

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte

Evaporative cooling systems for vertical elements: a review

Roberto Ernesto Cárdenas-Rodríguez, Luis Aarón García-Solórzano, Carlos Javier Esparza-López,* José Ricardo Moreno-Peña y José Fidel Navarro-Arellano

Para citar este artículo: Cárdenas-Rodríguez Roberto Ernesto, García-Solórzano Luis Aarón, Esparza-López Carlos Javier, Moreno-Peña José Ricardo y Navarro-Arellano José Fidel, 2023. Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte. Ciencia Nicolaita no. 87, 121-133. DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663

Historial del artículo:
Recibido: 25 de mayo de 2022
Aceptado: 3 de noviembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023

Ver material suplementario

Correspondencia de autor: cesparza@ucol.mx

Términos y condiciones de uso: https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy

Envíe su manuscrito a esta revista: https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions

 DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663

Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte

Evaporative cooling systems for vertical elements: a review

Roberto Ernesto Cárdenas-Rodríguez,[1] Luis Aarón García-Solórzano,[1] Carlos Javier Esparza-López,[2]* José Ricardo Moreno-Peña[1] y José Fidel Navarro-Arellano[1]

[1]Instituto Tecnológico de Colima, Av. Tecnológico 1, Villa de Álvarez, Colima.
[2]Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima; carretera Colima-Coquimatlán s/n, cp 28400, Coquimatlán, Colima, México

Resumen

Los sistemas de enfriamiento evaporativo son una alternativa en el ámbito de la construcción y la vivienda para reducir la temperatura en regiones con clima cálido mediante el cambio de fase del agua, el cual busca disminuir la alta demanda de energía para enfriar los espacios habitables. El siguiente documento realiza una búsqueda de diversos sistemas de enfriamiento evaporativo colocados en elementos verticales. Se presentan los resultados de búsqueda de información con base en la metodología PRISMA a través de sitios científicos como ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar y Scielo, con las palabras clave: enfriamiento evaporativo, enfriamiento evaporativo directo, enfriamiento evaporativo indirecto y enfriamiento pasivo.

***Palabras clave*:** enfriamiento evaporativo, estado del arte, clima cálido, sistema vertical

Abstract

Evaporative cooling systems are an alternative in construction and housing to reduce the temperature in regions with hot climates through the phase change of water, which seeks to reduce the high demand for energy to cool living spaces. The following document searches for various evaporative cooling systems placed on vertical elements. The information search results are presented based on the PRISMA methodology through scientific sites such as ScienceDirect, ResearchGate, GoogleScholar, and Scielo, with the keywords: thermal comfort, evaporative cooling, direct evaporative cooling, indirect evaporative cooling, and passive cooling.

***Keywords*:** evaporative cooling, state of the art, warm climate, vertical system

Autor de correspondencia: cesparza@ucol.mx; https://orcid.org/0000-0003-0058-5072
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Introducción

En las últimas tres décadas del siglo XX, el planeta Tierra ha experimentado un deterioro ambiental en el cual las condiciones climáticas se han modificado, teniendo cada año niveles más altos en la temperatura global, lo que ha provocado que el clima, los ecosistemas y la población en general, sufran las consecuencias negativas (Amestoy, 2010). Algunos efectos ya se pueden observar, por ejemplo, el deshielo de los polos o las largas sequías; de acuerdo con el tercer y cuarto Informe de Evaluación Climática Nacional, se prevén más efectos en el futuro provocados por el aumento de la temperatura global, tales como: temperaturas en aumento, cambios en los patrones de precipitación, más sequías y olas de calor, huracanes más fuertes e intensos, aumento del nivel del mar, entre otros (Melillo *et al*., 2014; Reidmiller, 2018).

El calentamiento global ocurre por el exceso de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, esta retiene gran parte del calor que entra a la Tierra, encapsulándolo sin permitir su completa salida, lo que genera estos cambios en el clima, especialmente contener calor (National Geographic, 2022)

La necesidad de combatir el calentamiento global, pone en marcha la búsqueda y mejora de estrategias con el fin minimizar el costo energético, de fabricación y de emisión de dióxido de carbono (CO_2) para que a largo plazo el calentamiento disminuya mientras que los periodos climáticos del planeta se estabilizan y esto se traduzca en un beneficio para el medio ambiente y los seres vivos en general.

En el caso de la arquitectura y el ámbito de la construcción, la solución surge en encontrar la sostenibilidad en las edificaciones, principalmente, al intentar conseguir el confort térmico en el interior de los espacios, con el menor impacto ambiental y que resulte económicamente barato y accesible para los habitantes, ya que entre el 30 y el 40% del consumo global de energía, se debe a los edificios donde un 50% de ese gasto se requiere para generar calor, ventilación y por el uso de aire acondicionado (Duan *et al*., 2012; Amer *et al*., 2015; Saffari *et al*., 2017). Una de las estrategias empleadas para alcanzar la sostenibilidad en ambientes cálidos es el Enfriamiento Evaporativo (EE).

El EE se ha convertido en una alternativa que resulta eficiente para impulsar la pérdida de calor en los espacios interiores de una edificación. En ciertos casos se procura que la energía para su funcionamiento provenga de fuentes renovables, en caso de no serlo, intenta tener un aprovechamiento de los sistemas de enfriamiento al interior para funcionar con el menor consumo de electricidad, con el objetivo de reducir el costo económico y ambiental debido a la huella de carbono que generan estos sistemas (Santamouris, 2005). En adición, el costo de adquisición y mantenimiento de estos sistemas, resulta más económico que los de refrigeración convencional como el aire acondicionado (Wen *et al*., 2014; Yang *et al*., 2019; Xuan *et al*., 2012).

Existen alternativas para lograr este enfriamiento, adecuándose cada una de ellas a las condiciones del clima en donde se aplica para tener un mejor rendimiento y desarrollo con la correcta ejecución y funcionamiento. Unas se enfocan en la transformación de la energía para reducir la ganancia de calor, otras en generar el flujo de la energía para disipar el calor, otras en evitar la ganancia de calor antes de que ingrese a los espacios, etc. (Bhamare, 2019).

En este contexto, el objetivo de esta investigación es analizar sistemas de enfriamiento evaporativo que se pueden colocar en elementos verticales de una edificación, para lo cual se explican sus características, funcionalidad y diseños, sin abundar en el amplio desglose de modelos existentes dentro del funcionamiento de un mismo sistema y definir únicamente la idea principal de cada uno de ellos. El propósito es obtener información que permita formular una visión simplificada y objetiva de estos sistemas.

Metodología

La búsqueda de información se realizó con base en el sistema PRISMA (Liberati *et al*., 2009), a través de bases de datos para publicación de artículos científicos como ScienceDirect, ResearchGate, GoogleScholar y Scielo, con interés en las palabras clave: enfriamiento evaporativo, enfriamiento evaporativo directo, enfriamiento evaporativo indirecto y enfriamiento pasivo. Estos buscadores académicos fueron seleccionados porque contienen fuentes con un alto

valor de credibilidad por parte de la comunidad científica a nivel mundial, con dominio en temas similares al que se analiza en esta investigación. Se encontraron 75 artículos referentes al tema, los cuales fueron valorados críticamente según su importancia, considerando su aporte en la reducción de temperatura, la relación que tiene con la función de EE con su uso en elementos verticales, los datos que presenta para cada modelo, incluyendo uso, características y función. Se analizó el trabajo operativo de los modelos de sistemas, sin abundar el análisis en las variaciones de cada modelo existente para no repetir información de configuraciones de un sistema donde se presenten cambios surgidos por nuevas propuestas o hipótesis.

Discusión

Sistemas de enfriamiento evaporativo (EE)

La evaporación es uno de los métodos a utilizar para lograr el enfriamiento natural dentro de un edificio (Rafique *et al*., 2015). Funciona intercambiando la masa térmica que se encuentra en el aire al incorporar humedad al espacio (por consecuencia disminuye la temperatura), para que posteriormente inicie el proceso de evaporación del líquido (debido a las altas temperatura del ambiente) para que finalmente se retire por medio de la ventilación (Amer *et al*., 2015; Yang *et al*., 2019; Rafique *et al*., 2015; Zhao *et al*., 2007). Todos los procesos de enfriamiento evaporativo incluyen un volumen de agua y un volumen de aire, sirviendo como el medio de enfriamiento o el medio complementario para hacerlo (Yang *et al*., 2019). Los sistemas se dividen en dos categorías, llamándose directo e indirecto, dependiendo la interacción que tienen con el agua y la relación con ella para trabajar (Amer *et al*., 2015; Sotelo-Salas *et al*., 2021). Con esas dos formas de trabajo se desglosan otras tres variaciones para cada sistema (Amer *et al*., 2015):

1. Enfriamiento evaporativo directo (EED). En estos sistemas el flujo de aire que ingresa desde el exterior realiza un contacto directo con un cuerpo húmedo localizado en el interior del modelo, refresca las partículas del aire que entra y por ese medio comienza el proceso de enfriamiento cambiando el calor sensible por calor latente (Amer *et al*., 2015; Zhao *et al*., 2007). Este aire que ingresa al interior del espacio entra cargado de humedad, por lo que alcanza a llegar hasta 80% de humedad relativa (Lechner, 2018). Los sistemas directos son más utilizados en zonas con condiciones de clima cálido seco; su efectividad es de aproximadamente 85% (Rafique *et al*., 2015).

2. Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI). En este sistema se evita que el flujo de aire que ingresa al espacio interior tenga contacto directo con el medio húmedo que ayuda a realizar el cambio de temperatura, consiguiéndolo con un intercambiador de calor, esto para sustituir el calor sensible sin modificar la humedad del ambiente (Amer *et al*., 2015; Rafique *et al*., 2015; Zhao *et al*., 2007; Sotelo-Salas *et al*., 2021). El intercambiador tiene contacto con dos corrientes de aire, la que entra al interior (la no humectada) y con la corriente de aire de trabajo (la humectada) sin cruzarlas, se evita el contacto de estos dos flujos para que no aumenten los niveles de humedad al interior (Liberari *et al*., 2017). Los sistemas indirectos son mayormente utilizados en zonas con condiciones de clima cálido y húmedo; su efectividad es aproximadamente de 60-70% (Rafique *et al*., 2015; Esparza-López *et al*., 2018; Esparza-López *et al*., 2022).

3. Sistema combinado de enfriamiento directo e indirecto (EEDI). Se trata de un sistema que utiliza flujos de aire directo e indirecto para conseguir el enfriamiento, logrando potenciar las características de ambos sistemas, reduciendo el calor sensible del espacio, pero reduciendo la humedad relativa, con mayor eficiencia y con un control de humedad (Amer *et al*., 2015; Rafique *et al*., 2012). Estos sistemas utilizan un doble flujo de aire dependiendo la cantidad de humedad que se desea en el espacio interior, el primer flujo entra como EEI al interior del modelo, ahí se humecta en caso de ser necesario con un sistema de EED en la cantidad requerida. Estos sistemas tienen una eficiencia aproximada de 70% (Duan *et al*., 2012; Esparza-López *et al*., 2022).

Estos sistemas pueden dividirse en otras categorías, dependiendo si son impulsados o no por medios que consuman energía eléctrica (Firfiria *et al*., 2019), nombrándolos en:

1. Activos. Impulsan el rendimiento para el enfriamiento al tener un sistema que consuma energía (generalmente eléctrica) que acelera la velocidad del viento que ingresa o la velocidad de evaporación del cuerpo de agua en el sistema.

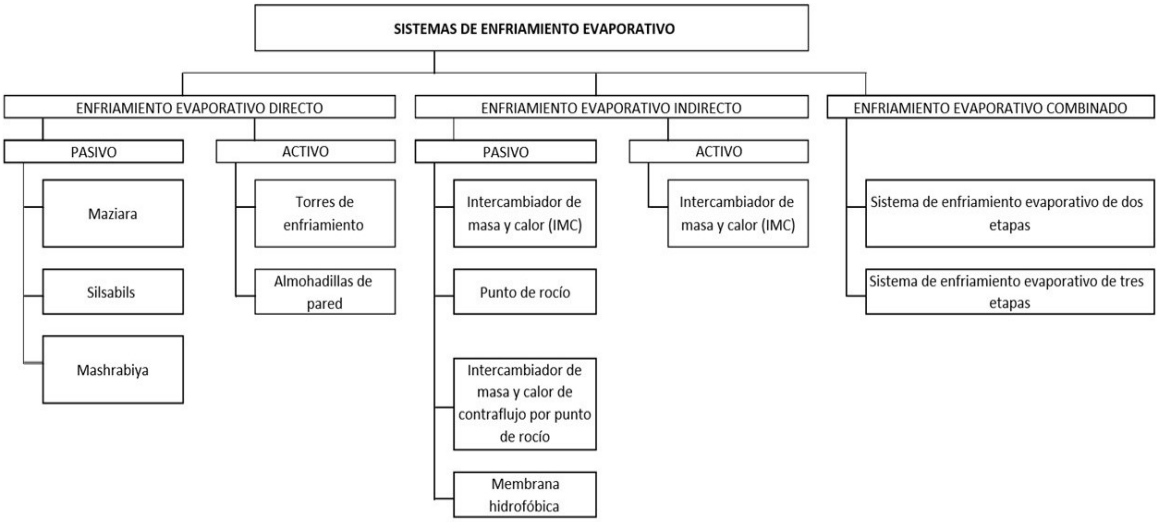


Figura 1. Concentrado de sistemas evaporativos para elementos verticales.

2. Pasivos. Buscan alcanzar el mayor rendimiento posible para eliminar el calor sin utilizar sistemas eléctricos con el aprovechamiento del entorno natural en conjunto de las geometrías que presenta la edificación.

A partir de cada uno de los sistemas se encuentran diferentes alternativas para intentar alcanzar el confort térmico en los interiores de los espacios, dependiendo de las condiciones climáticas donde se apliquen, ya que esas condiciones delimitan la funcionalidad que debe considerarse para cada sistema.

En la Figura 1 se muestra el concentrado de los tipos de sistemas de enfriamiento evaporativo y los distintos modelos encontrados para cada uno. Los modelos guardan la característica común de ser capaces de aplicarse en elementos verticales de una edificación.

1. Sistemas de enfriamiento evaporativo directo (EED) pasivo

1.1. Maziara

En Egipto, se llamó de esta forma a los elementos empleados en un sistema de enfriamiento evaporativo tradicional de la sociedad Islámica utilizado desde el año 2500 a. C. Funciona colocando jarras (a las que llamaron “maziara”) llenas de agua en los vanos o nichos de los muros; las jarras tienen la capa de barro

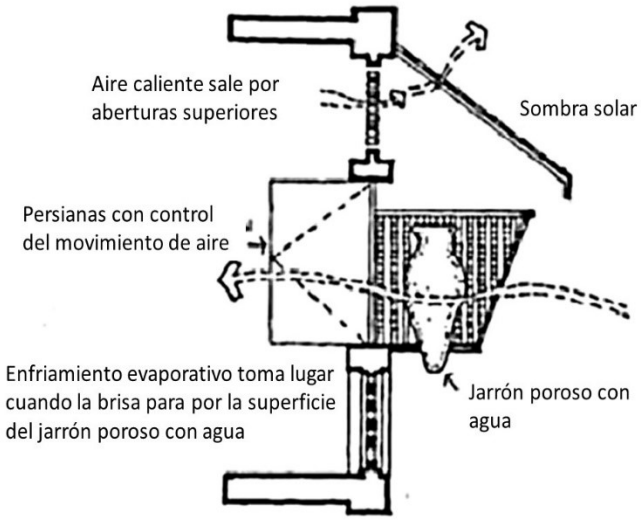


Figura 2. Funcionamiento de maziara (Fardeheb *et al*., 2009).

 DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663

con textura porosa, lo que permite que puedan transpirar y conectar la humedad hacia el exterior de esta, haciendo que por la evaporación del agua refresque el aire que entra al interior de la edificación cuando realiza el contacto (Figura 2) (Rafique *et al*., 2015; Fardeheb *et al*., 2009). En este sistema se absorben 580 calorías de energía por cada centímetro cúbico de agua evaporada.

1.2. Silsabils

Es un sistema utilizado en los inicios de la sociedad Islámica que se enfoca en correr agua a través de losas haciendo un efecto "cascada", dirigiendo el agua hacia canales que recorren la vivienda en los espacios comunes humectando el aire durante el recorrido de esta, consiguiendo así reducir la sensación térmica dentro de la vivienda (Bagasi *et al*., 2020).

1.3. Mashrabiya

Es un elemento de la arquitectura Islámica particular del Cairo, Egipto, y de la ciudad de Yeda, el cual consta de un marco segmentado hecho de madera que se coloca en las ventanas de las edificaciones, su función es proteger la ventana de la entrada de calor proveniente de los rayos del sol mientras permite el paso del viento (Bagasi *et al*., 2020); además, procura cuidar la intimidad del interior de la habitación (Figura 3). Por sí mismo, no funciona como un sistema de EED, pero en muchos de los casos se combina este elemento con mantas de tela que están humectados o con jarrones del tipo maziara para elevar el rendimiento de este sistema al generar brisas frescas y reducir la temperatura (Amer *et al*., 2015; Fardeheb, 2009).

En la actualidad, el uso de las mashrabiyas se ha cambiado para dar paso al empleo de dobles fachadas, permitiendo conservar la tradición de su arquitectura mientras que aplica su funcionamiento para reducir los gastos en sistemas de enfriamiento en las edificaciones (Schielke, 2014).

2. Sistema de enfriamiento evaporativo directo (EED) activo

2.1. Torres de enfriamiento

El proceso de este sistema es similar al de la típica torre de viento (Figura 4). Este se inicia al atomizar agua caliente desde la cima de la torre para producir un flujo de finas gotas de agua en la cara de un elemento sólido, las cuales combinadas con la corriente del viento, apoyan a la evaporación del líquido (Yang *et al*., 2019); en la parte interior de la torre, el aire estaría combinándose con las gotas de agua, impulsándolo hacia el interior del edificio para realizar la función del enfriamiento. En la parte superior de la torre se encuentra un ventilador que retira el aire caliente de la torre y facilita la salida del flujo de vapor que se produce en la torre (Yu *et al*., 2021; Glaciar ingenierías, 2022).

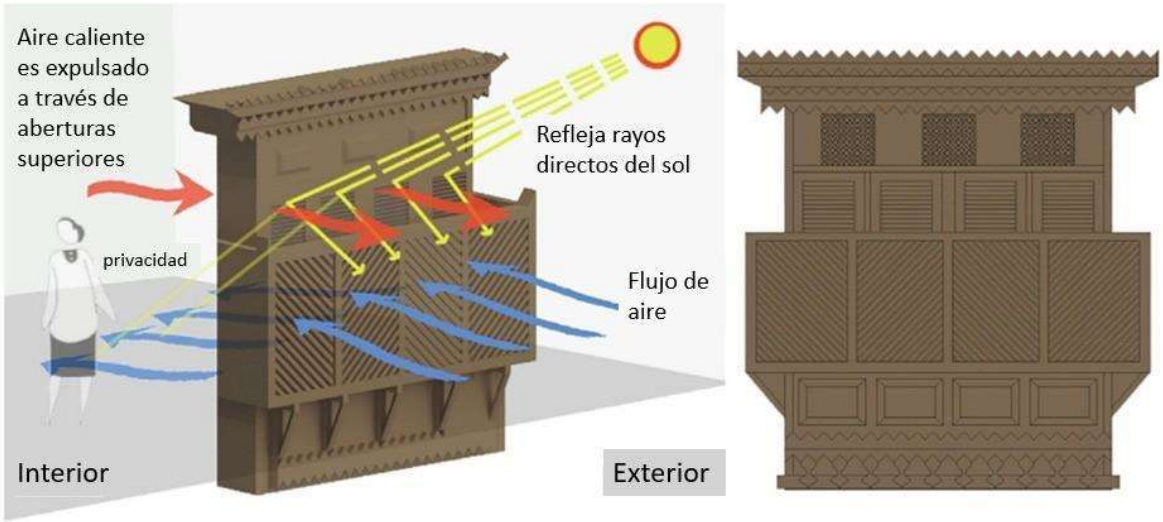


Figura 3. Esquema de función de mashrabiya (Bagasi *et al*., 2020).

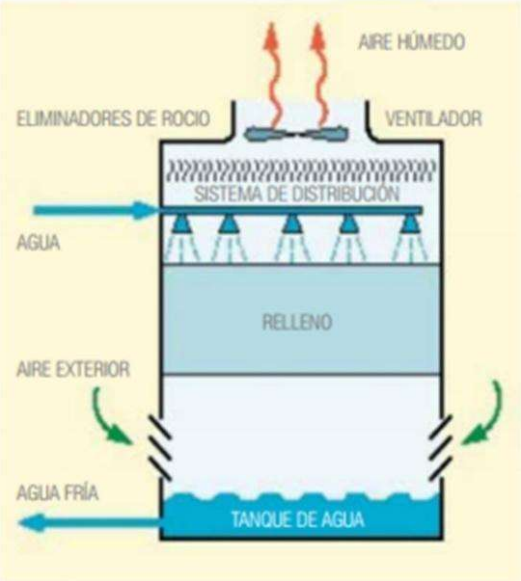


Figura 4. Funcionamiento de una torre de enfriamiento (Glacial ingenierías, 2022).

Como resultado, el agua que consigue mantenerse dentro de la torre se enfría e introduce al espacio donde es requerido, entrando aire sin calor y con una carga de humedad (Yang *et al*., 2019). Con este sistema, el agua realiza el trabajo de enfriamiento y el viento es el medio complementario. La velocidad de evaporación en estos sistemas obedece al tipo de rociado que se aplique; dependiendo de las condiciones de velocidad, orientación y presión, se puede obtener un distinto proceso de evaporación (Somasundar *et al*., 2020).

2.2. Almohadillas de pared

Este sistema es el más utilizado en la actualidad como sistema de enfriamiento evaporativo directo, siendo el de mejor desempeño y simple en su tipo (Xuan *et al*., 2012). Tiene distintas variaciones en su rendimiento dependiendo del material con el que se elabore la almohadilla; el desempeño de evaporación depende de las características de cada fibra y del flujo de viento (Xu *et al*., 2016). Se trata de cubos de metal o cajas de plástico que tienen dentro paredes hechas de fibras porosas que crean canales por donde fluyen las corrientes de aire. Las fibras se humidifican constantemente para generar el enfriamiento del aire, el cual se introduce a los espacios apoyado por ventiladores que están dentro del sistema; a ese aire que entra se le denomina 'aire lavado' (Figura 5) (Xuan *et al*., 2012). Algunos sistemas colocan ventiladores con más

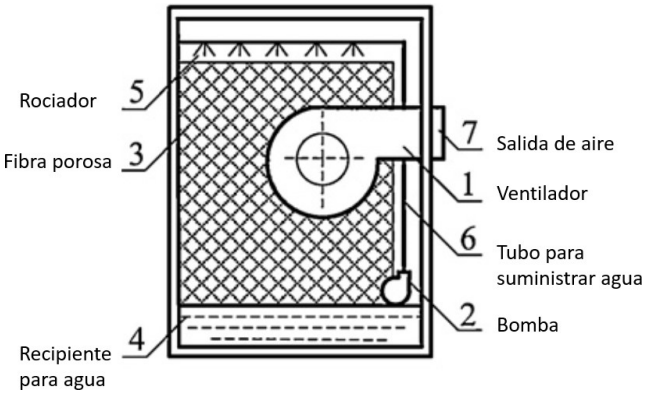


Figura 5. Diagrama de funcionamiento de almohadilla de pared (Xuan *et al*., 2015).

de una velocidad para controlar la cantidad de aire que ingresa al espacio.

A través de rociadores el agua se lleva a la fibra para humectarla por completo, su capacidad de absorción de humedad depende del movimiento que el tejido permita por la fuerza de su capilaridad (Xu *et al*., 2016); la fibra se puede colocar de manera vertical u horizontal y de esa forma también se distribuirá el agua en la fibra. Los materiales con que se fabrican las fibras pueden ser de metal poroso, celulosa, organismos de polímeros o cerámica porosa, estos materiales necesitan tener excelente absorción de agua y propiedades térmicas adecuadas, además de ser resistentes a la corrosión, al fuego y de propiedades antiincrustantes (Yang *et al*., 2019). En caso de tener un exceso de líquido, este se recupera en la parte baja del sistema para regresar a los canales de distribución de los rociadores (Xuan *et al*., 2012).

La eficiencia para el enfriamiento de la mayoría de los modelos comerciales en el mercado de este sistema, registra entre 70 y 95% (Xuan *et al*., 2012), siendo que la variable que cambia ese resultado puede ser tanto el diseño del equipo, las condiciones del equipo, la porosidad de la fibra, las condiciones del clima, entre otros.

3. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) pasivo

3.1. Intercambiador de masa y calor (IMC)

Se trata de un sistema con el que el cambio de temperatura ocurre al separar dos o más canales de flujo

 DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663

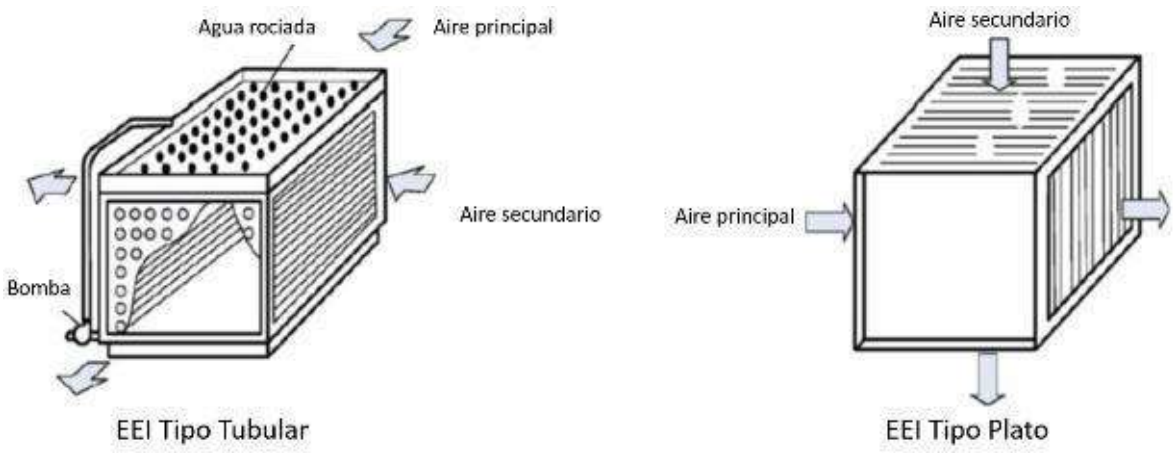


Figura 6. Configuraciones para IMC tipo tubular y tipo placa (Yang *et al*., 2019).

de viento para evitar la humidificación del aire que entra, haciendo que la superficie que separa ambos flujos de aire sea el medio por el cual se logre la transferencia de calor de forma convectiva, reduciendo la temperatura del aire que ingresa ya renovado. En uno de los lados de esta superficie se agrega una hoja o almohadilla la cual está humectada, en ella se realiza el trabajo de humidificación del 'aire de trabajo', el cual por convección, reducirá la temperatura al lado contrario de la superficie que separa los canales de entrada de aire (Xhao *et al*., 2007). Tradicionalmente se utilizan dos tipos de configuraciones para los sistemas intercambiadores de calor: tipo 'placa' y tipo 'tubular' (Figura 6).

El tipo placa es el más común. Trabaja con una placa que divide los flujos de aire seco y humidificado para evitar que el aire que entra tenga contacto con el agua; su rango de efectividad es entre 50 y 80% (Amer *et al*., 2015). El tipo tubular consiste en una serie de tubos colocados en forma de rejilla y rociados con agua por la parte externa; el aire que ingresa al interior del edificio pasa por dentro de los tubos, mientras que el aire humectado tiene contacto con la cara exterior del tubo (Amer *et al*., 2015; Yang *et al*., 2019).

3.2. Punto de rocío

Fue desarrollado por el Dr. Valeriy Maisotsenko en Rusia, como una propuesta para mejorar los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto. Este diseño hace que por medio de agua, el aire que entra a la edificación alcance a reducir su temperatura de bulbo húmedo a un punto muy cercano al de la temperatura de punto de rocío, de allí su nombre (Xuan *et al*., 2012). Para una configuración ideal de un IMC (Figura 7), la entrada de 'aire cambiante' (1) y de 'aire renovado' (2) sería la misma, teniendo su paso por el lado seco de la placa; en este modelo existe una segunda entrada de aire dedicada a la entrada de 'aire de trabajo'.

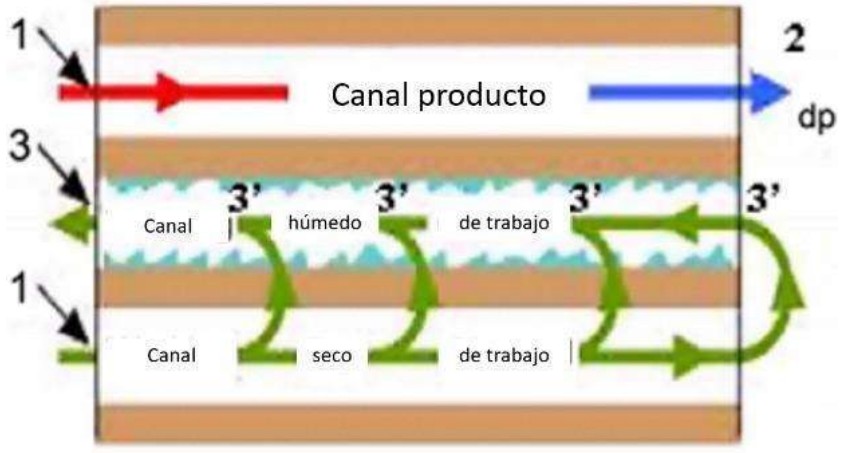


Figura 7. Diagrama de funcionamiento de un IMC (Zhao *et al*., 2007).

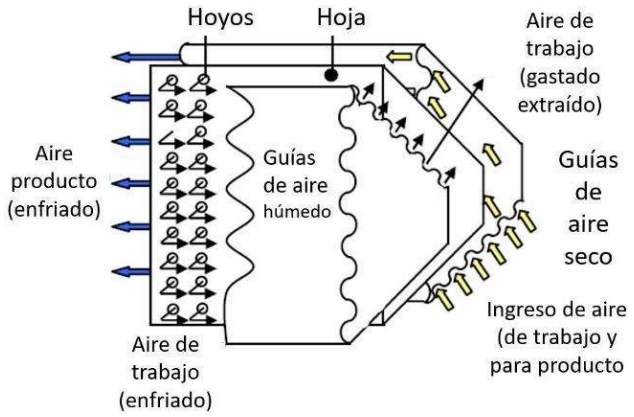


Figura 8. IMC de forma poligonal (Zhao *et al*., 2007).

La superficie de esa placa tiene distribuidos una serie de hoyos por los cuales ocurre el intercambio para lograr el enfriamiento con el lado húmedo, esperando que el aire que entra ingrese al canal húmedo para generar un flujo de aire que a su vez enfríe por medio de la evaporación, expulsando el aire caliente al exterior (Xuan *et al*., 2012; Zhao *et al*., 2007), esta configuración ha sido nombrada por algunos autores como el sistema M-cycle, combinando el intercambiador de calor y un enfriamiento evaporativo indirecto (Cuce, P. M. & Riffat, S., 2016).

3.2.1. Intercambiador de masa y calor de contraflujo por punto de rocío

Los investigadores Zhao, Li y Riffat (2007), diseñaron un nuevo IMC de contraflujo para enfriamiento por punto de rocío para un clima de verano en el Reino Unido. El principio con el que se hizo fue el mismo en cuanto colocar canales fabricados con almohadillas colocadas una tras otra, cambiando la configuración de la forma del IMC de una forma cuadrada a una poligonal para obtener un distinto flujo de aire (Figura 8).

Por un lado, cada almohadilla está cubierta con material a prueba de agua para evitar su penetración. El aire entra por la parte baja hacia los canales donde se divide en dos partes, la primera continúa su flujo entrando al interior del espacio para enfriar, mientras que la segunda parte se dirige hacia el lado que toca el extremo húmedo de la almohadilla para realizar el intercambio de temperaturas por medio de la evaporación, este aire fluye en reversa (de la corriente que ingresa) y se envía a la parte superior para ser extraído. En este diseño, el canal seco maneja el 'aire cambiante' y el 'aire renovado', mientras que el canal húmedo solo el 'aire cambian'.

Los resultados mostraron que la eficiencia de este modelo depende de la captación de aire que entra, mientras más aire entre por el IMC, menor gasto energético requiere el espacio a enfriar; además, mientras más velocidad presente el aire que ingresa, menor es la capacidad de enfriamiento.

3.3. Membrana hidrofóbica

Es un diseño conformado por una membrana multicapa para el enfriamiento evaporativo, siendo el medio de enfriamiento el agua (que realiza la acción de enfriamiento) y el medio complementario el aire (que apoya el ingreso de las partículas refrescadas con función para enfriar).

Fue desarrollado por Rothmaier (2008) con una lámina de triple capa. Consta de dos membranas hidrofóbicas con características a prueba de agua, pero que permiten el paso del vapor a través de ellas y una fibra hidrofóbica que se encuentra en medio de las otras dos. El agua está en contacto directo con una de estas membranas y es ahí en donde se realiza la evaporación, dejando transitar vapores con ayuda de la ventilación natural hacia la atmósfera e introduciéndolos a los espacios interiores de la edificación una vez que estos se hayan enfriado (Figura 9). Las membranas que se usan en este diseño son densas membranas de poliéster, co-polímeros y éter hidrófobos.

4. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) activo

4.1 Intercambiador de masa y calor (IMC)

El sistema trabaja de la misma manera que un sistema pasivo, en donde el enfriamiento se logra a través de dos corrientes de aire que interactúan en una misma configuración: la primera corriente ingresa al interior de los espacios sin contener humedad, mientras la otra está en contacto directo con el cuerpo líquido o humectado para realizar el enfriamiento del aire que ingresa. En este caso, la variable para volverse un sistema activo es a través del tipo de configuración para lograr el enfriamiento, siendo dicha configuración una del tipo llamado 'tubo de calor'. Esta se puede lograr por termo-fusión, criogenización,

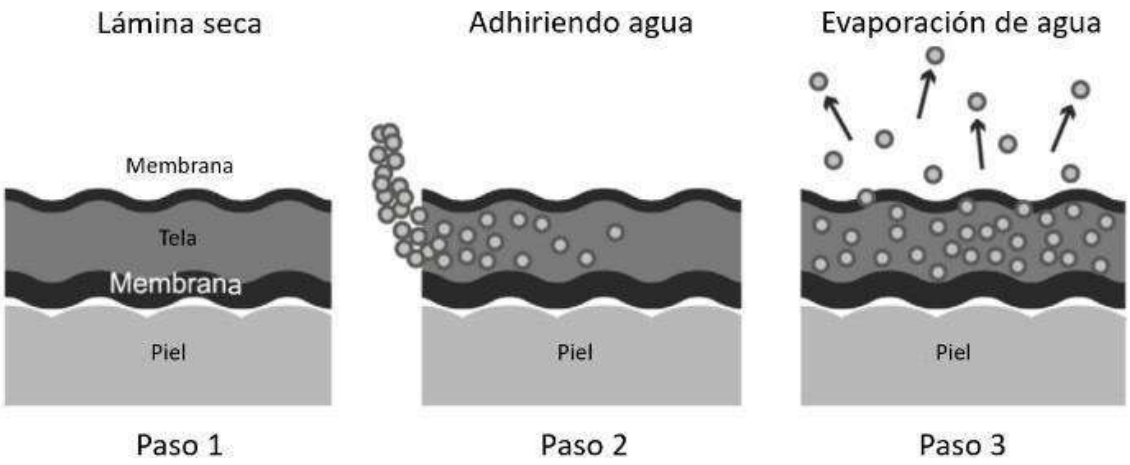


Figura 9. Diagrama de funcionamiento de membrana hidrofóbica (Yang *et al*., 2019).

rotando o revolviendo el aire para lograr su condensación, así la corriente que condensa es la húmeda y la que evapora es la seca.

La eficiencia de estos modelos se encuentra entre los valores de 50 y 70%; alcanzar estos porcentajes dependen principalmente de la cantidad de aire al que le logra intercambiar el calor, por lo mismo, depende en gran medida de cuánto de este ingresa por los flujos primario y secundario, además de las condiciones térmicas de este.

5. Combinado

5.1. Sistema de enfriamiento evaporativo de dos etapas

Es un sistema que combina una etapa de flujo de aire enfriado de manera indirecta y otra etapa de flujo de aire enfriado de manera directa (Rafique *et al*., 2015; Heidarinejad *et al*., 2009): en la primera etapa se enfría sin humedad, mientras que en la segunda se le agrega. Este tipo de sistema ha ganado popularidad en zonas con mucha humedad en el ambiente donde

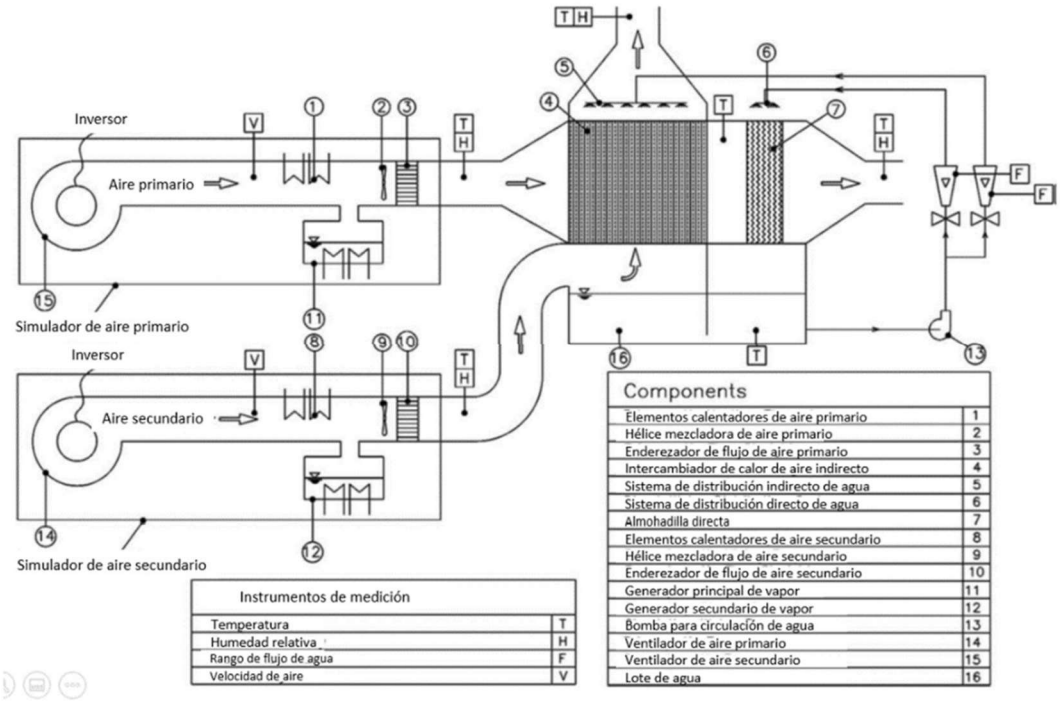


Figura 10. Diagrama de funcionamiento de un sistema de EE de dos etapas (Heidarinejad *et al*., 2009).

un sistema directo no es suficientemente bueno para reducir la temperatura.

Se ha encontrado en investigaciones previas que los sistemas logran reducir el costo energético entre un 30% y hasta un 75%, comparado con sistemas de refrigeración convencionales.

En el documento que presentan Heidarinejad *et al*. (2009), comparan el uso del agua en un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto y un sistema combinado directo/indirecto, colocando estos sistemas en varias condiciones climáticas. El sistema trabaja con cuatro módulos: el primero se trata del suministro de aire primario que está equipado con un ventilador centrífugo el cual cuenta con un sistema que regula temperatura, humedad y dispersión de aire para controlarlo, dependiendo de la condición climática que se quiera evaluar. El segundo módulo consiste en el suministro del aire secundario con un sistema similar al anterior. El tercero se trata de un sistema de enfriamiento directo/indirecto con una unidad intercambiadora de calor con superficie húmeda y una membrana gruesa de celulosa de unos 15 cm de espesor como EED, una bomba para circular agua, medidores y válvulas para el suministro de agua; el suministro del agua en los sistemas EEI y EED es por medio de rociadores. El cuarto está formado por un panel de control para obtener la configuración de temperatura y humedad relativa con el flujo de viento en los primeros dos módulos (Figura 10).

Realizaron las pruebas para siete ciudades en época de verano. En los resultados encontraron que estos sistemas ayudan a conseguir el confort térmico en temporadas de calor con más facilidad que un sistema directo, además de reducir el consumo eléctrico. La efectividad de cada sistema varía, encontrando que para un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto va de 55 a 61% de eficiencia, mientras que en un sistema de enfriamiento evaporativo directo va de 108 a 111%.

5.2. Sistema de enfriamiento evaporativo de tres etapas

Funciona ingresando aire del exterior a partir de un sistema de enfriamiento de dos etapas; ingresa aire humectado que, una vez dentro, regresa al sistema indirecto haciendo un reciclado del aire. Gracias a este método, el sistema tiene un ahorro de energía entre 54 y 82%, comparado con un sistema de enfriamiento convencional (Amer *et al*., 2015).

Conclusiones

Los sistemas de enfriamiento evaporativo tienen distintas configuraciones, por lo que la implementación dependerá de las condiciones y características del lugar donde se desea aplicar, junto a los cambios que se quieran lograr en el interior de los espacios; la eficiencia que pueden alcanzar está relacionada con las condiciones de cada caso específico, las cuales pueden ser climáticas, morfológicas, geográficas y hasta económicas.

Una variable similar en todas las investigaciones es que el flujo de aire juega un papel importante para el funcionamiento, en algunos se obtiene de manera natural mientras que en otros se consigue por medio de motores. En los casos donde el aire entra de manera pasiva, el enfriamiento puede no alcanzar la eficiencia óptima para que el modelo enfríe con la mayor potencia que podría tener realmente.

Para todos los modelos de sistemas EE, una pequeña variación en el funcionamiento representa una diferencia en su capacidad de enfriar, por tal motivo, es indispensable identificar la(s) necesidad(es) de cada situación para aplicar correctamente el uso de un sistema. Las variaciones que pueden existir dentro del sistema van desde tamaños de aberturas o ingreso para el flujo de aire, materiales de fabricación, posición del módulo, cantidad y tipo de líquido humectante, posición de materiales en el interior del módulo, entre otros. Estas variaciones alteran y generan nuevos modelos; sin embargo, continúan trabajando bajo una configuración de sistema existente.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo han logrado demostrar que tienen la capacidad para utilizarse con mayor frecuencia en distintas edificaciones y con diversos usos (dependiendo de la disposición que tiene el espacio para colocar el sistema), además de que su uso resulta benéfico para el medio ambiente y para la economía de los habitantes de los espacios donde se utilizan.

Referencias

Amer, O., Boukhanouf, R. and Ibrahim, H., 2015, A Review of Evaporative Cooling Technologies: *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(2), 111-117. DOI:10.7763/IJESD.2015.V6.571

Amestoy, J., 2010, El planeta Tierra en peligro: Calentamiento Global, Cambio Climático, Soluciones: *San Vicente, España, Editorial Club Universitario*.

Bagasi, A.A. and Calautit, J.K., 2020, Experimental field study of the integration of passive and evaporative cooling techniques with Mashrabiya in hot climates: *Energy and Buildings*, 225, 110325. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110325

Bhamare, D.K., Rathod, M.K. and Banerjee, J., 2019, Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones-The state of art: *Energy and Buildings*, 198, 467-490. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023

Cuce, P.M., Riffat, S., 2016, A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1240-1249. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.066

Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B. and Hasan, A., 2012, Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6823-6850. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.007

Esparza-López, C.J., Escobar del Pozo, C., Al-Obaidi, K.M. and González-Trevizo, M.E., 2022, Improving the Thermal Performance of Indirect Evaporative Cooling by Using a Wet Fabric Device on a Concrete Roof in Hot and Humid Climates: *Energies*, 15(6), 2213. https://doi.org/10.3390/en15062213

Esparza-López, C.J., Escobar del Pozo, C., Gómez Azpeitia, A., Gómez Amador, A. and González Cruz, E.M., 2018, Potential of a wet fabric device as a roof evaporative cooling solution: Mathematical and experimental analysis: *Journal Building Engineering*, 19, 366-375. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.021

Fardeheb, F., 2009, "Examination and Review of Passive Solar Cooling Strategies in Middle Eastern and North African Vernacular Architecture". In: D.Y. Goswami and Y. Zhao (eds), *Proceedings of ISES World Congress 2007 (vol. I-vol. V)*: Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 2511–2515. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_508

Firfiria, V.K., Martzopoulou, A.G. and Kotsopoulos, T.A., 2019, Passive cooling systems in livestock buildings towards energy saving: A critical review: *Energy and Buildings*, 202, 109368. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109368

Glaciar ingenierías S.A.S., 2022, "¿Qué es una torre de enfriamiento?" https://glaciaringenieria.com.co/torre-enfriamiento/ [consultado en febrero de 2022].

Heidarinejad, G., Bozorgmehr, M., Delfani, D. and Esmaeelian, J., 2009, Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling systems in various climatic conditions: *Building and Environment*, 44(10), 2073-2079. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017

Kun, F. and Xiang, H., 2014, A case Analysis of Application of Evaporative Cooling Air Conditioning of the Communication Equipment Room in Xi'an. *Applied Mechanics and Materials*, 472, 231-236. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.472.231

Lechner, N., 2014, Heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects (3rd ed.): *New Jersey, U.S.A., Wiley*, pp. 276-293.

Liberati, A., Altman, D.G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. and Ioannidis, J., 2009, The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration: *PLoSMed*.; 6 (7), https://doi.org/10.1371/journal.pmed.100010025

Liberari, P., Antonellis, S.D., Leone, C., Joppolo, C.M. and Bawa, Y., 2017, Indirect Evaporative cooling systems: modelling and performance analysis: *Energy Procedia*, 140, 475-485. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.159

Melillo, J., Richmond, T. and Yohe, G. (eds.), 2014, Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment: *U.S., Global Change Research Program*, 841 pp. ISBN 9780160924026. doi:10.7930/J0Z31WJ2

National Geographic, 2022, "¿Qué es el calentamiento global?" https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global [consultado el 1 de octubre de 2022].

Rafique, M.M., Gandhidasan, P., Rehman, S. and Al-Hadhrami, L.M., 2015, A review on desiccant based evaporative cooling systems: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 145-159. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.051

Reidmiller, D.R., Avery, C.W., Easterling, D.R., Kunkel, K.E., Lewis, K.L.M., Maycock, T.K. and Stewart, B.C. (eds.), 2018, Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, volume II: *U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA*, 1515 pp. doi: 10.7930/NCA4.2018

Rothmaier, M., Weder, M., Meyer-Heim, A. *et al*., 2008, Design and performance of personal cooling garments based on three-layer laminates: *Med Biol Eng Comput*, 46, 825-832. https://doi.org/10.1007/s11517-008-0363-6

Saffari, M., De Gracia, A., Ushak, S. and Cabeza, L.F., 2017, Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools. A review: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(C), 1239-1255. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.139

Santamouris, M., 2005, Passive cooling of buildings: Athens, Greece, Advances of Solar Energy, Group Building Environmental Studies, Physics Department, University of Athens.

Schielke, T., 2014, Light Matters. Mashrabiyas - Translating Tradition into Dynamic Facades: *ArchDaily*. ISSN 0719-8884. https://www.archdaily.com/510226/light-matters-mashrabiyas-translating-tradition-into-dynamic-facades

Sotelo-Salas, C., Escobar del Pozo, C. and Esparza-López, C.J., 2021, Thermal assessment of spray evaporative cooling in opaque double skin facade for cooling load reduction in hot arid climate: *Journal of Building Engineering*, 38, 102156. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102156

Somasundar, K.G., Soorej, S., Karthkeyan, S., Jayan, N. and Bhatlu, L.M., 2020, Review on cooling tower nozzle types: *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 3016-3018. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.723

Wen, M.Y., Ho, C.Y., Jang, K.J. and Yeh, C.H., 2014, Experimental study on the evaporative cooling of an air-cooled condenser with humidifying air: *Heat Mass Transfer*, 50, 225-233. https://doi.org/10.1007/s00231-013-1243-7

Xu, P., Ma, X., Zhao, X. and Fancey, K.S., 2016, Experimental investigation on performance of fabrics for indirect evaporative cooling applications: *Building and Environment*, 110, 104-114. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.003

Xuan, Y.M., Xiao, F., Niu, X.F., Huang, X. and Wang, S.W., 2012, Research and application of evaporative cooling in China: A Review (I) - Research: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3535-3546. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052

Yang, Y., Cui, G. and Lan, C.Q., 2019, Developments in evaporative cooling and enhancer evaporative cooling - A review: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109230. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.037

Yu, Z., Sun, C., Zhang, L., Bao, B., Li, Y., Bu, S. and Xu, W., 2021, Analysis of a novel combined heat exchange strategy applied for cooling towers: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120910. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120910

Zhao, X., Li, J.M. and Riffat, S.B., 2007, Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling: *Applied Thermal Engineering*, 28(14-15), 1942-1951. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.006