ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE DOS TIPOS DE RADIADORES APLICADOS AL ENFRIAMIENTO RADIATIVO NOCTURNO DE UNA CÁMARA CLIMÁTICA.

Eduardo Manuel González-Cruz (1); Eduardo L. Krüger (2)
(1) Dr. Professor Visitante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), eduardocruz@utfpr.edu.br, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Curitiba - Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 - 81280-340 Curitiba, Tel.: +55 (41) 99876 4625.
(2) Dr. Engenheiro Civil, ekruger@utfpr.edu.br, PPGEC – UTFPR, Campus Curitiba - Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 - 81280-340 Curitiba, Tel. +55 (41) 3279 6821.

RESUMEN
Reducir la demanda de energía para calefacción y refrigeración en los edificios orienta los trabajos de desarrollo y evaluación de un sistema de calentamiento y enfriamiento radiante-capacitivo que los autores han implementado en una cámara climática. Como parte de dicho proyecto, el objetivo de este estudio es evaluar el desempeño térmico de dos tipos de radiadores de bajo costo aplicados para enfriamiento radiativo nocturno: un radiador prototipo fabricado con perfiles de aluminio y un radiador conformado por colectores comerciales de polipropileno. Los radiadores han sido monitorizados ante diferentes condiciones climáticas y flujos de agua durante periodos cálidos en la ciudad de Curitiba y evaluado su desempeño térmico a partir de dos indicadores: la potencia de enfriamiento nocturno promedio por metro cuadrado y un índice de eficiencia de enfriamiento. Los resultados permiten concluir que, para un flujo de agua de 163 l/h e iguales condiciones climáticas en términos de DTrw (diferencia entre la temperatura del agua a la entrada al radiador y la temperatura de estancamiento), la potencia de enfriamiento nocturno del radiador comercial de polipropileno es en promedio 29% superior al de aluminio en el rango de DTrw entre 2K y 7K.

Palabras-clave: enfriamiento radiativo nocturno, sistema radiante-capacitivo, sistema de bajo consumo energético, estudio experimental, estudio comparativo.

ABSTRACT
The need for reducing energy demand for heating and cooling in buildings has guided the development and evaluation of a radiant-capacitive heating and cooling system that the authors have implemented in a climatic chamber. As part of this project, the objective of this study is to evaluate the thermal performance of two types of radiators, employed to obtain nighttime radiative cooling: a prototype radiator made of aluminum profiles, and a radiator made of commercial polypropylene collectors. Both radiators have been monitored, under different climatic conditions and water flows, during hot periods in Curitiba. Thermal performance has been evaluated based on two indicators: average night-time cooling power per square meter and a cooling efficiency index. Results allow us to conclude that, for a water flow of 163 l/h and equal climatic conditions in terms of DTrw (the difference between the water temperature at the radiator inlet and the stagnation temperature), the nighttime cooling power of the commercial polypropylene radiator is on average 29% higher than the aluminum prototype, in the DTrw range between 2K and 7K..

Keywords: night-time radiative cooling, radiant-capacitive system, low-energy system, experimental study, comparative study.

1. INTRODUCIÓN
Los edificios son uno de los principales contribuyentes al cambio climático, ya que representan un tercio del consumo mundial de energía y una cuarta parte de las emisiones de CO^2. (GONZÁLEZ-TORRES et al, 2022). De esta problemática energética-ambiental actual hay que enfatizar que el consumo de energía primaria relacionada con el acondicionamiento térmico de edificios no ha dejado de crecer en las últimas décadas. Por el contrario, con las tendencias actuales, si no se toman las acciones oportunas, las necesidades energéticas

para la refrigeración de espacios, casi en su totalidad en forma de electricidad, se triplicarán entre 2016 y 2050 impulsadas principalmente por el sector residencial (IEA, 2022). Caso emblemático es el de EE.UU. donde aproximadamente el 25 % de toda la energía es utilizada para la refrigeración de edificios (YOUNG et al, 2021). Aunque ese porcentaje es menor para el resto del mundo, está aumentando rápidamente en todas las regiones cálidas, sobre todo en países grandes como Brasil, donde se espera que los grados día de enfriamiento (CDD) aumenten en un asombroso 25 % entre 2016 y 2050, (IEA, 2023).

Reducir la demanda de energía para calefacción y refrigeración en los edificios debe ser, por lo tanto, una de las prioridades para la reducir la emisión de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción. En este marco de referencia, aplicar estrategias de diseño para adecuación de los edificios a las condiciones climáticas locales, en primer término, y hacer uso de sistemas pasivos/híbridos que aprovechen los potenciales naturales como la energía solar y sumideros para la disipación de calor, son prerrequisitos necesarios para diseñar edificaciones de muy bajo consumo de energía y de elevada eficiencia energética como exigen hoy día legislaciones como en el caso europeo (DIRECTIVE 2010/31/E) y de tendencia en otros muchos países.

Los sistemas pasivos de enfriamiento o de bajo consumo de energía pueden incluir tecnologías que aprovechan sumideros térmicos como el suelo a cierta profundidad, el aire nocturno o la "ventana atmosférica" que presenta la atmósfera. Muchas de estas tecnologías han sido ampliamente estudiadas y justificada su aplicabilidad (GIVONI, 1994; SANTAMOURIS, 1996).

Uno de los sumideros de energía, la bóveda celeste, ofrece la posibilidad de aplicar diversas tecnologías de enfriamiento basadas en la transferencia de calor por radiación infrarroja. La importancia del enfriamiento radiativo nocturno (ERN), posibles aplicaciones y formas de caracterización, ha sido puesta de relieve por numerosos investigadores desde hace algunas décadas (CATALANOTTI et al, 1975; GIVONI, 1977; MICHELL, D.; BIGGS, 1979; BERDAHL et al, 1983).

Los sistemas pasivos de enfriamiento radiativo nocturno permiten disipar calor desde las superficies expuestas al cielo mediante emisión de radiación de onda larga. Se trata de una técnica antigua que ha sido motivo de amplia investigación en los últimos 50 años, tanto en los aspectos físicos involucrados en el proceso como en relación a su aplicabilidad en el acondicionamiento térmico de edificios. Una revisión de las tendencias de esta técnica, así como los avances en los últimos años, con un intento de analizar la magnitud del enfriamiento y las perspectivas de desarrollo para los períodos diurno y nocturno es presentado por Lu et al (2016) haciendo énfasis en la integración con los edificios. El progreso reciente en el enfriamiento radiativo revela su potencial para aplicaciones en enfriamiento pasivo altamente eficiente. Especialmente en la última década el logro de enfriamiento significativo bajo la luz solar directa indica su potencial como un práctico enfriador pasivo durante el día (MUTASIR; GU, 2016).

Algunos estudios realizados muestran el interés de utilizar dispositivos que permitan combinar el enfriamiento radiativo nocturno y el calentamiento solar mediante la utilización de radiadores/colectores que puedan ser aplicados en condiciones climáticas con demandas de enfriamiento y calentamiento (MATSUTA, 1987; ERELL; ETZION, 2000; HU et al, 2016; VALL et al, 2020; GONZALEZ; KRÜGER, 2022; LU et al, 2023). El uso de esta tecnología con fines de enfriamiento puede reducir drásticamente el consumo de energía; dependiendo del caso, el consumo de energía puede ser cero o solo la energía consumida por una pequeña bomba que funciona en las horas de funcionamiento (VALL; CASTELL, 2017).

Etzion y Erell (1990) presentan resultados experimentales de un Sistema de enfriamiento hibrido radiativo-convectivo nocturno evaluado en el clima caliente y árido de Sde-Boquer, Israel. El sistema se basa en circulación de agua entre un techo con agua (roof pond) y dos colectores solares usados como radiadores a los que eliminaron las cubiertas de vidrio. Analizaron la influencia de dos flujos de agua distintos (170 l/h y 1100 l/h) sobre el potencial de enfriamiento del radiador por m2. La potencia de enfriamiento promedio fue de 31.9 W/m2 y de 55.8 W/m^2 respectivamente para los flujos de 170 l/h y 1100 l/h, con picos de hasta 90 W/m^2 en algunas noches. Observaron que la temperatura de la superficie de los radiadores era la mayor parte de la noche superior a la temperatura del aire y lograba mantener temperaturas medias internas inferiores a las medias exteriores. En un estudio sobre tres tipos de colectores solares aplicados en enfriamiento radiativo nocturno, Erell y Etzion (2000) concluyen que el análisis de colectores solares de placa plana convertidos para enfriamiento radiativo de edificios sugiere que, en condiciones ambientales típicas, pueden ser menos eficientes para este tipo de aplicación que los radiadores sin aletas.

En la misma línea de investigación González y Krüger, (2022) han reportado resultados del desempeño térmico de un sistema de calentamiento y enfriamiento radiante-capacitivo en Curitiba, Brasil, evaluado experimentalmente, haciendo uso de cámaras de tamaño reducido y de un prototipo de radiador/colector que fue usado como medio de disipación de calor por enfriamiento radiativo nocturno en los meses cálidos y como colector solar en los meses de fríos.

Muchos estudios, incluidas investigaciones de campo y encuestas, han demostrado que los sistemas de enfriamiento y calentamiento radiante pueden mejorar los niveles de confort térmico al proporcionar un entorno térmico uniforme y minimizar las molestias locales en comparación con los sistemas de aire convencionales (KYU-NAM RHEE et al, 2015).

2. OBJETIVO

Se trata de un estudio comparativo que tiene como objetivo evaluar el desempeño térmico de dos tipos de radiadores de bajo costo expuestos a la bóveda celeste para aprovechar el enfriamiento radiativo nocturno de un fluido (agua), aplicado en un sistema de enfriamiento radiante-capacitivo de bajo consumo de energía, como estrategia de acondicionamiento térmico en una cámara climática (CBBC).

3. MÉTODO

El método seguido en este trabajo es de carácter experimental y basado en el análisis de datos resultantes de la monitorización de parámetros relativos al sistema de enfriamiento radiante-capacitivo utilizado en modo de enfriamiento, donde uno de sus componentes principales lo constituye un conjunto de radiadores expuestos a la bóveda celeste y objeto de estudio de este trabajo.

El desempeño térmico de los radiadores utilizados se evalúa mediante análisis comparativo de los siguientes indicadores:

1. Potencia de enfriamiento radiativo nocturno.
2. Índice de Eficiencia de Enfriamiento de los radiadores.

A efecto de dar coherencia metodológica al presente estudio se presentan a continuación: a. la descripción del RC-HCS, sus componentes y en particular las características físicas de los dos tipos de radiadores estudiados, y el sistema de control y adquisición de datos; b. la descripción de las serie experimentales realizadas y condiciones de funcionamiento del sistema en cada una de ellas; c. el análisis del balance térmico de un radiador expuesto al cielo nocturno a través del cual existe un flujo de agua; d. la temperatura de lámina metálica o temperatura de estancamiento; e. la definición de los indicadores de desempeño térmico utilizados para el análisis comparativo de los dos tipos de radiadores.

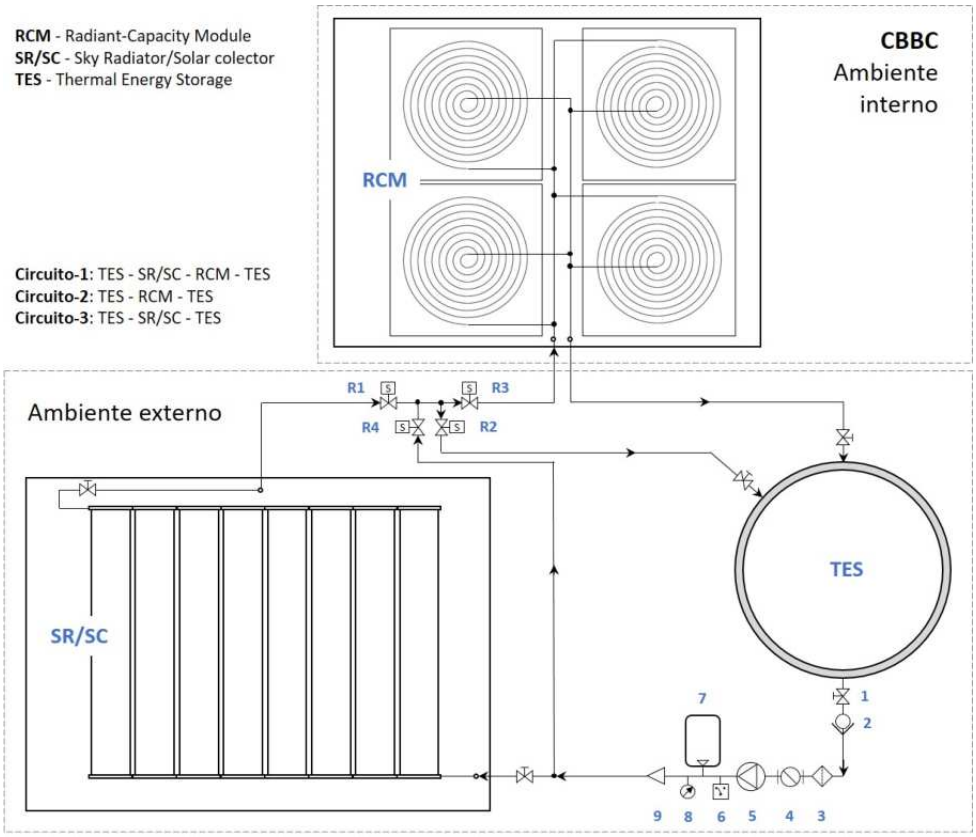


Figura 1: Esquema de componentes y circuitos de flujo de agua do RC-HCS con radiador/colector comercial de polipropileno. R1, R2, R3 y R4 Válvulas solenoides. 1- Válvula de registro, 2- Válvula de retención, 3- Filtro de agua, 4- Medidor de agua, 5- Bomba de agua, 6- Presostato, 7-Tanque de presión, 8- Manómetro, 9- Fluxómetro.

3.1. Descripción del RCHCS y de los radiadores analizados

El sistema de calentamiento y enfriamiento radiante-capacitivo denominado "Radiant-Capacity Heating and Cooling System (RC-HCS), en el cual se utilizan los radiadores evaluados en este trabajo, parte del principio del acondicionamiento radiante pasivo que, aplicado en modo de enfriamiento, aprovecha el enfriamiento radiativo nocturno como mecanismo de transferencia para disipar calor. El acondicionamiento interno se basa en el uso de elementos modulares de techo por donde circula el fluido (agua) enfriado durante la noche en los radiadores expuestos a la bóveda celeste. Estos elementos modulares de techo, de elevada capacidad térmica ("Radiant-Capacity Module" o RCM), contienen 56.2 litros de agua cada uno por lo que resultan muy importantes para aumentar la eficiencia del sistema al trabajar con temperaturas de agua más cercanas a las temperatura de confort (KYU-NAM RHEE et al, 2017).

3.1.1. RC-HCS y componentes

La configuración inicial del RC-HCS implementado en una cámara bioclimática de bajo costo en la Universidad Tecnológica Federal do Paraná, Sede Eco-Ville, está compuesto por tres componentes principales (Figura 1): a) cuatro módulos radiante-capacitivos (RCM); b) conjunto de paneles radiadores/colectores solares (SR/SC); c) un tanque de agua para almacenamiento de energía (TES); complementan el sistema un conjunto de componentes para facilitar su funcionamiento y control: d) sistema de bombeo hidroneumático, con un conjunto de tubos, mangueras, válvula de registro, conexiones y dispositivos para la medición de flujo y volumen de agua; e) sistema de control inteligente (SCS) con un conjunto de sensores y válvulas solenoides. Mayor información sobre las características físicas, dimensiones y otros detalles relacionados con las CBBC y los diferentes componentes del RC-HCS pueden encontrarse en González et al (2022).

3.1.2. Características de los Radiadores evaluados

Se trata de dos tipos de componentes de bajo costo utilizados como radiadores expuestos a la bóveda celeste, como parte fundamental del RC-HCS.

Por un lado un prototipo de SR/SC compuesto por cinco radiadores de 3,0 m x 0,49 m (1,47 m^2), cada uno fabricado a partir de cinco perfiles de una extrusión de aluminio de 3,0 m × 0,095 m × 0.0083 m, con acabado en color negro (Figura 2a y 2b). En sus extremos presenta tubos colectores de aluminio de 0.025 m x 0.025 m x 0.5 m, con una capacidad interior de 8.5 l cada uno, con un total de 42.5 l. El SR/SC fue colocado sobre una capa de aislamiento térmico de poliestireno de 50 mm de espesor sobre una plataforma de soporte con inclinación hacia el noreste de 10%.

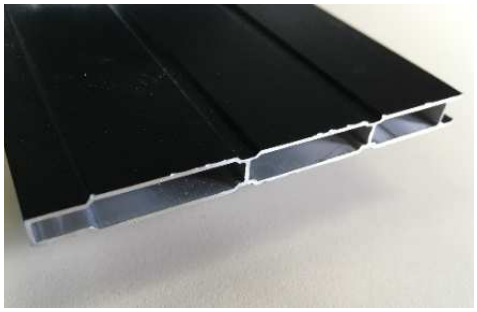
(a)  (b) 

Figura 2: (a) Perfil de aluminio utilizado en la fabricación del SR/SC, (b) SR/SC sobre plataforma de soporte.

(a)  (b) 

Figura 3 – (a) Detalle del colector solar comercial de polipropileno, (b) Disposición de 8 RCC sobre plataforma de soporte.

Por otro lado un conjunto de colectores solares comerciales usualmente vendidos para aplicación en calentamiento de agua para piscinas. Se trata de ocho colectores solares de polipropileno (Figura 3a y 3b), Modelo CPTS-200, de 2 m x 0.3 m (0.6 m^2) y 1.2 kg, donde cada colector está conformado por 30 tubos de aproximadamente 8 mm de diámetro, unidos entre sí por una aleta de ± 1,5 mm, constituyendo así una superficie continua. En sus extremos se encuentran tubos colectores de 0.04 m de diámetro. El volumen de agua interno de cada colector es de 1.2 l, para un total de 9.6 l en los 8 colectores instalados.

A diferencia de los colectores solares con tubos con aletas y cubiertas de vidrio, en los radiadores para disipar calor por radiación de onda larga al cielo nocturno resulta conveniente que la mayor parte de la superficie del radiador permanezca en contacto con el fluido en el interior. Por ello se trabajó inicialmente en un radiador/colector de superficie plana para aprovechar su geometría y propiedades del material para hacer más eficiente la transferencia de calor tanto en captación solar como en emisión de radiación de onda larga.

3.1.3. Sistema de control inteligente y adquisición de datos.

El RC-HCS es controlado por un microprocesador Raspberry Pi 3, conectado a 12 sensores a prueba de agua tipo DS18B20, un relé de cuatro canales y cuatro válvulas solenoides del tipo Normalmente Cerradas (NC). Este sistema de adquisición de datos y control es responsable de la lectura y almacenamiento de datos tanto localmente (Tarjeta SD conectada al Raspberry Pi) como en la nube, por medio de una biblioteca de código abierto gspread (Python API for Google Sheets). Este mecanismo independiente y redundante aumenta la seguridad de almacenamiento de la información además de permitir el acompañamiento en tiempo real de las mediciones y del comportamiento del sistema a distancia.

Todos los sensores fueron calibrados previamente al inicio de la monitorización. Para su ajuste se aplicaron ecuaciones de corrección deducidas para cada uno de ellos. Siete de estos sensores monitorean la temperatura del agua en diferentes partes del sistema (Tw1….Tw7), dos sensores monitorean la temperatura del ambiente exterior y del ambiente interior de la cámara (Tout y Tin), otros dos sensores están dedicados a monitorizar la Temperatura de globo (Tg) y la Temperatura superficial de un RCM en el interior de la cámara y finalmente un sensor está dedicado a medir la Temperatura de estancamiento de una lámina metálica de aluminio (Tr) (Figura 4b) del mismo material del primer conjunto de radiadores. La lectura y registro de datos fue realizado cada cinco minutos.

En este estudio Tw1 (Temperatura del agua a la salida de TES) y Tw4 representan las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del radiador y DTw la diferencia entre ellas.

3.2. Descripción de Series experimentales

Para analizar el desempeño térmico de los radiadores se han seleccionado Series experimentales en las que el Circuito-1 (Figura 1) estuvo activado durante el periodo de 10h en la noche (20:00h – 06:00h) como la Serie-5 y la Serie-19 o menos de 10h como en los casos de la Serie-18 y la Serie-20.

En la tabla 1 se presentan las fechas y número de días en análisis, y las condiciones de funcionamiento de cada una de estas series experimentales. Un aspecto importante a destacar es la diferencia en los flujos de agua entre las series. Este factor es clave para explicar los resultados del estudio. Otro aspecto a resaltar es la pequeña diferencia en superficie del radiador de aluminio (4.41 m^2) contra el radiador comercial (4.8 m^2).

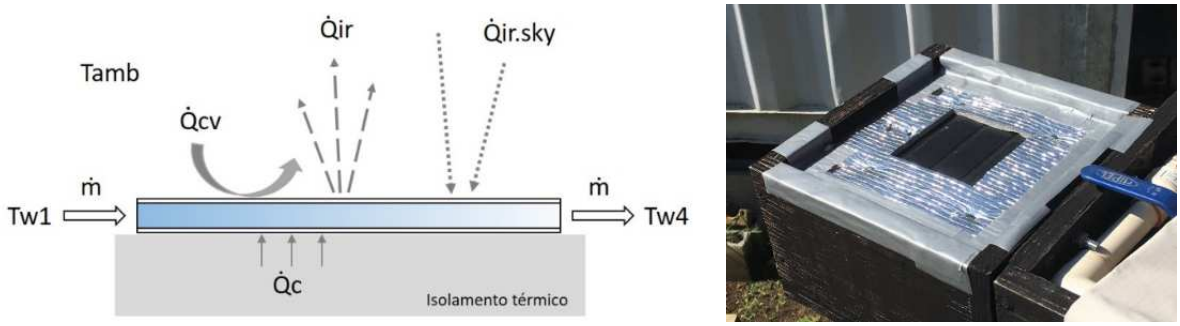
Para el cálculo de $CP_{SR/SC}$ en la Serie-18 y la Serie-20 se han considerado únicamente los periodos de las noches con funcionamiento del Circuito-1, esto ha sido de 6:25h, 5:35h, 5:10h, 4:40h, 1:50h, en la Serie-18 y de 7:00h, 5:40h, 5:00h y 5:30h en las cuatro noches analizadas de la Serie-20.

Tabla 1 – Series experimentales realizadas con los dos tipos de radiadores: condiciones de operación.

Serie	**Periodo**		**Superficie radiador**	**Horas bombeo**	**Flujo de agua**	**Capacidad TES**	**Circuito**
N°	Noches	Fechas	m^2	h	l/h	l	
5	8	6-03 a 29-03-2022	4.41 3 pzas.	10	163	975	1
18	5	6-02 a 13-02-2023	4.8 8 pzas.	Variable	163	975	1
19	4	25-02 a 1-03-2023	4.8 8 pzas.	10	105	975	1
20	4	22-03 a 26-03-2023	4.8 8 pzas.	Variable	143	975	1

3.3. Indicadores de desempeño térmico y temperatura de referencia

El objetivo fundamental de los radiadores expuestos a la bóveda celeste, como componente del RC-HCS en modo de enfriamiento, es el de enfriar un fluido (agua) que pasa a través del mismo. Este enfriamiento se logra mediante la disipación de calor en la superficie expuesta del radiador, debido al balance negativo que se establece una vez que la radiación de onda larga que emite el radiador es superior a la suma del flujo radiativo y convectivo que recibe (Fig. 4a). Este balance negativo se observa normalmente en las horas de la noche en la gran mayoría de las superficies expuestas a la bóveda celeste.



(a) (b)

Figura 4. (a) Sección transversal de un radiador e intercambios de energía durante la noche. (b) Dispositivo para la medición de la temperatura de estancamiento de una lámina metálica (Tr).

El desempeño térmico de los radiadores se ha evaluado mediante análisis de dos indicadores, estos son: la potencia de enfriamiento radiativo nocturno del radiador por unidad de área ($CP_{SR/SC}$ - W/m^2) y el índice de eficiencia de enfriamiento durante el ciclo nocturno (IEE - adimensional).

3.3.1. Potencia de enfriamiento radiativo nocturno ($CP_{SR/SC}$)

La potencia de enfriamiento radiativo nocturno de un radiador puede ser definida por calorimetría como la pérdida de calor del fluido de trabajo entre la entrada y la salida del radiador dividida por el área de apertura del mismo radiador (ERELL; ETZION, 2000), expresada como:

$$CP_{SR/SC} = \dot{m} * cp * \Delta T / A \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde $CP_{SR/SC}$ (W/m²) es la potencia instantánea de enfriamiento del radiador por unidad de área, ṁ (kg/s) es el caudal másico o flujo de agua, cp (J/kg.K) es el calor especifico del agua, ΔT (K) es la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del radiador y A (m²) es el área superficial del radiador.

De acuerdo con el esquema de intercambios de energía de la Figura 4a, si se desprecia el flujo de calor por conducción a través de la superficie inferior del radiador en contacto con la lámina de poliestireno, el balance térmico del sistema, en un momento dado (régimen estático), puede expresarse como:

$$\dot{m} * cp * (Tw1 - Tw4) \pm \dot{Q}cv - \dot{Q}r + \dot{Q}rsky = 0 \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde *Tw*1 (°C) es la temperatura del agua antes de ingresar al radiador, *Tw*4 (°C) es la temperatura del agua a la salida del radiador, $\dot{Q}cv$ (W/m^2) es la transferencia de calor por convección que puede ser positiva o negativa, lo que depende de las temperaturas del ambiente y del radiador, $\dot{Q}ır$ (W/m^2) es la transferencia de calor por radiación de onda larga desde la superficie del radiador hacia la bóveda celeste y $\dot{Q}ır.sky$ (W/m^2) es la transferencia de calor por radiación de onda larga recibida por el radiador proveniente de la atmosfera. Podemos expresar que la potencia instantánea de "enfriamiento radiativo nocturno" del radiador $CP_{SR/SC}$ es igual al balance térmico de los últimos tres términos de la ecuación 2, esto es:

$$CP_{SR/SC} = \pm\dot{Q}cv - \dot{Q}ır + \dot{Q}irsky = \dot{m} * cp * (Tw1 - Tw4) \qquad \text{Ecuación 3}$$

Para un radiador convencional, el flujo neto de radiación de onda larga desde la superficie del radiador puede ser expresado de forma linealizada utilizando la ley Stefan-Boltzmann (MARTIN, 1989):

$$\dot{Q}ır - \dot{Q}irsky = 4\varepsilon_s\sigma T_{amb}^3\left(T_s^4 - T_{sky}^4\right) \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde, ε es la emisividad/absortividad del espectro de radiación de onda larga de la superficie del radiador, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67*10^{-8}$ W/m^2.K^4), *Tamb* es la temperatura del ambiente, *Ts* es la temperatura de la superficie del radiador y *Tsky* es la temperatura efectiva del cielo. El flujo de calor por radiación de onda larga desde la superficie del radiador será mayor en la medida que la emisividad de la superficie sea grande y que la diferencia entre las temperaturas sea importante. Para una temperatura dada del radiador cuanto más claro, menos nubosidad y menor cantidad de agua total precipitable tenga la atmosfera, mayor será el flujo neto de enfriamiento.

En síntesis podemos decir que el potencial de enfriamiento radiativo nocturno de los radiadores es afectado por parámetros relativos a: 1. las características físicas del radiador tales como la emisividad de la superficie y la cantidad de área expuesta del radiador en contacto con el fluido de trabajo; 2. las condiciones cambiantes del ambiente como la velocidad de viento, la transmisividad atmosférica (que depende de la nubosidad, tipo y altura de nubes y cantidad total de agua precipitable (TPW)), temperatura y humedad del ambiente; 3. las condiciones de funcionamiento como el flujo de agua y la temperatura del agua a la entrada del radiador. Debe enfatizarse que la potencia de enfriamiento radiativo nocturno es tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperatura del agua entre la entrada y la salida del radiador.

3.3.2. Índice de eficiencia de enfriamiento (IEE)

El índice de eficiencia de enfriamiento es definida en este trabajo como el cociente de la diferencia de temperatura del agua entre la entrada y la salida del radiador (DTw) y la diferencia entre las temperaturas del agua a la entrada del radiador y la temperatura de estancamiento (Tr) que representa la depresión máxima que podría alcanzarse, esto es:

$$IEE = DTw/DTrw \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde DTw = Tw1-Tw4 y $DTrw$ = Tw1-Tr

3.3.3. Temperatura de estancamiento o de lámina metálica (Tr)

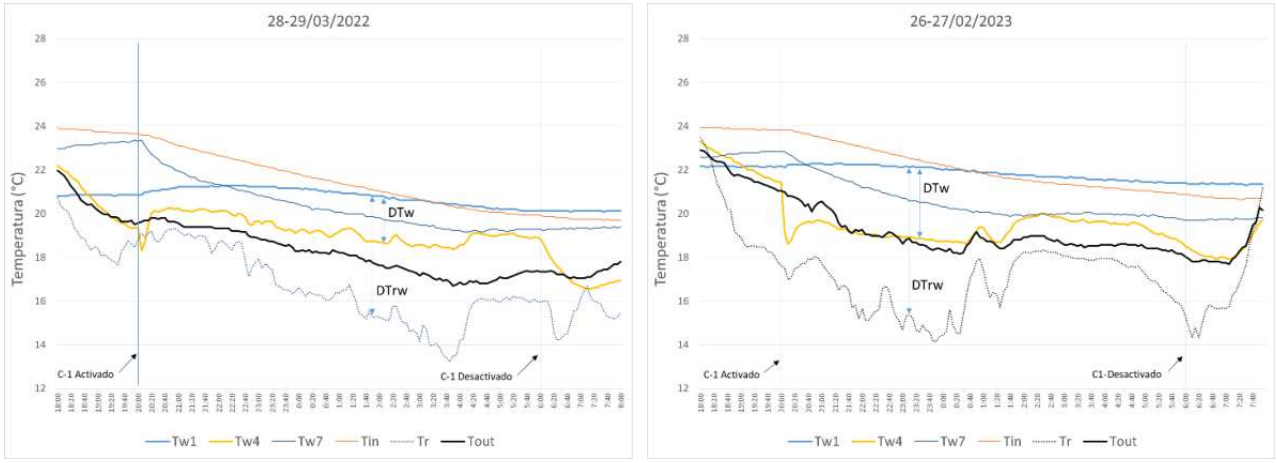
Una temperatura de referencia que resulta de gran importancia es Tr. La temperatura de estancamiento de un radiador metálico expuesto al cielo y ventilado es la temperatura mínima que puede alcanzar el radiador y se puede calcular en función de las temperaturas del aire y del cielo, la nubosidad o simplemente puede ser medida, como ha sido el caso. Debido a la dificultad para obtener información sobre la nubosidad nocturna del lugar, para calcular la temperatura efectiva de cielo (Tsky), en este estudio, ha sido medida la temperatura de estancamiento de una placa metálica (Tr) expuesta al cielo y aislada en su parte inferior (Figura 4b), y la diferencia entre la temperatura do aire y la placa metálica (DTr) es usada como un indicador del potencial climático de enfriamiento radiativo nocturno (GONZALEZ; KRÜGER, 2022).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se presentan, para cada serie experimental, los resultados del estudio en términos de Potencia de enfriamiento ($CP_{SR/SC}$ - promedios y máximos), Índice de Eficiencia de Enfriamiento (IEE y desviación estándar en cada Serie) y las diferencias de temperaturas que permiten el cálculo de los indicadores de desempeño y/o que explican su comportamiento, como son: la diferencia entre temperatura del ambiente y temperatura de estancamiento (DTr), la diferencia de temperatura del agua entre entrada y salida del radiador (DTw) y la diferencia entre temperatura de entrada al radiador y temperatura de estancamiento (DTrw).

Tabla 2 – Resultados de desempeño térmico y parámetros de referencia en Series experimentales estudiadas.

Serie	**Flujo de agua**	**DTr**		**DTrw**	**DTw**	**$CP_{SR/SC}$**		**IEE**	
N°	l/h	Prom -K	Max -K)	K	K	Prom -W/m2	Max -W/m2	Prom	DesvEst
5	163	1.4	2.6	3.65	1.4	**56.5**	84.5	**0.39**	0.09
18	163	2.1	3.0	5.17	2.2	**90.8**	111.4	**0.43**	0.07
19	105	2.1	3.3	4.96	2.7	**71.6**	88.1	**0.57**	0.08
20	143	1.6	2.5	4.48	2.0	**74.2**	96.3	**0.46**	0.06



(a) (b)

Figura 5. Evolución de la temperatura interna (Tin) y externa (Tout), temperatura da placa metálica (Tr), temperaturas da agua en TES (Tw1), en la salida de SR/SC (Tw4) e RCM (Tw7), en modo de enfriamiento, con circulación de agua en Circuito-1. (a) SERIE-5, noche 28-29 de marzo de 2022, (b) SERIE-19, noche 28-29 de febrero de 2023.

En las figuras 5a y 5b se presentan, como ejemplo de comportamiento térmico de los dos tipos de radiadores, la evolución de las temperaturas durante la noche 28/29/03/2022 de la Serie-5 con 163 l/h de flujo de agua y la noche del 26-27/02/2023 de la Serie-19 con 105 l/h. En los dos casos se nota una muy estrecha relación a lo largo de la noche entre DTw y DTrw con R^2 de 0.733 y 0.837, y de DTw con DTr con R^2 de 0.807 y 0.848 respectivamente. En ambos casos se observa que los cambios importantes en Tr producen cambios igualmente significativos en DTw.

A estas dos noches corresponden $CP_{SR/SC}$ de 67.3 W/m^2 y 66.2 W/m^2 consecuencia de DTw de 1.57 K y 2.6 K y de sus diferentes flujos de agua (Series 5 y 19 respectivamente). Es de notar que si las condiciones de cielo a lo largo de la noche del 26-27/02/2023 hubieran sido semejantes a la primeras horas, el promedio de DTw hubiera sido mucho mayor y como consecuencia también la potencia de enfriamiento. Durante los cuatro días de esta Serie-19 el promedio de $CP_{SR/SC}$ fue 71.6 W/m^2, mientras que, en la Serie-5 fue 56.5 W/m^2.

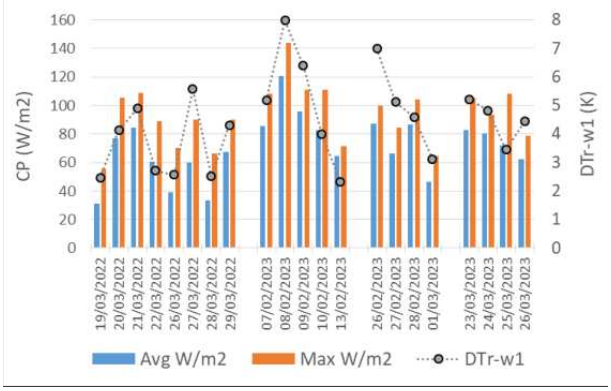


Figura 6. Valores de CP y relación con DTrw en cada día de las cuatro Series experimentales.

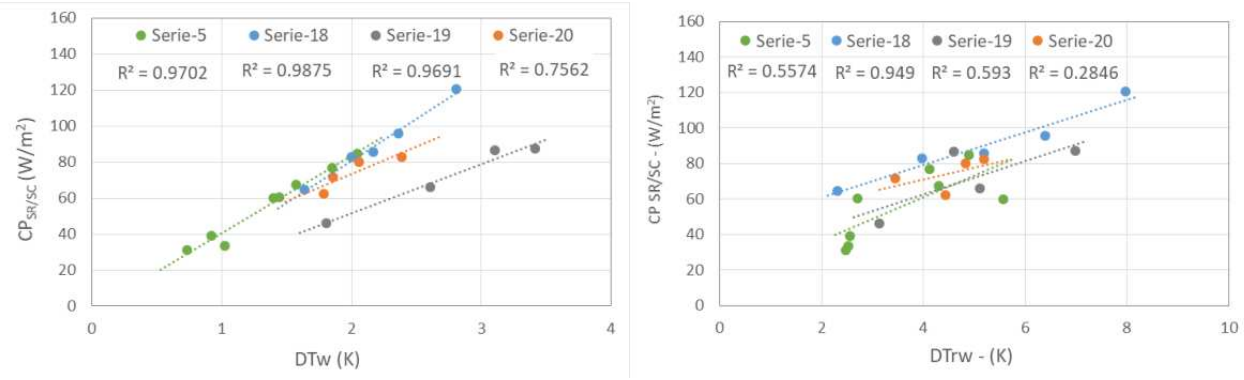
En la Figura 6 se presentan los valores promedios y máximos de $CP_{SR/SC}$ de cada día de las Series evaluadas y los valores de DTrw correspondientes. Si bien DTr y $CP_{SR/SC}$ presentan valores de correlación medio-altos en muchos de los días analizados, no es la referencia de mayor explicación de los resultados encontrados. DTrw explica mucho mejor los valores de CP correspondientes a cada día de las serie evaluadas, R^2 = 0.786. Es de notar la variabilidad de $CP_{SR/SC}$ con desviaciones estándar de entre 20 W/m2 y 29 W/m2 en cada una de las series experimentales lo que expresa lo cambiante de las condiciones atmosféricas en esta ciudad.

En relación con el Índice de Eficiencia de Enfriamiento (IEE), algo que se destaca al comparar estos dos días presentados en las Figuras 5a y 5b es la relación entre DTw y DTrw a lo largo de la noche. El IEE, que es el cociente de estos dos valores, es en promedio 0.39 en la Serie-5 y 0.57 en la Serie-19. Para un determinado tipo de radiador, un valor elevado de IEE se alcanza cuando el flujo de agua permanece mayor tiempo en el radiador, es decir, con menor flujo de agua. Esto se comprueba al analizar la correlación entre el flujo de agua y el IEE que presenta un coeficiente R^2 = 0.96 y toma en cuenta las cuatro Series analizadas. Los valores de desviación estándar de IEE se encuentran entre 0.06 (Serie-19) y 0.09 (Serie-5).

Debemos precisar que un elevado IEE no corresponde necesariamente a un elevado $CP_{SR/SC}$, por el contrario, para un mismo tipo de radiador y condiciones climáticas semejantes, al aumentar el flujo de agua aumenta la potencia de enfriamiento, pero disminuye el índice de eficiencia de enfriamiento, pues DTw será menor respecto a DTrw.

En síntesis, de los resultados de los IEE se pueden destacar que: 1. los promedios observados muestran una estrecha relación entre su valor y el flujo de agua en cada caso, cuanto mayor es el flujo de agua menor la

caída de temperatura y como consecuencia menor IEE; 2. Un menor flujo de agua conlleva a un mayor acercamiento a la temperatura de estancamiento y en oportunidades inferiores a Tout, por lo que la transferencia de calor por convección deja de ser una ventaja para representar un aporte de calor.



(a) (b)

Figura 7. (a) Líneas de tendencia de cada Serie experimental trazadas con las parejas de datos promedios de DTw y $CP_{SR/SC}$ de cada noche; (b) Líneas de tendencia trazadas con parejas de datos de DTrw y $CP_{SR/SC}$ de cada noche.

Los resultados en la Tabla 2 muestran que el RCC evaluado en las Series 18, 19 y 20 tiene promedios de $CP_{SR/SC}$ superiores al RA de la Serie-5. Sin embargo, sabemos que las condiciones climáticas de esos periodos no fueron iguales. De tal forma que los promedios de cada serie no pueden ser comparados directamente. Podemos compararlos al analizar la influencia del flujo de agua sobre $CP_{SR/SC}$ en cada serie mediante análisis de las líneas de tendencia de las correlaciones entre DTw y $CP_{SR/SC}$. Esto es lo que se muestra en la Figura 7a. Las líneas de tendencia de las Series 18, 19 y 20 tienen una diferencia y secuencia lógica que corresponde a la diferencia en el flujo de agua entre ellas.

Para un determinado tipo de radiador y un flujo de agua, la diferencia de temperatura del agua entre la entrada y la salida depende de las condiciones climáticas. Así, vemos en la Figura 7a la línea de tendencia trazada con los valores medios de DTw y la potencia de enfriamiento correspondientes a cuatro noches de la Serie-19 (8RCC y flujo de agua de 105 l/h) (R2 = 0.9691). Estos cuatro días presentan promedios de diferencias de temperatura entre entrada y salida del radiador entre 1,8 K y 3,41K. Ese mismo conjunto de radiadores en la Serie-20 y en la Serie-18, con flujos de agua de 142 l/h y 163 l/h producen líneas de tendencia con coeficiente R^2 de 0.919 y 0.963 respectivamente, permitiendo observar que, para una misma DTw, alcanzada con diferentes flujos de agua, la potencia de enfriamiento aumenta con el incremento del flujo de agua.

Ahora bien, cuando observamos en la misma Figura 7a las parejas de valores de DTw y $CP_{SR/SC}$ que corresponden a la Serie-5 (tres radiadores de aluminio 3RA y flujo de agua de 163 l/h), podemos ver que la línea de tendencia de dichos valores (R^2 = 0.9702) es muy próxima a la de la Serie-18. Se observa un comportamiento ligeramente superior en el radiador de aluminio que en el comercial. En el rango de DTw medidos en las Series 5 y 18 (0.7-2.8 K) la diferencia promedio de $CP_{SR/SC}$ es 5.3 % superior en el radiador de aluminio. La diferencia se anula cuando DTw es 3K.

Este es un resultado interesante pues el bajo costo y facilidad de operación, además de su aplicabilidad dual (calentamiento/enfriamiento) facilitan su uso como componente del RC-HCS. En principio con propiedades emisivas semejantes, aun cuando no se cuenta con caracterización precisa de la emisividad de ninguno de los dos materiales. El análisis de la geometría de las superficies de los dos radiadores permite considerar al de aluminio como una superficie plana, aun cuando presenta tres pequeñas depresiones de 1 mm. En cambio, la superficie del radiador plástico está constituida por una sucesión de secciones de medio cilindro de unos 8.5 mm de diámetro y una sección horizontal de 1.5 mm. En el primer caso, 1 m^2 de radiador equivale a 1m^2 de superficie expuesta e intercambiando calor por radiación y convección. En el segundo caso 1 m^2 de radiador equivale a 1.48 m^2 de superficie para el intercambio térmico, es decir 48% más superficie para disipar calor por radiación y convección que el radiador de aluminio.

Finalmente, en la Figura 7b se presentan las líneas de tendencia con coeficientes R^2 correspondientes a las correlaciones entre DTrw y $CP_{SR/SC}$. Se observa que para un mismo flujo de agua y una misma DTrw con los radiadores comerciales alcanzan valores de $CP_{SR/SC}$ superiores a los de aluminio. Esto muestra que el radiador de aluminio para conseguir una potencia de enfriamiento semejante al comercial necesita mayor DTrw. Para un mismo DTrw y flujo de agua la diferencia promedio es de aproximadamente 20 W/m^2. Así pues, la potencia de enfriamiento nocturno del radiador comercial de polipropileno se estima por estos resultados entre 66% y 9% superior al de aluminio en el rango de DTrw entre 2K y 7K.

5. CONCLUSIONES

La potencia de enfriamiento promedio calculada a partir de registros de cuatro Series experimentales muestra valores de $CP_{SR/SC}$ superiores en los casos del RCC (90.8, 71.6 y 74.2 W/m^2) que en caso del RA (56.5 W/m^2). Sin embargo, el análisis de regresión lineal entre DTw, DTrw y CP para el conjunto de las Series permiten concluir que, para un flujo de agua de 163 l/h e iguales condiciones climáticas en términos de DTrw, la potencia de enfriamiento nocturno del radiador comercial de polipropileno es en promedio 29% superior al de aluminio en el rango de DTrw entre 2K y 7K.

La magnitud del flujo de agua en operación tiene una influencia muy importante en el desempeño térmico de los radiadores. La potencia de enfriamiento aumenta al aumentar el flujo, pero al mismo tiempo disminuye el IEE al producirse una reducción de DTw.

El colector comercial de polipropileno utilizado como radiador es una buena alternativa por su bajo costo y desempeño térmico superior al radiador de aluminio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERDAHL, P.; MARTIN, M.; SAKKAL, F. Thermal performance of radiative cooling panels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 26, no 6, p. 871-880, 1983.

CATALANOTTI, S., CUOMO, V., PIRO, G., RUGGI, D., SILVESTRINI, V., & TROISE, G. The radiative cooling of selective surfaces. **Solar Energy**, 17(2), 83-89, 1975

DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union.

ERELL, E; ETZION, Y. Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors, **Building and Environment**, 35 (4), 297–305. 2000.

ETZION, Y.; ERELL, E. **A Hybrid Radiative-Convective Cooling System for Hot-Arid Zones**. In Clean and Safe Energy Forever. Pergamon Press, p. 477-481, 1990.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

GIVONI, B. Solar heating and night radiation cooling by a roof radiation trap. **Energy and buildings**, vol. 1, no 2, p. 141-145, 1977.

GONZALEZ CRUZ, E.; KRÜGER, E. Experimental study on a low energy radiant-capacitive heating and cooling system. **Energy and Buildings**, 255, 111674, 2022.

GONZALEZ-CRUZ, E., KRÜGER, E., CARRARO, F., MORAES DE BEM, G., Moreira de Abreu, A., TRENTO, D. Implementação de um sistema de aquecimento e resfriamento radiante-capacitivo (RC-HCS) em uma câmara climática. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

GONZÁLEZ-TORRES, M., PÉREZ-LOMBARD, L., CORONEL, J.F., MAESTRE I.R., YAN, D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. **Energy Reports**, Volume 8, Pages 626-637, 2022.

HU, M; PEI, G; WANG, Q; LI, J; WANG, Y; JI, J. Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system. **Applied Energy**, Volume 179, Pages 899-908, 2016.

IEA. **Cooling**. https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling (Accessed April 7, 2023).

IEA. **Space Cooling**, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/space-cooling, License: CC BY 4.0. 2022 (Accessed April 7, 2023).

LU, X., XU, P., WANG, H., YANG, T., HOU, J. Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 65, 1079-1097, 2016

MATSUTA, M., TERADA, S., ITO, H. Solar heating and radiative cooling using a solar collector-sky radiator with a spectrally selective surface. **Solar Energy** Volume 39, Issue 3, Pages 183-186, 1987.

MICHELL, D.; BIGGS, K. L. Radiation cooling of buildings at night. **Applied Energy**, vol. 5, no 4, p. 263-275, 1979.

RHEE, K.N., KIM, K.W. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. **Building and Environment**, 91, 166–190, 2015.

RHEE, K.N., OLESEN, B., KIM, K.W. Ten questions about radiant heating and cooling systems. **Building and Environment**, 112, 367-381, 2017.

SANTAMOURIS, M; ASIMAKOPOLOUS, D. **Passive cooling of buildings**. London: James and James, 1996.

VALL, S., CASTELL, A. Radiative cooling as low-grade energy source: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 77, p. 803-820, 2017.

VALL, S., MEDRANO, M., SOLÉ, C., & CASTELL, A. Combined radiative cooling and solar thermal collection: Experimental proof of concept. **Energies**, 13(4), 893, 2020.

YOUNG, D.A., WIJEWARDANE, S., STEFANAKOS, E., GOSWAMI, D.Y. Passive Radiative Cooling of Structures with Thick Film Nanocomposites. In **Proceedings** of the ISES Solar World Congress. 2021. p. 1146-1156.

LI, X., SHAO, S., HUANG, M., ZHANG, S., GUO, W. Integration of daytime radiative cooling and solar heating. **iScience,** 26, 105894, January 20, 2023.

MARTIN M. Radiative cooling. In: Cook J, editor. **Passive Cooling**, s.l. Cambridge, MA: The MIT Press; 1989.

AGRADECIMENTOS

Esta investigación se realiza en el ámbito de la CONVOCATORIA N° 11/2018 - PROPPG - Profesor Visitante (PV) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná - UTFPR, Curitiba, Brasil.