

Un modelo térmico para la estimación de la temperatura interior en viviendas rurales de Michoacán, México

D. Espinosa-Gómez^{a,b,t}, M. Moctezuma Sanchez^{a,u}, L. B. López-Sosa^{a,v,*},
F. Ramírez-Zavaleta^{b,x}, S. L. Hernández Trujillo^{a,y}, and I. Golpour^{c,z}

^aUniversidad Intercultural Indígena de Michoacán.

Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km3, 61614. Pátzcuaro, Michoacán, México.

*e-mail: lbernardo.lopez@uiim.edu.mx

^tORCID:0000-0003-2200-9156; ^u0000-0001-9284-737X; ^v0000-0003-3649-0315; ^y0000-0002-4706-8489

^bUniversidad Michoacana de Nicolás de Hidalgo,

Francisco J. Mújica SN, Ciudad Universitaria, 58040, Morelia, Michoacán.

^xORCID: 0000-0002-1170-6469

^cDepartamento: Ingeniería Energética, Universidad Nacional de Educación a Distancia,

UNED, C/ Juan del Rosal 12, 28040 Madrid, España.

^zORCID: 0009-0003-9663-0049

Received 6 November 2025; accepted 14 January 2026

En la actualidad existe un interés creciente en mejorar la eficiencia térmica de las viviendas y edificios, siendo importante el desarrollo de modelos que analicen el comportamiento térmico de estos inmuebles, y sugieran mejoras para optimizar el confort en la infraestructura habitacional. En este trabajo se desarrolló un modelo térmico que permite la estimación de la temperatura interior en viviendas rurales del estado de Michoacán a través del método de analogías eléctricas. La metodología propuesta se basa en tres etapas: (a) la formulación de un modelo a partir de un sistema de circuito eléctrico que se fundamenta en principios físicos a través de la transferencia de calor y el balance de energía de un sistema de vivienda cubica simple, donde se han utilizado las propiedades térmicas del techo, como la conductividad, el área, el espesor y la densidad; (b) el análisis del comportamiento térmico de tres tipos de viviendas con piso de cemento, muros de ladrillo de arcilla cocida y techos variables de cemento, lámina de asbesto y láminas de cartón negro, en cuyo caso se han registrado las temperaturas internas mediante termómetros ambientales, y externas mediante termopares y termografía aérea; y (c) la validación del modelo a través de la comparación de las temperaturas máximas y mínimas por día en las viviendas analizadas, contrastando la predicciones del modelo con los datos experimentales. Los resultados muestran que el modelo térmico es funcional, se probó en distintas viviendas durante el mes de marzo y abril del 2024, obteniendo un error relativo absoluto medio porcentual de 4 % respecto a la temperatura real de la vivienda, en los casos con mayores fluctuaciones climatológicas y de variación de temperaturas en los techos de las viviendas estudiadas, mostró errores menores al 10 %. Las temperaturas exteriores de los techos de las viviendas, como condición de frontera del modelo, pueden estimarse mediante tomografía aérea, lo que permite que a través de técnicas de medición no invasivas puedan predecirse las temperaturas interiores de los tipos de viviendas analizadas con errores aceptables. Se espera que esta herramienta pueda ser utilizada en el diagnóstico de materiales y formulación de estrategias que promuevan la mejora habitacionales para incentivar el confort térmico en comunidades rurales.

Descriptor: Termografía aérea; confort térmico; vivienda; modelo térmico; rural.

Currently, there is growing interest in improving the thermal efficiency of homes and buildings. It is important to develop models that analyze the thermal behavior of these buildings and suggest improvements to optimize comfort in housing infrastructure. In this work, a thermal model was developed that allows for the estimation of indoor temperatures in rural homes in the state of Michoacán using the electrical analogy method. The proposed methodology is based on three stages: (a) the formulation of a model from an electrical circuit system that is based on physical principles through the heat transfer and energy balance of a simple cubic housing system, where the thermal properties of the roof have been used, such as conductivity, area, thickness and density; (b) the analysis of the thermal behavior of three types of houses with cement floors, baked clay brick walls and variable roofs of cement, asbestos sheets and black cardboard sheets, in which case internal temperatures have been recorded using ambient thermometers, and external temperatures using thermocouples and aerial thermography; and (c) the validation of the model through the comparison of the maximum and minimum temperatures per day in the analyzed houses, contrasting the predictions of the model with the experimental data. The results show that the thermal model is functional. It was tested in different homes during March and April 2024, obtaining an average absolute relative error of 4 % with respect to the actual temperature of the home. In cases with greater climatic fluctuations and temperature variations on the roofs of the homes studied, errors were less than 10 %. The exterior temperatures of the roofs of the homes, as a boundary condition of the model, can be estimated using aerial tomography, which allows the interior temperatures of the types of homes analyzed to be predicted with acceptable errors through non-invasive measurement techniques. It is expected that this tool can be used in the diagnosis of materials and the formulation of strategies that promote room improvements to encourage thermal comfort in rural communities.

Keywords: Aerial thermography; thermal comfort; housing; thermal model; rural.

1. Introducción

La vivienda tradicional y vernácula en México se ha estudiado desde diferentes enfoques [1-4], analizando la arquitectura, componentes sociales, económicos, ambientales e incluso la preservación del valor cultural. Sin embargo, se sabe que este tipo de viviendas, en particular las viviendas construidas en comunidades rurales de México han sufrido cambios en su morfología con el paso del tiempo. Lo que implicó un abandono de todo el concepto de la vivienda tradicional y una adopción de viviendas de tipo industriales, pero que no corresponden a las necesidades reales de sus habitantes [1]. De acuerdo con Rodríguez y Velasco [5], en la arquitectura vernácula de zonas rurales, no existen programas efectivos para su conservación, por el contrario, se promueve la construcción de viviendas que no se adecua a las formas de vida locales y que rompe la imagen del entorno. Además, González [6] hace notar que las viviendas que utilizan materiales tradicionales, como la madera, la piedra y el adobe, dan un confort térmico y mejores condiciones ambientales que las construcciones modernas no poseen: sus espacios internos se mantienen a una temperatura idónea para el ser humano, aunque la del exterior tenga cambios importantes durante todo el día. Así, en algunas investigaciones [7] muestran que el adobe, que es un ladrillo de lodo, paja y agua, representa una tecnología constructiva amigable con el ambiente, cuyas propiedades de regulación térmica le permiten ser un componente adaptable en todo tipo de climas. De acuerdo con Schumacher [8], la vivienda de adobe ya no es un símbolo deseable para muchos campesinos y la técnica tradicional de elaboración se ha perdido en muchos lugares, causando que se construyan casas inseguras y de mala calidad, en muchos casos con materiales prefabricados o sintéticos. Hay que destacar que, en Michoacán, al occidente de México, se pueden reconocer tres grandes tradiciones constructivas: la construcción con base en muros de adobe con cubiertas de madera y terminado de teja de barro, la construcción con tablón de madera con cubierta de viguería con tejamanil, y la construcción con materiales ligeros, como varas, ramas y zacates [4]. Sin embargo, estas formas constructivas están desapareciendo. Actualmente, los materiales más utilizados en el medio rural son materiales cementantes, cerámicos de arcilla, de asbesto y galvanizados. Lo que genera viviendas que no responden a las necesidades ambientales de sus habitantes. Es por ello, que se requieren investigaciones para conocer el estatus que guardan actualmente las viviendas rurales en términos de temperaturas habitacionales, que mayoritariamente se componen de materiales que no son locales ni mantienen arquitecturas tradicionales. Estudios que permitan sensibilizar sobre el uso de los materiales de uso común y en la medida de lo posible auspiciar el uso de materiales tradicionales con diseños de acuerdo con las necesidades actuales de las comunidades. Por otra parte, el uso eficiente de los flujos de energía en casas y edificios tiene un impacto importante en términos de eficiencia energética, e influye en el confort térmico de sus habitantes. Las casas y edificios usan entre el 15 % al

40 % de energía para climatizar los espacios internos a través de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) [9]. Reducir el uso de sistemas HVAC tomando en cuenta medidas bioclimáticas puede reducir el consumo energético, mejorar la habitabilidad [10-12] y promover inmuebles más sustentables [13,14], así como casas y edificios más sustentables [15]. Y en entornos rurales el diseño y arquitectura bioclimática con el uso de materiales adaptados al entorno local genera mejores condiciones habitacionales, y de equidad de la vivienda, puesto que resulta complejo en estos espacios adquirir tecnologías para la climatización. Así, para mejorar la eficiencia energética en las viviendas, es importante conocer las condiciones climáticas, las características de transferencia de calor de los materiales utilizados y conocer los requerimientos de ventilación y confort térmico [10-12]. Se pueden implementar varias medidas de mejora como agregar aislamientos que reduzcan la transferencia de calor de la envolvente [16], utilizar ventanas con atenuación de luz [17], o mejorar la absorción de energía solar en zonas con temperaturas bajas [18]. La integración de sistemas de energía renovables se debe promover adecuadamente para mejorar la eficiencia energética de nuevas construcciones. En cualquier caso, la optimización de las viviendas desde una perspectiva energética requiere de la formulación de modelos que permitan identificar el comportamiento térmico y prever estrategias para la mejora habitacional [19]. En ese sentido, los modelos energéticos del comportamiento térmico de casas y edificios son sumamente necesarios [20,21]. Existen modelos térmicos de viviendas que consideran balances de energía incluyendo los intercambios del aire interior, las paredes, el techo, e incluso los muebles [10]. También se ha recurrido a analogías eléctricas térmicas, para describir el comportamiento térmico de viviendas. En algunos casos, se utilizan parámetros térmicos equivalentes, donde se utilizan redes de resistencia-capacitancia (RC) térmica para modelos del flujo de calor a través de una superficie [22]. Una ventaja de estos modelos es que se pueden simular numéricamente o también se puede obtener una solución analítica en modelos sencillos. También, surgen otros modelos más sofisticados utilizando herramientas de Computer Fluid Dynamics (CFD) con predicciones más exactas que pueden describir el comportamiento térmico de viviendas, sin embargo, son modelos más complejos [23], pero que también se han aplicado a viviendas rurales. Los modelos CFD son interesantes y funcionales técnicamente, pero suelen ser complicados para estimar la totalidad de viviendas en poblaciones marginadas. Además, están limitados a condiciones controladas y su predicción se basa en una diversidad de variables que no pueden controlarse como modelos experimentales reales. En este trabajo se ha desarrollado un modelo térmico, basado en principios físicos, que permite estimar en su forma general las temperaturas máximas y mínimas dentro de viviendas del sector rural de Michoacán, a partir de la temperatura exterior del techo. Este enfoque incentiva el análisis no invasivo, desde el punto de vista instrumental, para determinar la temperatura interior de las casas rurales mediante mediciones de la

temperatura del techo obtenidas mediante termografía aérea o termopares. Cabe mencionar que el modelo como primera versión está limitado a casas del sector rural con techos de cemento y láminas de asbesto; sin embargo, es atractivo para casas de construcción sencilla que están presentes también en zonas periurbanas urbanas marginadas y viviendas de interés social. Es importante mencionar que esta metodología propuesta elimina la necesidad de equipo instrumental para casos individuales y provee avances en la optimización de mediciones de temperatura interna en casas dentro de las comunidades rurales. El desarrollo de este modelo facilita la construcción de un sistema de diagnóstico de confort térmico usando termografía aérea, enfocado en mejorar el análisis de las casas en las áreas rurales.

2. Materiales y métodos

Este trabajo se enfoca en el análisis de viviendas en comunidades rurales localizadas en la región P'urhépecha, en el occidente de México [Fig. 1a)]. A través de un modelo térmico que considera como condición de frontera la temperatura exterior del techo, se estima la temperatura interna. El modelo está pensado para viviendas de pequeñas dimensiones, que son las que habitualmente se encuentran en el sector rural, espacios con geometría cúbica con muros de ladrillo rojo de arcilla cocida, piso de concreto y techos de diversos materiales. La metodología utilizada considera tres aspectos [Fig. 1b)]: (1) la formulación de un modelo de la física térmica de viviendas rurales de la región P'urhépecha (2) la estimación de datos experimentales en las viviendas del sitio de estudio, y (3) la validación del modelo propuesto considerando los datos experimentales.

2.1. Formulación del modelo térmico

A continuación, se describen algunas consideraciones asumidas para la formulación del modelo térmico.

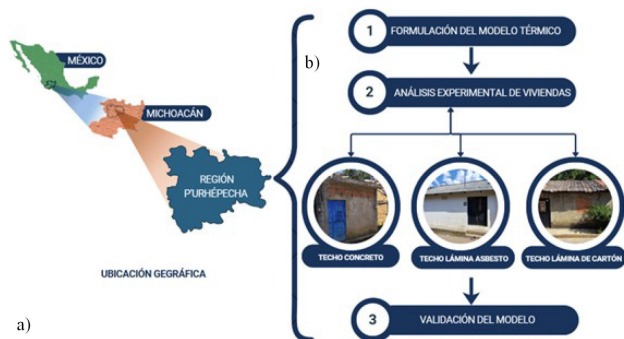


FIGURA 1. a) Localización del sitio de estudio; b) Metodología.

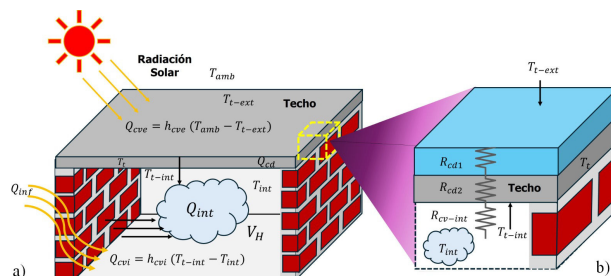


FIGURA 2. a) Diagrama de flujos de energía que se presenta en una vivienda como un modelo simple; b) Diagrama de transferencia de calor a través del techo por convección y por conducción, utilizando como condición de frontera la temperatura en la superficie del techo medida por termografía o termopares.

- Se ha considerado el flujo de calor en el techo como la fuente predominante de los flujos de calor, ya que el techo absorbe el mayor porcentaje de energía que entra en la vivienda, a través de energía solar [24]. En consecuencia, se ha despreciado el calor que se absorbe por las paredes que, aunque es importante, es mínimo comparado con las ganancias energéticas del techo. Además, en la región analizada, el entorno circundante de las paredes de las viviendas suele tener elementos que minimizan las ganancias de calor: árboles, ropa, utensilios de cocina, muebles, techos de pequeñas dimensiones, etcétera.
- Se considera la inercia térmica del techo, por lo que el modelo es capaz de describir el comportamiento dinámico de la temperatura interior y de los flujos de calor en función del tiempo a través del techo, así como la variación de temperatura interna.
- El flujo de calor que sucede a través del techo se considera unidimensional, y depende solo de una coordenada en la dirección del espesor del techo, y es constante en su área transversal.

De este modo, los flujos de energía que se consideran en este modelo se muestran en la Fig. 2a). El flujo de calor en el techo se genera mediante la conducción en el interior de los elementos, en el que se transfiere por convección y radiación en el exterior de la envolvente, así como por convección en el interior de la vivienda.

Como se afirmó previamente, en la Fig. 2b) se muestra la transferencia de calor a través del techo de una vivienda, donde este proceso de transferencia se divide en tres partes. La primera parte, cuando ocurre por convección desde medio ambiente hacia el exterior del techo, la segunda por conducción en el interior del techo, y la tercera parte surge por convección desde la superficie interna del techo hacia volumen del aire interior. Con respecto al calor que se transfiere por convección entre el medio ambiente y la superficie exterior del techo, se puede escribir como

$$Q_{cve} = h_{cve}A(T_{amb} - T_{t-ext}), \tag{1}$$

donde h_{cve} es el coeficiente de convección, T_{t-ext} es la temperatura en la superficie exterior del techo y T_{amb} es la temperatura del medio ambiente.

Por otra parte, hemos asumido que el techo se divide en dos capas como se muestra en la Fig. 2, donde el calor por conducción en cada una estas capas son de la forma

$$Q_{cd1} = \frac{kA}{L_t}(T_{t-ext} - T_t), \quad (2)$$

$$Q_{cd2} = \frac{kA}{L_t}(T_t - T_{t-int}), \quad (3)$$

donde T_t es la temperatura en el punto medio del techo y T_{t-int} es la temperatura en la superficie interior del techo. El parámetro k es la conductividad del material, L_t es el espesor de la capa de material y A es el área transversal del techo o elemento de la envolvente. Finalmente, el calor por convección entre la superficie interior del techo y el volumen de aire en el interior de la vivienda es

$$Q_{cvi} = h_{cvi}A(T_{t-int} - T_{int}), \quad (4)$$

siendo h_{cvi} el coeficiente de convección en la superficie interior del techo.

Dicho lo anterior, se ha planteado un modelo basado en analogías de sistemas eléctricos a través de utilizar los principios de transferencia de calor del techo sobre una casa habitación. De esta manera, se adaptó el modelo basado en redes de Resistencia-Capacitancia equivalentes, el cual adopta el uso de coeficientes de transferencia de calor [22,25].

El siguiente punto es describir el método de transferencia de energía usando analogías eléctricas. En la Fig. 2b), se muestra la transferencia de energía desde el medio ambiente hacia el interior de la vivienda, donde se ha analizado usando una resistencia térmica de convección y dos resistencias térmicas de conducción. Se ha considerado que el techo se divide en dos secciones de la mitad del espesor, donde resulta que los parámetros R_{cd1} , R_{cd2} son resistencias de conducción ubicadas en la mitad exterior e interior del techo y R_{cv-int} representa la resistencia de convección en el interior del techo. Es importante mencionar que, si se obtiene por medición directa la temperatura en la superficie externa del techo, es decir, mediante la medición con termómetros de contacto o por medio de termografía área, entonces se puede aplicar esta temperatura externa como condición de frontera en el modelo planteado [26] en la Fig. 2b). Así que para la deducción del modelo térmico se ha usado este enfoque, es decir, que la temperatura exterior del techo es la entrada del modelo.

Avanzando en el razonamiento de esta propuesta, y considerando el enfoque sobre la analogía eléctrica del modelo, se considera la diferencia de temperatura como una diferencia de potencial, y el flujo de calor como una corriente, mientras que la resistencia es el cociente del flujo entre la diferencia de potencial [26]. En este sentido, la resistencia por convección en el exterior se escribe como

$$R_{cv-ext} = \frac{Q_{cve}}{(T_{amb} - T_{t-ext})} = \frac{1}{h_{cve}A}, \quad (5)$$

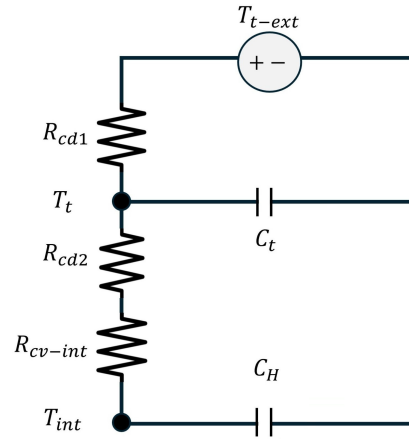


FIGURA 3. Modelo térmico de parámetros concentrados de tipo 2R2C, dos resistencias térmicas, una capacitancia térmica del techo y una capacitancia térmica del aire interior.

mientras que las resistencias por conducción (ver Fig. 3) son de la forma

$$R_{cd1} = \frac{Q_{cd1}}{(T_{t-ext} - T_t)} = \frac{L_t}{kA},$$

$$R_{cd2} = \frac{Q_{cd2}}{(T_t - T_{t-int})} = \frac{L_t}{kA}, \quad (6)$$

y la resistencia por convección en la superficie interior del techo se calcula como

$$R_{cv-int} = \frac{Q_{cvi}}{(T_{t-int} - T_{int})} = \frac{1}{h_{cvi}A}. \quad (7)$$

Las ecuaciones anteriores permiten modelar el cambio de energía interna dentro de una habitación, debido a la transferencia de calor en el techo se propone un modelo con base en una resistencia-capacitancia que se denota como 2R2C (ver Fig. 3). En este modelo se añadió una capacitancia térmica entre las dos resistencias de conducción, ya que el techo absorbe energía térmica durante el calentamiento y la libera progresivamente conforme se va enfriando, este fenómeno ocurre en el transcurso del día.

La capacitancia térmica del techo, C_t , se puede considerar localizada en un nodo entre las dos resistencias, siendo ρ_t , Cp_t , V_t , la densidad, capacidad específica y volumen del techo respectivamente, y se puede escribir como

$$C_t = \rho_t Cp_t V_t. \quad (8)$$

De manera similar se escribe la capacitancia térmica del volumen de aire en el interior de la habitación, teniendo la siguiente forma

$$C_H = \rho_H Cp_H V_H, \quad (9)$$

donde C_H es capacitancia térmica del aire, ρ_H es la densidad del aire, Cp_H es la capacidad específica del aire y V_H representa el volumen del aire.

Como se afirmó anteriormente, se ha considerado como condición de frontera la temperatura en la superficie exterior del techo, entonces, solo se considera la resistencia de conducción R_{cd1} como se observa en la Fig. 3, por lo que las resistencias intermedias son:

$$R_1 = R_{cd1}, \quad R_2 = R_{cd2} + R_{cv-int}. \quad (10)$$

Las ecuaciones de balance de energía para el elemento de la envolvente de la casa (techo) se obtienen aplicando las leyes de Kirchhoff, en cada nodo de la red [22]. En consecuencia, las dos ecuaciones diferenciales que describen este sistema, donde sólo se considera la transferencia de calor a través del techo son las siguientes:

$$C_t \frac{dT_t}{dt} = \frac{1}{R_1}(T_{t-ext} - T_t) + \frac{1}{R_2}(T_{int} - T_t), \quad (11)$$

$$C_H \frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{R_2}(T_t - T_{int}). \quad (12)$$

El término $(1/R_1)(T_{t-ext} - T_t)$ representa el flujo de calor del ambiente hacia un plano en el interior del techo. Asimismo, el término $(1/R_2)(T_{int} - T_t)$, representa el flujo de calor del volumen de aire interior hacia el plano transversal localizado en el punto medio del espesor del techo. La suma de estos dos términos debe ser iguales al cambio de energía en el tiempo del techo $C_t(dT_t/dt)$. De igual modo, el término de lado izquierdo de la Ec. (12) representa el flujo del calor desde el interior del techo hacia el volumen de aire interior que debe ser igual al cambio de energía del volumen de aire interior $C_H(dT_{int}/dt)$.

Cabe señalar que la temperatura ambiente, se ha adaptado como el modelo propuesto por Calmon [27], que tiene un comportamiento senoidal durante un día solar. Con esta información se calcula T_{t-ext} como

$$T_{t-ext} = A + B \sin \left[\frac{\pi(t - b_1)}{b_2} \right] - \frac{\epsilon \Delta R}{h_o}, \quad (13)$$

con $A = (T_{máx} + T_{mín})/2$, $B = (T_{máx} - T_{mín})/2$, $b_1 = (h_{máx} + h_{mín})/2$, $b_2 = h_{máx} - h_{mín}$. Los otros parámetros son: h_o es el coeficiente de transferencia de calor por radiación de onda larga y convección en la superficie exterior ($W/m^2 \cdot K$), ϵ , es la emitancia de la superficie, y ΔR es la diferencia entre la radiación de onda larga incidente sobre la superficie desde el cielo y los alrededores y la radiación emitida por el cuerpo negro a la temperatura del aire exterior (W/m^2).

En este trabajo se ha utilizado el método de operadores y de eliminación [28,29]. Este método es una forma sistemática que consiste en realizar combinaciones lineales entre las ecuaciones para obtener la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales. El método de operadores consiste en sustituir las derivadas con respecto al tiempo por el operador D ,

de este modo las Ecs. (12) y (13) se reescribe como

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_t} + D \right) T_t - \frac{1}{R_2 C_t} T_{int} &= \frac{1}{R_1 C_t} T_t, \\ - \frac{1}{R_2 C_H} T_t + \left(\frac{1}{R_2 C_H} + D \right) T_{int} &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Este sistema de ecuaciones diferenciales se puede escribir en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_t} + D & -\frac{1}{R_2 C_t} \\ -\frac{1}{R_2 C_H} & \frac{1}{R_2 C_H} + D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_t \\ T_{int} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1 C_t} T_{t-ext} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Con esta información, es posible despejar la variable T_t de la Ec. (14) y sustituir en la Ec. (15), después de realizar manipulaciones algebraicas se obtiene la siguiente ecuación:

$$(aD^2 + bD + c)T_{int} = T_{t-ext}, \quad (16)$$

siendo

$$\begin{aligned} a &= R_1 R_2 C_H C_t, \\ b &= R_1 C_t + (R_1 + R_2) C_H, \quad c = 1. \end{aligned} \quad (17)$$

Notemos que la ecuación homogénea (17) es de segundo orden, por lo tanto, su ecuación característica tiene dos raíces definidas por la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} r_{1,2} &= \frac{1}{2R_1 R_2 C_H C_t} \left[- (R_1 C_t + (R_1 + R_2) C_H) \right. \\ &\quad \left. \pm \sqrt{(R_1 C_t + (R_1 + R_2) C_H)^2 - 4R_1 R_2 C_H C_t} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

De esta manera, la solución homogénea obtenida es

$$T_{int-homogenea} = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t}. \quad (19)$$

Similarmente, se resuelve para $T_{t-homogenea}$:

$$\begin{aligned} T_{t-homogenea} &= C_1 (1 + R_2 C_H r_1) e^{r_1 t} \\ &\quad + C_2 (1 + R_2 C_H r_2) e^{r_2 t}. \end{aligned} \quad (20)$$

Dado que ya se conoce la solución de la ecuación homogénea, tanto para la temperatura interior (T_{int}) y para la temperatura del techo (T_t), entonces, la solución general es de la siguiente forma

$$\begin{aligned} T_{int} &= C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + PB \sin(\omega t - \varphi) \\ &\quad + QB \cos(\omega t - \varphi) + A - \frac{\epsilon \Delta R}{h_o}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} T_t &= C_1 (1 + R_2 C_H r_1) e^{r_1 t} + C_2 (1 + R_2 C_H r_2) e^{r_2 t} \\ &\quad + U \sin(\omega t - \varphi) + V \cos(\omega t - \varphi) + A - \frac{\epsilon \Delta R}{h_o}, \end{aligned} \quad (22)$$

con

$$\omega = \frac{\pi}{b_2}, \quad \varphi = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)\pi,$$

$$P = \frac{(c - a\omega^2)}{(a\omega^2 - c)^2 + (b\omega)^2}, \quad (23)$$

$$Q = \frac{-(b\omega)}{(a\omega^2 - c)^2 + (b\omega)^2}. \quad (24)$$

En cuanto a los coeficientes U y V , estos tienen la siguiente forma:

$$U = P - QR_2C_H\omega, \quad V = Q + PR_2C_H\omega. \quad (25)$$

2.2. Análisis de las viviendas y validación del modelo

En particular, se han analizado casas del sector rural en la región P'urhépecha. Que existen diferentes configuraciones, en estudios previos se han reportado algunas de las más comunes [30]; en este sentido se analizaron tres de las configuraciones más comunes que se conforman por pisos de concreto, muros de ladrillo rojo de arcilla cocina, pero difieren en techos: de concreto, lámina de asbesto y lámina de cartón negro [Fig. 1b)]. Se analizaron los techos de las 15 viviendas por cada tipo de configuración, 5 por cada tipo de techo. Las dimensiones promedio de las viviendas analizadas fueron de 4 m de largo por 4 de ancho y 3 m de alto. Las mediciones se realizaron en la comunidad de San Francisco Pichátaro, y Carapan, ambas de la región P'urhépecha, en el estado de Michoacán. En estas viviendas los datos recolectados corresponden a una semana de mediciones durante el mes de abril y otra durante el mes de mayo, del 2024. Se realizó un arreglo experimental para caracterizar la temperatura en el techo e interior de la vivienda. Para estimar la temperatura del techo se utilizaron dos termómetros de contacto con 4 termopares tipo K marca GAIN EXPRESS, y un Termómetro Digital Avanzado Fluke-51-2. La temperatura interna de las viviendas se registró utilizando 30 termómetros con datalogger y son Software de descarga marca Elitech modelo RC-5. Por otra parte, la validación de modelo mediante el uso de termografía aérea se realizó utilizando un Dron MAVIC 3T ENTERPRISE con cámara dual termográfica y el uso del software DJI Thermal Analysis Tool 3.

El modelo propuesto, descrito en el apartado anterior, se contrastó con los datos experimentales de las temperaturas exterior del techo e interior de las viviendas. Lo que permitió conocer los resultados de su aplicación.

Cabe destacar que esta investigación complementa avances previos sobras las investigaciones sobre modelos predictivos de temperaturas internas. Esta propuesta pretende, mediante termografía aérea, determinar los rangos de temperatura máxima y mínima al interior de las viviendas del sector rural, con el objetivo de proveer una herramienta que se instrumente para generar mapeos de temperaturas internas. Al tiempo de incentivar el análisis del confort térmico con herramientas complementarias, y la búsqueda de mejoras de

las viviendas, que se justifiquen a partir del diagnóstico de temperaturas interiores y su relación con materiales que actualmente se utilizan en los techos de las viviendas y que generan ambientes hostilmente térmicos.

3. Resultados y discusión

Se ha estimado el comportamiento de la temperatura interior de viviendas de la región P'urhépecha del estado de Michoacán, en dependencia de las horas del día. Para mostrar los resultados de la aplicación del modelo, en específico, se ha analizado un intervalo de las 8:00 horas hasta las 20:00 horas los días 14 y 15 de marzo de 2024. Comparando los resultados del modelo con los datos experimentales. Es importante mencionar, que se ha considerado un intervalo de 12 horas, tomando como referencia el inicio y el fin de la prueba, en momentos cuando no existe presencia de energía solar que incida sobre la superficie de los techos. Este modelo tiene aplicación diaria, por lo que su uso se basa principalmente en conocer el comportamiento de las temperaturas internas mínimas, en ausencia de radiación solar (amanecer y anochece), y máximas, al medio día o cuando se acumula mayor temperatura.

Con el propósito de estimar la temperatura interior de la vivienda, se han realizado como primer paso las mediciones de la temperatura exterior del techo mediante termopares tipo K , siendo esta una variable que utiliza el modelo térmico propuesto, como una condición de frontera. Con estas mediciones se obtuvo un promedio de la temperatura en el techo, registrándola cada 15 minutos con los termopares en la superficie exterior. Los datos de los termopares se corroboraron mediante termografía aérea para tener una mayor precisión por área de cobertura de los techos de las viviendas analizadas, información que resulta más sencilla de obtener a través de imágenes térmicas aéreas. Con estos datos extraídos experimentalmente, se calculan los parámetros A , B , b_1 y b_2 para obtener el comportamiento de la temperatura ambiente y del

TABLA I. Datos de temperatura ambiente.

Parámetros	$h_{\text{mín}}$	$h_{\text{máx}}$	$T_{\text{mín}}$	$T_{\text{máx}}$
14 de marzo	2 h	14 h	9°C	35.5°C
15 de marzo	2 h	14 h	6.2°C	35.3°C

TABLA II. Propiedades físicas de los materiales.

Material	Δx [m]	k [W/m°C]	Cp_t [J/kg°C]	ρ_t [kg/m ³]	Referencia
Losa de concreto	0.12	1.413	1000	2700	[30-32]
Asbesto	0.0071	0.106	816	824.130	[30,32]
Lámina de cartón negro	0.0034	0.085	1300	645.810	[30,33,34]

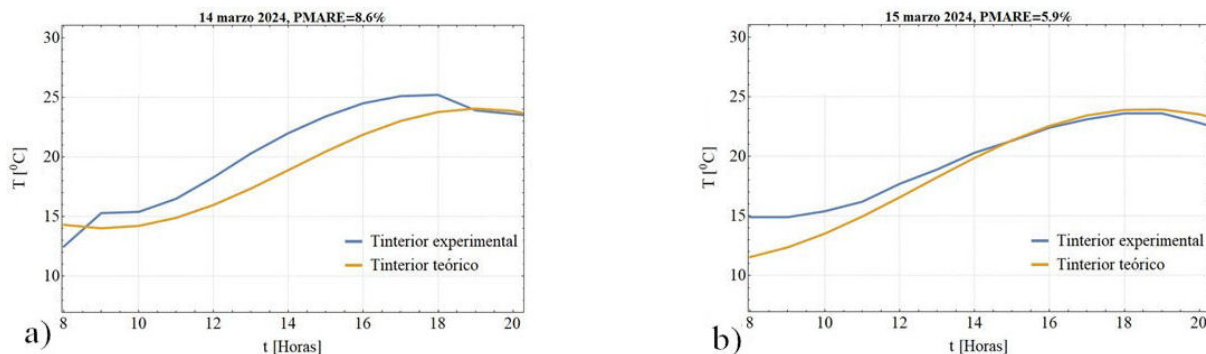


FIGURA 4. Análisis comparativo del modelo experimental y teórico para techo de cemento: a) 14 de marzo b) 15 de marzo.

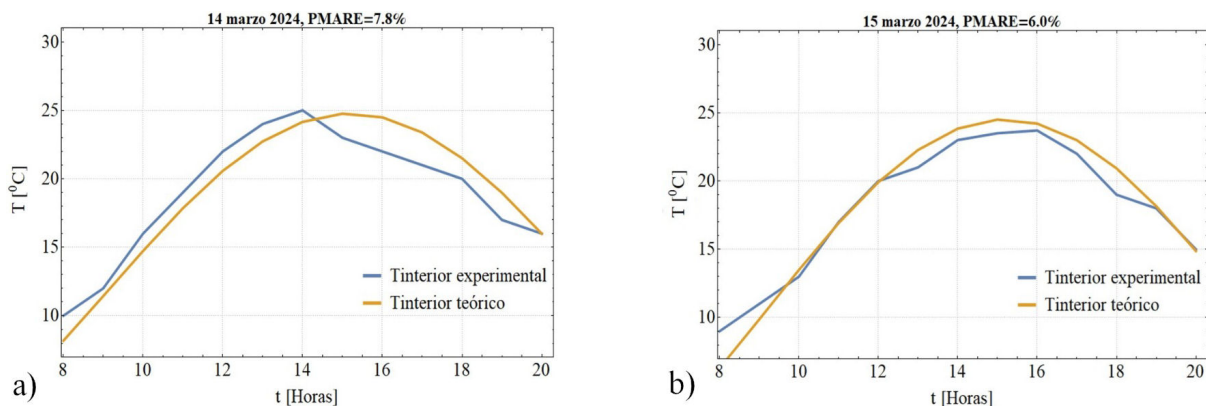


FIGURA 5. Análisis comparativo del modelo experimental y teórico para techo de asbesto: (a) 14 de marzo (b) 15 de marzo.

comportamiento de la temperatura interior de la vivienda mediante el modelo desarrollado. Los datos utilizados se muestran en la Tabla I.

Para fines demostrativos, de forma comparativa, en este trabajo se analiza el cambio de temperatura interior de una casa con piso de cemento, muros de tabique rojo de arcilla cocida, con techos variables de cemento, asbesto y lámina de cartón negro. Por lo que las condiciones del modelo cambian conforme a las propiedades del material, en este caso del techo, tales como la conductividad térmica (k), calor específico (Cp_t), densidad (ρ_t) y espesor Δx . Los valores de estas propiedades se muestran en la Tabla II.

En la Fig. 4, se muestran los comportamientos de la temperatura interior de la vivienda con techo de concreto medidos los días 14 y 15 de marzo, respectivamente. Se observa claramente que la máxima temperatura obtenida con el modelo térmico para el día 14 de marzo es de 24.05°C que se registró a las 19 horas, y la temperatura experimental es de 23.9°C [Fig. 4a)]. Así, se encontró un error relativo absoluto medio porcentual (PMARE, por sus siglas en inglés, Percentage Mean Absolute Relative Error) de 8.6%, indicando que se encuentra como bueno de acuerdo con los criterios señalados en la literatura [34].

De manera similar, en la Fig. 4b), se muestra la medición de la temperatura interior experimental y la predicción del modelo térmico para el día 15 de marzo de 2024. También,

se ha realizado la comparación de la temperatura interior en relación con el valor experimental y la predicción del modelo térmico, demostrando una buena correlación entre el valor experimental y la estimación numérica del modelo propuesto. De modo que el PMARE obtenido es de 5.9%, que también está dentro de la clasificación aceptable [35]. Para mostrar el alcance del modelo, se mostraron los resultados de dos días con diferentes condiciones [Figs. 4a) y 4b)]: un día con temperatura y viento oscilante, y otro con valores uniformes de incremento de temperatura e irradiación solar. Para el 14 de marzo, las temperaturas fueron abruptas, aun así, el modelo tuvo un error por debajo del 10%, mientras que el día 15, con condiciones ambientales más uniformes, el modelo tuvo un error menor que el día anterior. Se debe destacar que, en ambos casos se cumple con el objetivo del modelo, pues para los valores de temperatura mínima y máxima los valores obtenidos con el modelo desarrollado son similares con respecto a los datos experimentales.

En las Figs. 5a) y 5b), se muestran las estimaciones teóricas junto con los valores experimentales de la temperatura interna de una vivienda con techo de asbesto para el mes de marzo. En este caso, se aprecia un buen comportamiento, además, las curvas de la temperatura interior de la vivienda son similares a los valores experimentales encontrados. De hecho, se muestra que tiene una mejor correlación en comparación con los otros casos estudiados, de tal modo que sus

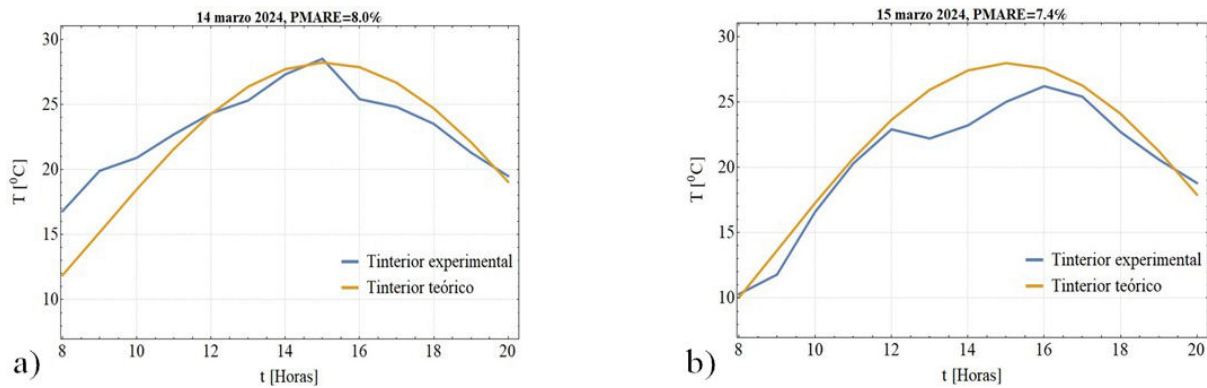


FIGURA 6. Análisis comparativo del modelo experimental y teórico para techo de asbesto: a) 14 de marzo b) 15 de marzo.

PMARE son del 7.8 % y 6.0 %, para los días 14 y 15 de marzo, respectivamente [Figs. 5a) y 5b)]. Estas estimaciones se encuentran dentro de resultados aceptables, dado que PMARE son menores del 8 % [35].

En referencia a las Figs. 6a) y 6b), se muestran los comportamientos de la temperatura interna de la vivienda con techo de lámina de cartón negro. Podemos apreciar que tanto los valores teóricos como experimentales tienen buena relación, aunque de 8:00 a.m. a 11:00 a.m. hay una diferencia mayor, pero después de esta hora existe una estimación muy buena. En ambas estimaciones se encuentran dentro de resultados aceptables, dado que PMARE son menores al 10 % [35].

Finalmente, se observa que el día 15 de marzo, existe un PMARE mayor en comparación con el día 14 abril para los casos de viviendas de techo de concreto, de asbesto y techo de lámina de cartón negro. Por consiguiente, se concluye que esto es debido a que existen diversos factores climatológicos que afectan la variación de temperatura, tales como la velocidad de viento, la presión, entre otros factores atmosféricos. Es importante resaltar que dichas estimaciones se encuentran dentro de resultados aceptables, dado que los PMARE son mayores que el 5 % y menores que el 10 % [35]. Por lo tanto, el modelo desarrollado es funcional y cumple con los objetivos propuestos, ya que se han obtenido resultados aceptables en comparación con datos recolectados experimentalmente.

Los valores registrados y las comparaciones para los tres diferentes tipos de viviendas analizadas consideran un día con mayores condiciones climatológicas fluctuantes, y otro con condiciones más estables. Esto permitió conocer el desempeño del modelo en condiciones heterogéneas y con condiciones más uniformes. En ambos casos, se tuvo un error absoluto por debajo del 10 % con respecto a los resultados experimentales. Sin embargo, además de las variaciones climatológicas, la inercia y acumulación térmica son distintas de acuerdo con el tipo de material de cada techo.

El cartón negro debido a su espesor y propiedades térmicas del material presenta variaciones repentinas, además de que es un material deformable que no presenta una cubierta homogénea en los techos de las viviendas, lo que genera filtraciones de aire entre cada lámina. Quienes habitan en viviendas con este material, suelen tener condiciones ambien-

tales extremas al interior. No obstante, el cartón negro es un material económico que sigue siendo asequible para la mayoría de las familias del sector rural en condiciones de pobreza.

En el caso de la lámina de asbesto, la acumulación térmica suele ser más homogénea, de tal forma que, ante cambios bruscos de temperatura en el exterior, tiene variaciones menos accidentadas que el cartón negro. Su comportamiento térmico está directamente vinculado a la radiación solar e incremento de temperatura ambiente, por lo que su mayor gradiente de temperatura se logra cercano al medio día solar. Y su descenso térmico está estrechamente ligado a la puesta del sol.

Por su parte, el cemento, es el material con mayor acumulación térmica de largo alcance. Los cambios de temperatura son menos fluctuantes y las mayores temperaturas se logran horas después del mediodía solar. Los cambios son menos abruptos que la lámina de asbesto y el cartón negro, sin embargo, la misma inercia térmica en climas de baja temperatura como la meseta P¹urhépecha, le impiden lograr un calentamiento adecuado de las viviendas, por lo que los inmuebles con este tipo de materiales suelen estar a bajas temperatura y no ser confortables térmicamente para los usuarios.

Este tipo de análisis térmico de los materiales, son poco comunes en el ámbito rural e indígena, limitan la gestión de la vivienda y en años recientes incentivan la creación de islas de calor comunitarias, como lo reportamos en investigaciones previas [30]. La ausencia de conocimiento del contexto habitacional y las condiciones de pobreza generan inmuebles poco habitables y, en muchos casos, cambios de hábitos locales: cambios en la indumentaria, adecuaciones a la vivienda, o el uso de tecnologías de combustión al interior. Por estas razones, resulta importante indagar en la formulación de modelos térmicos aplicados a casos de estudio específicos, que fomenten el conocimiento local, empoderamiento comunitario y ayuden a la toma de decisiones en los procesos de construcción de políticas públicas orientadas a la mejora de la vivienda.

El contexto mencionado, en convergencia con la presente investigación, se puede corroborar en la Fig. 7, mediante un análisis de fotografías aéreas, donde se muestran calles típi-

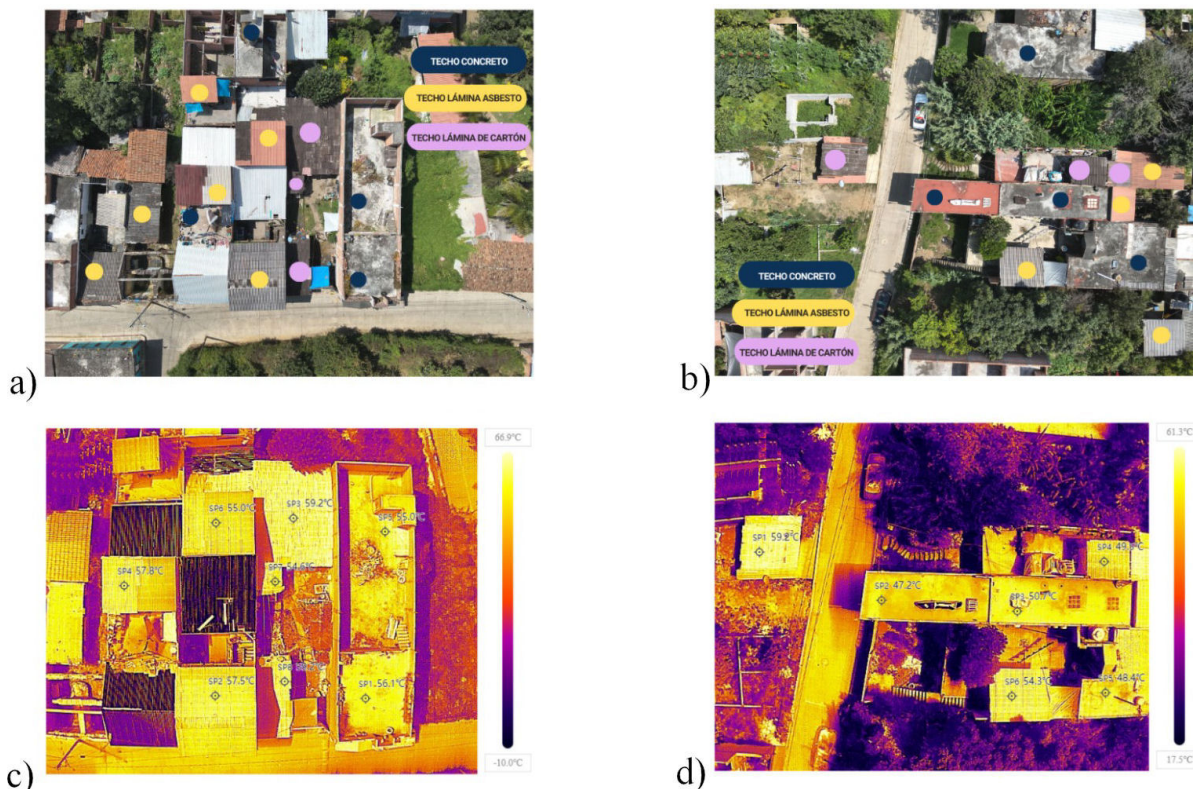


FIGURA 7. Análisis termográfico en calles de la comunidad de Carapan: a) y b) configuraciones típicas de las calles y viviendas. c) y d) Análisis Termográfico en los techos de las viviendas.

cas típicas de las comunidades analizadas. Y puede observar la predominante presencia de las configuraciones de viviendas estudiadas [Fig. 7a) y 7b)]. Las Figs. 7c) y 7d) muestran termografías áreas de las viviendas analizadas, y permiten identificar los techos con mayores temperaturas. Las imágenes fueron tomadas en abril 2024 a las 14:00 horas. Esta información es consistente con los datos del modelo térmico. Materiales como el cartón suelen tener incrementos altos de temperatura en el techo, en consecuencia, temperaturas elevadas de forma casi inmediata en el interior de las viviendas. Enseguida del cartón, en cuanto a incremento de temperatura al mediodía solar, se encuentra el asbesto y finalmente el cemento. El modelo entonces es válido, y permitirá en una segunda etapa de la investigación identificar calles, colonias o comunidades de manera porcentual con rangos de temperatura particulares. También determinará a aquellos inmuebles con gradientes térmicos bajos, medios o altos en función de la temperatura ambiente. O bien definir categorías de temperatura en función de los materiales del techo de las viviendas. La información del comportamiento térmico interno, también se pudo corroborar con mediciones promedio del interior de las viviendas.

La Fig. 8 muestra la distribución de temperaturas registradas con termómetros ambientales durante el mes de abril del 2024 en los tipos de viviendas analizadas, durante una semana. Se puede apreciar, que los mayores incrementos de temperatura se presentan en las viviendas de cartón, seguidos

del asbesto y el cemento, lo que es consistente con el comportamiento de la temperatura del techo registradas mediante termopares tipo k y termografía aérea, y es consistente con el modelo planteado.

El modelo planteado sienta las bases para generar una herramienta de medición de temperaturas internas, asociadas a los distintos tipos de materiales de los techos de las viviendas de comunidades rurales. La propuesta radica en que mediante termografía área se genere el mapeo de temperaturas superficiales de diferentes viviendas, en una calle, una colonia, una comunidad o bien un fraccionamiento. También representa una técnica no invasiva, puesto que se pretende solo con tomografía aérea determinar las temperaturas interiores

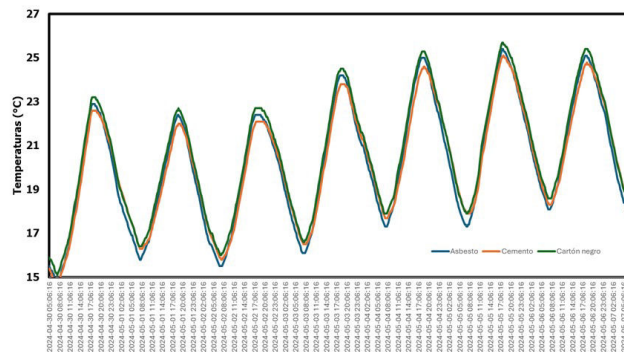


FIGURA 8. Comportamiento de temperaturas internas experimentales en las viviendas analizadas.

de las viviendas del sector rural, o aproximaciones con baja incertidumbre, sin generar instrumentación sofisticada que suele ser, en muchos casos, disruptiva de los entornos comunitarios.

Esta propuesta pretende incentivar la ciencia con incidencia, y que se puedan generar recomendaciones con base en los materiales y el ambiente al interior de las viviendas para la creación de programas de mejora habitacional, incentivar el uso de materiales locales, materiales con mejores condiciones térmicas y en algún momento, promover el uso de viviendas sustentables. En próximas investigaciones, se mostrará un modelo de machine learning que articula las imágenes termográficas áreas con el modelo propuesto, a través de un software que automatiza el proceso descrito en esta investigación para el análisis a mayor escala del modelo desarrollado en esta investigación.

A manera de comentarios finales, es importante considerar que previamente hemos desarrollado un modelo térmico, en el que solamente se consideró la resistencia térmica del techo y el almacenamiento de energía en el volumen interior, basado en relaciones de estado estable de transferencia de calor [36]. Sin embargo, no se consideró la capacitancia térmica del techo. De esta manera, el modelo podía predecir la temperatura interior, pero con un ajuste en los parámetros involucrados. Por esta razón, se ha implementado la propuesta de esta investigación, la cual consiste en utilizar balances de energía y, a su vez, utilizar analogías eléctricas para describir la transferencia de calor en los elementos de la envolvente de la vivienda y que pueda predecir la temperatura interior de la vivienda. Al mismo tiempo, en el modelo actual sí se considera la inercia térmica, logrando obtener un sistema de ecuaciones diferenciales [ver Ecs. (11) y (12)], que permite un modelado de la temperatura interior de la vivienda. Es importante mencionar que este nuevo modelo tiene algunas limitaciones, tales como: considerar el flujo de calor en el techo como la fuente predominante de energía, ya que el techo absorbe el mayor porcentaje de energía que entra en la vivienda [24]; se desprecia el calor que se absorbe por las paredes y se asume despreciable la infiltración. A pesar de estas limitaciones, se ha demostrado la relevancia del modelo, generando un modelo más preciso para ser utilizado con termografía aérea y cuyo error de predicción respecto a datos experimentales es aceptable respecto a modelos previos que hemos reportado [36].

4. Conclusiones

En este trabajo se ha implementado un algoritmo computacional que permite sistematizar un modelo matemático desarrollado para analizar la temperatura interna de tres tipos de viviendas del sector rural en Michoacán, a partir de la me-

dicción experimental del techo exterior. En general, se concluye que la estimación del modelo cumple con el objetivo principal, ya que se valida con un error relativo absoluto medio porcentual que va del 5.9% y 9.6% clasificándose como aceptable. Asimismo, este modelo es funcional y significativo, cuyos resultados obtenidos son confiables con base en los datos comparativos con mediciones del comportamiento térmico real. Además, las gráficas de las temperaturas representan formas coherentes con los valores experimentales. Por último, el modelo propuesto es simple, sin embargo, es escalable, ya que, si se requiere un modelo más completo, se podría considerar la contribución debido a la infiltración, a las cargas internas o al calor que desprenden las personas dentro de la habitación. Además, en su estatus actual, el modelo puede instrumentarse con termografía aérea, como una técnica no invasiva para medir la temperatura externa de los techos de viviendas rurales, que es una condición de frontera del modelo, y generar predicciones de temperaturas internas por calles, colonias o comunidades completas que es una línea de investigación futura, para incentivar las mejoras en la infraestructura habitacional a través de recomendaciones sobre el uso de materiales en los techos.

Agradecimientos

Este artículo se presenta como una obra en Memoria del Dr. Miguel Moctezuma Sánchez, quien partió de este mundo en abril del 2025, dedicando los últimos años de su vida a la investigación científica con incidencia social, y quien fuera parte fundamental en el desarrollo de este trabajo. Reconocemos su esfuerzo y dedicación concluyendo esta obra, como lo hubiese querido.

Los autores también agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Proyecto PEE-2025-G-551 y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente por su apoyo para la realización de esta investigación.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos utilizados para respaldar los hallazgos de este estudio están disponibles a pedido con el autor correspondiente.

Conflictos de intereses.

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses con respecto a la publicación de este artículo.

Financiación

Todos los costos de publicación de este artículo serán pagados por los autores.

1. J. M. Martínez-Aguilar and E. Bedolla-Arroyo, Transformación de la vivienda tradicional de Michoacán. Problemáticas y acciones de conservación, *Revista Legado de Arquitectura y Diseño* **16** (2021) 4, <https://doi.org/10.36677/legado.v16i30.15849>
2. M. L.-F. J. P. Juárez-Sánchez, B. Ramírez-Valverde and G. Ortega-López, Transformación de la vivienda rural Mexicana ante la migración. El caso de una localidad en Puebla, México, *Revista de El Colegio de San Luis* **8** (2018) 203, <https://doi.org/10.21696/rcls19162018789>
3. S. G. E. C. R. Ettinger McEnulty and J. A. B. Arroyo, Vivienda identidad y migración en Michoacán, Uaricha, *Revista De Psicología* **2** (2005) 54.
4. C. R. Ettinger, La transformación de la vivienda vernácula en Michoacán: Materialidad, espacio y representación (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2010).
5. A. R. Rodríguez-Peña, J. E. Velasco-Avalos, Habitabilidad del espacio interior con perspectiva de género: vivienda purépecha de Michoacán vs. vivienda popular de programas asistenciales, *Revista Legado de Arquitectura y Diseño* **12** (2017) 1
6. H. J. G. Licón, Desempeño térmico y determinación del rango de confort en una vivienda tradicional de adobe en Zopoco, Michoacán, México, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, *España y Portugal* **2** (2007) 31
7. L. A. R. y C. I. C. R. Morales Morales, R. Torres Cabrejos, Manual (CISMID, Lima, 1993).
8. M. Schumacher, Vivienda rural para campesinos, Barrio la Soledad, Estado de México, Ph.D. thesis (2006).
9. M. González-Torres *et al.*, A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers, *Energy Reports* **8** (2022) 626, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280>
10. D. Perera, C. F. Pfeiffer, and N.-O. Skeie, Modelling the heat dynamics of a residential building unit: Application to Norwegian buildings, *Modeling, Identification and Control* **35** (2014) 43, <https://doi.org/10.4173/mic.2014.1.4>
11. A. A. y S. V. Szokolay, Thermal Comfort, PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, 2nd ed. (Department of Architecture, The University of Queensland Brisbane 4072, 50 Halimah St, Chapel Hill, 4069, Australia, 2007), pp. 1-68.
12. Y. A. C. y M. A. Boles, Termodinámica, 7th ed. (McGRAW-HILL/ INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe, Delegación Alvaro Obregón, México, D.F., 2011), pp. 1-1041.
13. J. R. Molina, G. Lefebvre, and M. M. Gómez, Study of the thermal comfort and the energy required to achieve it for housing modules in the environment of a high Andean rural area in Peru, *Energy and Buildings* **281** (2023) 112757, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112757>
14. T. Yuan, *et al.*, Outdoor thermal comfort in urban and rural open spaces: A comparative study in China's cold region, *Urban Climate* **49** (2023) 101501, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101501>
15. S. Perez-Bezoz, O. Grijalba, and R. J. Hernandez-Minguillon, Evaluation of Thermal Comfort Perception in Social Housing Context, *Environmental and Climate Technologies* **27** (2023) 289, <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0022>
16. S. Paraschiv, L. S. Paraschiv, and A. Serban, Increasing the energy efficiency of a building by thermal insulation to reduce the thermal load of the micro-combined cooling, heating and power system, *Energy Reports* **7** (2021) 286, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.122>
17. R. Taher, W. A. Abdelkader, and A. A. A. Fahim, Sustainable Building: To Achieve Thermal Comfort in Highly Glazed Buildings Using Smart Glass, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **1113** (2022) 012021, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1113/1/012021>
18. B. Lie, *et al.*, Models for Solar Heating of Buildings (56th International Conference of Scandinavian Simulation Society SIMS2014, 2014) pp. 1-9, https://www.researchgate.net/publication/296025958_Models_for_Solar_Heating_of_Buildings.
19. Y. García *et al.*, Optimizing the indoor thermal behaviour of housing units in hot humid climates: Analysis and modelling of sustainable constructive alternatives, *Indoor and Built Environment* **28** (2019) 772, <https://doi.org/10.1177/1420326X18793965>
20. T. Berthou, *et al.*, Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings, *Energy and Buildings* **74** (2014) 91, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.038>
21. P. Bacher and H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, *Energy and Buildings* **43** (2011) 1511, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.005>
22. H. Bastida *et al.*, Thermal Dynamic Modelling and Temperature Controller Design for a House, *Energy Procedia* **158** (2019) 2800, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.041>
23. F. Muhsin *et al.*, CFD modeling of natural ventilation in a void connected to the living units of multi-storey housing for thermal comfort, *Energy and Buildings* **144** (2017) 1, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.035>
24. M. P. y R. Baskar, Evaluation of Indoor Temperature through Roof and Wall Temperatures-An Experimental Study in Hot and Humid Climate, *International Journal of Engineering and Innovative Technology* **4** (2014) 1, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.035>
25. A. Agouzoul *et al.*, Using neural network in a model-based predictive control loop to enhance energy performance of buildings, *Energy Reports* **8** (2022) 1196, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.125>
26. A. Y. C. y A. Ghajar, Heat and Mass transfer, 4th ed. (McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza, New York, NY 10121, 2011), pp. 1-991.
27. J. Calmon, Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción., Ph.D. thesis (1995), <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2650.0563>.

28. D. G. Z. y M. R. Cullen, *Differential Equations with Boundary-Value Problems*, 7th ed. (Brooks/Cole, Cengage Learning, Singapore, the United Kingdom, Australia, Mexico, Brazil, and Japan, 2009), p. 613.
29. W. Chen, *Differential Operator Method of Finding A Particular Solution to An Ordinary Nonhomogeneous Linear Differential Equation with Constant Coefficients* (2018), <https://arxiv.org/abs/1802.09343>.
30. L. B. López-Sosa *et al.*, Multivariate analysis of materials used in rural housing in Mexico considering sustainability indicators: Towards suitable house construction, *Results in Engineering* **25** (2025) 103744, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103744>
31. S. Real *et al.*, Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings, *Construction and Building Materials* **121** (2016) 460, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.018>
32. E. M. S. Bamogo, F. Zoma and D. Y. K. Toguyeni, Thermal Characterization of Concrete and Cement Mortar from Construction Sites and Industrial Production Units in the City of Ouagadougou with a View to Standardization in Energy Certification, *Engineering* **15** (2023) 460, <https://doi.org/10.4236/eng.2023.156031>
33. A. S. A. y. T. M. O. G. B. Egbeyale, Thermal properties of some selected materials used as ceilings in building, *Proceedings of the Nigerian Society of Physical Sciences* **1** (2024) 109, <https://doi.org/10.61298/pnspsc.2024.1.109>
34. L. Liu, et al., Spontaneous ignition of corrugated cardboard under dynamic high radiant flux, *Defence Technology* **40** (2024) 65, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.05.010>
35. I. M. H. Ali y I. Abustan, A new novel index for evaluating model performance, *Journal of Natural Resources and Development* **4** (2024) 1, <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
36. M. Moctezuma-Sánchez *et al.*, A Thermal Model for Rural Housing in Mexico: Towards the Construction of an Internal Temperature Assessment System Using Aerial Thermography, *Buildings* **14** (2024), <https://doi.org/10.3390/buildings14103075>