Global Energy Supply?* American Scientist, Vol. 101 Issue 5.