

Validación del rendimiento térmico en invierno del modelo de una vivienda de interés social

Validation of thermal performance during winter season in a low-income housing model

DOI: 10.32870/rvcs.v0i15.253

GABRIELA BACELIS

Universidad Autónoma de Baja California, México. ORCID: 0000-0001-6783-5916
Correo electrónico: gbacelis@uabc.edu.mx

KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES

Universidad Autónoma de Baja California, México. ORCID: 0000-0002-6744-8622
Correo electrónico: karen.martinez24@uabc.edu.mx

RAÚL PAVEL RUÍZ TORRES

Universidad Autónoma de Chiapas. ORCID: 0000-0001-5707-0411
Correo electrónico: raul.ruiz@unach.mx

Recepción: 5 de mayo de 2023. Aceptación: 5 de octubre de 2023.

RESUMEN

La demanda de vivienda en México promueve la producción en serie a partir del uso de sistemas constructivos y materiales que reducen los tiempos de construcción y sus costos, pero traen como consecuencia deficiencias térmicas, energéticas y de confort en los espacios. Un factor que determina el consumo de energía eléctrica es la envolvente arquitectónica. El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el rendimiento térmico de una vivienda de interés social, con envolvente de concreto, construida con un sistema de encofrado y un bloqueador nanotérmico como recubrimiento. El estudio se realizó durante el periodo invernal en Ensenada, Baja California, México, en un clima Bsk (mediterráneo seco). Para este estudio se registraron datos de temperatura y humedad relativa mediante instrumentos de medición. Para la validación del modelo se utilizó el simulador DesignBuilder®, con un motor de cálculo de EnergyPlus. La validación del modelo corresponde a un valor de 1.053 de error cuadrático medio. Los resultados indicaron

un rendimiento térmico deficiente al interior de la vivienda, el mayor decremento se registró en la habitación con orientación suroeste con un valor de 0.60 °C, y un retraso térmico de tres horas. La resistencia térmica no cumplió con lo que señala la norma. Se observó que el bloqueador actuó como un material frío. Se concluyó que las propiedades de los materiales, el bloqueador nanotérmico y la orientación de los espacios fueron factores clave en el rendimiento térmico para el periodo invernal. La principal limitación de la investigación fue la disponibilidad de los equipos de medición.

Palabras clave: vivienda, envolvente arquitectónica, consumo energético, rendimiento térmico, normativa, simulación energética.

ABSTRACT

In Mexico, there is a high demand for housing, which has led to the mass production of buildings using cost-effective construction systems and materials that reduce construction time;



however, this has resulted in thermal, energy, and comfort deficiencies in the living spaces. One factor that determines electrical energy consumption is the architectural envelope. This research aimed to evaluate the thermal performance of a low-income housing unit built using a formwork system coated with a nano thermal blocker. The study was conducted in Ensenada, Baja California, Mexico, during winter, in a climate classified as Bsk (dry Mediterranean). Temperature and relative humidity data were recorded and analyzed. DesignBuilder® with an EnergyPlus calculation engine was used to ensure model accuracy and precision. The validation of the model corresponds to a value of 1.053 root mean square error. The house's thermal performance is not ideal. The southwest room experiences the most significant temperature drop of 0.60°C, with a thermal lag of three hours. The thermal resistance didn't comply with the standard. Factors affecting winter thermal performance were material properties, space orientation, and nano thermal blockers. The limited availability of measurement equipment was a fundamental research limitation.

Keywords: dwelling, architectural envelope, energy consumption, thermal performance, regulations, energy simulation.

INTRODUCCIÓN

La energía se ha convertido en un tema de relevancia en todo el mundo, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), considera tres objetivos que abordan el impacto que provoca el uso de la energía en el medio ambiente. Ré y Filippín (2021) mencionan que en el orden global se ha identificado que los edificios intervienen directamente en los problemas generados por la energía, así como en sus efectos en el medio ambiente. Las edificaciones consumen el 40 % de la energía en el planeta y generan el 35 % de los gases que causan el efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático (Németh *et al.*, 2021). El sector residencial, actualmente, consume un

porcentaje considerable de energía (Albatayneh, 2021), anualmente la demanda de energía en el mundo se ha incrementado cerca del 1 % desde el año 2000. El incremento se debe a la necesidad de mantener los espacios interiores en condiciones de confort térmico (Daioglou *et al.*, 2022).

En México, durante el periodo de 1982 a 2020, la demanda energética del sector residencial presentó un crecimiento. De acuerdo con un análisis realizado a las tarifas de consumo, en las zonas cálidas la demanda fue mayor, a diferencia de las zonas templadas, en la zona norte del país, mientras que la zona sur y la zona del golfo presentaron un mayor consumo de energía (CONUEE, 2020). Además, en 1998 las viviendas fueron responsables del 9 % de las emisiones de dióxido de carbono (CONAFOVI, 2006). El incremento en el consumo de la energía también se ve reflejado en la economía, el Gobierno de México aporta anualmente más de 40 mil millones de pesos del erario público para subsidiar la energía utilizada con el fin de climatizar las viviendas en zonas de clima cálido (CONUEE, 2020). Esto afecta también en el gasto de las familias mexicanas, en el caso del estado de Baja California en 2012, se destinaba el 37 % del ingreso familiar para cubrir el consumo energético para la climatización de los espacios (Muñoz Meléndez *et al.*, 2012).

Un factor que determina el porcentaje de consumo de energía requerida para mantener los espacios térmicamente confortables es la envolvente arquitectónica, el diseño y componentes de cada uno de sus elementos se relacionan directamente con el consumo (CONUEE, 2017). La envolvente tiene una relación directa con el comportamiento del ambiente interior de los espacios, la interacción de los materiales que conforman la envolvente con las condiciones climáticas del exterior determina el grado de confort térmico y las propiedades termofísicas del material determinan su rendimiento térmico. Optimizar la envolvente arquitectónica permite reducir el uso de la energía y contribuir a mejorar las condiciones de confort térmico del ambiente interior de los espacios (Wang *et al.*, 2019). Por lo que al buscar un ahorro en el consumo de la energía es importante seleccionar de forma adecuada los

materiales de la envolvente, a partir de un enfoque que considere el comportamiento térmico (González, 2004).

En la literatura, se han identificado normativas establecidas por diversos países cuyo objetivo es regular el uso de la energía, así como disminuir los impactos que ocasiona al medio ambiente; estas normas también establecen la importancia de eficientizar la envolvente arquitectónica para dar solución al problema energético (GABC, 2018). Este artículo presenta los resultados obtenidos en la evaluación del rendimiento térmico de una vivienda de interés social construida con un sistema de moldes, la envolvente opaca es de concreto de alta densidad, los muros y la cubierta cuentan con un acabado de tipo bloqueador nanotérmico. El objetivo de la investigación fue evaluar el rendimiento térmico a través de los parámetros de retraso y decremento térmico de la temperatura al interior de la vivienda, a partir de los datos recolectados en la medición *in situ*. Además, se comparó la resistencia térmica del sistema constructivo con lo que indica la norma mexicana, la evaluación se realizó con los datos del día típico del periodo invernal en un ambiente con ventilación natural.-

PROBLEMÁTICA Y ESTADO DEL ARTE SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA ENVOLVENTE

La arquitectura originaria de México ha trascendido gracias a que sus características responden a las condiciones del contexto, ejemplo de ello son las construcciones con adobe y tejados para las zonas montañosas caracterizadas por mayor precipitación, en contraste, la construcción de viviendas en serie del periodo actual, producto de la demanda, se caracteriza por remplazar los métodos de la arquitectura vernácula con propuestas nuevas, como es el caso del sistema encofrado y los muros de menor espesor (Becerra-Santacruz & Lawrence, 2016). El concreto monolítico como sistema constructivo presenta una ventaja en la reducción del tiempo de construcción, este factor lo convierte en un sistema

con alto índice de selección para el desarrollo de viviendas en México; el concreto que se emplea tiene alta densidad, alta capacidad térmica y un valor de coeficiente de resistencia al flujo de calor bajo (Rojas *et al.*, 2016). Considerando que la envolvente es un elemento permanente dentro de la vivienda y que de ella dependen el uso de energía y el confort térmico (CONUEE, 2020), las propiedades termofísicas de los materiales que la conforman son determinantes en su rendimiento. Una envolvente con espesor delgado presenta una disminución en su capacidad para almacenar el calor y en un aumento en el uso de sistemas de climatización (Ostry & Charvat, 2013). Es por ello que existe un interés del Gobierno en el tema del cambio climático, específicamente lo relacionado a disminuir el consumo energético, mediante el uso de estrategias que tengan como objeto la eficiencia energética para minimizar los efectos ambientales generados por el aumento del consumo de energía en la edificación (Berrocal *et al.*, 2022).

La envolvente arquitectónica está compuesta de aquellos elementos que delimitan el espacio interior y lo separan del exterior (Fu *et al.*, 2020; Magadán *et al.*, 2016; Pawar & Kanade, 2018; Sadineni *et al.*, 2011). De acuerdo con Rojas *et al.* (2016), un factor significativo en el desempeño térmico es la manera en que se lleva a cabo la transferencia de calor a través de la envolvente arquitectónica. Rawat y Singh (2022) mencionan que las cubiertas se consideran como un elemento importante por la cantidad de radiación solar que reciben, ya que este elemento no solo protege el ambiente interior de las condiciones del clima exterior, sino que también permite modular las cargas de enfriamiento. Las propiedades termofísicas de los materiales, que son la conductividad, la densidad y el calor específico, determinan las ganancias de calor, el rendimiento térmico y las condiciones térmicas de los espacios interiores (Andoni & Wonorahardjo, 2018; Gunawardena *et al.*, 2017; Muhammad & Wonorahardjo, 2020). La conductividad, es la propiedad que tienen los materiales para conducir el calor (González, 2004), un rango mayor de esta propiedad provocará mayor carga de refrigeración (Muhammad & Wonorahardjo, 2020), la cualidad

de los materiales como almacenadores térmicos la proporcionan la densidad y el calor específico (Nayak & Prajapatl, 2006). Estas propiedades y el espesor de la envolvente son factores que determinan el retraso y el decremento térmico; un material con mayor espesor, mayor densidad y resistencia al calor tendrá un periodo más amplio de tiempo para que el flujo de calor atraviese la envolvente (El *et al.*, 2016). El confort térmico y la reducción de las cargas energéticas se relacionan también con el desempeño de los materiales de la envolvente (Borbon-Almada *et al.*, 2020).

El contexto climático es un factor que influye en el rendimiento térmico de los materiales (Morales-Inzunza *et al.*, 2023), y a su vez el rendimiento térmico determina cómo las temperaturas exteriores son transferidas a través de la envolvente hacia el interior (Nayak & Prajapatl, 2006). Existen dos métodos para evaluar el rendimiento: para las edificaciones que se encuentran en un estado estacionario, se evalúa a través de los factores de transmitancia térmica o valor U y de la resistencia térmica o valor R, para determinar un desempeño térmico como óptimo a partir de estos parámetros, el valor U debe tener un rango menor y el valor R debe tener un rango mayor (Barrios *et al.*, 2012). En México existe la norma NMX-C-460-ONNCE-2009 que establece el valor R de acuerdo a zonas térmicas, el objetivo de la norma es disminuir el uso de la energía para climatizar los espacios aumentando la habitabilidad de estos; para el caso de la ciudad de Ensenada, la norma determina para la cubierta una resistencia térmica de 2.30 m²K/W y para los muros 1.23 m²K/W dentro de la clasificación de habitabilidad, y para el ahorro de energía en las cubiertas un valor de 2.80 m²K/W y para los muros 1.80 m²K/W (DOF - Diario Oficial de la Federación, 2009). La producción de viviendas en México con el sistema constructivo de encofrado utiliza como material principal el concreto, debido a sus propiedades, los muros, losa y piso obtienen un valor U de 3 W/m²K a 4 W/m²K aproximadamente (Becerra-Santacruz & Lawrence, 2016).

Barrios *et al.* (2011) mencionan que el segundo método que se utiliza para determinar el desem-

peño térmico en edificaciones sin utilizar sistemas de climatización es mediante la estimación de los factores del decremento y el retraso térmico. El retraso térmico o *lag time* (LT por sus siglas en inglés) se define como la diferencia de tiempo en un intercambio térmico (Nayak & Prajapatl, 2006), para considerar un rendimiento térmico óptimo el valor del retraso térmico debe ser mayor, pero sin sobrepasar las doce horas, este desfase de tiempo puede darse entre las temperaturas máximas del ambiente interior y exterior (Barrios *et al.*, 2011) o entre las temperaturas de las superficies exterior e interior de la envolvente (Al-yasiri & Szabó, 2021). La ecuación para determinar el retraso térmico o LT se expresa de la siguiente manera:

$$LT = t(T_{in_{max}}) - t(T_{sa_{max}})$$

Donde LT es igual a la diferencia entre el tiempo en el que se obtiene la temperatura máxima interior $t(T_{in_{max}})$ y el tiempo en el que se obtiene la temperatura máxima del aire exterior $t(T_{sa_{max}})$ (Barrios *et al.*, 2011).

El decremento térmico o *decrement factor* (DF por sus siglas en inglés) se define como la disminución de las curvas del flujo de calor (Nayak & Prajapatl, 2006). Cuando la envolvente obtiene un valor de DF menor, es un indicativo de que su resistencia térmica es mayor frente a los cambios de temperatura del ambiente externo (Al-yasiri & Szabó, 2022). Una envolvente con multicapas y aislamiento contribuye en disminuir el decremento térmico, si el valor es menor el resultado es una estabilidad térmica en el interior de los espacios (Jannat *et al.*, 2020). El decremento térmico se puede considerar en las superficies de la envolvente (Al-yasiri & Szabó, 2021), así como en las temperaturas del ambiente interior y exterior. La ecuación para determinar el decremento térmico o DF se expresa de la siguiente manera:

$$DF = \frac{T_{in_{max}} - T_{in_{min}}}{T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}}$$

Donde DF es igual a la diferencia de la temperatura máxima interior $T_{in,max}$ menos la temperatura mínima interior $T_{in,min}$ entre la diferencia de la temperatura máxima del aire exterior $T_{sa,max}$ menos la temperatura mínima del aire exterior $T_{sa,min}$ (Barrios *et al.*, 2011). Un decremento en rangos menores y un retraso térmico con rangos mayores señala un desempeño adecuado (Barrios *et al.*, 2012).

De acuerdo con Nayak y Prajapatl (2006), las propiedades superficiales de los materiales de la envolvente como el color, la textura, la emisividad, el albedo, la rugosidad y la absorción también se consideran factores que intervienen en la transmisión del calor en las construcciones. Con respecto al color, las tonalidades claras favorecerán el reflejo de la radiación recibida del sol, mientras que tonalidades oscuras favorecerán la absorción (Bhargava *et al.*, 2017). La capacidad para ceder el calor que absorben los materiales se conoce como emisividad y la capacidad que tienen los materiales de reflejar la radiación se conoce como albedo, valores altos en estas dos propiedades son cualidades de los materiales fríos, la aplicación de estos materiales en la envolvente reduce el calor que se transmite a los espacios interiores (Alchapar *et al.*, 2012). En climas tropicales el 70 % del calor ganado al interior de las viviendas lo provee la cubierta (Al-Obaidi *et al.*, 2014); la cubierta se encuentra en constante intercambio de ganancias y pérdidas de calor debido a su exposición a la radiación del sol, por esto se considera como un elemento determinante en las condiciones de temperatura de los espacios interiores. El uso de techos fríos contribuye en reducir la transmisión de calor hacia el interior, favoreciendo el desempeño del elemento; los materiales utilizados en la construcción de losas, comúnmente, tienen rangos de emisividad de 0.85, reflectancia solar de 0.05 a 0.25 y algunos recubrimientos reflectantes están en un rango de 0.60 (Sadineni *et al.*, 2011).

Diversas investigaciones han demostrado que optimizar la envolvente contribuye a mejorar el rendimiento térmico, así como favorece las condiciones de confort térmico y el ahorro en el consumo de energía. Un estudio realizado por Alías y Jacobo (2011) en Argentina, cuya muestra fue de diez viviendas de interés social, indica que los materiales de la envolvente tienen relevancia en el consumo energético, la estrategia de mejora consistió en la aplicación de aislantes en los muros, lo que permitió obtener un ahorro en el consumo de energía. Otra investigación realizada en Coahuila, México, comparó el rendimiento térmico de dos habitaciones con diferente envolvente, la primera de concreto celular y la segunda de concreto de alta densidad que incluía un aislante, se observó un mejor rendimiento en la envolvente con aislante (Rojas *et al.*, 2016). Otro estudio sobre el desempeño térmico de la envolvente de viviendas de interés social realizado en Argentina concluyó que las mayores pérdidas térmicas se registraban en muros y losas, el mejoramiento de la envolvente a través de la aplicación de aislantes redujo las cargas para climatizar, también se identificó que el color es un elemento que interviene en el desempeño de la envolvente (Rizzarello *et al.*, 2018).

Una investigación realizada al norte de China tuvo como objetivo el mejoramiento de la envolvente de una vivienda rural, la aplicación de aislantes y el mejoramiento de las ventanas propició mayor reducción de las cargas de calefacción (Wang *et al.*, 2019). Otro estudio desarrollado en Brasil consistió en evaluar la aplicación de estrategias bioclimáticas en la envolvente, se demostraron los beneficios en el confort térmico y la eficiencia energética, además de generar una estabilidad en la temperatura interior (Lodete *et al.*, 2020). En Arabia Saudita se realizó una investigación de aplicación de estrategias pasivas a la envolvente para evaluar el desempeño térmico y el ahorro de energía en el consumo, se consideraron aislantes, acristalamientos, elementos para proyectar sombras y techos verdes, el mayor ahorro se obtiene del conjunto de

estrategias (Al-tamimi, 2022). Como se observa en los casos de estudio presentados, la envolvente es determinante en el rendimiento térmico, se observa el impacto que tiene la optimización de la envolvente en las condiciones ambientales de los espacios y en el ahorro de energía.

Para mejorar la envolvente arquitectónica se requiere de analizar diversas estrategias en diferentes periodos de tiempo y condiciones climáticas. Un simulador tiene la ventaja de realizar el análisis del desempeño térmico-energético tanto del edificio como de las estrategias propuestas en diferentes periodos, lo que permite realizar comparaciones para la selección de la propuesta adecuada, es por esto que la simulación de escenarios resulta ser una herramienta útil (Rizzarello *et al.*, 2018). La utilización de los simuladores tiene como objetivo conseguir la eficiencia energética de las edificaciones (Álvarez *et al.*, 2022). DesignBuilder® es un simulador que proporciona una amplia gama de datos, como son desempeño térmico-energético de las edificaciones, además de cargas de refrigeración y calefacción, así como ventilación e iluminación, entre otros; el programa trabaja con módulos a partir de un modelo en tres dimensiones y utiliza el motor de cálculo de EnergyPlus para realizar simulaciones avanzadas y en tiempo real, para la obtención de los datos climáticos en las simulaciones el programa utiliza archivos climatológicos como el EPW y TMY (Ordoñez, 2014).

Para optimizar la simulación de los escenarios, es importante realizar una validación del modelo, a través de una comparación entre los datos obtenidos en la simulación y los datos que fueron obtenidos en la parte experimental (Rojas *et al.*, 2016). El error cuadrático medio o Root Mean Square Error (RMSE por sus siglas en inglés) es un parámetro de validación, este considera la disociación que puede existir entre los datos recolectados *in situ* y los obtenidos en el simulador, el valor óptimo es de cero (Ali & Abustan, 2014). Como propuesta futura se plantea crear escenarios para evaluar estrategias constructivas que mejoren la envolvente. Otro de los objetivos de esta investigación fue la validación del modelo, esto permitirá dar una certeza de los datos obte-

nidos en estos escenarios futuros y en la selección de estrategias con mayor eficiencia.

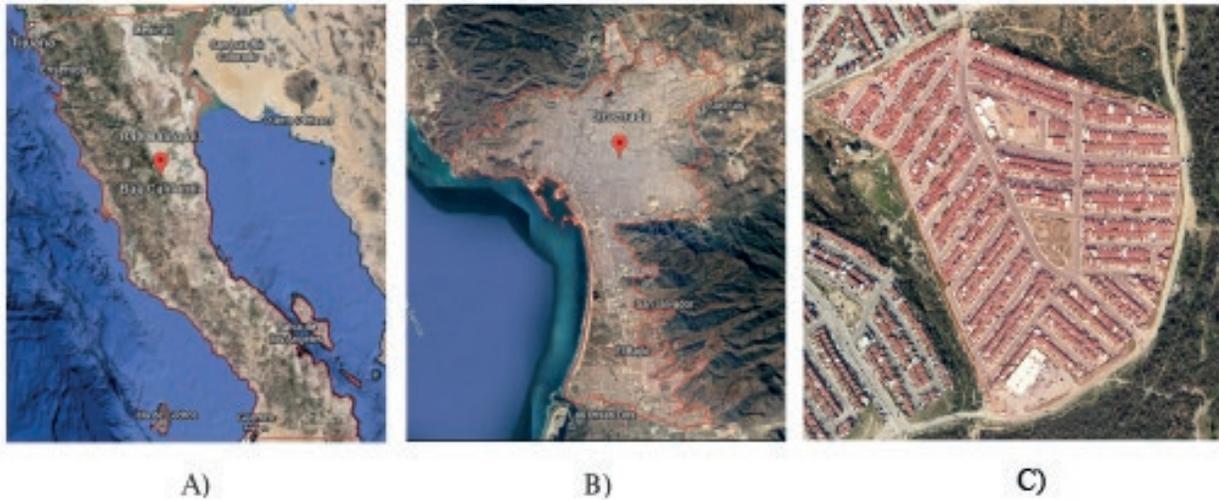
MÉTODO PARA EVALUAR DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA ENVOLVENTE EN VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL

La unidad de análisis consistió en una vivienda de interés social construida en serie de forma industrializada con un sistema tipo encofrado, de una envolvente opaca de concreto y un bloqueador nanotérmico como recubrimiento final. La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Ensenada, ubicada en el municipio de Ensenada en el estado de Baja California, al noroeste de la república mexicana (figura 1), con una localización geográfica de 31°51'30" latitud norte y 116°38'00" longitud oeste con una altitud de 16 m s. n. m. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, la ciudad se caracteriza por un clima Bsk que se considera como mediterráneo seco frío. Los meses más cálidos son julio y agosto con temperaturas promedio de 24 °C y sus meses más fríos son de diciembre a febrero con temperaturas promedio entre los 12 °C y 13 °C. La humedad relativa es constante durante todo el año, el mes de agosto registra el porcentaje más alto con 67 % y el mes de enero con 62 %, considerándose el más bajo.

La vivienda forma parte de un parque habitacional ubicado en la zona noroeste de la ciudad, se encuentra emplazada en un terreno de 7 m de ancho y 15 m de largo, cuenta con 52 m² de construcción y tiene una orientación noreste (figura 2). Su envolvente opaca es de concreto armado con un espesor de 10 cm y como acabado final exterior en muros y cubierta tiene un bloqueador nanotérmico de alta refractividad, de acuerdo al fabricante sus características crean en la superficie de la envolvente un acabado tipo espejo que reduce hasta un 80 % la conductividad, lo que favorece en la reducción del consumo de energía, fue aplicado como acabado tipo pintura y forma parte de una estrategia de adecuación pasiva para esta vivienda. La figura 3 muestra las propiedades termofísicas y superficiales de la envolvente opaca.

FIGURA 1

A) Estado de Baja California, México, B) Ciudad de Ensenada, C) Parque Habitacional Villas del Prado I



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth, recuperada el 7 de enero de 2021.

FIGURA 2

Panta arquitectónica de la vivienda

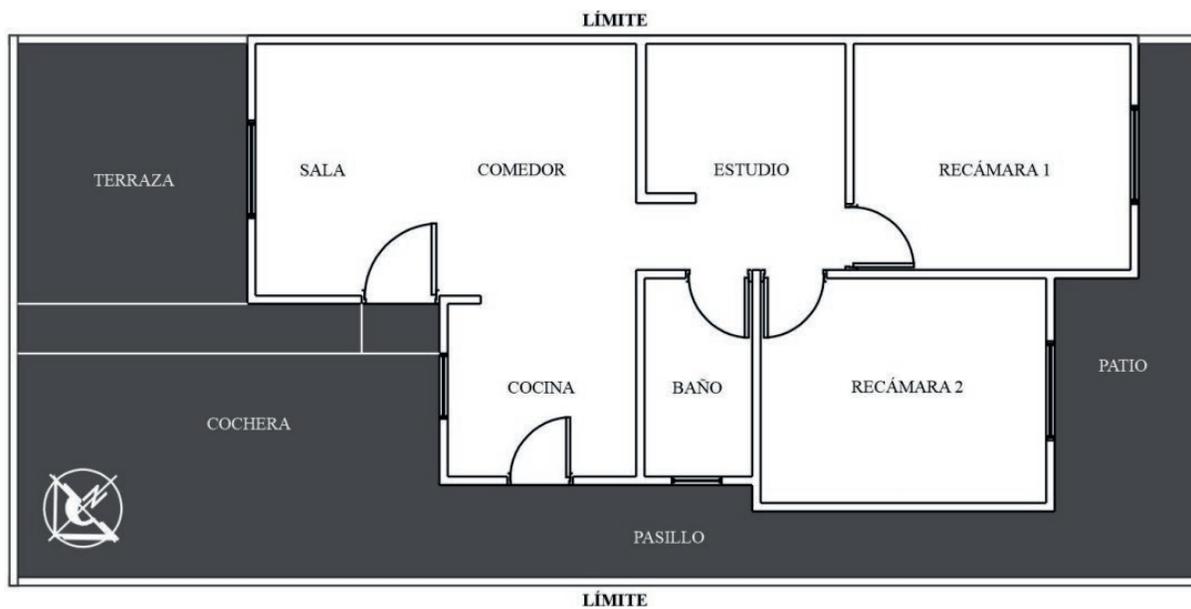
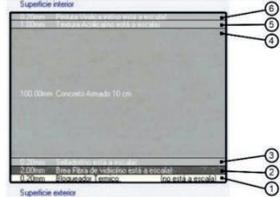
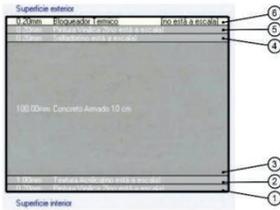


FIGURA 3
Propiedades termo físicas de la envolvente opaca exterior

Propiedades termo-físicas de los materiales						
Elemento	Capa (de la externa a la interna)	Material	Conductividad W/m-K	Calor específico J/kg-K	Densidad kg/m ³	Valor R
	6	Bloqueador Térmico	0.047	1675	50	
	5	Brea, fibra de vidrio asfaltada y mineralizada	0.17	1000	1050	
	4	Sellador	0.2	1500	1050	0.350
	3	Concreto Armado	1.74	1000	2300	m ² K/W
	2	Textura Acrílica	0.2	1500	1050	
	1	Pintura Vinílica	0.2	1500	1050	
	6	Bloqueador Térmico	0.047	1675	50	
	5	Pintura Vinílica	0.2	1500	1050	
	4	Sellador	0.2	1500	1050	0.240
	3	Concreto Armado	1.74	1000	2300	m ² K/W
	2	Textura Acrílica	0.2	1500	1050	
	1	Pintura Vinílica	0.2	1500	1050	

La fase de monitoreo se realizó durante el periodo invernal, del 6 de diciembre de 2021 al 15 de enero de 2022, este lapso se determinó a partir de definir los meses que corresponden a la temporada de invierno mediante el procesamiento de un archivo EPW generado en el programa Meteonorm. Un análisis en el consumo de energía eléctrica de la vivienda señaló que el bimestre de noviembre-enero que corresponde al periodo invernal presentó el mayor consumo, este dato puede considerarse como un indicativo del uso de medios activos para acondicionar el ambiente interior de los espacios en esta temporada. El monitoreo en la vivienda se realizó en condiciones de ventilación natural.

Como resultado de un análisis del recorrido solar, se determinó monitorear los espacios que corresponden a la sala comedor y a las habitaciones de la vivienda. La instalación de los instrumentos se realizó de acuerdo con lo que señala la norma ISO 7726 así como a recomendación de los expertos en el tema. Se utilizó una estación meteorológica modelo ACURITE ATLAS para la recolección de datos de las variables de temperatura y humedad relativa del ambiente exterior, este instrumento ofrece un rango de temperatura de

32 °F a 122 °F, 0 °C a 50 °C y una precisión de -40 °F a 158 °F (-40 °C a 70 °C) 1°F, así como un rango de humedad de 1-100 % HR y una precisión de 1-100 % HR ±1°F % HR, la recolección de datos estaba predeterminada cada diez segundos, su instalación fue en la superficie exterior de la cubierta de la vivienda (figura 4).

Se utilizaron dos registradores de datos Data Logger HOBO modelo MX1104, para monitorear datos de temperatura y humedad relativa del ambiente interior y exterior, este instrumento ofrece un rango de temperatura de -20 °C a 70 °C (-4 °F a 158 °F) y una precisión de ±.21 °C de 0 °C a 50 °C (±0.38 °F de 32 °F a 122 °F), en humedad relativa el rango es de 0 % a 100 % a -20 °C a 70 °C (-4 °F a 158 °F), y una precisión de ±2.5 % del 10 % al 90% (típico) hasta un máximo de ±3.5 %, incluida histéresis a 25 °C (77 °F); por debajo del 10 % y por encima del 90 % ±5 % típico, además, cuentan con un entrada analógica para termopares. Para medir la temperatura superficial de la cara exterior e interior de la losa se utilizaron termopares modelo SD-TEMP-20, con un rango de temperatura de -40 °C a 50 °C (-40 °F a 122 °F) en agua, -40 °C a 100 °C (-40 °F a 212 °F) en aire y una precisión de ±.15 °C de 0 °C a 50 °C (±.27 °F de 32 °F a 122 °F). Al

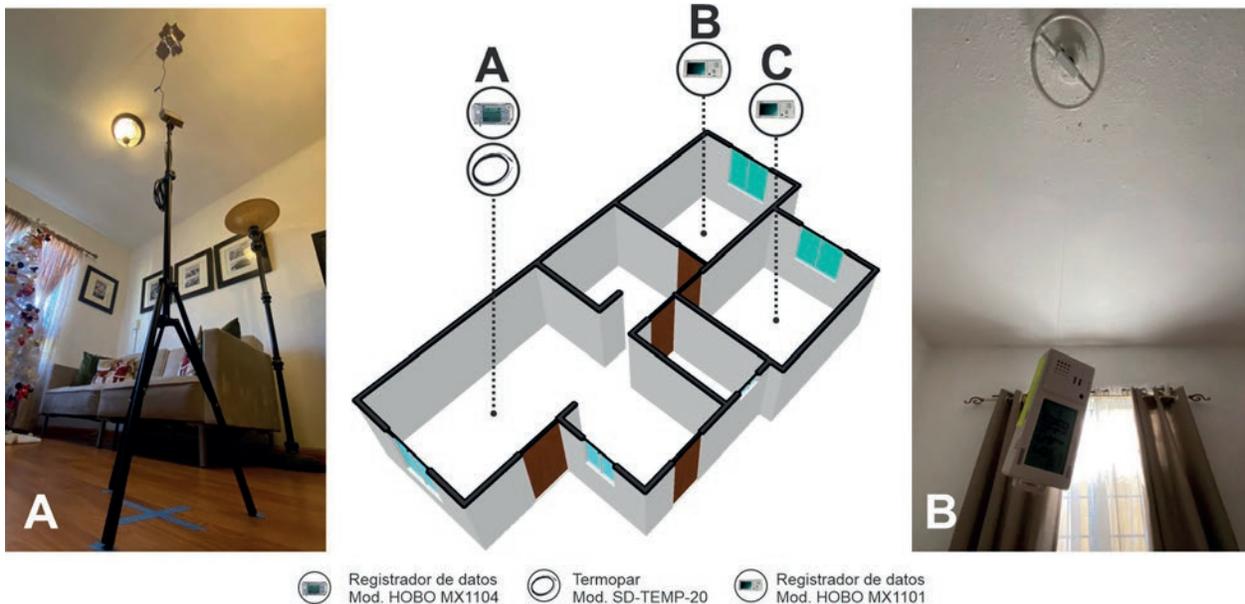
interior del espacio de la sala comedor se colocó uno de los registradores de datos, ubicándolo al centro geométrico del espacio a una altura de 1.30 m, otro registrador de datos se colocó en la parte exterior de la cubierta; de los termopares utiliza-

dos, uno se colocó en la superficie interior de la cubierta y otro en la parte exterior de la cubierta, ambos coincidiendo en su ubicación (figura 5). Los datos se recolectaron cada diez minutos.

FIGURA 4



FIGURA 5



A) Registrador Data Logger HOBO modelo MX1104 instalado al centro geométrico de la sala-comedor con un termopar modelo SD-TEMP-20 instalado en la superficie interior de la cubierta. B) Registrador Data Logger HOBO modelo MX1101 instalado al centro geométrico de la habitación 1. C) Registrador Data Logger HOBO modelo MX1101 instalado al centro geométrico de la habitación 2.

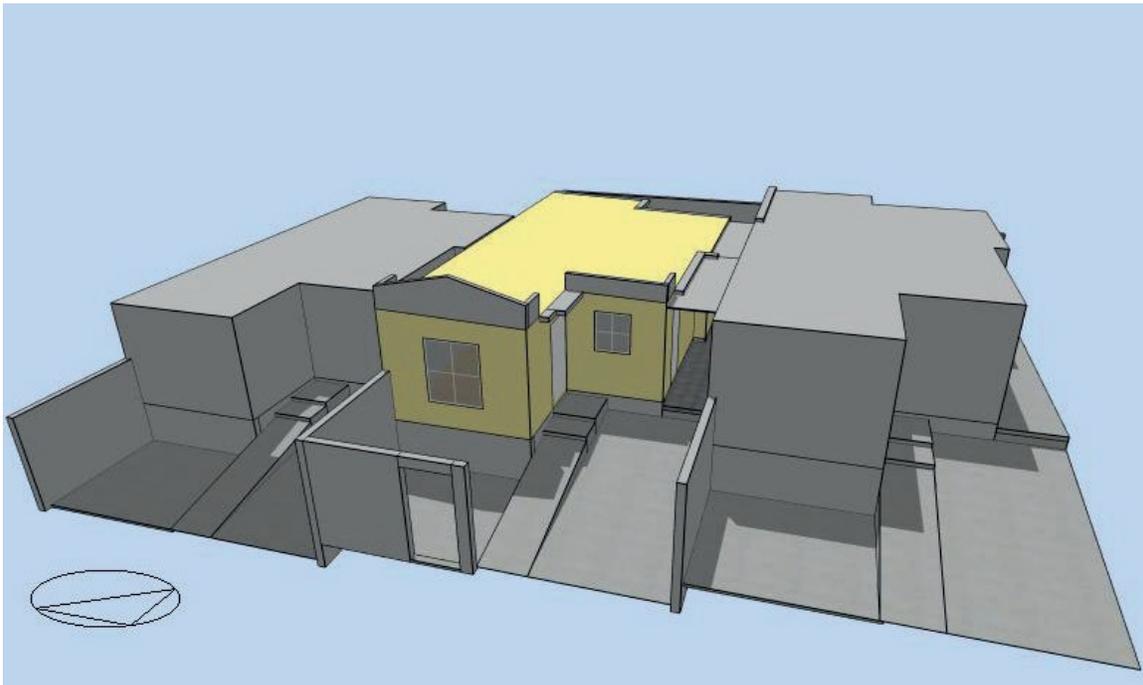
También se utilizaron dos registradores de datos Data Logger HOBO modelo MX1101 para las habitaciones, estos instrumentos registraron datos de temperatura y humedad relativa del ambiente interior, ofrecen un rango de temperatura $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-4\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $158\text{ }^{\circ}\text{F}$) y una precisión de $\pm 0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.38\text{ }^{\circ}\text{F}$ de $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $122\text{ }^{\circ}\text{F}$), el rango de la humedad relativa es de 1 % a 90 % (sin condensación) con una precisión de $\pm 2\%$ del 20 % al 80 % típico hasta un máximo de $\pm 4.5\%$, incluyendo histéresis a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$); por debajo del 20 % y por encima del 80 % $\pm 6\%$ típico. Una ventaja que presentan estos modelos de registradores, así como el modelo anterior, es que los datos se transfieren de forma inalámbrica a un dispositivo móvil y además se pueden observar los datos en tiempo real gracias a su pantalla LCD. Estos instrumentos fueron colocados al centro geométrico del espacio a una altura de 1.30 m y los datos se midieron cada diez minutos.

Un análisis climático de los datos recolectados en las mediciones *in situ* se utilizó para determinar el día con las condiciones ambientales

exteriores similares al día típico histórico. En un comparativo realizado con las gráficas de temperatura exteriores entre los días medidos contra los días históricos del archivo climático, se identificó que el 3 de enero de 2022 presentaba las condiciones requeridas, los datos del día elegido fueron analizados a partir de medios estadísticos y evaluados con los parámetros que determinan el rendimiento térmico. Para la validación del modelo, primero se procedió a localizar dentro del simulador una fecha del periodo invernal que presentara un comportamiento similar a la temperatura exterior que se monitoreó el 3 de enero de 2022, la fecha que se determinó dentro de los datos del simulador fue el 11 de diciembre. A continuación, se modeló la vivienda (figura 6) y se procedió a simular con la fecha determinada en el simulador DesignBuilder, para después realizar una comparación con las temperaturas interiores entre el modelo real y el modelo simulado, la validación del modelo se realizó a través del parámetro del error cuadrático medio.

FIGURA 6

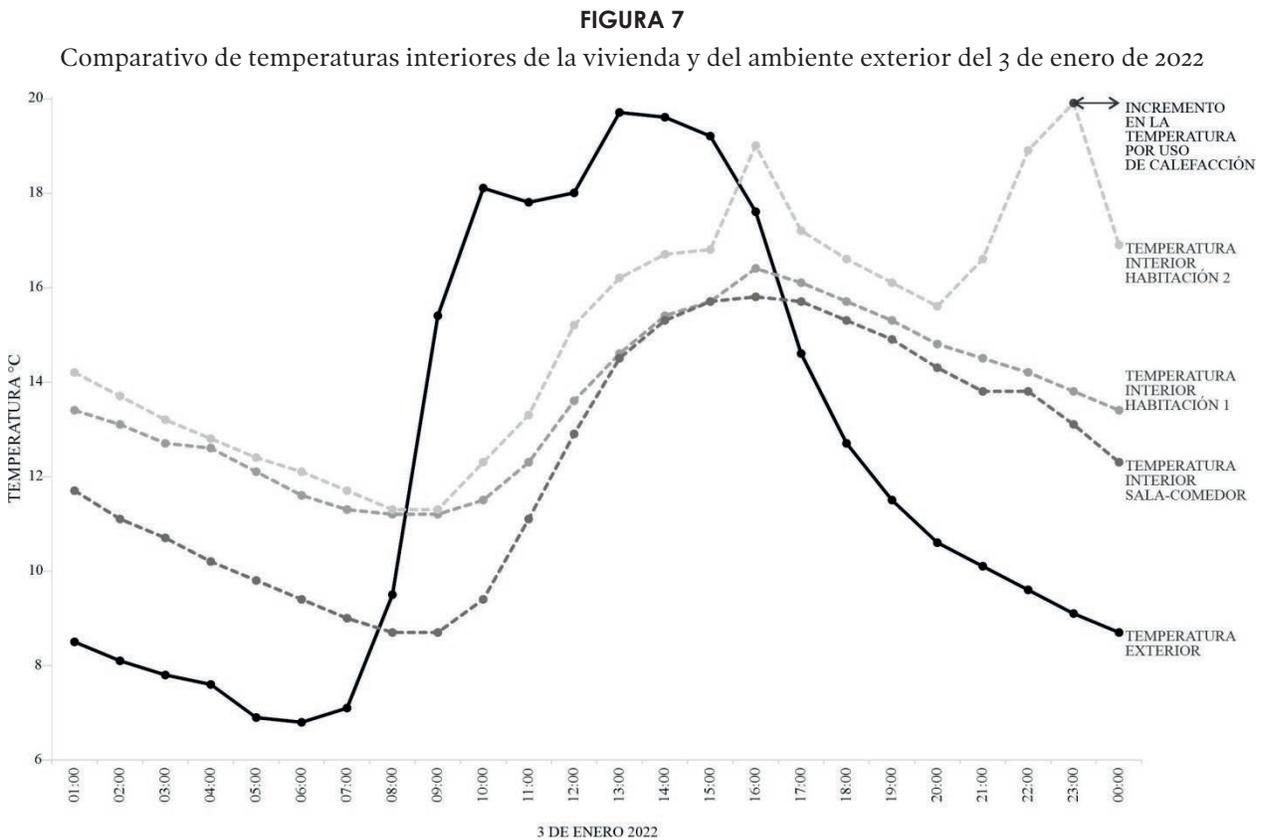
Geometría de la vivienda y el contexto



RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL

A continuación se observan los resultados obtenidos de la evaluación del rendimiento térmico realizada a una vivienda de interés social, a partir

de los datos recolectados de la medición *in situ* obtenidos el día 3 de enero de 2022. Se comparó el comportamiento de las temperaturas del ambiente interior de las áreas de la sala-comedor y las dos habitaciones en contraste con la temperatura exterior (figura 7).



La mayor amplitud térmica se registró en la habitación dos, que se localiza al suroeste, este espacio presentó temperaturas máximas más elevadas, a diferencia de la habitación uno, localizada al sur, y de la sala-comedor, ubicada al sureste de la vivienda; se deduce que estas diferencias se debieron a la orientación de cada espacio, la habitación dos recibe mayor radiación solar directa en muros y cubierta, lo que provoca mayor ganancia de calor al interior del espacio. La temperatura mínima y máxima interior se registró al mismo tiempo en los tres espacios. Se observó que las temperaturas interiores máximas

de los tres espacios se mantienen por debajo de la temperatura máxima del ambiente exterior, este comportamiento es resultado del recubrimiento exterior aplicado en los muros y cubierta, las propiedades superficiales del bloqueador nanotérmico lo convierten en un material frío que impide a la envolvente absorber el calor e introducirlo a los espacios interiores (Alchapar *et al.*, 2012).

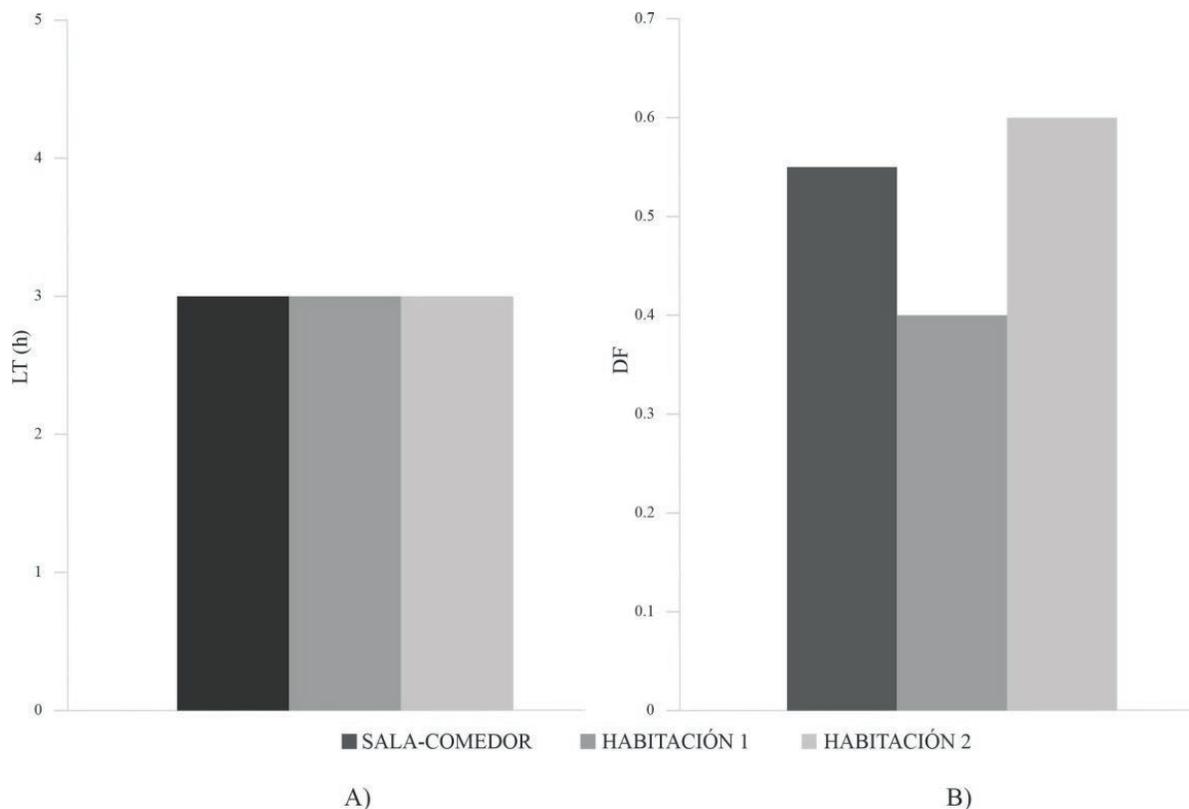
En la figura 8 se observan los valores de los parámetros de la evaluación del rendimiento térmico de la vivienda. La gráfica A muestra la comparación del retraso térmico de los tres espacios analizados, el resultado expone que la

temperatura interior alcanza el mayor valor tres horas después de que se presenta la temperatura máxima al exterior; a pesar de la diferencia en la orientación, el resultado de LT es el mismo para los tres espacios. La gráfica B muestra el resultado del decremento térmico, se observó que la habitación uno presenta un DF de 0.40 °C, se considera el decremento menor entre los espacios analizados, los valores de la temperatura interior

de esta área registraron una dispersión menor, por el contrario, la habitación dos presenta un DF de 0.60 °C, el mayor decremento térmico de los espacios evaluados, la amplitud entre sus valores de temperatura es mayor, la sala-comedor registró un DF de 0.55, valor muy cercano al de la habitación dos. El valor R del sistema constructivo de esta vivienda fue el de cubierta 0.350 m²K/W y el de muros exteriores 0.240 m²K/W.

FIGURA 8

Validación del modelo con el simulador DesignBuilder



A) Gráfica comparativa del retraso térmico o LT, B) Gráfica comparativa del decremento térmico o DF

Para futuras evaluaciones de las estrategias de optimización para la envolvente de la vivienda se realizó la validación del modelo simulado, para ello se compararon los datos de la variable de temperatura del ambiente exterior e interior en el escenario simulado el día 11 de diciembre contra los datos recolectados *in situ* el día 3 de enero de 2022 (valores que corresponden a las condiciones climatológicas del día típico histórico de la temporada invernal), la comparación de datos fue del

espacio de la sala-comedor, se utilizó como parámetro de evaluación el RSME. Como se observó en la gráfica (figura 9), el comportamiento de las temperaturas interiores y exteriores obtenidas del simulador presentaron valores muy similares a los obtenidos en la medición *in situ*, la tabla 1 contiene las temperaturas del ambiente interior y exterior de ambos días, la dispersión de los valores de la variable del día simulado fue menor, esto se confirma con el valor de su oscilación.

FIGURA 9

Comparativo de los datos *in situ* contra los datos de simulación, espacio sala-comedor

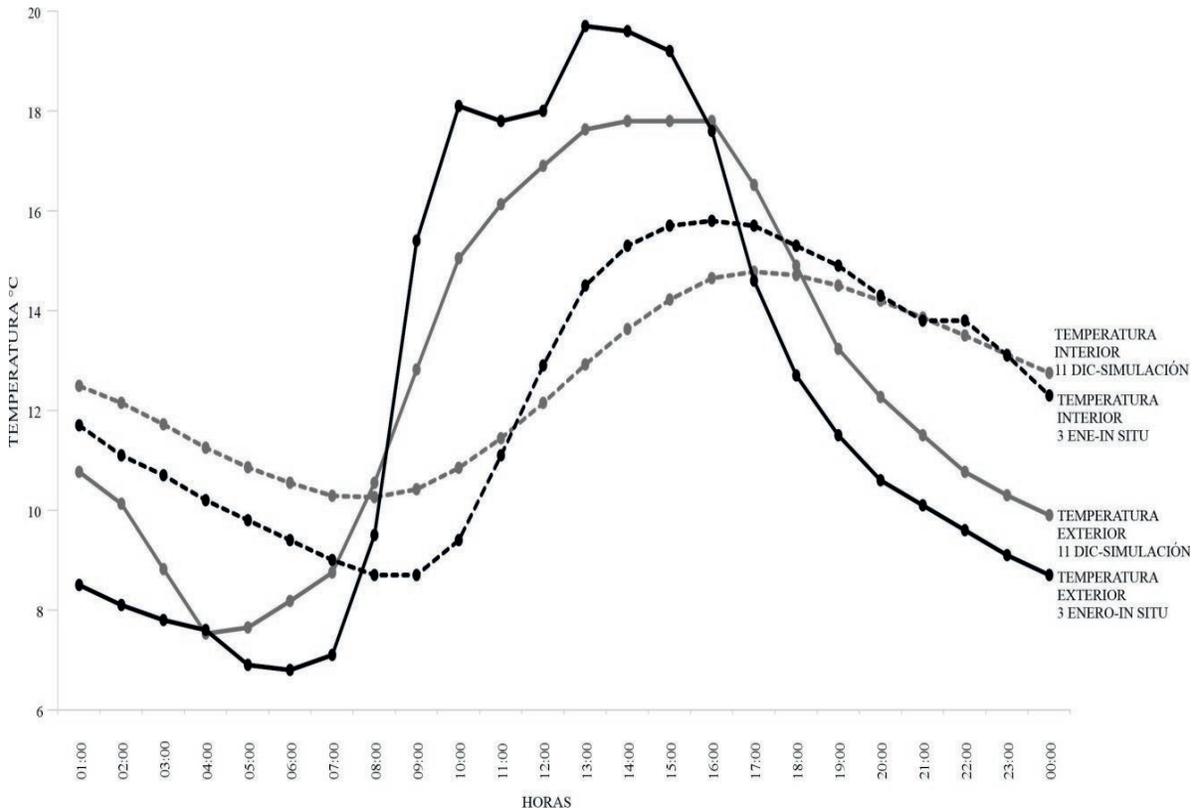


TABLA 1

Tabla comparativa de los datos de temperatura del modelo simulado y de la medición *in situ*

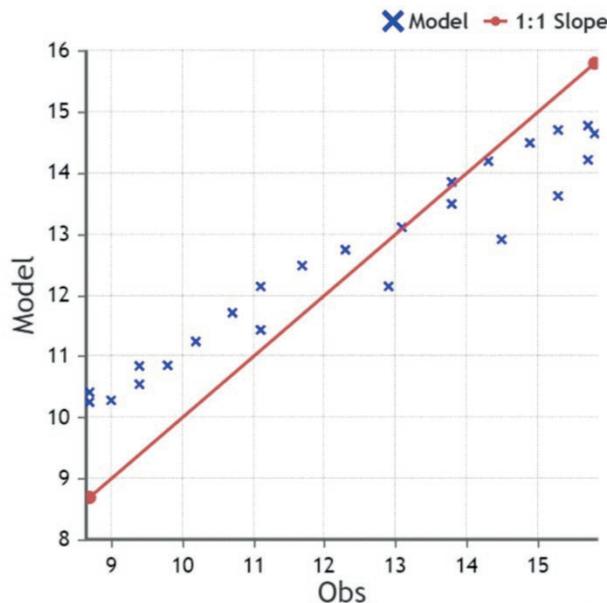
Día		Temperaturas			Oscilación
		máxima	promedio	mínima	
03 enero 2022 in-situ	Exterior	19.70	12.28	6.80	12.90
11 diciembre simulación	Exterior	17.80	12.65	7.53	10.27
03 enero 2022 in-situ	Interior	15.80	12.38	8.70	7.10
11 diciembre simulación	Interior	14.78	12.55	10.26	4.52

Para obtener el RMSE se realizó una comparación entre los valores observados y los simulados de la temperatura interior de la sala-comedor a través de la calculadora de AgriMagrimetsoft.

com. De acuerdo con la gráfica (figura 10), los datos registran una menor dispersión, el valor obtenido en el parámetro de RMSE fue de 1.053.

FIGURA 10

Diagrama de RMSE obtenida de AgriMetSoft (2019). Online Calculators



Fuente: Disponible en: <https://agrimetsoft.com/calculators/Root%20Mean%20Square%20Error> Discusión de la evaluación del rendimiento térmico de una vivienda de interés social

Al evaluar el rendimiento térmico de la vivienda a través de los parámetros de decremento y retraso térmico, se obtuvo que los valores de DF son mayores que los de LT, lo que representa un rendimiento térmico deficiente. Los espacios evaluados presentan una amplitud en los valores de su temperatura, esto se traduce en una inestabilidad térmica, las propiedades termofísicas del material principal de la envolvente, en conjunto con el espesor, favorecen al intercambio del flujo de calor. El concreto de la envolvente tiene una conductividad de 1.74 W/mK, una densidad de 2,300 kg/m³ y un calor específico de 1,000 J/kgK, la densidad tiene una relación directa con la conductividad del material, a mayor densidad el material tendrá mayor conductividad (González, 2004). Estos valores, junto con el espesor de 10 cm, hacen que la envolvente no almacene el calor captado a través de las ganancias internas y externas durante el día; esto se confirma en el resultado obtenido en los parámetros, al descender la temperatura exterior durante la noche, la temperatura interior responde a este descenso, por lo que se requiere de sistemas mecánicos de

calefacción para mantener los espacios dentro de una zona de confort térmico. La orientación de los espacios es también un factor importante que asociado a las propiedades de los materiales propicia las ganancias térmicas, los elementos de la envolvente que reciben mayor radiación solar en el periodo invernal representan un beneficio para los espacios interiores, tal es el caso de la habitación dos que se ubica al suroeste, aunque es necesario evaluar si esto representa una ventaja durante el periodo estival.

A pesar de que el valor R del sistema constructivo de la vivienda está por debajo de lo que la norma establece, las propiedades superficiales del bloqueador nanotérmico que se encuentra aplicado como acabado final en la envolvente de la vivienda lo convierten en un material frío; el efecto de este tipo de material está en limitar las ganancias térmicas hacia el interior de los espacios, lo que causa que las temperaturas máximas interiores se encuentren por debajo de la exterior. Se recomienda evaluar los efectos del bloqueador durante el periodo estival, ya que durante el periodo evaluado las características del

bloqueador nanotérmico no fueron las adecuadas para las condiciones climáticas. Quedó demostrado que el rendimiento térmico de la vivienda es considerado deficiente, es recomendable aplicar estrategias para mejorar este rendimiento, por lo que la simulación es una herramienta útil. La validación del modelo de la vivienda con los datos medidos darán la certidumbre en los resultados de simulaciones futuras que implementen diversas estrategias. El resultado de la validación determinó un RMSE de 1.053, por lo que el modelo se considera como óptimo debido a que no existe una elevada dispersión entre los datos.

CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación del rendimiento térmico de una vivienda de interés social, construida con un sistema de tipo encofrado y de envolvente opaca de concreto de 10 cm de espesor con un bloqueador nanotérmico de alta refractividad como acabado exterior. El estudio se realizó en la ciudad de Ensenada, Baja California, México, que se caracteriza por un clima templado seco frío. El monitoreo se realizó durante el periodo invernal, los datos fueron recolectados a través del uso de instrumentos colocados al interior y exterior de la vivienda. Las áreas analizadas fueron la sala-comedor y las dos habitaciones. El día típico que se seleccionó para la evaluación fue el día 3 de enero de 2022. La evaluación del rendimiento térmico se realizó a través de los parámetros del decremento térmico (DF) y el retraso térmico (LT), además, se comparó la resistencia térmica o valor R del sistema de la vivienda con lo que la norma mexicana NMX-C-460-ONNCCE-2009 establece.

En esta investigación, los resultados obtenidos indican que los tres espacios evaluados registraron un valor DF alto, la habitación dos ubicada al suroeste obtuvo el mayor índice con 0.60 °C, seguida del espacio de la sala-comedor con 0.55 °C, este resultado indica que la temperatura al interior de la vivienda fluctúa de acuerdo a las condiciones climatológicas del ambiente exte-

rior, la dispersión en los valores de la temperatura provoca que durante los días y noches del periodo invernal se requiera de medios de calefacción para lograr una estabilidad térmica al interior. Con respecto al valor de LT, la temperatura máxima interior fue registrada tres horas después de la máxima exterior, esto sucedió en los tres espacios analizados, estos valores son resultado de la aplicación del bloqueador nanotérmico utilizado en la envolvente como acabado exterior, el cual actuó como un material frío. Para determinar que el rendimiento térmico es óptimo, el valor DF debe ser menor, mientras que el LT debe ser mayor; al observar los resultados se puede concluir que el rendimiento térmico de la vivienda es deficiente.

Para mejorar el rendimiento térmico de estas viviendas se requiere la propuesta de estrategias constructivas que incrementen el almacenamiento térmico de la envolvente, ejemplo de ello puede ser la aplicación de los materiales de cambio de fase o materiales que funcionen como barreras térmicas, como es el caso de los aislantes, pero se debe considerar que las estrategias no planeadas desde el diseño se convierten en un costo extraordinario para este tipo de viviendas. La simulación es una herramienta útil para la creación de escenarios que permitan evaluar estrategias en diferentes condiciones y estaciones del año, la medición en el sitio permite obtener datos de las variables climáticas que serán utilizadas para la validación del modelo, el contraste de los datos simulados contra los datos recolectados en el sitio permite tener un grado de certidumbre sobre los valores obtenidos en los escenarios y en la evaluación de estrategias. Un parámetro de validación utilizado es el error cuadrático medio o RMSE, este parámetro considera el cero como un modelo óptimo. En el modelo validado en esta investigación se obtuvo un valor de RMSE de 1.053 que se considera como aceptable, esta validación permitirá comparar diferentes propuestas para mejorar la envolvente y seleccionar la estrategia de mayor eficiencia.

Cada vez es más frecuente la construcción de viviendas de interés social en México con el sis-

tema constructivo tipo encofrado, debido a sus ventajas en la construcción en serie, al ahorro en el tiempo y en los costos de la edificación, lo que ha propiciado que este tipo de sistemas sea la selección más viable para los desarrolladores, pero como se demostró en esta investigación, para el clima predominantemente frío de la ciudad de Ensenada, las propiedades termofísicas del material utilizado, en conjunto con el espesor de la envolvente opaca, generan un rendimiento térmico deficiente, además, se observó que su valor U y valor R no cumplen con lo que establece la normativa para habitabilidad y ahorro en el consumo de energía. Se concluye que el espesor de la envolvente y el material utilizado en este sistema son factores limitantes para desarrollar viviendas sustentables, por lo que, de implementarse este tipo de sistemas constructivos, deberá considerarse el uso de otras estrategias que permitan el desempeño térmico adecuado de acuerdo con las condiciones climáticas del sitio. En el caso particular de la ciudad de Ensenada, el uso de las estrategias para los sistemas constructivos tipo encofrado debe considerar los requerimientos de calefacción en invierno y de enfriamiento en verano.

Como recomendaciones para investigaciones futuras se propone realizar una evaluación en el periodo estival, en conjunto con el bloqueador nanotérmico y sin él, también se recomienda considerar la orientación dentro de la evaluación, ya que se observó que es un factor determinante en las ganancias y pérdidas de calor. El bloqueador podría evaluarse en conjunto con alguna otra estrategia como el uso de termoaislantes para determinar el comportamiento térmico. Dentro de la investigación se registraron diversas limitaciones, entre las cuales estaba el número de instrumentos, esto dificultó la evaluación de la superficie interior y exterior de la envolvente en todos los espacios, por lo que se recomienda contar con un mayor número de instrumentos para la evaluación *in situ*. Otra limitación fue la situación que se presentaba a escala mundial por la pandemia de COVID-19, lo que evitó realizar mediciones *in situ* entre dos viviendas para com-

parar el rendimiento térmico entre una vivienda con y sin estrategia.

REFERENCIAS

- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2014). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>
- Al-tamimi, N. (2022). Passive Design Strategies for Energy Efficient Buildings in the Arabian Desert. *Frontiers in Built Environment*, 7, 805603. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.805603>
- Al-yasiri, Q., & Szabó, M. (2021). Experimental evaluation of the optimal position of a macroencapsulated phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45(March), 101121. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101121>
- (2022). Energetic and thermal comfort assessment of phase change material passively incorporated building envelope in severe hot Climate: An experimental study. *Applied Energy*, 314(January), 118957. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118957>
- Albatayneh, A. (2021). Optimisation of building envelope parameters in a semi-arid and warm Mediterranean climate zone. *Energy Reports*, 7, 2081–2093. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.011>
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2012). Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana. *Ambiente Construido*, 12(3), 107–123. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212012000300008>
- Ali, M. H., & Abustan, I. (2014). A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*, 2002, 1–9. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
- Alías, H. M., & Jacobo, G. J. (2011). Eficiencia energética en viviendas sociales. Incidencia de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el bienestar higrotérmico en los espacios interiores. *Arquisur*, 1, 76–89. <https://doi.org/10.14409/ar.vii.925>

- Álvarez, J. L., Hernández Quiroz, N. S., & Estrada Ayub, J. A. (2022). Aplicaciones de la modelación energética de edificaciones: revisión y casos de estudio en México. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 12.
- Andoni, H., & Wonorahardjo, S. (2018). A Review on Mitigation Technologies for Controlling Urban Heat Island Effect in Housing and Settlement Areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 152(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/152/1/012027>
- Barrios, G., Huelsz, G., Rechtman, R., & Rojas, J. (2011). Wall / roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. *Energy & Buildings*, 43(1), 219–223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.015>
- Barrios, G., Huelsz, G., Rojas, J., Ochoa, J. M., & Marincic, I. (2012). Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>
- Becerra-Santacruz, H., & Lawrence, R. (2016). Evaluation of the thermal performance of an industrialised housing construction system in a warm-temperate climate: Morelia, Mexico. *Building and Environment*, 107, 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.029>
- Berrocal, D., Aranda, R., Santamaría, S., Vigil, A., & Chen, M. A. (2022). El cambio de fase como estrategia pasiva: Evaluación del rendimiento térmico-energético en edificaciones en Panamá. *I+D Tecnológico*, 17(2). <https://doi.org/10.33412/idt.v17.2.3478>
- Bhargava, A., Lakmini, S., & Bhargava, S. (2017). Urban Heat Island Effect: It's Relevance in Urban Planning. *Journal of Biodiversity & Endangered Species*, 05(02), 1–4. <https://doi.org/10.4172/2332-2543.1000187>
- Borbon-Almada, A. C., Lucero-Alvarez, J., Rodriguez-Muñoz, N. A., Ramirez-Celaya, M., Castro-Brockman, S., Sau-Soto, N., & Najera-Trejo, M. (2020). Design and application of cellular concrete on a mexican residential building and its influence on energy savings in hot climates: Projections to 2050. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(22), 1–22. <https://doi.org/10.3390/app10228225>
- CONAFOVI (2006). Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda. En *Bosque*.
- CONUEE (2017). *Costos y beneficios de la norma mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020-ENER)*. 1–24. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf
- (2020). Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. *Cuadernos de la Conuee*, 5.
- Daioglou, V., Mikropoulos, E., Gernaat, D., & Vuuren, D. P. Van. (2022). Efficiency improvement and technology choice for energy and emission reductions of the residential sector. *Energy*, 243, 122994. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122994>
- DOF - Diario Oficial de la Federación (2009). *Norma Mexicana NMX-C-460-ONNCCCE-2009, Industria de la construcción-Aislamiento Térmico-Valor "R" para las envolventes de viviendas por zona térmica para la república Mexicana-Especificaciones y verificación*.
- El, F., Lafhaj, Z., Antczak, E., & Chapiseau, C. (2016). Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks. *Applied Thermal Engineering*, 93, 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.009>
- Fu, S. C., Zhong, X. L., Zhang, Y., Lai, T. W., Chan, K. C., Lee, K. Y., & Chao, C. Y. H. (2020). Bio-inspired cooling technologies and the applications in buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110313. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110313>
- GABC (2018). *2018 Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*.
- González, E. (2004). Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática. En *Estudios de Arquitectura Bioclimática. Anuario 2004: Vol. January* (p. 351564413).
- Gunawardena, K. R., McCullen, N., & Kershaw, T. (2017). Heat island influence on space-conditioning loads of urban and suburban office buildings. *Cities and Climate Conference 2017*, 1–13.
- Jannat, N., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2020). A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics. *Sustainability*, 12(12), 4892. <https://doi.org/10.3390/SU12124892>
- Lodete, T., Arns, G., & Marcelino, R. (2020). Impact Analysis of Bioclimatic Strategies on the Thermoengetic Performance of a Pilot Plant in Southern Brazil. *Journal of Energy Engineering*,

- 146(5), 05020003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000704](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000704)
- Magadán, T. R., Laredo, C. G., Suarez, G. A., Cacabelos, Reyes Antón, Carrasco, P. P. J., & Álavarez, F. M. Á. (2016). Simulación mediante TRNSYS de la influencia de la envolvente térmica en la demanda energética en un Cuartel de la Armada y propuestas de actuación. *IV Congreso Nacional de I+D En Defensa y Seguridad 2016*, 322630705.
- Morales-Inzunza, S., González-Trevizo, M. E., Martínez-Torres, K. E., Luna-León, A., Tamayo-Pérez, U. J., Fernández-Melchor, F., & Santamouris, M. (2023). On the potential of cool materials in the urban heat island context: Scalability challenges and technological setbacks towards building decarbonization. *Energy and Buildings*, 296(July). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113330>
- Muhammad, F., & Wonorahardjo, S. (2020). Building Material in the Perspective of Energy Efficiency and Thermal Environment in TOD Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 532(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/532/1/012021>
- Muñoz Meléndez, G., Díaz González, E., Campbell Ramírez, H. E., & Quintero Nuñez, M. (2012). *Baja California: Perfil Energético 2010-2020. Propuesta y análisis de indicadores energéticos para el desarrollo de prospectivas estatales*. Comisión Estatal de Energía de Baja California. <https://studylib.es/doc/6258557/baja-california--perfil-energetico-2010-2020>
- Nayak, J. K., & Prajapatl, J. A. (2006). *Handbook on Energy Conscious Buildings*. Indian Institute of Technology, Bombay and Solar Energy Centre, Ministry of Non-Conventional Energy Sources. https://issuu.com/supplementarytechetv2035/docs/handbook_on_energy_conscious_buildings/395
- Németh, B., Ujhidy, A., Tóth, J., Gyenis, J., & Feczko, T. (2021). Testing of microencapsulated phase-change heat storage in experimental model houses under winter weather conditions. *Building and Environment*, 204, 108119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108119>
- Ordoñez, A. (2014). Manual de ayuda DesignBuilder en español. *Sol.Arq Soluciones Arquitectónicas Sustentables*, 417.
- Ostry, M., & Charvat, P. (2013). Materials for advanced heat storage in buildings. *Procedia Engineering*, 57, 837-843. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.106>
- Pawar, B. S., & Kanade, P. G. N. (2018). Energy Optimization of Building Using Design Builder Software. *International Journal of New Technology and Research*, 4(1), 69-73.
- Rawat, M., & Singh, R. N. (2022). A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*, 3(3), 327-347. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001>
- Ré, G., & Filippín, C. (2021). Evaluación energética y rehabilitación de la envolvente edilicia de una escuela en zona bioambiental templada cálida, Argentina. *Informes de la Construcción*, 73, 563.
- Rizzarello, F., Hongn, M., & Gea, M. (2018). Simulación computacional del comportamiento térmico de una vivienda social en Salta Capital. *Energías Renovables y Medio Ambiente.*, 42, 15-27.
- Rojas, J., Barrios, G., Huelsz, G., Tovar, R., & Jalife-Lozano, S. (2016). Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations. *Journal of Building Physics*, 39(5), 452-460. <https://doi.org/10.1177/17442591155591993>
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- Wang, W., Ge, X., & Xiong, H. (2019). Thermal design optimization and analysis on heating load of rural buildings in northern China. *E3S Web of Conferences ICBTE 2019*, 8, 1-5.