

Protecciones solares frías. Potencial del agua como sistema de enfriamiento pasivo en protecciones solares para zonas cálidas subhúmedas

Cool shading device. Potential of water as passive cooling system in shading devices for warm sub-humid zones

Esparza-López, C.J.^{a*}, Urbina-Rosales, C.L.^b, Aguilar-Lucas, S.R.^a, Elizondo-Mata, M.F.^a

^a Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima. Km 9 carretera Colima-Coquimatlán s/n, Coquimatlán, Colima. C.P. 28400.

^b Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Del Charro 450, Partido Romero, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua.

[*cesparza@ucol.mx](mailto:cesparza@ucol.mx)

Innovación tecnológica: Análisis experimental de un dispositivo de sombreado con capacidad de reducción de la temperatura del aire en climas cálidos y húmedos.

Área de aplicación industrial: Incorporación de la tecnología a edificios nuevos o existentes, sobre todo en el género habitacional de producción masivo como la vivienda de interés social.

Enviado: 20 Diciembre 2018.

Aceptado: 20 Noviembre 2019.

Abstract

The recommended strategies to achieve thermal comfort insides the buildings in hot humid areas are natural ventilation and solar protection. The applicability of both strategies in one device that works simultaneously to generate shadow and avoid heating the air that passes through it is hard to find.

An experimental study of a shading device under real conditions is presented in this paper. The shading devices allow to reduce the air temperature by itself due to the indirect evaporative cooling (IEC) of water. The study was carried out in the west coast of Mexico, specifically at Coquimatlan, Colima in a warm sub-humid climate. The average temperature of the analyzed season is 25.3 °C and the RH is 55 %.

Two devices were made of aluminum and acrylic inside polystyrene cells of 0.05 m wide as insulation. The dimension of the cells is 1.22 m long, 0.24 m high y 0.38 m wide. The dimension of the devices is 0.61 m long, 0.04 m high and 0.28 m wide. A 0.080 l of water was incorporated

in one of the devices to promote evaporative cooling. The experiment was performed 3 hours before and after local Zenit.

The results showed that indirect evaporative cooling helped reducing the temperature of the air passing below it by an average of 0.8 K in comparison with the same device without water. In further researches, it is recommended to perform the experiment under natural solar radiation conditions.

Keywords: Indirect evaporative cooling, solar protection, convective cooling, shading device.

Resumen

Las estrategias pasivas recomendadas para generar condiciones confortables al interior de los espacios habitables en climas cálidos húmedos son la ventilación natural y la protección solar. La aplicación de ambas estrategias en un dispositivo que trabaje simultáneamente para generar sombra y evitar que el aire se caliente al pasar a través del dispositivo de protección solar es difícil de identificar.

Se presenta un estudio experimental en condiciones reales de un dispositivo de sombreado para ventanas, que permite la reducción de temperatura del aire que pasa a través del mismo por medio de la evaporación de agua en forma indirecta. El estudio se realizó en la región occidente de México, concretamente en Coquimatlán, Colima que presenta un clima cálido sub-húmedo. La temperatura promedio de la temporada analizada es de 25.3 °C y la humedad relativa promedio es de 55 %.

Se construyeron dos celdas experimentales de poliestireno de 0.05 m de espesor donde se introdujeron los dispositivos. Las dimensiones de las celdas son de 1.22 m de largo, 0.24 m de alto y 0.38 m de ancho. Los dispositivos están fabricados en aluminio y acrílico con dimensiones de 0.61 m de largo, 0.04 m de alto y 0.28 m de ancho. A uno de los dispositivos se le incorporó la cantidad de 0.0801 de agua para procurar el enfriamiento evaporativo mientras que el otro permaneció intacto como referencia. El experimento se realizó durante 6 horas iniciando 3 horas antes del cenit local y se concluyó 3 horas después del cenit local.

Los resultados muestran que el enfriamiento evaporativo al interior de uno de los dispositivos experimentales mejoró la temperatura de la corriente de aire que pasa por debajo del dispositivo en un promedio de 0.8 K en comparación al mismo dispositivo que funcionó como referencia sin agua. En futuras investigaciones se recomienda experimentar bajo condiciones de radiación natural.

Palabras clave: Enfriamiento evaporativo indirecto, protección solar, enfriamiento convectivo, dispositivos de sombreado.

1. Introducción

En climas cálidos subhúmedos en la franja intertropical, las mejores estrategias pasivas para ser aplicadas son las protecciones solares y la ventilación (Givoni, 2011). Un dispositivo de sombreado es un elemento o conjunto de elementos, ya sean verticales u horizontales, que tienen como función controlar la entrada de la radiación solar en el interior de un espacio, ya sea evitándola o permitiéndola cuando sea necesaria. Los materiales más comunes con que se construyen en la actualidad este tipo de protecciones solares en las viviendas o edificaciones son madera, plásticos y metales, aunque también es común el uso de prefabricados con cemento portland y manufacturados con mampostería.

Por lo regular, el resultado entre el sombreado y la ventilación respecto a la adecuación bioclimática es opuesto cuando se aplica el uso de protecciones solares con materiales de alta conductividad (Fig. 1). La finalidad de una protección solar es bloquear la radiación solar y permitir la

visual y el flujo del aire. Sin embargo, la superficie que bloquea la radiación solar tiende a elevar su temperatura al recibir dicha radiación solar; esta energía se transmite al aire que pasa entre cada elemento de la protección solar dependiendo de las propiedades físicas de los materiales. Cuando funciona correctamente como bloqueador solar no necesariamente lo hace como ventilación ya que el aire que ingresa ha elevado su temperatura.

Cuando el vano está abierto, permite la entrada de aire previamente calentado por la protección solar. Entonces, el habitante debe decidir entre mantener la ventana cerrada evitando el acceso del aire caliente, pero tener el espacio interior a la sombra y sin viento, o en su defecto, abrirla aumentando la temperatura. El uso de dispositivos para sombreado influye en la energía usada por el edificio para iluminación, calentamiento y enfriamiento (Bellia, Marino, Minichiello, & Pedace, 2014).

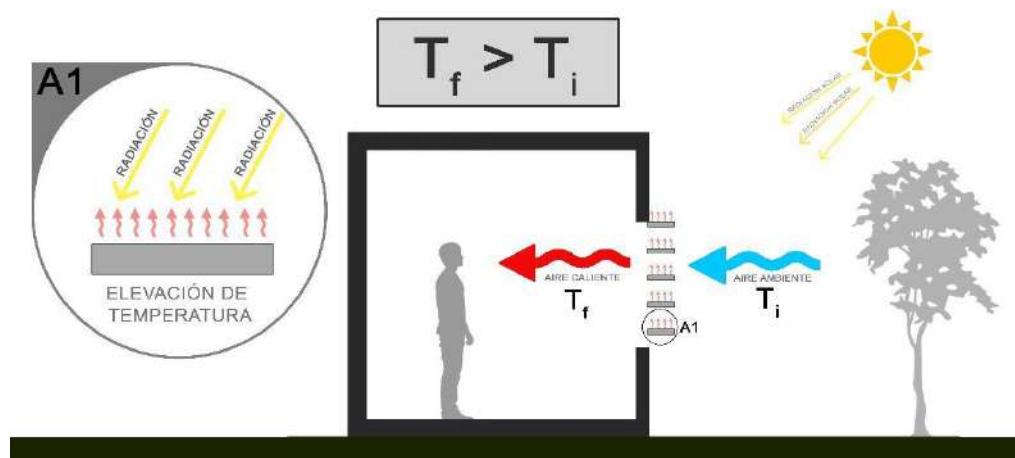


Figura 1. Desempeño típico de una protección solar metálica.

El enfriamiento evaporativo (EE) es el proceso que aprovecha el calor latente de vaporización de un fluido para reducir la temperatura, ya sea del aire o de una superficie en contacto con dicho fluido. Cuando esto ocurre, tanto el aire, el agua y

la superficie presentan una disminución de la temperatura debido a la transferencia de calor latente a calor sensible gracias a la evaporación del agua. Así es como el aire seco disminuye la temperatura conforme aumenta la humedad, hasta que alcanza el

punto donde ya no le es posible evaporar más agua (punto de saturación).

El enfriamiento evaporativo ha sido comprobado como una de las estrategias más eficaces para reducir la temperatura del aire (El-Refaie & Kaseb, 2009; Fernández-González, 2007; Porumb, Ungureşan, Tutunaru, Şerban, & BĂlan, 2016; Spanaki, 2007). Esta estrategia se ha usado como intercambiador de calor en configuración vertical (Finocchiaro, Beccali, & Nocke, 2012), pero en esta posición impide la protección solar.

En el caso del ámbito de la construcción, el EE puede ser aplicado de dos maneras dependiendo de su funcionamiento: directo o indirecto. Cuando el aire húmedo y con baja temperatura, producto del enfriamiento evaporativo, se introduce directamente al espacio habitable y, por lo tanto, está en contacto directo con las personas, se denomina Enfriamiento Evaporativo Directo (EED). Este proceso implica un aumento de humedad en el aire de la habitación.

Por otro lado, el Enfriamiento Evaporativo Indirecto (EEI) se presenta cuando el aire con alta humedad y con baja temperatura se utiliza para enfriar un elemento de la envolvente en lugar de introducirse directamente al espacio habitable, y es este elemento el que está en contacto con el interior (Esparza-López 2015; Esparza L. et al. 2018) Este elemento funcionará como sumidero de calor, es decir, absorberá el calor de la habitación, pero no introducirá humedad al ambiente interior ya que el aire que pasa a través de los dispositivos es completamente independiente al aire dentro de los mismos.

Para poder alcanzar el confort térmico en un clima cálido subhúmedo, se deben reducir los altos niveles de humedad de los espacios ya que el vapor de agua en el aire contiene calor latente que aunado al calor sensible del aire aumenta la incomodidad de las personas. Si se ventilan los espacios, se renueva aire fresco y se sustituye el aire utilizado, reduciendo el calor sensible para propiciar condiciones de confort (Cárdenas, 2017).

Se han realizado diversos estudios para caracterizar los sistemas de EEI en climas con alta humedad. Cárdenas (2017) realizó una investigación para identificar una membrana eficiente según ciertas características como capacidad de absorción, dispersión, capilaridad y velocidad de evaporación para ser aplicada en sistemas de enfriamiento evaporativo. Zhao et al. (2008) compararon las características de ciertos materiales para identificar el más eficiente para ser usado en estos sistemas. De igual modo, Pires et al. (2011) hicieron un estudio para determinar experimentalmente las capacidades de enfriamiento por evaporación de diferentes materiales de construcción y textiles.

En este artículo se presenta el funcionamiento de un dispositivo de protección solar que incorpora EEI y permite la ventilación, enfriando el aire a su paso a través del dispositivo para un clima cálido húmedo. En este documento se analiza el desempeño térmico de un componente de protección solar aplicándole EEI (Fig. 2). Se colocó una membrana húmeda dentro de la persiana procurando la evaporación del agua en su interior. El funcionamiento como protección solar se mantiene buscando enfriar el aire que pasa a través de la protección.

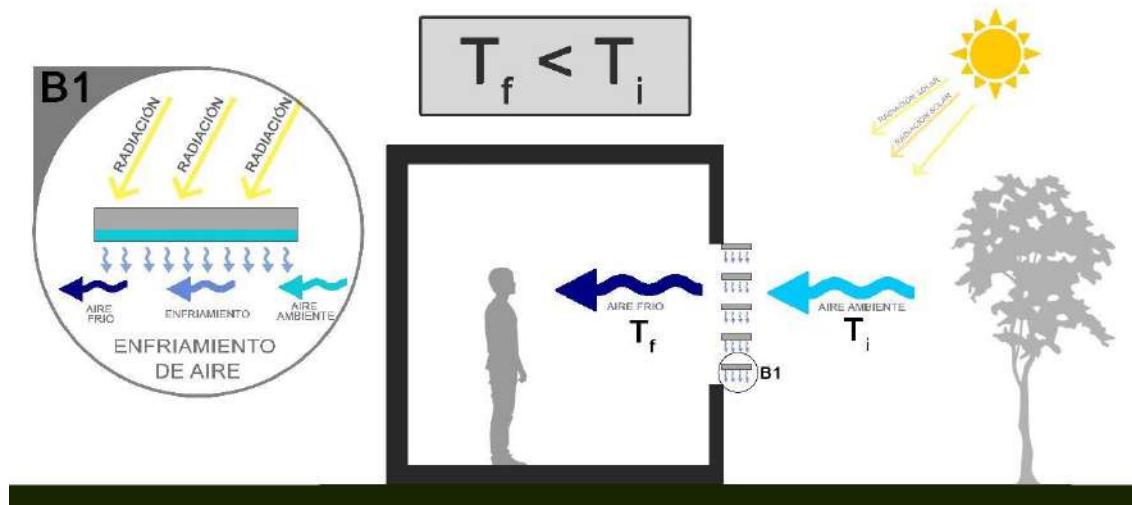


Figura 2. Enfriamiento evaporativo indirecto por medio de protecciones solares metálicas.

2. Materiales y métodos

El presente trabajo muestra el desempeño higro-térmico de un dispositivo que combina una protección solar con la ventilación mejorando las condiciones del aire usando el EEI para un clima cálido húmedo demostrado mediante casos de experimentación y el análisis comparativo. El experimento tuvo lugar en el edificio de Posgrado de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima, ubicado en Coquimatlán, Colima, México. De acuerdo con García (2004), la ubicación cuenta con un clima clasificado como Aw0 cálido subhúmedo. La hipótesis de trabajo presupone que el EEI dentro de la persiana reduce la temperatura del aire que pasa por debajo de ella.

Por 4 días del mes de julio del 2018 (miércoles 04, jueves 05, viernes 06 y lunes 09) se monitorearon las variables de temperatura de bulbo seco y humedad relativa tanto al exterior como dentro de los dispositivos, así como velocidad y

orientación del viento al exterior. Se utilizaron dos dispositivos de EE construidos con las mismas características y bajo las mismas condiciones reales teniendo un caso como referencia y otro como caso experimental, sus especificaciones se mencionan en el apartado 2.2 Unidad de análisis.

Los datos se analizaron por medio de la marcha horaria de temperaturas y humedades relativas y la determinación de la tasa de enfriamiento. De esta manera se pudo determinar cuál de los dos dispositivos es el que tuvo mejor desempeño térmico y su gradiente de reducción térmica del mismo.

2.1 Ubicación

La experimentación se llevó a cabo en la ciudad de Coquimatlán, Colima, México (Fig. 3) la cual se localiza en latitud de 19° 12' 41" Norte, longitud de 103° 48' 23" Oeste y una altitud de 354 m.s.n.m.

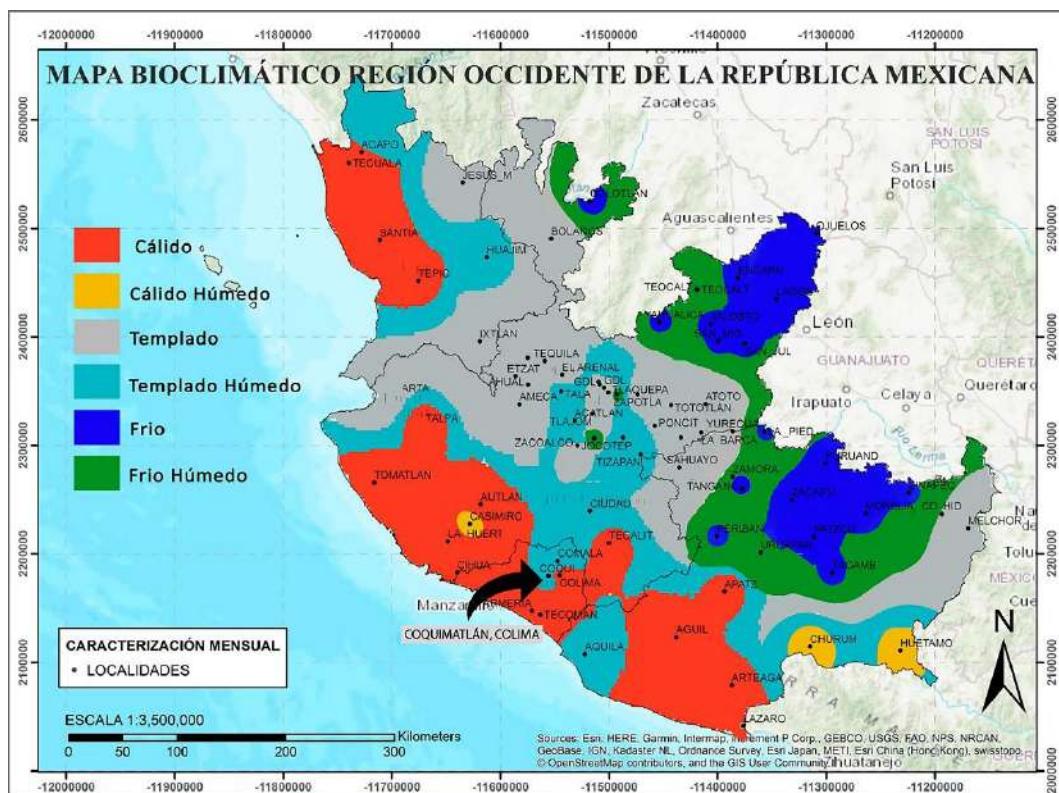


Figura 3. Mapa bioclimático región occidente de la República Mexicana.

El estado de Colima es parte del 27 % del clima húmedo del país (Esparza L., et al., 2016). Tiene una temperatura media anual de 25 °C y una humedad relativa media anual de 49 %. La temperatura máxima registrada fue en el mes de abril con 40.8 °C y la mínima en febrero y marzo con 12.5 °C. En cuanto a la humedad relativa, las máximas se presentan en septiembre con 82 % y las mínimas en marzo con 19 % aproximadamente. En Colima se definen 3 temporadas climáticas (ver figura 4) que son la cálida húmeda, cálida subhúmeda y templada subhúmeda. La templada subhúmeda (en color gris) en los meses de enero, febrero y marzo tiene una

temperatura promedio de 23.3 °C y una humedad relativa promedio del 43 %. El cálido subhúmedo (en color naranja) en los meses de abril a junio y diciembre tiene una temperatura promedio de 25.2 °C y una humedad relativa promedio de 45 %. Finalmente, la cálida-húmeda (en color azul) en los meses de julio a noviembre tiene una temperatura promedio de 25.3 °C y una humedad relativa promedio de 55 %.

El experimento se llevó a cabo en el mes de julio para poder analizar el rendimiento del sistema en la época más húmeda, que es cuando los sistemas de EEI presentan menor rendimiento.

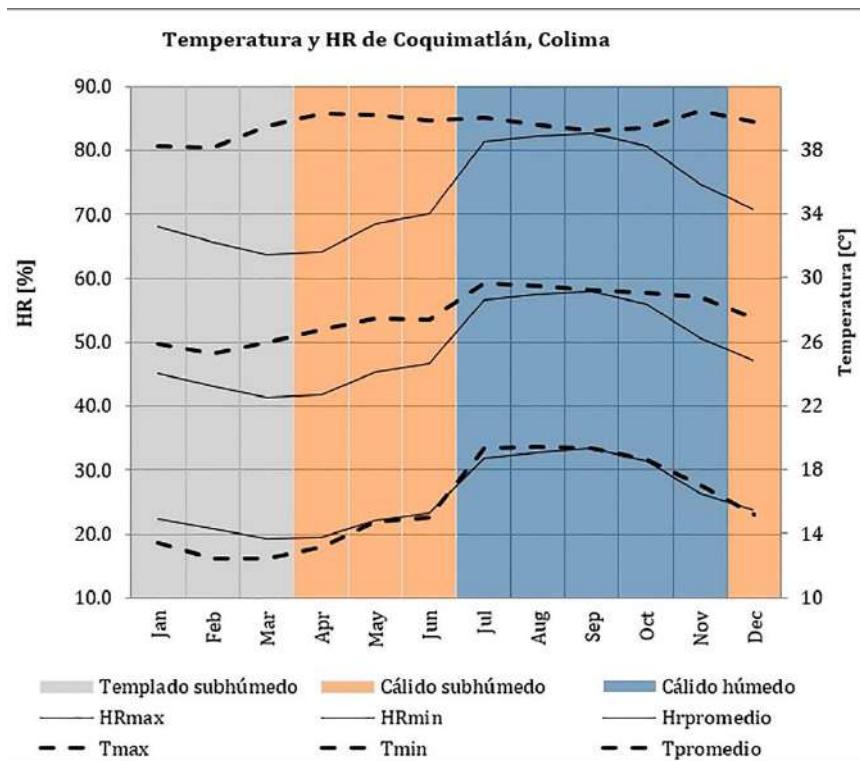


Figura 4. Temperatura y humedad relativa (HR) de Coquimatlán, Colima, México.

2.2 Unidad de análisis

El propósito principal del dispositivo (Fig. 5) es aplicar el EEI en el interior para reducir la temperatura del agua, del dispositivo y el aire que tiene contacto por

encima y por debajo de él. Permite que se pueda utilizar como dispositivo para sombrear y ventilar. Se basó en la configuración de una protección solar en modo horizontal, eficiente en regiones cálidas subhúmedas.

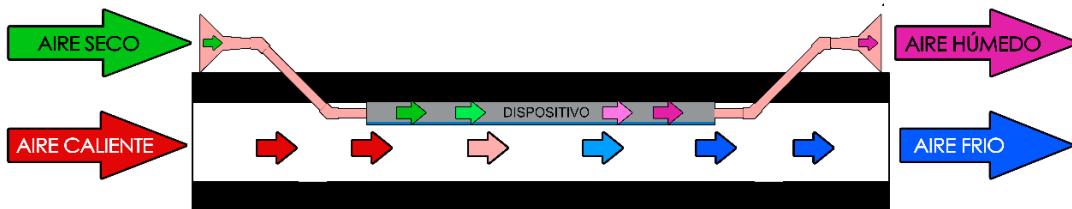


Figura 5. Operación del sistema de enfriamiento.

Se realizó un análisis comparativo con dos celdas (Fig. 6). Para comparar la eficiencia del EE, se construyeron dos dispositivos en donde uno de ellos contenía 0.080 l de agua (celda experimental), y el otro sin agua

(celda de referencia). Para distribuir y mejorar la tasa de evaporación dentro del dispositivo, se colocó un material poroso en su interior (Esparza L., et al., 2016; Esparza L. et al., 2018).

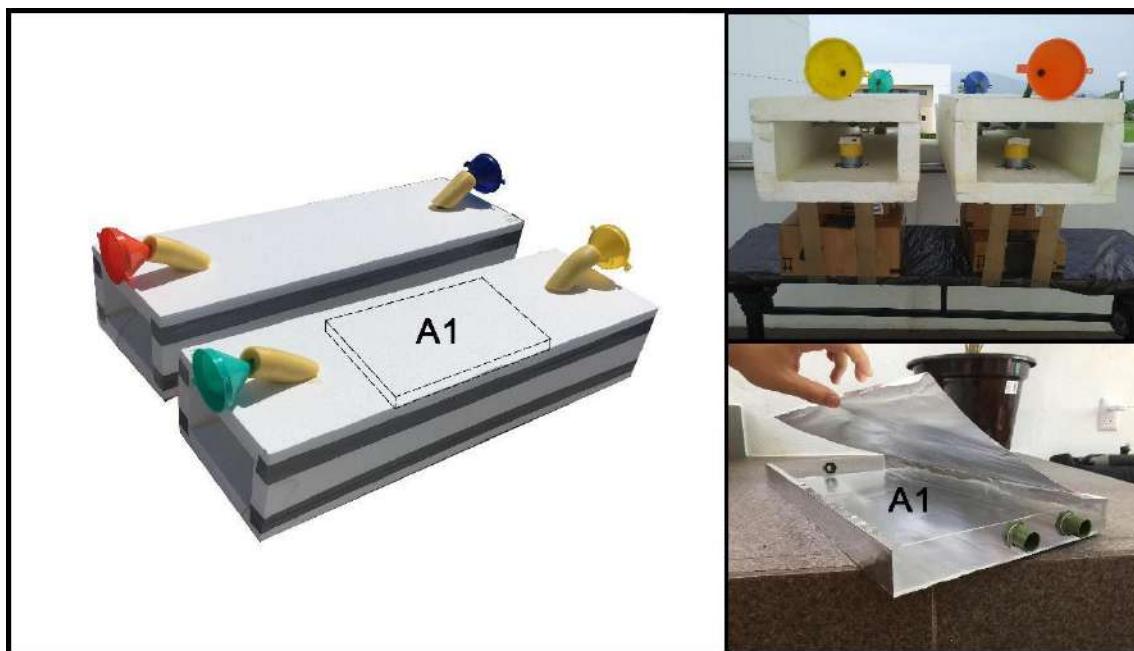


Figura 6. Celda de referencia y experimental.

Cada dispositivo se ubicó dentro de una celda de poliestireno, orientadas hacia el sur para poder recibir los vientos dominantes diurnos. La salida a sotavento se cubrió con una lámina de celulosa móvil (lado norte) para poder controlar la ventilación de la orientación elegida y evitar el contraflujo de aire no deseado.

Las celdas funcionan como túneles de viento en donde el aire puede circular en su interior. Sus dimensiones son 0.24 m de alto, 1.22 m de largo y 0.38 m de ancho. El material utilizado fue placas de poliestireno de 0.05 m de ancho, usadas como aislamiento para evitar la incidencia directa de la radiación solar (Fig. 7).

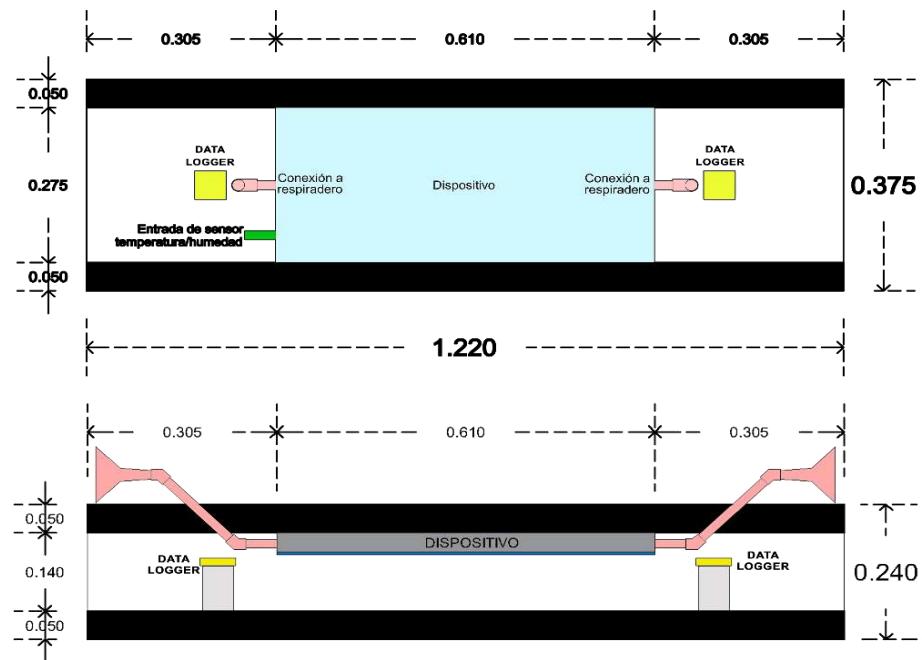


Figura 7. Vista en planta y sección longitudinal de la celda experimental.

VISTA EN EXPLOSIÓN DE CELDA EXPERIMENTAL

SIMBOLOGÍA

- ① Placa de poliestireno de 0.05m
- ② Embudo plástico de 0.15m de diámetro
- ③ Ducto de PVC de 0.00125m de diámetro
- ④ Lámina de aluminio
- ⑤ Manta de algodón
- ⑥ Acrílico transparente de 0.003m
- ⑦ Base de poliuretano expandido
- ⑧ Data logger

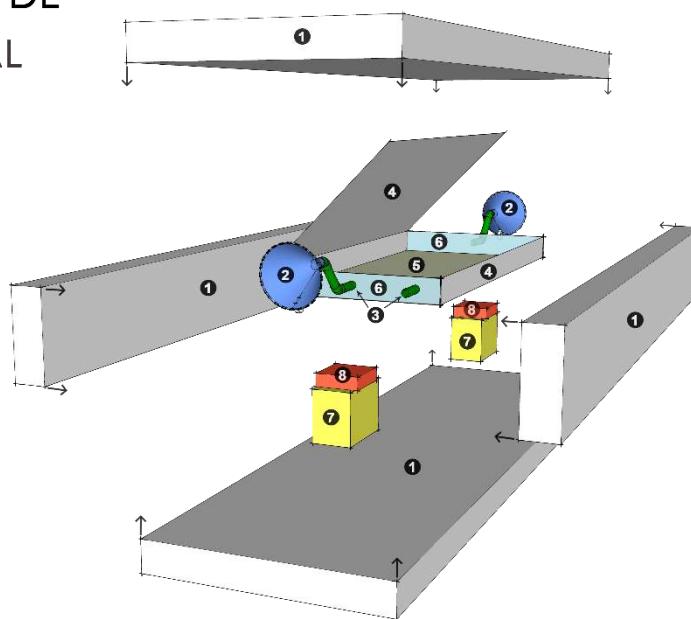


Figura 8. Vista en explosión de celda experimental.

Cada celda está compuesta por 4 piezas de poliestireno, que se unieron con cinta industrial de 0.05 m de grosor. Esto proporciona la solidez estructural necesaria y, a su vez, permite sellar las juntas entre las cuatro piezas, evitando así filtraciones de aire al interior.

Dentro de cada celda se tiene un dispositivo que hace la función de persiana en la protección solar. Uno de los dispositivos contiene agua para funcionar como un sistema de enfriamiento indirecto mediante la evaporación de un líquido. Las dimensiones de los dispositivos son 0.61 m de largo, 0.28 m de ancho y 0.04 m de alto.

Se usó aluminio, un material de alta conductividad en la superficie del dispositivo para mejorar el intercambio de energía entre la cámara evaporativa y el paso del aire, el cual fue colocado en todas las áreas de contacto. Los laterales del dispositivo fueron hechos con acrílico transparente de 0.003 m de grosor, para mantener la visibilidad del interior del dispositivo, lo que permite observar el proceso de evaporación del agua.

En una de las placas de acrílico se hizo una abertura de 0.0125 m para permitir introducir aire del exterior y retirar el aire saturado dentro de la cámara evaporativa (Ver figura 8, número 3). En la placa opuesta se hicieron dos aberturas de 0.0125 m para permitir la salida del aire saturado de la cámara evaporativa e introducir los sensores de temperatura y humedad relativa (Ver figura 8, número 3). Además, uno de estos orificios funcionó para introducir agua. Tanto en el orificio de entrada como de salida se insertó un ducto con un material de baja conductividad térmica como el PVC de 0.0125 m de diámetro.

Una manta de algodón se colocó dentro del dispositivo para esparcir el agua y evitar que se acumulara en un solo punto y aumentar el área de contacto del agua con el aire, lo que, a su vez, aumenta la tasa de evaporación (Esparza L., et al., 2016; Esparza L. et al., 2018). Se seleccionó el algodón por ser una fibra natural de fácil alcance, y por ser la más efectiva en cuanto a sus características de absorción de líquidos, evaporación y capilaridad (Cárdenas, 2017).

Finalmente, el resto del dispositivo fue sellado para evitar filtraciones de aire con humedad relativa alta dentro de la cámara ventilada. Al extremo de cada ducto se colocaron embudos de 0.15 m de diámetro para maximizar la cantidad de aire introducido, evitando así la saturación y permitiendo un EEI óptimo.

El ducto externo que conecta el dispositivo con los embudos se cubrió con espuma de

poliuretano expandido para evitar las ganancias de energía solar (Ver figura 6), de esta manera toda la celda estuvo completamente aislada de factores externos; al igual, las celdas se cubrieron del lado norte con una lámina de celulosa como protector móvil para evitar infiltraciones de aire no deseadas, pero no obstruir el flujo del aire (Fig. 9). Esto que permitió obtener datos más precisos en las mediciones.

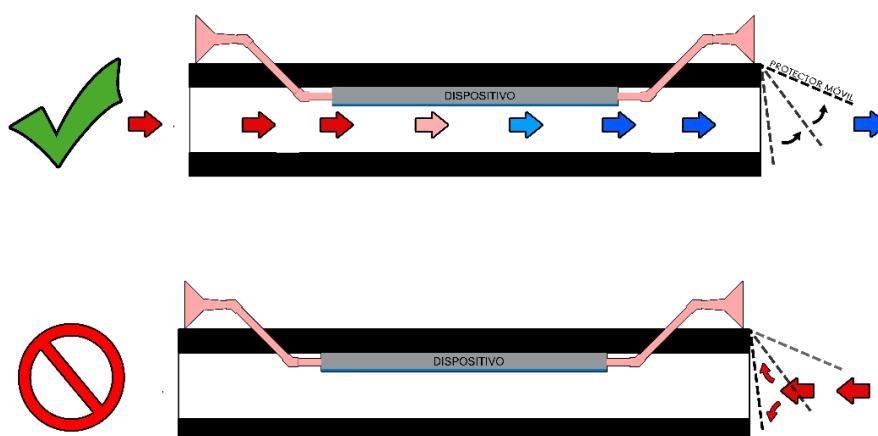


Figura 9. Funcionamiento de lámina de celulosa como protector móvil.

2.3 Equipo e instrumentación

Se colocaron dos registradores en cada celda para analizar la temperatura de bulbo seco externa y la humedad relativa externa. Se ubicaron en lados opuestos de cada celda (a 0.20 m de cada extremo) para registrar la temperatura del aire en la entrada y la salida del dispositivo, sobre bases de 0.08 m de altura de poliestireno expandido. A esta altura, el aire toca directamente la superficie del dispositivo y permite medir la disminución de la temperatura.

Se colocó un quinto registrador entre ambas celdas, al exterior, para tener una referencia en la temperatura de bulbo seco exterior y poder compararla con la temperatura de entrada de las celdas.

Las especificaciones técnicas de los registradores son:

Rango de medición:

- Temperatura: -20 ° a 70 °C
- RH: 5 % a 95 %

Precisión:

- Temperatura: ± 0.35 °C de 0 ° a 50 °C
- RH: ± 2.5 % de 10 % a 90 % de humedad relativa típico, a un máximo de ± 3.5 % incluyendo histéresis a 25 °C; por debajo del 10 % y por encima de 90 % ± 5 % típico.

Se analizó la temperatura del bulbo seco y la humedad relativa al interior del dispositivo, para identificar el nivel de saturación y poder saber si la ventilación al interior del dispositivo es adecuada o insuficiente. Se usó una estación meteorológica para llevar a cabo la medición de temperatura de bulbo seco y humedad relativa dentro de los dispositivos,

y velocidad del viento al exterior de las celdas.

Las especificaciones de la estación meteorológica:

- Rango de operación: -20 ° a 50 °C con baterías alcalinas, -40 ° a 70 °C con baterías de litio
- Entradas de sensor: hasta cuatro sensores inteligentes (incluyendo sensores de parámetros múltiples)
- Comunicación: puerto serie de .0035 m
- Dimensiones: 0.89 m (alto) x 1.14 m (largo) x .54 m (ancho)
- Peso: 0.36 kg
- Indicadores operativos: Siete luces proporcionan registro y estado de la red del sensor
- Intervalo de registro: 1 segundo a 18 horas, intervalo especificado por el usuario
- Duración de la batería: Uso típico de 1 año (hasta 4 sensores con intervalo de registro de 1 minuto o más).

En cuanto al sensor de temperatura / humedad relativa de 12 bits, sus especificaciones son:

Rango de medición:

- Temperatura: -40 °C a 75 °C
- RH: 0-100 % HR a -40 ° a 75 °C; la exposición a condiciones por debajo de -20 °C o por encima del 95 % de HR puede aumentar temporalmente el error máximo del sensor de HR en un 1 % adicional.

Precisión:

- Temperatura: +/- 0.21 °C de 0 ° a 50 °C
- HR: +/- 2.5 % de 10 % a 90 % RH (típico), hasta un máximo de +/- 3.5 %

Tiempo de respuesta

- Temp: 5 minutos en movimiento de aire 1 m/seg

- HR: 5 minutos en movimiento de aire 1 m/seg con tapa protectora
- Rango de temperatura de funcionamiento: -40 °C a 75 °C
- Dimensiones del sensor: .010 x .035 m
- Peso: 110 g
- Cantidad de canales de datos: 2.

Se utilizó un anemómetro para analizar la velocidad alrededor del dispositivo y poder calcular el caudal. Las especiaciones técnicas son las siguientes:

- Parámetros de medición: velocidad promedio del viento y la mayor ráfaga de 3 segundos en el intervalo de registro
- Rango de medición: de 0 a 76 m/s
- Rango de temperatura de funcionamiento: -40 ° a 75 °C
- Precisión: ± 1.1 m/s o ± 4 % de lectura, lo que sea mayor
- Resolución: 0.5 m/s
- Umbral de inicio: 1 m/s
- Dimensiones: 1.90 m x .51 m
- Peso aproximado: 300 g
- Longitud del cable: 3 m.

2.4 Casos de experimentación

Las celdas se acomodaron en paralelo a 0.20 m de cada una, con la intención de que estuvieran bajo las mismas condiciones de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del viento. Se orientaron al sur para captar la mayor parte de los vientos dominantes diurnos (Fig. 10). Pese a que los dispositivos se encontraban aislados dentro de las celdas para evitar las ganancias por radiación solar, estos a su vez, estaban debajo de la cubierta de fibrocemento del edificio, lo que permitió reducir la injerencia de la radiación sobre el experimento.

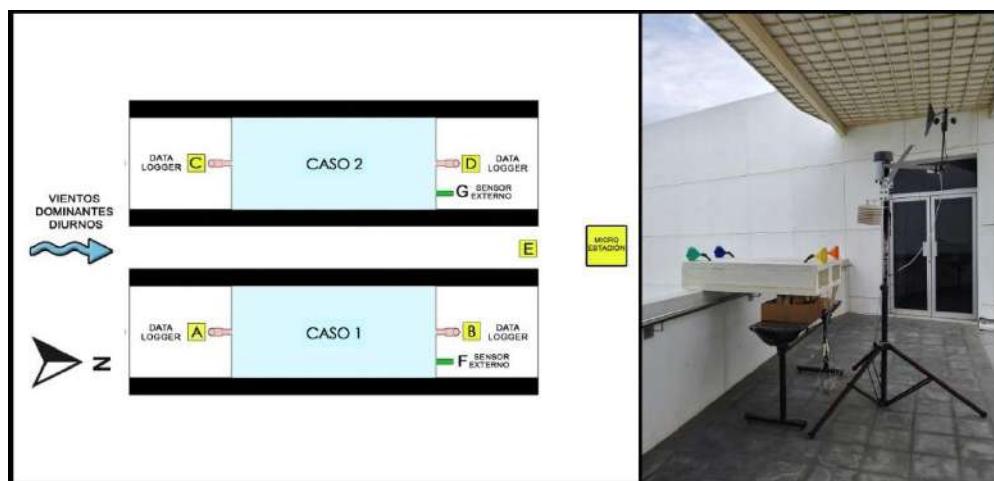


Figura 10. Selección de los casos para la experimentación.

Celda experimental – Caso 1 (Dispositivo con agua)

- Celda de poliestireno con el dispositivo de enfriamiento evaporativo con 0.080 l de agua en su interior.
- El registrador “B” se ubicó en la entrada de aire y el registrador “A” en la salida de aire.
- El sensor externo “F” se ubicó dentro del dispositivo.

Celda de referencia – Caso 2 (Dispositivo sin agua).

- Celda de poliestireno, con el dispositivo de enfriamiento evaporativo, sin agua en su interior.
- El registrador “D” se ubicó en la entrada de aire y el registrador “C” en la salida de aire.
- El sensor externo “G” se ubicó dentro del dispositivo.

El dispositivo “E” se colocó entre ambas celdas, al exterior, para tener una referencia en la temperatura de bulbo seco exterior y poder compararla con la temperatura de entrada de las celdas.

2.5 Calibración

Se hizo una calibración de los registradores y a los sensores externos durante una semana para compensar las diferencias en la medición en el equipo. En total se tuvieron 865 registros para la calibración. Se

ubicaron todos los dispositivos de medición juntos para monitorear las mismas condiciones ambientales. Para esto, se escogió un registrador como referencia y, mediante una regresión lineal en una gráfica de dispersión se obtuvo la correlación de los valores obtenidos, y por consiguiente, se definió la ecuación de la recta de la correlación lineal entre cada dispositivo, con la cual los errores sistemáticos de la medición pudieron ser compensados.

Los resultados de las calibraciones son los siguientes: el dispositivo “B” presentó un coeficiente de correlación de $r=0.9995$, con un error típico de $s=0.041$ en un muestreo de $n=865$, la desviación estándar de $\sigma=1.359$ y su ecuación de corrección $y=1.0048x-0.2218$. El dispositivo “C” presentó un coeficiente de correlación de $r=0.9998$, con un error típico de $s=0.022$ en un muestreo de $n=865$, la desviación estándar de $\sigma=1.370$ y su ecuación de corrección $y=0.9879x+0.3323$. El dispositivo “D” presentó un coeficiente de correlación de $r=0.9987$, con un error típico de $s=0.067$ en un muestreo de $n=865$, la desviación estándar de $\sigma=1.370$ y su ecuación de corrección $y=0.9544x+1.3586$. El dispositivo “E”, tuvo un coeficiente de correlación de $r=0.9991$, con un error típico de $s=0.056$ en un muestreo de $n=865$, la desviación estándar de $\sigma=1.397$ y su ecuación de corrección $y=0.9524x+1.4506$. Finalmente, para los sensores externos se

obtuvieron dos datos; uno para cada sensor. En este sentido, el dispositivo “F” presentó un coeficiente de correlación de $r=0.9957$, con un error típico de $s=0.126$ en un muestreo de $n=865$, la desviación estándar de $\sigma=1.407$ y su ecuación de corrección $y = 0.9379x+1.9577$ y el dispositivo “G” presentó un coeficiente de correlación de $r=0.9977$, con un error típico de $s=0.091$ en un muestreo de $n=865$, la desviación estándar de $\sigma=1.395$ y su ecuación de corrección $y=0.9564x+1.4339$.

2.6 Periodicidad

El experimento se realizó por 4 días (miércoles 04, jueves 05, viernes 06 y lunes 09 de julio del 2018) durante 6 horas iniciando a las 9:00 horas hasta las 15:00 horas. Este horario es el que tiene las temperaturas más altas del día. El agua (0.080 l) se introdujo dentro del dispositivo (celda experimental) al iniciar el experimento. Tres horas antes del cenit local. La temperatura de bulbo seco se registró cada 5 minutos. Las horas presentadas son horas solares.

2.7 Análisis de resultados

El análisis de resultados se llevó a cabo mediante gráficas que muestran el desempeño del dispositivo durante los días de experimentación, así como gráficas donde se presentan las tasas de enfriamiento del dispositivo y los porcentajes de humedad que se obtuvieron.

Para la tasa de enfriamiento se utilizó la siguiente ecuación:

$$R_e = T_i - T_f \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

T_i es la temperatura inicial

T_f es la temperatura final.

3. Resultados

Después de la etapa de la experimentación se analizaron y graficaron los resultados obtenidos, los cuales se muestran en las gráficas. Las variables que se presentan son: temperatura de bulbo seco (TBS) y humedad relativa. Para la variable de viento, se desarrolló un algoritmo que permitió señalar los momentos en lo que la ventilación tuviera la dirección sur-norte y fuera superior a 0.5 m/s.

En la figura 11, se puede apreciar la diferencia de temperatura entre el registrador que registró la entrada del aire y el que registró la salida de ambas celdas en los cuatro días que se midieron los datos. Se muestra la temperatura exterior para tener una mejor referencia en cuanto a la temperatura registrada en las celdas. Se presenta también la humedad del exterior para poder tener mejor referencia de la humedad dentro del dispositivo con agua y sin agua. Además, se muestran las horas donde hubo presencia de viento mayor a 0.5 m/s con dirección Sur-Norte para poder tener mayor claridad de cuanta cantidad de ventilación entró al dispositivo y analizar los efectos en el desempeño.

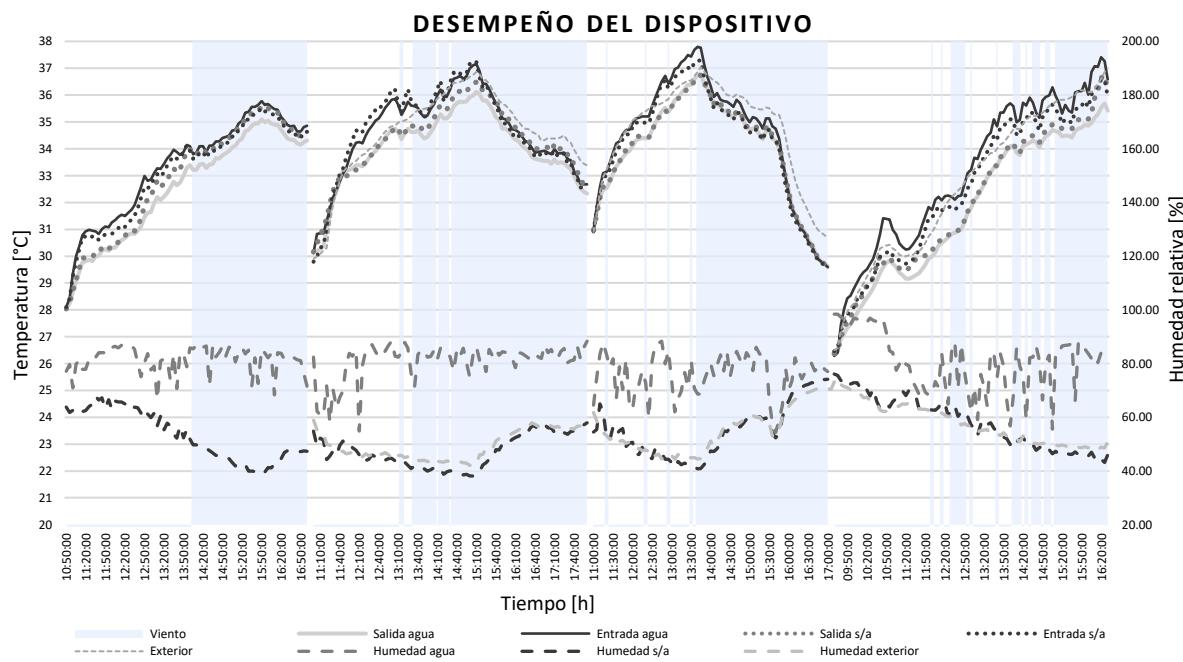


Figura 11. Desempeño general del dispositivo.

Como se mencionó anteriormente, se registró la temperatura exterior para poder comparar con las temperaturas alcanzadas dentro del dispositivo. Cabe mencionar que no se tiene el registro del día 1 (miércoles 04 de julio) debido a fallos que presentó el equipo. En este sentido, la temperatura promedio del exterior (“Exterior”) fue: día 2 (jueves 05 de julio) un promedio de 34.6 °C, para el día 3 (viernes 06 de julio) fue de 33.9 °C y para el día 4 (lunes 09 de julio) fue de 32.7 °C. Se registraron también las temperaturas máximas y mínimas exteriores donde la más alta fue el día 3 que tuvo una temperatura de 37.0 °C y la mínima la tuvo el día 4 con una temperatura de 26.5 °C. Teniendo esto como referencia, las temperaturas registradas en la entrada de aire de la celda experimental y la celda de referencia son similares entre sí, siendo mayor a la exterior donde el promedio más alto de temperatura fue de la celda de referencia en el día 2 con 34.7 °C comparado con la temperatura exterior promedio del día 2 que fue de 34.6 °C. En cuanto a la temperatura registrada de la salida del aire de ambas celdas, se tuvo una diferencia máxima de 0.3 °C siendo menor la celda experimental donde el promedio mayor fue de 34.3 °C en el día 2 y el

promedio menor se obtuvo en la celda experimental el día 4 con una temperatura promedio mínima de 31.7 °C.

Se midió la temperatura en el interior de los dispositivos en las celdas. En cuanto a la temperatura promedio del día 2, el dispositivo de la celda experimental presentó un 0.7 °C menos que la temperatura promedio del exterior mientras que en su contraparte el dispositivo de la celda de referencia se mantuvo similar a la exterior. En el día 3, el dispositivo de la celda experimental presentó una temperatura promedio similar a la exterior y el dispositivo de la celda de referencia se mantuvo 0.3 °C más alta que la exterior. En el día 4, los dispositivos de ambas celdas presentaron una temperatura promedio menor que la temperatura exterior siendo el dispositivo de la celda experimental 0.9 °C menor y el dispositivo de la celda de referencia 0.5 °C menor.

Se registró la humedad relativa del exterior donde los datos son los siguientes: el día 1 no se cuenta con datos; el día 2 tuvo una humedad relativa promedio de 49 %, el día 3 de 55 % y el día 4 de 58 % donde el día de mayor humedad relativa fue el día 4 y el

de menor humedad relativa el día 2. Teniendo esta información como referencia, se observó que la humedad relativa dentro del dispositivo de la celda experimental siempre fue mayor a la del exterior por cuando menos 21 % mientras que la humedad relativa dentro del dispositivo de la celda de referencia se mantuvo muy similar a la del exterior por diferencia de $\pm 2\%$. Este dato es de relevancia dado que se mostró si la ventilación dentro del dispositivo de la celda experimental fue óptima permitiendo renovar el aire húmedo como resultado del EE.

En la figura 12 se muestran las horas con viento en dirección sur-norte mayor a 0.5 m/s de modo que se pudiera reflejar algún dato de valor sin embargo es en los siguientes gráficos donde tiene una mayor relevancia.

A continuación, se muestra la tasa de enfriamiento del aire de ambos casos por cada día. Hay que señalar que las celdas no estuvieron expuestas a la radiación solar directa. En el gráfico 12 se muestra el comportamiento del día 1 donde además se registra la humedad relativa del interior de ambos dispositivos y las horas con viento en dirección sur-norte mayor a 0.5 m/s.

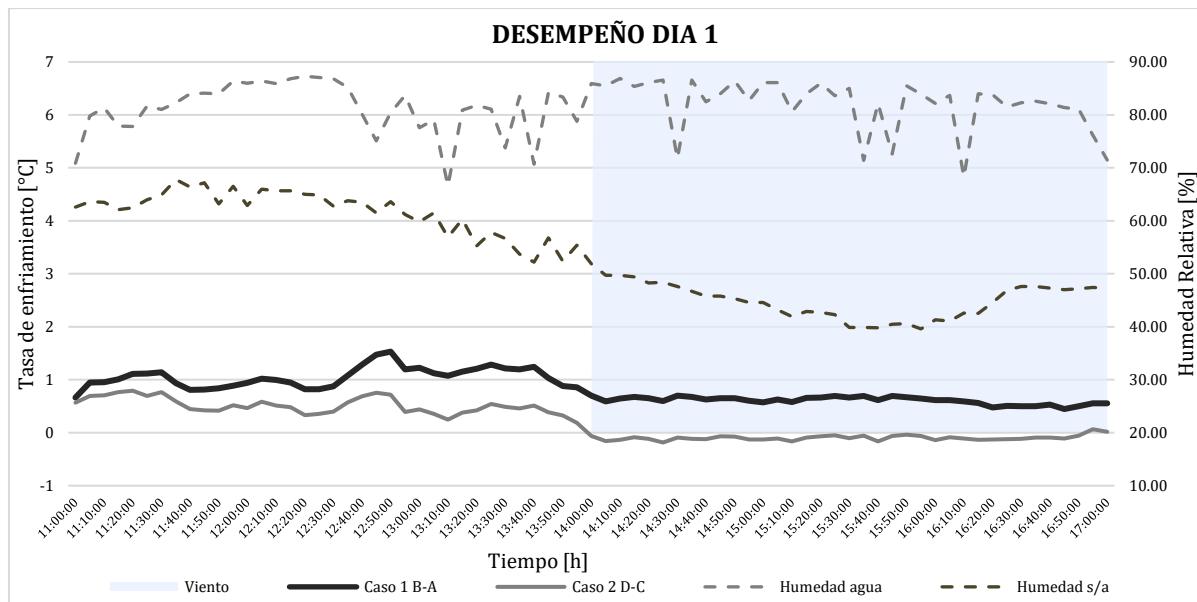


Figura 12. Desempeño del dispositivo día miércoles 04 de julio 2018 (día 1).

Se puede observar que el caso de la celda experimental siempre tuvo mayor tasa de enfriamiento, donde el promedio fue de 0.8 K contra el promedio de la celda de referencia el cual fue de 0.2 K. La tasa de enfriamiento máxima de la celda experimental fue de 1.5 K y la mínima fue de 0.4 K en comparación con la celda de referencia que tuvo 0.8 K y -0.2 K respectivamente. Es importante señalar, que al presentar valores negativos la tasa de enfriamiento implica que existió calentamiento en el fenómeno.

Además, se puede apreciar que la humedad relativa de la celda experimental siempre fue superior a la celda de referencia en un 30 % como mínimo. Esto refleja que se presentó el fenómeno de la evaporación del agua dentro de la celda y, por lo tanto, una mayor humedad relativa frente a la celda de referencia. No se registró un cambio significativo en la tasa de enfriamiento con la presencia de viento con las características anteriores.

En la figura 13 se muestra el comportamiento del día 2 donde además se

registra la humedad relativa tanto del exterior como del interior de ambos

dispositivos y las horas con viento en dirección sur-norte mayor a 0.5 m/s.

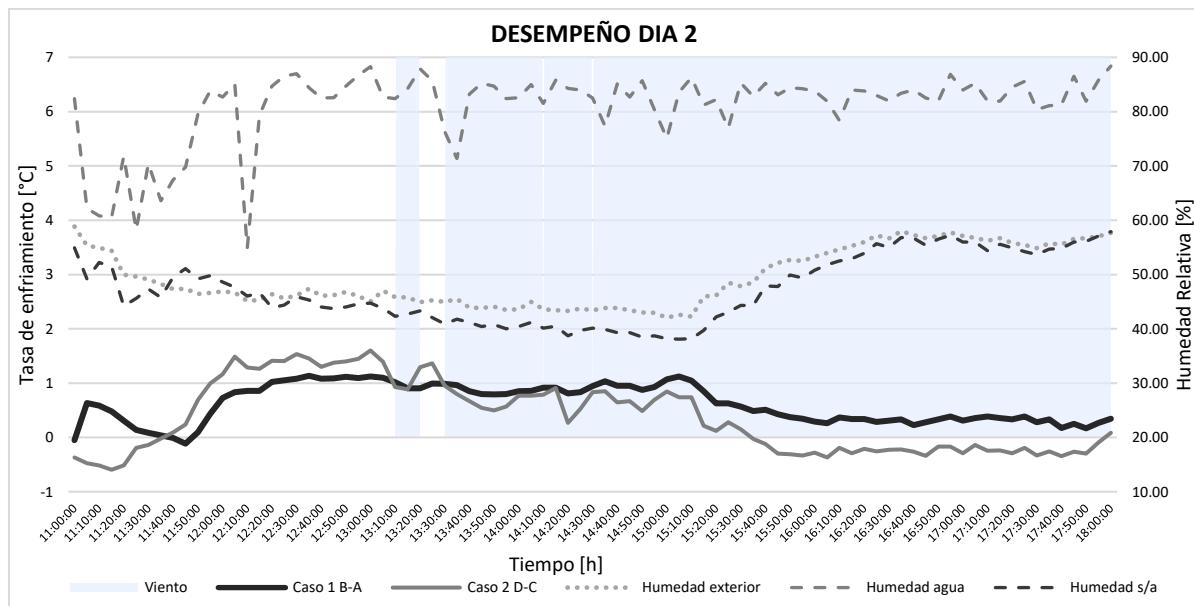


Figura 13. Desempeño del dispositivo día jueves 05 de julio 2018 (día 2).

En este caso hubo una variación donde por las primeras horas la celda de referencia presentar mejor tasa de enfriamiento, sin embargo, hay un punto donde ambas tasas coinciden manteniéndose la tasa de la celda experimental de manera continua y se observó un descenso de la celda de referencia. El promedio de la tasa de enfriamiento de la celda experimental fue de 0.6 K y la de la celda de referencia fue de 0.4 K. En cuanto a la máxima y mínima, la celda experimental tuvo 1.1 K y -0.1 K en comparación con la celda de referencia la cual presentó una máxima de 1.6 K y una mínima de -0.6 K.

Además, se apreció que la humedad relativa de la celda experimental siempre fue mayor a la celda de referencia y a la exterior en un 30 % a pesar de los picos que se presentaron. Se observó que desde las 12:30 horas civiles se presentó una variación mínima de 10 % y máxima de 15 % durante

el resto del periodo de experimentación de este día. La humedad relativa de la celda de referencia siempre se mantuvo muy similar a la exterior.

En cuanto a la presencia de viento, se pudo observar que mientras hubo viento favorable la tasa de enfriamiento de la celda experimental fue mayor a la celda de referencia. Pareciera que existe una relación entre la presencia del viento y la tasa de enfriamiento durante este día, lo cual no se registró en los demás días de experimentación. A pesar de las variaciones la celda experimental tuvo mejor comportamiento y una mayor humedad relativa frente a la celda de referencia.

En la figura 14 se muestra el comportamiento del día 3 donde se presentan las mismas características analizadas en las figuras 12 y 13.

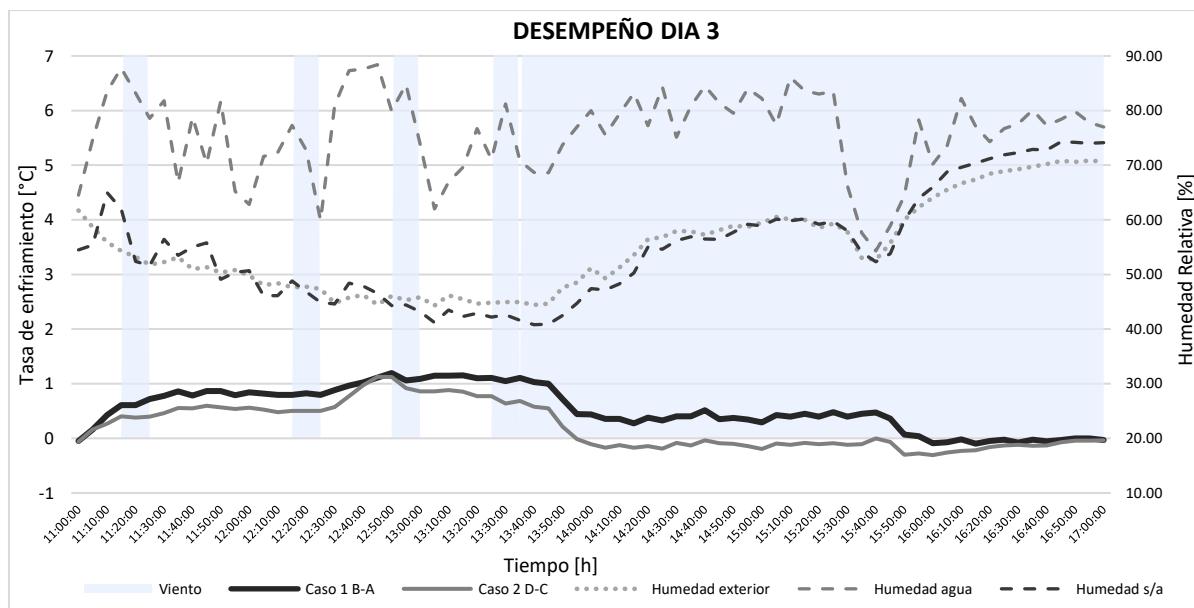


Figura 14. Desempeño viernes 06 de julio 2018 (día 3).

El promedio de la tasa de enfriamiento de la celda experimental fue de 0.5 K y la de la celda de referencia fue de 0.2 K. En cuanto a la máxima y mínima, la celda experimental tuvo 1.2 K y -0.1 K en comparación con la celda de referencia la cual presentó una máxima de 1.1 K y una mínima de -0.3 K.

Además, se puede apreciar que la humedad relativa de la celda experimental fue mayor a la de la celda de referencia y a la exterior en un 20 % a pesar de que se presenta un pico que se aproxima a la humedad de la celda de referencia y a la exterior. La humedad relativa de la celda de referencia siempre se mantuvo muy similar a la exterior.

En cuanto a la presencia de viento, se observó que cuando aparecen franjas en el gráfico hay variación en el porcentaje de humedad. A pesar de las variaciones la celda experimental tuvo mejor comportamiento y una mayor humedad relativa frente a la celda de referencia.

Es importante señalar un fenómeno que se presentó a partir de las 16:00 h. Aparentemente, el agua dentro de la celda experimental se evaporó por completo a partir de esa hora y, por lo tanto, se redujo considerablemente la tasa de enfriamiento y la humedad relativa.

En el gráfico 15 se muestra el comportamiento del día 4, el último, donde se presentan las mismas características analizadas en las figuras 12, 13 y 14.

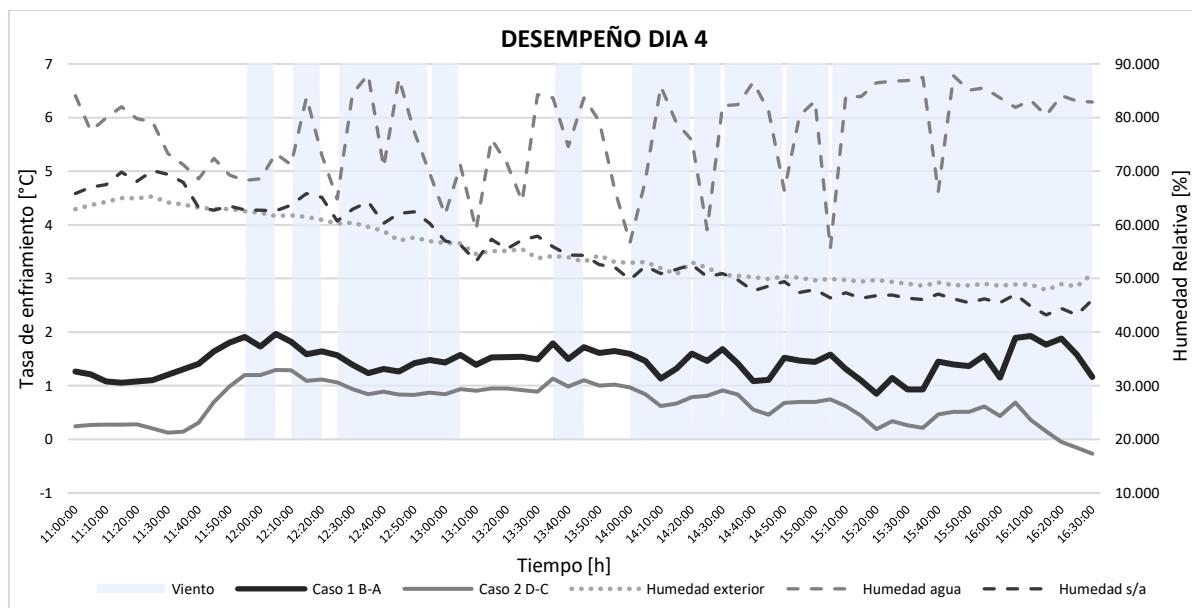


Figura 15. Desempeño lunes 09 de julio 2018 (día 4).

En este caso la tasa de enfriamiento de la celda experimental también fue mejor manteniéndose siempre por encima de la celda de referencia. Aquí es donde es más notoria la diferencia en la tasa de enfriamiento. El promedio de la tasa de enfriamiento de la celda experimental fue de 1.4 K y 0.5 K para la celda de referencia. En cuanto a la máxima y mínima, la celda experimental tuvo 2.0 K y -0.1 K en comparación con la celda de referencia la cual presentó una máxima de 1.3 K y una mínima de -0.1 K.

La humedad relativa de la celda experimental siempre fue mayor a la de la celda de referencia y a la exterior en un 20 % a pesar de que se presentan picos que se aproximan a la humedad de la celda de referencia y a la exterior. La humedad relativa de la celda de referencia siempre se mantuvo muy similar a la exterior.

En cuanto a la presencia de viento, se observó que cuando aparecen franjas en la figura hay variación en el porcentaje de humedad. A pesar de las variaciones la celda experimental tuvo mejor desempeño térmico y una mayor humedad relativa frente a la celda de referencia.

4. Discusión y conclusión

El presente documento tuvo como finalidad analizar el desempeño de un dispositivo de EEI a partir de la evaporación de un líquido al interior. Como se demostró en los resultados, es posible combinar las estrategias que menciona Givoni (2011) en un solo dispositivo.

Los resultados muestran en tres de los cuatro días una disminución del caso experimental superior a la referencia con una tasa de enfriamiento de hasta 1.6 K, 1.1 K y 2 K contra el 0.8 K, 1.0 K y 1.3 K respectivamente. El día 2 se presentó un fenómeno donde la referencia tuvo una mayor tasa de enfriamiento que el caso experimental, sin embargo, en ese mismo día el caso referencia presentó calentamiento al interior del dispositivo.

El desempeño del EEI presentó un comportamiento similar al demostrado por Rincón (2001) y Kumar (2009). La humedad relativa modifica considerablemente la tasa de enfriamiento y, a su vez, la evaporación al interior del dispositivo incrementa la humedad relativa hasta el punto de la saturación como lo demuestra Spanaki (2007, 2011 y 2012). Es importante señalar el papel que juega la humedad relativa

resultante dentro del dispositivo con agua. Se puede observar en las figuras 12 a 15 que después de la incorporación de agua en dispositivo, la humedad relativa al interior del mismo se eleva y se mantiene alrededor del 90 %, saturando relativamente el espacio y reduciendo la evaporación del agua y, por consiguiente, la capacidad de enfriamiento del mismo. Así mismo, la humedad relativa exterior afecta también el desempeño de los dos dispositivos. En las mismas figuras se puede observar que a mayor humedad relativa, menor tasa de enfriamiento se produce como indicó Spanaki (2011 y 2012).

La hipótesis de investigación se comprueba parcialmente. Si se toman en cuenta las tasas de enfriamiento promedio en todos los días el caso de experimentación fue superior al caso de referencia. Empero, si tomamos en cuenta la tasa de enfriamiento máximo, en un 75 % de los análisis el caso de experimentación fue superior al caso de referencia. No obstante que en uno de los días el desempeño máximo no fue el esperado, en general el dispositivo funciona de manera positiva en relación con el caso de referencia.

Lo anterior, permitirá disminuir el consumo de energía del edificio para su climatización como bien lo mencionan Bellia, Marino, Minichiello y Pedace (2014). Además, se vuelve a demostrar que el EE sigue siendo una de las estrategias pasivas para reducir la temperatura del aire como lo comentan El-Refaie y Kaseb (2009).

Estos dispositivos aquí presentados se suman al esfuerzo de autores como González y Rincón (2001), Kumar (2009) y Spanaki (2012; 2007; 2011) para demostrar la eficiencia del EEI en climas húmedos.

Se analizaron todos los datos obtenidos en la experimentación y con ello se concluyó:

- En el mejor de los casos, el dispositivo dentro de la celda experimental obtuvo una tasa de

enfriamiento promedio de 0.8 K en comparación al dispositivo dentro de la celda de referencia.

- El dispositivo de la celda experimental, que utilizó agua, siempre mantuvo su temperatura promedio menor que el dispositivo dentro de la celda de referencia y a la exterior entre 0.3 K y 0.6 K.

La idea principal del experimento es combinar las estrategias de EEI y la protección solar, sin embargo, en este caso solo se analizó el EEI, sin la función de protección solar, por lo que no se contemplaron los efectos de la radiación solar directa.

La estrategia de EEI ayuda en la reducción del calor del dispositivo. Esto permite el uso de protecciones solares para bloquear la radiación solar y pre-enfriar al aire que se introduce en el espacio habitable. El comportamiento térmico del dispositivo para el EEI incrementa si se introduce un flujo de aire considerable que ayude a reducir la humedad relativa dentro de él.

En futuras investigaciones se recomienda:

- Diseñar un dispositivo en donde se analice la estrategia de EEI en presencia de la radiación solar.
- Simplificar el diseño del dispositivo para ser fácilmente replicado.
- Promover un efecto chimenea que force el movimiento del aire dentro del dispositivo.
- Analizar la relación agua-aire en función del dispositivo.
- Contemplar la incorporación automática del agua.
- Diseñar la extracción constante de aire con alta humedad relativa.
- Implementar un diseño que evite la propagación de hongos y larvas.

5. Agradecimientos

El segundo autor agradece a la Universidad de Colima, a la Universidad Autónoma de

Ciudad Juárez y al Programa Delfín por su apoyo para la realización de esta investigación.

6. Referencias

Givoni, Baruch (2011) “Indoor temperature reduction by passive cooling systems” *Solar Energy*, 85(8), 1692–1726.

Bellia, Laura; Marino, Concetta; Minichiello, Francesco; & Pedace, Alessia (2014). “An overview on solar shading systems for buildings” *Energy Procedia*, 62, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392>.

El-Refaie, Mohamed Fawsi; & Kaseb, Sayeb (2009) “Speculation in the feasibility of evaporative cooling” *Building and Environment*, 44(4), 826–838. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.020>.

Fernández-González, Alfredo (2007). “Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States Midwest” *Solar Energy*, 81(5), 581–593. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2006.09.010>.

Porumb, Bobdan; Ungureşan, Paula; Tutunaru, Lucian Fechete; Şerban, Alexandru; & BĂlan, Mugur (2016) “A Review of Indirect Evaporative Cooling Operating Conditions and Performances” *Energy Procedia*, 85 (November 2015), 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.226>.

Spanaki, Artemisa (2007). Comparative studies on different type of roof ponds for cooling purposes: literature review. In *In 2dn PALENc Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced*

Ventilation Technologies in the 21 st Century (pp. 1009–1015). Crete Island, Greece.

Finocchiaro, Pietro; Beccali, Marco; & Nocke, Bettina (2012) “Advanced solar assisted desiccant and evaporative cooling system equipped with wet heat exchangers”. *Solar Energy*, 86(1), 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.003>.

Esparza López, C. J. (2015). Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo, 190. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3925.4806>.

Esparza-López, Carlos Javier; Escobar del Pozo, Carlos; Gómez-Amador, Amador; Gómez-Azpeitia, Gabriel; & González-Cruz, Eduardo (2018) “Potential of a wet fabric device as a roof evaporative cooling solution: Mathematical and experimental análisis”. *Journal of Building Engineering*, 19(January), 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.021>.

Cárdenas, R. (2017). *Análisis experimental de membranas naturales para un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto en una región con clima cálido sub-húmedo. Manuscrito inédito*. Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Coquimatlán, Colima, México.

Zhao, Xudong; Liu, Shuli; & Riffat, Saffa (2008) “Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems”. *Building and Environment*, 43(11), 1902–1911. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.009>.

Pires, Luis; Silva, Pedro; & Castro Gomes, Joao (2011) “Performance of textile and building materials for a particular

- evaporative cooling purpose”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(4), 670–675. <https://doi.org/10.1016/j.expthermfluxci.2010.12.017>.
- García, E., 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* 5ta ed. UNAM, ed., México D.F.
- Esparza L., Carlos J.; Gomez A., Adolfo; Escobar, Carlos; Elizondo Miguel; Gómez, G. (2016). Experimental analysis of a humid fiber as an indirect evaporative cooling device against roofpond and gunny bags in a hot sub-humid climate. *PLEA 2016: Nd 32 International Conference on Passive and Low Energy Architecture*.
- Rincón, José; Almao, Nastia; & González, Eduardo (2001). “Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions”. *Solar Energy*, 71(1), pp.71–80. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00010-X).
- Kumar, Kamlesh Senthil; Tiwari, Kamlesh Narayan; & Jha, Madan Kumar, (2009). “Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review”. *Energy and Buildings*, 41(12), pp.1269–1275. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.003>.
- Spanaki, Artemisa; Tsoutsos, Theocharis; & Kolokotsa, Dionysia, (2011). “On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), pp.3523–3533. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.007>.
- Spanaki, Artemisa; Kolokotsa, Dionysia; Tsoutsos, Theocharis; & Zacharopoulos, Ilias, (2012). “Theoretical and experimental analysis of a novel low emissivity water pond in summer”. *Solar Energy*, 86, pp.3331–3344. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.017>.