

EFICIENCIA DE ESTRATEGIAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO EN CLIMA CÁLIDO SECO

Luis Carlos Herrera Sosa

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México)

Herrera Sosa, L. C. (2014). Eficiencia de estrategias de enfriamiento pasivo en clima cálido seco. *Revista de Arquitectura*, 16, 86-95. doi: 10.41718/RevArq.2014.16.1.10



<http://dx.doi.org/10.41718/RevArq.2014.16.1.10>

Luis Carlos Herrera Sosa

Arquitecto, Escuela de Arquitectura de Chihuahua.

Maestro en arquitectura bioclimática, Escuela de América Latina y el Caribe (ISTHMUS) y Universidad de Colima (México). Graduado con Mención Honorífica

Doctor en Arquitectura, Universidad de Colima, Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura (PIDA).

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I.

Profesor investigador del Instituto de Arquitectura Diseño y Arte de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Director de ISTHMUS NORTE, Escuela de Arquitectura y Diseño de América Latina y el Caribe.

Líneas de investigación: la relación entre arquitectura y medioambiente; dispositivos y estrategias de climatización pasiva.

Ganador del Premio Peña Colorada que otorga el gobierno de Colima por su desempeño académico (2008).

Mención especial en el Premio Chihuahua en el área de tecnología (2008).

Tercer lugar del Premio Iberoamericano de Tesis de Investigación sobre Vivienda Sustentable INFONAVIT-REDALYC (2010).

Profesor invitado en Colombia, Panamá, Argentina y México.

moreguachi@gmail.com

RESUMEN

Este documento presenta los resultados de una evaluación de la eficiencia de enfriamiento que se alcanza con la aplicación en techos estanque de seis técnicas de enfriamiento pasivo en clima cálido seco. El procedimiento consistió en monitorear en campo, durante el verano de 2012, módulos experimentales con las técnicas pasivas de enfriamiento: evaporativo indirecto (EEI), protección solar (PS) y enfriamiento radiativo nocturno (ERN), apoyadas con aislamiento térmico (AT) y masa térmica (MT). El módulo experimental se comparó con un módulo de control de iguales características constructivas, dimensiones y orientación. Con los resultados obtenidos en campo se calculó el potencial de enfriamiento medio de cada una de las técnicas pasivas aplicadas para determinar su eficiencia de enfriamiento (EF). Los resultados indicaron que todas las técnicas de enfriamiento pasivo aplicadas tienen capacidad de enfriamiento. La técnica pasiva con mayor potencial de enfriamiento medio fue la EEI+AT+ERN con 822.89 Wh/m²día, le sigue la EEI+PS con 764.19 Wh/m²día y la EEI+AT+ERN+MT con 532.78 Wh/m²día.

PALABRAS CLAVE: evaporativo indirecto, masa térmica, módulo experimental, radiativo, techo estanque.

EFFICIENCY OF PASSIVE COOLING STRATEGIES IN HOT DRY WEATHER

ABSTRACT

This paper presents the results of an evaluation done on the cooling efficiency that could be reached with the use of six passive cooling techniques performed on roof tanks in hot dry weather. The procedure consisted in monitoring at field, during summer 2012, experimental units with the passive cooling techniques: Indirect Evaporative Cooling (IEC), Solar Protection (SP), Night Radiative Cooling (NRC), Thermal Insulation (TI), and Thermal Mass (TM). The experimental unit was compared to a control unit built with the same characteristics, dimensions, and position. With the results obtained at field, there was a calculation of the average cooling potential in each of the applied passive techniques, in order to determine the cooling efficiency (CE). The passive technique with the highest cooling potential average was IEC+TI+NRC with 822.89 Wh/m²day; and those that followed it were IEC+SP with 764.19 Wh/m²day, and IEC+TI+NRC+TM with 532.78 Wh/m²day.

KEY WORDS: Indirect evaporative cooling, thermal mass, experimental units, roof tanks.

Recibido: enero 7/2014

Evaluado: octubre 21/2014

Aceptado: noviembre 27/2014

INTRODUCCIÓN

El alto costo de la energía, el agotamiento de los recursos naturales y el problema del cambio climático a nivel mundial, obligan a los profesionales de la construcción a diseñar y construir los edificios con estrategias de climatización pasiva para alcanzar niveles de confort higrotérmico adecuados, y en climas cálidos esto se consigue con un mayor enfriamiento. Sin embargo, esta postura no se ha logrado generalizar, ya sea por cuestiones económicas, sociales o por desconocimiento de las técnicas y estrategias aplicables, por lo que en muchos de los casos no se satisfacen esas necesidades de confort, incluso se agravan. Las necesidades de climatización se siguen solucionando por medios activos que utilizan energía convencional para funcionar, con el consecuente consumo de recursos naturales, emisión de CO₂ al ambiente y alto costo energético.

En México, el clima está determinado por varios factores, entre los que se encuentran la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, las diversas condiciones atmosféricas y la distribución existente de tierra y agua. Por lo anterior, el país cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en: húmedo, subhúmedo y muy seco (figura 1).

El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país, región que comprende el 28,3% del territorio nacional; se caracteriza por la circulación de los vientos, lo cual provoca escasa nubosidad y precipitaciones de 300 a 600 mm anuales, con temperaturas en promedio de 22 a 26 °C en algunas regiones, y en otras de 18 a 22 °C (figura 1). El clima muy seco,

que se encuentra en el 20,8% del país, registra temperaturas en promedio de 18 a 22 °C, con casos extremos de más de 26 °C, presentando precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio.

Este trabajo de investigación se realizó en la ciudad de Chihuahua, que se localiza al norte de la República Mexicana, a 28° 38' latitud norte, 106° 06' longitud oeste y a 1423 msnm (figura 1).

Chihuahua tiene un clima cálido seco extremo, con tres temporadas climáticas definidas: invierno, transición y verano (tabla 1).

La temporada de verano tiene una duración de cinco meses en promedio (mayo a septiembre). En esta temporada la temperatura máxima promedio es de 32,0 °C, media de 24,7 °C y mínima de 17,5 °C; con una oscilación térmica de 14,5 °C. La humedad relativa promedio es de 52,8%, con mínimas promedio de 16,3%. La precipitación pluvial es de 313,1 mm, con vientos dominantes

Figura 1. Climas de la República Mexicana
Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI (2014).



Temporada	Características	Meses	Humedad relativa (%)	Temperatura	Viento	Humedad pluvial	Condiciones del cielo
Invierno	Frío	Diciembre, enero, febrero y noviembre	53,70	Máx. Prom. 20,55°	NE/SW	38,7 mm	Despejados 39
				Prom. 12,13°	2 m/s	-10,04%	½ Nublados 44
				Mín. Prom. 3,7°		#días c/lluvia 10,18	Nublados 36
				Oscilación 16,8°			
Transición	Templado	Marzo, abril y octubre	49,90	Máx. Prom. 27,03°	SW/NE	33,4 mm	Despejados 37
				Prom. 18,23°	5 m/s	-8,67%	½ Nublados 48
				Mín. Prom. 9,43°		No. días c/lluvia 7,42	Nublados 18
				Oscilación 17,6°			
Verano	Cálido-seco	Mayo, junio, julio, agosto y septiembre	52,80	Máx. Prom. 32°	SW/NE	313 mm	Despejados 25
				Prom. 24,73°	2 m/s	-81,20%	½ Nublados 73
				Mín. Prom. 19,64°		No. días c/lluvia 44,28	Nublados 55
				Oscilación 14,54°			

Tabla 1. Caracterización climática de Chihuahua
Fuente: elaboración propia.

del noreste con velocidad promedio de 2,6 m/s (tabla 2)¹.

Estas condiciones extremas del verano traen consigo, como se mencionó, que durante la época de calor los habitantes resuelvan sus necesidades de enfriamiento con el uso continuo de equipos de climatización artificial, normalmente mediante enfriamiento evaporativo directo (EED), por lo que el consumo de energía eléctrica y agua se incrementa de manera significativa y, por ende, aumenta la emisión de CO₂ al ambiente por la quema de hidrocarburos requeridos para la generación de energía eléctrica.

Este trabajo en particular se enfoca en evaluar la eficiencia de enfriamiento (EF) de seis técnicas de enfriamiento pasivo (TEP), aplicables en techos estanque para clima cálido seco, a partir de cuantificar su potencial de enfriamiento medio (PEM), para reducir el consumo energético.

Este trabajo de investigación, denominado "Eficiencia de estrategias de enfriamiento pasivo en clima cálido seco", da continuidad a los resultados encontrados en la tesis de doctorado de Herrera (2009), en la cual se demostró la factibilidad de lograr ahorros energéticos e hídricos durante el funcionamiento de equipos de EED convencionales, mediante la aplicación de estrategias bioclimáticas en los edificios.

MARCO TEÓRICO

Enfriamiento. El enfriamiento es un proceso de eliminación de calor de un cuerpo o un espacio, el cual puede ocurrir por medio de la reducción de su

temperatura sin que el cuerpo sufra un cambio de estado físico a temperatura constante. De manera natural, los cuerpos pueden enfriarse hasta la temperatura del ambiente en que se encuentran.

Los procesos de enfriamiento natural consisten en la pérdida de calor espontánea, como ocurre en los procesos de enfriamiento debido a la pérdida de calor por radiación (enfriamiento radiativo), por convección-evaporación (enfriamiento evaporativo) o por procesos térmicos de conducción, es decir, por contacto entre los diferentes cuerpos. Entre las distintas formas de propiciar el enfriamiento pasivo encontramos el enfriamiento evaporativo y el enfriamiento radiativo nocturno.

Enfriamiento evaporativo. Se basa en la termodinámica de la evaporación del agua, el cambio de fase del agua del estado líquido al estado gaseoso (Mihalakakou y Santamouris, 1996). Se trata de un proceso que utiliza la evaporación como pozo térmico natural, aun cuando es el aire ambiente el recipiente último de la transferencia de calor. En este proceso, el calor sensible necesario para la evaporación del agua es tomado del aire y del agua misma, para ser usado como calor latente de vaporización. La cantidad de calor sensible absorbido depende de la cantidad de agua evaporada.

Una medida del potencial de enfriamiento evaporativo es la depresión de la temperatura de bulbo húmedo (TBH), esto es, la diferencia entre la temperatura de bulbo seco (TBS) y la temperatura de bulbo húmedo (TBH). Cuanto mayor sea la depresión de la TBH mayor será el potencial de enfriamiento evaporativo. El enfriamiento evaporativo puede ser utilizado de dos modos diferentes: como enfriamiento evaporativo directo o indirecto.

El enfriamiento evaporativo directo (EED) consiste en introducir humedad de manera directa en el espacio para reducir adiabáticamente la temperatura sensible del aire. Esta técnica se aconseja para ser aplicada en regiones áridas con disponibilidad de agua; lugares con temperatura de bulbo húmedo (TBH) no mayores a 22-24 °C, y cuando la temperatura de bulbo seco (TBS) no es mayor a 42-44°C (Givoni, 1994).

El enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) son técnicas basadas en el mismo principio evaporativo, y son utilizadas para enfriar algún componente de la edificación y este a su vez enfriar el espacio interior sin aumentar su contenido de humedad. Este enfriamiento representa la posibilidad de reducir la temperatura del aire respecto al exterior pero sin aportar humedad al ambiente interno. Se aconseja su aplicación en regiones áridas y subhúmedas con disponibilidad de agua. Lugares con temperatura de bulbo húmedo (TBH) no mayores a 25 °C y

Tabla 2. Parámetros climáticos de Chihuahua
Fuente: elaboración propia.

¹ Para mayor información climática consultar <http://smn.cna.gob.mx>

Parámetro climático	Promedio anual	Promedio de verano
Temperatura promedio	18,9 °C	24,7 °C
Temperatura máxima	26,9 °C	32,0 °C
Temperatura máxima extrema	41,3 °C	41,3 °C
Temperatura mínima	10,8 °C	17,5 °C
Temperatura mínima extrema	-12,8 °C	4,5 °C
Oscilación de temperaturas	16,0 °C	14,5 °C
Humedad relativa media	52,4 %	52,8 %
Humedad relativa mínima	14,4 %	16,3 %
Humedad relativa máxima	90,4 %	89,1 %
Precipitación total	385,2 MM	313,1 MM
Dirección del viento	Northeast	Northeast
Velocidad del viento	3,3 M/s	2,6 M/s

máximos valores de temperatura de bulbo seco (TBS) de 46 °C (Givoni, 1994).

Enfriamiento radiativo nocturno. Es un fenómeno mediante el cual un cuerpo expuesto a la bóveda celeste pierde calor durante la noche debido al balance negativo de radiación que se establece. El sol emite radiación en forma de onda corta a la tierra durante el día y la tierra está irradiando calor en forma de onda larga hacia el cielo. El cielo es el pozo térmico más importante y la radiación de onda larga el principal modo de transferencia de calor, mediante el cual el calor del sol absorbido en las superficies durante el día, es disipado.

Masa térmica. La masa térmica es el material de construcción capaz de absorber y almacenar el calor recibido del ambiente externo o interno. Los materiales ideales para constituir una buena masa térmica son aquellos que tienen alto calor específico, alta densidad y alta conductividad térmica (González, 1997a).

El uso de la masa térmica no se considera como una técnica de enfriamiento; sin embargo, alcanzar condiciones de confort al interior de las edificaciones requiere el mantenimiento de niveles de temperatura dentro de un rango relativamente pequeño. La oscilación interna o amplitud de temperatura (DT) dentro de una edificación depende en gran medida de la cantidad de "masa térmica efectiva" con que cuenta el edificio. Generalmente, un edificio de gran masa térmica tiene menor oscilación interior que uno de baja masa térmica. Por otro lado, la utilización de masa térmica en los edificios puede reducir la carga pico de enfriamiento de los mismos (Balaras, 1996).

Aislamiento. El aislamiento térmico es la propiedad que tienen los materiales para oponerse al paso de calor por conducción y se evalúan por la resistencia térmica que tienen (NMX-C-460, 2009). La resistencia térmica al paso de calor es producto del valor de conductividad de material y su espesor. Aunque no se considera una estrategia de enfriamiento, su aplicación contribuye a conservar las condiciones en que se encuentra un espacio y los elementos que contiene.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar las TEP se realizó una investigación de tipo experimental descriptiva con base en los métodos de trabajo propuestos por González (1989) y González (2010) para climas cálidos húmedos consistentes en registros de campo sobre módulos experimentales de iguales dimensiones, materiales y acabados.

Para la realización de este proyecto se utilizaron módulos con las características descritas en los trabajos mencionados: medidas exteriores

de 0,80 m x 0,80 m x 0,47 m, fabricados con madera contraenchapada de 0,015 m de espesor pintada en su exterior con pintura epóxica de color blanco. Fueron recubiertos en su interior con láminas de poliestireno expandido de 0,045 m de espesor fijadas a presión sin pegamento. Se colocaron unos listones de madera de 0,04 m x 0,05 m en su base, con la finalidad de separarlos del suelo y evitar el contacto directo de toda la superficie de base con el suelo.

Para esta investigación se emplearon tres módulos, uno funcionó como módulo de control (MC) sin ninguna TEP aplicada (figura 2) y sin techo estanco. A los otros dos se les denominó módulos experimentales (ME), a los cuales se les agregó un estanco metálico en su parte superior, que se fue adaptando de acuerdo con el requerimiento de cada TEP seleccionada.

En el módulo de control (MC) se registraron temperaturas del aire interior (T_{int}) y de globo negro o radiante (T_g). Los módulos experimentales (ME) registraron temperatura del aire interior (T_{int}), temperatura de la superficie inferior de la lámina (T_s), temperatura de globo negro o radiante (T_g), temperatura del agua de la masa térmica (T_{wMT}) (en su caso) y del agua de enfriamiento evaporativo indirecto (T_{wEEI}) (en su caso). También se registró la temperatura del aire exterior (T_{ext}).

En este trabajo se evalúan seis técnicas de enfriamiento pasivo aplicables en techos estanco:

1. Cámara de aire con aislamiento térmico (CA+AT).
2. Cámara de aire con aislamiento térmico, enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica (CA+AT+ERN+MT).
3. Enfriamiento evaporativo indirecto con aislamiento térmico y enfriamiento radiativo nocturno (EEI+AT+ERN).
4. Enfriamiento evaporativo indirecto, aislamiento térmico, enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica (EEI+AT+ERN+MT).
5. Enfriamiento evaporativo indirecto con protección solar (EEI+PS).
6. Enfriamiento evaporativo indirecto con protección solar y masa térmica (EEI+PS+MT).

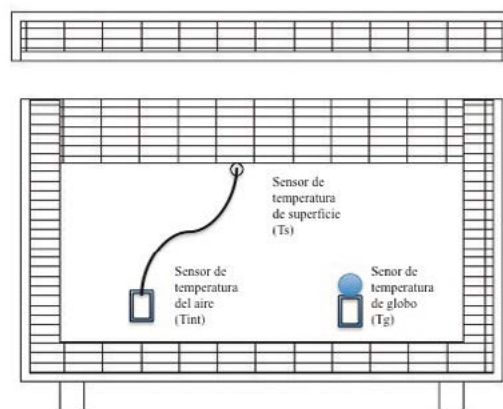


Figura 2. Módulo de control (MC)

Fuente: elaboración propia.

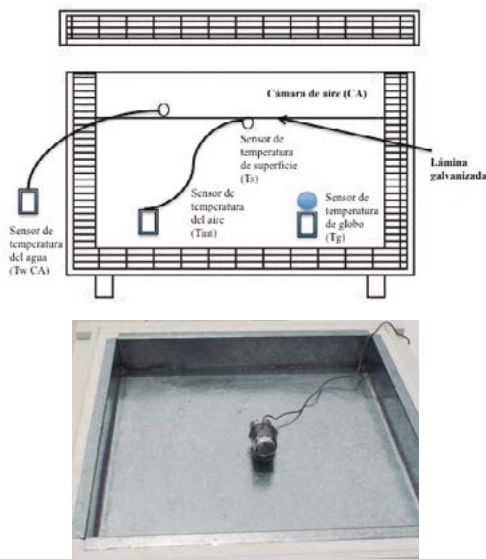


Figura 3. Módulo experimental con CA+AT

Fuente: elaboración propia.

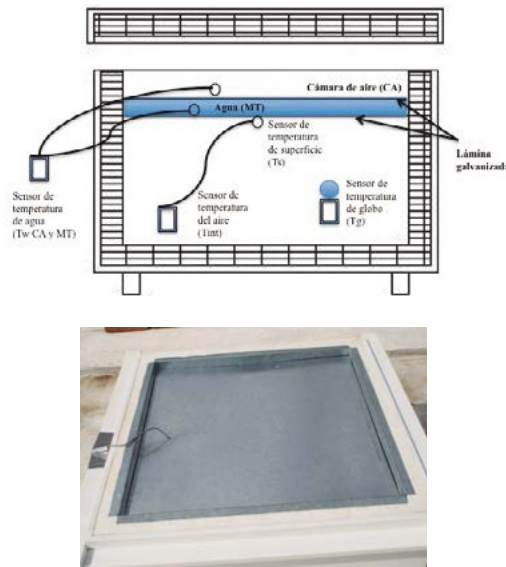


Figura 4. Módulo experimental con CA+AT+ERN+MT

Fuente: elaboración propia.

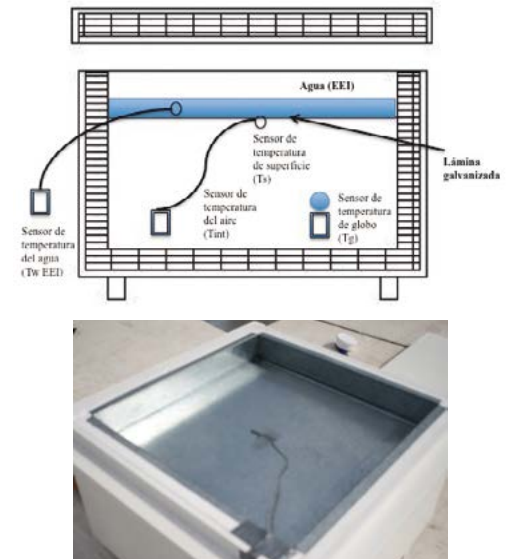


Figura 5. Módulo experimental con EEI+AT+ERN

Fuente: elaboración propia.

La técnica de enfriamiento pasivo CA+AT consistió en medir el comportamiento del ME aislado con una placa de poliestireno de 0,047 m de espesor y con una cámara de aire de 0,105 m en el techo estanque (figura 3).

La técnica de enfriamiento pasivo CA+AT+ERN+MT es una variación de la anterior, solo que en este caso se instaló un recipiente de lámina de acero galvanizado calibre 16 con 30 litros de agua (0,071 m de altura), que 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 ambiente exterior. La MT estuvo con aislamiento durante el día y expuesta al aire exterior durante la noche para propiciar el enfriamiento radiativo nocturno (ERN) (figura 4).

La técnica de enfriamiento pasivo EEI+AT+ERN consistió en agregar en la cámara de aire una película de agua de 0,020 m de altura (11 litros) en el techo estanque (figura 5).

La técnica de enfriamiento pasivo EEI+AT+ERN+MT es una variación de la anterior, solo que en este caso se le agregó un recipiente de lámina de acero galvanizado con 30 litros de agua (0,071 m de altura), que actuó como masa térmica (MT) y se expuso al aire exterior durante la noche (ERN) (figura 6).

La técnica de enfriamiento pasivo EEI+PS se preparó con un estanque ventilado elaborado a base de lámina de acero galvanizado calibre 16, con una película de agua de 0,020 m de altura (11 litros). La protección solar consistió en agregar hacia las cuatro orientaciones del Me un volado de 0,30 m de longitud elaborado con madera contrachapada pintada con pintura epóxica de color blanco y aislada con una placa de poliestireno de 0,047 m, para disminuir la incidencia de los rayos solares sobre el estanque (figura 7).

La técnica de enfriamiento pasivo EEI+PS+MT es una variación del anterior solo que en este caso se instaló un recipiente de lámina de acero galvanizado con 30 litros de agua (0,071 m de altura), que 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 ambiente exterior (figura 8).

El potencial de enfriamiento medio (PEM) se define como “la cantidad de energía por unidad de tiempo y de superficie, capaz de ser retirada por el sistema, obtenida como valor medio durante un periodo de 24 horas” (González, 1989), mediante la siguiente ecuación:

$$PEM = \frac{CPC * (\overline{T}_{opmc} - \overline{T}_{opme}) * 24}{A} \quad (1)$$

PEM = Potencial de Enfriamiento Medio en Wh/m²día.

CPC = Coeficiente de pérdida de calor = 1,50 W/m²K, debido a que se adopta la metodología del trabajo de investigación de González (1989) antes mencionada.

T_{opmc} = Temperatura operativa media del módulo control en 24 horas, en oC.

T_{opme} = Temperatura operativa media del módulo experimental en 24 horas, en oC.

A = Área del techo (0,67 x 0,67 m) = 0,4356 m².

La temperatura operativa se obtuvo del valor medio de la temperatura seca del aire (Tint), y la temperatura radiante media (Tg) dentro de los módulos. Este criterio es válido en este trabajo pues la velocidad del aire al interior de los módulos es menor a (< 0,2 m/s).

La temporada de registro de datos en campo se llevó a cabo durante el verano de 2012, en los meses de junio a septiembre. Cada técnica de enfriamiento pasivo estudiada se monitoreó durante 72 horas consecutivas (tres días),

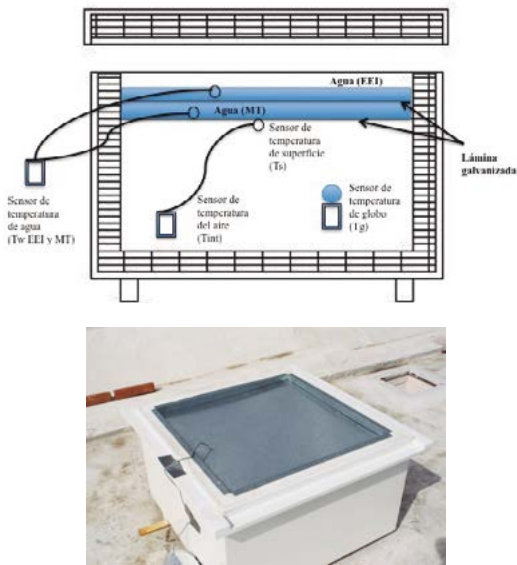


Figura 6. Módulo experimental con EEI+AT+ERN+MT
Fuente: elaboración propia.

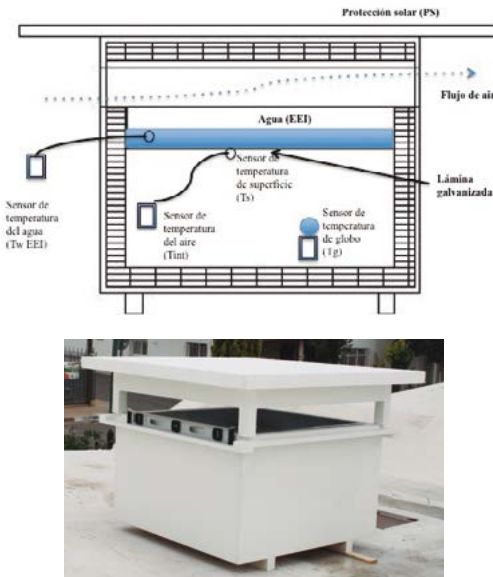


Figura 7. Módulo experimental con EEI+PS
Fuente: elaboración propia.

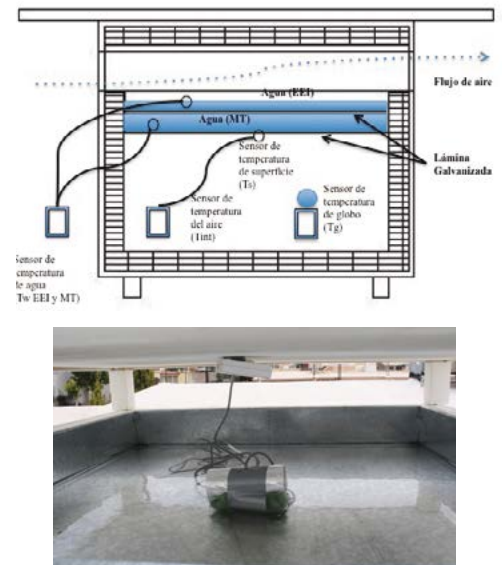


Figura 8. Módulo experimental con EEI+PS+MT
Fuente: elaboración propia.

con registros de datos cada 15 minutos. Entre cada experimento se dejaron 24 horas para la estabilización del módulo experimental y las técnicas de enfriamiento pasivo utilizadas.

El equipo de monitoreo utilizado consistió en *datta loggers* tipo HOBO de Onset Computer Co., modelos H08-004, H08-032-08 y U12-013 provistos de sensores de temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo (TBH), temperatura de globo negro (Tg), así como el cable TMC6-HD para el registro de temperatura del agua (Tw). Las mediciones obtenidas con este equipo pueden considerarse como de clase I de acuerdo con la norma ISO 7726, con base en la precisión y los rangos de operación con que trabajan.

RESULTADOS

TEP- CA+AT

El registro de datos de esta TEP fue del 2 al 5 de junio, de las 8:00 a las 07:45 respectivamente. La temperatura operativa registrada al interior del ME-CA+AT (TopCA+AT) fue inferior respecto a la exterior (Text) en la temperatura promedio y la mínima (1,14 y 3,81 °C respectivamente), mientras que en la máxima fue superior (2,39 °C). Con respecto a la temperatura operativa del módulo control (TopMc), la máxima no tiene diferencia alguna, mientras que la promedio y la mínima son inferiores (0,38 °C y 1,14 °C respectivamente). La oscilación de temperaturas operativas observada al interior del ME-CA+AT es 6,2 °C más larga que la correspondiente al exterior, y 1,14 °C respecto del MC; esto se debe a que el espesor de aislamiento en la cubierta es menor y que la cámara de aire no es efectiva (figura 9) (tabla 3).

TEP-CA+AT+ERN+MT

El registro de datos de esta TEP inició el 13 de junio a las 22:00 y concluyó el 16 de junio a las 21:45 h. La temperatura operativa regis-

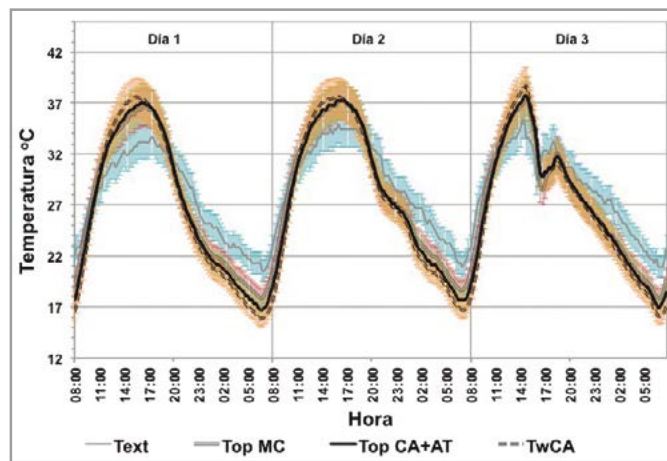


Figura 9. Datos registrados en °C con CA+AT (\pm 95 % intervalos de confianza)
Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Máximas	Promedio	Mínima	Oscilación
TEXT	35,27	28,38	20,57	14,70
TwCA	38,64	26,92	15,84	22,80
TOP MC	37,66	27,63	17,90	19,76
TOP CA+AT	37,66	27,24	16,76	20,90

trada al interior del ME-CA+AT+ERN+MT (TopCA+AT+ERN+MT), fue siempre inferior a la temperatura exterior (Text) (2,8 °C en promedio). Respecto a la temperatura operativa del módulo control (TopMC) en las máximas y mínimas fue inferior (6,1 °C en promedio), mientras que en la mínima fue mayor (2,1 °C). Esta diferencia se acentúa en los casos de temperatura máxima, cuando en el ME-CA+AT+ERN+MT se registraron temperaturas en promedio 6,0 °C más bajas que en el exterior y 10,2 °C que en el MC. Por su parte, la Top del ME-CA+AT+ERN+MT corre siempre muy cercana a la temperatura del agua de la masa térmica del estanque (TwMT), en promedio 0,73 °C por debajo de

Tabla 3. Promedios de temperaturas en °C con CA+AT
Fuente: elaboración propia.

ella. Por último, es pertinente hacer notar el efecto de amortiguamiento que proporciona la masa térmica del agua, fácilmente identificable mediante la oscilación térmica registrada. La oscilación de temperaturas operativas observada al interior del ME-CA+AT+ERN+MT es 5,8 °C más corta que la correspondiente al exterior, y 12,3 °C respecto del MC (figura 10) (tabla 4).

TEP-ME-EEI+AT+ERN

El registro de datos de esta TEP fue del 10 de junio a las 5:00 al 13 de junio a las 16:45 h. La temperatura operativa registrada al interior del módulo experimental ME-EEI+AT+ERN ($T_{opEEI+AT+ERN}$), fue siempre inferior a la temperatura exterior (Text) (8,43 °C en promedio) y a la temperatura operativa

del módulo control (T_{opMC}) (8,2 °C en promedio). Esta diferencia se acentúa en los casos de temperatura mínima, cuando en el ME-EEI+AT+ERN se registraron temperaturas en promedio 10,3 °C más bajas que en el exterior y 7,1 °C que en el MC. La diferencia entre las temperaturas máximas es menor, pero relevante, 4,0 °C con respecto al exterior y 7,4 °C con el MC. Por su parte, la T_{op} del ME-EEI+AT+ERN corre siempre muy cercana a la temperatura del agua del estanque (T_{wEEI}), en promedio 1,4 °C por encima de ella. Por último, es pertinente hacer notar el efecto de amortiguamiento que proporciona el agua, fácilmente identificable mediante la oscilación térmica registrada. La oscilación de temperaturas operativas observada al interior del ME-EEI+AT+ERN es 6,3 °C más

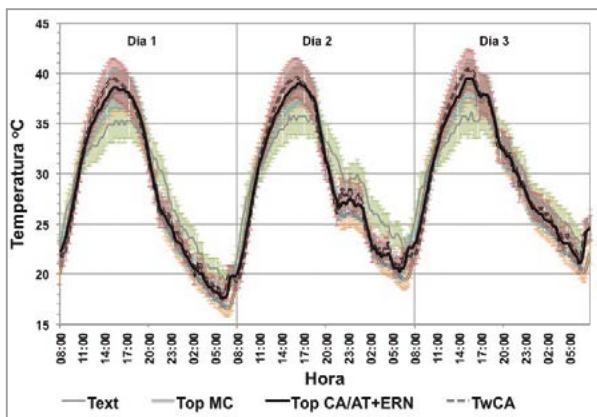


Figura 10. Datos registrados en °C durante el experimento con CA+AT+ERN/MT (\pm 95 % intervalos de confianza)
Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Máximas	Promedio	Mínima	Oscilación
TEXT	35,70	27,20	20,19	15,51
TOP MC	39,90	26,91	17,90	22,00
T _{OP} CA+AT+ERN+MT	29,72	24,99	20,00	9,72
T _{wEEI}	29,99	24,45	19,91	10,08
T _{wMT}	30,19	24,84	21,37	8,83

Tabla 4. Promedios de temperaturas en °C del experimento con CA+AT+ERN+MT
Fuente: elaboración propia.

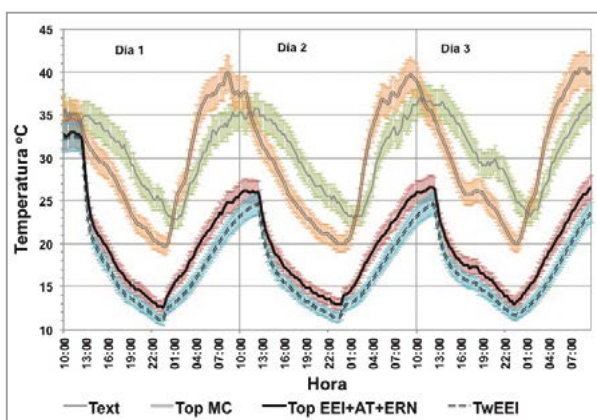


Figura 11. Datos registrados en °C con EEI+AT+ERN (\pm 95 % intervalos de confianza)
Fuente: elaboración propia.

PARÁMETRO	MÁXIMAS	PROMEDIO	MÍNIMA	OSCILACIÓN
TEXT	37,00	30,49	22,86	14,14
TOP MC	40,36	29,66	19,62	20,75
T _{OP} EEI+AT+ERN	32,97	19,55	12,54	20,43
T _{wEEI}	32,41	17,36	11,08	21,33

Tabla 5. Promedios de temperaturas en °C con EEI+AT+ERN
Fuente: elaboración propia.

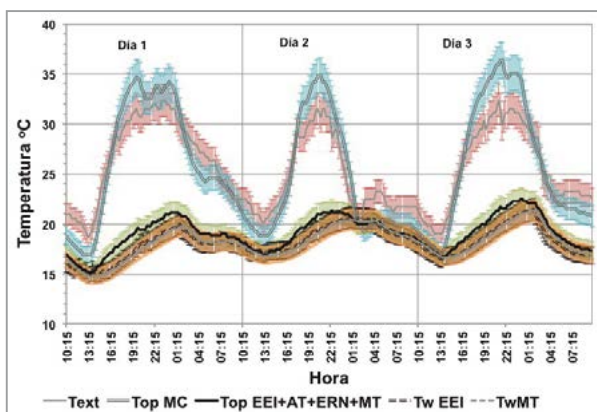


Figura 12. Datos registrados en °C con EEI+AT+ERN+MT (\pm 95 % intervalos de confianza)
Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Máximas	Promedio	Mínima	Oscilación
TEXT	32,34	25,52	18,66	13,68
TOP MC	36,35	25,51	16,95	19,40
T _{OP} EEI+AT+ERN+MT	22,48	19,07	15,04	7,44
T _{wEEI}	21,41	18,22	14,89	6,53
T _{wMT}	21,34	18,20	14,72	6,62

Tabla 6. Promedios de temperaturas en °C con EEI+AT+ERN+MT
Fuente: elaboración propia.

larga que la correspondiente al exterior y 0,3 °C respecto del MC (figura 11) (tabla 5).

TEP-EEI+AT+ERN+MT

El registro de datos de esta TEP fue del 23 de agosto a las 4:00 al 26 de agosto a las 03:45 h. La temperatura operativa registrada al interior del módulo experimental ME-EEI+AT+ERN+MT (TopEEI+AT+ERN+MT), fue siempre inferior a la temperatura exterior (Text) (6,7 °C en promedio) y a la temperatura operativa del módulo control (TopMC) (7,4 °C en promedio). Esta diferencia se acentúa en los casos de temperatura máxima, cuando en el ME-EEI+AT+ERN+MT se registraron temperaturas en promedio 9,9 °C más bajas que en el exterior y 13,9 °C que en el MC. La diferencia entre las temperaturas mínimas es 3,6 °C menor con respecto al exterior y 1,9 °C con el MC. La Top del ME-EEI+AT+ERN+MT corre siempre muy cercana a la temperatura del agua del estanque (TwEEI), en promedio 0,7 °C por encima de ella; mientras que con la (TwMT) es de 0,8 °C. Por último, es pertinente hacer notar el efecto de amortiguamiento que proporciona el agua, fácilmente identificable mediante la oscilación térmica registrada. La oscilación de temperaturas operativas observada al interior del ME-EEI+AT+ERN+MT es 6,2 °C más corta que la correspondiente al exterior y 12 °C respecto del MC (figura 12) (tabla 6).

TEP-ME-EEI+PS T2

El registro de datos de esta TEP inició el 6 de junio a las 2:00 y terminó el 9 de junio a las 01:45 h. La temperatura operativa registrada al interior del módulo experimental ME-EEI+PS (TopEEI+PS), fue siempre inferior a la temperatura exterior (Text) (9,9 °C en promedio) y a la temperatura operativa del módulo control (TopMC) (8,8 °C en promedio). Esta diferencia se acentúa en los casos de temperatura máxima, cuando en el ME-EEI+PS se registraron temperaturas en promedio 11,7 °C más bajas que en el exterior y 14,6 °C que en el MC. La diferencia entre las temperaturas mínimas es menor, pero relevante, 7,1 °C con respecto al exterior y 4,6 °C con el MC. Por su parte, la Top del ME-EEI+PS corre siempre muy cercana a la temperatura del agua del estanque (TwEEI), en promedio 1,6 °C por encima de ella. Por último, es pertinente hacer notar el efecto de amortiguamiento que proporciona el agua, fácilmente identificable mediante la oscilación térmica registrada. La oscilación de temperaturas operativas observada al interior del ME-EEI+PS es 4,7 °C más corta que la correspondiente al exterior y 10 °C respecto del MC (figura 13) (tabla 7).

TEP-EEI+PS+MT

El registro de datos de esta TEP se llevó a cabo del 14 de junio a las 01:30 al 17 de junio a las 00:45 h.

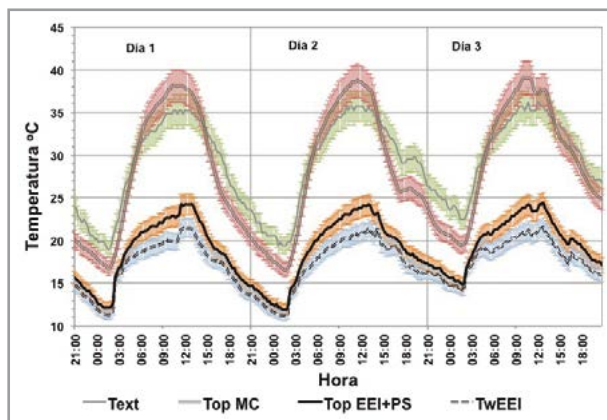


Figura 13. Datos registrados en °C con EEI+PS (\pm 95% intervalos de confianza).

Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Máximas	Promedio	Mínima	Oscilación
TEXT	36,13	29,17	19,04	17,09
TwEEI	21,58	17,37	11,15	10,43
TOP MC	39,00	28,37	16,57	22,43
TOP EEI+PS	24,41	19,11	11,97	12,45

Tabla 7. Promedios de temperaturas en °C con EEI+PS

Fuente: elaboración propia.

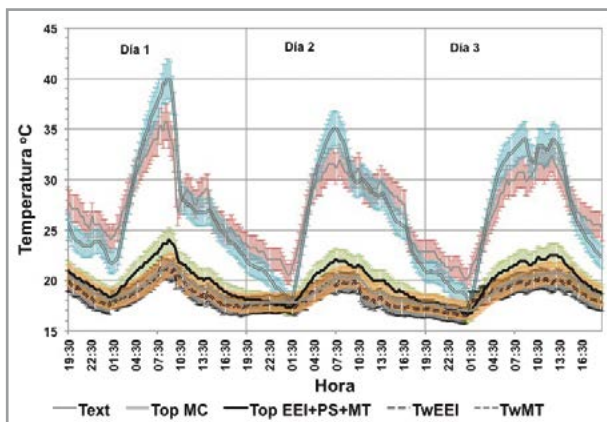


Figura 14. Datos registrados en °C con EEI+PS+MT (\pm 95% intervalos de confianza)

Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Máximas	Promedio	Mínima	Oscilación
TEXT	35,70	27,04	20,19	15,51
TOP MC	39,90	26,73	17,90	22,00
TOP EEI+PS+MT	24,02	19,85	16,57	7,45
TwEEI	21,27	18,52	16,44	4,83
TwMT	21,63	18,95	16,94	4,69

Tabla 8. Promedios de temperaturas en °C con ME-EEI+PS+MT

Fuente: elaboración propia.

La temperatura operativa registrada al interior del módulo experimental ME-EEI+PS+MT (TopEEI+PS+MT), fue siempre inferior a la temperatura exterior (Text) (7,5 °C en promedio) y a la temperatura operativa del módulo control (TopMC) (8,0 °C en promedio). Esta diferencia se acentúa en los casos de temperatura máxima, cuando en el ME-EEI+PS+MT se registraron temperaturas en promedio 11,7 °C más bajas que en el exterior y 15,9 °C que en el MC. La diferencia entre las temperaturas mínimas es menor, pero relevante, 3,6 °C con respecto al exterior y 1,3 °C con el MC. Por su parte, la Top del ME-EEI+PS+MT corre siempre muy cercana a la temperatura del agua del estanque (TwEEI), en promedio 1,3 °C por encima de ella, mientras que con la (TWMT) corre 1 °C. Por último, es pertinente hacer notar el efecto de amortiguamiento que proporciona el agua, fácilmente identificable mediante la oscilación térmica registrada. La oscilación de temperaturas operativas observada al interior del ME-EEI+PS+MT es 8,1 °C más corta que la correspondiente al exterior y 14,6 °C respecto del MC (figura 14) (tabla 8).

POTENCIAL DE ENFRIAMIENTO MEDIO (PEM)

El potencial de enfriamiento medio (PEM) se obtuvo a partir de los valores promedio de temperatura operativa al interior de los módulos de control y experimental de cada una de las técnicas de enfriamiento pasivo aplicadas y del análisis de los mismos. El análisis se hizo cada periodo de 24 horas y luego se promediaron los resultados obtenidos para determinar el PEM correspondiente de cada TEP experimentada.

Como resultado de ello se obtuvo que la TEP-EEI+AT+ERN alcanzó el mejor desempeño con un índice de 822,89 Wh/m²día, seguido de la TEP-EEI+PS con 764,60 Wh/m²día, luego la TEP-EEI+AT+ERN+MT con 532,78 Wh/m²día. El resto de las TEP se ubicaron por debajo de los 500 Wh/m²día (tabla 9).

Destaca en este resultado la mejora obtenida en el PEM con el enfriamiento radiativo nocturno y con cámara de aire ventilada. Es oportuno aclarar que la lámina galvanizada del techo estanque no se pintó de blanco, lo que disminuye la capa-

Experimento	PEM (Wh/m ² día)
ME-CA+AT	32,78
ME-CA+AT+ERN+MT	158,68
ME-EEI+AT+ERN	822,89
ME-EEI+AT+ERN+MT	532,78
ME-EEI+PS	764,90
ME-EEI+PS+MT	568,60

Tabla 9. Potencial de enfriamiento medio calculado con datos obtenidos en cada TEP

Fuente: elaboración propia.

de enfriamiento durante el intercambio radiativo nocturno (Givoni, 1994).

EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO (EF)

La eficiencia de enfriamiento se calculó a partir del comportamiento del MC y la TEP que mejores resultados obtuvieron. Los resultados nos indican que si a la técnica de EEI+AT+ERN le asignamos un índice de 100, todas las técnicas donde se incluye enfriamiento evaporativo tienen el mejor comportamiento.

Los resultados también nos indican que el aislamiento, aunque no es una técnica de enfriamiento, afecta el amortiguamiento total obtenido, efecto que hace sinergia cuando se combina con otra técnica pasiva.

CONCLUSIONES

Esta investigación confirma que en climas cálidos y secos, evaporar agua es una técnica de enfriamiento eficiente. Esto se debe a que esta técnica no requiere agregar grandes cantidades de humedad al ambiente ni aumentar la velocidad del aire en el espacio interior.

También se reafirma que la cubierta estanque, como cualquier cuerpo expuesto a la bóveda celeste, pierde calor por emisión de radiación de onda larga y alcanza un potencial de enfriamiento máximo, producto de las condiciones de cielo despejado y baja humedad específica características de este clima árido.

El aislamiento reduce el paso del flujo de calor, pero no contribuye como técnica de enfriamiento por sí solo, es necesario que esté combinado con alguna de las técnicas de enfriamiento pasivo para alcanzar su mejor potencial.

El agua contenida como masa térmica sin enfriamiento radiativo nocturno no fue eficiente como técnica de enfriamiento, debido a que su espesor fue insuficiente y tiene ganancia de calor durante el día cuando está expuesta al exterior y traslada el calor al interior por conducción.

El enfriamiento radiativo nocturno alcanza su mayor eficiencia cuando se combina con aislamiento y con otra TEP.

Experimento	Eficiencia (%)
MC	0
CA+AT	3,98
CA+AT+ERN+MT	19,28
EEI+AT+ERN	100
EEI+AT+ERN+MT	64,74
EEI+PS	92,95
EEI+PS+MT	69,1

Tabla 10. EF calculado con datos obtenidos en cada experimento

Fuente: elaboración propia.

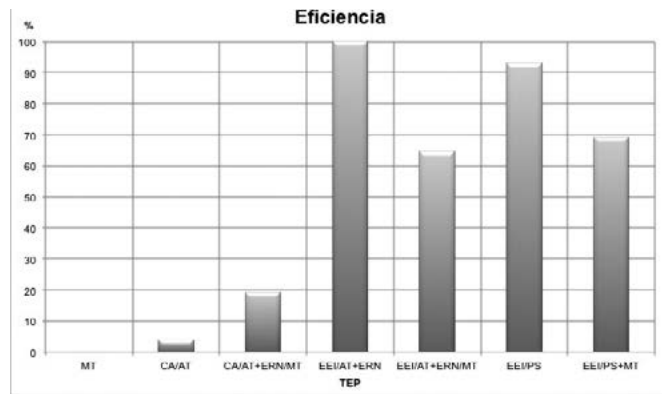


Figura 15. Eficiencia de enfriamiento calculado con datos obtenidos en cada experimento

Fuente: elaboración propia.

SIGLAS

CA+AT	Cámara de aire con aislamiento térmico.	MC	Módulo de control.
CA+AT+ERN/MT	Cámara de aire con aislamiento térmico, enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica.	ME	Módulo experimental.
DT	Amplitud de temperatura.	MT	Masa térmica.
EED	Enfriamiento evaporativo directo.	PEM	Potencial de enfriamiento medio.
EEl	Enfriamiento evaporativo indirecto.	TBS	Temperatura de bulbo seco.
EEl+AT+ERN	Enfriamiento evaporativo indirecto con aislamiento térmico y enfriamiento radiativo nocturno.	TBH	Temperatura de bulbo húmedo.
EEl+AT+ERN/MT	Enfriamiento evaporativo indirecto, aislamiento térmico, enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica.	TEP	Técnicas de enfriamiento pasivo.
EEl+PS	Enfriamiento evaporativo indirecto con protección solar.	Text	Temperatura exterior.
EEl+PS+MT	Enfriamiento evaporativo indirecto con protección solar y masa térmica.	Tint	Temperatura interior.
EF	Eficiencia de enfriamiento.	Tg	Temperatura de globo.
		Ts	Temperatura superficie interior de la lámina.
		TwMT	Temperatura del agua de la masa térmica.
		TwEEl	Temperatura del agua del enfriamiento evaporativo indirecto.

REFERENCIAS

- ANSI/ASHRAE Standard 55-04 (2010). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta GA, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers.
- ASHRAE (2009). Handbook of Fundamentals. Section 9.10. Atlanta GA, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers.
- Givoni, B. (1994). Passive and low energy cooling of buildings. New York: Wiley.
- Balaras, C. A. (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Building*, 24, 1-10.
- González, E. (1989). Evaluación de sistemas pasivos de enfriamiento y su aplicación en el diseño de viviendas. Informe de investigación CONDES, Universidad de Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- González, E. (1997a). Étude de matériaux et de 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*, 8(5), 99-103.
- González, S. (2010) Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo. Tesis de Maestría publicada. 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. Universidad de Colima, Facultad de Arquitectura, Coquimatlán.
- Hinz, E. (2006). Estudio del comportamiento térmico de un sistema pasivo de enfriamiento evaporativo indirecto con cobertura vegetal en un clima tropical. Madrid: DEA Ciencias Ambientales, Universidad Politécnica de Madrid.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2014). Climas de la República Mexicana. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/index.php>
- IMPCO (1999). Calculando enfriamiento evaporativo. Recuperado de: <http://www.impco.com>
- International Organization for Standardization. ISO 7726 (1998). Ergonomics of the Thermal Environment: Instruments of measuring physical quantities. Switzerland: ISO.
- International Organization for Standardization. ISO 7730 (1995). Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Switzerland: ISO.
- Norma mexicana NMX-C-460-onncce (2009). Industria de la construcción aislamiento térmico valor "R" para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana. Diario oficial de la Federación.
- Mihalakakou, J. O. y Santamouris, M. (1996). On the heating potential of buried pipes techniques-application in Ireland. *Energy and Buildings*, 19-25.