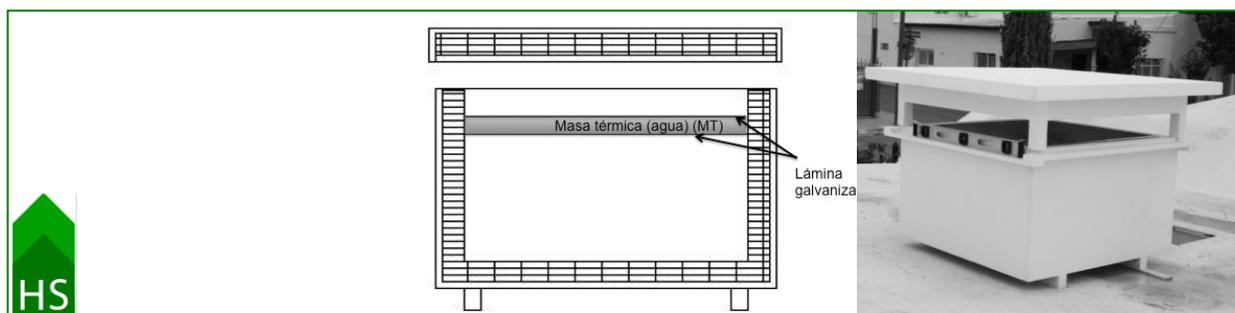


Porcentaje de horas de confort térmico con técnicas de enfriamiento evaporativo indirecto en techos estanque en clima árido

Percentage of hours of thermal comfort with indirect evaporative cooling techniques in roof ponds in an arid climate



Luis Carlos Herrera carlos.herrera@uacj.mx

Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte - Universidad Autónoma de Ciudad Juárez – Chihuahua, México

Gabriel Gómez-Azpeitia ggomez@ucol.mx

Facultad de Arquitectura y Diseño - Universidad de Colima – Colima, México

Eduardo González Cruz edugoncruz@gmail.com

Facultad de Arquitectura y Diseño - Universidad del Zulia – Maracaibo, Venezuela



RESUMEN

Palabras Clave

Confort térmico
Clima árido
Techo estanque
Técnicas de enfriamiento pasivo

En este documento se presenta un estudio comparativo del porcentaje de tiempo en que la temperatura operativa se ubica dentro de los límites de la zona de confort propuesta por la norma ASHRAE 55-2010 para edificios libremente ventilados. Las temperaturas estudiadas se registraron al interior de módulos experimentales con techo estanque, emplazados en clima cálido seco, a los que les fueron aplicadas cinco técnicas de enfriamiento pasivo. El experimento se llevó a cabo en Chihuahua, México (Lat.: 28N, Long.: 106W, altura: 1.425m) durante el verano de 2012. Los resultados indican que el techo estanque es una excelente alternativa para incrementar el porcentaje de horas de confort, pues se alcanza hasta un 30% más horas en promedio, respecto de un módulo control sin techo estanque. Si se añade enfriamiento radiativo nocturno, el porcentaje aumenta a 40%, e incorporando masa térmica, se incrementa hasta en un 65%. Incluso, en algunos casos, el enfriamiento es tan intenso que se sobrepasa el rango inferior de confort en horas de las mañanas.

ABSTRACT

Key Words

Thermal comfort
Arid climate
Roof pond
Passive cooling techniques

This document presents a comparative study of the percentage of time that the operating temperature is located within the limits of the comfort zone proposed by ASHRAE Standard 55-2010 for naturally ventilated buildings. The temperatures studied were recorded inside of experimental roof pond modules, located in a warm, dry climate. Five passive cooling techniques were applied to the modules. The experiment was carried out in Chihuahua, Mexico (Lat.: 28N, Long.: 106W, altitude: 1,425m) during the summer of 2012. The results indicate that roof ponds are an excellent alternative to increase the percentage of hours of comfort, because they provide up to 30% more hours on average with respect to a control module without a roof pond. If radiative cooling is added at night, the percentage increases to 40%, and incorporating thermal mass it increases up to 65%. Even, in some cases, the cooling is so intense that it exceeds the lower range of comfort in morning hours.

1. Introducción

La ciudad de Chihuahua se localiza al noroeste de México y sus coordenadas geográficas son: 28° 38' latitud norte, 106° 06' longitud oeste; y se ubica a 1.425 metros sobre el nivel medio del mar (Figura 1).

El clima se considera cálido seco extremoso

con una temperatura promedio anual máxima de 26.94°C, promedio de 18.9°C y mínima de 10.87°C, con una oscilación térmica de 16.08°C. La humedad relativa promedio es de 52.4%, con mínimas promedio de 14.4%. La precipitación pluvial es de 385.1mm, con vientos dominantes provenientes del noreste con una velocidad promedio de 3.33m/s. La temporada de verano se

caracteriza por un clima cálido seco con una duración promedio de cinco meses (mayo a septiembre). La temperatura máxima promedio es de 32°C, la promedio es de 24.7 °C y la mínima, de 17.5°C. La humedad relativa promedio es de 52.80%, y la mínima es de 16.30%. La precipitación pluvial es de 313.1mm. Este clima presenta periodos recurrentes de sequía debido a su escasa precipitación. De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua (CNA), Chihuahua tuvo periodos de sequía entre 1993 y 2003, y entre 2005 y 2012.



Figura 1: República mexicana. Fuente: Herrera, 2004.

Figure 1: Mexican Republic. Source: Herrera, 2004.

El clima cálido seco del verano obliga a que los habitantes de Chihuahua recurran al uso de equipos de enfriamiento, por lo regular de tipo evaporativo directo. Su uso generalizado origina un aumento en el consumo de energía eléctrica convencional, así como de agua. Esto impacta a las familias económicamente y a las reservas acuíferas de la región, que de por sí son escasas.

En trabajos previos de investigación se demostró que el uso de estrategias bioclimáticas (Herrera, 2009) y de techos estanque (Herrera y Gómez-Azpeitia, 2013) aplicados en la arquitectura, disminuyen el consumo de agua y energía, y alcanzan temperaturas iguales o menores a las logradas con el uso de equipos de enfriamiento evaporativo directo.

El objetivo de este trabajo es estudiar comparativamente los porcentajes de tiempo en que la temperatura interior se mantiene dentro de la zona de confort -de acuerdo a la norma ASHRAE 55-2010 (ANSI/ASHRAE, 2010: 11-12), en un clima cálido- en cinco módulos experimentales con cubierta estanque, así como en un módulo control sin techo estanque. A cada módulo experimental se le aplica una técnica de enfriamiento pasivo:

- Módulo experimental 1: Aislamiento térmico con cámara de aire más enfriamiento radiativo nocturno. (ME1: AT+CA+ERN).
- Módulo experimental 2: Protección solar con masa térmica. (ME2: PS+MT).
- Módulo experimental 3: Aislamiento térmico con masa térmica más enfriamiento radiativo nocturno. (ME3: AT+MT+ERN).
- Módulo experimental 4: Enfriamiento evaporativo indirecto con aislamiento térmico más masa térmica. (ME4: EEI+AT+MT).
- Módulo experimental 5: Enfriamiento evaporativo indirecto con aislamiento térmico, masa térmica y enfriamiento radiativo nocturno. (ME5: EEI+AT+MT+ERN)

2. Método

Con el fin de evaluar el techo estanque (TE) se realizó una investigación de tipo experimental descriptiva, de acuerdo a la metodología propuesta por E. González (1989) y S. González (2010) para climas cálidos húmedos, la cual consiste en registrar en campo módulos experimentales de iguales dimensiones, materiales y acabados. Los módulos utilizados en esta investigación conservaron las características propuestas por esas investigaciones (Herrera y Gómez-Azpeitia, 2013).

En este trabajo se emplearon tres módulos de características constructivas idénticas para que la carga térmica fuera igual en cada una de ellas, y así comparar su funcionamiento. Las medidas utilizadas fueron de 0.80m de largo por 0.80m de ancho y 0.47m de alto. Los módulos se fabricaron con madera contrachapada de 0.015m de espesor, pintada en su exterior con pintura epóxica de color blanco. Fueron forrados internamente con placas de poliestireno expandido de 0.05m de espesor. Se dispusieron unos listones de madera de 0.04m x 0.05m en su base, con la finalidad de separarlos del suelo y evitar el contacto directo con toda la superficie.

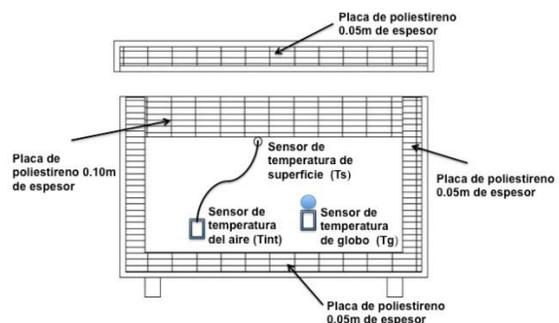


Figura 2: Módulo de control (MC).

Figure 2: Control module (MC).

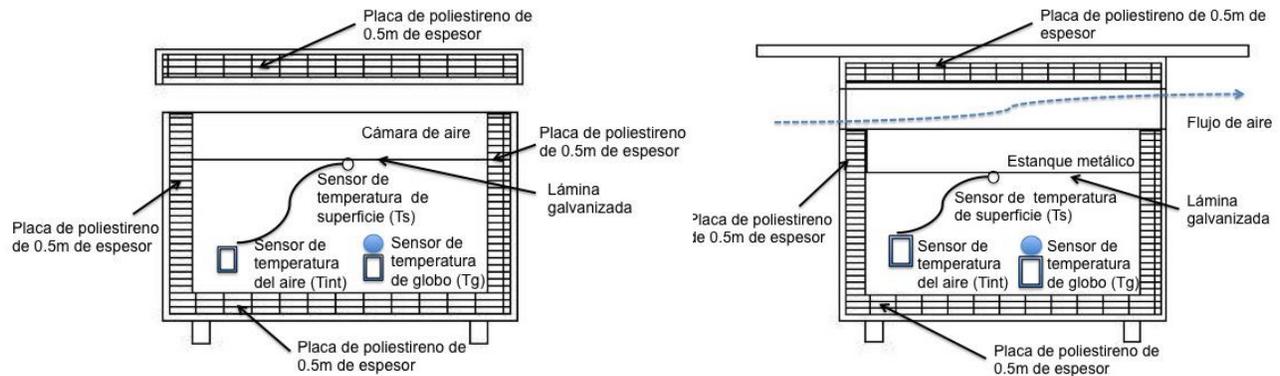


Figura 3: Módulos experimentales (ME).
Figure 3: Experimental modules (ME).

En la parte superior del módulo que funcionó como control (MC), fue dispuesto un aislamiento térmico adicional de 0.10m de espesor, para reducir al máximo la ganancia de calor a través de la cubierta. Ésta estuvo sellada y traslapada 0.01m para evitar infiltraciones y el intercambio de calor exterior e interior (Figura 2).

A los otros dos módulos se les denominó módulos experimentales (ME) y se les proveyó de un estanque metálico de lámina de acero galvanizado en su parte superior, el cual se modificó según lo requería cada experimento. La cubierta de uno de los módulos experimentales estuvo sellada y traslapada de la misma manera que en el MC, mientras que la otra cubierta fue levantada 0.12m para permitir el flujo de aire entre el estanque metálico y dicha cubierta (Figura 3).

Durante todo el tiempo de trabajo se registró la temperatura del aire con un sensor exterior. Al interior se ubicó un sensor de temperatura para registrar la temperatura del aire (Tint) y un sensor de globo negro para el registro de temperatura de

globo (Tg) (Tabla 1).

A continuación se describen las técnicas de enfriamiento pasivo que fueron incorporadas a cada cubierta estanque de los módulos experimentales (ME):

2.1 Aislamiento térmico

Se conservó la placa de poliestireno de alta densidad de 0.05m de espesor, como aislante térmico (AT) entre el tanque metálico y la cubierta del módulo experimental. Entre el aislamiento y la placa metálica permanece una cámara de aire confinada (Figura 4). Esta técnica se incluyó en los experimentos de los módulos ME1, ME3, ME4 y ME5.

2.2 Cámara de aire

Entre la placa de aislante de la cubierta se dejó contenida sin ventilación una cámara de aire de 0.05m de espesor (CA) (Figura 5). Esta técnica se incluyó en el experimento del módulo ME1.

Tabla 1: Rango de medición y precisión del equipo de monitoreo empleado en los experimentos.
Table 1: Range of measurement and accuracy of the monitoring equipment used in the experiments.

PARÁMETRO	REQUISITOS DE LA ISO 7726:1998 CLASE I		EQUIPO EMPLEADO EN LOS EXPERIMENTOS		
	Rango	Precisión	Rango	Precisión	Modelo
Temperatura del aire exterior (T_{ext}) e interior (T_{int})	10° a 40°C	Requerido: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Deseable: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	-20 a 70°C	$\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ de 0° a 50°C	U12-013
Temperatura de globo negro (T_g)	10° a 40°C	Requerido: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ Deseable: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	-20 a 70°C	$\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ de 0° a 50°C	H08-004
Temperatura de la superficie inferior de la lámina (T_s), temperatura del agua de la masa térmica (T_{WMT}), temperatura del agua de enfriamiento evaporativo indirecto (T_{WEI}).	0° a 50°C	Requerido: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ Deseable: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	-30 a 50°C	$\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ a 21°C	H08-032-08

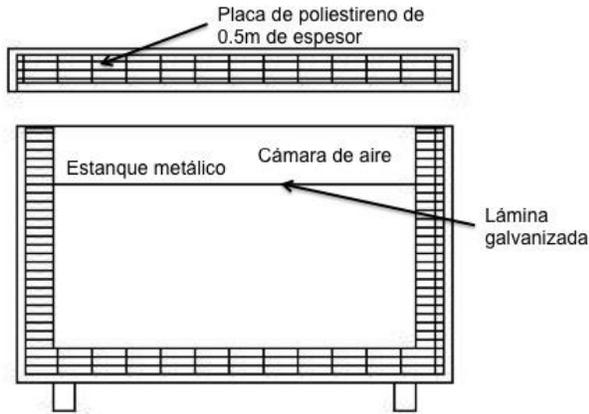


Figura 4: Técnica de aislamiento térmico (ME).
Figure 4: Thermal insulation technique (ME).

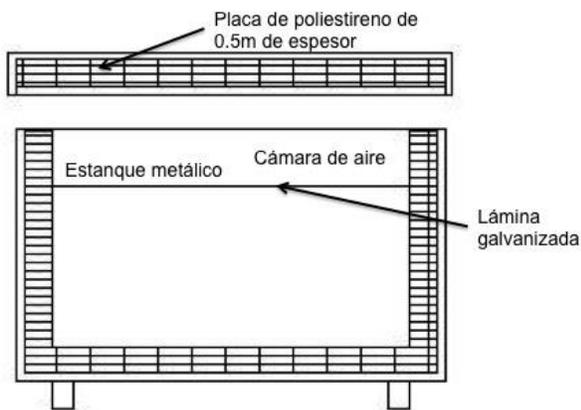


Figura 5: Técnica de cámara de aire.
Figure 5: Plenum airspace technique.

2.3 Protección solar

Consistió en la aplicación de aleros para protección solar (PS) de alta eficiencia a fin de disminuir al máximo posible la incidencia directa de los rayos solares sobre el estanque. Los cuatro costados del módulo se dejaron abiertos para permitir la libre circulación del aire sobre la cubierta del estanque metálico (Figura 6). Esta técnica se incluyó en el experimento del módulo ME2.

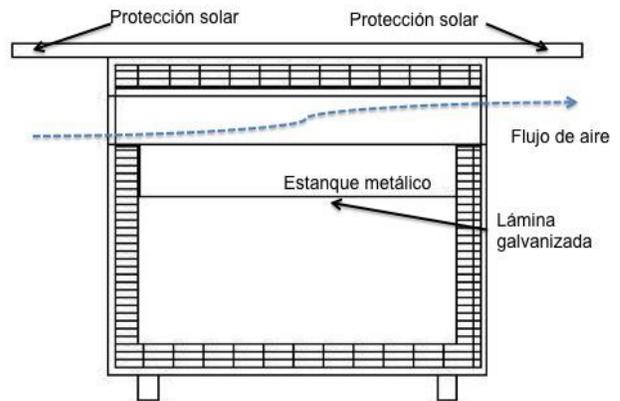


Figura 6: Técnica de protección solar.
Figure 6: Shading device technique.

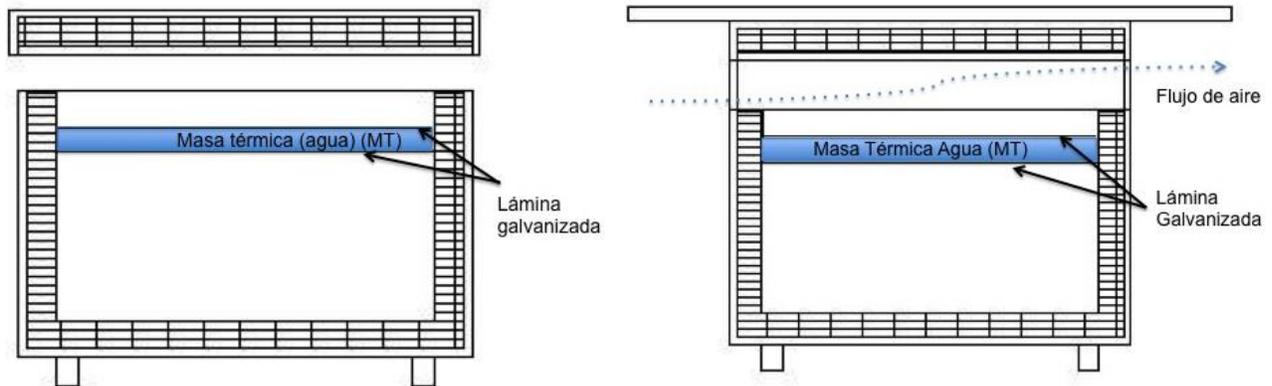


Figura 7: Técnica de masa térmica.
Figure 7: Thermal mass technique.

2.4 Masa térmica

Un recipiente de lámina de acero galvanizado con 30 litros de agua (0.701m de altura) actuó como masa térmica (MT). El agua estuvo confinada en el recipiente con una tapa de lámina de acero galvanizado sellada con acrílico, con el fin de evitar el contacto de la superficie del agua con el flujo de la ventilación natural (Figura 7). Esta técnica se incluyó en los experimentos de los módulos ME2, ME3, ME4 y ME5.

2.5 Enfriamiento evaporativo indirecto

Al espacio de la cámara de aire contenida entre la masa térmica y la placa aislante se le agregó una película de agua de 0.020m de altura para propiciar el enfriamiento por evaporación (EEI) (Figura 8). Esta técnica se incluyó en el experimento del módulo ME5.

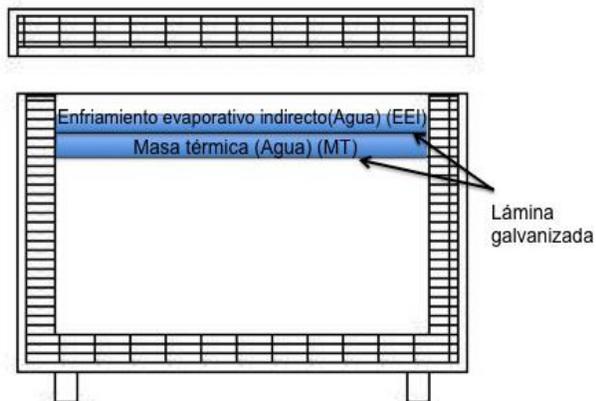


Figura 8: Técnica de enfriamiento evaporativo indirecto.
Figure 8: Indirect evaporative cooling technique.

2.6 Enfriamiento radiativo nocturno

Durante la noche se retiró la cubierta del módulo experimental a fin de propiciar el intercambio radiativo con la bóveda celeste (ERN). Esta técnica se incluyó en los experimentos de los módulos ME1, ME3 y ME5 (Figura 9).

La temporada de registro de campo se realizó durante el verano de 2012, en los meses de junio, agosto y septiembre. Cada variación de la cubierta estanque se monitoreó durante 96 horas consecutivas (4 días), con registros de datos cada 15 minutos.

Como el espacio interior de los módulos estuvo confinado y cerrado a cualquier flujo de ventilación, la temperatura media radiante (T_{mr}) se consideró igual a la temperatura de globo negro registrada (T_g); la temperatura operativa (T_{op}) se obtuvo a su vez de la fórmula simplificada propuesta por la norma ASHRAE 55-2010:

$$T_{op} = \frac{T_{int} + T_{mr}}{2} \quad (2)$$

Donde,

T_{int} = Temperatura del aire en °C

T_{mr} = Temperatura Media Radiante (T_g) en °C

Para calcular la temperatura neutral o preferida en espacios con ventanas operables y ajustables, que no tenga equipos mecánicos de enfriamiento, la norma ASHRAE 55-2010 establece la ecuación siguiente:

$$T_n = 17.8 + 0.31(T_o) \quad (1)$$

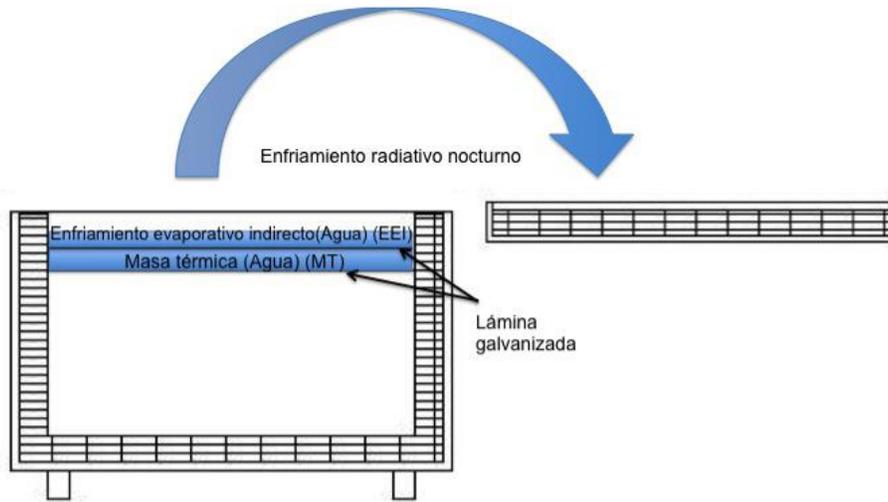


Figura 9: Técnica de enfriamiento radiativo.
Figure 9: Radiative cooling technique.

Tabla 2: Determinación de la zona de confort.
Table 2: Determination of the comfort zone.

MES	TEXT °C	TN°C	RANGO +2.5 °C	RANGO -2.5 °C	RANGO +3.5 °C	RANGO -3.5 °C
Junio	26.30	25.93	28.43	23.43	29.43	22.43
Agosto	24.90	25.52	28.02	23.02	29.02	22.02
Septiembre	23.20	24.99	27.49	22.49	28.49	21.49

Los rangos de confort de temperatura operativa para un 80% de aceptabilidad tienen una amplitud de ± 2.5 °C. Para el 90% de aceptabilidad la amplitud es de ± 3.5 °C. En este trabajo se tomó como temperatura exterior el promedio mensual publicado por la comisión del Agua del Estado de Chihuahua (CNA, 2008) (Tabla 2).

Es oportuno aclarar que la utilización de la fórmula que propone la norma ASHRAE 55 está orientada a espacios que no posean equipos de climatización artificial o mecánicos y ventilados naturalmente, por lo que puede no estar ajustada a la realidad en cuanto a la confortabilidad de los sujetos de la localidad estudiada. En espacios naturalmente ventilados los individuos suelen expresar un rango de temperaturas de confort mucho más amplio de lo que establece la norma (incluso sobrepasando los 6 °C de amplitud).

3. Resultados

Al interior del módulo ME1: AT+CA+ERN (aislamiento térmico, cámara de aire y enfriamiento radiativo nocturno) la temperatura operativa estuvo 30.21% del tiempo dentro de la zona de confort térmico, del cual el 23.96%

estuvo dentro de los límites del 80% de aceptación. Por su parte, el módulo de control estuvo 28.13% del tiempo dentro de la zona de confort, del cual el 20.83% se ubicó dentro de los límites del 80% de aceptación (Figura 10).

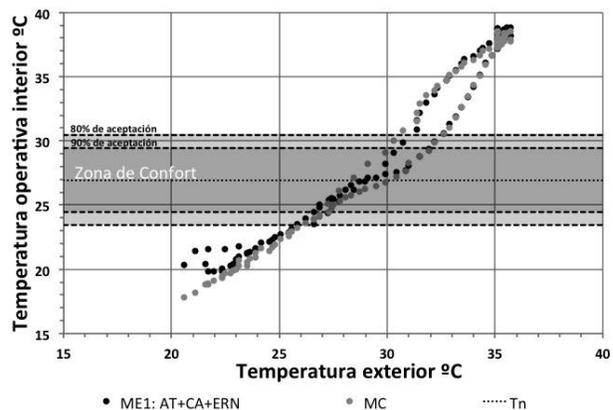


Figura 10: Porcentaje de tiempo de confort térmico al interior de los módulos. ME1: AT+CA+ERN y MC.
Figure 10: Percentage of thermal comfort zone time inside modules. ME1: AT+CA+ERN and MC.

La temperatura operativa en disconfort por calor, al interior del módulo ME1: AT+CA+ERN, estuvo el 41.67% del tiempo dentro de los límites

del 80% de aceptación y el 43.75% dentro de los límites del 90% de aceptación. Mientras que el disconfort por frío estuvo el 28.13% del tiempo dentro de los límites del 80% de aceptación y 32.29%, dentro de los límites del 90% de aceptación.

Al interior del módulo ME2: PS+MT (protección solar y masa térmica) la temperatura operativa se ubicó un 53.13% del tiempo dentro de la zona de confort térmico, de los cuales 42.71% estuvo dentro de los límites del 80% de aceptación. Por su parte, el módulo MC (control) estuvo 31.25% del tiempo dentro de la zona de confort, de los cuales 22.92%, dentro de los límites del 80% de aceptación (Figura 11).

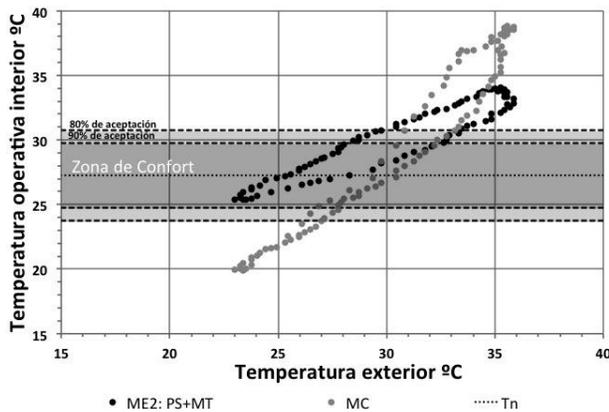


Figura 11: Porcentaje de tiempo de confort térmico al interior de los módulos. ME2: PS+MT y MC.

Figure 11: Percentage of thermal comfort zone time inside the modules. ME2: PS+MT y MC

La temperatura operativa en disconfort por calor, al interior del módulo ME2: PS+MT, se mantuvo un 46.88% del tiempo dentro de los límites del 80% de aceptación y el 57.29%, dentro de los límites del 90% de aceptación. En este módulo no se presentó disconfort por frío.

Al interior del módulo ME3: AT-MT-ERN la temperatura operativa estuvo 90.63% del tiempo dentro de la zona de confort térmico, de los cuales 73.96% se halló dentro de los límites del 80% de aceptación. Por su parte, el módulo de control se ubicó un 32.29% del tiempo dentro de la zona de confort, de los cuales un 19.79% lo hizo dentro de los límites del 80% de aceptación (Figura 12).

Al interior del módulo ME3: AT-MT-ERN, la temperatura operativa en disconfort por frío estuvo el 9.38% del tiempo dentro de los límites del 80% de aceptación y el 26.04%, dentro de los límites del 90% de aceptación. En este módulo no se presentó disconfort por calor.

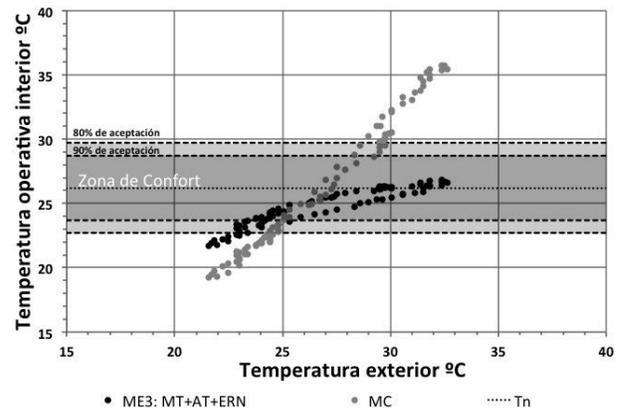


Figura 12: Porcentaje de tiempo de confort térmico al interior de los módulos ME3: AT-MT-ERN y MC.

Figure 12: Percentage of thermal comfort zone time inside the modules. ME3: AT-MT-ERN y MC.

Al interior del módulo ME4: EEI-AT-MT (enfriamiento evaporativo indirecto, aislamiento térmico y masa térmica), la temperatura operativa se mantuvo un 38.54% del tiempo dentro de la zona de confort térmico, de los cuales 11.46% estuvo dentro de los límites del 80% de aceptación. Por su parte, el módulo de control se halló un 23.96% del tiempo dentro de la zona de confort, de los cuales 15.63% lo hizo dentro de los límites del 80% de aceptación (Figura 13).

La temperatura operativa en disconfort por frío, al interior del módulo ME4: EEI-AT-MT, estuvo el 61.46% del tiempo dentro de los límites del 80% de aceptación y el 88.54%, dentro de los límites del 90% de aceptación. En este módulo no presentó disconfort por calor.

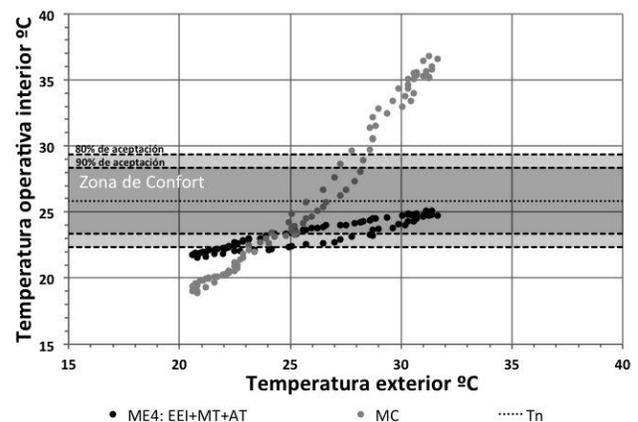


Figura 13: Porcentaje de tiempo de confort térmico al interior de los módulos ME4: EEI-AT-MT y MC.

Figure 13: Percentage of thermal comfort zone time inside the modules. ME4: EEI-AT-MT y MC.

Al interior del módulo ME5: AT-MT-ERN (aislamiento térmico, masa térmica y enfriamiento

radiativo nocturno), la temperatura operativa estuvo 0% del tiempo dentro de la zona de confort térmico. Por su parte, el módulo de control se ubicó un 20.83% del tiempo dentro de la zona de confort, de los cuales el 13.54% lo hizo dentro de los límites del 80% de aceptación (Figura 14).

La temperatura operativa en disconfort por frío, al interior del módulo ME5: AT-MT-ERN, se mantuvo el 100% del tiempo dentro de los límites del 80% de aceptación y el 100% dentro de los límites del 90% de aceptación. Este módulo no presentó disconfort por calor.

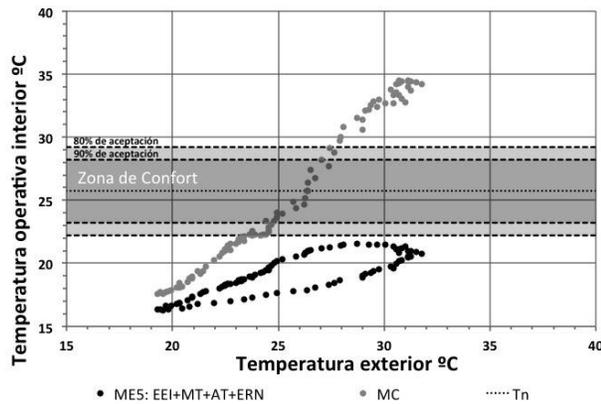


Figura 14: Porcentaje de tiempo de confort térmico al interior de los módulos. ME5: AT-MT-ERN y MC.

Figure 14: Percentage of thermal comfort zone time inside the modules. ME5: AT-MT-ERN y MC.

4. Discusión

La aplicación de las técnicas de enfriamiento pasivo en los módulos ME1 y ME5 arrojó los resultados más pobres en cuanto a tiempo de coincidencia de la temperatura operativa interior con la zona de confort. En comparación con los resultados del módulo control, estos módulos no ofrecen una mejora significativa y, en el caso particular del módulo M5, incluso el módulo control resultó con mejores números. En lo que se refiere al módulo M1, el tiempo dentro del límite de aceptación del 80% fue apenas 3% mayor que el registrado en el módulo control. Sus respectivos desempeños desarrollan un patrón muy similar entre sí. Distinto es lo que ocurre en el módulo M5, donde las técnicas de enfriamiento fueron tan eficientes que originaron que el 100% del tiempo las condiciones dentro del módulo estuvieran por abajo del límite inferior de la zona de confort.

En contraste con esos primeros datos, las técnicas de enfriamiento pasivo incorporadas a los módulos ME2 y ME3 dieron los mejores

resultados del proyecto. Las temperaturas operativas al interior de esos módulos alcanzaron el mayor porcentaje de tiempo dentro de la zona de confort, entre el 42.71% y el 73.96% dentro del margen con aceptación del 90%.

Con un desempeño intermedio les sigue el módulo ME4, en cuyo interior las temperaturas operativas estuvieron el 38.54% del tiempo dentro de la zona de confort, dentro de los límites del 80% de aceptación y de 11.46% del tiempo dentro de los límites del 90% de aceptación (Tabla 2).

Tabla 2: Porcentaje de tiempo dentro de la zona de confort.
Table 2: Percentage of time within the comfort zone.

MC	28.3	31.25	32.29	23.96	20.83
ME1	30.21				
ME2		53.13			
ME3			73.96		
ME4				38.54	
ME5					0

Los resultados demuestran que el uso de aislamiento térmico, masa térmica, protección solar y cámara de aire no resultan eficientes para incrementar el tiempo en condiciones de confort por sí solos. Es necesario combinarlos con otras técnicas de enfriamiento pasivo.

Indican también que el enfriamiento evaporativo indirecto y el enfriamiento radiativo nocturno son técnicas de enfriamiento pasivo muy eficientes para los climas cálido-secos, dependiendo de la amplitud de la zona de confort determinada en la localidad, sin embargo, deben ser manejadas con cuidado para no propiciar condiciones fuera de confort por exceso de enfriamiento.

5. Conclusiones

La cubierta estanque adicionada con las técnicas de enfriamiento pasivo evaluadas en los módulos ME2 (PS+MT) y ME4 (EEI+MT+AT) constituyen una buena opción para propiciar que las temperaturas al interior de los espacios habitables alcancen altos porcentajes de tiempo dentro de la zona de confort, en un clima cálido seco.

Al adicionarle a la cubierta estanque la técnica de masa térmica (ME3 y ME4), una de técnica de enfriamiento pasivo, se alcanzan los porcentajes más altos de tiempo dentro de la zona de confort.

En verano, el objetivo de la climatización es disminuir la sensación de calor al interior de los espacios habitables, por lo que las condiciones fuera de la zona de confort por exceso de enfriamiento registradas en el módulo ME5 podrían resolverse aumentando el nivel de arropamiento de las personas y en algunos de casos con aumento en la tasa metabólica, lo cual no implica aumento en la demanda de energía y agua.

Este trabajo demuestra que en el clima cálido seco de Chihuahua se puede estar hasta el 90% de tiempo dentro de la zona de confort con el uso de cubiertas estanque con aislamiento térmico, masa térmica y enfriamiento radiativo nocturno.

Los resultados y conclusiones aquí expuestos, se han circunscrito a lo establecido en la norma ASHRAE 55-2010, por lo que es importante relacionarlos con resultados provenientes de un estudio de campo de confort térmico, para determinar con mayor certeza la zona de confort y los rangos respectivos para la ciudad de Chihuahua.

Referencias bibliográficas

ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers, pp. 11-12.

González, E. (1989). Evaluación de sistemas pasivos de enfriamiento y su aplicación en el diseño de viviendas. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela: CONDES.

González, S. (2010). Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo. Tesis de Maestría publicada. España: Universidad Internacional de Andalucía.

Herrera, L. (2009). Evaluación de estrategias bioclimáticas aplicadas en edificios y su impacto en la reducción del consumo de agua en equipos de enfriamiento evaporativo directo. Tesis de Doctorado publicada. México: Universidad de Colima, Facultad de Arquitectura.

Herrera, L. y Gómez-Azpeitia G. (2013). Techos estanque como estrategia para el ahorro de agua en climas áridos. Caso: Chihuahua, México. Revista Palapa. No. 2. Pág. 41-58.

Recibido: 04|05|2014
Aceptado: 16|05|2014