

Aplicaciones de la modelación energética de edificaciones: revisión y casos de estudio en México

Applications of Building Energy Modeling: Review and Case Studies in Mexico

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.213>

JORGE LUCERO ÁLVAREZ

Universidad Autónoma de Chihuahua, México / ORCID: 0000-0001-5203-3857

Correo electrónico: jluceroa@uach.mx

NATHALIE SOCORRO HERNÁNDEZ QUIROZ

Universidad Autónoma de Chihuahua, México / ORCID: 0000-0001-5158-3355

Correo electrónico: nhernandez@uach.mx

JESÚS ÁNGEL ESTRADA AYUB

Universidad Autónoma de Chihuahua, México / ORCID: 0000-0003-4690-952X

Correo electrónico: aayub@uach.mx

Recepción: 2 de enero de 2022. Aceptación: 28 de marzo de 2022.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión sobre la utilidad actual que tienen los programas que simulan el desempeño energético de edificaciones. Las aplicaciones de dichos programas tienen un fin común: contar con edificios más eficientes en cuanto a consumo de energía se refiere. La simulación del desempeño energético de edificios puede ser aplicada en las primeras etapas de diseño del edificio; durante la remodelación de un edificio para mejorar el desempeño térmico; para justificar o evaluar normas sobre eficiencia energética en edificaciones; o bien para evaluar el desempeño de un determinado material, sistema constructivo u otros componentes del edificio. En este trabajo también se exponen resultados de dos trabajos de investigación donde se utilizan dos diferentes programas de simulación energética de edificaciones. En el primer caso se

utilizó el programa TRNSYS para evaluar el efecto de propiedades térmicas del techo sobre el costo de la energía de un edificio residencial. Para ello se utilizó un modelo de simulación energética de una vivienda de interés social y un análisis paramétrico para variar los valores de reflectancia solar, emisividad y aislamiento térmicos bajo condiciones climáticas de 20 ciudades mexicanas. Los resultados muestran ahorros en el costo anual de la energía de entre 3,288 y 5,436 pesos mexicanos al usar techos reflectivos en ciudades de las zonas térmicas 1 y 2. En el segundo caso corresponde a la calibración un modelo de simulación realizado con OpenStudio para evaluar el desempeño energético de un edificio académico. Las temperaturas del aire y de las paredes del edificio simulaciones fueron comparadas con mediciones in situ durante un periodo de tres semanas. Los resultados muestran la necesidad de detallar componentes del modelo de simulación;



por ejemplo, elementos externos de sombreados, para alcanzar niveles adecuados de calibración.

Palabras clave: simulación energética de edificios, BIM, TRNSYS, OpenStudio, eficiencia energética.

ABSTRACT

This paper presents a review of the current utility of software that simulates the energy performance of buildings. The applications of this software have a common purpose: to have buildings that are more efficient in terms of energy consumption. The building energy simulation of the energy can be applied in the early stages of building design or during the remodeling of a building to improve thermal performance. Other applications are to justify or evaluate standards on energy efficiency in buildings, and to evaluate the performance of new materials, construction system or other building components. This paper also presents the results of two research works that were done with different building simulation software. In the first case, a residential building is modeled using the software TRNSYS to evaluate the effect of roof thermal properties on the energy cost. To do this, an energy simulation model of a social housing was used to vary the values of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation under climatic conditions of 20 Mexican cities. The energy model revealed that an annual energy saving between 3,288 and 5,436 Mexican pesos can be achieved by use of reflective roofs in cities in thermal zones 1 and 2. The second case corresponds to the calibration process of a building simulation model made with OpenStudio to evaluate the energy performance of an academic building. Air and wall temperatures of the simulated building were compared with in-situ measurements over a three-week period. The results show the need to detail components of the simulation model, for example, external elements of shading, to reach adequate levels of calibration.

Keywords: building energy modeling, BIM, TRNSYS, OpenStudio, energy efficiency.

LISTA DE ABREVIATURAS

BIM:	Building Information Modeling.
BPS:	Building Performance Simulation.
HVAC:	Heating - Ventilation - Air conditioning.
DBM:	Dynamic Building Modeling.
BES:	Building Energy Simulation.
ACVE:	análisis de ciclo de vida del edificio.
RS:	reflectancia solar.
EI:	emisividad infrarroja
ASHRAE:	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
MCF:	materiales con cambios de fases.
USD:	United States Dollar.
CAE:	costo anual de la energía.
ECM:	error cuadrático medio.
EAM:	error absoluto medio.

INTRODUCCIÓN

Con el surgimiento de la cuarta revolución industrial se ha desarrollado una amplia gama de software de modelación y simulación aplicada en diversas disciplinas. En la digitalización de la industria de la construcción de edificaciones se pueden considerar dos vertientes: el modelado de información de edificio (BIM, Building Information Modelling), que es una tecnología que propone una práctica integrada para el diseño de edificios, y la simulación del desempeño de los edificios (BPS, Building Performance Simulation), que integran la simulación de transferencia de calor en la estructura del edificio, el flujo de aire dentro y a través del edificio, la iluminación natural, la acústica y el funcionamiento de una amplia gama de tipos de sistemas y componentes.

Los modelos BIM corresponden a

[...] un conjunto de metodologías basadas en el uso compartido de modelos digitales que representan las características físicas y funcionales de los edificios y las obras de ingeniería, permitiendo el intercambio de información en la cadena de valor de la industria de construcción (Asociación Española de Normalización UNE, 2020).

El objetivo del BIM es reducir tiempo y recursos en el diseño, la construcción y la gestión del activo. A lo largo de los años, el modelado de información de construcción (BIM) ha experimentado un aumento significativo, tanto en términos de funciones como de uso. Esta herramienta puede gestionar casi por completo todo el proceso de diseño, construcción y gestión de un edificio de forma interna. Sin embargo, no es capaz de integrar completamente las funciones y especialmente la información necesaria para realizar un análisis energético complejo (Bonomolo et al., 2021).

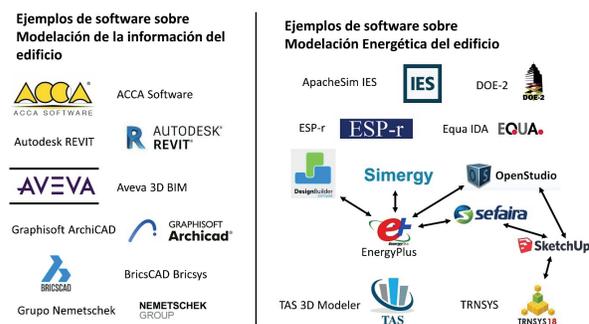
BPS es una tecnología que utiliza el modelo matemático de fenómenos físicos, con el cual se puede determinar de manera realista el desempeño del edificio en términos de demanda de energía, calidad del aire interior y confort térmico, parámetros relacionados con iluminación y acústica con esfuerzos y costos relativamente bajos. El objetivo de la simulación de desempeño de edificios es la cuantificación de aspectos que son relevantes para el diseño, construcción, operación y control de edificios (de Wilde, 2018). La simulación BPS sirve no sólo para revelar las interacciones entre el edificio y sus ocupantes, los sistemas HVAC y el clima exterior, sino también para hacer posibles opciones de diseño respetuosas con el medio ambiente (Hong et al., 2000). Aunque actualmente se dispone de una gran cantidad de herramientas BPS (www.buildingenergysoftwaretools.com), existe una superposición significativa en la funcionalidad (Crawley, 2008), y aunque la mayoría de las herramientas aspiran a encapsular las interacciones entre las construcciones, los sistemas, el comportamiento del usuario y el clima de un edificio, no todas lo

logran de una manera completamente dinámica (Clarke y Hensen, 2015).

Dentro de las herramientas BPS destacan el modelamiento energético en edificios (BEM, Building Energy Modelling). Los modelos BEM son desarrollados a través de software de simulación basado en la física del uso de energía en edificios. Los planteamientos del desempeño energético del edificio a menudo están basados en modelos de transferencia de calor en estado transitorio, por lo cual también es referida como modelación dinámica de edificios (DBM, Dynamic Building Modelling) o simulación energética de edificios (BES, Building Energy Simulation). BEM es una herramienta versátil y multipropósito que se utiliza en el diseño de nuevos edificios, remodelaciones (rehabilitación energética), cumplimiento de códigos, certificación ecológica, calificación para créditos fiscales e incentivos de servicios públicos y control de edificios en tiempo real. BEM también se utiliza en análisis a gran escala para desarrollar códigos de eficiencia energética de edificios e informar decisiones políticas (U. S. Department of Energy, 2021a). La figura 1 muestra una lista de software BIM y BEM actualmente disponibles. Algunos programas como DesignBuilder, Simergy y Sefaira utilizan EnergyPlus como motor de cálculo. Por otra parte, SketchUp es un software de diseño gráfico y modelado en 3D que puede ser utilizado por TRNSYS y EnergyPlus, vía OpenStudio, para visualizar, configurar y editar la geometría del edificio en 3D.

FIGURA 1

Ejemplos de software disponibles BIM y BEM



Fuente: elaboración propia.

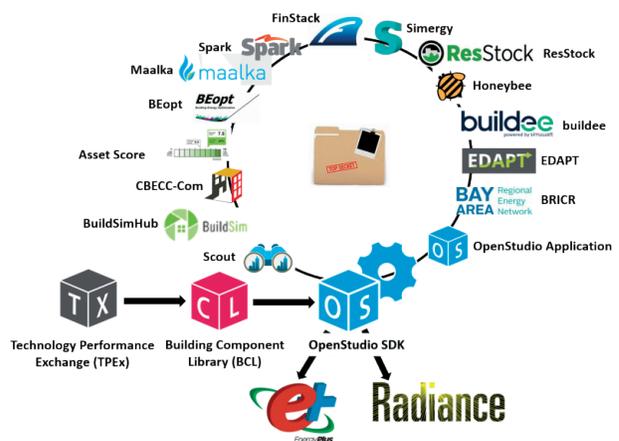
La conjunción entre BIM y BEM es una tendencia actual y existe un desarrollo de interoperabilidad entre los diversos software de ambas tecnologías (Lobos et al., 2014; Kamel y Memari, 2019). El método de utilizar el modelado de información de edificios para el proceso de modelado de energía de edificios, denominado modelado de energía de edificios basado en modelado de información de edificios, se ha convertido en un tema predominante y atractivo tanto en la investigación como en la sociedad industrial en los últimos años (Gao et al., 2019).

En las últimas décadas el consumo de energía a nivel mundial ha aumentado drásticamente, este crecimiento ha sido impulsado por el aumento de la población, el crecimiento de la economía y la mayor demanda de calidad de vida (U. S. Department of Energy, 2012). El uso de energía en edificaciones es una de las áreas con mayor potencial de los ahorros energéticos significativos, para ello es preciso que los edificios se diseñen, construyan y operen adecuadamente. La tecnología BEM es una herramienta efectiva para evaluar diversos diseños de edificaciones y arreglos en los materiales de construcción, comparar y seleccionar sistemas tales como los equipos de climatización artificial, asignar presupuestos anuales de energía; lograr el cumplimiento de los estándares energéticos; y optimización económica, durante el proceso de diseño del edificio (Al-Homoud, 2001).

En general, el software BPS se puede clasificar en tres tipos de aplicaciones: motores de simulación integrada (por ejemplo, EnergyPlus, ESP-r, TAS, IES-VE, IDA ICE), software que se acopla a un determinado motor (por ejemplo, DesignBuilder, eQuest, RIUSKA, Sefaira), y complementos que permiten ciertos análisis de rendimiento (por ejemplo, DIVA para Rhino, Honeybee, Autodesk Green Building Studio) (Østergård, 2016).

Uno de los software BEM de mayor uso es EnergyPlus. Este programa fue desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos y es de acceso abierto (<https://energyplus.net/>). La figura 2 muestra una serie de aplicaciones que se han desarrollado en torno al motor de cálculo EnergyPlus.

FIGURA 2
Aplicaciones y servicios del sector público y privado en torno al programa EnergyPlus



Fuente: U. S. Department of Energy (2021a).

El objetivo de este artículo es revisar algunas de las aplicaciones del modelamiento energético de edificios que han sido reportadas en diversos artículos y publicaciones. Además, se exponen un par de casos de aplicaciones del BEM en México donde se describen de forma breve la metodología y los resultados obtenidos.

APLICACIONES DEL MODELAMIENTO ENERGÉTICO DE EDIFICIOS

Los software de simulación se han convertido en una herramienta útil para evaluar el desempeño energético de edificios con diversos fines. Algunas aplicaciones que se pueden mencionar son en el diseño de edificios más eficientes en el consumo de energía, el cálculo de cargas térmicas para dimensionar equipos HVAC, el diagnóstico energético en edificios ya construidos, la calificación de rendimiento energético de códigos de energía y certificaciones ecológicas, el diseño de normas sobre consumo energético en edificios, así como en la investigación sobre la aplicaciones de nuevos materiales, diseños y sistemas que mejoren el rendimiento energético del edificio.

ETAPA DE DISEÑO DE EDIFICIOS

Uno de los mayores potenciales de aplicación de la modelación energética de edificios corresponde a la etapa de diseño de un edificio. Este potencial es soportado por una tendencia global sobre regulaciones y certificación relacionadas a la eficiencia energética de edificaciones, incluyen los objetivos de edificios “net zero” (optimización entre reducción del consumo de energía y auto-generación de energía renovable) que se plantean en diversas regiones del planeta. Sin embargo, hoy en día incorporar BEM en las primeras etapas del diseño es muy difícil. Los tiempos de respuesta son cortos y los presupuestos ajustados, a veces inexistentes si una empresa de arquitectura está licitando un proyecto (U. S. Department of Energy, 2021b). Una revisión integral de los estudios de optimización del rendimiento del edificio en la etapa inicial de diseño ha sido realizada por Han et al. (2018) y por Gassar et al. (2021).

Existen una gran cantidad de publicaciones en revistas científicas especializadas sobre la aplicación de BEM en el diseño de edificios, aquí se mencionan un par de ejemplo. El primer caso corresponde una serie de simulaciones realizadas durante las primeras etapas del diseño de un edificio residencial multifamiliar (Samuelson et al., 2016). Los autores realizaron un análisis de sensibilidad simple para identificar los parámetros de diseño probados más influyentes en la intensidad del uso de energía, que incluían la relación ventana-pared, el tipo de vidrio, la rotación del edificio, la forma del edificio y el aislamiento en paredes, en ese orden. Para llevar a cabo las simulaciones y el análisis paramétrico de este estudio se utilizó EnergyPlus y Grasshopper como un servicio en la nube. En este análisis se incluyeron simulaciones considerando tanto el edificio residencial aislado, como si se ubicara en diversos contextos urbanos. En dichos contextos urbanos se consideraron condiciones climáticas de tres ciudades: Nueva York, Beijing y Shenzhen. Además, se varió la densidad y altura de edificios vecinos que influyen en el sombreado sobre el edificio residencial modelado. Dentro de los parámetros y rangos probados aquí, la relación ventana-pared surgió

como la consideración de diseño más importante. Por otra parte, en este trabajo se demuestra cómo el contexto urbano influye notablemente sobre el consumo anual de energía, por lo que dichos contextos afectan las decisiones de diseño del edificio (Samuelson et al., 2016).

Un segundo ejemplo de la aplicación del BEM corresponde a modelos de un edificio comercial y uno doméstico en el Reino Unido (Alwan et al., 2021). En este estudio se propone un método interactivo entre el análisis de ciclo de vida del edificio (ACVE) y el BEM para abordar los puntos críticos tanto de la energía operativa como la energía incorporada. La energía incorporada de un edificio es un cálculo que involucra energía utilizada para producir los materiales que componen el edificio, la cual es abordada mediante el ACVE. Por otro lado, la energía operativa corresponde a la energía requerida para operación del edificio como acondicionamiento de espacios, iluminación y operación de aparatos, etc. El edificio comercial es para oficinas y consiste en un marco de acero, vidriado y losas concreto-prefabricadas. Para estimar el uso de energía operativa se utilizó el software DesignBuilder, una interfaz gráfica que utiliza EnergyPlus como motor de cálculo. También se utilizó el software de modelado Grasshopper para llevar a cabo un análisis paramétrico que permite analizar el consumo de energía para una serie de opciones de diseño, incluyendo cambios en geometrías, materiales y sistemas constructivos. Como conclusión de este trabajo, los autores describen cómo el uso de energía operativa supera el uso de energía incorporada dentro de los primeros 10 años de vida de ambos edificios. También se menciona cómo los perfiles de energía para las cargas de ocupación, el consumo de energía y el guión se modifican de acuerdo con los requisitos de las ubicaciones geográficas específicas y las prioridades ambientales. Por ejemplo, las regiones cálidas y secas del mundo adaptarán un guión para centrarse más en el sombreado, mientras que una región templada se centrará en el uso de materiales y las opciones de calefacción (Alwan et al., 2021).

Ambos trabajos presentan enfoque novedoso de la aplicación BEM en las primeras etapas de diseño. Samuelson et al. (2016) incorporan un contexto urbano para evaluar el sombreado de edificios vecinos. Por otra parte, Alwan et al. (2021) incluyen el uso de energía incorporada en el análisis energético obtenido con las herramientas BEM.

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE NORMAS SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS

La simulación energética de edificios ha sido utilizada para la inclusión de estándares relacionados al consumo de energía en edificaciones en diversas partes del mundo. Uno de los aspectos que más ha sido abordado se relaciona con estándares sobre techos reflectivos o cool roofs. Esencialmente, los techos reflectivos tienen una combinación con altos valores de reflectancia solar (RS) y emisividad infrarroja (EI) que permiten reducir el consumo de energía para el enfriamiento de edificaciones en lugares cálidos. Los techos reflectivos representan también una de las medidas propuestas para mitigar el problema de las islas de calor urbanas (Taha, 2008). La simulación energética permite construir un modelo de edificio y ubicar virtualmente dicho edificio en diversas localidades al utilizar los datos climáticos de dichas localidades. Esto permite realizar análisis rápidos y económicos evaluando las propiedades de los materiales o de los sistemas constructivos de interés, como pueden ser la reflectividad o resistencia térmica del techo.

En 1999 la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) acreditó por primera vez los techos fríos en edificios residenciales, no residenciales y de gran altura en la Norma ASHRAE 90.1-1999. En 2001, ASHRAE amplió sus estándares para acreditar techos fríos ahora en edificios residenciales de poca altura, implementando algunas revisiones tres años después en el estándar ASHRAE 90.2-2004 (Akbari y Levinson, 2008). En enero de 2001, el estado de California siguió el enfoque ASHRAE al acreditar en su estándar de eficiencia energética de, conocido como

“Título 24”, el uso de productos para techos reflectivos en edificios no residenciales con techos de poca pendiente (California Energy Commission, 2001). A partir de estas iniciativas pioneras sobre la implementación de techos reflectivos en edificios, se empezaron a implementar diversos tipos de estándares y acreditaciones de cool roofs en diversas partes del mundo.

En 1997 un comité para el estándar ASHRAE 90.1, que fue formado para reconocer el potencial de los techos reflectivos, determinó rangos de la reflectancia solar y emisividad infrarroja para algunos materiales comunes en techos (Akbari et al., 1998). La reflectancia solar de las tejas varió de 0.03 a 0.26, con la mayoría entre 0.10 y 0.15. Los techos de grava tenían reflectancias solares de aproximadamente 0.12 a 0.34, dependiendo del color de la grava. Las emisiones térmicas de estas superficies no metálicas fueron de aproximadamente 0.8 a 0.9. Los techos de metal desnudo y brillante tienen una mayor reflectancia solar (aproximadamente 0.60), pero su baja emisividad térmica (aproximadamente 0.10) los hace tan calientes como un techo oscuro bajo vientos de baja velocidad. Por lo tanto, se asumió que un techo “frío” de pendiente baja debería tener una reflectancia solar inicial no menor de 0.70, una reflectancia solar envejecida no menor de 0.55 y una emisividad térmica no menor de 0.80.

Varios estudios han evaluado el impacto de los techos reflectantes sobre el potencial de enfriamiento de edificios, vecindarios e incluso ciudades enteras con apoyo de BEM. Akbari et al. (1999) estimaron el efecto de los techos reflectivos en 11 ciudades de Estados Unidos utilizando el programa de simulación energética DOE-2. Estos autores estimaron ahorros anuales por el uso de altos valores de reflectancia solar en techos, que pueden llegar hasta 51 USD por cada 1,000 ft² (alrededor de 0.55 USD por m²) para edificios residenciales. Levinson y Akbari (2010) utilizaron el programa DOE-2 para estimar los beneficios potenciales de los techos reflectantes para edificios comerciales en 236 ciudades de Estados Unidos. Descubrieron que los ahorros de energía de refrigeración durante el verano compensan cualquier pena-

lización por energía de calefacción, excepto en los sitios remotos de Alaska, lo que resulta en ahorros netos de energía anual. Los ahorros de energía por área de techo variaron de \$0.126/m² en West Virginia a \$1.14/m² en Arizona, con un promedio de \$0.356/m² a nivel nacional según las ubicaciones estudiadas.

Simulaciones realizadas con EnergyPlus en prototipos de edificios residenciales y de oficinas en siete ciudades chinas (Harbin, Changchun, Beijing, Chongqing, Shanghai, Wuhan y Guanzhou) mostraron que la sustitución de un techo blanco envejecido (albedo 0.6) por un techo gris envejecido (albedo 0.2) produce ahorros anuales de energía de entre 4.1 y 10.2 kWh/m² y reducen emisiones de CO₂, NO_x y SO₂ en rangos de 1.0-3.5 kg/m², 5.1-13.2 g/m² y 9.4-32.6 g/m² respectivamente (Gao et al., 2014).

Recientemente, Tzempelikos y Lee (2021) utilizaron EnergyPlus para modelar tres tipos de edificios (comercios, oficinas y edificios escolares) en 16 ubicaciones representativas del clima en Estados Unidos. El objetivo fue evaluar el efecto combinado de la reflectividad y el aislamiento térmico del techo. La reflectividad solar se varió entre 6% (negro), 50% (techo reflectante envejecido) y 70% (techo reflectante nuevo), mientras que se consideraron tres niveles de aislamiento térmico con valores de resistencia térmica de 2, 4 y 6 m² °C/W. Los resultados muestran que todos los casos, los ahorros de energía con techos reflectantes (en comparación con los techos negros) son mayores para climas cálidos, aunque no necesariamente siguen el orden de subcategorías climáticas establecido en Estados Unidos. El aislamiento del techo es fundamental para todos los climas. Para oficinas y escuelas de poca altura, los beneficios de los techos reflectantes frente a los techos de colores oscuros son claros para todas las zonas climáticas de Estados Unidos. Por otro lado, para los edificios minoristas de grandes dimensiones, los techos reflectantes funcionan mejor, excepto en las zonas de clima frío (zonas climáticas 7 y 8).

Los trabajos antes expuestos han permitido evaluar los beneficios de los techos reflectivos.

Los resultados de estos trabajos han sido útiles para justificar o evaluar resultados de la implementación de normas que obligan, o bien sugieren, altos valores de reflectancia solar en techos de edificios que se ubican en diversas partes del mundo.

REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

Otro uso de BEM corresponde a la simulación de edificios construidos con el objetivo de incorporar adecuaciones para obtener un mejor desempeño energético. Estas adecuaciones, o rehabilitación energética, permiten disminuir el consumo de energía en rubros importantes como son la climatización artificial y la iluminación, obteniendo así ahorros económicos y reducciones en la emisión de gases con efecto invernadero. Simular un edificio ya construido nos permite monitorear algunos parámetros como la temperatura del aire interior o el consumo eléctrico para calibrar el modelo de simulación. De esta forma se puede realizar un proceso más completo de modelación energética del edificio que incluye etapas como análisis de sensibilidad, calibración, validación y optimización. Esto da como resultado modelos de simulación de edificios más realistas si se compara con la aplicación BEM en la etapa de diseño del edificio. Es indudable que en muchas regiones del mundo las condiciones de edificios para diversos usos pueden ser mejoradas con medidas pasivas simples como aislamiento térmico, techos reflectivos o sombreados en ventanas. Estas medidas simples pueden resultar económicamente factibles y es aquí donde la aplicación del BEM es fundamental.

Mazzocco et al. (2018) evaluaron propuestas de rehabilitación energética de una vivienda social en la región central de Argentina construida en 1960. Los muros exteriores de la vivienda son de ladrillo común de 0,30 m y el techo es una cubierta tradicional compuesta por losa de viguetas pretensadas de hormigón armado. La vivienda se modeló con Ecotect, un software propietario de la empresa Autodesk ahora incorporado a la plataforma Revit, y Simedif para Windows, desarrollado en el Instituto de Investigación en Energía

No Convencional de Argentina. Los modelos de simulación de ambos software fueron calibrados utilizando el consumo de energía monitoreado. Dentro de las propuestas de rehabilitación energética se incluyeron adicionar capas de poliestireno expandido en muros y techo, así como cambiar ventanas existentes por ventanas de doble vidrio hermético. A partir de la intervención energética, la energía incorporada se incrementa un 4.3 y 7.1% para alcanzar el nivel B y A de la Norma IRAM 11605, respectivamente. Sin embargo, la rehabilitación energética propuesta alcanza ahorros en la energía operativa para ambas intervenciones, del 53.7 y 85.6%, respectivamente.

Otro caso citado es un análisis sobre rehabilitación energética de edificios antiguos en la ciudad de Izmir, Turquía (Ulu y Arsan, 2020). Los autores investigaron un total de 22 edificios: cuatro edificios comerciales y 18 residenciales. En este estudio utilizaron el programa de simulación DesignBuilder v.5.2. Los 22 edificios fueron clasificados en tres grupos de acuerdo con el valor del patrimonio histórico y el registro como edificio histórico. El grupo 1 corresponde a edificios registrados oficialmente como históricos, el grupo 2 son edificios históricos no registrados como tales, y el grupo 3 corresponde a edificios no históricos. Para el proceso de rehabilitación se propusieron dos paquetes de soluciones de mejora al desempeño energético por cada grupo de edificios. En los seis paquetes se consideraron también el riesgo al patrimonio histórico de los edificios. Para los edificios de los grupos 1 y 2, el paquete 1 considera medidas sin ningún riesgo al patrimonio y el paquete 2 incorpora medidas de bajo riesgo al patrimonio. El aislamiento térmico en la parte exterior del muro, así como el cambio de ventanas y puertas son medidas que mejoran considerablemente el desempeño energético, pero fueron eliminadas por su impacto al patrimonio en los grupos 1 y 2. En el grupo 3 los cambios se dividieron en el paquete 1, que incluye componentes verticales como aislamiento en muros y sustitución de ventanas, y el paquete 2, con modificaciones en componentes horizontales como aislamiento en techo y pisos. Los resulta-

dos de este trabajo detallan los consumos obtenidos por grupo de edificios y para cada escenario: el caso base, o estado actual del edificio, y para los dos paquetes de mejoras al desempeño térmico. Para los edificios oficialmente registrados como históricos (grupo 1) se reporta un rango de ahorro en el consumo de energía de entre 14.04 kWh/m² y 118.2 kWh/m² para el paquete 1 y entre 56.33 kWh/m² y 186.35 kWh/m² para el paquete 2. Los rangos del ahorro energético reportados para el grupo 2 son similares a los del grupo 1. Para el grupo 3 se obtuvieron ahorros de 33.76 kWh/m² a 217.38 kWh/m² y de 57.39 kWh/m² a 221.25 kWh/m². Considerando el total de los edificios analizados, el consumo anual de energía fue de 506,924 kWh y se obtuvieron ahorros de energía del 19.8 y 48.57% para los paquetes 1 y 2, respectivamente.

EVALUACIÓN DE NUEVOS MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

La simulación energética de edificios es una herramienta útil en la investigación enfocada en el desarrollo de nuevos materiales y sistemas constructivos que buscan mejorar el desempeño energético de los edificios. Un ejemplo es aplicación de la simulación energética de edificaciones para evaluar la tecnología de materiales con cambios de fase en componentes de la envolvente de edificios (Devaux y Farid, 2017; Royon et al., 2013; Jeong et al., 2021). Durante el proceso de transferencia de calor que ocurre a través de los componentes de la envolvente como el piso, el techo y los muros, parte de la energía es almacenada en estos componentes. La energía se puede almacenar principalmente de dos formas: calor sensible y calor latente. Un material convencional almacena la energía como calor sensible, es decir a través del cambio de temperatura. La densidad y el calor específico de los materiales son las propiedades que se relacionan con almacenamiento de calor sensible, aunque también se utiliza el término de masa térmica en el diseño de edificios. La masa térmica corresponde a la capacidad calorífica, que equivale al producto de la densidad por el calor específico. Por otra parte, se puede aprovechar materiales que tienen un

cambio de fase, generalmente de líquido a sólido y viceversa, para que ocurra un almacenamiento de energía en forma de calor latente. El uso de materiales con cambio de fases (MCF) en las condiciones que ocurre la transferencia de calor a través de la envolvente es más efectivo cuando se tiene materiales de construcción livianos (Chiu y Martin, 2013). El uso de MCF en la envolvente tiene dos ventajas principales: aporta un nivel de temperatura más constante dentro de un edificio y permite que la aplicación de MCF sea independiente del sistema de calefacción y refrigeración empleado (Soares et al., 2013). Algunos programas de BEM como EnergyPlus y TRNSYS han incorporado módulos para cálculos con la tecnología de MCF en edificaciones (Tabares-Velasco et al., 2012; Kuznik et al., 2010). Un ejemplo de la aplicación de EnergyPlus para evaluar la incorporación de MCF es presentado por Devaux y Farid (2017). Estos autores evaluaron un par de casetas de oficinas construidas con paneles de yeso acondicionadas con un sistema de calefacción por piso radiante. Las casetas tienen una superficie construida de casi 7 m² cada una y son ubicadas en el campus de Tamaki de la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda). En una de las casetas se adicionaron paneles con MCF en paredes, piso y techo. Ambas casetas fueron monitoreadas por 10 días. Los consumos de energía medidos en la cabaña y los previstos por EnergyPlus resultaron con una muy buena concordancia, con una diferencia promedio de sólo 1.5% durante siete días; Sin embargo, EnergyPlus en algunos días sobreestimó el consumo, y en otros lo subestimó. El uso de MCF permitió reducir la carga máxima de calefacción de manera significativa y obtener ahorros en el consumo de energía del 32%. Los costos para la calefacción se redujeron en un 42% debido tanto al ahorro en el consumo de energía como por el cambio de la carga máxima.

CASOS DE APLICACIÓN

Para ilustrar dos diferentes tipos de aplicaciones de la modelación energética de edificaciones, se

describen dos casos de estudio. El primer caso consiste en evaluar el efecto de la reflectancia solar, emisividad infrarroja y aislamiento térmico en techos sobre el uso de energía. Para este caso se utilizó el programa TRNSYS para simular una vivienda familiar bajo condiciones climáticas de 20 ciudades de México. El segundo caso consiste en la calibración de un modelo energético desarrollado con Openstudio y EnergyPlus para simular un edificio académico. En este caso se monitorearon temperaturas del aire interior y superficies de paredes para compararlas con las temperaturas obtenidas con la simulación energética de este edificio.

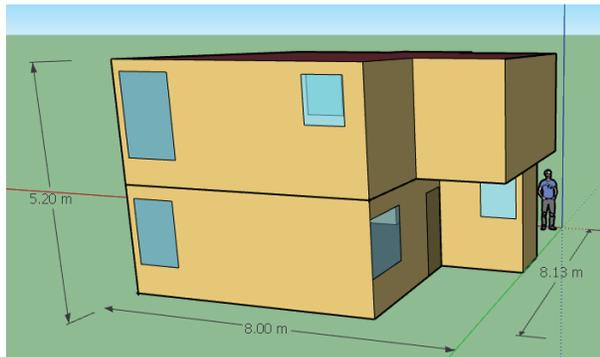
EFECTO DE LA REFLECTANCIA SOLAR Y EMISIVIDAD INFRARROJA DEL TECHO SOBRE EL USO DE ENERGÍA EN MÉXICO

Este análisis se basa en un trabajo de tesis doctoral (Lucero, 2016) donde se consideraron, además del edificio residencial aquí discutido, un modelo de vivienda de interés social y un edificio no residencial. Algunos resultados sobre la simulación de la vivienda social han sido previamente publicados (Lucero-Álvarez et al., 2014; Lucero-Álvarez et al., 2016; Lucero-Álvarez y Martín-Domínguez, 2016, 2019).

El modelo del edificio residencial es una vivienda de dos niveles, con una superficie total de construcción aproximadamente de 100 m² (figura 3). Este modelo corresponde al edificio de referencia utilizado para el diseño de la Norma Mexicana NOM-020-ENER-2011 y la información fue obtenida de un reporte preparado para Comisión Nacional de Uso Eficiente de Energía (CONUEE) (Álvarez et al., 2014). Las características del edificio, incluyendo materiales de construcción y horarios de operación se basan en trabajos previos (Álvarez et al., 2014, y Halverson et al., 1994, en Álvarez et al., 2014).

FIGURA 3

Modelo de edificio residencial simulado con TRNSYS



Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el efecto de la RS y EI se utilizó el software TRNSYS y se realizó un análisis paramétrico donde se variaron ambas propiedades termo-ópticas en un rango de 0.1 a 0.9 con incrementos de 0.1. Adicionalmente se consideraron tres escenarios con aislamiento térmico (sin aislamiento térmico, 2.5 cm y 5.0 cm de aislamiento). Las simulaciones se realizaron con condiciones climáticas de 20 ciudades que son representativas de las diferentes zonas térmicas que define la Norma Mexicana NMX-C460-ONNCCE-2009 (tabla 1). La ocupación es de cuatro personas, y el horario de operación es de lunes a viernes entre las 0:00 a 8:00 horas y 15:00 a 24:00 horas, e incluye las 24 horas del sábado y domingo. Se consideraron ganancias por equipo eléctrico, iluminación y ocupación de personas. Los sistemas constructivos incluyen paredes en base a bloque hueco de concreto con acabados de yeso, en la superficie interior, y de mortero en la exterior. El techo consiste en una losa de concreto con acabado de yeso e impermeabilizante elastomérico. Para el piso se considera una losa de concreto con cerámica. Otros parámetros para la simulación, incluyendo las propiedades físicas de los materiales de construcción, son detallados en Lucero (2016).

TABLA 1

Ciudades consideradas para realizar la simulación térmica, y que representan las diferentes zonas térmicas de México

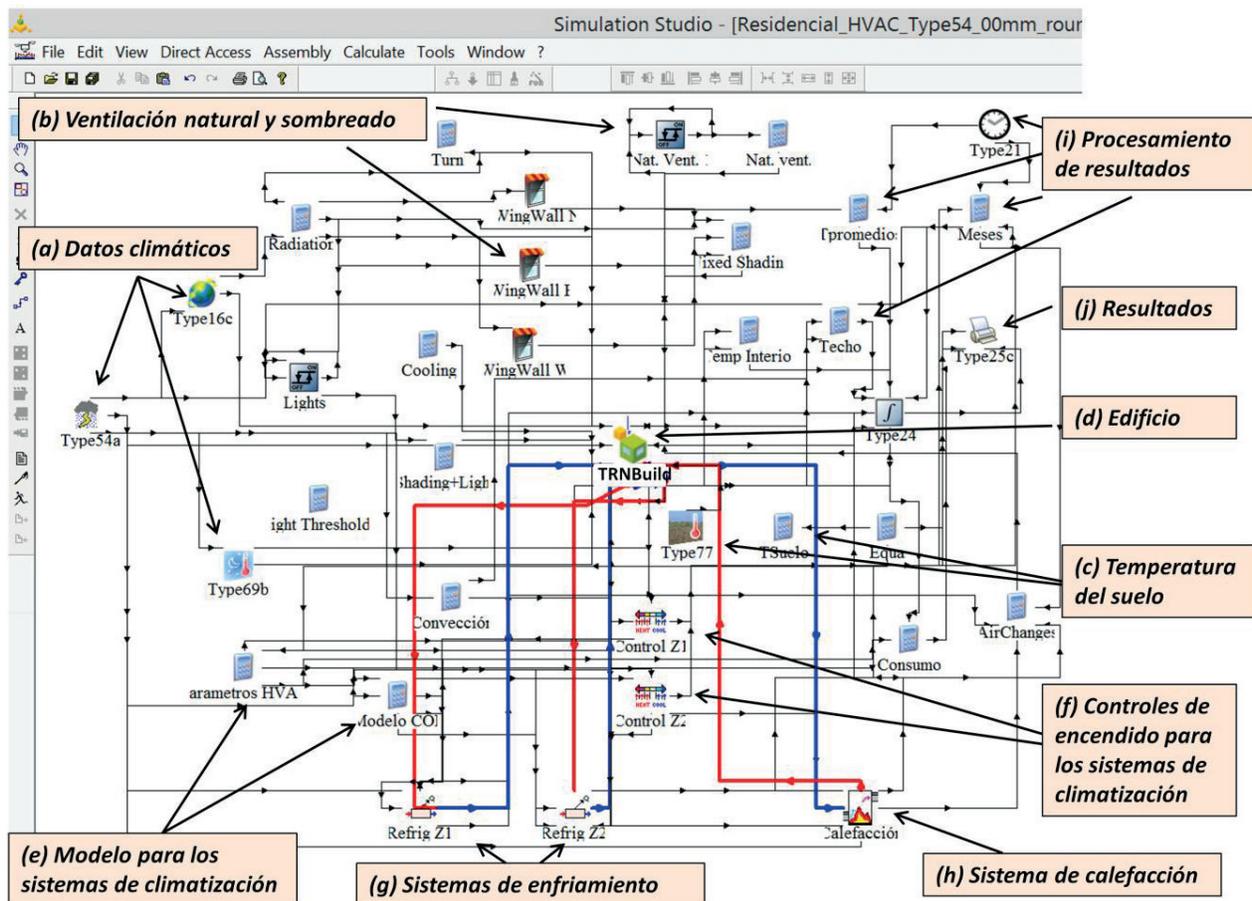
Zona 1
1. Acapulco
2. Campeche
3. Culiacán
4. Veracruz
Zona 2
5. Cuernavaca
6. Guadalajara
7. Hermosillo
8. Monterrey
Zona 3A
9. México DF
10. Morelia
11. Puebla
12. Querétaro
Zona 3 (B y C)
13. Chihuahua (3B)
14. Saltillo (3B)
15. San Luis Potosí (3B)
16. Orizaba (3C)
Zona 4
17. Tlaxcala (4A)
18. Toluca (4A)
19. Pachuca (4B)
20. Zacatecas (4C)

Fuente: Lucero, 2016.

El TRNSYS es un entorno de software basado en gráficos para la simulación de sistemas en estado transitorio. Aunque este paquete está enfocado en la evaluación del rendimiento de sistemas de energía térmica y eléctrica, permite una gran flexibilidad para la simulación de otros tipos de sistemas. TRNSYS puede ser dividido en dos partes: una biblioteca de componentes que evalúan las diversas partes del sistema, y un motor (o kernel) que lee la información proporcionada en cada componente y resuelve iterativamente el sistema (TRNSYS, 2021).

La figura 4 muestra la interfaz principal de TRNSYS denominada Simulation Studio, con el sistema desarrollado para la simulación energética del edificio residencial. En la figura 4 se indican los objetivos de algunos componentes, cada componente es enlazado a otros componentes de forma tal que las variables de salida de un com-

FIGURA 4
Interfaz gráfica Simulation Studio de TRNSYS, mostrando los módulos y enlaces utilizados para el modelo del edificio residencial



Fuente: Lucero, 2016.

ponente corresponden a las variables de entrada de otros componentes.

Además del sistema para simular el uso de energía, también se utilizaron otras variantes para evaluar el confort y las cargas térmicas. El sistema para evaluar el confort térmico no utiliza sistemas de enfriamiento y calefacción, por lo que la temperatura fluctúa de forma libre según las condiciones climáticas y los flujos de calor que se establezcan a través de la envolvente del edificio. El confort térmico puede ser evaluado a través de dos parámetros: la predicción del voto promedio (PMV, por sus siglas en inglés) y la predicción del porcentaje de incomodidad, o no confort (PPD, por sus siglas en inglés) basados en el modelo de Fanger (Bojórquez-Morales

et al., 2011). En el modelo de cargas térmicas se determina un rango de temperaturas a mantener dentro de la vivienda. La carga térmica corresponde a la energía que se necesita para conseguir que las condiciones de temperatura y humedad se mantengan en una zona de confort térmico. En el modelo de TRNSYS para determinar cargas térmicas, se fijan la fluctuación de temperatura del aire interior del edificio, por ejemplo entre 20° C y 25° C, y mediante el balance de energía se determinan las cargas térmicas de calefacción y enfriamiento.

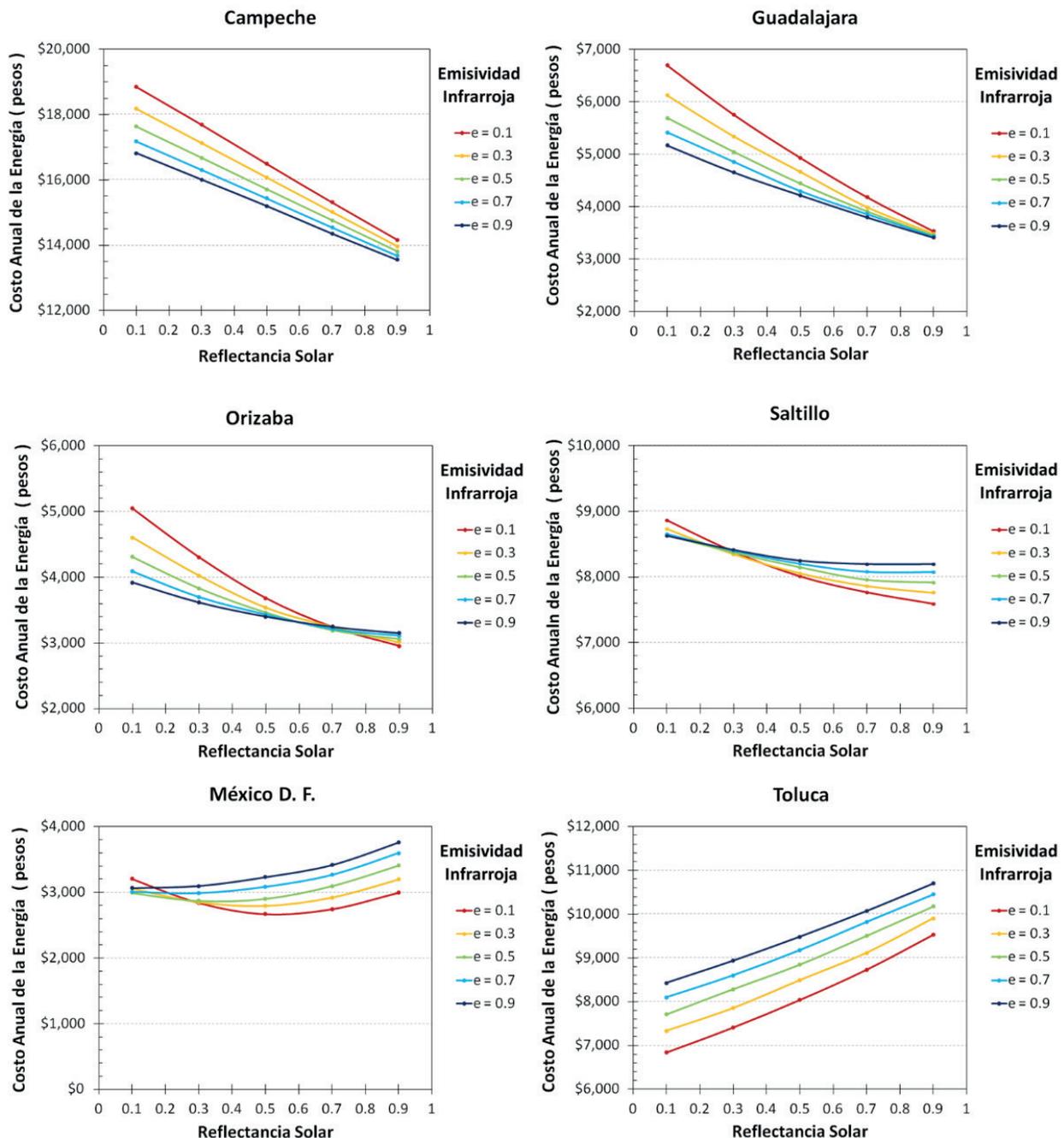
Dado que los sistemas de climatización considerados requieren diferentes recursos energéticos, durante el verano se consume electricidad y durante el invierno se requieren tanto energía

eléctrica como gas natural, se utilizó el costo de total de la energía durante todo el año para optimizar los valores de RS, EI y aislamiento térmico. El costo anual de la energía (CAE) fue calculado con un precio de electricidad de 127 c\$/kWh

correspondiente al precio medio del sector doméstico para el primer semestre de 2014, y con el precio medio de gas natural del 2014, que fue de 181.56 pesos/GJ.

FIGURA 5
Patrones de la variación del costo de la energía en función de la RS y EI

Edificio Residencial



Fuente: Lucero, 2016.

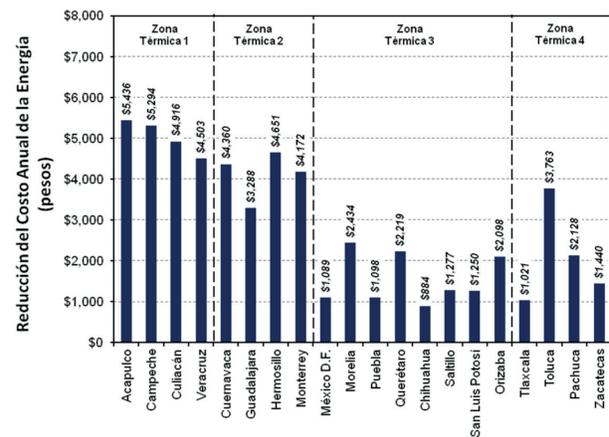
Las gráficas de la figura 5 muestran casos representativos de los diferentes patrones de la variación del costo de la energía al cambiar los valores de la RS y EI del techo sin aislamiento térmico. Las ciudades cuyos requerimientos de energía para climatización artificial son dominados por las necesidades de enfriamiento (zonas térmicas 1 y 2), resultaron con las mayores diferencias del costo de la energía, en estas ciudades se requieren altos valores de RS, para disminuir la ganancia de calor por absorción de la radiación solar, y altos valores de EI, para incrementar la pérdida de calor por interacción de la radiación infrarroja con la atmósfera, como se puede observar en los casos de Campeche y Guadalajara. En las ciudades de estas dos zonas térmicas se tiene una relación lineal de la RS sobre el costo anual de la energía para cada isovalor de EI, observándose que el mayor efecto de la EI se da cuando $RS = 0.1$ y decrece al aumentar la RS. Conforme se incrementan las necesidades de calefacción en las ciudades de las zonas térmicas 3 y 4, se presenta una curvatura y un punto de convergencia en los isovalores de EI, resultando combinaciones óptimas que incluyen bajos valores de EI y diversos valores de RS.

En las gráficas de la figura 5 pueden observarse diversos grados de reducción del CAE entre la combinación de RS-EI con mayor consumo, y la combinación RS-EI con menor consumo. Por ejemplo, para el caso de Campeche la combinación $RS = 0.1$ y $EI = 0.1$ representa un costo de \$18,923 mientras que una combinación óptima de $RS = 0.9$ y $EI = 0.9$ el costo es de \$13,629. Las reducciones del CAE entre la peor y la mejor combinación de RS y EI se muestran en la figura 6. En dicha figura se observa que la mayor reducción del CAE, y por tanto el mayor efecto de la RS y EI sobre el consumo de energía, corresponden a las ciudades ubicadas en las zonas térmicas 1 y 2. Estas ciudades se caracterizan por presentar un consumo de energía destinado casi en su totalidad al enfriamiento del edificio. Para las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2 se requieren altos valores de RS

para disminuir la ganancia de calor por absorción de la radiación solar, y altos valores de EI para incrementar la pérdida de calor por interacción de la radiación infrarroja con la atmósfera. Una reducción importante corresponde a la ciudad de Toluca (zona térmica 4), cuya combinación óptima de RS y EI es opuesta a las combinaciones adecuadas de las zonas térmicas 1 y 2.

FIGURA 6

Reducción del CAE para el edificio residencial

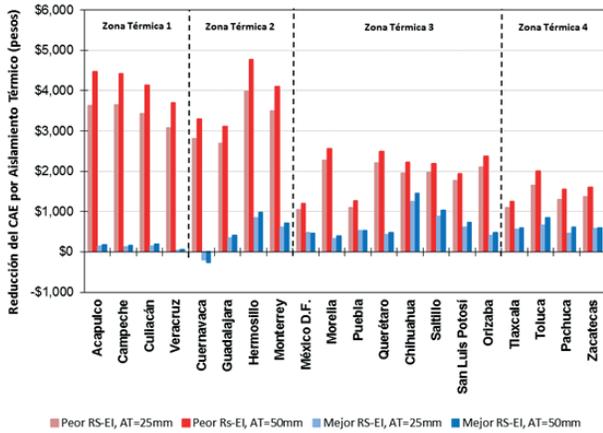


Fuente: Lucero, 2016.

El efecto del aislamiento térmico está en función de la efectividad que presente la combinación de RS y EI (véase figura 7). El efecto del aislamiento térmico puede ser muy variado para ciudades en las zonas térmicas 1 y 2, en estos casos la reducción del CAE puede ser superior a los \$3,000 si el techo presenta la peor combinación de RS y EI (0.1 para ambas propiedades). El ahorro en el consumo de energía debido al uso de aislamiento térmico disminuye notablemente si se cuenta con un techo reflectivo en ciudades de climas cálidos. Si consideramos que se cuenta con una combinación óptima de RS-EI (barras azules en la figura 7), entonces los mayores efectos del aislamiento térmico corresponden a ciudades que tienen requerimientos energéticos para calefacción (zonas térmicas 3 y 4).

FIGURA 7

Reducción del costo de energía al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en edificio residencial

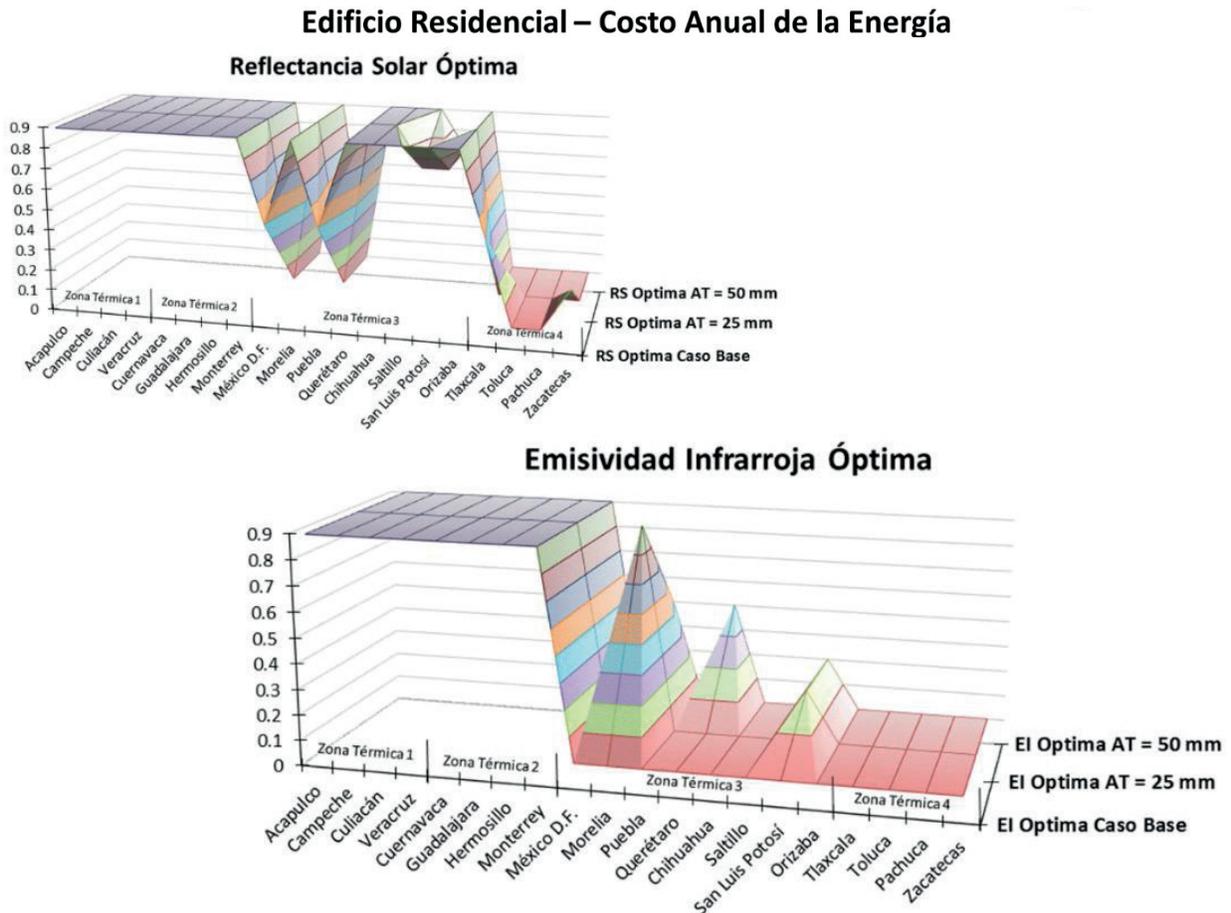


Fuente: Lucero, 2016.

Las combinaciones de RS-EI que resultan óptimas en los tres escenarios de aislamiento térmico se muestran en la figura 8. Se pueden generalizar valores de RS y EI para los impermeabilizante comunes en México como asfálticos negros (0.1), acrílicos rojos (0.3) y acrílicos blancos (0.7), todo ellos con valores altos de emisividad infrarroja (0.9), por los que se tendrían menores reducciones del CAE para un contexto más real que las presentadas en las figuras 6 y 7. Debido a que la diferencia en el costo entre los tres tipos de impermeabilizantes comunes en México es mucho menor que la inversión que se requiere para la instalación de aislamiento térmico, es importante considerar la mejor combinación posible de RS y EI del techo para estimar los ahorros por la aplicación de aislamiento térmico. Un ejemplo

FIGURA 8

Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en el edificio residencial



Fuente: Lucero, 2016.

de un análisis de costo-beneficio por el uso de aislamiento térmico con este enfoque, se muestra en Lucero et al. (2016).

CALIBRACIÓN DE UN MODELO ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO ACADÉMICO

Una aplicación importante de la simulación energética de edificios corresponde a la rehabilitación energética. En este escenario se simula un edificio ya construido de tal forma que pueden ser evaluadas diferentes medidas para reducir el consumo de energía para climatización e iluminación. Al simular un edificio ya construido permite monitorear algunos parámetros como la temperatura y humedad del aire interior, el consumo eléctrico o de cualquier combustible que utilice el edificio, temperaturas y flujos de calor en las superficies de paredes, piso y techos, entre otras. La medición experimental de estas variables resulta clave para calibrar los modelos de simulación, y de esta forma tener resultados más apegados a la realidad. Una vez obtenido el modelo de simulación calibrado, es posible explorar diversas tecnologías pasivas o activas para mejorar el desempeño energético del edificio.

Para mostrar este tipo de aplicación se seleccionó un edificio académico de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua. La Facultad se ubica en el extremo suroeste de la ciudad de Chihuahua. El edificio es destinado a aulas y laboratorios de cómputo, consta de dos niveles donde se definieron 28 espacios o zonas térmicas, 14 por nivel (véanse tabla 2 y figura 9). El área total del edificio es de 1,027.12 m² y el volumen total considerando las 28 zonas térmicas definidas es de 2,875.94 m³.

TABLA 2
Área y volumen de los espacios del edificio

Espacio_Área (m ²)	Volumen (m ³)	Espacio	Área (m ²)	Volumen (m ³)	
LC 18	38.08	106.62	Salón 23	38.08	106.62
LC 22	51.52	144.26	Salón 24	38.08	106.62
LC 25	51.52	144.26	Salón 26	38.08	106.62
Lobby PA	43.68	122.3	Salón 27	51.52	144.26
Lobby PB	43.68	122.3	Salón 28	51.52	144.26
Pasillo C PA	27.68	77.5	Salón 29	38.08	106.62
Pasillo C PB	27.68	77.5	Salón 30	38.08	106.62
Pasillo N PA	33	92.4	Salón 31	51.52	144.26
Pasillo N PB	33	92.4	Salón 32	38.08	106.62
Pasillo S PA	35.2	98.56	Salón 33	51.52	144.26
Pasillo S PB	29.92	83.78	wc h pa	12.48	34.94
Salón 19	38.08	106.62	wc h pb	12.48	34.94
Salón 20	38.08	106.62	wc m pa	12.48	34.94
Salón 21	51.52	144.26	wc m pb	12.48	34.94

Fuente: elaboración propia.

Los sistemas constructivos del edificio y las propiedades térmicas de los materiales de construcción están enlistados en las tablas 3 y 4. En el caso de los sistemas constructivos de la tabla 3, se enlistan de la superficie exterior a la superficie interior. Puede notarse que para los casos de piso y techo interiores, la lista de materiales es la misma, sólo que esta invertida, ésta es una convención que sigue Openstudio para llevar a cabo las simulaciones de forma correcta.

FIGURA 9
Plantas de los dos niveles del edificio académico analizado



Fuente: elaboración propia.

TABLA 3
Sistemas constructivos del edificio académico analizado

Muro exterior	Techo	Piso
Pintura acrílica	Impermeabilizante	Losa de concreto 17 cm
Enjarre	Aislamiento 2.5 cm	Pega-azulejo
Block de concreto 20 cm	Losa de concreto 7 cm	Cerámica
Yeso	Caseto EPS	
Pintura acrílica		
Muro interior	Piso interior	Techo interior
Pintura acrílica	Cerámica	Losa aligerada-plenum
Yeso	Pega-azulejo	Pega-azulejo
Block de concreto 12 cm	Losa aligerada	Cerámica
Yeso		
Pintura acrílica		

Muro exterior	Techo	Piso
Ventanas-puertas exteriores	Vigueta de concreto	
Vidrio de 6 mm	Impermeabilizante*	
	Losa de concreto 17 cm	

Sistemas constructivos_

TABLA 4
Propiedades térmicas de los materiales opacos

Espesor	Cond. térmica	Calor específico	Densidad		
Material	E_m	λ [W/m·K]	C_p [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]	Referencias
Enjarre	0.03	0.8722	840	1,860	Lucero, 2011
Block 15 cm (no usado)	0.15	0.877	930	1,050	Pérez et al., 2011
Block 12 cm	0.12	0.755	920	1,210	Pérez et al., 2011
Block 20 cm	0.20	1.07	940	900	Fogiatto et al., 2016
Losa de concreto 17 cm	0.17	1.74	840	2,300	Lucero, 2011
Losa de concreto 7 cm	0.07	1.74	840	2,300	Lucero, 2011
Casetón EPS	0.1	0.02885	1,210	35	Martínez et al., 2010
Pintura acrílica	0.002	0.17	800	1,127	Lucero, 2016
Yeso	0.013	0.16	830	785	Calixto et al., 2021
Cerámica	0.01	1.0469	800	2,500	Lucero, 2016
Aislamiento 2.5 cm	0.025	0.04	1,400	10	Lucero, 2016
Pega-azulejo	0.01	1.3	1,000	1,900	Lucero, 2016
Losa aligerada-plenum	0.3	1.128	1,000	1,090	Lucero, 2016

La medición de temperaturas se llevó a cabo en los salones 26, 32 y 24 (véase figura 9). El monitoreo de temperaturas del aire interior se llevó a cabo con dos termohigrómetros de marca Hioki modelo LR5001. Para determinar las temperaturas de las paredes se utilizó un adquisidor de datos de la marca Hioki modelo LR8432-20 con 10 canales; como sensores de temperatura se utilizaron termopares tipo K. La figura 10 muestra los equipos utilizados y ejemplos de la instalación de estos equipos en el edificio analizado.

Se realizaron tres conjuntos de mediciones de un periodo de siete días para cada conjunto. Cada conjunto de medición se llevó a cabo en cada uno de los tres salones considerados. El intervalo

de medición fue de 15 minutos. Los datos de las mediciones se almacenaron en una base de datos SQLite.

Para llevar a cabo las simulaciones térmicas se utilizó la versión 1.1.0 de OpenStudio Application que trabaja con el núcleo de OpenStudio SDK versión 3.1.0 y EnergyPlus versión 9.4.0 como motor de simulación. OpenStudio Application permite tener una interfaz gráfica de usuario donde se pueden visualizar e introducir todos los datos de entrada del modelo, así como parte de los resultados. Para construir el modelo de simulación en OpenStudio Application se utilizan 15 pasos que están relacionados con las 15 pestañas que aparecen en la barra ubicada en el extremo izquierdo de la interfaz gráfica principal (figura 11).

FIGURA 10

Instrumentos utilizados para el monitoreo experimental: (a) termohigrómetro Hioki modelo LR5001 para medir temperatura y humedad relativa del aire interior montado en trípode; (b) adquisidor de datos Hioki modelo LR8432-20 con sensores de flujo de calor y termopares tipo K instalados en pared del edificio monitoreado



Fuente: elaboración propia.

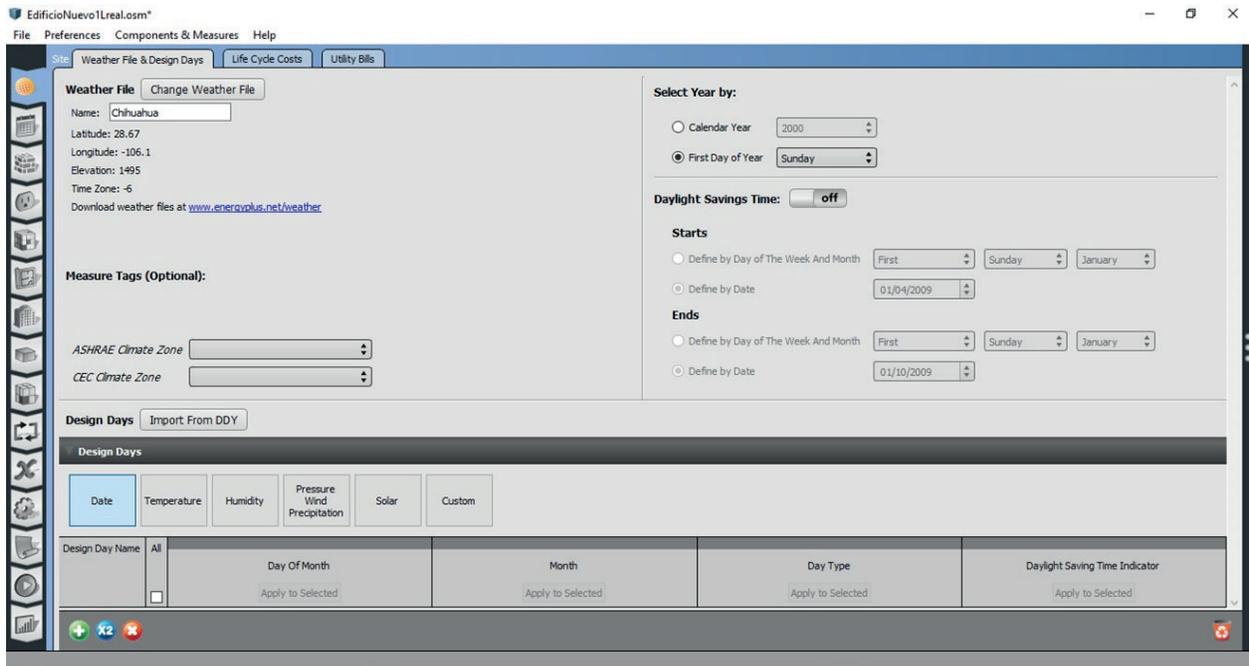
Cada pestaña despliega una interfaz diferente, la primera pestaña se relaciona con los datos climáticos y su interfaz es la que se muestra en la figura 11. En esta interfaz se selecciona un archivo de datos meteorológicos con la extensión EPW (EnergyPlus Weather Format). En cada una de las siguientes 11 pestañas se introduce información o se seleccionan opciones de acuerdo con el nombre de pestaña que aparece en la figura 11.

Las últimas dos pestañas corresponden al módulo donde se corren las simulaciones y al módulo donde se presentan los resultados.

Los archivos EPW se pueden preparar a partir de un año típico (que son representativos del clima a largo plazo, compilados a partir de datos de 20 a 30 años). Existen fuentes de acceso abierto como los sitios web “Weather Data” de EnergyPlus (<https://energyplus.net/weather>) y “Cli-

FIGURA 11

Ventana de inicio de la interfaz de usuario de OpenStudio Application; en la parte de abajo se enumeran las pestañas de la barra de herramientas ubicada en el extremo izquierdo de la interfaz de usuario



Fuente: elaboración propia.

mate” de la organización OneBuilding (<http://climate.onebuilding.org/default.html>). También existen software de licencia como Meteonorm que pueden generar este tipo de archivos climáticos para cualquier localidad basándose en datos de más de 8,000 estaciones meteorológicas y cinco satélites geoestacionarios (<https://meteonorm.com/en/>). Para este estudio se utilizó el archivo Chihuahua-hour.epw descargado del sitio web de OneBuilding Org. Para llevar los modelos de validación fue necesario modificar el archivo Chihuahua-hour.epw para incluir los datos climáticos del periodo en el que realizaron

las mediciones de temperatura en el edificio. Los datos climáticos fueron obtenidos la estación meteorológica “Potabilizadora Chihuahua”, que es la más cercana al edificio académico. Esta estación meteorológica se ubica aproximadamente a 4 km al NNE del edificio analizado.

Los monitoreos se llevaron a cabo entre el 27 de julio al 21 de agosto. De acuerdo con los datos climáticos obtenidos de la estación “Potabilizadora Chihuahua”, la temperatura del aire fluctuó entre los 17.4 hasta los 32.6° C (figura 12). La radiación solar y la difusa alcanzaron máximos que superaron los 800 W/m² y 400 W/m², res-

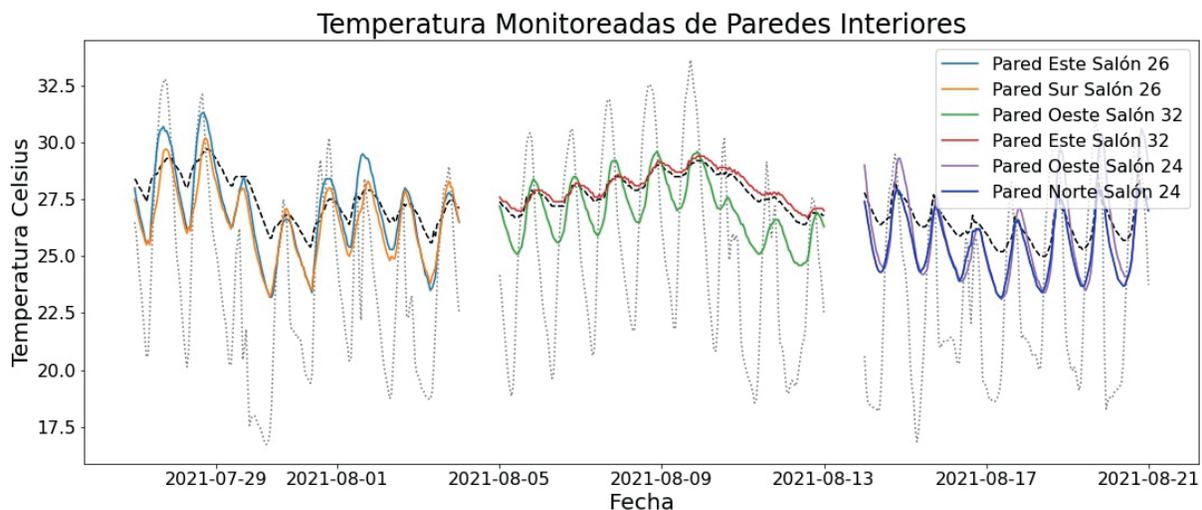
pectivamente. La temperatura del aire interior se mantuvo en un rango entre los 25° C y los 29.7° C, como se puede observar en la figura 12. El valor mínimo (25° C) se presentó en el salón 24 el 19 de agosto, mientras que el valor máximo (30° C) ocurrió el 29 de julio en el salón 26. En esta figura 12 se presentan también las temperaturas de superficies interiores de los salones monitoreados.

Para calibrar el modelo de simulación se inició con una versión base donde se simplificaron algunos sistemas constructivos. A partir de este modelo se fueron agregando diversos elementos y parámetros como ventanas, datos de infiltración y masa térmica interna, así como elementos de sombreados. Las versiones del modelo de simulación se nombraron como EdificioNuevo1 más una letra mayúscula que identifica cada corrida. En total se construyeron nueve versiones de modelo de simulación para la validación (D,

E, F, G, Ga, H, Ha, K y L). En el modelo K se llevó a cabo un análisis paramétrico donde se realizaron nueve corridas, identificadas con una letra minúscula adicional, variando la infiltración y masa térmica interna. Los valores de infiltración fueron de 0.5, 1 y 2 renovaciones de aire por hora, mientras que para la masa térmica interna (efecto de inercia térmica por mobiliario y paredes internas) se utilizaron los valores de 20, 60 y 120 kJ/m². El modelo EdificioNuevo1L, con infiltración de una renovación de aire por hora y masa térmica interna de 120 kJ/m², presentó el mejor ajuste de las temperaturas simuladas respecto a las temperaturas monitoreadas (figura 13). En cada uno de los modelos se compararon las temperaturas de superficies internas de paredes y del aire interior de los salones 26, 32 y 24. La figura 13 compara el ajuste entre las temperaturas simuladas de los modelos EdificioNuevo1J y el EdificioNuevo1L.

FIGURA 12

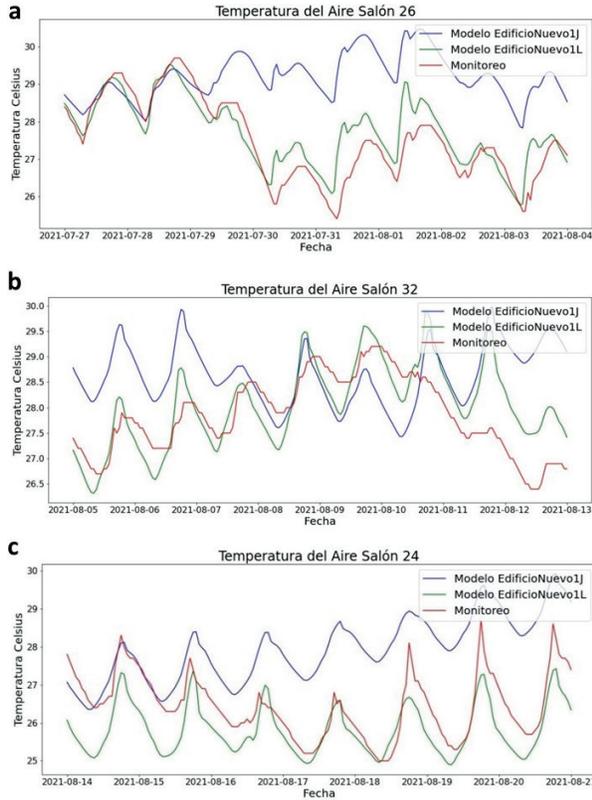
Temperatura de las superficies interiores de los espacios monitoreados. La temperatura del aire exterior se muestra con líneas de puntos en color gris, y la temperatura del aire interior se muestra con línea discontinua de color negro.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 13

Comparación entre las temperaturas del aire interior en las versiones EdificioNuevo1J, EdificioNuevo1L y las temperaturas monitoreadas obtenidas con la instrumentación instalada en los salones 26, 32 y 24



Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el ajuste entre las temperaturas de modelo de validación y las temperaturas monitoreadas se utilizaron el error cuadrático medio y el error absoluto medio. El error cuadrático medio (ECM) corresponde a la raíz cuadrada del cociente entre la suma de los cuadrados de la desviación (diferencia entre el valor de la temperatura observada y el valor de la temperatura simulada) y el número de observaciones.

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{O,i} - T_{S,i})^2}$$

Donde n es el total de observaciones de las temperaturas, T_O son las temperaturas observadas

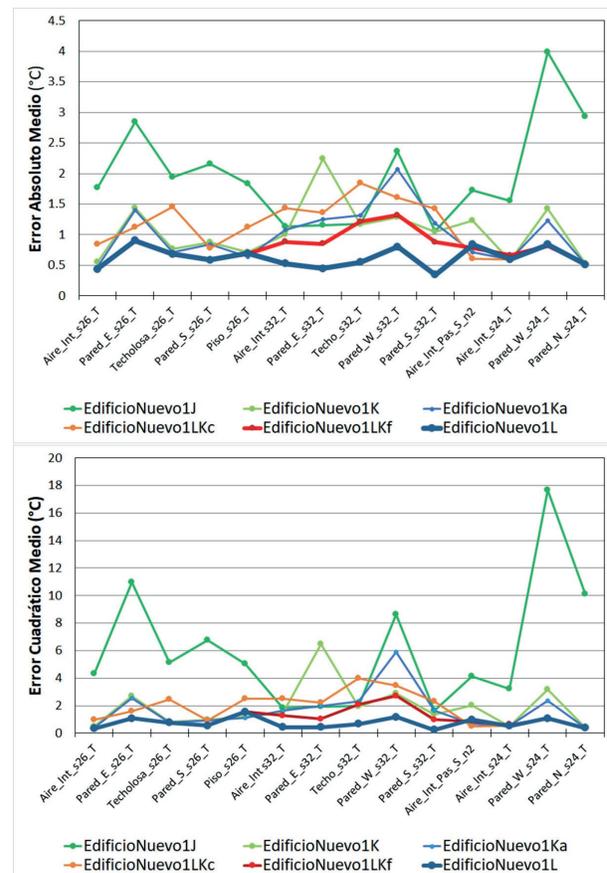
(monitoreadas con sensores) y T_S son las temperaturas del modelo de simulación térmica. El error absoluto medio (EAM) es obtenido con el promedio de los valores absolutos de la diferencia entre la temperatura observada T_O y la temperatura simulada T_S .

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{O,i} - T_{S,i}|$$

La figura 14 muestra los resultados obtenidos de los ECM y EAM, respectivamente. En ambas figuras se muestran todas las temperaturas consideradas para el análisis del modelo de validación para seis de las 17 versiones construidas.

FIGURA 14

Error cuadrático medio y error absoluto medio de las temperaturas observadas/simuladas para seis versiones del modelo de validación



Fuente: elaboración propia.

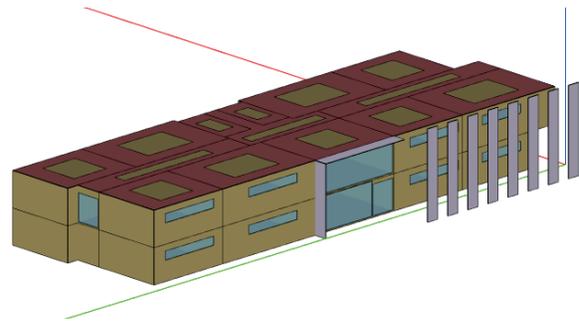
En la figura 14 se observa la evolución en el ajuste entre las temperaturas simuladas y las temperaturas observadas. El principal parámetro que influyó para el ajuste fue el valor de la masa térmica interna, este parámetro es relacionado con el almacenamiento de calor entre los cuerpos que se encuentran en el interior del edificio, en estos cuerpos debe incluirse la masa del aire presente en el interior del edificio, así como el mobiliario que se encuentre presente y la masa de los muros interiores. Las versiones que muestran un mayor ajuste en ambas figuras son EdificioNuevo1Lkf y Edificio1L, la única diferencia se presenta entre ambas versiones corresponde a temperaturas del salón 32.

La figura 15 muestra el isométrico del modelo de validación final, donde se observan los elementos de sombreado que representan los árboles cercanos al edificio. El efecto del sombreado por árboles se reflejó en la disminución de las temperaturas del salón 32 y un mayor ajuste con las temperaturas monitoreadas. Otra medida que se tomó para mejorar el modelo de simulación fue separar las viguetas de concreto de la losa aligerada y tratarlas como una subsuperficie de los espacios de la planta alta. Estas subsuperficies son representadas por los rectángulos de color café mostrados en el techo del edificio en la figura 15, el área de las subsuperficies es proporcional al área que ocupan las viguetas de concreto en la losa.

Como puede observarse en la figura 14, en el modelo EdificioNuevo1L los errores ECM y EAM tiene valores menores a 2°C y 1°C , respectivamente, para las temperaturas consideradas en la validación. El valor de desviación entre temperaturas simuladas y monitoreadas menor a 1°C es aceptable, considerando la precisión de los equipos de monitoreo (que es de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$).

FIGURA 15

Isométrico de la versión final (EdificioNuevo1L) del modelo de validación con los elementos de sombreado representando los árboles cercanos al edificio y subsuperficies de las viguetas de concreto en el techo



Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso de la calibración consiste en la validación de dicho modelo. Para la validación se pueden monitorear las temperaturas del aire interior y paredes en otros espacios o zonas térmicas, así como considerar otra época del año. De esta forma se verifica que el modelo de simulación tiene la aproximación requerida en estas condiciones diferentes de monitoreo. En caso de que no se alcance el límite de los errores establecidos (ECM y EAM), entonces el modelo debe modificarse para reducir dichos errores. Una vez que el modelo ha sido validado, el modelo está listo para ser modificado para simular el edificio con adecuaciones que pueden reducir el consumo de energía. Algunas medidas de mejora para este edificio que se pueden considerar son el sombreado en ventanas, aislamiento térmico en paredes, recubrimientos para techos con mayores valores de reflectancia solar-emisividad infrarroja, cambiar ventanas de vidrio sencillo a doble vidrio, cambiar los sistemas de climatización actuales por sistemas más eficientes, entre otras. Posteriormente cada propuesta debe ser evaluada con un análisis de costo-beneficio antes de ser implementada.

CONCLUSIONES

La revisión sobre trabajos de investigación presentada en este artículo permite identificar algunas aplicaciones del BEM. Se ha mostrado cómo algunos investigadores han utilizado software para diseñar edificios de oficinas y residenciales con desempeños energéticos más eficientes. Para ello se han utilizado herramientas adicionales que permiten realizar corridas de forma automatizada, variando parámetros que incluyen la geometría del edificio. Otros autores han aplicado la simulación de edificios para evaluar el desempeño térmico y propuestas de mejora para la rehabilitación térmica de edificios, algunos de ellos considerados como patrimonio histórico. Otras aplicaciones del BEM revisadas en este trabajo corresponden a la justificación de normas relacionadas con techos reflectivos, y la evaluación de tecnologías novedosas como los paneles con materiales que cambian su fase para almacenar energía en la envolvente.

Por otra parte, resultados obtenidos con el software TRNSYS muestran que las ciudades de clima cálido extremo en México (zonas térmicas 1 y 2) presentan los mayores efectos de la RS y EI sobre el consumo energético para un edificio residencial tipo. Los datos obtenidos con este ejercicio concluyen que los beneficios por el uso de techos reflectivos son mayores en las zonas térmicas 1 y 2, mientras que el aislamiento térmico en techo tendrá mejores efectos en las zonas térmicas 3 y 4 si se consideran los valores óptimos de RS y EI. Otro caso de aplicación corresponde a un proceso de calibración de un modelo de simulación de un edificio académico desarrollado con OpenStudio. Para calibrar el modelo del edificio académico, el proceso que se utilizó fue mejorar el nivel de detalle del modelo de simulación en cada versión y en las versiones finales realizar un análisis paramétrico en variables de entrada con mayor incertidumbre, como son la infiltración y la masa térmica interna.

Existen retos importantes en la modelación energética enfocada en edificaciones, como mejorar la interoperabilidad con los software BIM,

así como disminuir los tiempos y costos para que su uso sea más extendido durante el diseño temprano de edificios proyectados, o durante la remodelación de edificios ya construidos. Sin embargo, es indudable que el uso de la modelación energética en edificios cada vez es más extendido en todo mundo. En México también se observa un crecimiento de casos de aplicación del BEM en la última década, esto a través de un mayor número de publicaciones realizadas por investigadores de universidades y centro de investigación del país, así como exposiciones de casos realizadas por diversas empresas que ya ofrecen servicios de consultoría en este tema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Homoud, M. S. (2001). Computer-aided building energy analysis techniques. *Building and Environment*, 36(4): 421-433. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00026-3)
- Akbari, H., Konopacki, S., Parker, D., Wilcox, B., Eley, C., y Van Geem, M. (1998). Calculations in Support of SSP90.1 for Reflective Roofs. *ASHRAE Transactions*, 104(1B): 984-995.
- Akbari, H., Konopacki, S., y Pomerantz, M. (1999). Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. *Energy*, 24(5): 391-407. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00105-4)
- Akbari, H., y Levinson, R. (2008). Evolution of Cool-Roof Standards in the US. *Advances in Building Energy Research*, 2(1): 1-32. <https://doi.org/10.3763/aber.2008.0201>
- Álvarez-García, G. S., Shah, B., Rubin, F., Gilbert, H., Martín-Domínguez, I., y Shickman, K. (2014). Evaluación del impacto del uso de “cool roof” en el ahorro de energía en edificaciones no-residenciales y residenciales en México. Recuperado de <https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2014/05/informe-cool-roofs-conuee-mayo-22-2014-espan%cc%83ol.pdf>
- Alwan, Z., Nawarathna, A., Ayman, R., Zhu, M., y ElGhazi Y. (2021). Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilizing BIM. *Journal of Building Engineering*, núm. 42, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102768>

- Asociación Española de Normalización (UNE). (2020). Informes de normalización: BIM. Estandarización de la información digital para el proyecto, construcción y gestión de edificios y obras de ingeniería civil. Recuperado de https://www.une.org/normalizacion_documentos/est%20c3%a1ndares%20en%20apoyo%20del%20bim.pdf
- Bojórquez-Morales, G., Luna-León, A., Ruiz-Torres, P., Gómez-Azpeitia, G., y García-Cueto, R. (2011). Confort térmico y normatividad. Memorias del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar (ANES) (pp. 369-374).
- Bonomolo, M., Di Lisi, S., y Leone, G. (2021). Building Information Modelling and Energy Simulation for Architecture Design. *Applied Science*, 11(5): 1-31. <https://doi.org/10.3390/app11052252>
- California Energy Commission. (2001). Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings. P400-01-024. Sacramento, California.
- Calixto-Aguirre, I., Huelsz, G., Barrios, G., y Cruz-Salas, M. V. (2021). Validation of thermal simulations of a non-air-conditioned office building in different seasonal, occupancy and ventilation conditions. *Journal of Building Engineering*, núm. 44, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102922>
- Chiu, J. N. W., y Martin, V. (2013). Multistage latent heat cold thermal energy storage design analysis. *Applied Energy*, núm. 112, pp. 1438-1445. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.054>
- Clarke, J. A., y Hensen, J. L. M. (2015). Integrated Building Performance Simulation: Progress, Prospects and Requirements. *Building and Environment*, núm. 91, pp. 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>
- Crawley, D. B., (2008). Building Performance Simulation: A Tool for Policymaking. Tesis de Doctorado en Filosofía. Universidad de Strathclyde, Glasgow, Escocia. http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/crawley_thesis.pdf
- Devaux, P., y Farid, M. M. (2017). Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter. *Applied Energy*, núm. 191, pp. 593-602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.060>
- De Wilde, P. (2018). Building Performance Analysis. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Fogiatto, M. A., Santos, G. H., y Mendes, N. (2016). Thermal Transmittance Evaluation of Concrete Hollow Blocks. 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (pp. 1291-1296).
- Gao, H., Koch, C., y Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy*, núm. 238, pp. 320-343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032>
- Gao, Y., Xua, J., Yang, S., Tang, X., Zhou, Q., Ge, J., Xu, T., y Levinson, R. (2014). Cool roofs in China: Policy review, building simulations, and proof-of-concept experiments. *Energy Policy*, núm. 74, pp. 190-214. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.036>
- Gassar, A. A. A., Koo, C., Kim, T. W., y Cha, S. H. (2021). Performance Optimization Studies on Heating, Cooling and Lighting Energy Systems of Buildings During the Design Stage: A Review. *Sustainability*, 13(17): 1-47. <https://doi.org/10.3390/su13179815>
- Halverson, M. A., Stucky, D. J., Fredrich, M., Godoy-Kain, P., Keller, J. M., y Somasundaran, S. (1994). Energy Effective and cost effective building energy conservation measures from Mexico. Richland, Washington: Pacific NW Laboratory.
- Han, T., Huang, Q., Zhang, A., y Zhang, Q. (2018). Simulation-Based Decision Support Tools in the Early Design Stages of a Green Building: A Review. *Sustainability*, 10(10): 1-23. <https://doi.org/10.3390/su10103696>
- Hong, T., Chou, S. K., y Bong, T. Y. (2000). Building simulation: An overview of developments and information sources. *Building and Environment*, 35(4): 347-361. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00023-2)
- Jeong, S. G., Lee, T., y Lee, J. (2021). Evaluation of Energy Performance and Thermal Comfort Considering the Heat Storage Capacity and Thermal Conductivity of Biocomposite Phase Change Materials. *Processes*, núm. 9, pp. 1-18. <https://doi.org/10.3390/pr9122191>
- Kamel, E., y Memari, A. M. (2019). Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction*, núm. 97, pp. 164-180. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.008>

- Kuznik, F., Virgone, J., y Johannes, K. (2010). Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. *Energy and Buildings*, 42(7): 1004-1009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.012>
- Levinson, R., y Akbari, H. (2010). Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency*, núm. 3, pp. 53-109. <https://doi.org/10.1007/s12053-008-9038-2>
- Lobos, D., Silva-Castillo, L., y Wandersleben, G. (2014). Mapeo de interoperabilidad entre BIM y BPS software (simulación energética) para Chile. *Proceedings of the XVII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics: Knowledge-based Design*. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradiz2013-0072>
- Lucero-Álvarez, J. (2016). Estudio comparativo de recubrimientos para techos y el efecto sobre el confort humano y uso de energía en México. Tesis doctoral. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.
- Lucero-Álvarez, J., Alarcón-Herrera, M. T., y Martín-Domínguez, I. R. (2014). The effect of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation of roofs on the annual thermal load of single-family households in México. *Memoria de Congreso Eurosun 2014*. Aix-Les-Bains, Francia.
- Lucero-Álvarez, J., Rodríguez-Muñoz, N. A., y Martín-Domínguez, I. R. (2016). The Effects of Roof and Wall Insulation on the Energy Costs of Low Income Housing in Mexico. *Sustainability*, núm. 8, p. 590. <https://doi.org/10.3390/su8070590>
- Lucero-Álvarez, J., y Martín-Domínguez, I. R. (2019). The effect of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation of roofs on the annual energy consumption of single-family households in México. *Indoor and Built Environment*, 28(1): 17-33. <https://doi.org/10.1177/1420326X17729194>
- Mazzocco, M. P., Filippin, C., Sulaiman, H., y Flores-Larsen, S. (2018). Performance energética de una vivienda social en Argentina y su rehabilitación basada en simulación térmica. *Ambiente Construido*, 8(4): 215-235. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400302>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2009). *Industria de la construcción —aislamiento térmico—*. Valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana —especificaciones y verificación. (NMX-C460-ONNCCE-2009).
- Østergård, T., Jensen, R. L., y Maagaard, S. E. (2016). Building simulations supporting decision making in early design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 61, pp. 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045>
- Pérez, J. B., Cabanillas, R. E., Hinojosa, J. F., y Borbón, A. C. (2011). Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico. *Información Tecnológica*, 22(3): 27-38. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000300005>
- Royon, L., Karim, L., y Bontemps, A. (2013). Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings. *Energy and Buildings*, núm. 63, pp. 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.042>
- Samuelson, H., Claussnitzer, S., Goyal, A., Chen, Y., y Romo-Castillo, A. (2016). Parametric Energy Simulation in Early Design: High-Rise Residential Buildings in Urban Contexts. *Building and Environment*, núm. 101, pp. 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.018>
- Secretaría de Energía. (2011). *Eficiencia energética en edificaciones. Envoltante de edificios para uso habitacional*. (NOM-020-ENER-2011).
- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., y Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. *Energy Building*, núm. 59, pp. 82-103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>
- Tabares-Velasco, P. C., Christensen, C., y Bianchi, M. (2012). Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment*, núm. 54, pp. 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>
- Taha, H. (2008). Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation. *Atmospheric Environment*, 42(38): 8795-8809. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.036>

- Tzempelikos, A., y Lee, S. (2021). Cool Roofs in the US: The Impact of Roof Reflectivity, Insulation and Attachment Method on Annual Energy Cost. *Energies*, 14(22): 1-17. <https://doi.org/10.3390/en14227656>
- Ulu, M., y Arsan, Z. D. (2020). Retrofit Strategies for Energy Efficiency of Historic Urban Fabric in Mediterranean Climate. *Atmosphere*, 11(7): 1-33. <https://doi.org/10.3390/atmos11070742>
- U. S. Department of Energy. (2012). 2011 Buildings Energy Data Book. Recuperado de http://192.31.135.76/docs/databooks/2011_bedb.pdf
- . (2021a). About Building Energy Modeling. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/buildings/about-building-energy-modeling>
- . (2021b). Architecture Firm Perkins & Will “SPEEDS” Up Early-Stage BEM. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/architecture-firm-perkinswill-speeds-early-stage-bem>