

# Evaluación computacional de la implementación de techos ventilados en casas de interés social en ciudad Caucel Mérida: Un enfoque para la mejora de la sensación térmica

M. Jiménez Torres\*, M. M. Pérez Sanchez, E. E. Ordoñez Lopez, B. J. Cruz Jiménez, A. Bassam

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias no contaminantes, Mérida, Yucatán, México.*

*Fecha de recepción: 11 de agosto de 2020 - Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2020*

## Resumen

En este trabajo se presenta un análisis numérico mediante el software Energy Plus para la implementación de techos ventilados como un método pasivo de enfriamiento en una casa muestra de interés social en Mérida Yucatán. El modelo se desarrolló tomando en consideración variables de construcción y las propiedades de los materiales implementados en la edificación de una casa muestra y parámetros ambientales del lugar tal como radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa para la estimación de la temperatura interna dentro del lugar bajo estudio. Las simulaciones del comportamiento de la temperatura interna del recinto se realizaron considerando los 12 meses del año de la zona de estudio. Se observó que las construcciones alcanzan temperaturas superiores a los 29 °C, indicando la ineficacia de los métodos actuales de construcción. Por otro lado, la implementación del techo ventilado logra una disminución en la temperatura interna de casi 2 °C. Esta disminución en la temperatura interna deriva en un ahorro energético del 30 % en el consumo energético de la casa durante el año. Adicionalmente los resultados obtenidos sugieren la necesidad de búsqueda de métodos pasivos para la reducción de la temperatura interna de casas de interés social y con ello obtener mejorar la sensación térmica de estos lugares.

**Palabras clave.** - Energy Plus, temperatura interna, casa de interés social, sistemas pasivos, eficiencia energética.

---

\*mario.jimenez@alumnos.uady.mx

# Computational evaluation of the implementation of ventilated roofs in houses of social interest in the city Caucel Merida: An approach to improve thermal sensation

## Abstract

This paper presents a numerical analysis using the Energy Plus software for the implementation of ventilated roofs as a passive cooling method in a sample house of social interest in Mérida Yucatán. The model was developed taking into consideration construction variables and the properties of the materials implemented in the construction of a sample house and environmental parameters of the place such as solar radiation, wind speed, ambient temperature and relative humidity to estimate the internal temperature within the place under study. The simulations of the behavior of the internal temperature of the enclosure were carried out considering the 12 months of the year in the study area. Constructions were observed to reach temperatures above 29 ° C, indicating the ineffectiveness of current construction methods. On the other hand, the implementation of the ventilated ceiling achieves a decrease in the internal temperature of almost 2 ° C. This decrease in the internal temperature results in an energy saving of 30% in the energy consumption of the house during the year. Additionally, the results obtained suggest the need to search for passive methods to reduce the internal temperature of social interest houses and thereby improve the thermal sensation of these places.

**Keywords.** Energy Plus, internal temperature, low-income house, passive systems, energy efficiency.

## Introducción

En términos generales las edificaciones se encuentran como uno de los sectores de mayor consumo eléctrico abarcando alrededor del 30 % de la generación mundial, destinándose aproximadamente un 80 % a procesos de ventilación y obtención del confort térmico (Aflaki, Mahyuddin, Al-Cheikh Mahmoud, & Baharum, 2015). En climas tropicales el consumo energético en edificaciones es superior, esto se debe a que el clima tropical se caracteriza por altas temperaturas y humedad relativa elevada. Aunada al clima, el aumento de espacios urbanos y la reducción de zonas verdes, genera fenómenos conocidos como Islas de Calor Urbano (UHI, por sus siglas en inglés); que se caracterizan por el aumento

en la temperatura ambiente en las urbes respecto a las áreas rurales, derivando en un incremento de consumo eléctrico (Ashtiani, Mirzaei, & Haghighat, 2014; Yang et al., 2018).

Dentro de los parámetros que afectan a la ganancia y almacenamiento de calor en edificaciones se encuentran las envolventes, las cuales se refieren a la barrera del medio externo con el interior (Littlewood, Howlett, Capozzoli, & Jain, 2020). Un buen diseño en las paredes, ventanas, puertas, piso y techo contribuye en la obtención del confort térmico y el uso eficiente de la energía. En este sentido, el techo es uno de los elementos más importantes ya que recibe una mayor incidencia solar respecto a las demás componentes, además de presentar mayor fluctuación de temperatura;

aportando cerca del 50 % del total de energía incidente en edificaciones (Nahar et al., 2014). Diversas tecnologías se han desarrollado en los últimos años para contrarrestar y regular la ganancia de energía en los techos, entre estas tecnologías se encuentran: materiales reflectivos, materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés), espacios y cavidades ventiladas o inclusive vegetación. Particularmente, investigaciones han demostrado que el uso de techos ventilados son una buena alternativa para reducir la ganancia energética en edificaciones (Hernández-Pérez et al., 2014; May Tzuc et al., 2019). Estos sistemas tienen el propósito de disminuir la temperatura del recinto sin necesidad de consumir energía logrando que la edificación sea eficiente energéticamente.

En México las casas catalogadas como de “Interés social” se han convertido en un tema de estudio debido a que son las más solicitadas a nivel nacional. Estas construcciones tienen un área promedio de 46.8 m<sup>2</sup> y se componen de baño, cocina, estancia-comedor y dos recámaras (CANADEVI, 2019). Sin embargo, la gran demanda que han tenido estas construcciones desde los años ochenta ha ocasionado que los modelos de casa habitación no cumplan los requerimientos mínimos de área y espacios internos, generando afectaciones a la salud debido a que no proporcionan una protección efectiva a los habitantes. Esto último, con el único propósito de que las viviendas se enfocan más a la ganancia económica de las constructoras dejando de lado la calidad de los materiales implementados, derivando en la insatisfacción de los parámetros de confort térmico y ocasionando un incremento en el consumo energético para

la climatización de espacios a los usuarios (May Tzuc et al., 2020).

Para el caso de Yucatán, lo antes expuesto cobra vital importancia ya que cerca del 70 % de las viviendas son de Interés Social (INEGI, 2019b). Así mismo los registros más recientes indican que en el estado se presentan temperaturas superiores a los 36 °C durante el verano (INEGI, 2019a). Esto en conjunto con las UHI ocasiona un incremento de 5 °C en la temperatura ambiente provocando una sensación térmica mayor (García, Celene, & Manrique, 2016). Por lo tanto, es necesario realizar investigación referente a sistemas pasivos de enfriamiento que afecten en menor medida la estructura de las viviendas que propicien la disminución del consumo eléctrico en la región peninsular.

Basado en lo anterior, este trabajo de investigación se enfoca hacia un análisis computacional para la implementación de los techos ventilados en casas de interés social en la ciudad de Mérida como alternativa para disminuir la sensación térmica en estos lugares. Se presentan los componentes de construcción a tomar en consideración y la metodología realizada para la realización de los modelos computacionales en la búsqueda de la temperatura interna del recinto. Posteriormente se realizó la simulación del techo ventilado modificando la altura con el fin de obtener el diseño óptimo de este sistema pasivo considerando dos tipos de láminas para las configuraciones apropiadas. Por último, se hizo un análisis energético para cuantificar la disminución de energía requerida en la climatización de espacios al usar el techo ventilado.

## 1. Descripción del caso de estudio

### 1.1. Ubicación de la zona de estudio y sus características

de Mérida, Yucatán, específicamente en la zona residencial de Ciudad Cauce (21° 53' N, 89° 42' 25' W). Dicha zona residencial inició su construcción en el año 2004 por iniciativa del gobierno del Estado, con el propósito de ofrecer espacios habitacionales en las cercanías de la ciudad. Debido al incremento en la población de Mérida y la búsqueda de zonas residenciales, se ha aumentado la construcción de complejos habitacionales en esta zona. La zona de Ciudad Cauce tiene un área aproximada de 10.22 km<sup>2</sup> como se aprecia en la Figura 1. Sin embargo, debido a los intereses

La casa seleccionada para el estudio se encuentra ubicada en la parte poniente de la ciudad

estudio debido a que presenta el nuevo enfoque de construcción en Mérida, el cual se enfoca tener la mayor cantidad de casas en la menor área posible. Así mismo, esta limitación de espacios inhabilita la posibilidad de tener áreas verdes en las casas, por lo cual genera afectaciones en la sensación térmica de la zona.

La Figura 2, presenta la ubicación de la zona de estudio, la vivienda posee un área de construcción de 69.69 m<sup>2</sup> y una altura de 2.8 m. Se compone de dos recámaras, comedor, cocina y baño, la cual es la configuración



**Figura 1.** Vista aérea de la zona de estudio “Ciudad Cauce”.

económicos diversas constructoras deciden aumentar el número de edificaciones disminuyendo los espacios verdes. Se escogió Ciudad Cauce, como zona de

estándar del espacio en las casas de la región. La edificación tiene paredes de 17 cm de grosor construidas a partir de bloques de concreto de 15 cm x 20 cm x 40 cm, con

revestimiento de mortero de 1 cm; el techo se conforma por vigueta, bovedilla y un colado de 5 cm, los materiales son implementados de acuerdo con la normativa vigente. Por último, una vez realizado el diseño con las medidas mencionadas, se

introduce la altura total de la planta, la cual será de 2.8 m, específicamente de piso a plafón son 2.5 m. La Tabla 1, presenta las medidas y consideraciones necesarias de la casa de estudio.



**Figura 2.** Ubicación de la vivienda de estudio en la colonia Ciudad Caucel.

Tabla 1. Disposición de espacios de la zona de estudio

Características	Dimensiones
Área de la edificación	69.69 m <sup>2</sup>
Profundidad (Largo)	20 m
Ancho	8.4 m
Cocina – Comedor	3.28 m x 6.23 m
Cuartos	3.65 m x 4.28 m
Orientación de la fachada	Noreste

### 1.2. Monitoreo de parámetros ambientales de la zona de estudio

El estudio se enfoca en la ciudad de Mérida, Yucatán, México (20° 58' N, 89° 37' W), esta ciudad presenta una altura de 10 m sobre el nivel del mar y colinda al norte con el Golfo de México. La zona se caracteriza por presentar un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio en Mérida es de 26 °C, las mayores temperaturas se alcanzan en los meses de abril a julio superando los 36 °C, mientras que la temperatura mínima se

presenta en enero con 16 °C en promedio. La precipitación anual es de aproximadamente 1014.1 mm, específicamente durante los meses de junio a octubre (INEGI, 2017). Las variables ambientales, temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), radiación solar ( $G$ ), humedad relativa ( $HR$ ), velocidad de viento ( $V_v$ ), presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) se monitorearon mediante la estación meteorológica VantagePro2 (Davis Instruments, 2020). En la Tabla 2 se resumen las características de la instrumentación para la formación de la base de datos meteorológica. El

almacenamiento de datos meteorológicos se filtró verificando la correcta lectura de las variables ambientales; teniendo al final una base de datos que comprende del mes de enero a diciembre del año 2019.

Posteriormente, los datos se procesaron mediante herramientas computacionales a la extensión *Energy Plus Weather* (.epw, por sus siglas en inglés), este proceso se encuentra representado en la Figura 3.

Tabla 2. Características de medición de la estación Vantage Pro2.

Equipo	Parámetros	Rango	Incertidumbre	Resolución
Vantage Pro2	Radiación solar	0 – 1, 800 W/m <sup>2</sup>	± 5 %	1 W/m <sup>2</sup>
	Temperatura ambiente	0 – 60 °C	0.5 °C	1 %
	Humedad relativa ambiente	1 – 100 %	1.00 %	5 %
	Velocidad de viento	de 1 – 80 m/s	± 5 %	0.4 m/s
	Presión atmosférica	540 – 1, 100 hPa		0.1 hPa

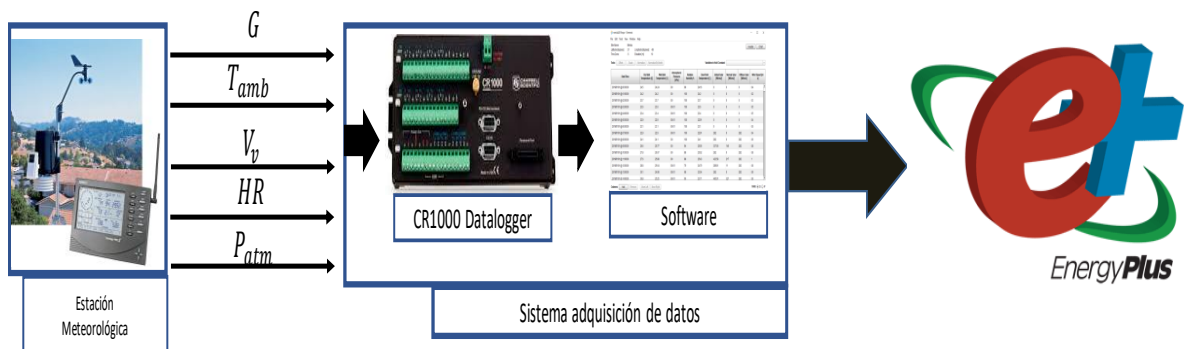


Figura 3. Diagrama del monitoreo, registro y procesamiento de las variables meteorológicas para implementar en el modelo computacional.

### 3. Metodología computacional

Los programas utilizados en este estudio son *SketchUp*, *OpenStudio* y *Energy Plus*. De manera conceptual, se puede decir que *SketchUp* es el software destinado a crear el modelo geométrico de la zona de estudio; con él se creará el edificio basándose de los planos correspondientes, creación de las divisiones o particiones de los diferentes espacios existentes y por último la extrusión

de los volúmenes. Con *Open Studio* se afinan y ajustan los parámetros para la ejecución de las simulaciones, los componentes de cada envolvente y se escogerá el formato en el que queremos obtener el sumario de resultados. Finalmente, *Energy Plus* es el programa encargado de realizar las simulaciones propiamente dichas. Dicho software, se

encarga de recoger o recopilar toda la información introducida mediante *SketchUp* y *OpenStudio*, de procesarla y con la ejecución de una serie de algoritmos, es capaz de calcular el comportamiento de los modelos y ofrecer unos valores de salida que serán plasmados u ordenados en el formato que se haya escogido. Es importante señalar que los softwares con los cuales se está desarrollando esta metodología son de licencia libre o (General Public License GPL por sus siglas en inglés).

### 3.1. Diseño computacional de la vivienda

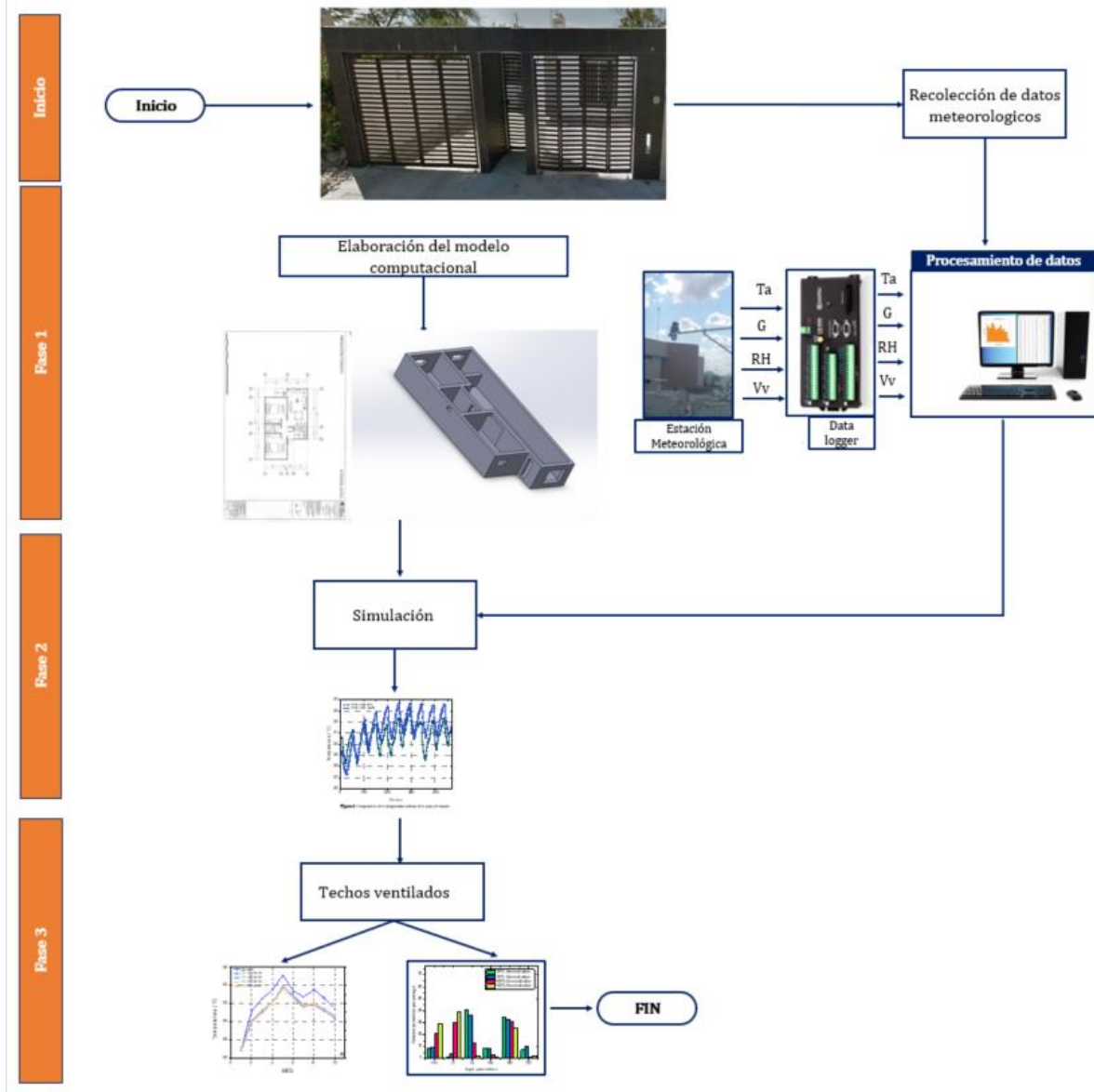
A partir de la selección de la casa muestra descrita en la sección 2.1 y con el propósito de llevar a cabo las simulaciones que permitan un adecuado análisis térmico al interior del edificio bajo estudio, se planteó la metodología computacional mostrada en la Figura 4. Esta metodología se encuentra conformada por tres etapas:

- Instrumentación de variables ambientales y elaboración del modelo computacional: En esta fase se realiza la instrumentación en la zona de estudio. Se elabora la base de datos de variables meteorológicas que se requieren para la simulación computacional. De igual manera se elabora el diseño computacional de la casa de estudio tomando en consideración las medidas presentadas en la Tabla 1.
- Simulación de techos ventilados: Después que se tiene el modelo terminado, se procede a realizar el

diseño del techo ventilado variando la altura respecto al techo de la casa, modificando las láminas de acuerdo con lo que se encuentra comercialmente. Una vez realizados los modelos, se realiza la obtención de la base de datos de temperaturas internas y su análisis en la búsqueda del mejor comportamiento.

- Comparación de resultados de techos ventilados: Una vez que se tiene la base de datos de temperaturas internas al implementar las diferentes configuraciones de techos ventilados, se realiza la comparación para obtener el mejor diseño de acuerdo con la disminución de temperatura interna. De igual manera se realizará una proyección de ahorro energético al implementar dicho sistema.

Es importante señalar que, para la correcta elaboración del modelo computacional de la edificación bajo estudio, se requiere ingresar los valores de conductividad, calor específico y grosor de acuerdo con la normatividad nacional vigente, la cual se aprecia en la Tabla 3. Dichas propiedades se pueden modificar en *OpenStudio*; de igual manera, es importante ingresar otras variables como la absorción térmica, visible y solar; dichas componentes se compararon de diversas fuentes confiables (ToolBox, 2020).



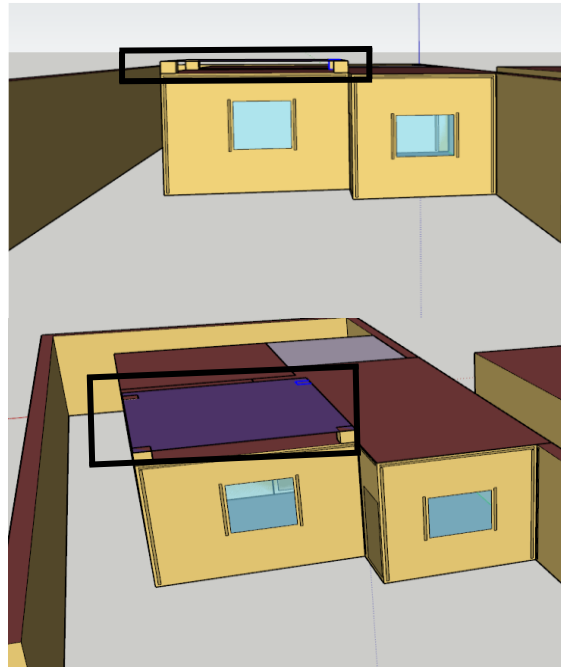
**Figura 4.** Metodología de trabajo para la simulación de techos ventilados en casas de interés social bajo las condiciones de Mérida, Yucatán.

Tabla 3. Materiales implementados en la construcción de casas de interés social tomando como referencia normativa nacional (SENER, 2011)

Envolvente	Materiales	Grosor (cm)	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Conductividad ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )	Calor específico ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )
------------	------------	-------------	------------------------------	---	---



Techo	Concreto	3 - 5	2, 130	1.8	1, 050
	Vigueta	12	1, 900	0.41	1, 000
	Bovedilla	15	1, 200	1.74	1, 000
Muros	Acabado	3	1, 570	0.53	1, 000
	Block de concreto	15	1, 920	0.8	800



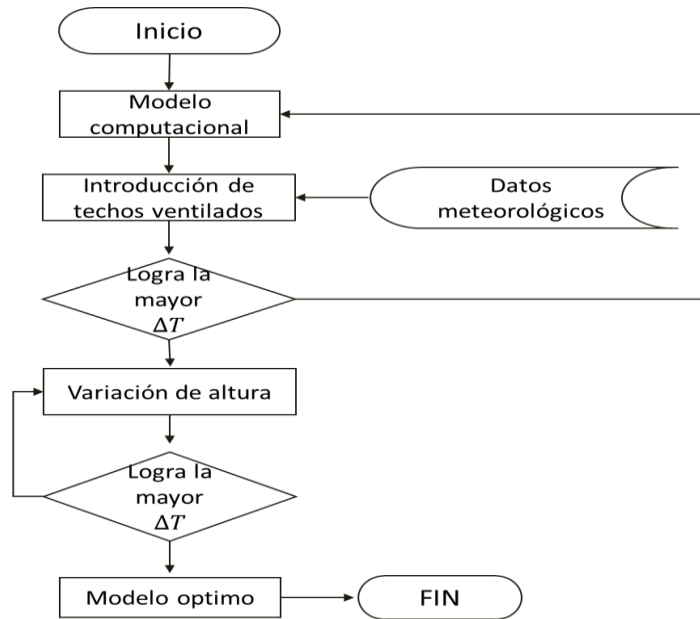
**Figura 5.** Modelo computacional del techo ventilado en software SketchUp.

### 3.2. Modelado del techo ventilado

El techo ventilado es un sistema pasivo el cual tiene como objetivo la búsqueda de parámetros de confort térmico sin requerir energía eléctrica en el proceso. Esto se logra mediante la eliminación de calor a través de procesos radiativos y reflectivos. En la Figura 5, se presentan el diseño final del techo ventilado a través del software *SketchUp*.

Los materiales por considerar en la elaboración del techo ventilado son láminas

comerciales de Zinc y Ultralam. Dichos materiales poseen diferentes propiedades térmicas las cuales se analiza si tiene afectación en la transferencia de calor al edificio. Así mismo, el análisis se desarrolla variando la altura (30 cm, 50 cm, 60 cm y 90 cm) con el propósito de entender si existe relación en la disminución de la temperatura interna del recinto respecto a esta componente. En la Figura 6 se exhibe el diagrama de flujo describiendo la metodología explicada con anterioridad.



**Figura 6.** Diagrama de flujo de la metodología en la implementación de techos ventilados.

#### 4. Resultados y discusión

##### 4.1. Estimación de la temperatura interna a través de la simulación sin techo ventilado

En esta sección se observan los resultados de la temperatura a lo largo del año. En la Figura 5 se analiza el índice de confort térmico existente de manera natural durante todo el año. Para este propósito, se emplea una tabla psicrométrica la cual se genera mediante los datos de temperatura de la región en el periodo anual y con ello se obtiene el confort térmico de la edificación mediante ventilación natural. En la Figura 7 se observa una carta o diagrama psicrométrica bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán México.

Dicho diagrama permite encontrar para un punto cualquiera el estado del aire húmedo según diferentes variables. Este método de representación es de suma importancia debido a que facilitan el análisis de las características climáticas de una locación dada, desde el punto de vista del confort humano. Específicamente, para este trabajo la carta psicrométrica presenta que, bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán, más del 50 % del tiempo a lo largo del año no se cumple con el rango de temperatura de bulbo seco óptimo (24 °C – 28 °C) para la obtención del confort térmico. Por lo cual se requerirá de sistemas mecánicos de enfriamiento de espacios, ejemplificando el uso de aire acondicionado para el enfriamiento por ventilación forzada.

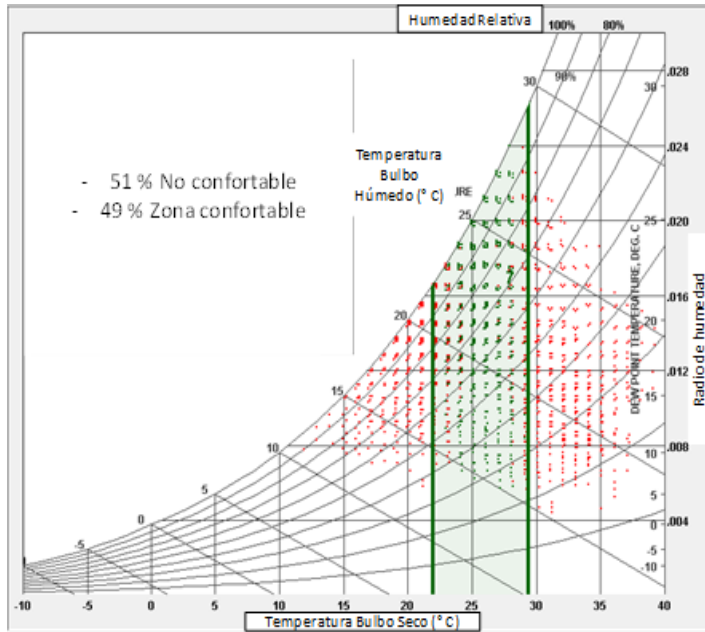


Figura 7. Carta psicométrica de la zona de Mérida Yucatán.

La Figura 8 manifiesta el comportamiento de la temperatura del comedor y cuarto en un periodo de 9 días. En esta gráfica se aprecia que la temperatura promedio del

cuarto es de 31.5 °C, teniendo máximos cercanos a los 34 °C; mientras que el comedor tiene una temperatura promedio de

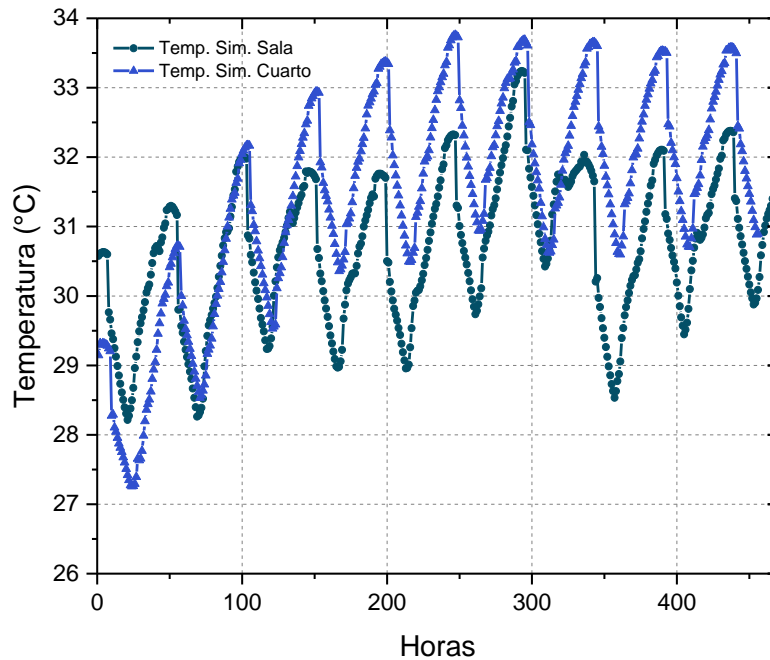


Figura 8. Comparativa de la temperatura simulada interna de la zona de estudio durante una semana representativa.

30 °C, teniendo como pico máximo de temperatura los 32.5 °C.

Esta diferencia de temperatura entre el cuarto y el comedor se debe principalmente a que el área de ventanas en el cuarto no permite la correcta circulación de aire. En el caso del comedor, el área de ventana de la cocina le afecta directamente teniendo un flujo constante del viento permitiendo mayor flujo de aire.

4.2. *Simulación térmica del uso de techo ventilado*

El análisis del comportamiento de la temperatura interna considerando el techo ventilado como medida de reducción de la temperatura se efectúa tomando el cuarto principal como zona de mayor interés. La decisión es con base a que los ocupantes de la vivienda se encuentran más del 50 % del

tiempo en este espacio, por lo cual, *se desea comparar el consumo eléctrico requerido para disminuir la temperatura de la edificación de techo original con la de doble techo*. En esta sección se presenta la evaluación de dos materiales en el uso de techos ventilados a diversas alturas (30, 50, 60 y 90 cm). Los materiales son lámina de Zinc y Ultralam, ambos son comerciales, únicamente teniendo diferencia que la Ultralam se caracteriza por estar compuesta por dos capas de polímero y una capa de aislante en el centro, siendo esta última constituida principalmente de PVC y microburbujas de aire. En la Tabla 4, se presentan las características de las láminas de estudio. Es importante señalar que el cuarto tiene dimensiones de 3.65 m X 4.28 m, por lo cual se requerirían del uso de 3 láminas en ambos casos.

Tabla 4. Características de las láminas de estudio para implementar como techo ventilado

Zinc		Ultralam	
Espesor (mm)	0.44	Espesor (mm)	0.22
Ancho (m)	1.05	Ancho (m)	1.26
Largo (m)	3.66	Largo (m)	4.27
Conductividad (W/m*K)	116	Conductividad (W/m*K)	7.73
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7, 140	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	5
Calor específico (J/kg*K)	390	Calor específico (J/kg*K)	820

La Figura 9(a) exhibe el comportamiento de la temperatura interna del cuarto sin techo ventilado, contrastándola con la temperatura interna del mismo recinto al implementar las diversas configuraciones de techos ventilados con lámina de Zinc. En esta figura es evidente que la temperatura interior presenta una disminución durante todo el periodo en aproximadamente 1 °C. Se aprecia de mejor manera que al usar un techo ventilado a 30 cm de altura presenta el

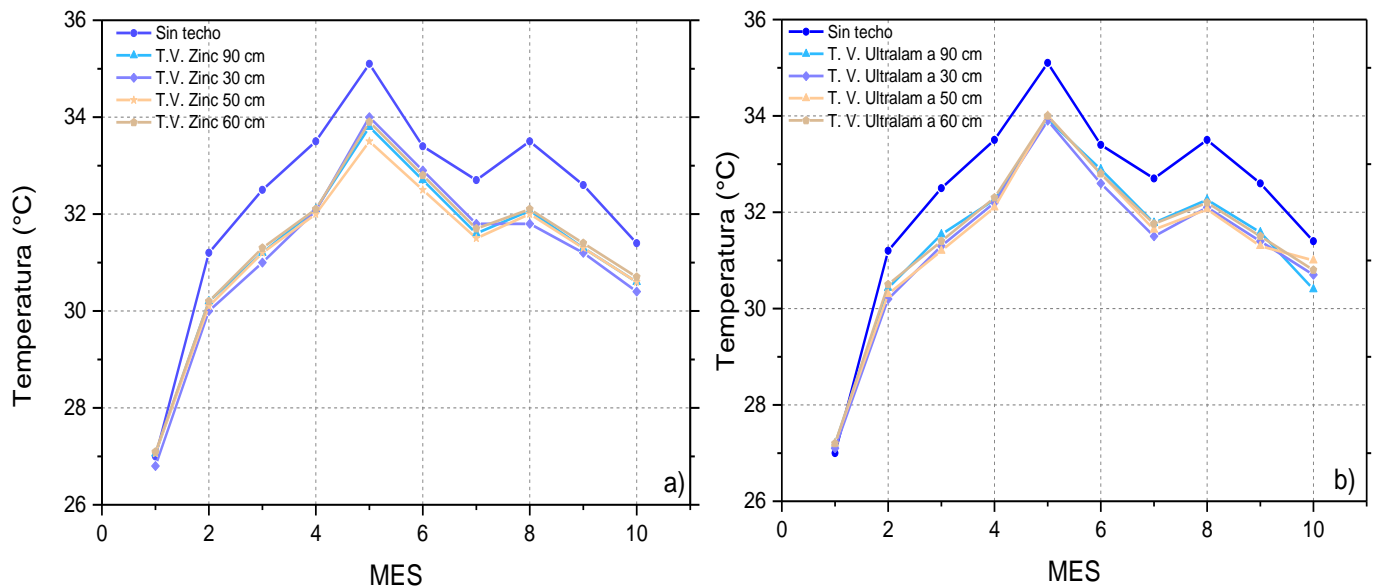
mejor comportamiento, puesto que la disminución de temperatura respecto a la altura es mínima. La Figura 9(b) presenta el mismo análisis ahora con lámina Ultralam. Al implementar el sistema pasivo, ahora con el material Ultralam, se aprecia una disminución en la temperatura interior en promedio de 0.8 °C. Se tiene que a lo largo del año la altura que presenta un mejor comportamiento es la de 30 cm con una temperatura interior de 29.4 °C,

contrastando con los 30.2 °C que tiene el recinto sino se implementa ninguna tecnología. La reducción de la temperatura interior lograda al utilizar el techo ventilado a esta altura se ocasiona debido a dos procesos significativos. Como primer punto se tiene la limitación de la radiación incidente en el transcurso del día, puesto que la lámina absorbe la radiación proveniente del sol, ocasionando una menor incidencia en el techo. El segundo fenómeno está relacionado con procesos convectivos, a dicha altura se tiene que el calor almacenado por la lámina se transfiere al ambiente por la convención natural; así mismo las propiedades térmicas de la lámina ocasionan que transfieran mayor cantidad de calor del material al ambiente limitando la transferencia de calor al techo.

#### 4.3. Consumo de energía para climatización del recinto

Una vez que se tiene definida la altura óptima se procede a calcular la disminución de calor en el cuarto, para su posterior análisis en la reducción de energía necesaria en climatización. El software *OpenStudio – Energy Plus*, nos proporciona la ganancia total del recinto ( $Q_T$ ). La ganancia de energía a lo largo del año considera todos los fenómenos convectivos, conductivos y radiativos. De igual manera se conoce la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la temperatura interna del recinto ( $T_a$ ). Con estos datos se desarrolla el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de la superficie, como se exhibe en la ecuación 1 (American Society of Heating, 2010).

$$p = \frac{Q_T}{(T_{amb} - T_a)} \quad (1)$$



**Figura 9.** Comparativa de la temperatura interna del cuarto mensual comparando el uso de techos ventilados a diferentes alturas; a) Lamina de Zinc; b) Lamina Ultralam.

Dicho coeficiente presenta diferencia en su valor en los escenarios de este estudio (Techo sin sistema pasivo, techo ventilado de lámina de Zinc y Ultralam); posteriormente, se realiza el cálculo de la energía necesaria en la disminución de la

temperatura interna del cuarto, mediante la ecuación 2. Dichos valores se obtienen puntualmente por cada intervalo de tiempo (30 minutos), por lo tanto, para conocer el valor puntual mensual, se empleó el método

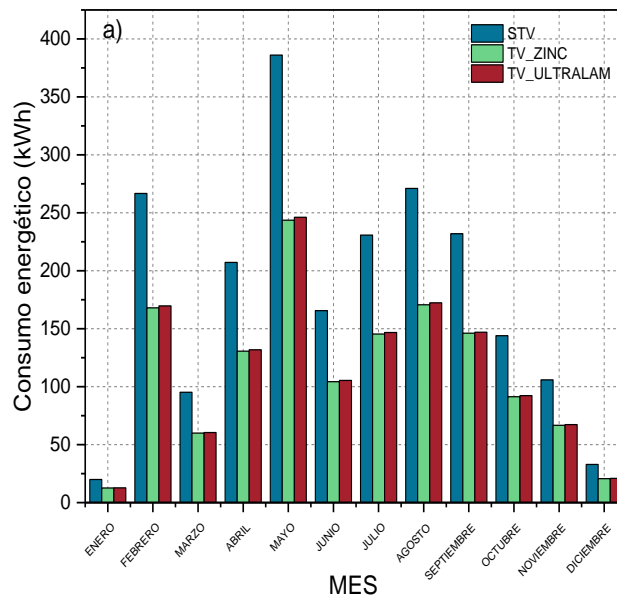
del trapecio (Ecuación 3) (Zingre, Wan, Wong, Toh, & Lee, 2015).

$$Q_T = p * (T_{amb} - T_T) \tag{2}$$

$$Q_T = \int_a^b \left[ f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a} (x - a) \right] dx \tag{3}$$

Para este análisis se considera la energía necesaria para alcanzar la temperatura objetivo ( $T_T$ ) de 27 °C. Esta temperatura se escogió debido a que se encuentra en el rango de confort térmico. La Figura 10, ofrece la comparativa de energía requerida para el enfriamiento del cuarto por cada mes. En ella se presenta la energía mensual para alcanzar el rango de sensación térmica adecuada (27 °C). Se tiene que, al no implementar ningún sistema pasivo la energía requerida para disminuir la temperatura es de aproximadamente 2, 100 kWh en todo el año, siendo el periodo

mayo-agosto el de mayor consumo debido a la época de verano. Contrastando estos resultados al usar el techo ventilado se aprecia una disminución en el consumo eléctrico de aproximadamente 30 %. Comparando estos resultados con la literatura se tiene que bajo condiciones de clima mediterráneo la reducción de ganancia de calor del edificio es de 50 %, obteniendo una reducción significativa superior al 40 % en cargas de enfriamiento de espacios (Gagliano, Patania, Nocera, Ferlito, & Galesi, 2012).



**Figura 10.** Energía necesaria mensual al implementar un equipo de aire acondicionado para la obtención del confort térmico a 27 °C.

Con el propósito de cuantificar la energía consumida se procedió a calcular el coste monetario respecto a la tarifa de la CFE,

para el caso de Mérida la tarifa doméstica implementada es la 1D. En la Tabla 5 se exponen los costos de energía para la

climatización del cuarto de manera bimestral de acuerdo con el manejo que emplea CFE a los usuarios. De esta tabla, los resultados más importantes son que al implementar el sistema pasivo en sus dos

configuraciones de materiales, se presenta un ahorro monetario de aproximadamente del 35 % en el pago de aire acondicionado, presentando un mejor comportamiento la lámina de Zinc.

Tabla 5. Costo de la energía requerida para climatización del cuarto para lograr disminuir la temperatura del cuarto a 27 °C.

Bimestre	Sin techo ventilado	TV_ZINC	TV_ULTRALAM
	27 °C	27 °C	27 °C
Nov - Ene	\$ 44.54	\$ 28.06	\$ 28.41
Ene – Mar	\$ 466.89	\$ 205.74	\$ 208.28
Mar – May	\$ 470.02	\$ 285.85	\$ 286.49
May – Jul	\$ 300.00	\$ 185.00	\$ 187.00
Jul – Sep	\$ 391.85	\$ 234.75	\$ 236.68
Sep – Nov	\$ 229.68	\$ 137.00	\$ 138.56

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología computacional para auxiliar en el proceso de simulación de la temperatura y humedad relativa interna en edificaciones y su comportamiento durante el año.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, los materiales constructivos empleados en las viviendas de interés social bajo las condiciones climatológicas de Mérida ocasionan que se presente una temperatura interna superior a los 28 °C, teniendo máximas cercanas a los 37 °C. Mientras que, al implementar el techo ventilado se presenta una disminución de 1 °C en la temperatura interna durante el año.

Esta disminución de 1 °C al implementar el techo ventilado es consecuencia de disminuir en un 30 % la ganancia de calor del edificio. Al cuantificar este resultado directamente en el consumo energético se tiene que, para disminuir la temperatura del cuarto a la temperatura de 27 °C, sin la implementación del sistema pasivo, el equipo de refrigeración requiere anualmente 2157 kWh, mientras que, al implementar el techo ventilado el consumo disminuye en un 38 %. De manera monetaria, aplicando el costo por kWh que tiene estipulado CFE a la península, dicha disminución en el consumo energético equivale a un ahorro de \$ 800.00 de acuerdo con el escenario planteado.

## Referencias

- Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z., & Baharum, M. R. (2015). A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy and Buildings*, *101*, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>
- American Society of Heating, R. and A.-C. E. (2010). *ashrae\_standard\_55\_2013\_Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- Ashtiani, A., Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2014). Indoor thermal condition in urban heat island: Comparison of the artificial neural network and regression methods prediction. *Energy and Buildings*, *76*, 597–604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.018>
- CANADEVI, C. N. de la I. de D. y P. de V. (2019). CANADEVI • Yucatán. Retrieved February 15, 2019, from [http://www.canadeviyucatan.org.mx/novedad\\_noticia.php?id=163](http://www.canadeviyucatan.org.mx/novedad_noticia.php?id=163)
- Davis Instruments. (2020). Vantage Pro2. Retrieved April 1, 2020, from <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-pro2/>
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A., & Galesi, A. (2012). Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings*, *49*, 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.007>
- García, C. R., Celene, Y., & Manrique, E. (2016). Oleadas de calor y el efecto de la vegetación en Yucatán. *Desde El Herbario CICY*, *8*(30), 97–101. Retrieved from [http://www.cicy.mx/sitios/desde\\_herbario/](http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/)
- Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., & Simá, E. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*, *80*, 81–105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.008>
- INEGI. (2019a). Clima. Yucatán. Retrieved February 18, 2019, from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/clima.aspx?tema=me&e=31>
- INEGI. (2019b). Viviendas. Yucatán. Retrieved February 18, 2019, from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=31>
- INEGI, I. N. de E. y G. (2017). *Conociendo Yucatán*. 36.
- Littlewood, J., Howlett, R., Capozzoli, A., & Jain, L. (2020). Sustainability in Energy and Buildings. In J. Littlewood, R. J. Howlett, A. Capozzoli, & L. C. Jain (Eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies*. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2>
- May Tzuc, O., Hernández-Pérez, I., Macias-Melo, E. V., Bassam, A., Xamán, J., & Cruz, B. (2019). Multi-gene genetic programming for predicting the heat gain of flat naturally ventilated roof using data from outdoor environmental monitoring. *Measurement*, *138*, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.032>
- May Tzuc, O., Livas-García, A., Jiménez Torres, M., Cruz May, E., López-Manrique, L. M., & Bassam, A. (2020). Artificial Intelligence Techniques for Modeling Indoor Building



Temperature under Tropical Climate Using Outdoor Environmental Monitoring. *Journal of Energy Engineering*, 146(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000649](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000649)

Nahar, N. M., Sharma, P., Purohit, M. M., Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., ... Emmanuel, R. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*, 5(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>

SENER, S. de E. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011*. 47.

ToolBox, T. E. (2020). Absorbed Solar Radiation. Retrieved March 22, 2020, from [https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d\\_1568.html](https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d_1568.html)

Yang, J., Mohan Kumar, D. Ilamathy, Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Lee, S. E. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 173, 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006>

Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T., & Lee, I. Y. L. (2015). Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. *Energy*, 82, 813–826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.092>