

EFFECTO DE LA REFLECTANCIA SOLAR DEL TECHO SOBRE LAS CARGAS DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL

EFFECT OF ROOF SOLAR REFLECTANCE ON THE HEATING AND COOLING LOADS OF A RESIDENTIAL BUILDING

Ricardez-Palma M.¹, Hernández-Pérez I.^{1*}

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1,
La Esmeralda, 86690 Cunduacán, Tab.
ivan.hernandezp@ujat.mx

Artículo Científico

Publicado: 15 de septiembre 2024

RESUMEN

Se analizó el efecto de aumentar la reflectancia solar del techo sobre las cargas de enfriamiento y calentamiento de un edificio residencial localizado en la República Mexicana. Se usó el programa de simulación EnergyPlus para estimar las cargas térmicas. Los resultados indican que, considerando el incremento de la carga de calentamiento, un techo con una reflectancia de 0.9 y sin aislamiento térmico puede reducir el consumo anual de energía por un factor que varía entre 16-45%. El uso de aislamiento beneficia solamente a edificios con baja reflectancia solar, ya que en edificios con techos reflectivos el aislamiento térmico puede incrementar la carga de enfriamiento entre 5-14%. En todos los casos analizados, el uso de materiales reflectivos en el techo proporcionó más ahorros de energía que el aislamiento térmico.

Palabras clave: reflectancia solar; techo fresco; cargas térmicas; aislamiento térmico.

ABSTRACT

The effect of increasing the solar reflectance of the roof on the cooling and heating loads of a residential building located in Mexico was analyzed. EnergyPlus simulation program was used to estimate the thermal loads. The results showed that the increase in reflectance of an uninsulated roof reduced annual energy consumption by a factor ranging from 16-45%. The use of thermal insulation was beneficial in buildings with low solar reflectance, because in buildings with cool roofs the thermal insulation increases cooling loads between 5-14%. In all cases, the use of reflective materials provided more energy savings than thermal insulation.

Keywords: solar reflectance; cool roof; thermal loads; thermal insulation.

INTRODUCCION

Actualmente, el sector de la construcción es uno de los principales consumidores de energía. Aunque los porcentajes varían de país a país, los edificios son responsables

aproximadamente del 40% de la demanda mundial de energía [1]. Una de las principales causas del consumo de energía en los edificios es el uso de equipos de aire acondicionado. Por lo tanto, para reducir el uso de energía utilizada para acondicionamiento de espacios, se deben explorar dos estrategias; la primera consiste en el aumento de la eficiencia de los equipos de aire acondicionado y la segunda consiste en mejorar el desempeño térmico de la envolvente de las edificaciones. Todos los componentes de la envolvente de un edificio contribuyen a su comportamiento térmico. Sin embargo, el techo es la superficie del edificio más expuesta a la radiación solar de modo que es una fuente importante de ganancias de calor. Varias tecnologías para enfriamiento pasivo y diseño eficiente de construcción están disponibles para los techos; el enfriamiento evaporativo (techo inundado), la vegetación (techo verde), el aislamiento térmico (techo aislado), recubrimientos reflejantes (techo reflectivo), etc. Un techo reflectivo es un techo convencional con un recubrimiento reflejante solar en la superficie exterior. Bajo el sol, la alta reflectancia solar (ρ) y la emisividad de onda larga (ϵ) del recubrimiento hacen que la superficie del techo se mantenga a una temperatura más baja que la mayoría de los techos convencionales. Al tener una temperatura más baja el flujo de calor que penetra al edificio se ve reducido considerablemente. Esta medida es probablemente más fácil de aplicar, ya que las propiedades ópticas se pueden controlar utilizando materiales reflejantes [2].

Muchos estudios de simulación se han llevado a cabo para analizar la influencia de aumentar la reflectancia de paredes y techos en el consumo de energía de edificios ubicados en diferentes países. Por ejemplo, Nutakki et al. [3] estudiaron el impacto del uso de pinturas frías y/o aislamiento térmico en el comportamiento y la demanda de energía de un edificio residencial de Portugal, en el verano. Los resultados se obtuvieron utilizando el programa ESP-r y se consideraron edificios con características térmicas que representan construcciones antiguas y nuevas. Se encontró que, con un incremento en el techo y la fachada, aumentar la reflectancia solar total (TSR) del 50% al 92% redujo la temperatura máxima en evolución libre del ambiente interior entre 2.0°C y 4.0°C en la construcción antigua (sin aislamiento térmico) y entre 1.2 °C y 3.0 °C en la construcción nueva (con aislamiento térmico). También se demostró con los resultados de la demanda anual de energía para la calefacción, una penalización máxima de alrededor del 30% cuando se utilizan pinturas reflejantes, consiguiendo de esta manera eliminar la necesidad del aire acondicionado. Athmani et al. [4] investigaron cómo reducir la carga de enfriamiento y mejorar el confort térmico en edificios residenciales en Biskra, Argelia mediante los techos reflejantes. Se realizó una campaña de mediciones durante cinco días de verano en módulos de prueba y se compararon tres técnicas de techos reflejantes: pintura blanca reflectante (CR), azulejos cerámicos blancos (CT) y un techo ventilado

combinado con pintura blanca reflectante (C-VR). Además, se realizó una simulación dinámica utilizando el software TRNSYS para evaluar la eficiencia de los techados. Los resultados mostraron que C-VR fue el más eficiente, reduciendo la temperatura interior en 5°C. La simulación reveló que un C-VR es la mejor solución, logrando una reducción del 45% en las horas de incomodidad térmica y disminuyendo las cargas de enfriamiento de 1121.91 kWh a 741.09 kWh comparado con un techo plano convencional. Xu et al. [5] investigaron los efectos de los materiales reflectivos en las temperaturas de las superficies y las temperaturas interiores de edificaciones en Guangzhou, China. Primero se evaluó el impacto de aplicar materiales reflectivos en los techos para reducir las temperaturas de la superficie del techo y del ambiente interior. Los resultados mostraron una reducción significativa de 13.5 °C en la temperatura de la superficie del techo y de 3.9 °C en la temperatura interior del último piso. Después se probaron cuatro arreglos, incluyendo un grupo de control sin materiales reflectivos y tres configuraciones con materiales reflectivos aplicados en las fachadas de los pisos tercero, segundo y primero, respectivamente. Los materiales reflectivos redujeron las temperaturas interiores en promedio en 1.9 °C, 0.8 °C y 0.5 °C para los pisos tercero, segundo y primero, siendo más efectivos en los pisos superiores que reciben más radiación solar. Cheng et al. [6] evaluaron el rendimiento térmico de edificios en Hefei, China, durante el otoño, al integrar materiales de cambio de fase (PCM) y

pintura reflectiva (CP) en la envolvente de los edificios. Se compararon las mejoras al aplicar PCM y CP de manera individual y combinada en diferentes ubicaciones (pared sur y techo). Los resultados indicaron que la combinación de PCM y CP fue más eficaz que cada uno por separado. Para edificios comerciales, aplicar PCM en la pared sur y CP en el techo mantuvo la temperatura interior en la zona de confort durante más de 10 horas al día, mientras que, en edificios residenciales, la combinación opuesta prolongó el confort térmico por más de 8 horas. Jiang et al. [7] investigaron el comportamiento térmico y los ahorros de energía de un techo reflectivo con material de cambio de fase (PCM) en un edificio de oficinas en Chongqing, China. Esta investigación combina mediciones experimentales con simulaciones energéticas. Se encontró que la temperatura de la superficie interior del techo reflectivo con PCM se mantuvo hasta 6.3°C más fría que la temperatura de un techo convencional. Asimismo, el techo reflectivo con PCM redujo la demanda de energía para enfriamiento de manera notable, ahorrando un total de 6437 kWh en la temporada de verano comparado con un techo con PCM pero sin recubrimiento reflectivo. Khorat et al. [8] estudiaron el efecto de incrementar la reflectancia solar del techo de los edificios residenciales en Dubai. Se realizaron simulaciones de los edificios usando el software CitySim. Se encontró que el aumento de la reflectancia de los techados de 0.2 a 0.8 redujo significativamente las necesidades de enfriamiento de los edificios. El estudio muestra que los

edificios residenciales con techados reflectancia de 0.8 experimentaron reducciones en la carga de refrigeración de 13.1 kWh/m² y 6 kWh/m² para los edificios sin aislamiento y aquellos con aislamiento, respectivamente. Thakur y Kumar [9] investigaron la influencia de las reflectancia y emisividad en la cantidad de energía utilizada por edificios residenciales ubicados en varias zonas en la India. En la primera parte, se evaluaron los impactos de los techos reflectivos utilizando simulaciones. En la segunda fase se realizó una comparación entre los posibles ahorros energéticos que se pueden obtener al cambiar de techos de baja reflectancia solar a techos de alta reflectancia solar. Se realizó un análisis de las características de reflectancia y emisividad del techo usando el software QUEST. Se encontró que los tejados altamente reflectivos, que tienen una reflectancia de 0.8 y una emisividad de 0.9, redujeron las cargas de enfriamiento en un 38% y un 20% en zonas cálidos y secos, entre un 21% y un 25 % en climas compuestos, entre un 17% y un 25% en climas cálidos y húmedos, y el 37% en climas más fríos. Jiang et al. [10] investigaron el comportamiento térmico y los ahorros de energía de un techo reflectivo con material de cambio de fase (PCM) en un edificio de oficinas en Chongqing, China. Esta investigación se desarrolló usando un método que combina mediciones experimentales con simulaciones energéticas. Los resultados mostraron que la temperatura de la superficie interior del techo reflectivo con PCM se mantuvo hasta 6.3°C más fría que la temperatura de un techo convencional.

Asimismo, el techo reflectivo con PCM redujo la demanda de energía para enfriamiento de manera notable, ahorrando un total de 6437 kWh en la temporada de verano comparado con un techo con PCM pero sin recubrimiento reflectivo.

Además de los estudios mencionados anteriormente, existe una extensa literatura sobre la determinación de las cargas de enfriamiento de edificios con techos frescos en una variedad de condiciones climáticas [11-14]. Sin embargo, la influencia de los techos frescos en el consumo de energía de enfriamiento ha sido poco estudiada para los edificios típicos de México. Aunque algunas normas de energía opcionales en México y guías para el ahorro de energía recomiendan utilizar colores claros en los techos [15-16], la norma obligatoria para los edificios residenciales no considera los diferentes valores de reflectancia de que un techo puede tener [17]. Por lo tanto, los constructores y los propietarios no están informados de los beneficios que ofrecen los techos frescos.

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de la reflectancia del techo sobre las cargas de enfriamiento y calentamiento del edificio de referencia considerado en la norma oficial mexicana NOM-020-ENER-2011 [17]. Se realizaron simulaciones para las ciudades representativas de los diferentes climas de México utilizando el programa EnergyPlus. La reflectancia solar del techo se modificó para el edificio de referencia considerando diferentes espesores de aislamiento térmico en el techo.

METODOLOGÍA

Para estimar los efectos del incremento de la reflectancia del techo en las cargas térmicas, se realizaron simulaciones con el programa EnergyPlus [19] en seis ciudades que representan a las diferentes condiciones climáticas de México de

acuerdo con lo reportado con el INEGI [18]. El clima, Grados-Día de Enfriamiento (GDE) y Grados Día de Calefacción (GDC) de las ciudades representativas se presentan en la **Tabla 1**. Los datos meteorológicos de las seis ciudades fueron obtenidos con el software Meteonorm [20].

Tabla 1. Características de las ciudades seleccionadas.

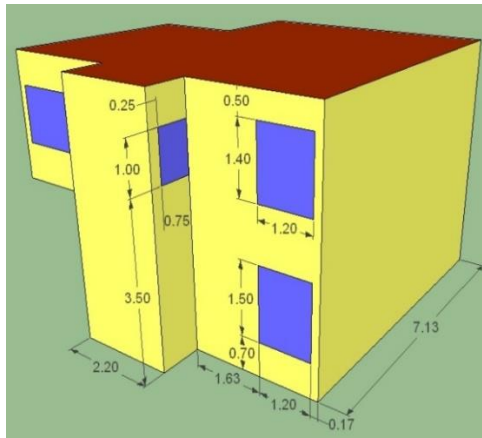
Ciudad	Tipo de clima	GDE (°C-día)	GDC (°C-día)
Villahermosa	Cálidohúmedo	1365.2	2.0
Mérida	Cálido sub-húmedo	1116.5	7.7
Monterrey	Seco	771.4	274.5
Hermosillo	Muyseco	1330.3	214.5
Tulancingo	Templadohúmedo	13.5	771.2
Ciudad de México	Templado sub-húmedo	13.8	770.0

El edificio residencial considerado para elaborar la NOM-020-ENER-2011 fue reportado por Heard [21] el cual es un edificio típico de dos plantas en México. Las dimensiones del edificio se presentan en la **Figura 1**. La fachada principal tiene una orientación norte. Las superficies este y oeste del edificio están en contacto con edificios idénticos al estudiado en este trabajo (el edificio es parte de una fila de edificios). Todas las paredes están hechas de ladrillo con un espesor de 14 cm, tienen una capa de mortero en el exterior y una capa de yeso en el interior, el espesor de las dos capas es 1.5 cm. El techo está hecho de 10 cm de hormigón y tiene una capa de mortero de 2 cm en el exterior y una capa de yeso de 1.5 cm en el interior. La reflectancia solar del techo fue modificada desde 0.1 hasta 0.9 para cuatro casos de techo: techo sin aislamiento, techo con 0.025 m de aislamiento, techo con 0.05 m de

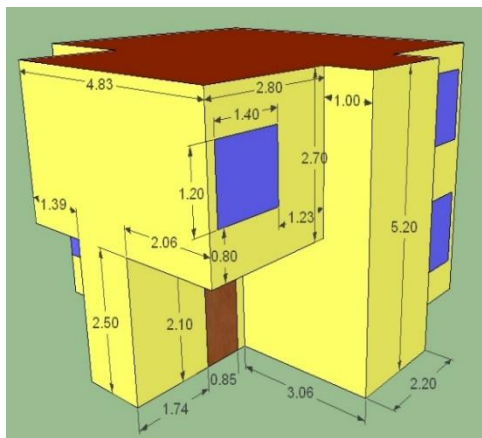
aislamiento y techo con 0.075 m de aislamiento.

El edificio tiene un diseño diferente de las ventanas de las cuatro fachadas. La fachada norte tiene dos ventanas en la planta baja y dos en la planta alta. La fachada sur tiene dos ventanas en la parte alta, una ventana y una puerta en la planta baja. Los lados Este y Oeste tienen una sola ventana. La **Tabla 2** describe las características de las puertas y las ventanas. El edificio tiene cuatro habitantes y se han considerado las ganancias internas debido a iluminación y aparatos de cocina. La climatización es un sistema central y funciona de lunes a viernes de 01:00 a 09:00 y de 15:00 a 24:00 horas; los fines de semana funciona todo el día (24 horas).

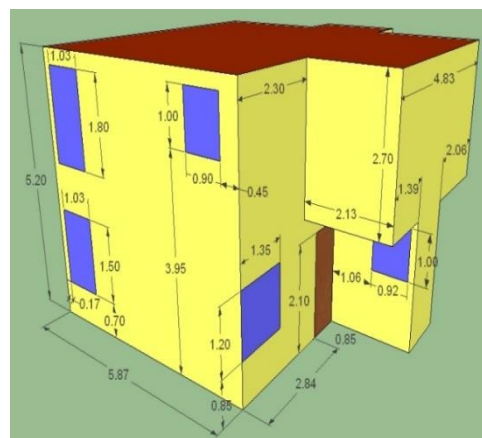
La **Tabla 3** resume la descripción del edificio residencial, sus parámetros y valores.



(a) Vistas sur y oeste



(b) Vistas este y sur



(c) Vistas norte y este

Figura 1. Dimensiones del edificio residencial.

VERIFICACION DE LAS SIMULACIONES.

Con el fin de verificar las simulaciones en EnergyPlus, se llevaron a cabo simulaciones de uno de los casos de construcción presentados en la norma ANSI/ASHRAE 140-2007 [22]. Seleccionamos el caso BESTEST900, lo que representa un edificio de masa térmica elevada. Todas las características del edificio se detallan en la norma, incluyendo las dimensiones, las propiedades de los componentes (paredes, techo, ventanas, piso, etc.), la generación interna, así como las características de los equipos de calefacción y refrigeración. Los datos climáticos también son proporcionados por el estándar ANSI/ASHRAE 140-2007, y representan un año meteorológico típico de Denver, Colorado

El modelo se creó, usaron las características del edificio y se desarrollaron las simulaciones. La **Tabla 4** muestra las cargas de calefacción y enfriamiento del edificio BESTEST900 proporcionada por el ANSI/ASHRAE 140-2007 y los obtenidos mediante el uso de EnergyPlus. Como puede verse, los valores obtenidos para las cargas térmicas están muy cerca de los valores dados en la norma, existe una desviación máxima de 2.3% de la carga de calefacción. Con este ejercicio de verificación, se garantiza que el programa de simulación está desarrollando cálculos correctamente y que el usuario puede analizar otros tipos de edificios.

Tabla 2. Descripción de las aberturas de las fachadas.

Fachada	Descripción	Material	A (m ²)	U (W/m ² K)
Norte	Puerta frontal	Madera	1.78	2.04
	Ventana 1	Vidrio	1.54	5.95
	Ventana 2	Vidrio	2.16	5.95
	Ventana 3	Vidrio	0.9	5.95
	Ventana 4	Vidrio	0.9	5.95
Sur	Puerta trasera	Madera	1.78	2.04
	Ventana 5	Vidrio	1.8	5.95
	Ventana 6	Vidrio	1.68	5.95
	Ventana 7	Vidrio	1.68	5.95
Este	Ventana 7	Vidrio	1.62	5.95
Oeste	Ventana 8	Vidrio	0.75	5.95

Tabla 3. Descripción del edificio residencial, parámetros y valores.

Descripción	Valor
Número de plantas	2
Área total	88 m ²
Altura de cada piso	2.5 m
Razón de ventilación	Edificio no ventilado
Infiltraciones	2 cambios de aire por hora
Horas de operación	Semana 1:00-9:00 & 15:00-24:00 Fin de semana 00:00-24:00
Cargas internas por persona (W/m ²)	0.1 (habitaciones), 0.15 (Sala), 0.1 (Cocina), 0.1 (Corredor)
Set point de enfriamiento	25 °C
Set point de calentamiento	18 °C

Tabla 4. Comparación de los resultados de las simulaciones y los valores presentados en [22].

Parámetro	ANSI/ASHRAE 140-2007	Presente trabajo	Diferencia porcentual
Carga de calentamiento anual	1,164 kWh	1,178 kWh	1.26 %
Carga de enfriamiento anual	2,683 kWh	2,746 kWh	2.34%

RESULTADOS

En la primera parte de los resultados se presenta el comportamiento de las cargas térmicas de la edificación ubicada en

Hermosillo, Sonora en función de la reflectancia solar y del espesor del aislamiento térmico del techo. Debido a que el clima en esta ciudad es cálido-seco, la carga de enfriamiento es mayor a la

carga de calentamiento. En la **Figura 2**, se puede apreciar que el aumento de la reflectancia en el techo tiene una influencia mayor en la carga de enfriamiento cuando la edificación no tiene aislamiento térmico. Aumentar la reflectancia desde 0.1 hasta 0.9 puede proporcionar una disminución en la carga de enfriamiento de 7,615 kWh (30%). Para valores de reflectancia menores o iguales que 0.6, el aislamiento térmico puede reducir la carga de enfriamiento.

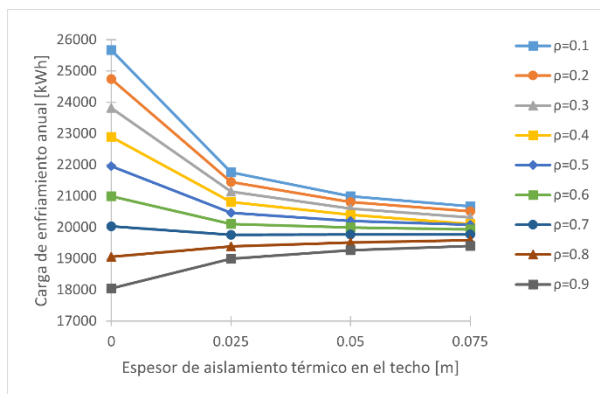


Figura 2. Cargas de enfriamiento de la edificación base localizada en Hermosillo, Sonora.

Por ejemplo, cuando $\rho = 0.1$ un aislamiento de 0.025 m puede reducir la carga de enfriamiento hasta 3,903 kWh (15%). Además, el aislamiento térmico tiene un efecto casi despreciable en la carga de enfriamiento anual cuando $\rho = 0.7$. Para los valores de reflectancia del techo de 0,8 y 0.9, el aislamiento tiene un efecto negativo porque la carga de enfriamiento anual se incrementa con respecto al edificio sin aislamiento. Con $\rho = 0.9$, el aislamiento con un espesor de 0.025 m incrementó la carga de enfriamiento anual hasta 928 kWh (5%). Este efecto es indeseable, y se produce porque durante la noche el aislamiento impide que el calor fluya del interior hacia

el exterior; por lo tanto, el edificio con aislamiento almacena más energía que el caso sin aislamiento provocando que el equipo aire acondicionado trabaje durante más tiempo.

La **Figura 3** muestra la carga de calentamiento del edificio ubicado en Hermosillo. Esta figura indica que las cargas de calentamiento para esta ciudad son muy pequeñas.

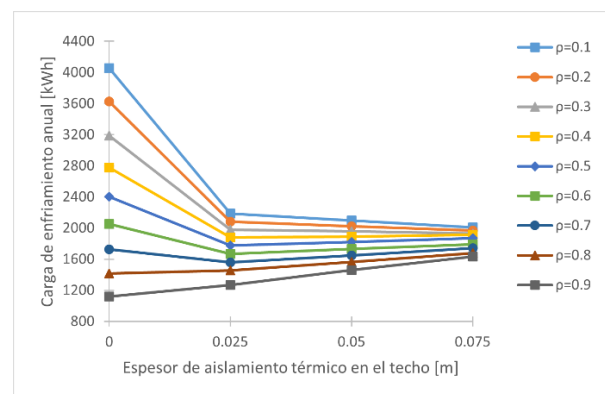


Figura 3. Cargas de calentamiento de la edificación base localizada en Hermosillo, Sonora

Esto se debe al clima que existe en esta ciudad. La carga de calentamiento se comporta de forma opuesta a la carga de enfriamiento cuando se modifica la reflectancia del techo. La carga de calentamiento disminuye cuando el techo tiene una reflectancia pequeña y tiene aislamiento con un espesor grande. Además, en la Figura se puede apreciar que, al aumentar la reflectancia del techado, la carga de calentamiento se incrementa, sin embargo, este incremento es mucho menor que la disminución de carga de enfriamiento. Por ejemplo, cuando se aumenta la reflectancia desde 0.1 hasta 0.9 en el caso de la edificación sin aislamiento, la carga de enfriamiento disminuye 7,615 kWh y la carga de

calentamiento aumenta solamente 691 kWh. Por lo tanto, al aplicar un recubrimiento reflectivo con $\rho = 0.9$ se pueden alcanzar un ahorro total de 6,924 kWh.

A continuación, se presenta el comportamiento de las cargas de enfriamiento y calentamiento anuales de la edificación ubicada en la Ciudad de México. En la **Figura 4** se puede apreciar que el aislamiento en el techo reduce la carga de enfriamiento cuando la edificación tiene valores bajos de reflectancia en el techo. Es decir, cuando el techo tiene una reflectancia de 0.1, 0.2, y 0.3, el aislamiento reduce la carga de enfriamiento anual. Por ejemplo, cuando $\rho = 0.1$ el aislamiento con un espesor de 0.025 m puede reducir la carga de enfriamiento 1,541 kWh (38%) con respecto al caso del techo sin aislamiento. Para valores de reflectancia dentro del intervalo $0.1 \leq \rho \leq 0.7$, un espesor de aislamiento de 0.025 m proporciona los ahorros más grandes en la carga de enfriamiento comparado con espesores mayores de aislamiento. Cuando el techo tiene una reflectancia elevada (valores de 0.8 y 0.9), el aislamiento incrementa la carga de enfriamiento. Cuando el aislamiento con un espesor de 0.025 m puede incrementar la carga de enfriamiento hasta 160 kWh (14%) cuando $\rho = 0.9$. Por otro lado, en la Figura 3 se muestra que el incremento de reflectancia desde 0.1 a 0.9 para el caso del techo sin aislamiento térmico proporciona un ahorro de 2,932 kWh (72%) en la carga de enfriamiento anual. Este ahorro es mayor

que el máximo proporcionado por el aislamiento térmico.

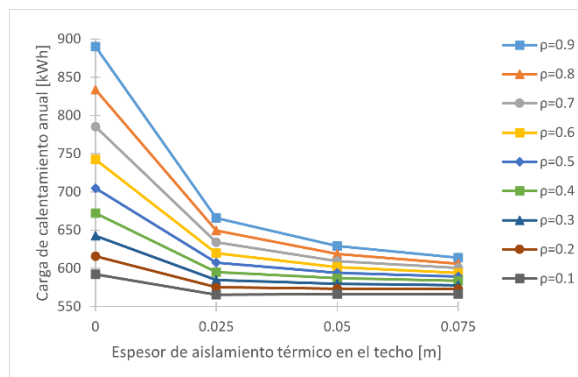


Figura 4. Cargas de enfriamiento de la edificación base localizada en la Ciudad de México

La **Figura 5** muestra el comportamiento de la carga de calentamiento anual de la edificación en la Ciudad de México. Se puede apreciar que la carga de calentamiento anual de los casos analizados anteriormente es más pequeña que la carga de enfriamiento. Sin embargo, debido a que el clima de la Ciudad de México es templado subhúmedo, la carga de calentamiento puede ser mayor que la carga de enfriamiento en esta ciudad. En el gráfico se puede apreciar que mientras mayor sea el espesor del aislamiento, mayores serán los ahorros de la carga de calentamiento; sin embargo, aumentar el espesor de 0.05 m a 0.075 m no tendrá un efecto significativo en la carga de calentamiento. Aumentar la reflectancia en el techo incrementa las cargas de calentamiento anual, para el caso sin aislamiento térmico aumentar la reflectancia de 0.1 hasta 0.9 incrementa la carga de calentamiento 795 kWh. Este valor es menor que el ahorro en la carga de enfriamiento proporcionado

cuando se aumenta la reflectancia. Entonces, el efecto de aumentar la reflectancia solar en la Ciudad de México resulta positivo tomando en cuenta la carga de enfriamiento y la carga de calentamiento.

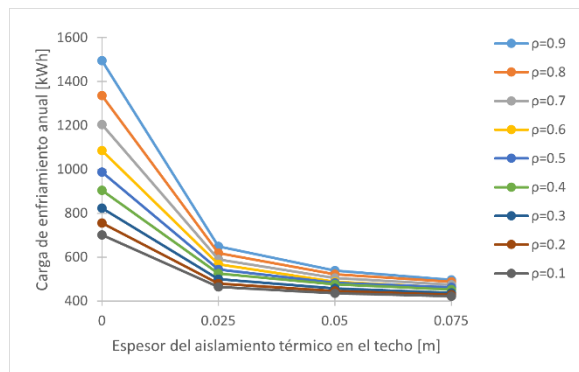


Figura 5. Cargas de calentamiento de la edificación base localizada en la Ciudad de México

Ahora se muestra el comportamiento de las cargas térmicas de la edificación ubicada en Tulancingo, Hidalgo en función de la reflectancia solar y el aislamiento térmico del techo. En esta ciudad tiene un clima templado húmedo de acuerdo con INEGI [18]. Al igual que los casos anteriores, las cargas de enfriamiento son más grandes que las cargas de calentamiento. En la **Figura 6** se presenta la carga de enfriamiento de la edificación analizada. Se puede apreciar que el aumento de la reflectancia en el techo tiene una influencia más grande en la carga de enfriamiento cuando el edificio no tiene instalado aislamiento térmico. Aumentar la reflectancia desde 0.1 hasta 0.9 proporciona un ahorro en la carga de enfriamiento de 3,883 kWh (53%). Para valores de reflectancia solar menores o iguales que 0.5, el aislamiento térmico puede disminuir la carga de enfriamiento, hasta 2,128 kWh (29%) cuando $\rho = 0.1$.

Además, el aislamiento térmico tiene un efecto casi despreciable en la carga de enfriamiento anual cuando $\rho = 0.6$. Para valores de reflectancia en el techo de 0.7, 0.8 y 0.9, el aislamiento tiene un efecto negativo porque la carga de enfriamiento anual se incrementa con respecto al edificio sin aislamiento. Por ejemplo, con $\rho = 0.9$, el aislamiento con un espesor de 0.025 m aumentó la carga de calentamiento anual hasta 470 kWh (14%). Este efecto no es deseable y se produce porque durante la noche el aislamiento disminuye la transferencia de calor a través del techo desde el interior hacia el exterior, de modo que se retiene más calor dentro del edificio en comparación con el caso sin aislamiento, aumentando de este modo el consumo de energía del equipo de climatización.

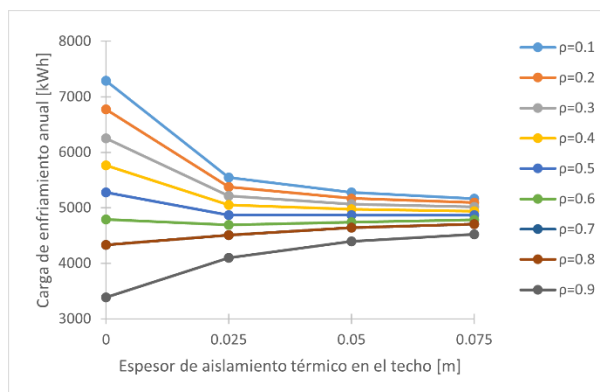


Figura 6. Cargas de enfriamiento de la edificación base localizada en Tulancingo, Hidalgo.

La **Figura 7** presenta la carga de calentamiento de la edificación en Tulancingo. Se observa que las cargas de calentamiento son más pequeñas que la carga de enfriamiento. La carga máxima de calentamiento (2,570 kWh) se presenta cuando la edificación no tiene aislamiento y tiene una reflectancia de 0.9 en el techo. Este valor no es despreciable si se

compara con la disminución de la carga de enfriamiento cuando se utiliza la misma configuración en el techo.

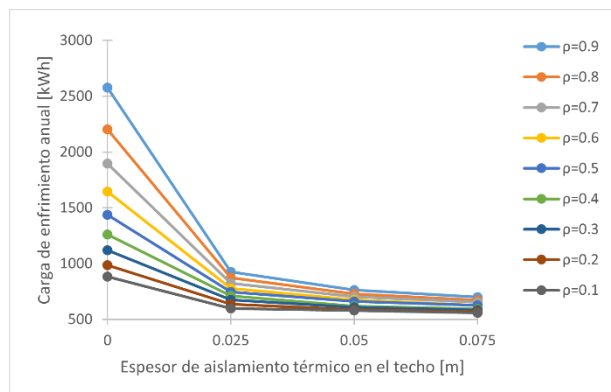


Figura 7. Cargas de calentamiento de la edificación base localizada en Tulancingo, Hidalgo.

Debido al tipo de clima que esta ciudad posee, se observa que la edificación residencial localizada en Tulancingo tiene unas cargas de calentamiento relativamente grandes. A pesar de ello, utilizar un recubrimiento con una reflectancia alta proporciona ahorros en las cargas térmicas. El ahorro total máximo que se puede alcanzar resulta de aplicar un recubrimiento con una reflectancia de 0.9. Dicho ahorro es igual

a la diferencia entre la reducción de la carga de enfriamiento.

De la misma forma que las tres ciudades consideradas anteriormente, se realizaron simulaciones para obtener la carga de enfriamiento y calentamiento de Villahermosa, Mérida y Monterrey.

La **Tabla 5** presenta un resumen de los resultados obtenidos de las simulaciones del edificio residencial en las seis ciudades representativas de los climas de México. Como se aprecia, el aumento de la reflectancia solar en los techos provoca mayores ahorros en las ciudades con clima cálido; sin embargo, en climas templados las edificaciones también se ven beneficiadas cuando se aumenta la reflectancia. Entonces, se puede concluir que utilizar un recubrimiento con una reflectancia $\rho = 0.9$ en el techo del edificio residencial puede proporcionar ahorros de energía entre 1,313 y 9,950 kWh/año, que traducidos a porcentaje se encuentran entre el 16 y el 45%.

Tabla 5. Efecto de utilizar un recubrimiento con reflectancia $\rho = 0.9$.

Lugar	Reducción carga de enfriamiento (kWh)	Aumento carga de calentamiento (kWh)	Ahorro neto (kWh)
Monterrey, NL	4,130	977	3,153 (16%)
Hermosillo, Son	7,615	691	6,924 (27%)
México, DF	2,932	795	2,137 (45%)
Tulancingo, Hgo	3,883	2,570	1,313 (16%)
Villahermosa, Tab	10,321	371	9,950 (32%)
Mérida, Yuc	7,141	222	6,919 (23%)

CONCLUSIONES

El efecto de la reflectancia solar del techo en las cargas de enfriamiento y calentamiento se analizó en un edificio residencial considerado en la NOM-020-ENER-2011 [17]. Las simulaciones dinámicas se llevaron a cabo utilizando EnergyPlus y los datos climáticos de varias ciudades representativas de las condiciones climáticas de México. Se encontró que para el edificio sin aislamiento del techo de un revestimiento fresco con $\rho = 0.9$ puede reducir el consumo de energía entre 1,313 y 9,950 kWh/año (16-45%). Las reducciones son más importantes en las edificaciones localizadas en zonas con clima cálido (Villahermosa, Mérida, Monterrey y Hermosillo). En los edificios localizados en climas templados (México y Tulancingo) tuvieron reducciones menores, pero no por ello menos importantes. Por lo tanto, se recomienda aplicar un recubrimiento con una reflectancia solar elevada a los techos de edificios localizados en la República Mexicana para disminuir el consumo de energía eléctrica y la emisión de gases de efecto invernadero.

REFERENCIAS

- [1] Bohorquez Castaneda, J. A., Orjuela Cruz, I. D., & Neuta Pinto, J. F. (2024). Diseño de un prototipo de aplicación que provee recomendaciones para la reducción del consumo de agua y energía mediante el uso de herramientas de IOT (Tesis de Ingeniería de Sistemas).
- [2] Sánchez-Amono, M. P., Sulaiman, H., & Gaggino, R. (2024). Tejas de caucho y plástico reciclado análisis de sus propiedades optotérmicas. *Revista Arquitectura (Bogotá)*, 26(1), 49-64.
- [3] Nutakki, T. U. K., Kazim, W. U., Alamara, K., Salameh, T., & Abdelkareem, M. A. (2023). Experimental investigation on aging and energy savings evaluation of high solar reflective index (sri) paints: A case study on residential households in the gcc region. *Buildings*, 13(2), 419. <https://doi.org/10.3390/buildings13020419>
- [4] Athmani, W., Sriti, L., Dabaieh, M., & Younsi, Z. (2022). The potential of using passive cooling roof techniques to improve thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid regions. *Buildings*, 13(1), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings13010021>
- [5] Xu, F., Hang, J., Wang, H., Gao, Z., Zhang, J. J., & Yang, J. (2024). An experimental study of the effects of using cool materials at different building heights on the indoor and outdoor environment. *Building and Environment*, 259, 111664. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111664>
- [6] Cheng, Y. X., Chen, X. N., Xu, B., Pei, G., & Jiao, D. S. (2024). Experimental analysis of building

- envelope integrating phase change material and cool paint under a real environment in autumn. *Journal of Cleaner Production*, 142674. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142674>
- [7] Jiang, L., Gao, Y., Zhuang, C., Feng, C., Zhang, X., & Guan, J. (2024). Experiment verification and simulation optimization of phase change material cool roof in summer--A case study of Chongqing, China. *Energy*, 130613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130613>
- [8] Khorat, S., Das, D., Khatun, R., Aziz, S. M., Anand, P., Khan, A. & Niyogi, D. (2024). Cool roof strategies for urban thermal resilience to extreme heatwaves in tropical cities. *Energy and Buildings*, 302, 113751. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113751>
- [9] Thakur, R., & Kumar, A. (2024). Exploring the Influence of Reflectivity and Emissivity on Energy Consumption Across Varied Climate Zones in India. *ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*, 1-35. <https://doi.org/10.1115/1.4066021>
- [10] Jiang, L., Gao, Y., Zhuang, C., Feng, C., Zhang, X., & Guan, J. (2024). Experiment verification and simulation optimization of phase change material cool roof in summer - A case study of Chongqing, China. *Energy*, 130613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130613>
- [11] Saber, H. H. (2024). Sustainability of cool and black roofs with high initial construction moisture. *Discover Applied Sciences*, 6(8), 402. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06094-8>
- [12] Ho, M. L., Yew, M. C., Yew, M. K., Saw, L. H., Yuen, R. K. K., Tan, W. C., & Yit, J. E. (2024). Numerical simulation of a pioneering cool roof system for Asia's roofing system reformation: The alternative cooling measure. *Alexandria Engineering Journal*, 102, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.072>
- [13] Li, Y., Tao, X., Zhang, Y., & Li, W. (2024). Combining use of natural ventilation, external shading, cool roof and thermal mass to improve indoor thermal environment: Field measurements and simulation study. *Journal of Building Engineering*, 86, 108904. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.108904>
- [14] Mohammed, A., Khan, A., Khan, H. S., & Santamouris, M. (2024). On the energy impact of cool roofs in Dubai. *Solar Energy*, 272, 112447. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112447>
- [15] PROY-NMX-AA-164-SCFI-2012, Edificación sustentable - criterios y requerimientos ambientales mínimos.

-
- [16] CONAFOVI, Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda, primera edición 2006.
- [17] NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones - Envoltante de edificios para uso habitacional, Norma Oficial Mexicana, 2011.
- [18] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Recursos naturales - climatología 2013. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/>.
- [19] (17) D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, J.Y. Huang, C.O. Pedersen, et al., EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings* 33 (2001) 319-331. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6).
- [20] Meteonorm, Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- [21] C. Heard, Notes on the typical house description as used with SUNCODE.
- [22] ANSI/ASHRAE 2007, standard 140-2007, Standard Method of Test for evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.