

CONAMA 2022

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Caracterización de Sistemas de Enfriamiento Evaporativo Indirecto

Climatización de Viviendas en Climas
Cálido-Húmedo



Autor Principal: José Roberto García Chávez. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. México e-mail: joserobertogsol@gmail.com

Otros autores:

Anaís Carrillo Salas. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. México e-mail: doc.anasalas@gmail.com

Karina Angélica García Pardo. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, U. de Sevilla, España e-mail: gkarinap9@gmail.com

ÍNDICE

1. Título
2. Palabras Clave
3. Resumen
4. Introducción
5. Metodología
6. Resultados
7. Discusión
8. Conclusiones
9. Bibliografía

TÍTULO

Caracterización de Sistemas de Enfriamiento Evaporativo Indirecto.

PALABRAS CLAVES

Enfriamiento evaporativo indirecto; ahorro de energía; edificios; cálido- húmedos; confort higrotérmico

RESUMEN

El consumo de energía en los edificios debido al uso de sistemas de aire acondicionado (AC) se ha incrementado exponencialmente, exacerbado por los efectos del Calentamiento Global (CG) y el Cambio Climático (CC). Esta situación es particularmente evidente en regiones climáticas durante los períodos de sobrecalentamiento. Una alternativa promisorio para mitigar esta problemática es la implementación de sistemas pasivos de enfriamiento, que pueden contribuir a reducir los elevados consumos de energía eléctrica y al mismo tiempo proporcionar condiciones de confort higrotérmico para los ocupantes de los edificios. El objetivo de este trabajo está orientado a la caracterización de estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto aplicadas en módulos experimentales, enfocadas a proporcionar confort higrotérmico. Los resultados obtenidos revelaron que las estrategias investigadas presentaron temperaturas más bajas que las condiciones externas y el módulo de referencia o control. La alternativa de enfriamiento evaporativo indirecto, combinada con masa térmica, control solar y enfriamiento radiativo nocturno fue la que mejores resultados presentó, con una reducción de la temperatura de 4.2 K en relación con la temperatura media exterior y una disminución de 8.3 K de su temperatura máxima con respecto a la temperatura exterior máxima. Se espera que estos resultados se puedan aplicar en edificios ubicados en climas predominantemente cálido-húmedos, para reducir el consumo de energía para la climatización, así como para mejorar el confort higrotérmico y la salud de los ocupantes y así mismo, contribuir a la disminución de la emisión de Gases de Efecto Invernadero al medio ambiente y mitigar el Cambio Climático a nivel global.

INTRODUCCIÓN

El uso extensivo y exacerbado del aire acondicionado en los edificios está directamente relacionado con el Calentamiento Global y el Cambio Climático. El rápido aumento de las temperaturas ambientales a nivel mundial implica un mayor uso del AC en los edificios para proporcionar confort higrotérmico a los ocupantes, lo que al mismo tiempo provoca la continua emisión de Gases de Efecto Invernadero, y numerosas alteraciones climáticas, así como graves efectos en la salud de las personas. Un enfoque prometedor para mitigar esta situación es la implementación del enfriamiento pasivo en los edificios, donde la aplicación de sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto es una alternativa viable y sostenible, particularmente en regiones cálidas-húmedas. El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar y caracterizar varios sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo indirecto en cinco módulos experimentales, ubicados en su cubierta superior y orientados a lograr tanto condiciones de confort térmico en edificios en climas cálidos-húmedos de México como ahorro de energía.

1. Consumo de Energía en las Edificaciones y su Relación con el Uso de Sistemas de Aire Acondicionado y la Emisión de GEI en la Atmósfera

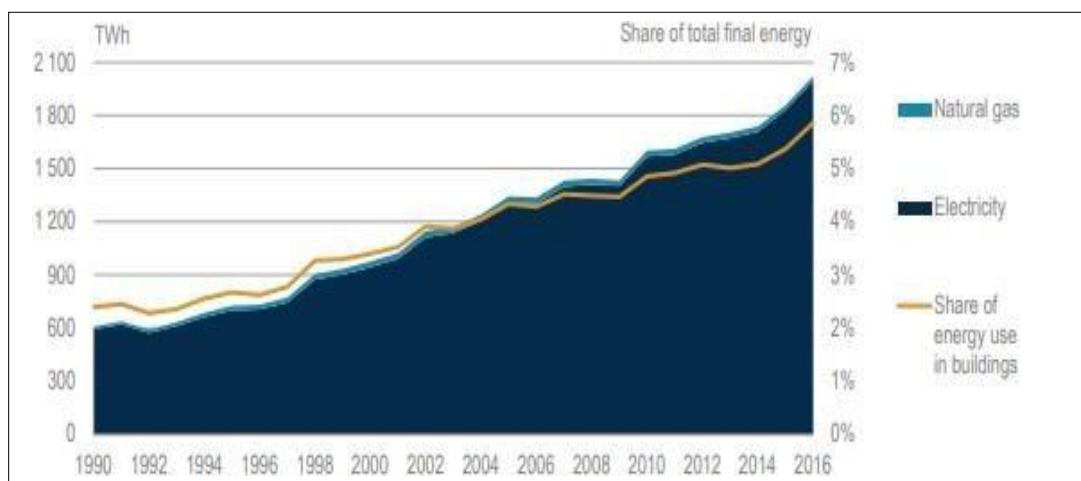
Estadísticas recientes (BP, 2022) indican que la demanda de energía primaria, a pesar del confinamiento y la pandemia provocados por el SARS-CoV-2 y el COVID-19, aumentó un 5,8% en 2021, superando los niveles de 2019 en un 1,3%. Es importante destacar que entre 2019 y 2021, las energías renovables aumentaron en más de 8 ExaJoules (EJ, que equivale a 1×10^{18} Julios o $2,222\ 222 \times 10^{12}$ KiloWatts hora [kWh]). Es importante mencionar que la producción y el consumo de las energías renovables han aumentado continuamente en los años más recientes. Por otra parte, el consumo de combustibles fósiles, provenientes del carbón, petróleo y gas natural, se mantuvo prácticamente sin cambios. Los combustibles fósiles representaron el 82% del uso de energía primaria del año anterior, por debajo del 83% en 2019 y del 85% hace cinco años. Este aumento está directamente asociado a un alto nivel de emisión de Gases de Efecto Invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, que está provocando un severo deterioro ambiental a nivel global.

Por lo que respecta a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes del uso de la energía y de otros procesos industriales, aumentaron un 5,7% en 2021 hasta alcanzar las 39,0 GtCO₂e, y las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la producción de la energía aumentaron un 5,9% hasta alcanzar las 33,9 Gigatoneladas de CO₂. Esta tendencia aumentará debido a factores como el crecimiento económico y de la población y se manifestará con mayores señales en las regiones cálidas, así como en los climas templados durante los periodos de sobrecalentamiento.

Dentro de la utilización de sistemas de aire acondicionado, el uso de energía que más crece en los edificios es el del enfriamiento de espacios. El uso total de energía para el enfriamiento de espacios en edificios residenciales y comerciales en todo el mundo se ha triplicado considerablemente entre 1990 y 2016 hasta alcanzar los 2,020 TeraWatts hora (TWh) (Figura 1) (IES, 2018). Además, debido al aumento de la población mundial, junto con el crecimiento de la urbanización y la expansión de la industrialización, las olas de calor, como las que se han producido más recientemente en el verano en Europa y otras regiones del planeta, se requerirá más enfriamiento de los edificios en las próximas décadas.

En resumen, el aumento de las necesidades del uso de sistemas de aire acondicionado en los edificios está generando una demanda masiva continua de energía eléctrica, que en su mayoría proviene de combustibles fósiles, lo que a su vez provocará más contaminación y emisiones de CO₂, y el consiguiente deterioro del medio ambiente, agravando la situación y creando un círculo vicioso nocivo, que afectará a los ecosistemas del planeta, a la economía de los ocupantes de los edificios, a su calidad de vida y, lo que es más importante, a su salud.

En la actualidad, el crecimiento del Calentamiento Global y la intensificación del Cambio Climático a nivel mundial tienen una relación directa con el aumento exponencial del uso del Aire Acondicionado en los edificios y presenta un rápido incremento, especialmente en las localidades urbanas. Es importante mencionar que la tecnología de los equipos de Aire Acondicionado no ha cambiado significativamente en relación con sus primeras aplicaciones, de hace casi un siglo, y en la actualidad está creciendo rápidamente en términos absolutos y como parte del uso total de la energía en los edificios (Figura 1). En la actualidad, el uso de sistemas de Aire Acondicionado representa casi el 20% del total de la electricidad utilizada en los edificios de todo el mundo y el 10% de todo el consumo mundial de electricidad (IEA, 2018). Ciertamente, en este reporte se establece que la demanda mundial de energía de los sistemas de aire acondicionado se triplicará de la actualidad al año 2050. Si hoy el parque mundial de estos equipos es de 1,600 millones, crecerá hasta alcanzar 5,600 millones en 2050, lo que representa que 10 nuevos equipos de AC serán vendidos cada segundo durante los próximos 30 años (IEA, 2018). Con base en lo antes mencionado, el uso de la energía para la climatización y enfriamiento de los espacios arquitectónicos es el que representa el mayor crecimiento a nivel global.



Figur 1. Consumo Mundial de Energía para el Enfriamiento de Espacios Arquitectónicos, casitotalmente en forma de electricidad en los edificios. Referencia: IEA, 2018. http://www.iea.org/publications/free_publications/publication/The_Future_ofCooling

METODOLOGÍA

En el desarrollo de trabajo se utilizaron cinco módulos experimentales, en los cuales se implementaron y evaluaron varios sistemas de enfriamiento evaporativo en su cubierta superior y se complementaron con otros sistemas de enfriamiento pasivo (Figura 2). El desempeño térmico de estos módulos experimentales se comparó con un módulo de control. Este caso de estudio se ubicó en la Ciudad de Mérida, Yucatán, México, una localidad con un clima cálido- húmedo representativo. Según Köppen y Geiger, este clima se clasifica como BSh.

La temperatura anual es de 27,2 °C; la velocidad media anual del viento: 3,3 m/s; la radiación solar global media 5,5 kWh/m² (19,8 MJ/m²); humedad relativa media: 72%; y precipitación pluvial media: 1,036,9 mm (CBE Clima Tool, 2022). La geometría de los módulos, basada en investigaciones previas (González, et al, 2013, 2015), es hexaédrica. Los módulos experimentales se diseñaron y construyeron con cinco configuraciones diferentes de sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto y se designaron como M1, M2, M3, M4 y M5, complementados con varios sistemas pasivos de enfriamiento (Figuras 2 y 3).



Figura 2. Disposición experimental durante la monitorización de datos de los SEEI con sistemas pasivos de enfriamiento suplementarios

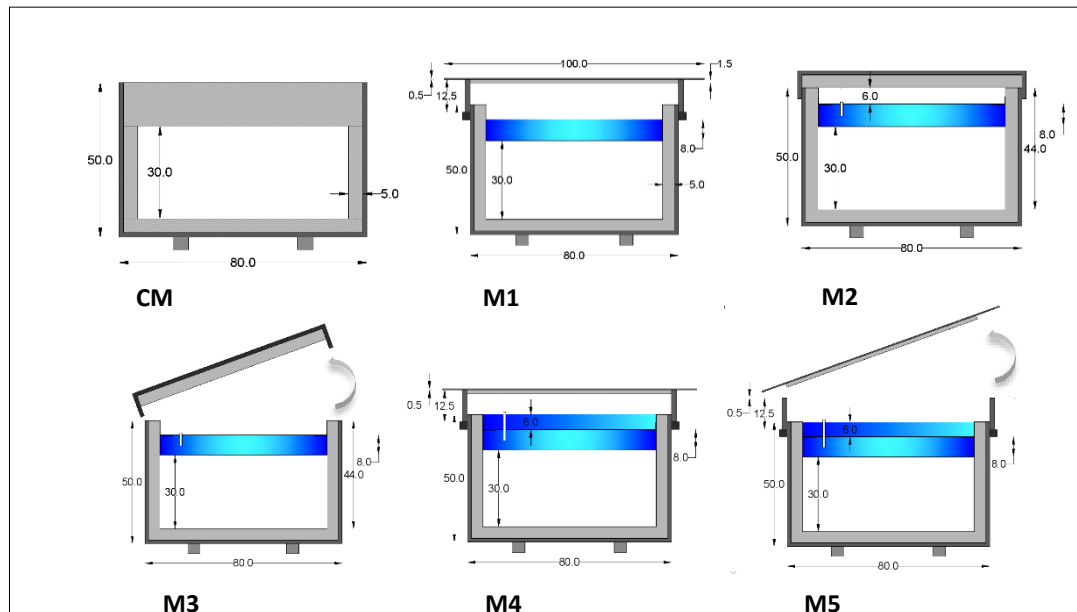


Figura 3. Geometría y características de los módulos experimentales. CM: Módulo de control; M1: enfriamiento evaporativo indirecto + masa térmica + control solar; M2: masa térmica + aislamiento térmico; M3: enfriamiento nocturno radiativo + masa térmica; M4: enfriamiento evaporativo indirecto + masa térmica + control solar; M5: enfriamiento evaporativo indirecto + masa térmica + control solar + enfriamiento nocturno radiativo. M3 y M5 en modo nocturno: 18:00-06:00 horas. En modo diurno: 06:00-18:00 hrs.

Los módulos experimentales se construyeron con una estructura de madera contrachapada, con dimensiones de 0,8 metros de largo por 0,8 metros de ancho, 0,47 metros de alto, y 1,5 cm de espesor, recubierta en su interior por un panel de foamular® de 0,045 metros de espesor como aislamiento térmico para permitir condiciones adiabáticas (Figura 2). Este material aislante es de espuma rígida de poliestireno extruido con un valor de conductividad térmica de 0,03 W/mK (para una temperatura exterior media de 24 °C). La transferencia de calor por conducción de los módulos es de 1,80 W/m²K. El valor "U" de la envolvente del módulo es de 0,514 W/m²K. La masa térmica fue proporcionada por 54 litros de agua introducidos en un contenedor metálico galvanizado en la parte superior de los módulos (Figura 3). La capacidad calorífica específica del agua es de 4,182 kJ/kgK. La velocidad media del viento en el lugar es de 3,33 m/s, lo que proporcionó un flujo de aire adecuado durante los experimentos.

La metodología consistió en la evaluación y caracterización de los sistemas investigados, a través de la monitorización de las condiciones higrotérmicas en el interior de los cinco módulos experimentales en comparación con el módulo de control (Figura 3). Los sensores para la monitorización se ubicaron en el centro de los módulos. Estos módulos integraron diferentes sistemas en su cubierta: Enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar (IEC + SP); masa térmica y aislamiento térmico (TM + TI); enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica (NRC + TM); enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (IEC + TM + SP); y enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica, protección solar y enfriamiento radiativo nocturno (IEC + TM + SP + NRC). La etapa inicial incluyó la calibración de los sensores y registradores de datos utilizados en los experimentos, y los resultados obtenidos indicaron una consistencia en los valores registrados, lo que validó su uso con fiabilidad. La monitorización de

los valores de la temperatura del bulbo seco (DBT) y de la humedad relativa (HR) se realizó simultáneamente durante 30 días consecutivos en el periodo de sobrecalentamiento predominante en el lugar. En el proceso del trabajo experimental y en los módulos donde se implementó el sistema NRC (M3 y M5), se incluyó una variante, con respecto a los demás módulos, que consistió en retirar la cubierta a las 18:00 hrs y volver a colocarla en el período de las 6:00 am (Figura 3).

RESULTADOS

Durante el periodo de monitoreo, se registraron los valores de temperatura de bulbo seco y humedad relativa con un intervalo de diez minutos, durante un periodo representativo de sobrecalentamiento en el mes de mayo, en el que las temperaturas exteriores medias fluctuaron entre 27 °C y 38 °C. Los valores obtenidos se promediaron en un ciclo de 24 horas. Los resultados indicaron que las temperaturas medias en el interior de los módulos disminuyeron con respecto a las temperaturas medias y máximas exteriores de la Estación Meteorológica Automatizada del lugar. El módulo experimental M1 mostró una temperatura media de 29,3 °C, con una máxima de 32,2 °C y una mínima de 26,7 °C, respecto a al MC, que presentó 31,3 °C, 38,6 °C y 25,6 °C, respectivamente. Estos valores representaron una reducción de temperatura de 2K, 6,4K y -1,1 K, respectivamente. Las reducciones de temperatura del M1 en relación con las temperaturas externas fueron de 2,5 K, 5,5K y 0,2K, comparativamente (Figura 4).

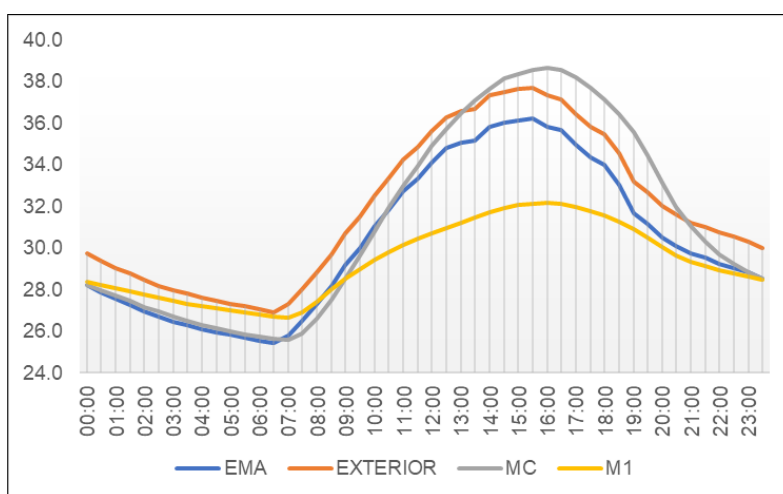


Figura 4. Datos de temperatura horaria del M1 comparados con las temperaturas del Módulo de Control y del Exterior

El módulo experimental M3 registró una temperatura media de 30,7 °C, con un máximo de 33,4°C y un mínimo de 28,0 °C, en relación con el MC, que presentó 31,3 °C, 38,6 °C y 25,6 °C, respectivamente. Estos valores representaron una reducción de temperatura de 0,6K, 5,2K y 2,4 K, respectivamente. Las reducciones de temperatura del M1 en relación con las temperaturas externas fueron de 1,1 K, 4,3 K y 1,1 K, correspondientemente (Figura 4).

DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos, se infiere que el sistema de enfriamiento más prometedor investigado fue el M5, que mostró una reducción media de la temperatura de 4.2 K con respecto a la temperatura media exterior y una reducción de 8.3 K de su temperatura máxima en el interior del módulo con respecto a la temperatura máxima exterior (Figura 7). En el sistema de enfriamiento más prometedor (Módulo 5), se implementó una técnica adicional de enfriamiento pasivo, utilizando un material de cambio de fase (PCM) en la cubierta, sustituyendo la masa térmica del agua por una cubierta de policarbonato que encapsulaba un PCM orgánico. Este material utiliza la diferencia de temperatura entre el día y la noche para el almacenamiento y la disipación de energía térmica. El monitoreo de este sistema de enfriamiento pasivo se llevó a cabo durante el periodo de sobrecalentamiento más crítico de la localidad, con una temperatura media máxima de 38.0 °C y una mínima de 26.6 °C. Los resultados se compararon con las temperaturas en el módulo de control y con el exterior. La temperatura media en el módulo de control fue de 30.2 °C en relación con la temperatura media en el M5 con 25.3 °C, lo que infiere una reducción absoluta de 4.9 K (Figura 6). Así, la temperatura media en el M5 fue de 25.3 °C en relación con la temperatura media exterior de 31.6 °C (Figura 6).

Por lo tanto, los resultados absolutos dentro del M5 con esta estrategia presentaron una reducción de la temperatura de 6.3 K respecto a la temperatura media exterior y una reducción de 11.5 K de su temperatura máxima respecto a la temperatura máxima exterior (Figura 7).

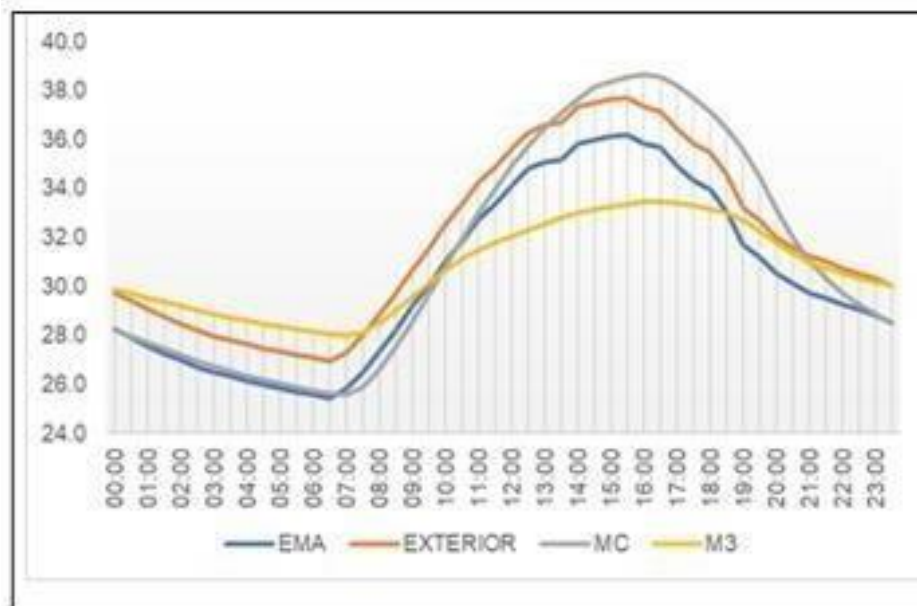


Figura 5. Temperatura horaria del M3 comparada con el módulo de control y lastemperaturas del exterior

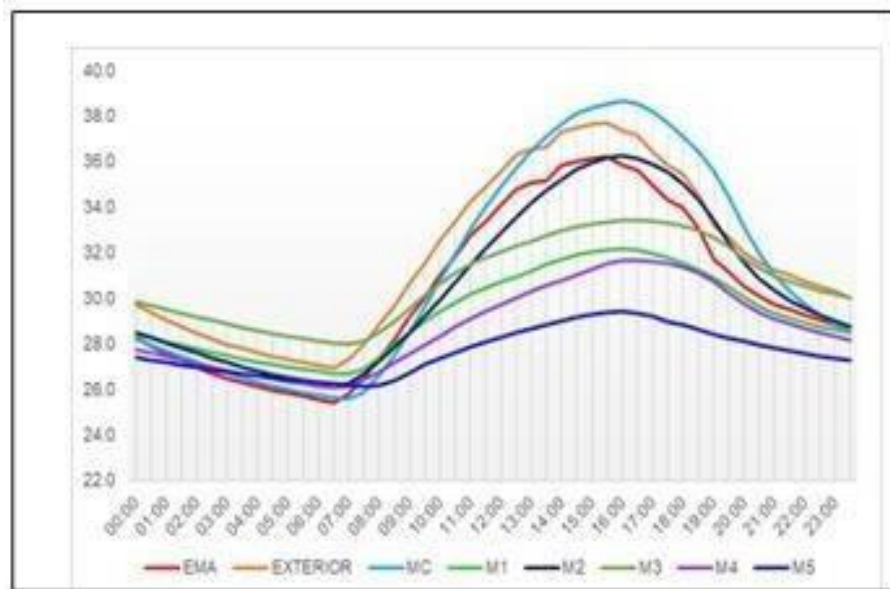


Figura 6. Rendimiento térmico de todos los sistemas de pasivos de enfriamiento durante el período de monitoreo

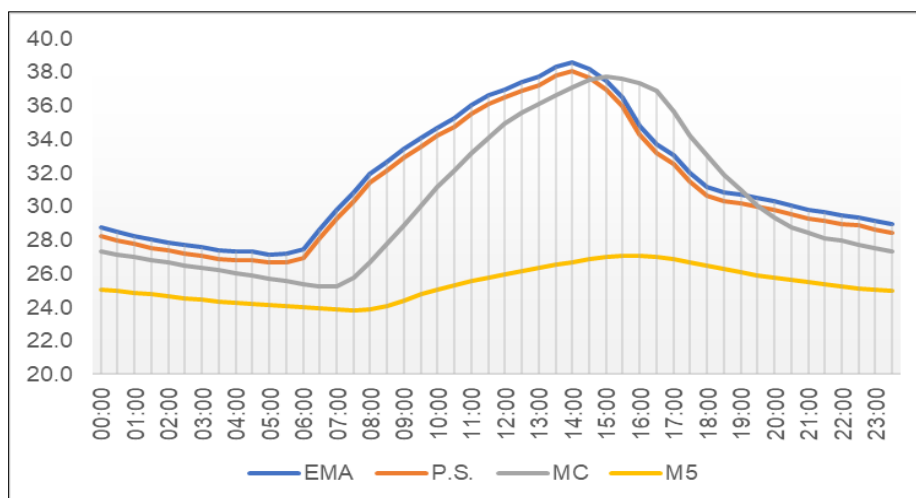


Figura 7. Comportamiento térmico del M5 en relación con las temperaturas del módulo de control y temperaturas exteriores durante el periodo de monitoreo

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación demostraron que los Sistemas de Enfriamiento Evaporativo Indirecto evaluados en los módulos experimentales presentaron un importante desempeño térmico con la reducción de temperaturas. Las mediciones mostraron que es posible un enfriamiento de bajo consumo utilizando adicionalmente una combinación de sistemas de enfriamiento pasivo. Los resultados obtenidos también revelaron un buen potencial de ahorro energético en los sistemas investigados, del que se pueden extrapolar lecciones y aplicarlas en condiciones reales en edificios existentes o en nuevos proyectos. Ciertamente, la envolvente de los edificios desempeña un papel muy importante en el comportamiento térmico de estos sistemas y tiene un gran impacto en las necesidades de sistemas de Aire Acondicionado de los edificios. La elección de los materiales de construcción es de gran importancia. En particular, la masa térmica, que es esencial para reducir las oscilaciones térmicas. Por lo tanto, el uso de la masa térmica, con sistemas de agua integrados y materiales de fase de cambio, tal y como se aplicó en esta investigación, apunta hacia un potencial importante para el enfriamiento de espacios, que es necesario continuar con más trabajos de investigación. Además, la implementación de sistemas de enfriamiento pasivo en los edificios, donde la gente no puede permitirse el lujo de la compra de equipos de aire acondicionado y el pago de la electricidad, es recomendable explorar con estas alternativas, enfocadas a proporcionar una ruta viable y eficaz para proveer confort térmico de baja energía a muchas personas en un mundo de cada vez más altas temperaturas debido a la situación actual del Calentamiento Global y el Cambio Climático. Por lo tanto, la aplicación de estrategias bioclimáticas de bajo consumo energético tiene también un importante valor socioeconómico y posee el potencial de generar un círculo virtuoso en una arquitectura resiliente y más apropiada para las condiciones climáticas actuales y en escenarios futuros de un probable mayor nivel de intensificación, y propuesta a mejorar el medio ambiente y la salud de las personas a nivel global.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. BP Statistical Review of World Energy (2022). <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [2]. IEA (2018). *The Future of Cooling 2018*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [3]. González E., González. S. (2013) *Experimental study on the thermal behaviour of a new type of roof pond for passive cooling in humid climate*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 149-171, out./dez. 2013. ISSN1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- [4]. González E, Kruger, E (2015). *Evaluating the Potential of Indirect Passive Cooling System for Brazilian Dwellings*. Building and Environment No. 87 (pp 265-273)
- [5]. CBE (2022). <https://clima.cbe.berkeley.edu/>