



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELADO DE TECHOS VENTILADOS PARA LA
MEJORA DE LA SENSACIÓN TÉRMICA EN CASAS
DE INTERÉS SOCIAL EN CLIMA TROPICAL**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.E.R. MARIO ANTONIO JIMÉNEZ TORRES

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2020

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen Profesional y hubiere sido aprobado por el sínodo, solo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

RESUMEN

El presente trabajo propone un análisis energético y económico en el diseño de techos ventilados como sistema pasivo y su incorporación en casas de interés social. Una metodología computacional es empleada para auxiliar en el proceso de simulación de la temperatura interna de la edificación y su comportamiento al implementar el sistema pasivo de estudio variando los materiales. Se utilizó un conjunto de softwares computacionales, mismos que involucra aspectos climáticos y operativos para transferir el fenómeno de estudio a un modelo que represente la realidad, en el cual se aprecie el comportamiento de diversas variables de salida de manera rápida y eficiente. Dicho modelo se validó a través de mediciones experimentales y normativas internacional en sistemas energéticos computacionales. Se evaluaron diversos materiales y alturas de techos ventilados para analizar la variación de la temperatura al interior del recinto. Se seleccionó como configuración óptima a aquella que presentara la mayor disminución de temperatura interna, y posteriormente se le efectuó un análisis económico. El trabajo contempla el caso de estudio de una casa de interés social ubicada en Mérida, Yucatán, la cual no presente modificaciones realizadas, de acuerdo con los modelos de vivienda que se presentan a nivel nacional. Según los resultados, la altura óptima del sistema es de 30 cm respecto al techo de la vivienda, presentando una disminución en la temperatura de 1 °C a lo largo del año. La disminución en la temperatura del recinto es producto de una reducción de cerca del 35 % de la energía incidente a la envolvente. El ahorro energético se evaluó considerando la búsqueda de dos temperaturas objetivo de 27 y 22 °C respectivamente, lo que equivale al confort térmico y al caso de la búsqueda de la sensación de frío. En ambos análisis el sistema pasivo reduce el consumo energético en el 40 %. Además, el estudio de factibilidad económica muestra que el costo beneficio de dichos sistemas pasivos es positivo, presentando mejores resultados utilizando el material de lámina de Zinc como envolvente auxiliar o doble techo.

Abstract

The present work proposes an economic and environmental analysis in the design of ventilated ceilings as a passive system and its incorporation in houses of social interest. A computational methodology is used to assist in the simulation process of the internal temperature of the building and its behavior when implementing the passive study system by varying the materials. A set of some computer software involving environmental and operational aspects was used to transfer the study phenomenon to a model that represents reality, in which the behavior of various output variables is appreciated quickly and efficiently; This model was validated through experimental measurements and the use of international regulations in computational energy systems. The behavior of the internal temperature when implementing the ventilated ceiling was carried out through the interaction of the construction material, as well as the variation in the installation height of the system. The optimal result was selected with the greatest decrease in internal temperature, for subsequent economic analysis. The study contemplates the case study of a house of social interest located in Mérida, Yucatán, which does not present any modifications made, according to the housing models presented at the national level. According to the results, the optimal height of the system is 30 cm from the roof of the house, presenting a decrease in temperature of 1 ° C throughout the year. The decrease in the temperature of the room is the result of a decrease of about 35% of the energy incident on the room envelope. The energy-saving was evaluated considering the search for two target temperatures of 27 - 22 ° C respectively, which is equivalent to thermal comfort and in the case of the search for the sensation of cold. In both analyzes, the passive system reduces energy consumption by 40%, while, under the economic feasibility study, the cost-benefit of these passive systems is positive, presenting better results using the Zinc sheet material as a passive system.

Agradecimientos

El autor de este documento agradece en exceso al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero otorgado para la realización del presente trabajo de maestría, otorgado a partir de la beca escolar de posgrado CONACYT número 44102 (CVU 930301).

Índice General

RESUMEN	2
Abstract	3
Agradecimientos.....	4
Índice de Figuras.....	8
Índice de Tablas	11
Nomenclatura	12
Introducción.....	1
Antecedentes	4
Justificación	6
Hipótesis.....	9
Objetivo General.....	9
Objetivos específicos	9
Capítulo 1. SISTEMAS PASIVOS EN EL ACONDICIONAMIENTO DE ESPACIOS.....	10
1.1. Técnicas pasivas de acondicionamiento	10
1.2. Métodos de enfriamiento pasivo para techos.....	13
1.2.1. Techos de concreto modificado	14
1.2.2. Techos con materiales reflejantes	15
1.2.3. Techos con materiales aislantes.....	17
1.2.4. Techos verdes	18
1.2.5. Techo con estanque	20
1.2.6. Techos ventilados.....	22
1.2.7. Chimenea solar.....	23
1.3. Viabilidad de los métodos de enfriamiento de techo	25

1.3.1. Idoneidad para diferentes tipos de clima	25
1.3.2. Impacto y reducción de ganancia de calor	26
1.3.3. Retorno de inversión.....	27
Capítulo 2. NORMATIVIDAD EN EDIFICACIONES.....	29
2.1. Normativa Internacional.....	31
2.1.1. Estándar para el Aislamiento térmico para espacios de techos ventilados	32
2.1.2. Estándar para el diseño del entorno del edificio: Diseño, dimensionamiento, instalación y control de sistemas integrados de refrigeración y calefacción.....	33
2.1.3. Estándar para el cálculo de la transmitancia térmica de fachadas ligeras (muros cortinas o fachada ligera)	33
2.1.4. Estándar para la evaluación global de la eficiencia energética de los edificios.	33
2.1.5. Estándar para la sostenibilidad en edificios y obras de ingeniería civil	34
2.1.6. Estándar para el comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas ...	34
2.2. Normativa de eficiencia energética en México.....	34
2.2.1. Norma nacional para la eficiencia energética en edificaciones no residenciales	35
2.2.2. Norma nacional para la eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales	35
2.2.3. Norma nacional para los sistemas de aislamiento térmico en la industria	36
2.2.4. Norma nacional para el aislamiento térmico en edificaciones	36
2.2.5. Norma nacional para la eficiencia energética en edificaciones de uso habitacional mediante la envolvente	36
2.2.6. Norma nacional para las características térmicas y ópticas de sistemas vidriados para edificaciones	37
2.3. Esquema Tarifario de CFE	38

Capítulo 3. MODELACIÓN DEL TECHO VENTILADO	41
3.1. Herramienta de software para simulación en edificios.....	41
3.1.1. Software de diseño CAD SketchUp.....	41
3.1.2. Software libre OpenStudio	42
3.1.3. Motor de cálculo Energy Plus.....	42
3.2. Edificación bajo estudio	43
3.2.1. Características de la región de clima tropical.....	43
3.2.2. Descripción de la vivienda.....	44
3.3. Metodología computacional	46
3.3.1. Instrumentación y adquisición de datos	49
3.3.2. Simulación computacional.....	51
3.3.3. Validación del modelo	62
3.3.4. Modelación de techos ventilados	63
Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
4.1. Variables meteorológicas y datos experimentales de la zona de estudio	68
4.2. Validación del modelo con los datos experimentales	70
4.3. Simulación térmica del uso de techo ventilado.	74
4.3.1. Techo ventilado implementando láminas de zinc.....	75
4.3.2. Techo ventilado implementando láminas Ultralam.	78
4.4. Consumo de energía para climatización del recinto	81
4.5. Análisis económico	84
Conclusiones.....	88
Referencias	90

Índice de Figuras

Figura 1. Emisiones de CO ₂ a nivel mundial (Gráfico realizado con información de IEA, 2018)	7
Figura 1. 1. Clasificación de las técnicas de enfriamiento pasivo (Bhamare et al., 2019) .	12
Figura 1. 2. Clasificación de técnicas pasivas de enfriamiento en techos (Realizada con información de Nahar et al., 2014)	14
Figura 1. 3. Técnica de blocks huecos (del Coz Díaz et al., 2009).....	15
Figura 1. 4. Comportamiento del techo con material reflectivo (Najim & Fadhil, 2015).	16
Figura 1. 5. Aislamiento térmico en techos: a) Espuma de Polietileno; b) Lana de vidrio; c) Poliuretano expandido (EPS); d) Poliuretano Expandido.	18
Figura 1. 6. Componentes del techo verde.....	19
Figura 1. 7. Configuraciones de techos con estanque (Spanaki, Tsoutsos, & Kolokotsa, 2011)	21
Figura 1. 8. Diseño del techo ventilado (Lai, Huang, & Chiou, 2008)	23
Figura 1. 9. Esquema de la chimenea solar	25
Figura 1. 10. Retorno de inversión de sistemas pasivos en techos (Realizada con información Abuseif & Gou, 2018).....	28
Figura 2. 1. Clasificación de los países según la normativa aplicada en materia de energía en edificaciones (International Energy Agency, 2019a).	31
Figura 2. 2. Retos a los que se enfrenta actualmente la producción de energía (Tejera Oliver, 2013).....	32
Figura 3.1. Imagen satelital de Mérida Yucatán, México	43
Figura 3. 2. Vista aérea de la zona de estudio "Ciudad Caucel".	44
Figura 3. 3. Ubicación de la vivienda de estudio	45
Figura 3. 4. Interior de la vivienda de estudio.	46
Figura 3. 5. Metodología de trabajo para simulación de techos ventilados en casas de interés social.	48
Figura 3. 6. Instrumentación de las zonas de estudio mediante el Datalogger HOBO U12-012.	49

Figura 3. 7. Diagrama del monitoreo, registro y procesamiento de las variables meteorológicas.....	50
Figura 3. 8. Metodología computacional simplificada del modelo de predicción de temperatura interna en casa-habitación de interés social.	51
Figura 3.9. a) Añadir localización del sitio de estudio; b) Creación del plano de la zona de estudio.....	52
Figura 3. 10. Plano 2D de la vivienda de estudio.	52
Figura 3. 11. Captura de imagen de la interfaz SketchUp con las particiones interiores...	53
Figura 3. 12. Captura del menú del Inspector de OpenStudio integrado en el software SketchUp.....	54
Figura 3. 13. a) Creación del material en OpenStudio; b) Creación de los elementos de la envolvente de la vivienda de estudio.....	56
Figura 3. 14. Captura de OpenStudio especificando las construcciones creadas y asignadas a cada superficie.	57
Figura 3. 15. Diagrama esquemático que presenta los procesos de transferencia de calor en el techo ventilado.	64
Figura 3. 16. Comportamiento de la temperatura de la cara externa de la edificación (Elaboración propia).....	66
Figura 3. 17. Diagrama de flujo de la metodología de implementación de techos ventilados.	67
Figura 4. 1. Contraste de temperatura ambiente respecto: a) Temperatura interna en el cuarto secundario; b) Temperatura interna en el comedor; c) Temperatura interna en el cuarto principal; d) Temperatura interna en el cuarto principal en un periodo de 2 semanas.....	70
Figura 4. 2. Comparativa de la temperatura experimental vs simulada.....	72
Figura 4. 3. Comparativa de la humedad relativa experimental vs simulada.....	73
Figura 4. 4. a) Comparativa de la temperatura simulada respecto a la experimental del comedor de la zona de estudio; b) Comparativa de la temperatura simulada respecto a la experimental del cuarto de la zona de estudio.	74

Figura 4. 5. Contraste de la temperatura interna al utilizar el techo ventilado (Zinc) a distintas alturas.	76
Figura 4. 6. Comportamiento de la temperatura interna del cuarto mensual comparando el uso del techo ventilado de lámina de Zinc a diferentes alturas.	78
Figura 4. 7. Contraste de la temperatura interna al utilizar el techo ventilado (Ultralam) a distintas alturas.	79
Figura 4. 8. Comportamiento de la temperatura interna del cuarto mensual comparando el uso del techo ventilado de lámina de Zinc a diferentes alturas.	81
Figura 4. 9. Energía necesaria mensual para: a) La obtención del confort térmico 27 °C; b) La obtención de 22 °C en el interior del cuarto.	83

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Impacto de diferentes sistemas pasivos en techos bajo diversas condiciones climáticas (P: Positivo; N: Negativo; E: Equitativo) (Abuseif & Gou, 2018)	26
Tabla 1.2. Comparación entre los diferentes tipos de sistemas pasivos en techos, porcentaje de reducción de flujo de calor, reducción de temperatura; N/D: No disponible (Abuseif & Gou, 2018)	27
Tabla 2. 1. Evaluación del mercado para componentes de envolventes de edificios (International Energy Agency, 2013)	30
Tabla 2. 2. Esquema tarifario de la CFE (Datos correspondientes al mes de abril CFE, 2020)	38
Tabla 2. 3. Clasificación de la Tarifa doméstica según CFE	39
Tabla 2. 4. Costo de la energía en tarifa 1D (Datos correspondientes al mes de abril CFE, 2020)	40
Tabla 3. 1. Características de medición de la estación Vantage Pro2.	50
Tabla 3. 2. Disposición de espacios de la zona de estudio.....	53
Tabla 3. 3. Materiales implementados en la construcción de casas de interés social (SENER, 2011b)	55
Tabla 3. 4. Parámetros de validación de modelos energéticos con base en normativa internacional	63
Tabla 4. 1. Parámetros de validación del modelo realizado bajo la normativa internacional	71
Tabla 4. 2. Características de lámina de zinc.....	75
Tabla 4. 3. Temperatura interna del cuarto con techo ventilado de zinc	77
Tabla 4. 4. Características de lámina Ultralam.....	78
Tabla 4. 5. Temperatura interna del cuarto con techo ventilado de lámina ultralam	80
Tabla 4. 6. Costo de la energía requerida para climatización del cuarto para lograr disminuir la temperatura del cuarto a 27 °C y 22 °C.....	84
Tabla 4. 7. Parámetros económicos considerados para el estudio de factibilidad del sistema pasivo basado en el mercado mexicano.	86

Tabla 4. 8. Relación Costo - Beneficio al implementar el techo ventilado en los dos materiales bajo los dos escenarios de refrigeración de espacios (27 °C y 22 °C). 87

Nomenclatura

CTF: Función de transferencia de conducción

PT: Puente térmico (W/mK)

q''_{asol} : Flujo de radiación solar, (W/m²)

q''_{LWR} : Intercambio neto de flujo de radiación de onda larga con el aire y alrededores (W/m²)

q''_{conv} : Flujo de intercambio convectivo con aire exterior (W/m²)

q''_{ko} : Flujo conductivo (W/m²)

q''_{LWX} : Intercambio neto de flujo radiante de onda larga entre superficies (W/m²)

q''_{SW} : Flujo neto de radiación de onda corta a la superficie proveniente de iluminación (W/m²)

q''_{LWS} : Flujo de radiación de onda larga proveniente de equipos (W/m²)

q''_{ki} : Flujo de conducción a través de la pared (W/m²)

q''_{sol} : Transmisión de flujo radiativo solar absorbido en la superficie (W/m²)

q''_{conv} : Flujo de calor convectivo por zona (W/m²)

X_j : CTF exterior de la superficie

Y_j : CTF a través de superficies

Z_j : CTF en el interior de la superficie

Φ_j : Flujo de la mecánica de fluidos computacional (CTF)

θ : Tiempo

δ : Lapso de tiempo

T_{si} : Temperatura de la cara interna ($^{\circ}\text{C}$)

T_{so} : Temperatura de la cara externa ($^{\circ}\text{C}$)

T_o : Temperatura del aire en el exterior ($^{\circ}\text{C}$)

h_{co} : Coeficiente de convección exterior introducido mediante el uso de $q''_{conv} = h_{co}(T_o - T_{so})$

T_a : Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

T_T : Temperatura objetivo ($^{\circ}\text{C}$)

h_{co} : Coeficiente de convección interior introducido mediante el uso de $q''_{conv} = h_{ci}(T_a - T_{si})$

h_i : Conductancia superficial interior

e : Espesor de cada material que compone la envolvente

λ : Coeficiente de conductividad térmica de cada material

h_e : Conductancia superficial exterior

Introducción

El confort térmico se define como la satisfacción de las personas con el ambiente a su alrededor y se encuentra vinculado con la salud humana. La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) define que las temperaturas fuera del rango de 24 – 28 °C, afecta perjudicialmente la salud; produciendo desde fatiga, dolor de cabeza hasta deshidratación (American Society of Heating, 2010; ISO, 2005). Otro aspecto importante es la estrecha relación respecto al rendimiento laboral, un bajo confort térmico recae en la insatisfacción y pobre rendimiento en el trabajo, siendo la temperatura interna el principal aspecto a considerar. Por lo tanto, el discomfort térmico repercute en la vida diaria llegando a afectaciones a la salud de cada persona en el ambiente laboral ocasionando disminución en la productividad. Además, en las residencias este genera un aumento en el consumo energético por cuestiones de climatización de espacios. (Enescu, 2017; Guslisty, Malomuzh, & Fisenko, 2018).

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, ejemplificando en México se asigna el 40 % de generación eléctrica para enfriamiento y obtención del confort en espacios (IEA, 2017; Rodríguez et al., 2018). Esto se debe a que el clima tropical se caracteriza por una alta temperatura y humedad relativa. Aunado 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 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, el 21 de abril de 1972 se crea el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), con el propósito de dar soluciones financieras a los derechohabientes, proporcionando acceso a una vivienda adecuada (INFONAVIT, 2020a). La Asociación Hipotecaria Mexicana (AHM) que se conforma por el INFONAVIT, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales para los Trabajadores del Estado (FOVISSSTE), entre otros, clasifican las edificaciones habitacionales como económica, popular y tradicional mismas que forma parte del ramo conocido como de “interés social”, seguido de vivienda media, residencial y residencial plus. De estas, las 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 m² 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. Lo anterior fomenta el presente estudio, el cual pretende simular y comparar el comportamiento térmico en casas de interés social mediante la implementación de techos ventilados y con ello la obtención del confort térmico.

El presente trabajo de tesis se encuentra integrado por un total de cuatro capítulos los cuales son descritos de forma breve a continuación:

Capítulo 1.- SISTEMAS PASIVOS EN EL ACONDICIONAMIENTO DE ESPACIOS

Presenta el estado actual de las tecnologías pasivas para el acondicionamiento de espacios en edificaciones. Se describe en qué consiste cada sistema, la configuración que se presenta según la tecnología pasiva, así como la operación y beneficios de implementar cada una de ellas en diferentes condiciones climatológicas teniendo especial énfasis en el clima cálido subhúmedo.

Capítulo 2.- NORMATIVIDAD EN EDIFICACIONES

Realiza una descripción a nivel mundial de la normativa vigente en relación con la eficiencia energética. Se analizan el tipo de leyes que se tienen ya sea de índole parcial u obligatoria, así como el enfoque que presentan, desde la perspectiva de equipos eléctricos y

envolventes. De igual manera se abordan propuestas nacionales creadas con el propósito de incentivar la construcción eficiente considerando el ahorro energético y confort térmico.

Capítulo 3.- MODELACIÓN DEL TECHO VENTILADO

Describe la estrategia experimental y computacional propuesta, los elementos que la integran y los procedimientos para aplicarla. Contiene la explicación del desarrollo computacional del caso de estudio, la localización de interés, la clasificación de los componentes a tomar en consideración. Contempla los reglamentos internacionales que se deben cumplir en la validación de modelos computacionales al igual que la metodología en la aplicación del sistema pasivo en la edificación habitacional.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Presenta los resultados obtenidos tras la implementación de la metodología descrita en el capítulo 3. Valida el modelo computacional mediante la comparación de los datos experimentales respecto a los proporcionados por el software, a través de criterios especificados por normativa internacional. Se presenta el análisis de implementación de las diversas configuraciones de techos ventilados en la zona de estudio con el propósito de obtener el diseño óptimo a lo largo del año. Finalmente, presenta un análisis del desempeño energético del diseño óptimo para determinar la viabilidad económica y ambiental.

Antecedentes

En los últimos años, el diseño de edificaciones se está centrando en la gestión del confort térmico, enfocándose primordialmente en el comportamiento del flujo de aire. Dicho flujo depende de diversos factores, tales como, el número de ocupantes, la geometría del cuarto, el método de ventilación y diversos difusores (Taghinia, Rahman, & Siikonen, 2015). Debido a esto, la investigación se ha enfocado en la optimización de los diversos componentes en edificaciones, para alcanzar un rango de confort óptimo y lograr una disminución considerable en el consumo energético. De acuerdo a la Organización de Naciones Unidas (ONU) las zonas urbanas han incrementado en los últimos años y se prevé que para 2050 más del 70 % de la población mundial se encuentre alojada en ellas (Rupp, Vásquez, &

Lamberts, 2015). Lo anterior se ve representado en el consumo energético, se ha presentado un incremento del 3.15 % de consumo de energía eléctrica de 2005 a 2011, mientras que la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) estima un crecimiento del 56 % de consumo de energía hacia el 2020 (López-Pérez, Flores-Prieto, & Ríos-Rojas, 2019).

A nivel mundial el consumo energético de zonas residenciales representa cerca del 30 % del consumo total de energía (Prieto, Knaack, Auer, & Klein, 2018; Rupp et al., 2015). En Europa el consumo proveniente de dicho sector representa el 24.79 % de la energía eléctrica producida (Bienvenido-Huertas, Moyano, Rodríguez-Jiménez, & Marín, 2019). De lo anterior mencionado cerca del 50 % se implementa en equipos calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) para la climatización de espacios. Lo cual ha propiciado el desarrollo de estudios enfocados a conocer y estimar el desempeño térmico de los edificios, así como su consumo energético. Esto ha sido complementando con el surgimiento de herramientas de simulación como Design Builder y Energy Plus que han facilitado dicha tarea (Rahman & Smith, 2018).

En cuestión de diseño y métodos pasivos para la obtención del confort térmico, Al-Obaidi et al. (2014), observaron el comportamiento de las técnicas pasivas de enfriamiento en casas mediante la implementación de techos reflectivos y radiativos en climas tropicales. En este estudio se usaron techos con recubrimientos de diversos colores y analizaron la ganancia térmica interna. Se observó que la máxima disminución de temperatura se encuentra en el rango de 2 – 4 °C implementando recubrimiento frío. Hernández-Pérez et al. (2018), se enfocaron en el comportamiento térmico de los edificios al colocar materiales reflectivos. En este estudio su interés principal fue el techo debido a que es el componente con mayor ganancia de calor. Se obtuvo que mediante la implementación de dichos materiales se reduce la temperatura interna de 1 – 2 °C. Roslan et al. (2016), analizaron el comportamiento de techos ventilados en la zona de Malasia. Este diseño se ejecutó en techos inclinados; como resultado se tuvo que aplicando un ángulo de 10 ° respecto al techo y una apertura del 50 -100 % se logran disminuciones de temperatura en el rango de 6 – 10 °C. Ávila-Hernández et al. (2020), analizaron mediante celdas de prueba el comportamiento de los

techos verdes en clima húmedo, obteniendo disminuciones en la temperatura interna de 4.7 °C; reduciendo de esta manera las emisiones de CO₂ hasta en un 45 %. Específicamente para la ciudad de Mérida Ordoñez López & Pérez Sánchez (2015), compararon el uso de techos verdes respecto a materiales reflejantes, obteniendo un mejor comportamiento en la temperatura interna aplicando vegetación en el techo.

Desde la perspectiva de la simulación en el interior de edificaciones Ashtiani et al. (2014), se enfocó en la predicción de temperatura interna en edificios con el efecto de islas de calor urbano mediante redes neuronales y métodos de regresión. Los datos se recabaron mediante la estación meteorológica Pierre-Elliot en Montreal, Canadá. Se concluyó que las redes neuronales tienen una mejor aproximación debido a que se tiene una diferencia máxima de 2.27 °C respecto a los datos experimentales. Blanco et al. (2015), estudiaron la optimización energética en edificaciones mediante fachadas de doble capa a través del software Design Builder con el complemento de Energy Plus. Dicho estudio se llevó a cabo en España, las simulaciones se realizaron con tiempo de 24 horas en las cuales se modificó el grosor del material y la distancia entre perforaciones. Como resultado se presentó un 20 % de disminución energética respecto a la edificación sin modificaciones. Chi et al. (2017), se enfocaron en la simulación para la mejora del diseño de fachadas perforadas, con el propósito de una óptima incidencia solar y obtener una mejora en el rendimiento térmico a través del software DIVA-for-Grasshopper y Energy Plus, en Sevilla, España. Como resultado se logró un ahorro energético del 50 %. Xamán et al. (2020), estudiaron el desempeño de PCM en techos bajo las condiciones ambientales de Mérida, obteniendo con esta técnica una disminución de la carga térmica de un 57 %.

Justificación

En el 2018, con el propósito de satisfacer la demanda energética a nivel mundial, la emisión de CO₂ en el mundo fue de 33.3 Giga toneladas (Gt) producto del alto consumo de combustibles fósiles (Figura I). Lo cual corresponde a un incremento del 1.7 % respecto al 2017. De dicha generación el sector de edificaciones es responsable del 28 % de la generación de contaminantes (IEA, 2018a, 2019b).

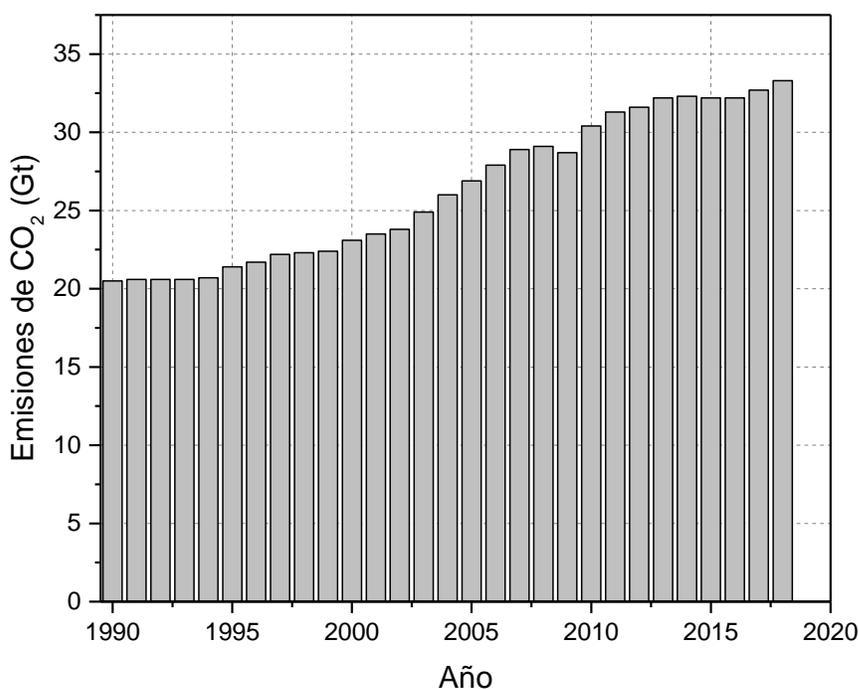


Figura 1. Emisiones de CO₂ a nivel mundial (Gráfico realizado con información de IEA, 2018)

En México al cerrar el 2017, la capacidad instalada para generación eléctrica fue de 75, 685 MW, 3 % mayor que lo registrado en 2016. Esto conllevó a una generación de energía eléctrica de 329, 162 GWh, donde el 78.9 % provino de tecnologías convencionales y el 21.1 % de tecnologías limpias (SENER, 2020). El comportamiento de consumo energético en el país obedece a la tendencia mundial con el sector de edificación como el tercer mayor consumidor de energía con el 17.6 % (SENER, 2018). Específicamente en el sector residencial, el uso de electricidad para confort térmico en zonas de clima cálido representa más del 30 % de todo el consumo eléctrico. En promedio, un usuario en región de clima cálido consume el doble de electricidad que uno en clima templado y se prevé que el uso de electricidad en aplicaciones relacionadas con el confort continúe con una tendencia creciente en los próximos años (CONUEE, 2018). Debido a esto, en México se tiene un creciente interés por mejorar la eficiencia energética de las edificaciones desde los equipos eléctricos y envolventes de los edificios; todo esto a través de diversas políticas.

La CONAVI tiene como propósito el diseño, promoción e instrumentación de nuevas políticas y normativas a nivel nacional, dedicadas a la búsqueda de parámetros adecuados

para el confort en las construcciones. En cuestión de normativas en el área de la construcción, específicamente materiales y aislantes térmicos se cuenta con dos normativas “NOM-018-ENER-2011 y NOM-020-ENER-2011”. Por un lado, la NOM-018-ENER-2011 tiene como propósito regular los productos o elementos termoaislantes para implementar en las edificaciones; mientras que, la NOM-020-ENER-2011 se encarga de analizar los componentes aplicados a las envolventes de la edificación (techo, muro, cimientos) de acuerdo con la ganancia de calor permitida para su utilización en la construcción de inmuebles. Sin embargo, el análisis solo considera el día tipo por lo cual no se tienen parámetros confiables de su comportamiento a lo largo del año. Esto nos proporciona un amplio campo de estudio en la búsqueda de métodos para la reducción de temperatura interna en las construcciones de manera pasiva y con ello lograr una disminución del consumo eléctrico en equipos de aire acondicionado.

En un enfoque regional, en la ciudad de Mérida Yucatán, en los últimos años se presenta un crecimiento constante en el sector privado, específicamente en complejos habitacionales. En el 2016 se tenían 30 proyectos inmobiliarios con más de 30, 000 unidades para consigna, y en el año 2019 se prevé una derrama económica superior a los 676, 377 millones de pesos, derivando en un incremento en la generación de energía para el abasto de dichos establecimientos (Desarrollos, 2019).

Basado en lo anterior, este trabajo de investigación propone una metodología computacional para la implementación de sistemas pasivos específicamente techos ventilados a viviendas de interés social bajo clima cálido subhúmedo, en la península de Yucatán. A través de una estructura computacional se pretende mejorar el diseño y operabilidad de estos sistemas para seleccionar las configuraciones apropiadas que garanticen la compensación energética y económica.

Hipótesis

La implementación de un techo ventilado reduce la temperatura interna en casas de interés social, disminuyendo el consumo energético en equipos de ventilación en la búsqueda de la sensación térmica adecuada para la ocupación habitacional.

Objetivo General

Evaluar la implementación de techos ventilados en casas de interés social en clima tropical mediante herramientas computacionales, con el propósito de disminuir la temperatura interna del recinto.

Objetivos específicos

- i) Comparar diversas configuraciones de techos ventilados en casas de interés social para la ciudad de Mérida.
- ii) Variar los componentes en el diseño de los techos ventilados.
- iii) Analizar la disminución del consumo energético al implementar techos ventilados.

Capítulo 1. SISTEMAS PASIVOS EN EL ACONDICIONAMIENTO DE ESPACIOS

Una parte importante de la energía del edificio se consume para proporcionar confort térmico a los ocupantes. Las técnicas de enfriamiento pasivo pueden ser una alternativa prometedora para satisfacer los requisitos de enfriamiento del edificio, así como para reducir el consumo de energía del edificio; diversos estudios demuestran que estos sistemas pueden reducir el consumo de energía en un 2.35 % (Khedari, Waewsak, Thepa, & Hirunlabh, 2000). La selección de la técnica de enfriamiento pasivo adecuada depende de muchos factores, incluidas las condiciones climáticas, las limitaciones de espacio del edificio y el rendimiento de la técnica pasiva. Para adoptar una técnica de enfriamiento pasivo adecuada para un edificio determinado, es necesario un conocimiento profundo de las diferentes técnicas junto con sus aplicaciones y parámetros de rendimiento (Bhamare, Rathod, & Banerjee, 2019).

La mayoría de las nuevas ciudades prefieren usar concreto, vidrio y metales brillantes. La mayoría de las demandas de energía de enfriamiento en los trópicos están directamente relacionadas con los materiales de construcción, particularmente el área de techo. Vijaykumar, Srinivasan, & Dhandapani (2007), indicaron que el sistema de techo representa el 90 % de la ganancia de calor total. Ejemplificando, Allen et al. (2008) investigaron los materiales del techo utilizados en viviendas: en casas adosadas (tejas de concreto 20 % y tejas de arcilla 2.5 %), en apartamentos con terraza (tejas de concreto 45 % y tejar de arcilla 2.5 %) y en bungalow (tejas de concreto 17.5 %, baldosas de arcilla 5 % y cubiertas de metal 5 %). Estos materiales permiten la alta transmisión de radiación solar que induce un efecto de sauna, lo que crea un ambiente incómodo.

1.1. Técnicas pasivas de acondicionamiento

Los principales componentes del consumo de energía en el sector de la construcción son calefacción, refrigeración, aire acondicionado y ventilación. También se argumenta que a nivel mundial alrededor del 40 % de la energía total consumida por edificaciones se enfoca

en aplicaciones de calefacción o refrigeración de espacios en los sectores residencial y comercial (Bhamare et al., 2019). Además, la demanda de aplicaciones de refrigeración espacial está aumentando debido al incremento de la temperatura atmosférica asociada con la emisión de carbono y calentamiento global (IEA, 2018b). Los aires acondicionados de habitaciones se utilizan principalmente en todo el mundo como aparatos de enfriamiento de aire. Sin embargo, un aumento en la venta de aparatos de aire acondicionado ha llevado a serios problemas ambientales asociados con el agotamiento del nivel de ozono y el clima global (IEA, 2020). Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar técnicas de enfriamiento que reduzcan el consumo de energía, apoyen el medio ambiente, el ecosistema y proporcionen un grado satisfactorio de confort. Así, para abordar el impacto energético y ambiental asociado con las aplicaciones de construcción, la selección de técnicas de enfriamiento adecuadas juega un papel vital.

Uno de los enfoques sostenibles para enfriar edificios por medios naturales es la estrategia de enfriamiento pasivo (Kamal, 2012). Esta estrategia implica un controlador que limita el efecto total de la ganancia de calor para proporcionar una temperatura interior más baja que la del entorno natural (Firfiris, Martzopoulou, & Kotsopoulos, 2019; Gupta & Tiwari, 2016). En general, el flujo de energía en un diseño pasivo se basa en medios naturales, como la radiación, la convección o la conducción (Kamal, 2012). Dichos sistemas se diseñan considerando tres niveles, es decir, protección de la ganancia de calor, modulación de la ganancia de calor y rechazo o disipación de la ganancia de calor (Bhamare et al., 2019; Santamouris & Kolokotsa, 2013).

Las estrategias de enfriamiento pasivo deben evitar el aumento de calor en el interior del edificio. Los parámetros que deben considerarse incluye el aislamiento de la envolvente, el sombreado de la fachada y propiedades de la superficie como el color de superficies externas (Al-Obaidi, Ismail, & Abdul Rahman, 2014a). Las ganancias de calor deben ser moduladas por un control solar efectivo que admita suficiente luz natural, mientras se garantiza la arquitectura y requisitos estructurales de la envolvente del edificio. Además, un nivel cómodo de carga de calor debe ser permitido modulando las temperaturas requeridas para los diferentes usos de los espacios internos durante la fase de diseño (Mumovic &

Santamouris, 2009). El calor en el interior del edificio debe reducirse en disipadores de calor (enfriamiento natural o híbrido) a través de la infiltración de aire, propiedades de superficie, como el color de las superficies internas y equipo eficiente de energía que puede reducir considerablemente las ganancias de calor interno (Al-Obaidi et al., 2014b; Mumovic & Santamouris, 2009). Los primeros dos enfoques reducen las ganancias de calor y la temperatura del aire dentro del edificio, mientras que, el tercer enfoque reduce la temperatura del aire interior (Al-Obaidi et al., 2014b). Estas condiciones pueden lograrse mediante disipadores de calor ambiental, que se dividen en cuatro tipos (Kamal, 2012):

- Aire ambiente, que transfiere el calor por convección.
- El cielo (atmósfera superior), que transfiere calor por radiación de onda larga a través de las superficies del edificio, como el techo.
- Agua, que transfiere el calor por evaporación al interior y/o fuera del edificio.
- Tierra (debajo de la superficie del suelo), que transfiere calor por conducción a través de la envolvente del edificio.

Estos métodos pasivos de enfriamiento, así como su clasificación se presentan en la Figura 1.1.

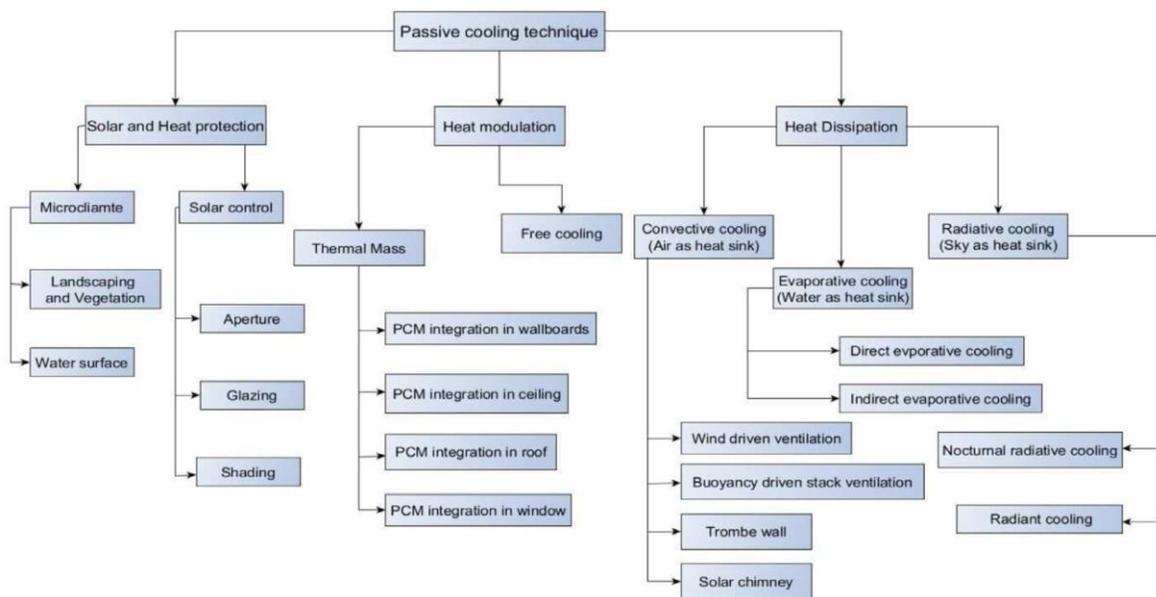


Figura 1. 1. Clasificación de las técnicas de enfriamiento pasivo (Bhamare et al., 2019)

Diversos factores tienen influencia en el ambiente térmico interno, y con ello, el consumo de energía en equipos de acondicionamiento; las condiciones climáticas, los materiales de construcción, el área de materiales opacos y transparentes, la orientación, etc. A pesar de que, todos los componentes de la envolvente del edificio están en contacto con el ambiente, el techo es el componente con la mayor fluctuación de temperatura. El impacto de la radiación solar en días soleados, la pérdida de calor en las noches y la lluvia, afectan en mayor medida al techo respecto a las demás envolventes. Como ya se mencionó anteriormente el techo contribuye con más del 50 % de la carga térmica del edificio en climas cálidos, por lo tanto, este componente juega un importante rol en el rendimiento térmico del edificio (Nahar, Sharma, & Purohit, 2003).

1.2. Métodos de enfriamiento pasivo para techos

Una manera de reducir la influencia del techo en la ganancia de calor es la implementación de medidas pasivas. De acuerdo a investigaciones realizadas (Dincer, Ozgur, Kizilkan, & Akif Ezan, 2015), los sistemas de enfriamiento pasivos se pueden clasificar en métodos arquitectónicos o métodos no arquitectónicos como se aprecia en la Figura 1.2. Los métodos arquitectónicos están relacionados en la configuración de la geometría del techo que contribuyen a la reducción de la ganancia de calor. Esta técnica se aplica en la etapa de la construcción del edificio. Por otro lado, los métodos no arquitectónicos se pueden utilizar independientemente la geometría del techo. Estos métodos pasivos actualmente están adquiriendo importancia debido a que se pueden implementar en edificios existentes; las barreras de transmisión son materiales que prevén el flujo del calor de techo al interior debido a su baja conductividad.

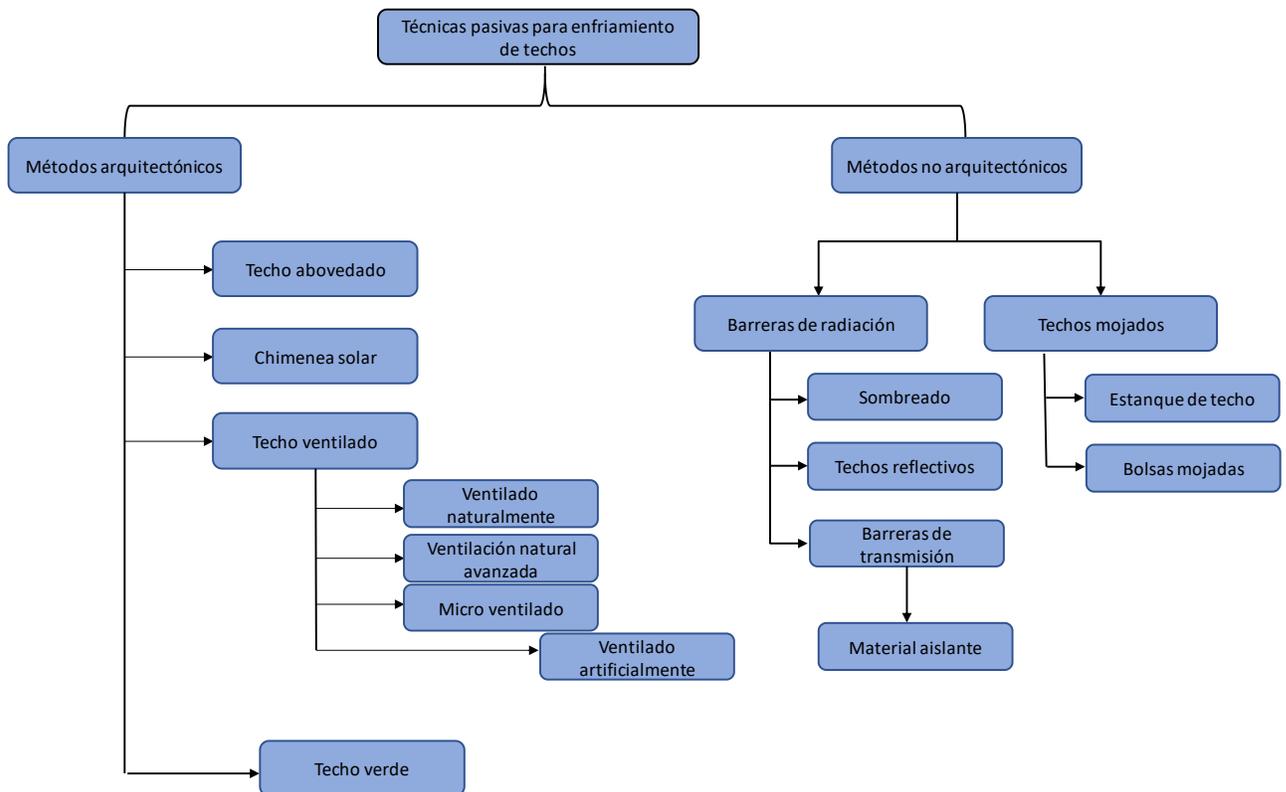


Figura 1. 2. Clasificación de técnicas pasivas de enfriamiento en techos (Realizada con información de Nahar et al., 2014)

Basados en las técnicas de enfriamiento en los techos, se identifican las de mejor comportamiento. Estos métodos son: techos de concreto modificado, techos con material reflejante, techos con material aislante, techos verdes, techos ventilados y techos con estanque. Cada una de estas tecnologías pasivas tiene sus ventajas, así como desventajas, así como la competencia entre ellas en su construcción, reducción del flujo de calor, costo, mantenimiento y comportamiento en diversos climas lo cual se explicará a continuación.

1.2.1. Techos de concreto modificado

Las losas de concreto son de los métodos de techado más común en el mundo. Existen diferentes métodos de realizar la estructura, sin embargo, la mayoría tiene una alta conductividad térmica absorbiendo el calor externo durante verano, mientras que tienen grandes pérdidas durante el invierno. Esto resulta que la ocupación de estos techos sea inestable térmicamente; debido a ello, diversas investigaciones se han enfocado en la

mejora de losas de concreto aplicando diferentes tratamientos a la estructura. En esta técnica se propone realizar modificaciones en las losas de concreto que conforman el techo, ya sea mediante el uso de block hueco o agregar componentes a la mezcla de concreto. La primera técnica (Figura 1.3) consiste en la creación de block con perforaciones en su interior, de esta manera se aligeran las cargas del edificio y se mejora el rendimiento térmico debido a que el aire que se encuentra relativamente estancado en su interior presenta una alta resistencia térmica, logrando una disminución en la conductividad térmica de un 13.65 % hasta 40.42 % (del Coz Díaz, García Nieto, Domínguez Hernández, & Suárez Sánchez, 2009; Shi et al., 2016). La segunda técnica consiste en agregar componentes de goma y/o plásticos en la mezcla de concreto que se aplica en el techo, logrando una reducción en la ganancia de calor en un rango de 10 – 19 % sin afectar el desempeño estructural (Najim & Fadhil, 2015; Yesilata, Isiker, & Turgut, 2009).

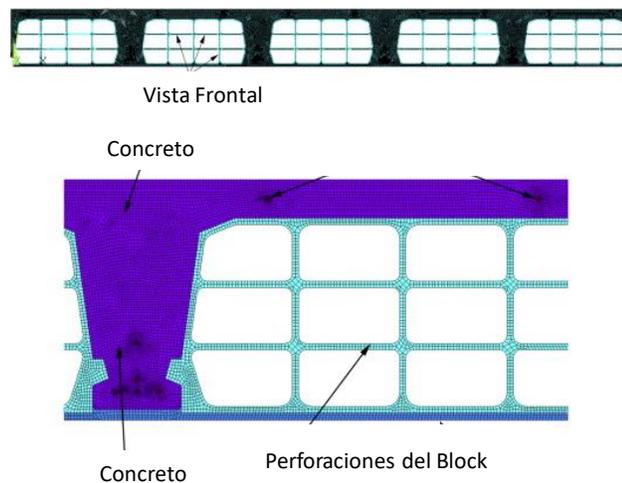


Figura 1. 3. Técnica de blocks huecos (del Coz Díaz et al., 2009)

1.2.2. Techos con materiales reflejantes

Los techos con material reflejante se diseñan para incrementar la reflexión de luz solar y absorber menos calor que un techo estándar. Esta clase de techos se encuentran recubiertos por un tipo especial de pintura, cubierta de lámina o tejas altamente reflectantes como se aprecia en la Figura 1.4. Casi cualquier tipo de edificio puede beneficiarse de un techo reflejante, pero se debe tener en consideración el clima y otros factores antes de su

instalación. La capa o revestimiento reflectante sobre el techo generalmente es de color blanco, ya que cuando los colores se vuelven más oscuros, la reflectancia disminuye y la temperatura superficial tiende a aumentar (Xamán et al., 2017). Este tratamiento se usa para el enfriamiento pasivo y funciona bien bajo climas cálidos, áridos y tropicales logrando una reducción de flujo de calor de hasta un 33 % (Zhang, Tong, & Yu, 2016). El retorno de inversión con esta técnica se presenta en un lapso de dos años.

Dentro de los beneficios que un techo reflejante presenta al edificio, ocupantes y al medio ambiente se tiene:

- Reducir las facturas de energía al disminuir las necesidades de aire acondicionado.
- Mejora de la comodidad interior para espacios que no tienen aire acondicionado, como garajes o patios cubiertos.
- Disminución de la temperatura del techo, lo que puede extender la vida útil del techo.
- Reducir la temperatura del aire local (UHI).
- Reducir las emisiones de las centrales eléctricas, incluidos el dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos nitrosos y el mercurio.

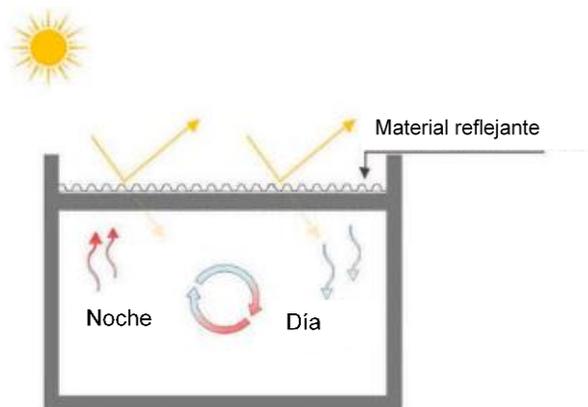


Figura 1. 4. Comportamiento del techo con material reflectivo (Najim & Fadhil, 2015).

1.2.3. Techos con materiales aislantes

El aislante térmico es el método más utilizado en los techos y en diversos países esta tecnología se considera obligatoria. El aislante térmico es un material con alta resistencia térmica convirtiéndose en una barrera para el paso del calor entre dos medios; es decir, se interpone entre el medio ambiente externo con el propósito de retrasar la mayor cantidad de tiempo que la temperatura interna tenga el mismo comportamiento del ambiente. El rasgo común de los materiales para aislar los techos es que todos se valen del aire como aislante térmico; por esta razón, se utilizan materiales porosos o fibrosos, que permiten inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior. Dentro de los materiales aislantes para techos se tienen: espuma de polietileno, lana de vidrio o fibra de vidrio, telgopor o poliestireno y poliuretano expandido o espuma de poliuretano, los cuales se exhiben en la Figura 1.5. Con esta tecnología se reportan disminuciones de hasta el 40 % en la energía requerida para climatización de espacios; así como reducciones de calor de 38 – 62 % (Daouas, Hassen, & Aissia, 2010; Pisello, Pignatta, Castaldo, & Cotana, 2014). Si la técnica de material aislante se integra con otras técnicas como ventilación o aplicar un material reflejante, se presentan mejoras en la eficiencia hasta del 88 % (Tong et al., 2014). En general la aplicación de esta técnica presenta un retorno de recuperación ambiental mucho menor que la recuperación económica; igualmente, el retorno económico varía respecto al material aplicado así como el grosor, encontrándose en un margen de 3 – 6 años (Akyüz, Altuntaş, & Söğüt, 2017; Daouas et al., 2010)

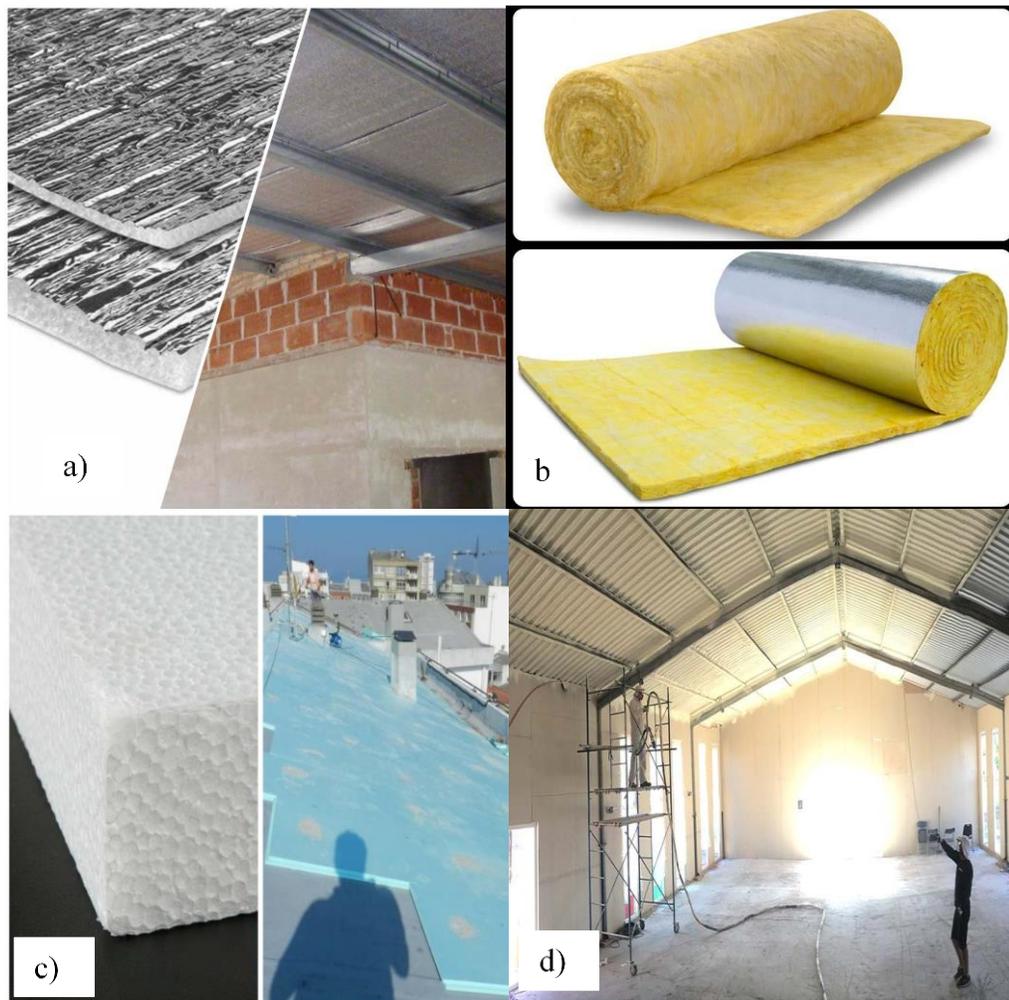


Figura 1. 5. Aislamiento térmico en techos: a) Espuma de Polietileno; b) Lana de vidrio; c) Poliestireno expandido (EPS); d) Poliuretano Expandido.

1.2.4. Techos verdes

Involucrar a la vegetación en los techos de los edificios proporciona diversos beneficios, desde un aislamiento adecuado, enfriamiento pasivo en verano y calefacción en invierno. De igual manera absorbe el CO₂ del entorno circundante, mejora la calidad del aire debido a la filtración de la vegetación y la producción de O₂. Otra de las ventajas es la mejora la gestión de aguas pluviales en el espacio, mitigación de islas de calor urbano y una mejora visual del paisaje (He & Zhu, 2018).

Estos techos se componen de diversas capas dependiendo del diseño, en orden descendente se pueden clasificar de la siguiente manera y se exhiben en la Figura 1.6:

- **Vegetación:** capa superior de todo techo verde, debe cumplir con los requisitos mínimos de supervivencia, y con ella no solo deben obtenerse beneficios estéticos, sino efectos físico-constructivos (aislamiento térmico, protección del calor en verano y protección acústica).
- **Sustrato:** esta capa ejerce como soporte de la vegetación, de igual manera, cumple el propósito de nutriente y almacenaje de agua.
- **Filtro:** tiene el propósito de impedir que, mediante la lluvia, el sustrato tienda a presentar infiltración a las capas inferiores.
- **Capa de drenaje:** su función es evitar los estancamientos excesivos de agua en el sustrato ocasionando deterioro en la vegetación.
- **Lámina anti-raíz:** el material usado de manera común es un tejido de polyester revestido con PVC, evita perforaciones de las raíces al elemento constructivo.
- **Impermeabilizante:** tiene como propósito lograr hermeticidad del techo desviando el agua hacia los conductos de drenaje.

Cómo se construye

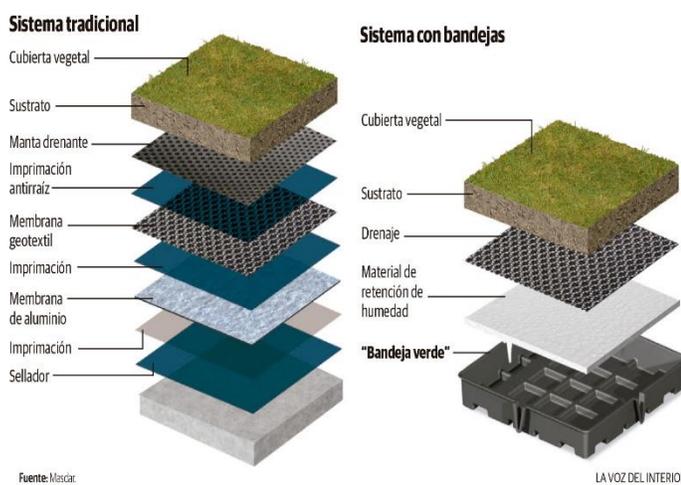


Figura 1. 6. Componentes del techo verde.

Esta tecnología en climas cálidos obtienen reducciones en el flujo de calor en un 31 – 37 % (D’Orazio, Di Perna, & Di Giuseppe, 2012; Yang et al., 2018). El efecto de enfriamiento pasivo disminuye cuando aumenta la temperatura, especialmente en climas áridos donde se ha reportado disminuciones en la conducción de calor del 24 % – 35 % (Mahmoud, Asif, Hassanain, Babsail, & Sanni-Anibire, 2017). El tiempo de recuperación de un jardín en el techo está relacionado con sus componentes, si se compone únicamente por vegetación, tierra y agua, la recuperación sería de unos 10 años (Chan & Chow, 2013); sin embargo, aumentaría si se plantara intensamente y se necesita una estructura y componentes especiales, alcanzando un retorno de inversión entre 25 – 57 años (Refahi & Talkhabi, 2015). El periodo de recuperación de la inversión en este método sería injusto compararlo únicamente desde la perspectiva del ahorro de energía, debido a que presenta diversos beneficios.

1.2.5. Techo con estanque

Esta técnica funciona mediante el proceso de utilizar la evaporación del agua para reducir la temperatura de la corriente de aire. El agua naturalmente tiende a absorber el calor del entorno y lo convierte en vapor, permitiendo que la temperatura del aire circundante disminuya (Rincón, Almaso, & González, 2001). Los estanques de techo proporcionan beneficios a través del enfriamiento evaporativo indirecto y/o enfriamiento radiante; en ambos procesos, el techo actúa como un elemento de intercambio de calor que se enfría por evaporación en su superficie, radiación de onda larga hacia el techo o ambos. Dado que el techo está acoplado térmicamente al estanque del techo, el espacio interior también se enfría por convección y radiación (Givoni, 2011). Las funciones térmicas de esta tecnología pueden variar según sus configuraciones y la hora del día en que se utiliza. A continuación, se presentan algunas configuraciones de estanque de techo, sin embargo, en la Figura 1.7 se exhiben todas las permutaciones de estanques de techo.

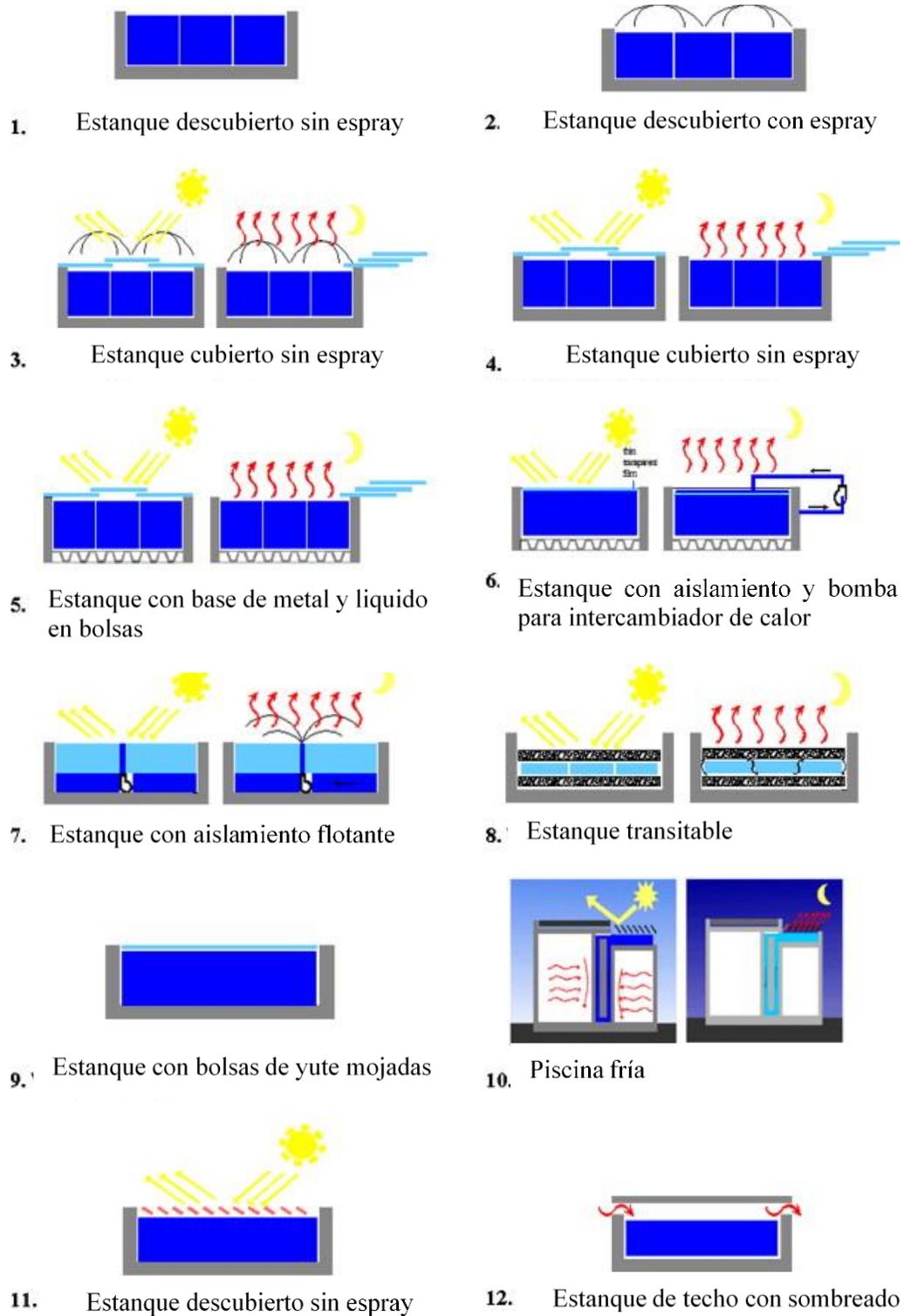


Figura 1. 7. Configuraciones de techos con estanque (Spanaki, Tsoutsos, & Kolokotsa, 2011)

1.2.6. Techos ventilados

El techo de doble capa o techo ventilado es una solución de enfriamiento pasivo para reducir la ganancia de calor en los edificios, generalmente aplicados a techos inclinados (Zingre, Wan, Wong, Toh, & Lee, 2015). Esta técnica consiste en dos techos sólidos (techo secundario en la parte superior y techo primario en la parte inferior) separados por un espacio de aire (abierto o cerrado); el techo secundario protege al techo primario de la radiación solar directa, y el espacio de aire actúa como una capa de aislamiento (Gratia & De Herde, 2004). El espacio entre los dos techos permite la ventilación de los techos mediante convección natural o forzada. La convección natural (efecto de la flotabilidad) se genera por la diferencia de temperaturas, mientras que la convección forzada es generada por el uso de ventiladores (Ciampi, Leccese, & Tuoni, 2005). La radiación solar calienta el techo secundario ocasionando un aumento en la temperatura del aire en el espacio, esto ocasiona que el fluido se vuelva más ligero creando un flujo ascendente; este flujo de aire produce efectos ventajosos porque reduce la acumulación de calor en la estructura, mientras que, reduce el flujo de calor transferido al techo. Por lo general, se procura que el techo secundario sea de un material con propiedades aislantes con el fin de limitar la transferencia de calor al techo principal, así mismo, actualmente se encuentra bajo investigación el uso de techos ventilados junto con la aplicación de otras técnicas pasivas como el de materiales reflejantes o PCM. Dentro de los tipos de techos ventilados se tiene el de ventilado naturalmente, el cual es el más común, sin embargo, al ser un fenómeno espontáneo no se puede controlar la velocidad de viento. El techo ventilado avanzado de igual manera implementa el flujo de aire del ambiente, sin embargo, se coloca en la parte superior del techo principal una pequeña cavidad con agua de tal manera que la corriente de aire adquiera un porcentaje de humedad aumentando la sensación de fresco. El ventilado mecánico emplea el uso de dos o más ventiladores forzando el flujo de viento; mientras que el techo micro ventilado divide el espacio de la edificación en diferentes áreas de tal manera que cada una tiene un flujo particular según sean los requerimientos.

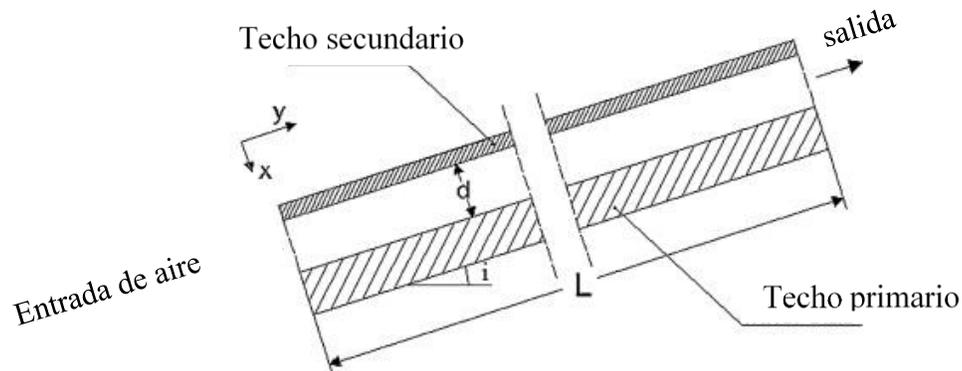


Figura 1. 8. Diseño del techo ventilado (Lai, Huang, & Chiou, 2008)

1.2.7. Chimenea solar

La chimenea solar es un sistema pasivo generador de movimiento de aire, siendo su motor principal la radiación solar. Fundamentalmente es una torre vertical hueca con una columna de aire fluyendo hacia el exterior por su extremo superior. Al estar adosada a una habitación mediante un hueco inferior, el aire interior de la habitación reemplaza al de la chimenea generando un movimiento de aire (Kamal, 2012). Esta técnica amplifica los fenómenos diferenciales de temperatura, densidad y presión, permitiendo el flujo y la velocidad de la columna de aire se incrementen proporcionalmente al diferencial de los gradientes. Para incrementar la temperatura del aire al interior de la chimenea se aplica el fenómeno del efecto invernadero, captar la máxima radiación solar posible a través de un acristalamiento en función de absorber esta energía en una superficie oscura. Posteriormente, este calor será transmitido al aire interior por efectos convectivos, aumentando gradualmente la temperatura a lo largo del tiro de la chimenea disminuyendo la densidad del aire ocasionando su desplazamiento a capas superiores. Dentro de los componentes de este sistema pasivo se explican a continuación y se aprecian en la Figura 1.9.

- Receptor: el siguiente componente es la superficie interna de la chimenea, que funciona como un receptor de la radiación solar, su función es absorber la mayor cantidad de radiación por lo que su característica principal es el color oscuro negro

mate, con un coeficiente de absorbencia de 0,9, es decir absorbe el 90% de la radiación solar transformándola en calor, y por efectos de la dirección del flujo de calor, de más caliente a más frío, se transmitirá hacia el interior del cerramiento por conducción. Por lo que este cerramiento se convertirá en un acumulador de energía térmica. La inercia de los cerramientos de la chimenea dependerá de las características de sus materiales y su composición, en este caso aplicará una masa muy pesada para obtener valores altos de retardo en la pérdida de energía; para incrementar el período de operación de la chimenea en horario nocturno cuando no existe la presencia de radiación solar.

- Aislamiento: la aplicación del aislamiento conforma una envolvente térmica, es decir, se utiliza en la parte externa de los cerramientos de la chimenea, cumpliendo dos funciones: por una parte es una barrera ofreciendo mayor resistencia al flujo de calor hacia el exterior, y de esta forma conservar la mayor cantidad de la energía en el interior de la chimenea, incrementando de esta forma su temperatura; y por otra parte esta misma resistencia evita que el flujo de calor se transmita hacia el edificio adyacente, el cuál proporcionará el servicio de ventilación.
- Tiro de la chimenea: el cuerpo principal de la chimenea se conoce como tiro o fuste, que está compuesto de las superficies receptoras y una superficie transparente que permite la transmisión de radiación al interior, sus características principales son: esbeltez estanqueidad y geometría rectangular. La esbeltez es la relación entre la altura total y el radio de la superficie equivalente de su planta. Es decir, a mayor esbeltez mayor será la diferencia de altura entre sus aberturas y más alta la diferencia de presiones. La máxima estanqueidad en la chimenea es necesaria para evitar infiltraciones y exfiltraciones que afecten su rendimiento de movimiento de aire. La geometría rectangular aumentará la superficie de transmisión y captación de radiación solar, al orientar los cerramientos más largos perpendiculares a la dirección de los rayos solares. El interior de la cámara de la chimenea no debe presentar obstrucciones que incidan en el flujo de la columna de aire.

- Salida y entrada de aire: la salida se encuentra en la parte superior de la chimenea y es por donde se exhalará el aire precalentado en el cuerpo de esta; la entrada de aire tiene como propósito reemplazar el aire que expulsará la chimenea.

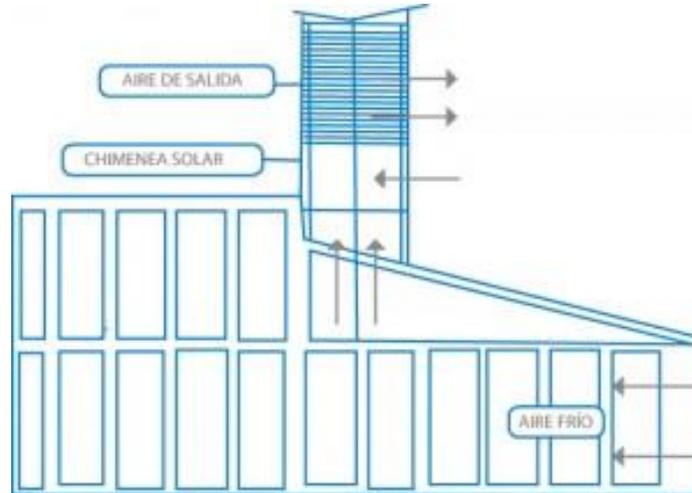


Figura 1. 9. Esquema de la chimenea solar

1.3. Viabilidad de los métodos de enfriamiento de techo

1.3.1. Idoneidad para diferentes tipos de clima

Las condiciones climáticas juegan un papel esencial en la selección del método de sistema pasivo, estas tecnologías deben adaptarse a las condiciones de la zona. La Tabla 1.1. resume la aplicabilidad de los sistemas pasivos en diferentes zonas climáticas. Se tiene que bajo condiciones de clima cálido, especialmente, climas tropicales, subtropicales y áridos, se debe priorizar el enfriamiento pasivo respecto al aislamiento (Sodha, Singh, & Kumar, 1985). En climas tropicales y áridos, el beneficio del enfriamiento pasivo es significativo; mientras que, el aislamiento del techo es más aplicable en climas fríos para mejorar la estabilidad térmica dentro de los edificios y reducir el consumo de energía en aplicaciones de calefacción. Akyuz et al. (2017) concluyó que la aplicación de aislamiento térmico en un techo puede disminuir la pérdida de calor hasta en un 56 % en clima mediterráneo; los climas mediterráneos y templados tienen necesidades cambiantes de enfriamiento y

calefacción por su clima fluctuante. Los climas polares presentan días fríos durante todo el año, por lo cual el aislamiento es la solución óptima.

Tabla 1.1. Impacto de diferentes sistemas pasivos en techos bajo diversas condiciones climáticas (P: Positivo; N: Negativo; E: Equitativo) (Abuseif & Gou, 2018)

Métodos de tecnología en techos	Árido	Mediterráneo	Montañas	Polar	Templado	Tropical
Techos de concreto	N	N	N	N	N	N
Techos con material reflejante	P	E	N	N	N	P
Techos con material aislante	E	P	P	P	P	E
Techo verde	P	P	N	E	E	P
Techos ventilados	P	P	N	N	N	P
Techos con PV	P	P	N	N	N	P
Chimenea solar	P	P	N	N	N	P

1.3.2. Impacto y reducción de ganancia de calor

Los métodos explicados anteriormente difieren en su rendimiento y capacidad de reducción de ganancia de calor, lo cual tiene un impacto directo en las cargas de enfriamiento dentro de los edificios. La reducción de flujo de calor de los techos tiene el mismo valor de reducción de energía para el enfriamiento de espacios. Algunos de los métodos presentados exceden el beneficio de simplemente reducir el flujo de calor, y brindan una adaptación completa para espacios internos sin utilizar equipos mecánicos. En la Tabla 1.2 se presenta el comportamiento de todos los sistemas pasivos, así como el comportamiento de dos sistemas pasivos integrados.

Tabla 1.2. Comparación entre los diferentes tipos de sistemas pasivos en techos, porcentaje de reducción de flujo de calor, reducción de temperatura; N/D: No disponible (Abuseif & Gou, 2018)

Métodos de sistema pasivo	Reducción en la ganancia de calor %	Reducción en la temperatura bajo el techo (°C)	Clima
Techo con tragaluz	N/D	20	-
Estanque de techo ventilado	N/D	16	Árido
Estanque de techo fresco	N/D	11	Tropical
Techo aislado adjunto con material reflejante	88	N/D	Laboratorio
Techo ventilado adjunto con material reflejante	85	N/D	Tropical
Techo aislado con ventilación	84	N/D	Tropical
Techos verdes	37	N/D	Tropical
Techos verdes con ventilación	79	N/D	3 diferentes climas cálidos
Techo con aislante	75	N/D	Tropical
Techo ventilado	71	N/D	Tropical
Techos con paneles fotovoltaicos	63	N/D	Clima mediterráneo y verano caluroso
Bloques huecos	40	N/D	Clima cálido
Concreto con PCM	40	N/D	Árido
Concreto con plástico y goma	19	N/D	Laboratorio

1.3.3. Retorno de inversión

Se tiene poca información respecto al tiempo de retorno de los sistemas pasivos mencionados anteriormente. De la investigación realizada, algunas técnicas diferían en los períodos de recuperación debido a los materiales utilizados, el tipo y tamaño del proyecto, la ubicación y por último el clima. En la Figura 1.9. se exhibe el período de recuperación económica promedio de cada tecnología; esta recuperación se refiere al beneficio o ahorro

económico que se presenta al implementar los sistemas pasivos. De igual manera, es importante señalar que los estudios que se tienen actualmente en techos ventilados no consideran el retorno de inversión, sin embargo, se prevé que dependa del material, costo de mantenimiento y tipo de clima.

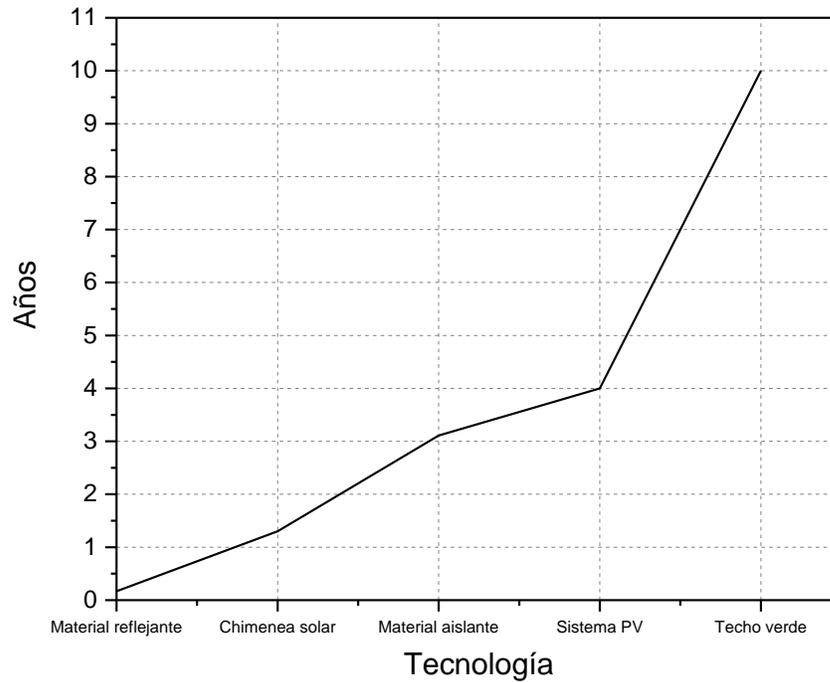


Figura 1. 10. Retorno de inversión de sistemas pasivos en techos (Realizada con información Abuseif & Gou, 2018)

Capítulo 2. NORMATIVIDAD EN EDIFICACIONES

La normativa en edificaciones tiene como propósito establecer estándares en los materiales de construcción, así como en equipos electrónicos con el fin de disminuir el consumo energético. Esto es debido a que desde el año 2000 el espacio destinado a la construcción de edificaciones en todo el mundo ha incrementado aproximadamente en un 65 %, llegando hasta los 240, 000, millones de m² en 2018. Sin embargo, el promedio de energía consumida por m² solo ha disminuido en un 20 % (IEA, 2019a). Este consumo excesivo es generado por diversos factores, siendo el elemento central la envolvente de la edificación, es decir, el diseño y los materiales. Una construcción bien diseñada en orientación y con elementos de envolvente adecuados puede tener mucho menores ganancias de calor y, por lo mismo, facturaciones eléctricas significativamente menores a lo largo de la vida útil del edificio.

Sin embargo, el mercado de materiales térmicamente adaptados para su implementación en la envolvente no se encuentra en completo desarrollo en diversos países. Los costos de estos materiales son caros para su obtención en países desarrollados y, a menudo, no están disponibles en los mercados emergentes. En la Tabla 2.1 se presenta el estado del mercado en diversos países clasificados como mercado maduro (más del 50 %), mercado establecido (aproximadamente del 5 – 50 %) y presencia inicial en el mercado (disponible menos del 5 %). Dicha evaluación realizada por la IEA muestra claramente que Canadá, la Unión Europea y Estados Unidos han hecho el mayor progreso en el despliegue de envolventes de edificios para lograr la eficiencia energética (IEA, 2013). Esta problemática del mercado de materiales se debe a que los países no tienen sus códigos de manera obligatoria. Durante el año 2018, solo 69 países tenían un código de energía en la construcción obligatorio o voluntario, mientras que alrededor de 85 países tenían certificaciones de energía; de las cuales 36 países incluyen políticas de certificación obligatorias y 20 países su certificación es de carácter voluntario (IEA, 2019a), tal como se aprecia en la Figura 2.1.

Tabla 2. 1. Evaluación del mercado para componentes de envoltentes de edificios (International Energy Agency, 2013)

Madurez del mercado/ saturación	Asia	Brasil	China	Unión Europea	India	Japón/ Corea	México	Australia/ Nueva Zelanda	Rusia	Sudáfrica	Estados Unidos/ Canadá
Vidrio de baja emisividad con doble acristalamiento	●	▲	▲	★	▲	●	●	●	●	●	★
Películas para ventana	▲	▲	▲	●	▲	●	▲	●	▲	▲	●
Fijación de ventanas (ej. Persianas o piezas de sombra)	●	▲	●	★	▲	●	▲	●	▲	●	●
Ventana altamente aislada	✘	▲	▲	✘	✘	▲	●	▲	▲	▲	▲
Aislamiento típico	★	●	★	★	●	★	●	★	★	●	★
Aislamiento exterior	●	▲	●	★	●	●	▲	✘	▲	▲	★
Aislante avanzado (ej. Aerogel)	✘	✘	✘	▲	✘	▲	✘	✘	▲	▲	▲
Sellado de aire	●	▲	▲	★	▲	●	✘	▲	▲	✘	●
Techos fríos	▲	▲	▲	●	▲	▲	▲	▲	✘	✘	★
BIVP/ techos avanzados	▲	▲	✘	▲	▲	▲	✘	▲	▲	▲	▲
	★ Mercado maduro	● Mercado establecido	▲ Mercado Inicial	✘ No existe							

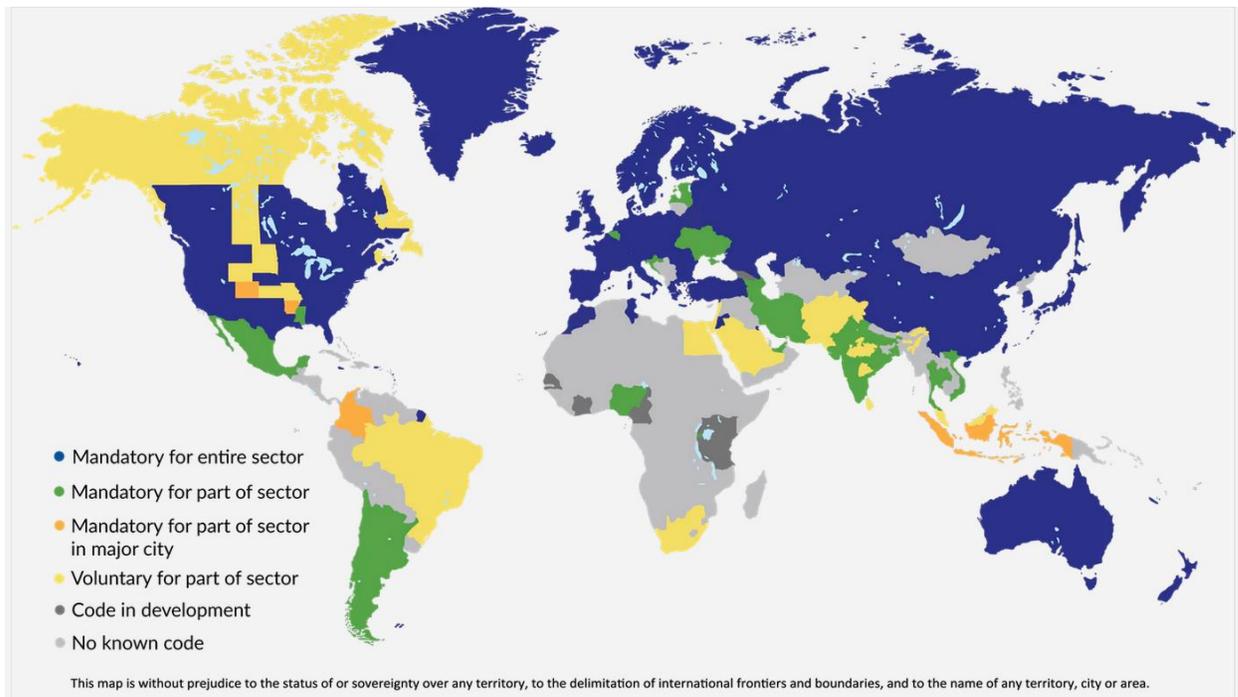


Figura 2. 1. Clasificación de los países según la normativa aplicada en materia de energía en edificaciones (International Energy Agency, 2019a).

2.1. Normativa Internacional

En el escenario actual, el ámbito energético se enfrenta a tres grandes retos: la competitividad directamente relacionada con la disminución de la intensidad energética (lo que se denomina el desacoplamiento del aumento del consumo energético con el desarrollo económico), el cambio climático y la seguridad del suministro (Figura 2.2). En cualquiera de las soluciones estudiadas para resolver estos desafíos, se encuentra la eficiencia y el ahorro energético por ser la más inmediata y barata de aplicar. Además, esta aporta reducciones de costes y ahorro en recursos que redundan en un aumento de competitividad y mejoran la seguridad energética. Ahora bien, la eficiencia energética se ha convertido en un pilar de los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los ODS reconocen la importancia transversal de edificios y ciudades en el logro de los objetivos globales relacionados con la energía y las infraestructuras sostenibles. Unos mejores edificios también pueden hacer contribuciones significativas a la lucha contra el cambio climático. En reconocimiento del importante papel que debe desempeñar para garantizar

que los países cumplen con sus obligaciones en reducción de emisiones, la Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP21, 2020) celebrada en París dedicó un espacio únicamente al sector de construcción. Dicho evento concluyó con el lanzamiento de la Alianza Global para Edificios y Construcción, y se establecieron normativas con el objetivo de lograr la eficiencia energética en edificios y disminuir las emisiones de CO₂, a continuación, se presentan algunas normativas internacionales.

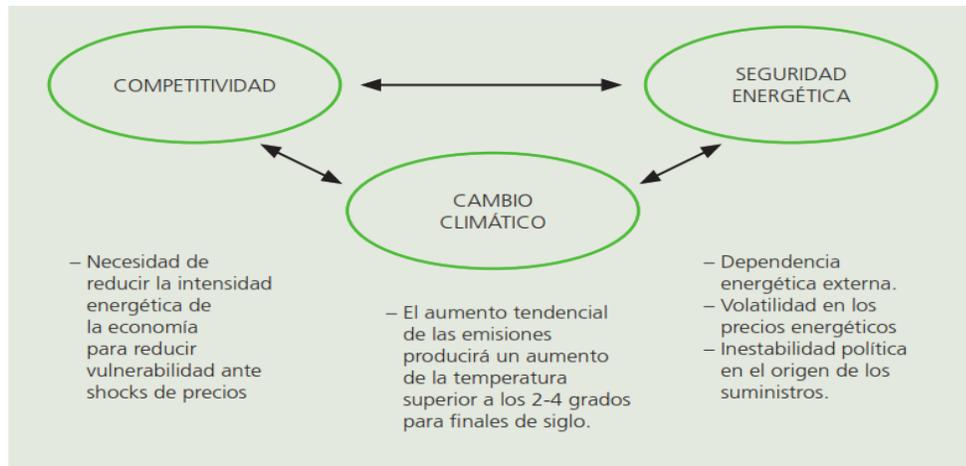


Figura 2. 2. Retos a los que se enfrenta actualmente la producción de energía (Tejera Oliver, 2013).

2.1.1. Estándar para el Aislamiento térmico para espacios de techos ventilados

La ISO 8144 – 1:1995, especifica las propiedades y tolerancias aceptables para el aislamiento térmico de lana mineral en su aplicación dentro de espacios de techos ventilados de edificios donde la ventilación esencial del espacio del techo puede verse restringida si el grosor es excesivo. De igual manera esta norma establece las propiedades que debe declarar el fabricante en el momento de la entrega, así como algunos métodos de prueba para la determinación de dichas propiedades (ISO, 1995).

2.1.2. Estándar para el diseño del entorno del edificio: Diseño, dimensionamiento, instalación y control de sistemas integrados de refrigeración y calefacción

La ISO 11855 – 1:2012, se enfoca en el diseño del entorno del edificio, diseño, dimensionamiento, instalación y control de sistemas de calefacción y refrigeración integrados. Especifica los criterios de confort que deben considerarse al diseñar sistemas integrados de calefacción y refrigeración implementando energía renovable radiante para satisfacer la comodidad térmica de los ocupantes. Presenta métodos de cálculo para el dimensionamiento de dichos sistemas, por último, presenta un método de control adecuado de los sistemas para garantizar el máximo rendimiento (ISO, 2012a).

2.1.3. Estándar para el cálculo de la transmitancia térmica de fachadas ligeras (muros cortinas o fachada ligera)

La ISO 12631:2012, especifica un procedimiento para calcular la transmitancia térmica de la estructura de los muros cortina o fachada ligera. Los muros cortina a menudo contienen diferentes tipos de materiales, unidos de diversas maneras y pueden exhibir numerosas variaciones de forma geométrica. Mediante esta directriz se presenta una metodología para obtener la transmitancia térmica de dicho componente con el propósito de añadir este valor a la entrada de calor del edificio; esta norma se publicó en el año 2012, presentando una actualización en el 2017 (ISO, 2012b).

2.1.4. Estándar para la evaluación global de la eficiencia energética de los edificios

La ISO 52000 – 1:2017, tiene como propósito acelerar la eficiencia energética en el mercado de la construcción en el mundo. Desde la calefacción, la refrigeración, la ventilación y los controles inteligentes hasta los aparatos que utilizan o producen energía. Esta normativa presenta un método integral para evaluar el rendimiento energético como la energía primaria total utilizada para calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y agua caliente sanitaria de los edificios; esto con el propósito, de acelerar el progreso en la construcción

de eficiencia energética utilizando nuevos materiales, tecnología y enfoques para el diseño, construcción y gestión de edificios (ISO, 2020).

2.1.5. Estándar para la sostenibilidad en edificios y obras de ingeniería civil

La ISO 21930:2017, se compone de normas básicas para declaraciones ambientales de productos de construcción y servicios, ayudará a evaluar si un edificio o proyecto de infraestructura es amigable con el medio ambiente utilizando un método común para expresar la declaración de producto ambiental (EPD). Esta normativa permite una declaración transparente del impacto en el ciclo de vida de la construcción (incorporando la producción, construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento de la materia prima); por lo tanto, sirve como una herramienta de “construcción ecológica” utilizando un proceso de evaluación que permite que todos los materiales y productos compitan en igualdad de condiciones. Permite uniformidad y consistencia en la forma en que se hacen declaraciones de productos ambientales para los productos y servicios de construcción (ISO, 2017b).

2.1.6. Estándar para el comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas

La ISO 10077 – 1:2020, se publicó en el año 2017 y se actualizó en febrero del 2020. En ella se especifican los métodos de cálculo de la transmitancia térmica de ventanas y puertas peatonales por acristalamiento formadas por acristalamiento y/o paneles opacos montados en un marco, con o sin persianas. Se consideran los diferentes tipos de acristalamiento, paneles opacos y diversos tipos de marcos con el fin de calcular la transmitancia térmica de dichos componentes (ISO, 2017a).

2.2. Normativa de eficiencia energética en México

A nivel nacional, en México el código de energía para las edificaciones establece requisitos mínimos de eficiencia energética integrando las normas obligatorias conocidas como Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) y las normas voluntarias, conocidas como Normas

Mexicanas (NMXs). La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), es responsable del desarrollo de estas normas de eficiencia energética para aparatos y sistemas, así como el monitoreo de su cumplimiento (SENER, 2017). La creación de una norma se desarrolla a petición de los fabricantes, consumidores o por el gobierno; posteriormente, la CONUEE a través de su Comité Consultivo para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) evalúa la factibilidad de la norma. Con este procedimiento la CONUEE ha creado diversas normativas en eficiencia energética, específicamente 6 normas obligatorias, las cuales se presentarán a continuación (SENER, 2017).

2.2.1. Norma nacional para la eficiencia energética en edificaciones no residenciales

La NOM – 008 – ENER – 2001 (1989), tiene como propósito el óptimo diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico, limitando la ganancia de calor de las edificaciones no residenciales a través, de la envolvente a todas las edificaciones nuevas y ampliaciones de edificios existentes.

2.2.2. Norma nacional para la eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales

La NOM – 007 – ENER – 2014 (2014), tiene como finalidad establecer niveles de eficiencia energética en términos de densidad de potencia eléctrica para alumbrado. Esta normativa se aplica en edificios no residenciales nuevos, ampliaciones y modificaciones con carga total conectada mayor o igual a 3kW. Esto con el fin de disminuir el consumo de energía eléctrica y contribuir a la preservación de recursos energéticos. Dicha norma se puso en vigor por primera vez en el año 1996, siendo actualizada por primera vez en el 2005, mientras que la última actualización entro en vigor el 5 de diciembre de 2014.

2.2.3. Norma nacional para los sistemas de aislamiento térmico en la industria

La NOM – 009 – ENER – 2014 (2014), establece la eficiencia energética de los sistemas de aislamientos térmicos industriales, de manera que el consumo de energía sea el óptimo aprovechable para los procesos productivos, durante todo el tiempo de vida de la instalación industrial; considerando, que los aislantes térmicos no presenten peligro a la salud, incrementen los riesgos en las instalaciones y no sean clasificados como residuos peligrosos. Dicha norma establece criterios y metodologías para cuantificar las pérdidas de energía en los sistemas aislantes, propiedades que deben poseer, criterios que deben incluir los fabricantes en los productos, al igual que, criterios a cumplir de los usuarios para su máximo aprovechamiento.

2.2.4. Norma nacional para el aislamiento térmico en edificaciones

La NOM – 018 – ENER – 2011 (2011a), tiene por objeto establecer los métodos de prueba para evaluar la conductividad o resistencia térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua, la adsorción de humedad y absorción de agua, que se indiquen en los materiales homogéneos que se comercialicen con propiedades de aislantes térmicos. Esto con el propósito de incrementar el ahorro de energía y la preservación de los recursos energéticos a través de la utilización de mejores materiales, orientando al consumidor en la selección de la mejor alternativa de aislantes térmicos para implementar en la edificación; todo esto mediante características y métodos de prueba que debe cumplir cada productor, componente y elemento termoaislante.

2.2.5. Norma nacional para la eficiencia energética en edificaciones de uso habitacional mediante la envolvente

La NOM – 020 – ENER – 2011 (2011b), se aplica a todos los edificios habitacionales nuevos y ampliaciones partiendo de la fecha de expedición de dicho código, con el objetivo de mejorar el diseño térmico de edificios, logrando la comodidad de sus ocupantes con el

mínimo consumo de energía, a través, del análisis del comportamiento térmico de la envolvente. Esta norma limita la ganancia de calor de los edificios de uso habitacional, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento.

2.2.6. Norma nacional para las características térmicas y ópticas de sistemas vidriados para edificaciones

La NOM – 024 – ENER – 2012 (2012), tiene por objeto, establecer los métodos de prueba para evaluar la transmitancia visible, el coeficiente de ganancia de calor solar, el coeficiente de sombreado, el coeficiente global de transferencia de calor y el coeficiente visible térmico, que se indiquen en los sistemas vidriados que se comercialicen en el país. Esto con el propósito de responder a la necesidad de incrementar el ahorro de energía y la preservación de los recursos energéticos a través de la utilización de mejores materiales, así como la de proteger al consumidor, orientándole en la selección de los materiales que le ofrezcan la mejor alternativa para su necesidad de aislar térmicamente su edificación sin perder las características de diseño

De igual manera el gobierno mexicano ha promovido diferentes programas de certificación, por ejemplo del año 2006 al 2012 se implementó el Programa de Certificación de Edificios Sustentables (PCES), que buscaba promover y fomentar la reducción de emisiones contaminantes y el uso eficiente de los recursos naturales en el diseño y operación de edificaciones, con base en criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental; a través de la implementación y certificación de un proceso de regulación voluntaria y el otorgamiento de incentivos económicos (SEDEMA, 2008). En el sector de la vivienda resalta el programa de la Hipoteca Verde (INFONAVIT, 2020b), el cual mediante el subsidio manejado por la CONAVI, aplica un monto adicional al crédito de los derechohabientes con el propósito de poder adquirir o incorporar tecnologías eficientes a la vivienda que disminuyan el consumo de agua, energía eléctrica y gas. Sin embargo, las políticas y los programas establecidos en México no han tenido el alcance y el impacto esperando en lo que se refiere a la mejora de los diseños de la envolvente de viviendas nuevas. Los programas operados por la CONAVI, INFONAVIT y otras dependencias gubernamentales no atienden el problema de

las viviendas en climas cálidos de manera suficiente ya que, además de que no integran a la NOM – 020 – ENER como requisito a la entrega de beneficios, los elementos de atenuación de ganancias térmicas son opcionales, no se les da la ponderación adecuada y su alcance se limita a una fracción de las viviendas en regiones cálidas. Aunado a esto, los desarrolladores de vivienda han presentado objeciones en la normativa, específicamente el cumplimiento de la NOM – 020 argumentando un costo adicional en un mercado de vivienda de interés social con márgenes muy reducidos de costos (SENER, 2017).

2.3. Esquema Tarifario de CFE

Los proyectos y normativa creada para la eficiencia energética en edificaciones tienen como propósito la disminución del consumo energético. Específicamente en México la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es la encargada de generar y suministrar energía eléctrica a los distintos sectores a nivel nacional. La CFE presenta el siguiente esquema para las tarifas de energía eléctrica en México, como se exhibe en la Tabla 2.2 (CFE, 2020). Las cuotas de cada tarifa varían dependiendo de la región geográfica en la que se encuentre el usuario. La clasificación de zonas es: Baja California, Baja California Sur, Noroeste, Central, Noreste, Norte, Peninsular y Sur.

Tabla 2. 2. Esquema tarifario de la CFE (Datos correspondientes al mes de abril CFE, 2020)

Sector	Tarifa anterior	Tarifa actual
Domésticas	1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F y DAC	1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F y DAC
Servicios públicos	5, 5-A y 6	APBT y APMT
Agrícolas	9, 9M, 9-CU y 9-N	RABT y RAMT
Temporal	7	
Acuícola	EA	EA
En baja tensión	2 y 3	PDBT y GDBT
En media tensión	O-M, H-M Y H-MC	GDMTH y GDMTO
Con cargos fijos	OMF, HMF y HMCF	
En alta tensión	HS, HS-L, HT y HT-L	DIST y DIT
Con cargos fijos	HSF, HS-LF, HTF y HT-LF	
Servicio de respaldo	HM-R, HM-RF, HM-RM, HS-R, HS-RF, HS-RM, HT-R, HT-RF y HT-RM	
Servicio interrumpible	I-15 y I-30	DIST y DIT

El estudio se enfoca a casas habitación, por lo cual nos enfocaremos en la tarifa doméstica. Para determinar el esquema de cobro de la tarifa, la CFE los clasifica según la temperatura que se presenta la región durante el periodo de verano, dicha clasificación se ofrece en la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Clasificación de la Tarifa doméstica según CFE

Tarifa	Temperatura media mensual mínima en verano	Límite para aplicación de la tarifa DAC
1	< 25 °C	250 kWh/mes
1A	25 °C	300 kWh/mes
1B	28 °C	400 kWh/mes
1C	30 °C	850 kWh/mes
1D	31 °C	1, 000 kWh/mes
1E	32 °C	2, 000 kWh/mes
1F	33 °C	2, 500 kWh/mes

El presente estudio se enfoca en la zona peninsular, el cual por la temperatura mínima en verano le corresponde la tarifa 1D. Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, que no sean consideradas de alto consumo doméstico (Tarifa DAC), conectadas individualmente a cada residencia, en localidades cuya temperatura mensual en verano sea de 31 °C como mínimo. Dicho esquema tarifario, presenta un rango y costo de energía el cual se exhibe en la Tabla 2.4 y se tomará a consideración en el capítulo 4.

Tabla 2. 4. Costo de la energía en tarifa 1D (Datos correspondientes al mes de abril CFE, 2020)

MES	Concepto	Energía (kWh)	Costo
ENERO	Básico	Primeros 75	\$ 0.83
	Intermedio	Siguientes 125	\$ 1.01
	Excedente	kWh adicional	\$ 2.94
FEBRERO	Básico	Primeros 75	\$ 0.83
	Intermedio	Siguientes 125	\$ 1.01
	Excedente	kWh adicional	\$ 2.94
MARZO	Básico	Primeros 75	\$ 0.83
	Intermedio	Siguientes 125	\$ 1.01
	Excedente	kWh adicional	\$ 2.94
ABRIL	Básico	Primeros 175	\$ 0.741
	Intermedio bajo	Siguientes 225	\$ 0.866
	Intermedio alto	Siguientes 200	\$ 1.11
	Excedente	kWh adicional	\$ 2.962
MAYO	Básico	Primeros 175	\$ 0.741
	Intermedio bajo	Siguientes 225	\$ 0.868
	Intermedio alto	Siguientes 200	\$ 1.11
JUNIO	Excedente	kWh adicional	\$ 2.962
	Básico	Primeros 175	\$ 0.745
	Intermedio bajo	Siguientes 225	\$ 0.87
JULIO	Intermedio alto	Siguientes 200	\$ 1.11
	Excedente	kWh adicional	\$ 2.97
	Básico	Primeros 175	\$ 0.745
AGOSTO	Intermedio bajo	Siguientes 225	\$ 0.87
	Intermedio alto	Siguientes 200	\$ 1.11
	Excedente	kWh adicional	\$ 2.97
SEPTIEMBRE	Básico	Primeros 175	\$ 0.745
	Intermedio bajo	Siguientes 225	\$ 0.87
	Intermedio alto	Siguientes 200	\$ 1.11
OCTUBRE	Excedente	kWh adicional	\$ 2.97
	Básico	Primeros 75	\$ 0.84
	Intermedio	Siguientes 125	\$ 1.02
NOVIEMBRE	Excedente	kWh adicional	\$ 3.004
	Básico	Primeros 75	\$ 0.84
	Intermedio	Siguientes 125	\$ 1.02
DICIEMBRE	Excedente	kWh adicional	\$ 3.004
	Básico	Primeros 75	\$ 0.84
	Intermedio	Siguientes 125	\$ 1.02

Capítulo 3. MODELACIÓN DEL TECHO VENTILADO

En este capítulo se presenta la metodología empleada para la adquisición de datos meteorológicos y térmicos de una vivienda ubicada en la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Igualmente, se explica la creación del modelo computacional de la zona de estudio considerando las propiedades constructivas en las casas de interés social de acuerdo con la normativa nacional vigente.

3.1. Herramienta de software para simulación en edificios

Los programas utilizados en la realización de 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 afinarán y ajustarán 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).

3.1.1. Software de diseño CAD SketchUp

El software *SketchUp* es una herramienta que permite conceptualizar rápidamente volúmenes y formas arquitectónicas de un espacio en 3D. Además, los edificios creados pueden ser geo-referenciados y colocados sobre imágenes de *Google Earth*. Dicho software fue diseñado para usarse de manera intuitiva y flexible, facilitando ampliamente su uso

respecto con otros programas de modelado 3D. Es propiedad de *Trimble Inc.*, siendo ésta una empresa de cartografía, topografía y equipo de navegación (SketchUp, 2020).

3.1.2. Software libre OpenStudio

Open Studio es una colección de herramientas de software multiplataforma de código abierto para soportar el modelado energético de todo el edificio utilizando *Energy Plus* y el análisis avanzado de luz diurna utilizando *Radiance*. En su desarrollo participaron diversos laboratorios como el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés), el Laboratorio Nacional de Berkeley (LBNL, por sus siglas en inglés), el Laboratorio Nacional Argonne (ANL, por sus siglas en inglés), entre otros (Energy Efficiency & Renewable Energy, 2020). Permite mediante una interfaz gráfica introducir datos climáticos, sistemas mecánicos, materiales, iluminación, cargas internas. Así mismo permite la introducción de las propiedades termo físicas de los materiales que componen la envolvente del edificio, para luego ejecutar simulaciones con el propósito de observar la variación del comportamiento térmico de un edificio respecto a cada parámetro.

3.1.3. Motor de cálculo Energy Plus

El software *Energy Plus* está desarrollado por el Departamento de Energía del Gobierno de E.E.U.U (DOE, por sus siglas en inglés), siendo uno de los programas más reconocidos en el ámbito de simulación energética (Buechler, Pallin, Boudreaux, & Stockdale, 2017). Está ideado para modelar edificios con sus respectivos sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Tiene sus raíces en los programas *BLAST* y *DOE-2; BLAST* (Construcción de Análisis de cargas y Termodinámica del Sistema). Es un programa muy utilizado en procesos de dimensionamiento de equipos con sistemas HVAC, generar simulaciones con las características y datos del edificio, optimizar los rendimientos energéticos, etc.

Energy Plus implementa la física detallada del edificio para la transferencia de aire, humedad y calor, incluido el tratamiento de la transferencia de calor por radiación y convección por separado para respaldar el modelado de sistemas radiantes y el cálculo de métricas de confort térmico. Calcula la iluminación, el sombreado y las métricas de confort

visual. Este admite configuración flexible a nivel de componentes de sistemas de climatización, plantas y refrigeración e incluye diversos conjuntos de modelos de HVAC. *Energy Plus* se prueba según la metodología ASHRAE Standard 140, que actualmente se está ampliando con datos medidos de instalaciones de prueba bien instrumentadas y caracterizadas (Energy Efficiency & Renewable Energy, 2020).

3.2. Edificación bajo estudio

3.2.1. Características de la región de clima tropical

El estudio se enfoca en la ciudad de Mérida, Yucatán, México ($20^{\circ} 58' N$, $89^{\circ} 37' W$). Tal como se presenta en la Figura 3.1., 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 $26^{\circ} C$, las mayores temperaturas se alcanzan en los meses de abril a julio superando los $36^{\circ} C$, mientras que la temperatura mínima se presenta en enero con $16^{\circ} C$ en promedio. La precipitación anual es de aproximadamente 1014.1 mm, específicamente durante los meses de junio a octubre (INEGI, 2017). Como se puede apreciar en la imagen satelital, el amplio crecimiento de la zona urbana ha propiciado la generación una gran mancha gris producto de la construcción desmedida, generando grandes islas de calor urbano.

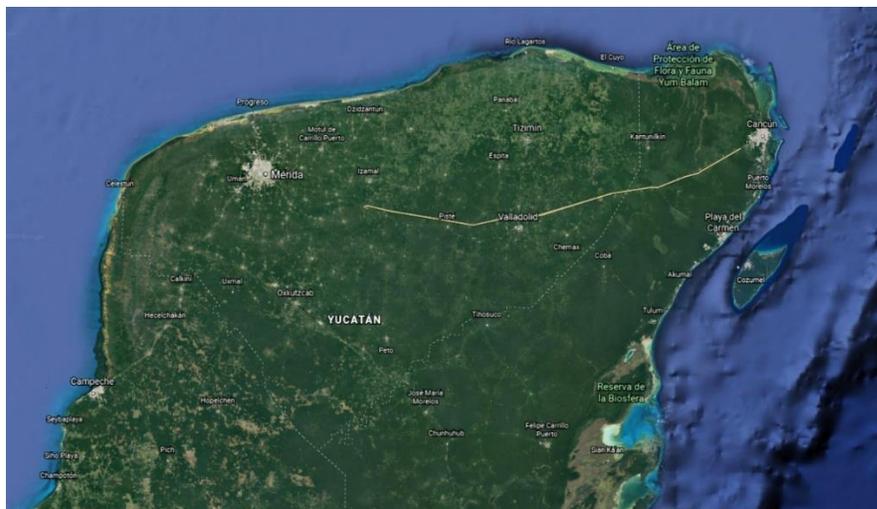


Figura 3.1. Imagen satelital de Mérida Yucatán, México

3.2.2. Descripción de la vivienda

La casa seleccionada para el estudio se encuentra ubicada en la parte poniente de la ciudad de Mérida, Yucatán, específicamente en la zona residencial de Ciudad Caucel ($21^{\circ} 53''$ N, $89^{\circ} 42' 25''$ W). Dicha zona residencial inicio su construcción en 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 Caucel tiene un área aproximada de 10.22 km^2 como se aprecia en la Figura 3.2. Sin embargo, debido a los intereses económicos diversas constructoras deciden aumentar el número de edificaciones disminuyendo los espacios verdes. Se puede observar en la figura que esta zona residencial es una plancha de concreto trayendo consigo el fenómeno de UHI, por lo cual se quiere estudiar el comportamiento de este fenómeno en la afectación de la temperatura interna en las viviendas de esta zona.



Figura 3. 2. Vista aérea de la zona de estudio "Ciudad Caucel".

La construcción de la vivienda bajo estudio la realizó Grupo Promotora Residencial, la cual es de las constructoras más importantes en el Estado. La Figura 3.3, presenta la ubicación de la zona de estudio, mientras que, la Figura 3.4 exhibe el interior de la vivienda, la cual posee un área de construcción de 69.69 m² y una altura de 2.8 m. Se compone de dos recámaras, comedor, cocina y baño, la cual es la configuración 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. Esta vivienda se escogió debido a que no presenta modificaciones estructurales posteriores a su construcción.

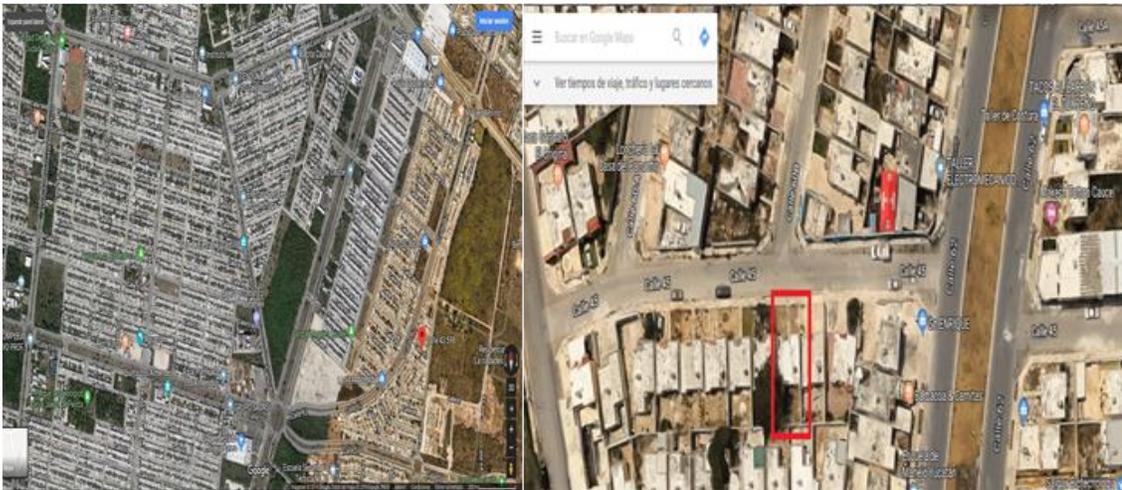


Figura 3. 3. Ubicación de la vivienda de estudio



Figura 3. 4. Interior de la vivienda de estudio.

3.3. Metodología computacional

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 3.5. Esta metodología se encuentra conformada por tres etapas:

- Instrumentación, recolección de datos y elaboración del modelo computacional: En esta fase se realiza la instrumentación en la zona de estudio. Se instalarán sensores dentro de la casa para el almacenamiento de la temperatura interna y humedad relativa que se representan y con ello poder realizar la validación de la simulación. Con los datos obtenidos experimentalmente, se procederá a comparar los resultados

obtenidos de la simulación a través de *Energy Plus* con el propósito de validar el diseño.

- Simulación de techos ventilados: Una vez que se tiene verificado el modelo, 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 procede a 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 y el costo de implementación del sistema. De igual manera se realizará una proyección del ahorro energético al implementar dicho sistema.

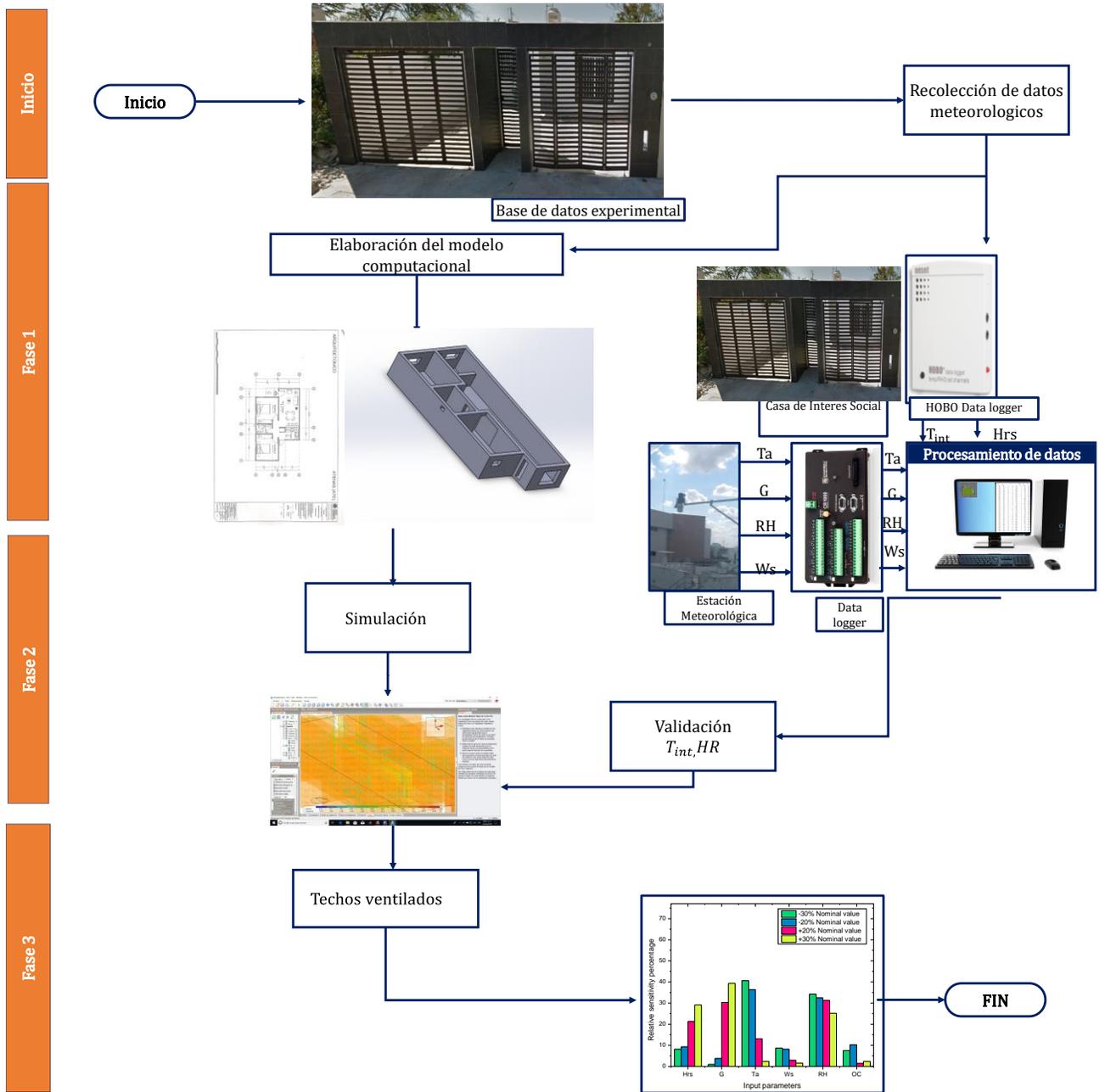


Figura 3. 5. Metodología de trabajo para simulación de techos ventilados en casas de interés social.

3.3.1. Instrumentación y adquisición de datos

Para analizar la temperatura y humedad al interior de la residencia, esta se instrumentó empleando sistemas de adquisición de datos HOBO U12-012 (ONSET Computer Corporation, 2020). Dichos datos se almacenaron a intervalos de 30 minutos debido a que los fenómenos de transferencia de calor que afectan la variación de la temperatura y humedad relativa se observan de manera clara en este periodo de tiempo (Hernández Gómez & Gálvez, 2013). Los adquirentes de datos se distribuyeron a lo largo de la construcción en tres zonas (cuarto principal, cuarto secundario y comedor). Debido a las limitaciones en el número de sensores HOBO y con el propósito de no incomodar a los habitantes del recinto, los sistemas de adquisición de datos se colocaron en lugares estratégicos como se exhibe en la Figura 3.6.

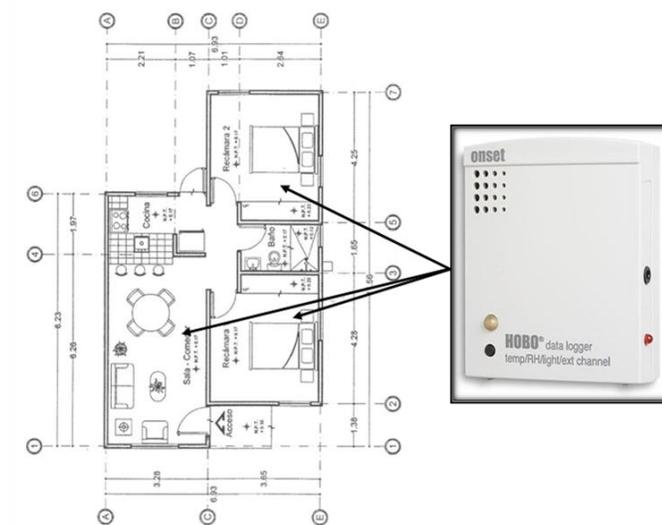


Figura 3. 6. Instrumentación de las zonas de estudio mediante el *Datalogger* HOBO U12-012.

Con el propósito de tener resultados exactos al momento de realizar las simulaciones, se implementó una base de datos meteorológica para la adquisición de las variables ambientales requeridas por el software *Energy Plus*. El sistema de monitores y adquisición de datos meteorológicos correspondió a una estación de uso comercial VantagePro 2 (Davis Instruments, 2020). En la Tabla 3.1. se resumen las características de los instrumentos de

medición utilizados 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 3.7.

Tabla 3. 1. Características de medición de la estación Vantage Pro2.

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

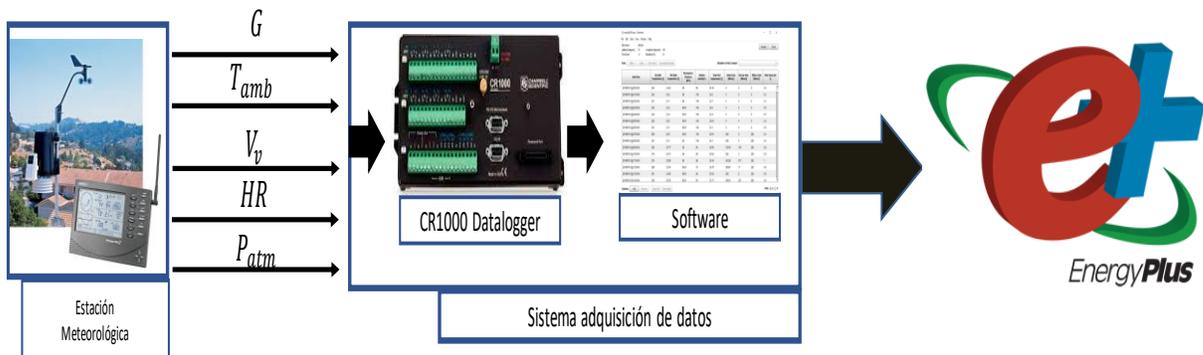


Figura 3. 7. Diagrama del monitoreo, registro y procesamiento de las variables meteorológicas.

3.3.2. Simulación computacional

En la Figura 3.8 se presenta el funcionamiento en conjunto de los softwares seleccionados en este estudio al momento de la creación del modelo.

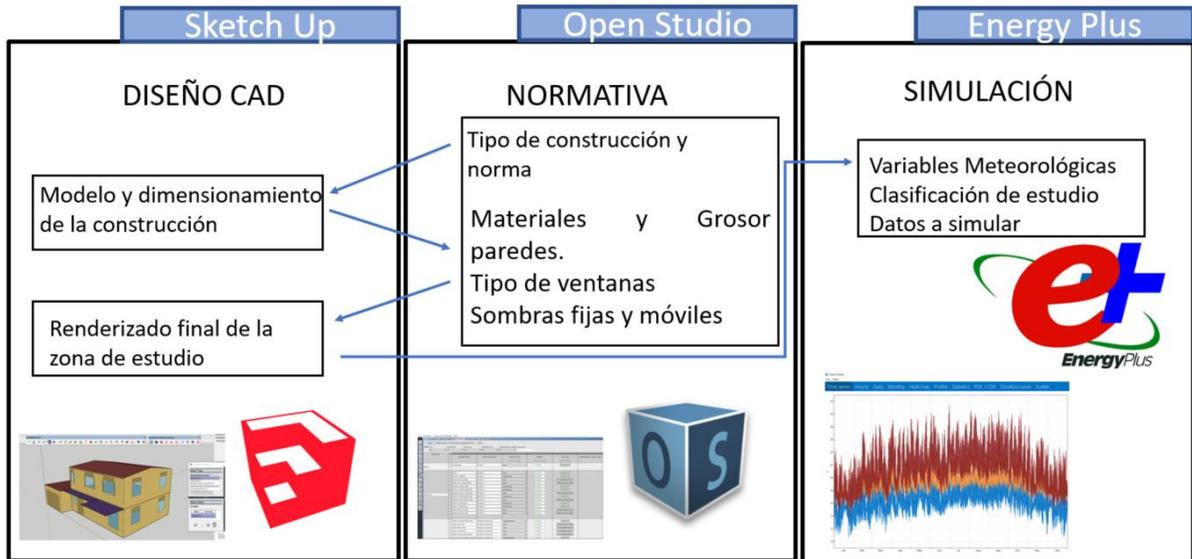


Figura 3. 8. Metodología computacional simplificada del modelo de predicción de temperatura interna en casa-habitación de interés social.

Para la creación del modelo es importante considerar la ubicación y orientación, pues la proyección de las sombras y la incidencia del sol en las fachadas variarán según este orientado el edificio y las épocas estacionales.

Para ello, antes de crear los espacios, en el menú principal seleccionamos **Archivo > Geolocalización > Añadir localización**, como se aprecia en la Figura 3.9(a), la cual es una ejemplificación de la geolocalización de un diseño utilizando *SketchUp*. De ahí se procede a introducir la dirección donde se encuentra localizada la zona de estudio. Posteriormente, se procede a la digitalización de la vivienda tomando las medidas que se presentan en la Figura 3.10, quedando el plano tal como se presenta en la Figura 3.9(b). Solo quedará orientar la fachada a la zona noreste, esto mediante las herramientas mover y rotar del entorno *SketchUp*.

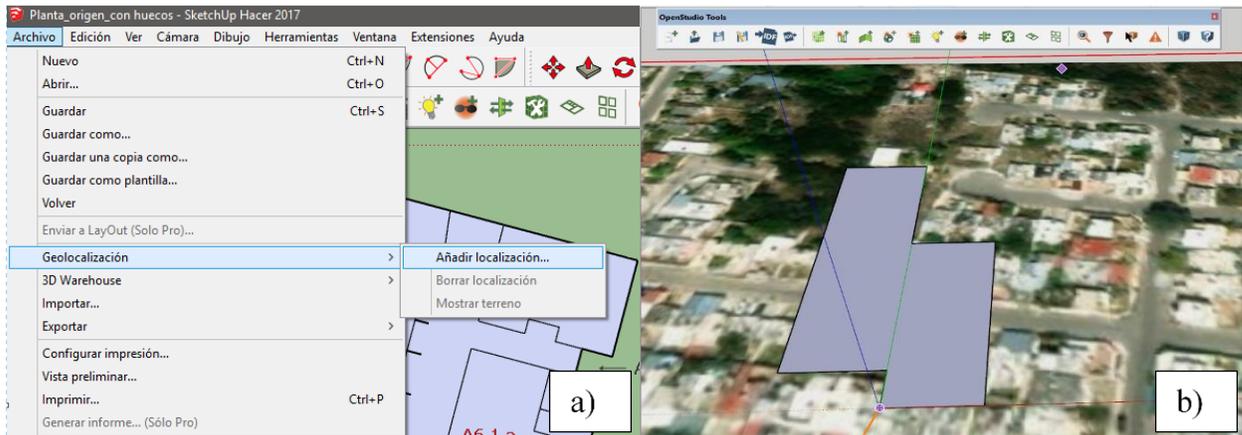


Figura 3.9. a) Añadir localización del sitio de estudio; b) Creación del plano de la zona de estudio.

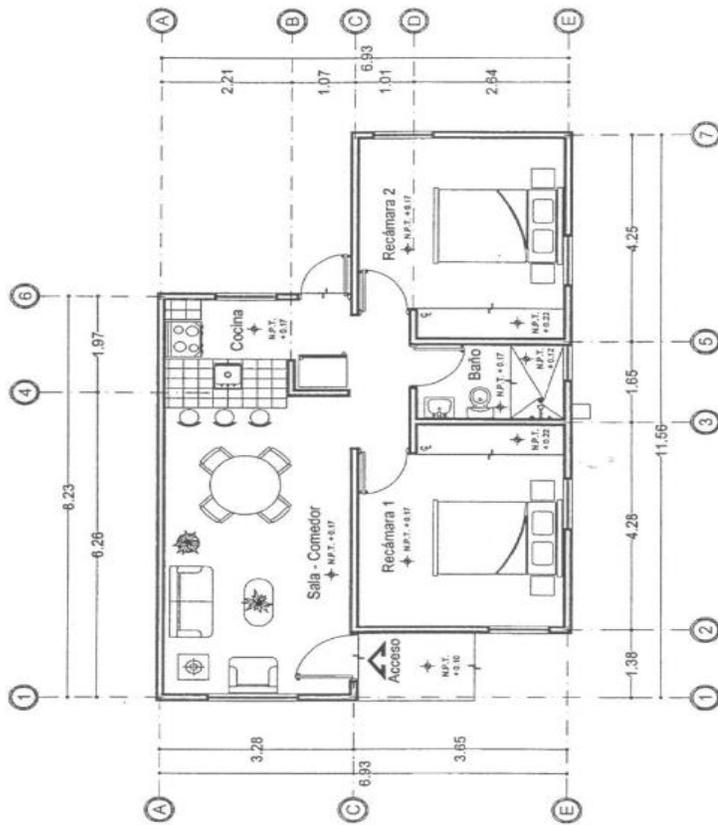


Figura 3. 10. Plano 2D de la vivienda de estudio.

Modelación de la vivienda

Una vez realizado el diseño de la vivienda como se presentó en la Figura 3.9. se procede a realizar las particiones interiores de la planta. Esto es debido a que la simulación térmica tomará en consideración las áreas de cada zona. Para este diseño se toman en consideración las medidas que se presentan en la Tabla 3.2, quedando el modelo final tal como se aprecia en la Figura 3.11, donde la línea amarilla corresponde al norte. Por último, una vez realizado el diseño con las medidas mencionadas, se procede a seleccionar toda la base y mediante la herramienta “*Create spaces from diagram*” se introduce la altura total de la planta, la cual será de 2.8 m, específicamente de piso a plafón son 2.5 m.

Características	Dimensiones
Área de la edificación	69.69 m ²
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

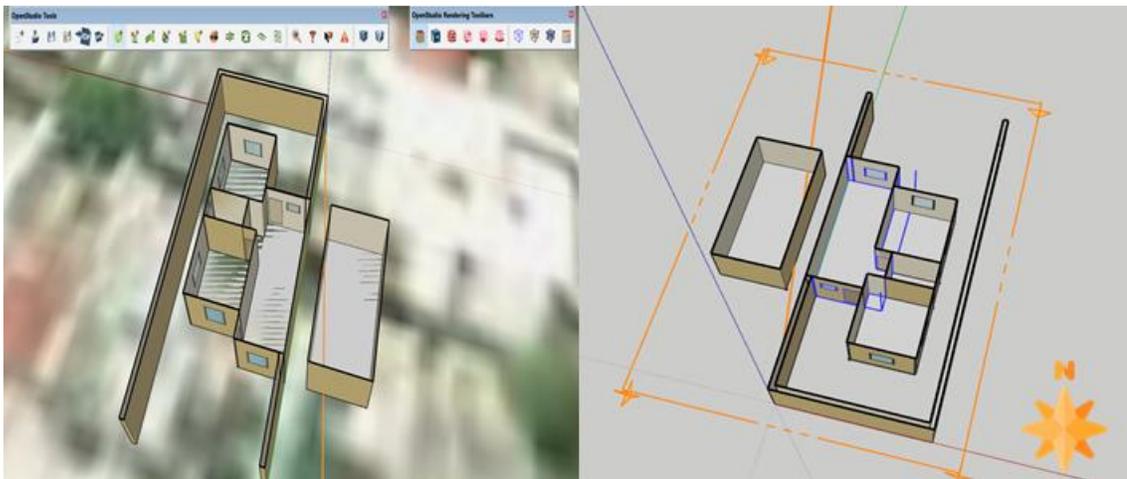


Figura 3. 11. Captura de imagen de la interfaz SketchUp con las particiones interiores.

La interfaz de *SketchUp* proporciona una herramienta integrada con las propiedades del modelo *OpenStudio*. Esta herramienta nos permite renombrar los espacios, modificar parámetros de la edificación, entre otros, tal como se exhibe en la Figura 3.12. Es importante

nombrar los espacios y modificar los nombres de cada recinto, esto facilitará la introducción de propiedades térmicas, así como la interpretación de resultados.

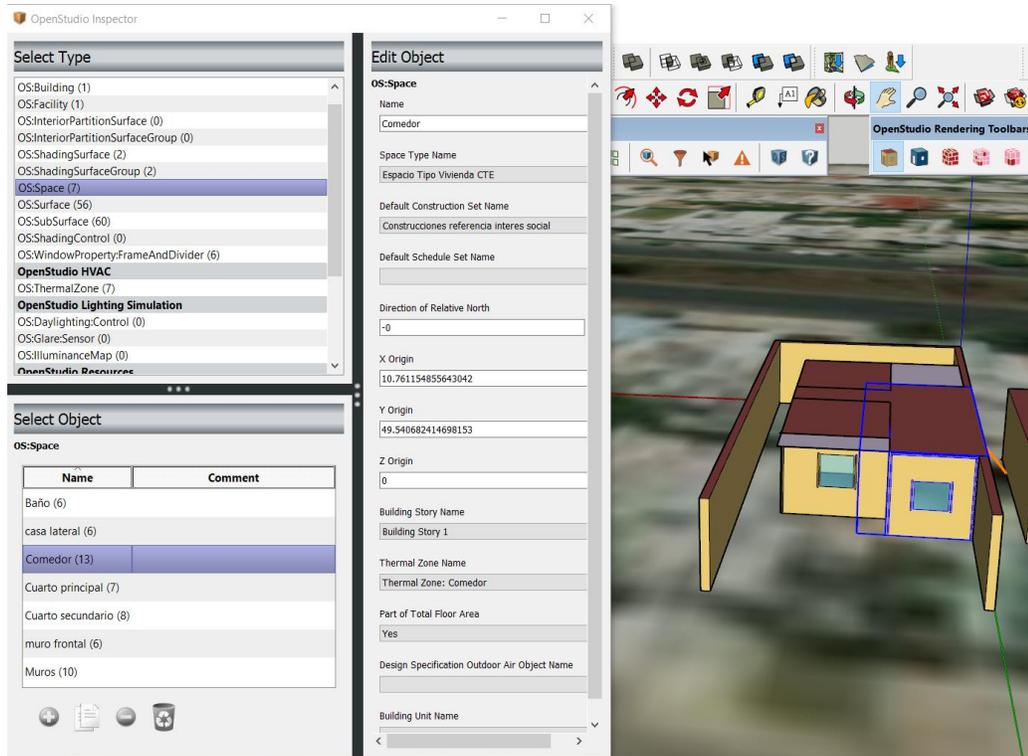


Figura 3. 12. Captura del menú del Inspector de OpenStudio integrado en el software SketchUp.

Una vez realizado el diseño de acuerdo con las mediciones experimentales se procede a trabajar en el software *OpenStudio*, en el cual se introducirán las propiedades de los materiales y la formación de los componentes.

Después de realizar el modelo 3D a través de la interfaz de *SketchUp* y guardar los espacios extruidos, de crear las sub-superficies que representan las puertas, ventanas y nombrarlas según lo requerido; ahora toca la introducción de información característica de cada espacio mediante el software *OpenStudio*. Esto se enfoca a definir los materiales que formarán parte de las construcciones de cada superficie y sub-superficies.

Creación de la envolvente del edificio y sus propiedades

En este apartado se procede a definir los materiales que conforman la edificación, para ello, se requiere modificar los valores de conductividad, calor específico y grosor de acuerdo con la normativa nacional vigente, la cual se aprecia en la Tabla 3.3 (SENER, 2011b). Dichas propiedades se pueden modificar en **OpenStudio > Constructions > Materials**; de igual manera es importante ingresar otras variables como la absorptancia térmica, visible y solar; dichas componentes se compararon de diversas fuentes confiables (ToolBox, 2020), las cuales se ingresaron en el modelo como se aprecia en la Figura 3.13 (a). Posteriormente se procedió a la creación de los componentes según las capas de material con el propósito de replicar las envolventes de la zona de estudio en el modelo computacional (Figura 3.13 (b)). Por último, se definen las construcciones que conforman la vivienda como se exhibe en la Figura 3.14. En el modelo computacional se reúnen todos los elementos creados en la interfaz de *OpenStudio* con el propósito de definir cada elemento que integra las diversas envolventes de la edificación. Se diferencia entre los elementos de la envolvente pertinentes a las superficies exteriores, interiores y aquellas que están en contacto con el suelo.

Tabla 3. 3. Materiales implementados en la construcción de casas de interés social (SENER, 2011b)

Envolvente	Materiales	Grosor (cm)	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad (W/m*K)	Calor específico (J/Kg*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

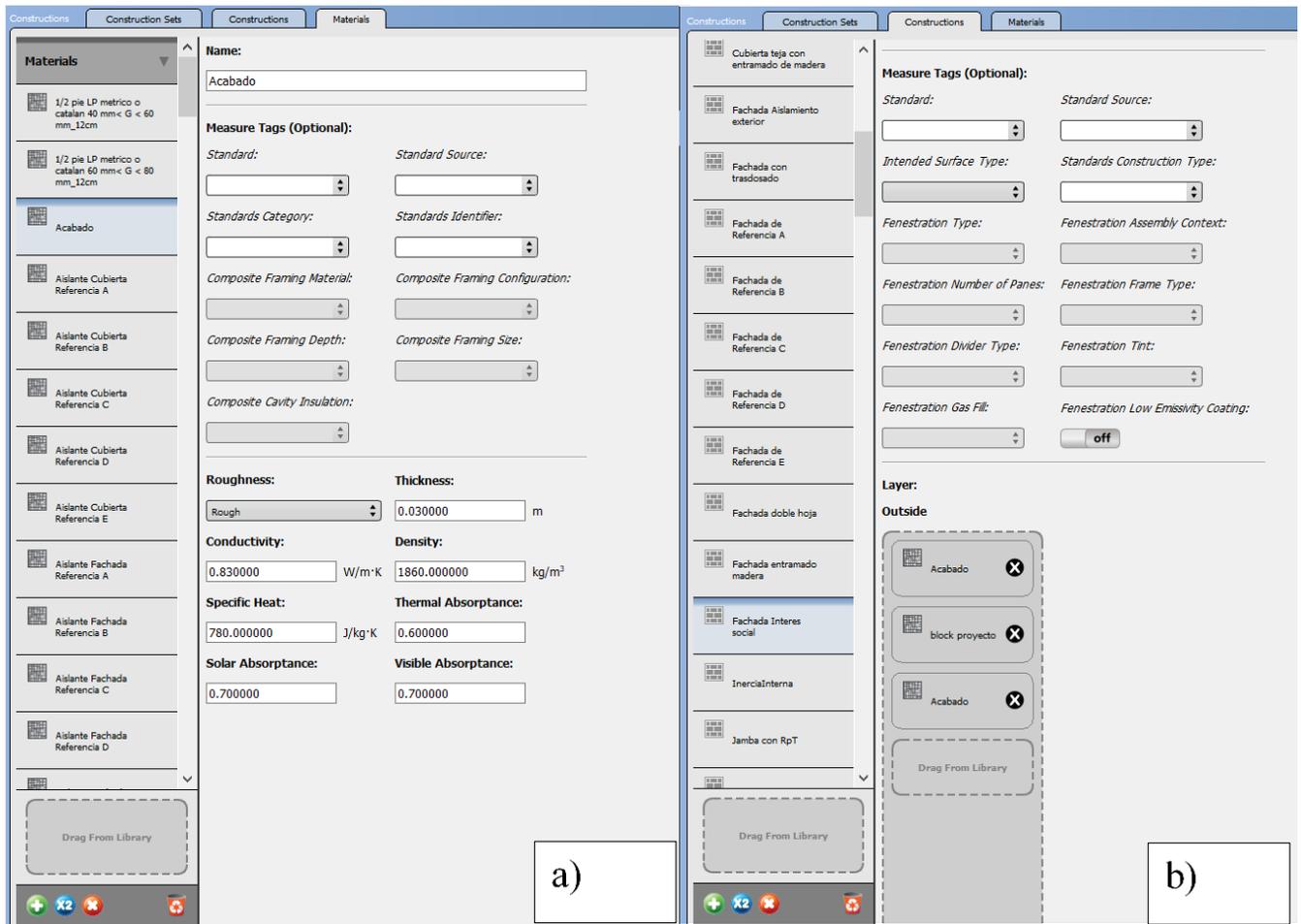


Figura 3. 13. a) Creación del material en OpenStudio; b) Creación de los elementos de la envolvente de la vivienda de estudio.

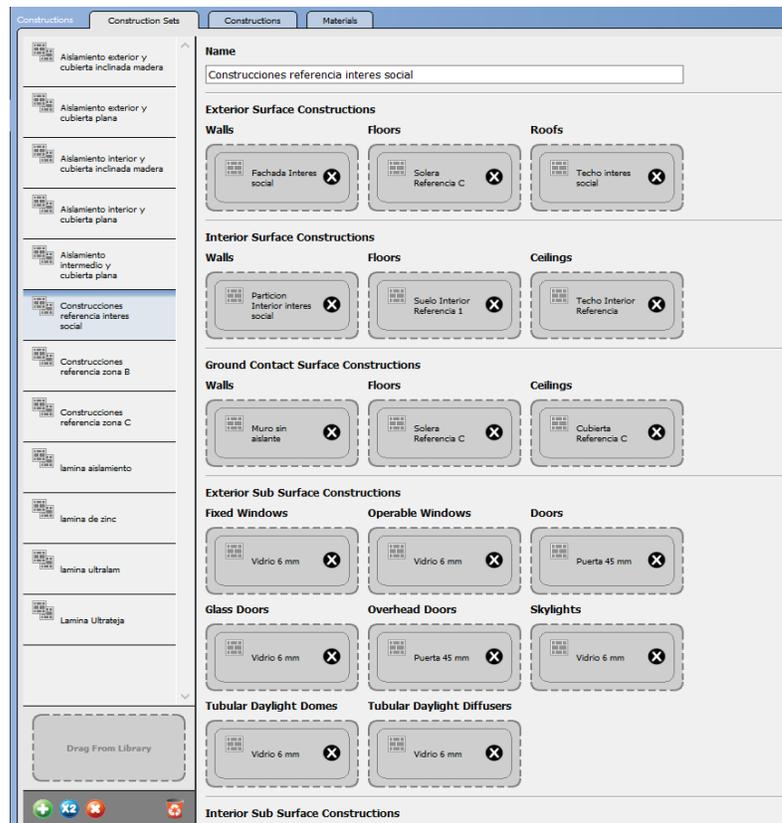


Figura 3. 14. Captura de OpenStudio especificando las construcciones creadas y asignadas a cada superficie. Una vez completado el modelo con las consideraciones pertinentes de la ubicación del estudio, diseño 3D de la vivienda, selección de las condiciones de operación y colocación de los materiales adecuados, se procede a la ejecución del software *Energy Plus* para el cálculo de los parámetros deseados.

Para la realización del modelo, el software implementa mecánica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), para estimar las ganancias de calor a través de la envolvente de la edificación. Por ello es importante la correcta introducción de parámetros térmicos de los materiales. De acuerdo a la guía de ASHRAE (ASHRAE, 2017): El balance de energía de la cara externa por cada superficie se presenta en la Ecuación 3.1, donde q_{asol}'' es el flujo de radiación solar, q_{LWR}'' es el intercambio neto de flujo de radiación de onda larga con el aire y los alrededores, q_{conv}'' corresponde al flujo de intercambio convectivo con el aire exterior y q_{ko}'' es el flujo conductivo:

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3.1)$$

El equilibrio térmico interno involucra las caras internas de las superficies de la zona, este balance de calor tiene diversas componentes de transferencia de calor. Tanto la radiación de onda larga como la de onda corta son importantes, así como la conducción y convección de la pared al aire. El balance de calor (HB, por sus siglas en inglés) de la cara interna para cada superficie se describe a continuación (ASHRAE, 2017):

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (3.2)$$

donde q''_{LWX} corresponde al intercambio neto de flujo radiante entre superficies, q''_{SW} es el flujo neto de radiación de onda corta a la superficie proveniente de la iluminación, q''_{LWS} es la radiación proveniente de equipos, q''_{ki} pertenece al flujo de conducción a través de la pared, q''_{sol} contempla la transmisión de flujo radiativo solar absorbido por la superficie y q''_{conv} es el flujo convectivo por zona. Debido a la unión de los procesos de equilibrio de calor tanto externo como interno, el proceso de conducción de la pared regula la dependencia del tiempo de la carga de enfriamiento. Para esto se formula funciones de transferencia de conducción (CTF's por sus siglas en inglés), que relacionan los flujos de calor conductivos con las temperaturas actuales y pasadas de la superficie y los flujos de calor pasados respecto al tiempo. La forma general para el flujo de calor interior se presenta en la ecuación 3.3 (ASHRAE, 2017); donde X_j es el CTF del exterior, Y_j se conoce como el CTF a través de las superficies, Z_j corresponde al CTF en el interior de la superficie, Φ_j es el flujo de CTF, θ corresponde al tiempo, δ son los pasos de tiempo, T_{si} corresponde a la temperatura de la cara interna de la superficie, T_{so} equivale a la temperatura de la cara externa de la superficie, q''_{ki} es el flujo convectivo de la cara interna de la superficie, mientras que, q''_{ko} corresponde al flujo convectivo de la cara externa:

$$q_{ki}''(t) = -Z_o T_{s(i,\theta)} \quad (3.3)$$

$$- \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{si,(\theta-j\delta)} + Y_o T_{so,\theta} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{so,(\theta-j\delta)} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ki,(\theta-j\delta)}''$$

Para el flujo de calor externo, la ecuación se presenta a continuación (ASHRAE, 2017):

$$q_{ki}''(t) = -Y_o T_{si,\theta} \quad (3.4)$$

$$- \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{si,(\theta-j\delta)} + X_o T_{so,\theta} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{so,(\theta-j\delta)} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ki,(\theta-j\delta)}''$$

Ahora bien, se tiene que definir la zona térmica, la cual depende de cómo se controla la temperatura. Si el aire que circula a través de toda la edificación es uniforme, toda la edificación se considera como una zona térmica. Por otro lado, si cada cuarto tiene un diferente esquema de control en la temperatura, cada cuarto se considera como una zona térmica. Esto se requiere para una descripción detallada en el cálculo de la transferencia de calor. Dicha zona consiste en 4 paredes, un techo, piso y una superficie de masa térmica. Cada muro o techo puede incluir una ventana o tragaluz, derivando en un total de 12 superficies por zona térmica para su modelación.

Para el balance de calor se tiene, como se presentó anteriormente, 12 superficies tanto internas como externas las cuales se evaluarán cada 24 horas, asignando i a la superficie y j al tiempo. En el caso del CTF's, la secuencia de las variables queda como se presenta a continuación:

$$T_{so(i,j)} = \text{temperatura de la cara externa, } i = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, 24.$$

$$T_{si(i,j)} = \text{temperatura de la cara interna, } i = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, 24. \quad (3.5)$$

$$q_{sysj} = \text{carga de enfriamiento, } i = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, 24.$$

Las ecuaciones (3.1) y (3.4) se combinan para la solución respecto a T_{so} aplicable a cada paso de tiempo, quedando la siguiente ecuación (ASHRAE, 2017), donde T_o corresponde a la temperatura del aire en el ambiente y h_{co} se conoce como el coeficiente de convección de la superficie externa:

$$\begin{aligned}
& T_{so}(i,j) \\
& = \left(\sum_{k=1}^{nz} T_{si}(i,j-k) Y_{i,k} - \sum_{k=1}^{nz} T_{so}(i,j-k) Z_{i,k} - \sum_{k=1}^{nq} \Phi_{i,k} q''_{ko}(i,j-k) + q''_{\alpha sol}(i,j) \right) \\
& \quad + q''_{LWR}(i,j) + T_{si}(i,j) Y_{i,0} + T_{o(j)} h_{co}(i,j) \\
& / (Z_{i,0} + h_{co}(i,j))
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Ahora bien, las ecuaciones (3.2) y (3.3) se combinan para la solución respecto a T_{si} , quedando la siguiente ecuación (ASHRAE, 2017), donde T_a es la temperatura de la zona o espacio térmico y h_{ci} es el coeficiente de transferencia de calor en el interior:

$$\begin{aligned}
T_{si}(i,j) = & \left(T_{si}(i,j) Y_{i,0} + \sum_{k=1}^{nz} T_{so}(i,j-k) Y_{i,k} - \sum_{k=1}^{nz} T_{si}(i,j-k) Z_{i,k} \right) \\
& + \sum_{k=1}^{nq} \Phi_{i,k} q''_{ki}(i,j-k) + T_{a(j)} h_{ci}(j) + q''_{LWS} \\
& + q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{sol} e
\end{aligned} / (Z_{i,0} + h_{ci}(i,j)) \tag{3.7}$$

Por último, el balance de calor del aire, provee la carga de enfriamiento q_{sys} en cada lapso de tiempo, tal como se presenta en la siguiente ecuación (ASHRAE, 2017):

$$q_{sys}(j) = \sum_{i=1}^{12} A_i h_{ci} (T_{si}(i,j) - T_{a(j)}) + q_{CE} + q_{IV} \tag{3.8}$$

De igual manera se considera la junta o puente térmico (PT), la cual se define como aquella parte del cerramiento de un edificio en la cual la resistencia térmica normalmente uniforme cambia significativamente debido a penetraciones completas o parciales, producto de materiales con diferente conductividad térmica. Este fenómeno se puede apreciar en las juntas de paredes, suelos o techos, la cual se presenta en la siguiente ecuación (Stritih, 2003), donde h_i es la conductancia superficial interior, e es el espesor de cada material, λ corresponde al coeficiente de conductividad térmica de cada material y h_e es la conductividad superficial de la superficie externa.

$$PT = \frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e} \quad (3.9)$$

Variables Meteorológicas y ejecución del modelo

Para el desarrollo de las ecuaciones presentadas anteriormente, el software *Energy Plus* requiere de una base de datos meteorológica que contemple los siguientes parámetros: radiación solar (G), temperatura ambiente (T_{amb}), humedad relativa (HR), velocidad de viento (V_w) y presión atmosférica (P_{atm}). Dichos parámetros se requieren en un periodo de un año para la ejecución de CFD, en los cuales mediante simulación se obtienen diversos parámetros, enfocando este estudio en la temperatura y humedad relativa al interior del edificio. Dicho software tiene una base de datos con los componentes meteorológicos de diversos países y ciudades, sin embargo, debido a que se desea tener la máxima precisión en este estudio se procedió a la instrumentación y adquisición de las variables ambientales tal como se especificó en la sección 3.3.1.

Una vez terminado el modelo con las consideraciones explicadas con anterioridad, las cuales se enumeran a continuación de manera rápida, se procede a realizar la simulación de la vivienda.

- i. Obtener las dimensiones de la edificación.
- ii. Conocer las componentes (materiales) de cada envolvente, así como el grosor.
- iii. Elaborar el modelo considerando la ubicación geográfica de la fachada, al igual que construcciones aledañas que afecten la zona de estudio.
- iv. Colocar las juntas térmicas en donde se presente cambio de materiales en la construcción.
- v. Insertar la base de datos meteorológica de la zona de estudio, en este caso Mérida, Yucatán.
- vi. Seleccionar las variables de salida del modelo.

En este estudio los resultados deseados son las ganancias de calor de cada envolvente, la temperatura y humedad relativa interna de cada recinto de la vivienda. Estos valores se contrastan con las mediciones recabadas por el *Datalogger* HOBO para su posterior análisis

y determinar si el modelo se adapta al comportamiento experimental; dicho análisis se presenta en la sección 3.3.3.

3.3.3. Validación del modelo

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación y su posterior comparación con los datos recabados mediante los *Datalogger* HOBO, para su análisis mediante normas internacionales en aplicación de modelos computacionales.

Una vez que se realizó el modelo de acuerdo con las propiedades físicas y térmicas de los materiales de construcción implementados bajo la norma mexicana vigente en edificaciones habitacionales, se procedió a la validación de los resultados. La verificación de modelos energéticos se realiza tomando en consideración a las normas emitidas por el ASHRAE, el Protocolo de Verificación y Medición de Desempeño Internacional (IPMVP, por sus siglas en inglés) y, por último, el Programa Federal de Gestión Energética (FEMP, por sus siglas en inglés), siendo las dos últimas instituciones de Estados Unidos. Dichas instituciones dictaminan un análisis estadístico mediante el error de sesgo medio (MBE, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de variación del error cuadrático medio (CV RMSE, por sus siglas en inglés). Dichos parámetros se presentan en las ecuaciones (3.10) y (3.11) respectivamente (Chaudhary et al., 2016; Lara et al., 2017).

$$MBE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{Np} (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{Np} (m_i)} \quad (3.10)$$

$$CV(RMSE)(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{Np} (m_i - s_i)^2 / Np}}{\bar{m}} \quad (3.11)$$

donde m_i y s_i son los datos medidos y simulados respectivamente; N_p es el número total de datos del intervalo de medición y \bar{m} es la media de los datos medidos.

Con estos parámetros, las instituciones mencionadas anteriormente tienen criterios de evaluación los cuales se aprecian en la Tabla 3.4. para determinar si el modelo

computacional se adapta al comportamiento de la edificación y se puede aplicar en la predicción de diversos parámetros.

Tabla 3. 4. Parámetros de validación de modelos energéticos con base en normativa internacional

Guía Estándar	Criterio Mensual (%)		Criterio Horario (%)	
	MBE	CV RMSE	MBE	CV RMSE
ASHRAE (American Society of Heating, 2010)	5	15	10	30
Medición de desempeño internacional y protocolo de verificación (Savings, 2012)	20	-	10	20
Programa Federal de manejo de energía (Fumo, 2014)	5	15	10	30

Como se expone en la Tabla 3.4., las instituciones presentan un criterio mensual y horario, siendo el último el de mayor importancia puesto que los datos simulados se recabaron cada 30 minutos. En el siguiente capítulo se presentan los datos recabados, así como la validación del modelo según la normativa presentada.

3.3.4. Modelación de techos ventilados

Una vez que se comprueba que el modelo es válido según la normativa presentada anteriormente, se procede a la realización del diseño considerando los techos ventilados. 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 3.15, se presentan las condiciones que se consideran al momento de realizar el modelo computacional del techo ventilado.

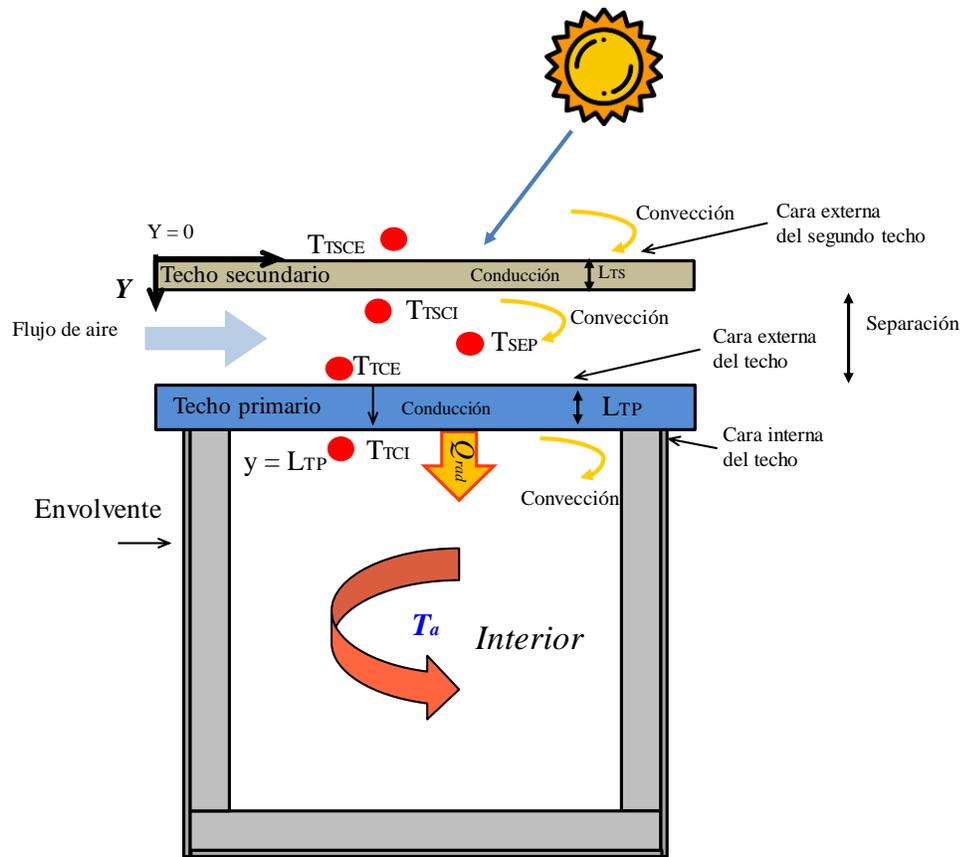


Figura 3. 15. Diagrama esquemático que presenta los procesos de transferencia de calor en el techo ventilado. Para la realización del modelo al implementar el techo ventilado, se consideran los fenómenos presentados en la Figura 3.15. El balance de energía de para el techo secundario y primario, se aprecian en la Ecuación 3.13 y 3.14 respectivamente (Zingre et al., 2015):

$$\frac{dT_{TS}(y,t)}{dT} = \left[\begin{array}{l} \left(B_1^+ \cos\left(\frac{m\pi y}{LTS_{(o,i)}}\right) - D_1^+ \sin\left(\frac{m\pi y}{LTS_{(o,i)}}\right) \right) \\ * \left(E_1^+ \frac{y}{LTS_{(o,i)}} - G_1^+ \left(1 - \frac{y}{LTS_{(o,i)}}\right) \right) \end{array} \right] e^{-\lambda_m^2 t} \quad (3.13)$$

$$\frac{dT_{TP}(y,t)}{dT} = \left[\begin{array}{l} \left(B_2^+ \cos\left(\frac{m\pi y}{LTP_{(o,i)}}\right) - D_2^+ \sin\left(\frac{m\pi y}{LTP_{(o,i)}}\right) \right) \\ * \left(E_2^+ \frac{y}{LTP_{(o,i)}} - G_2^+ \left(1 - \frac{y}{LTP_{(o,i)}}\right) \right) \end{array} \right] e^{-\lambda_m^2 t} \quad (3.14)$$

Los valores de B_1^+ , B_2^+ , D_1^+ , D_2^+ , E_2^+ , E_1^+ , G_1^+ y G_2^+ se presenta su desarrollo a continuación. Para el cálculo de dichos parámetros se considera como h_{SC} el coeficiente global de transferencia de calor de la cara interna del techo secundario (W/m^2K), k_{TS} la conductividad térmica de la cara externa del techo secundario (W/mK), T_{sep} la temperatura del espacio entre los dos techos (K), $T_{sol-aire TS}^s$ es la temperatura sol – aire simulada del techo secundario (K), h_{TS} es el coeficiente global de transferencia de calor de la cara externa del techo secundario (W/m^2K), h_{PC} corresponde al coeficiente global de transferencia de calor de la cara interna del techo principal (W/m^2K), k_{TP} es la conductividad térmica de la cara externa del techo principal (W/mK), T_a es la temperatura interna del recinto, h_{TP} es el coeficiente global de transferencia de calor de la cara externa del techo principal (W/m^2K) y por ultimo T_{sep}^s es la temperatura simulada de la separación entre techos.

$$B_1^+ = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2}{m^2 \pi^2} (T(L_{TS}, 0) - T(0,0)) (\cos m \pi - 1) \right] \quad (3.15)$$

$$D_1^+ = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2}{m \pi} \cdot T(L_{TS}, 0) (\cos m \pi - 1) \right] \quad (3.16)$$

$$E_1^+ = \left[\frac{\frac{h_{SC}}{k_{TS}} T_{sep}}{\frac{4}{L_{TS}} T(L_{TS}, 0) + \frac{4h_{SC}}{\pi^2 k_{TS}} (T(L_{TS}, 0) - T(0,0))} \right] \quad (3.17)$$

$$G_1^+ = \left[\frac{\frac{h_{TS}}{k_{TS}} T_{sol-aire TS}^s}{\frac{4}{L_{SR}} T(L_{SR}, 0) + \frac{4h_{TS}}{\pi^2 k_{TS}} (T(L_{SR}, 0) - T(0,0))} \right] T_{sol-aire TS}^s \quad (3.18)$$

$$B_2^+ = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2}{m^2 \pi^2} (T(L_{TP}, 0) - T(0,0)) (\cos m \pi - 1) \right] \quad (3.19)$$

$$D_2^+ = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2}{m \pi} \cdot T(L_{TP}, 0) \cdot (\cos m \pi - 1) \right] \quad (3.20)$$

$$E_2^+ = \left[\frac{\frac{h_{PC}}{k_{TP}} \cdot T_a}{\frac{4}{L_{TP}} \cdot T(L_{TP}, 0) + \frac{4h_{PC}}{\pi^2 k_{TP}} \cdot (T(L_{TP}, 0) - T(0,0))} \right] \quad (3.21)$$

$$G_2^+ = \left[\frac{\frac{h_{TP}}{k_{TP}} \cdot T_{sep}^s}{\frac{4}{L_{PR}} \cdot T(L_{PR}, 0) + \frac{4h_{PR}}{\pi^2 k_{TP}} \cdot (T(L_{PR}, 0) - T(0,0))} \right] T_{sep}^s \quad (3.22)$$

En la Figura 3.16. se aprecia que el techo de una edificación alcanza los 50 °C, mientras que al usar un techo ventilado disminuye la radiación incidente sobre esta componente derivando en una temperatura de 30 °C, esto significa una disminución de 20 °C. Donde s_TV es la temperatura del techo de la cara externa sin la implementación del sistema pasivo, mientras que, C_TV corresponde a la temperatura del techo con el techo ventilado. Dichos resultados se obtuvieron del modelo al momento de desarrollar la simulación empleando las ecuaciones presentadas anteriormente.

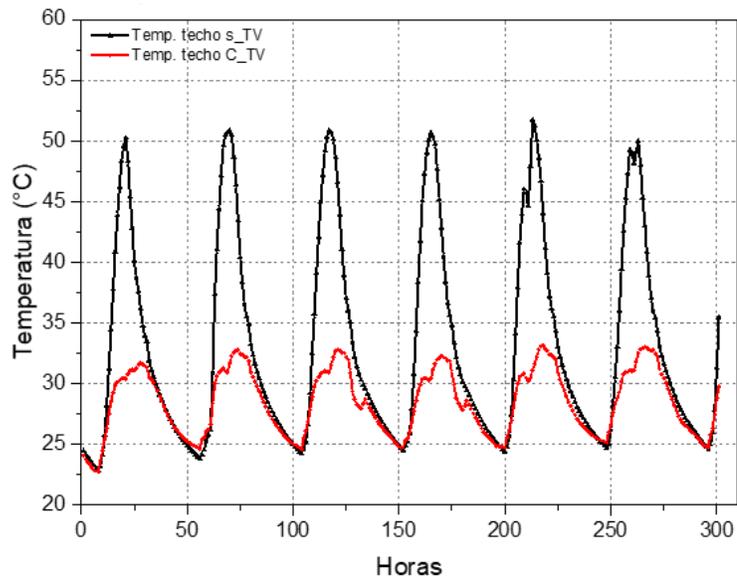


Figura 3. 16. Comportamiento de la temperatura de la cara externa de la edificación (Elaboración propia).

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 3.17. se exhibe el diagrama de flujo describiendo la metodología explicada con anterioridad.

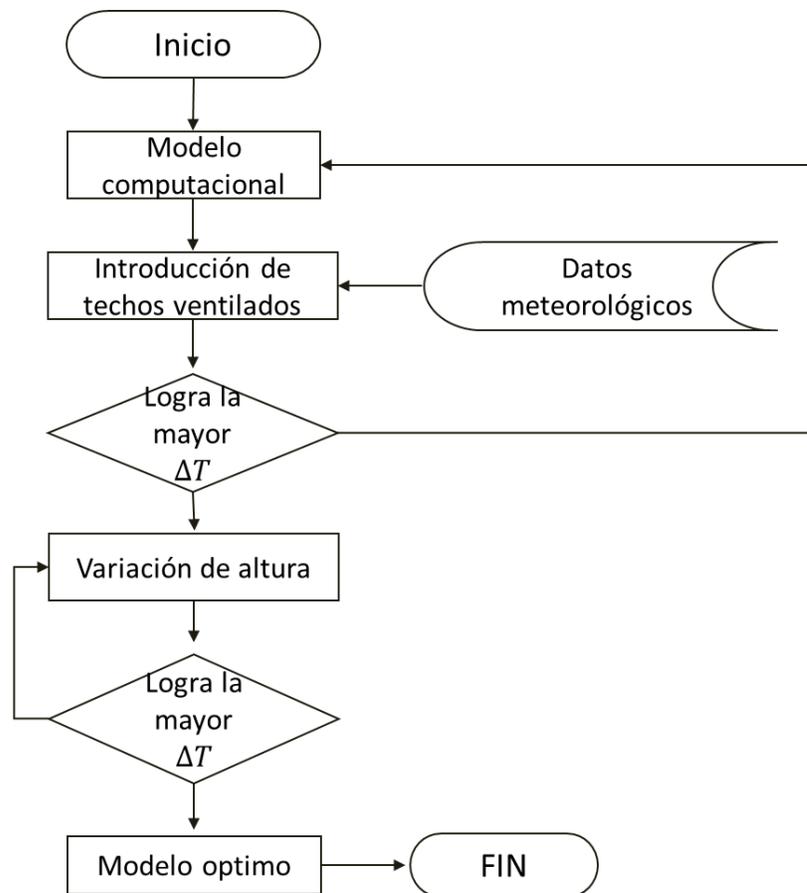


Figura 3. 17. Diagrama de flujo de la metodología de implementación de techos ventilados.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan las mediciones experimentales de la zona de estudio, así como el análisis en la verificación del modelo computacional. Así mismo, se presentan los análisis en el comportamiento de la temperatura interna del recinto al implementarse los techos ventilados a lo largo del año bajo diferentes configuraciones de materiales y alturas de operación. Por último, se escoge el modelo con mejor comportamiento para realizar el análisis económico estudiando si es redituable el uso de esta tecnología bajo condiciones de clima cálido subhúmedo.

4.1. Variables meteorológicas y datos experimentales de la zona de estudio

En la Figura 4.1 se aprecian los datos adquiridos mediante la estación de medición y el *Datalogger* HOBO, esto para analizar el comportamiento de la temperatura interior en el recinto durante los meses de mayo y junio. Dichos meses se escogieron debido a que en la región de Mérida son los más calurosos durante el año. De igual manera se presenta el porcentaje de tiempo que el recinto se encuentra en el rango de confort térmico. Para realizar dicho análisis se toma en consideración el total de mediciones recabados (7140 aproximadamente). Posteriormente, se catalogó el número de datos en los cuales la temperatura interior del recinto se encuentra en el rango de temperaturas (24 °C – 28 °C), finalizando con la división de dicho número de datos entre las mediciones totales.

En la Figura 4.1 (a) se distingue que, con los materiales implementados en la construcción, el cuarto secundario presenta una temperatura interna promedio de 31.5 °C, teniendo una sensación térmica adecuada el 6.63 % del tiempo. Dicho comportamiento se debe a que los materiales utilizados en la construcción tienen un alto índice de retención de calor. Por otro lado, se tiene que el área de ventanas no es el adecuado para su correcta ventilación. En la Figura 4.1 (b) se exhibe la comparativa de la temperatura ambiente e interna ahora respecto a la sala. En este análisis se tiene que la temperatura máxima se encuentra cercana a los 38 °C en diversos lapsos de tiempo durante el periodo de evaluación. De estos

datos se tiene únicamente que el 11.4 % del tiempo la temperatura interna del recinto se encuentra en el rango adecuado para la sensación térmica. En esta parte de la edificación se tienen fenómenos similares al cuarto secundario por lo cual la temperatura interna en promedio ronda los 31 °C. En la Figura 4.1 (c) se observa la comparativa de temperatura, ahora respecto al cuarto principal. Se contempla que la temperatura tiene un comportamiento promedio de 28 °C, encontrándose en el rango de la sensación térmica adecuada el 52 % del tiempo en los meses de mayo y junio. Sin embargo, dicho fenómeno se relaciona con el uso del equipo de aire acondicionado por parte de los ocupantes de la vivienda, en la búsqueda de la disminución de la temperatura hasta lograr su comodidad. En la Figura 4.1 (d) se exhibe en un rango de 2 semanas el comportamiento de la temperatura ambiente respecto a la temperatura del cuarto principal, para la mejor apreciación del comportamiento de la temperatura interna.

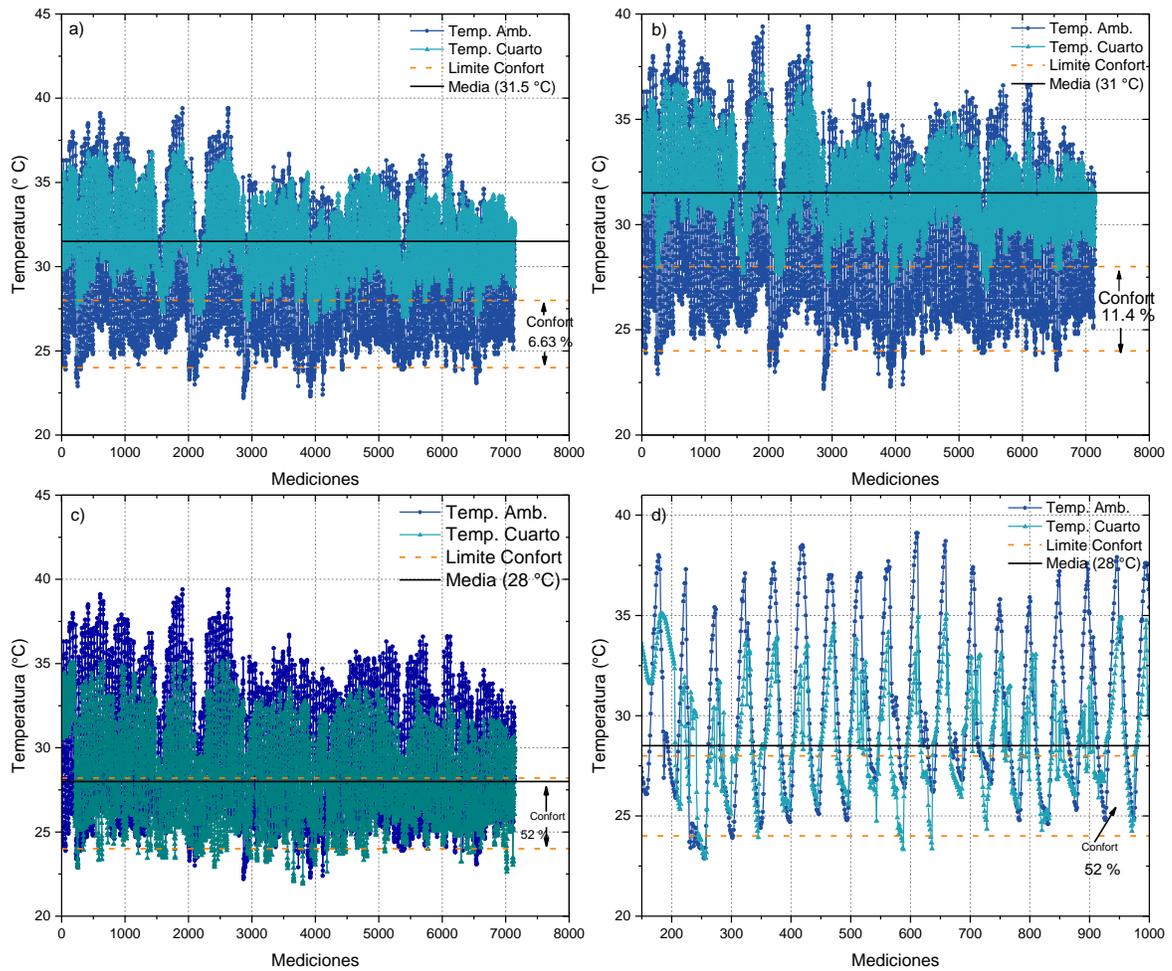


Figura 4. 1. Contraste de temperatura ambiente respecto: a) Temperatura interna en el cuarto secundario; b) Temperatura interna en el comedor; c) Temperatura interna en el cuarto principal; d) Temperatura interna en el cuarto principal en un periodo de 2 semanas.

4.2. Validación del modelo con los datos experimentales

Con las mediciones experimentales de la temperatura interna en las diferentes zonas, se procede a validar el modelo computacional bajo la normativa presentada en el apartado 3.3.3. En la Tabla 4.1 se observan los valores estadísticos del modelo; contrastando sus valores respecto a la Tabla 3.3, se determina que el modelo de la vivienda cumple los requisitos internacionales para poder predecir el comportamiento de la temperatura interna a lo largo del año.

Tabla 4. 1. Parámetros de validación del modelo realizado bajo la normativa internacional

ZONA	Estadístico				
	MBE (%)	RMSE (%)	ASHRAE	IPMVP	FEMP
Temperatura Sala	1.5814	4.22			
Humedad Sala	8.92	11.13			
Temperatura Cuarto	0.276	4.95			
Humedad Cuarto	9.5	17.72			

En la Figura 4.2 se aprecia el comportamiento de la temperatura simulada respecto a los datos experimentales. En ella se puede analizar que la temperatura real de la edificación en el comedor es de 31.5 °C, con una mínima y máxima de 29.3 °C y 35 °C respectivamente; mientras que el modelo presenta en este mismo espacio una temperatura promedio de 30.8 °C, con mínimos y máximos de 28 °C y 34 °C. En el cuarto los datos experimentales presentan un promedio de 31.5 °C, con temperaturas mínimas y máximas de 28.5 °C y 35.2 °C respectivamente; contrastando con el modelo computacional, el cual tiene para esta zona una temperatura promedio de 31.5 °C, una temperatura mínima de 29 °C y máxima de 34 °C.

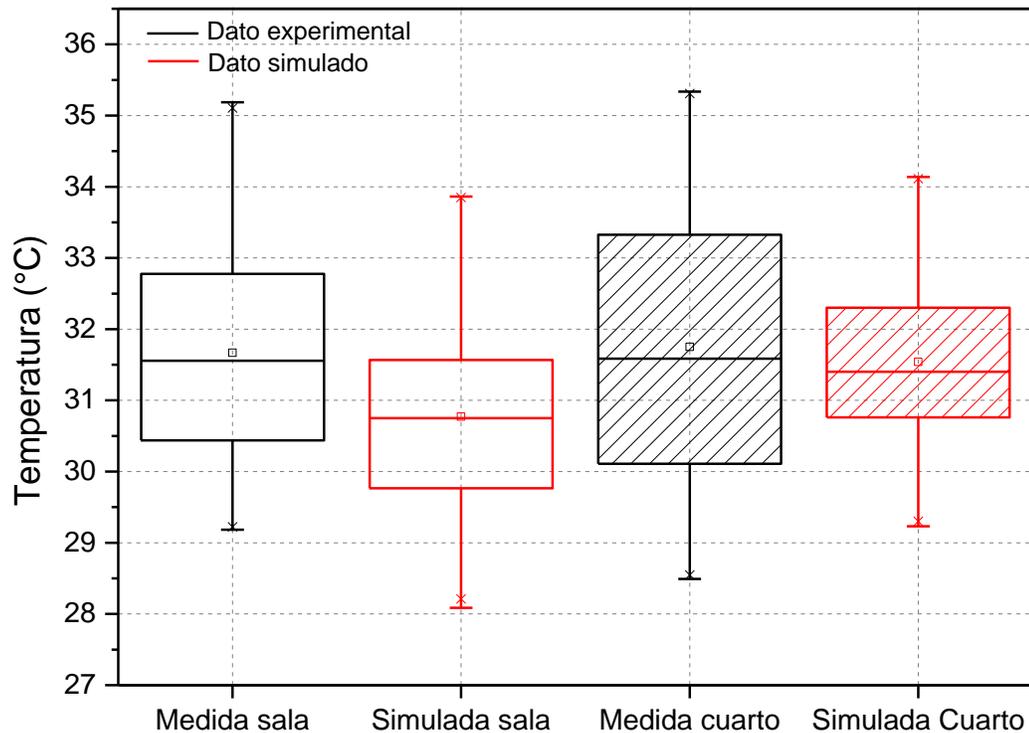


Figura 4. 2. Comparativa de la temperatura experimental vs simulada.

La Figura 4.3 entrega el mismo análisis ahora con relación a la humedad relativa. Se contempla que en el comedor la humedad relativa recabada por el sensor HOBO tiene un comportamiento promedio del 72 % de humedad, el modelo computacional exhibe una humedad del 76 % a lo largo del rango de tiempo. En el caso del cuarto, la humedad relativa experimental se mantiene con el 60 %; mientras que el modelo arroja una humedad relativa del 75 %. Esta dispersión se ocasiona a diferentes patrones de los usuarios con base a las acciones realizadas en materia de ventilación como: el porcentaje de abertura de ventanales, el uso de cortinas o materiales generadores de sombra y el uso de equipos de ventilación que el modelo computacional no puede simular; así mismo, tiene efecto, la presencia de las personas, y diversas actividades realizadas en el día a día por los usuarios.

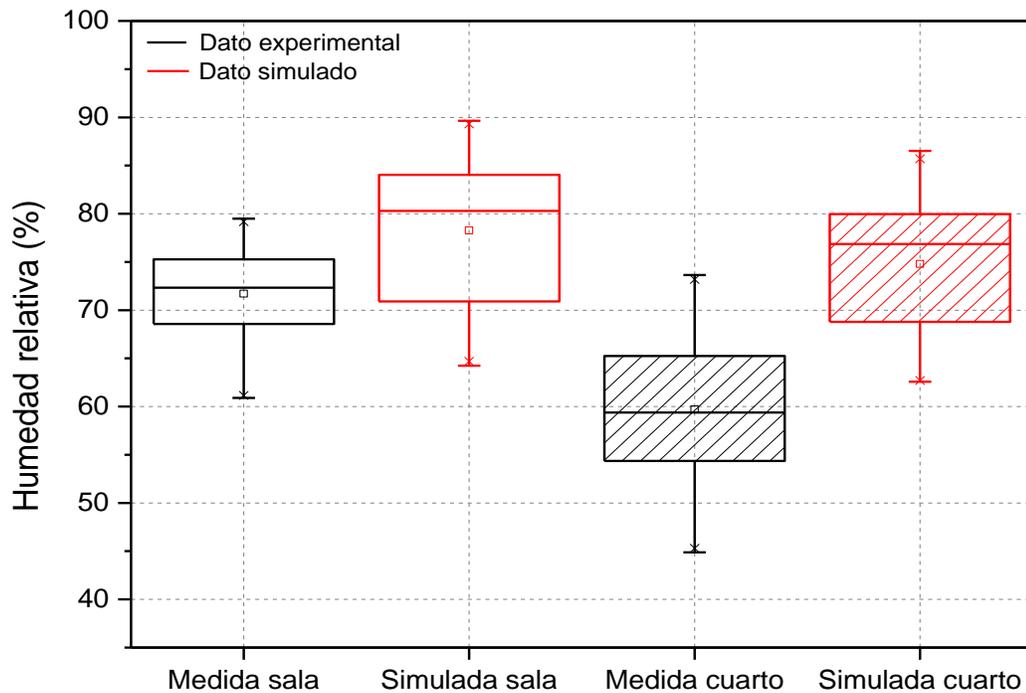


Figura 4. 3. Comparativa de la humedad relativa experimental vs simulada.

La Figura 4.4 (a), manifiesta el comportamiento de la temperatura simulada respecto a la experimental del comedor en un periodo de 9 días. En ella se observa un comportamiento similar de los datos proporcionados por el software, sin embargo, se logra distinguir que las temperaturas de la simulación presentan un pico máximo menor respecto a los datos experimentales. Mientras que la Figura 4.4 (b), exhibe el contraste de la temperatura simulada con base a la experimental del cuarto. Es apreciable que los datos experimentales tienen un rango mayor respecto a sus máximos y mínimos durante el recabado de datos, sin embargo, el comportamiento de las temperaturas entregadas por el software se asemeja a las experimentales. El desfase en las temperaturas mínimas de los datos experimentales es ocasionado por los patrones mencionados anteriormente que tienen los ocupantes de la vivienda. De igual forma, es importante recalcar que los materiales en la construcción no son homogéneos en sus parámetros térmicos puesto que no se tiene una estandarización

en su realización; cosa que afecta en la conductividad y almacenamiento térmico. Por lo cual, el software no logra imitar el comportamiento exacto en la temperatura.

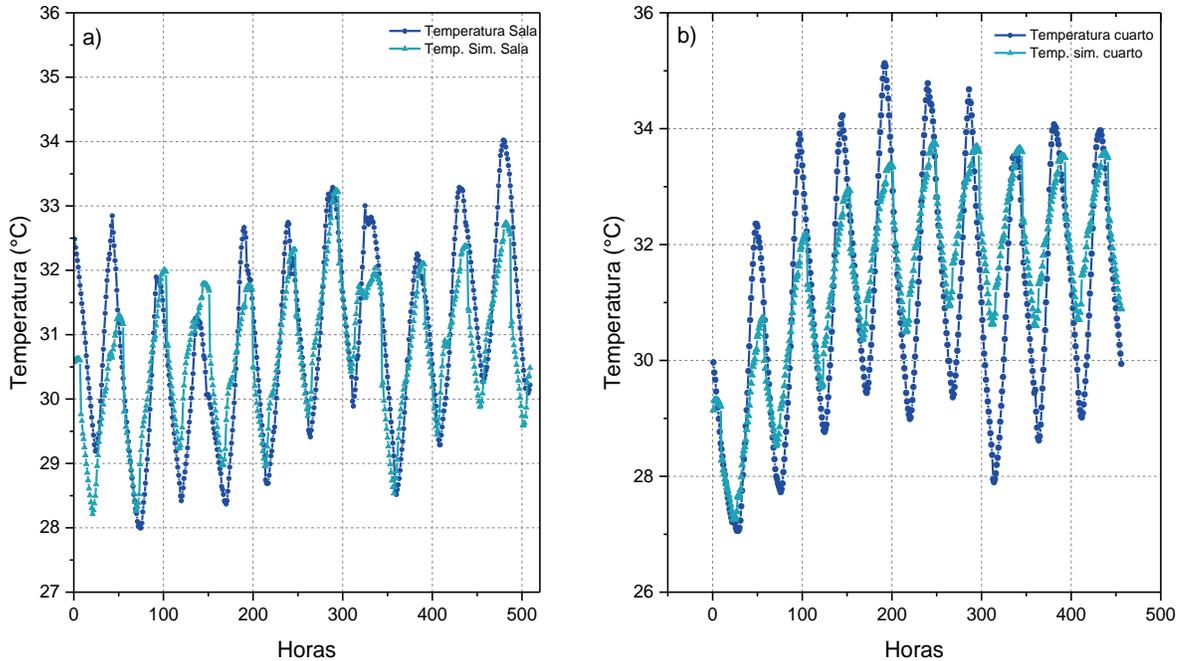


Figura 4. a) Comparativa de la temperatura simulada respecto a la experimental del comedor de la zona de estudio; b) Comparativa de la temperatura simulada respecto a la experimental del cuarto de la zona de estudio.

4.3. 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 considerando al 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.

4.3.1. Techo ventilado implementando láminas de zinc.

En esta sección se presenta la evaluación del primer material en el uso de techos ventilados “lámina de Zinc” a diversas alturas (30, 50, 60 y 90 cm). El cuarto tiene las dimensiones de 3.65 m x 4.28 m; en la Tabla 4.2 se presentan las características de la lámina de estudio. Es importante señalar que por sus características de área se necesita del uso de 3 láminas.

Tabla 4. 2. Características de lámina de Zinc

Espesor (mm)	0.44
Ancho (m)	1.05
Largo (m)	3.66
Conductividad (W/m*K)	116
Densidad (Kg/m ³)	7, 140
Calor específico (J/Kg*K)	390

La Figura 4.5 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. Es evidente que se logra una disminución en la temperatura interior al implementar este sistema pasivo, logrando tener la temperatura en el rango de confort térmico. De igual manera, se observa que la altura del segundo techo presenta afectaciones en el comportamiento de la temperatura, siendo 30 cm el de mejor desempeño. 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 convección 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.

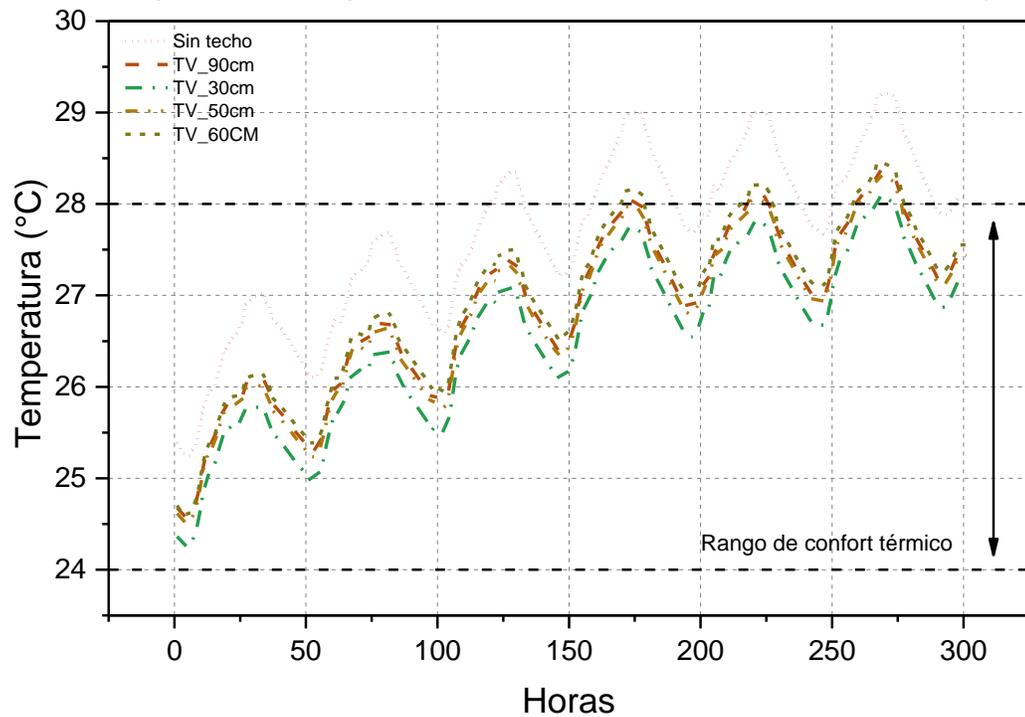


Figura 4. 5. Contraste de la temperatura interna al utilizar el techo ventilado (Zinc) a distintas alturas.

En la Tabla 4.3 se presenta el comportamiento de la temperatura interior del cuarto sin implementar dicho sistema pasivo a lo largo del año contrastándola con el uso de los techos ventilados. A lo largo de los meses es apreciable que el uso de techos ventilados reduce la temperatura cada mes en promedio 1 °C. De igual manera se aprecia que en ciertos meses la temperatura tiene un mejor comportamiento con una altura de 50 cm, esto es debido a una mayor distancia entre la lámina y el techo favoreciendo los procesos convectivos. Sin embargo, el mejor comportamiento de la temperatura se obtiene con el techo ventilado a 30 cm como se mencionó anteriormente.

Tabla 4. 3. Temperatura interna del cuarto con techo ventilado de Zinc

MES		Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct.
SIN	Max.(°C)	27.0	31.2	32.5	33.5	35.1	33.4	32.7	33.5	32.6	31.4
TECHO	Min.(°C)	21.3	24.19	27.4	28.6	31.3	27.2	27.9	27.6	27.8	29.8
	ΔT	5.6	6.9	5.1	4.8	3.7	6.2	4.8	5.8	4.8	1.5
Techo de Zinc a 30 cm	Max.(°C)	26.8	30	31	32.07	34	32.9	31.8	31.8	31.2	30.4
	Min.(°C)	21.8	23.3	26.5	28.0	30.35	27.3	27.8	27.3	27.3	29.05
	ΔT	4.9	6.6	4.4	4.03	3.57	5.6	4.02	4.7	3.9	1.4
Techo de Zinc a 50 cm	Max.(°C)	27.06	30.1	31.2	32	33.5	32.5	31.5	32	31.3	30.6
	Min.(°C)	22	23.6	26.7	28.1	30.2	27	27.3	27.4	27.4	29.2
	ΔT	5.03	6.5	4.45	3.9	3.3	4.5	4.2	4.6	3.9	1.4
Techo de Zinc a 60 cm	Max.(°C)	27.09	30.2	31.3	32.1	33.9	32.8	31.7	32.1	31.4	30.7
	Min.(°C)	21.8	23.6	26.7	28.1	30.4	27.1	27.6	27.3	27.4	29.3
	ΔT	5.2	6.5	4.5	4.06	3.4	5.6	4.1	4.8	4	1.3
Techo de Zinc a 90 cm	Max.(°C)	27.06	30.2	31.2	32.1	33.8	32.7	31.6	32.07	31.3	30.6
	Min.(°C)	22.01	23.6	26.8	28.1	30.4	27.2	27.7	27.4	27.4	29.2
	ΔT	5.05	6.5	4.45	3.9	3.4	5.4	3.9	4.6	3.9	1.4

Por último, en la Figura 4.6, se observa el comportamiento de la temperatura de manera mensual del cuarto respecto a los techos ventilados. 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. El dato interesante es durante el mes de agosto, en el cual, la temperatura interior es inferior respecto a las demás configuraciones de techo ventilado. Además, a mayor altura aumentan los costos de estructura.

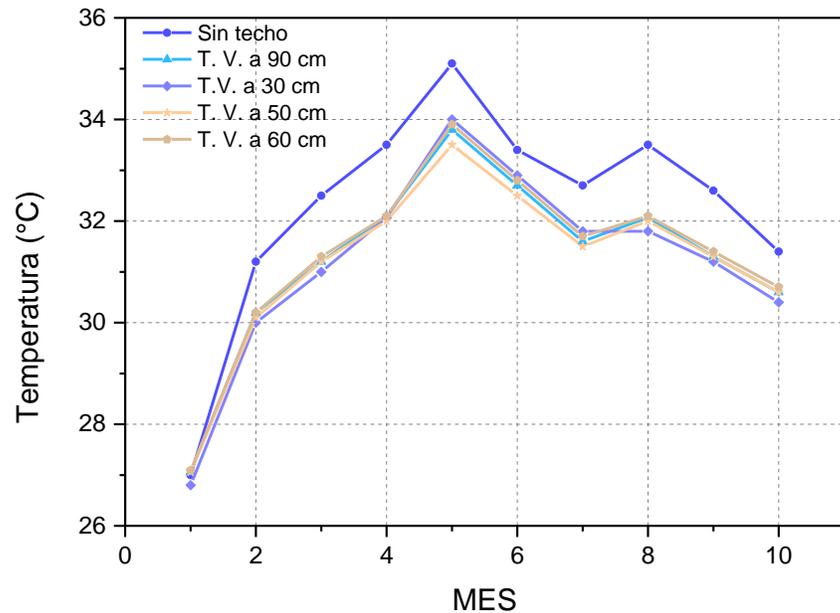


Figura 4. 6. Comportamiento de la temperatura interna del cuarto mensual comparando el uso del techo ventilado de lámina de Zinc a diferentes alturas.

4.3.2. Techo ventilado implementando láminas Ultralam.

En esta sección se presenta la evaluación del segundo material en el uso de techos ventilados “lámina Ultralam” a las alturas que se está trabajando. De igual forma que el análisis realizado con la lámina de Zinc primero se procedió a la búsqueda de este material el cual se presenta de manera comercial. Esta lámina 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. De la misma manera que en la lámina de Zinc para su posterior análisis económico se considera el uso de 3 láminas.

Tabla 4. 4. Características de lámina Ultralam

Espesor (mm)	0.22
Ancho (m)	1.26
Largo (m)	4.27
Conductividad (W/m*K)	7.73
Densidad (Kg/m ³)	5
Calor específico (J/Kg*K)	820

En la Figura 4.7, se observa el comportamiento de la temperatura interior del cuarto respecto al de techos ventilados utilizando la lámina de Ultralam. De igual forma que el caso anterior, se observa a simple vista como la temperatura disminuye al usar esta tecnología cercana al grado centígrado. También y de forma similar al caso anterior, se obtiene que la altura ideal para implementar este material es 30 cm.

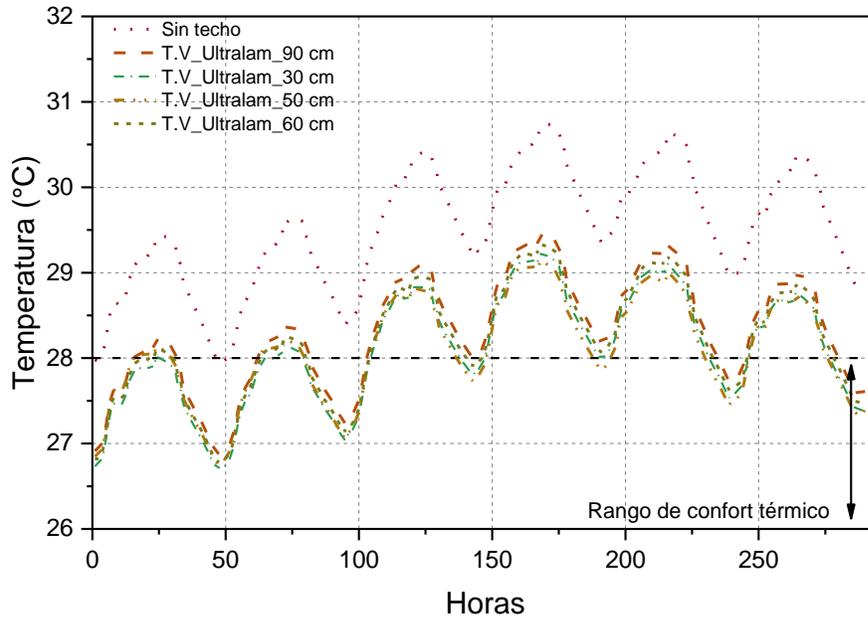


Figura 4. 7. Contraste de la temperatura interna al utilizar el techo ventilado (Ultralam) a distintas alturas.

En la Tabla 4.5, se presenta el comportamiento de la temperatura interior del cuarto sin implementar el sistema pasivo a lo largo del año contrastándola con el uso de los techos ventilados. Se observa una disminución en la temperatura interior en promedio de 0.8 °C y que la altura ideal es 30 cm. El comportamiento de este material es similar a la lámina de Zinc, sin embargo, presenta un ligero aumento en la temperatura interior del cuarto. Este fenómeno se presenta debido a que si bien es cierto es un material compuesto en cierto porcentaje con aislante, su conductividad térmica es menor a la lámina de Zinc, ocasionando retención de calor por la radiación incidente, derivando en una mayor transferencia de calor por procesos convectivos al techo teniendo como impacto el aumento en la temperatura interior.

Tabla 4. 5. Temperatura interna del cuarto con techo ventilado de lámina Ultralam

MES		Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct.
SIN	Max.(°C)	27.0	31.2	32.5	33.5	35.1	33.4	32.7	33.5	32.6	31.4
TECHO	Min. (°C)	21.3	24.19	27.4	28.6	31.3	27.2	27.9	27.6	27.8	29.8
	ΔT	5.6	6.9	5.1	4.8	3.7	6.2	4.8	5.8	4.8	1.5
Techo de Ultralam a 30 cm	Max.(°C)	27.1	30.2	31.3	32.2	33.9	32.6	31.5	32.1	31.4	30.7
	Min. (°C)	21.8	23.5	26.7	28	30.3	27.1	27.5	27.3	27.4	29.1
	ΔT	5.3	6.5	4.6	4.1	3.5	5.7	4.25	4.86	4.02	1.37
Techo de Ultralam a 50 cm	Max.(°C)	27.2	30.3	31.2	32.1	34	32.8	31.64	32.06	31.3	31
	Min. (°C)	22.03	23.6	26.8	28.2	30.5	27.3	27.7	27.4	27.4	29.2
	ΔT	5.03	6.5	4.45	3.9	3.49	5.4	3.9	4.6	3.9	1.8
Techo de Ultralam a 60 cm	Max.(°C)	27.2	30.5	31.4	32.3	34	32.8	31.76	32.2	31.5	30.8
	Min. (°C)	21.7	23.8	26.7	28.2	30.3	27.07	27.51	27.2	27.45	29.3
	ΔT	5.4	6.7	4.6	4.1	3.53	5.8	4.24	4.9	4.06	1.4
Techo de Ultralam a 90 cm	Max.(°C)	27.2	30.43	31.54	32.26	33.93	32.89	31.78	32.26	31.58	30.8
	Min. (°C)	21.7	23.82	26.86	28.08	30.38	27.04	27.52	27.29	27.48	29.4
	ΔT	5.46	6.59	4.67	4.17	3.54	5.85	4.25	4.97	4.1	1.42

En la Figura 4.8, se exhibe el comportamiento de la temperatura interior a lo largo del año comparando el uso del sistema pasivo. 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.

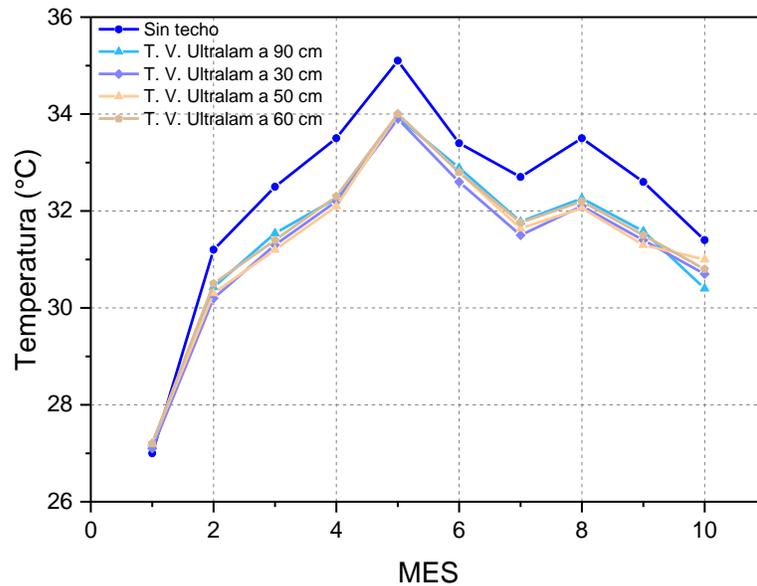


Figura 4. 8. Comportamiento de la temperatura interna del cuarto mensual comparando el uso del techo ventilado de lámina de Ultralam a diferentes alturas.

4.4. Consumo de energía para climatización del recinto

En el apartado anterior se concluyó que la altura óptima para el sistema de techo ventilado es de 30 cm. Con esta altura se procederá a calcular la disminución de calor al cuarto, para su posterior análisis en la reducción de energía necesaria en climatización. De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 3, el complemento de *Open Studio – Energy Plus*, nos permite seleccionar las variables de salida del modelo, por lo cual se escogió la ganancia total de energía del recinto (Q_T). La ganancia de energía a lo largo del año considera todos los fenómenos reflejados en la ecuación 3.1. De igual manera se conoce la temperatura ambiente (T_o) y la temperatura interna del recinto (T_a). Con estos datos se procede a calcular el coeficiente de transferencia de calor de la superficie, como se exhibe en la ecuación 4.1:

$$p = \frac{Q_T}{(T_o - T_a)} \quad (4.1)$$

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 4.2. 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 4.3).

$$Q_T = p * (T_o - T_T) \quad (4.2)$$

$$Q_T = \int_a^b \left[f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a} (x - a) \right] dx \quad (4.3)$$

En el desarrollo de este análisis se considera la energía necesaria para alcanzar la temperatura objetivo (T_T) de 27 °C y 22 °C: Dichas temperaturas se escogieron, debido a que la primera se encuentra dentro del rango de confort térmico, mientras que, la segunda corresponde al deseo de las personas de obtener la sensación de frío, por lo cual se coloca el termostato del equipo de refrigeración al mínimo aumentando el consumo de energía. En la Figura 4.9, se ofrece la comparativa de energía requerida para el enfriamiento del cuarto por cada mes. En la figura 4.9 (a) se aprecia 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. En esta gráfica es evidente que durante el periodo de mayo – agosto se genera el mayor consumo de energía, lo cual está relacionada con los meses más calurosos en la región. Contrastando estos resultados respecto al uso del techo ventilado, se distingue una disminución en el consumo eléctrico de aproximadamente un 30 %, presentando un mejor comportamiento con la lámina de Zinc. Esta reducción en el consumo de energía se ocasiona por factores relacionados con la absorción y retención de calor en el techo. Como se explicó anteriormente, el techo ventilado actúa como una sombra disminuyendo la ganancia de calor al techo de la construcción, por lo cual se logra una disminución en la energía calorífica que repercute en el aumento de temperatura en el interior del recinto. En la Figura 4.9 (b), se exhibe el mismo análisis, considerando ahora la energía necesaria para mantener el interior del cuarto a 22 °C. En la figura se distingue que

con el objetivo de disminuir la temperatura al valor deseado se requiere cerca del doble de energía respecto al uso del equipo de acondicionamiento eficiente. De igual manera este alto consumo energético se presenta debido a las condiciones climáticas de Mérida. La temperatura media anual es de 26 °C, logrando temperaturas máximas superiores a los 36 °C en diversas ocasiones a lo largo del año, por lo cual, se está requiriendo que el equipo logre una temperatura menor a las condiciones climáticas de la zona demandando un mayor consumo de energía con el fin de lograr este propósito.

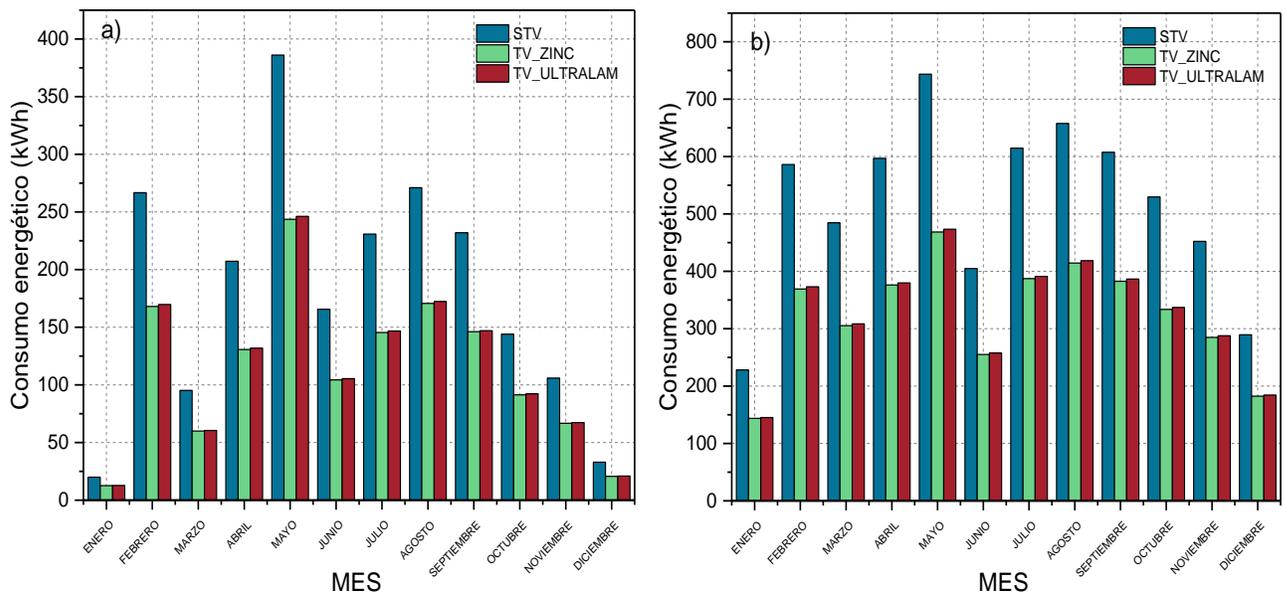


Figura 4. 9. Energía necesaria mensual para: a) La obtención del confort térmico 27 °C; b) La obtención de 22 °C en el interior del cuarto.

Una vez que se tiene el consumo energético se procede a calcular el coste monetario que conlleva usar el equipo de climatización para disminuir la temperatura del cuarto en los escenarios de estudio. El cálculo se realizó utilizando la tarifa y los costes de energía mencionados en el capítulo 2, se toma en consideración que la facturación de la CFE se emplea la segunda semana de cada mes. En la Tabla 4.6 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. En el caso de la búsqueda de la temperatura de confort térmico, es apreciable que el bimestre diciembre – enero, el costo monetario de implementar un equipo de climatización es mínimo. Esto corresponde a que en estos meses la temperatura

ambiente es menor a los 27 °C, por lo cual no se requiere equipo de climatización. Sin embargo, en la misma tabla es evidente que durante el mismo periodo de tiempo, al requerir que el cuarto se mantenga a una temperatura de 22 °C, se tiene un costo mayor de energía, debido a que el cuarto se encuentra con temperaturas superiores a la deseada. 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. Los dos materiales del techo ventilado presentan un comportamiento similar, la diferencia monetaria en ahorro energético entre los dos materiales se encuentra en 1 % a favor de la lámina de Zinc; por lo que el análisis económico considerando los costos de implementación y el ahorro de energía será el que dictamine cual es el mejor material en la construcción del sistema pasivo.

Tabla 4. 6. Costo de la energía requerida para climatización del cuarto para lograr disminuir la temperatura del cuarto a 27 °C y 22 °C.

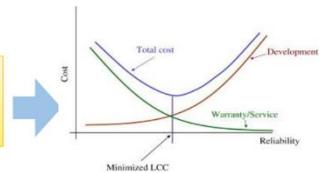
BIMESTRE	STV		TV_ZINC		TV_ULTRALAM	
	27 °C	22 °C	27 °C	22 °C	27 °C	22 °C
Nov - Ene	\$ 44.54	\$ 727.5	\$ 28.06	\$ 305.19	\$ 28.41	\$ 308.52
Ene – Mar	\$ 466.89	\$ 2, 348.68	\$ 205.74	\$ 1, 181.87	\$ 208.28	\$ 1, 203.72
Mar – May	\$ 470.02	\$ 1, 027.07	\$ 285.85	\$ 704.41	\$ 286.49	\$ 712.92
May – Jul	\$ 300.00	\$ 670.54	\$ 185.00	\$ 512.44	\$ 187.00	\$ 518.04
Jul – Sep	\$ 391.85	\$ 721.18	\$ 234.75	\$ 649.94	\$ 236.68	\$ 657.91
Sep – Nov	\$ 229.68	\$ 2, 106.71	\$ 137.00	\$ 1, 030.92	\$ 138.56	\$ 1, 049.37

4.5. Análisis económico

Desde la perspectiva económica se empleó un indicador para determinar la rentabilidad del sistema pasivo. Este estudio se realizó mediante la relación costo – beneficio (C/B), que representa una medida económica para evaluar la relación entre los beneficios de efectuar un proyecto y sus costos (Short, Packey, & Holt, 1995). Para este análisis es importante identificar los costos y beneficios del sistema, los cuales se deben proyectar a la duración del sistema. La ecuación 4.4 explica el desarrollo de la relación C/B, en donde los ingresos o beneficios del proyecto se coloca como numerador, mientras que, los gastos o costos anuales se colocan como denominador; siendo S_j la energía ahorrada en el año, R_j la

energía vendida, O son los costos de operación, M equivale al costo de mantenimiento, I_j es la inversión inicial, V es el valor de salvamento (cuanto se recupera al final del tiempo de vida de la construcción), S_{aux} es la energía adicional requerida. Para el estudio de los techos ventilados no se requiere el uso de R_j, O, V y S_{aux}, lo cual simplifica la ecuación. El resultado de esta división debe ser de mayor o igual a 1. Si se tiene una relación C/B inferior a uno, quiere decir que el proyecto no es viable puesto que se gasta una mayor cantidad de dinero que los beneficios obtenidos. Si la relación C/B es igual a uno, se interpreta que durante el tiempo que se ejecuta el proyecto, la inversión final es equivalente a la ganancia; el objetivo es que la relación sea superior a uno, esto significa la obtención de mayores beneficios respecto a los costos del proyecto, durante el tiempo que se encuentre en funcionamiento el sistema (Ambriz García & Paredes Rubio, 1993).

Es un método que expresa la relación entre los beneficios de adquirir un equipo o efectuar un proyecto y sus costos.
Los beneficios ocurren cuando la relación C/B > 1



$$B_j = (S_j + R_j)$$

$$\frac{B_1}{(1+i)^1} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n}$$

$$\frac{C_1}{(1+i)^1} + \frac{C_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

$$C_j = (O_j + M_j - V_j + S_{aux,j})$$

$$C/B = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\frac{(S_j + R_j)}{(1+i)^j} \right]}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{(I_j + O_j + M_j - V_j + S_{aux,j})}{(1+i)^j} \right]}$$

(4.4)

La Tabla 4.7 enumera los supuestos de este estudio para el desarrollo del análisis económico. Las presentes consideraciones se basan en información correspondiente al mercado mexicano.

Tabla 4. 7. Parámetros económicos considerados para el estudio de factibilidad del sistema pasivo basado en el mercado mexicano.

Suposición	Valor
Lámina de Zinc (3 unidades)	\$ 540.00
Lámina Ultralam (3 unidades)	\$ 1, 200.00
Costo de instalación	\$ 1, 500.00
Mantenimiento	\$ 1, 800.00
Valor de salvamento	\$ 100.00
Tasa anual de costo de energía	10 %

Considerando los valores de la Tabla 4.7, en el análisis económico y tomando en consideración que la duración del proyecto es de 5 años, en la Tabla 4.8, se observa la relación C/B de los dos materiales implementados, así como los escenarios energéticos explicados con anterioridad. En esta se aprecia que, bajo ambos escenarios, los materiales presentan valores positivos, lo cual significa que el sistema entrega ganancias al final de los 5 años del proyecto. En el primer escenario con el ahorro energético al buscar la temperatura de confort térmico, la lámina de Zinc al finalizar el proyecto se recupera el 30 % de la inversión inicial, mientras que la lámina Ultralam tiene una disminución del 10 % en ganancias. Esto es debido, a que la lámina Ultralam tiene un mayor costo de inversión, así mismo, la disminución de temperatura es inferior respecto al Zinc por lo cual, si bien es cierto, que es sistema es redituable, se opta por la lámina de Zinc. En el segundo escenario que implica la disminución de temperatura del cuarto a 22 °C, es más evidente la ganancia de los sistemas; al implementar la lámina de Zinc se tiene que al final del proyecto, la inversión del sistema se recupera cuatro veces, la lámina Ultralam recupera su costo de construcción 3.5 veces; con esto podemos determinar que, bajo las condiciones de Mérida, el material con mejor rendimiento es la lámina de Zinc. El techo ventilado obtiene estas ganancias debido a que el costo de inversión no es significativo, sin embargo, reduce la ganancia de calor en un 30 % en la envolvente del edificio, ocasionando que la temperatura interna del cuarto presente una reducción de 1 °C a lo largo de año. Esta disminución en la temperatura ocasiona que el equipo de climatización opere de manera más eficiente para alcanzar las temperaturas deseadas.

Tabla 4. 8. Relación Costo - Beneficio al implementar el techo ventilado en los dos materiales bajo los dos escenarios de refrigeración de espacios (27 °C y 22 °C).

C/B	Relación del costo en sistema que busca los 27 °C		Relación del costo en sistema que busca los 22 °C	
	TV_ZINC	TV_ULTRALAM	TV_ZINC	TV_ULTRALAM
	1.3	1.2	5	4.5

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. Los resultados demuestran que la implementación del modelo considerando parámetros constructivos del edificio de acuerdo con la normativa vigente en materia de construcción y empleando variables meteorológicas de la zona de estudio permite generar bases de datos de diversos factores a tomar a consideración en la búsqueda de la sensación térmica adecuada y la eficiencia energética en construcciones residenciales. Una vez validado el modelo bajo normativa internacional en sistemas energéticos, la arquitectura del sistema demostró ser útil para observar el comportamiento de los elementos constructivos empleados en el diseño y construcción de las viviendas y su impacto en la fluctuación de la temperatura interna del edificio; posteriormente se analizó el consumo energético requerido para obtener la adecuada sensación térmica y el coste monetario que se requeriría. Este gasto energético se contrastó con la energía requerida en la climatización de espacios si se implementa un sistema pasivo, específicamente, techos ventilados. En el diseño de los techos ventilados, se analizó el comportamiento de dos materiales que se encuentran en la industria, así como, la variación de la altura con el propósito de encontrar el diseño óptimo; posteriormente se concluyó con un análisis económico verificando la factibilidad del proyecto.

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 40 °C. Al realizar el estudio se analizó que las envolventes afectan al incremento de la temperatura en el interior del edificio; sin embargo, el techo es la componente de la envolvente de mayor relevancia en este efecto, debido a que es el encargado del 50 % de la ganancia de calor de la construcción. Bajo las condiciones de Mérida, Yucatán, el techo alcanza los 50 °C, mientras que, al implementar el techo ventilado se observa una disminución de 20 °C de este elemento constructivo, ocasionando una disminución de 1 °C la temperatura interna de la zona térmica durante el año. Esta

disminución en la temperatura no se ve incrementada en mayor medida por diversos factores, como se mencionó anteriormente, los materiales empleados en la construcción de viviendas de interés social no son los adecuados para el tipo de clima cálido subhúmedo que se presenta en la región, así mismo, el área destinada a ventanales no es el adecuado para permitir el adecuado flujo de aire logrando la disminución de la temperatura del recinto, por último, el clima de Mérida afecta directamente en el gradiente de temperatura; al presentarse temperaturas durante el año superiores a los 29 – 30 °C, el sistema se encuentra limitado en su operación ajustándose a las condiciones ambientales. 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 las temperaturas de 27 – 22 °C, sin la implementación del sistema pasivo, el equipo de refrigeración requiere anualmente 2157 kWh y 6194 kWh respectivamente, 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 - \$ 3, 200.00 de acuerdo con los dos escenarios planteados. Ahora bien, el comportamiento de los materiales del techo ventilado que se analizaron en este estudio (lámina de Zinc y Ultralam), presentan un comportamiento similar, presentando un mejor comportamiento en un 1 % el Zinc, por lo cual, la selección del mejor material se determina bajo el análisis costo – beneficio. Dichos ahorros energéticos y monetarios se contrastan con el coste de implementación de cada material, ya que mientras la inversión inicial del techo ventilado con lámina de Zinc requiere de \$ 3, 040.00, la lámina Ultralam necesita de \$ 3, 700.00. El sistema se proyecta a 5 años que es la vida útil de ambos materiales, por lo cual, al terminar este periodo de tiempo, la lámina de Zinc, bajo el escenario de un consumo energético eficiente recupera el 30 % de la inversión inicial, y bajo el segundo escenario, de un consumo energético alto, el sistema recupera 4 veces su inversión inicial. Si bien es cierto que el segundo material (Ultralam), recupera su inversión bajo un consumo alto de energía 3.5 veces, de acuerdo con la inversión inicial y el comportamiento en la temperatura interna, el material óptimo bajo las condiciones de la zona es la lámina de Zinc.

Referencias

- Abuseif, M., & Gou, Z. (2018). A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. *Energies*, 11(11), 3196. <https://doi.org/10.3390/en11113196>
- 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>
- Akyüz, M., Altuntaş, Ö., & Söğüt, M. (2017). Economic and Environmental Optimization of an Airport Terminal Building's Wall and Roof Insulation. *Sustainability*, 9(10), 1849. <https://doi.org/10.3390/su9101849>
- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2014a). A study of the impact of environmental loads that penetrate a passive skylight roofing system in Malaysian buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 3(2), 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.03.004>
- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2014b). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>
- Allen, L. K., Elias, S., & Lim, C. H. (2008). *Thermal Performance of Roofing Systems in Relation To the Mean Radiant Temperature in Malaysian Residential Buildings* Allen Lau Khin Kiet.
- Ambriz García, J. J., & Paredes Rubio, H. H. (1993). *Administración y ahorro de energía* (Primera Ed; U. A. Metropolitana, ed.). México.
- American Society of Heating, R. and A.-C. E. (2010). *ashrae_standard_55_2013_Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

- ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook-Fundamentals 2017* (ASHRAE, Ed.).
- Ashtiani, A., Mirzaei, P. A., & Haghghat, 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>
- Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109709. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109709>
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Rodríguez-Jiménez, C. E., & Marín, D. (2019). Applying an artificial neural network to assess thermal transmittance in walls by means of the thermometric method. *Applied Energy*, 233–234(August 2018), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.052>
- Blanco, J. M., Buruaga, A., Rojí, E., Cuadrado, J., & Pelaz, B. (2016). Energy assessment and optimization of perforated metal sheet double skin façades through Design Builder; A case study in Spain. *Energy and Buildings*, 111, 326–336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.053>
- Buechler, E., Pallin, S., Boudreaux, P., & Stockdale, M. (2017). Probabilistic modeling of the indoor climates of residential buildings using EnergyPlus. *Journal of Building Physics*, 41(3), 225–246. <https://doi.org/10.1177/1744259117701893>
- 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
- CFE, C. F. de. (2020). Consulta tu tarifa. Retrieved from Tarifa electrica website: https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1

&anio=2018

- Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. *Energy and Buildings*, *64*, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.015>
- Chaudhary, G., New, J., Sanyal, J., Im, P., O'Neill, Z., & Garg, V. (2016). Evaluation of “Autotune” calibration against manual calibration of building energy models. *Applied Energy*, *182*(August), 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.073>
- Chi, D. A., Moreno, D., & Navarro, J. (2017). Design optimisation of perforated solar façades in order to balance daylighting with thermal performance. *Building and Environment*, *125*, 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.007>
- Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2005). Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy*, *79*(2), 183–192.
- CONNUE, C. N. para el U. E. de la E. (2001). Nom-008-Ener-2001. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*, 160. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CONUEE, C. N. para el U. E. de la E. (2014). *NOM-007-ENER-2014*. 2014.
- CONUEE, C. N. para el U. E. de la E. (2018). *Energía y edificaciones en México: Importancia y políticas públicas presentes y futuras*.
- D’Orazio, M., Di Perna, C., & Di Giuseppe, E. (2012). Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy and Buildings*, *55*, 439–451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>
- Daouas, N., Hassen, Z., & Aissia, H. Ben. (2010). Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. *Applied Thermal Engineering*, *30*(4), 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.009>

- Davis Instruments. (2020). Vantage Pro2. Retrieved April 1, 2020, from <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-pro2/>
- del Coz Díaz, J. J., García Nieto, P. J., Domínguez Hernández, J., & Suárez Sánchez, A. (2009). Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM. *Energy and Buildings*, 41(12), 1276–1287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.005>
- Desarrollos, P. (2019). Inversión inmobiliaria en Mérida y el futuro de la ciudad. Retrieved March 20, 2020, from Inversión inmobiliaria en Mérida website: <https://blog.proxima.mx/inversion-inmobiliaria-en-merida-y-el-futuro-de-la-ciudad>
- Dincer, I., Ozgur, C., Kizilkan, O., & Akif Ezan, M. (2015). *Progress in Clean Energy, Volume 2* (Ibrahim Dincer, C. O. Colpan, O. Kizilkan, & M. A. Ezan, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2>
- Energy Efficiency & Renewable Energy. (2020). OpenStudio. Retrieved April 9, 2020, from <https://www.openstudio.net/>
- Energy Efficiency & Renewable Energy. (2020). EnergyPlus | Department of Energy. Retrieved March 31, 2020, from <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>
- Enescu, D. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(May), 1353–1379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175>
- Firfiris, V. K., Martzopoulou, A. G., & Kotsopoulos, T. A. (2019). Passive cooling systems in livestock buildings towards energy saving: A critical review. *Energy and Buildings*, 202, 109368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109368>
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>
- 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/
- Givoni, B. (2011). Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy*, 85(8), 1692–1726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>
- Gobierno de México. (2020). ¿Qué es la COP21 de París? | gob.mx | Gobierno | gob.mx. Retrieved April 18, 2020, from <https://www.gob.mx/gobmx/articulos/que-es-la-cop21-de-paris>
- Gratia, E., & De Herde, A. (2004). Optimal operation of a south double-skin facade. *Energy and Buildings*, 36(1), 41–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.06.001>
- Gupta, N., & Tiwari, G. N. (2016). Review of passive heating/cooling systems of buildings. *Energy Science & Engineering*, 4(5), 305–333. <https://doi.org/10.1002/ese3.129>
- Guslisty, A. A., Malomuzh, N. P., & Fisenko, A. I. (2018). Optimal Temperature for Human Life Activity. *Ukrainian Journal of Physics*, 63(9), 809. <https://doi.org/10.15407/ujpe63.9.809>
- He, B., & Zhu, J. (2018). Constructing community gardens? Residents' attitude and behaviour towards edible landscapes in emerging urban communities of China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.015>
- 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>
- Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., & Simá, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158, 569–579. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.085>

- Hernández Gómez, V. H., & Gálvez, D. M. (2013). Analytical model for double skin roofs. *Applied Thermal Engineering*, 60(1–2), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.057>
- 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.
- INFONAVIT. (2020a). Acerca de nosotros | Infonavit. Retrieved March 27, 2020, from https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/portal/infonavit.web/el-instituto/el-infonavit/acerca-de-nosotros!/ut/p/z1/jY9ND8FAFEV_i0W3fXd8ZdiVMEUjRBo1GympQaojY7R_X5WNRMXbvZdzbu4jSRHJLM5PKrYnncVpuW9kd9sVgD9sszkPZh0ssZgJTMFWPqN1BTQ5IAZgc8F9Dm88mox6QaspGEj-4_8Anj
- INFONAVIT, I. del F. N. de la V. para los T. (2020b). Hipoteca verde | Infonavit. Retrieved April 19, 2020, from https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/portal/infonavit.web/proveedores-externos/para-tu-gestion/desarrolladores/hipoteca-verde!/ut/p/z1/pZJbC4JAEIV_ja_OqLIYb2uYF6QLKNm-hMW2GuqGWf79xJ6CUqF5m-E7M4fDAIMEWJU-c5E2uazSousPjByJigtZ9raDVDH3caOtrFuBzPPhP0AYBBCgP2
- International Energy Agency, I. (2013). *Technology Roadmap “Energy efficient building envelopes.”*

- International Energy Agency, I. (2017). *International Energy Outlook 2017*.
[https://doi.org/www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://doi.org/www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- International Energy Agency, I. (2018a). *Global Energy & CO2 status Report*.
- International Energy Agency, I. (2018b). *Key World Energy Statistics 2018*.
https://doi.org/10.1787/key_energ_stat-2018-en
- International Energy Agency, I. (2019a). Building energy codes. Retrieved from Tracking Buildings website: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/building-envelopes>
- International Energy Agency, I. (2019b). *World energy balances Overview*. 23. Retrieved from <http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000>
- International Energy Agency, I. (2020). Cooling - Fuels & Technologies - IEA. Retrieved April 14, 2020, from <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling>
- ISO, I. O. for S. (1995). ISO - ISO 8144-1:1995 - Thermal insulation — Mineral wool mats for ventilated roof spaces — Part 1: Specification for applications with restricted ventilation. Retrieved April 18, 2020, from <https://www.iso.org/standard/15227.html>
- ISO, I. O. for S. (2005). *INTERNATIONAL STANDARD ISO. 2005*.
- ISO, I. O. for S. (2012a). ISO 11855-1:2012(en), Building environment design — Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems — Part 1: Definition, symbols, and comfort criteria. Retrieved April 18, 2020, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11855:-1:ed-1:v1:en>
- ISO, I. O. for S. (2012b). ISO 12631:2012(en), Thermal performance of curtain walling — Calculation of thermal transmittance. Retrieved April 19, 2020, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12631:ed-1:v1:en>
- ISO, I. O. for S. (2017a). ISO - ISO 10077-1:2017 - Thermal performance of windows, doors and shutters — Calculation of thermal transmittance — Part 1: General. Retrieved April 19, 2020, from <https://www.iso.org/standard/67090.html>

- ISO, I. O. for S. (2017b). ISO - ISO 21930:2017 - Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services. Retrieved April 18, 2020, from <https://www.iso.org/standard/61694.html>
- ISO, I. O. for S. (2020). ISO 52000-1:2017(en), Energy performance of buildings — Overarching EPB assessment — Part 1: General framework and procedures. Retrieved April 17, 2020, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:52000:-1:ed-1:v1:en>
- Kamal, M. A. (2012). An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions. *Civil Engineering & Architecture*, 55(1), 84–97.
- Khedari, J., Waewsak, J., Thepa, S., & Hirunlabh, J. (2000). Field investigation of night radiation cooling under tropical climate. *Renewable Energy*, 20(2), 183–193. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00104-4)
- Lai, C., Huang, J. Y., & Chiou, J. S. (2008). Optimal spacing for double-skin roofs. *Building and Environment*, 43(10), 1749–1754. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.008>
- Lara, R. A., Naboni, E., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Zhang, Y., Barzon, F., ... Romagnoni, P. (2017). Optimization Tools for Building Energy Model Calibration. *Energy Procedia*, 111(September 2016), 1060–1069. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.269>
- 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>
- López-Pérez, L. A., Flores-Prieto, J. J., & Ríos-Rojas, C. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Building and Environment*, 150(December 2018), 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>
- Mahmoud, A., Asif, M., Hassanain, M., Babsail, M., & Sanni-Anibire, M. (2017). Energy and Economic Evaluation of Green Roofs for Residential Buildings in Hot-Humid Climates.

Buildings, 7(4), 30. <https://doi.org/10.3390/buildings7020030>

- 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)
- Mumovic, D., & Santamouris, M. (2009). *A handbook of sustainable building design & engineering*. Taylor & Francis.
- Nahar, N. M., Sharma, P., & Purohit, M. M. (2003). *Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions*. 38, 109–116.
- 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>
- Najim, K. B., & Fadhil, O. T. (2015). Assessing and improving the thermal performance of reinforced concrete-based roofing systems in Iraq. *Energy and Buildings*, 89, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.049>
- ONSET Computer Corporation. (2020). HOBO U12 Temperature/Relative Humidity/Light/External Data Logger. Retrieved April 2, 2020, from <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012/>
- Ordoñez López, E. E., & Pérez Sánchez, M. M. (2015). Green roofs and white roofs thermal performance comparison using IR techniques. *Acta Universitaria*, 25(5), 11–19. <https://doi.org/10.15174/au.2015.782>

- Pisello, A., Pignatta, G., Castaldo, V., & Cotana, F. (2014). Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. *Sustainability*, 6(8), 4706–4722. <https://doi.org/10.3390/su6084706>
- Prieto, A., Knaack, U., Auer, T., & Klein, T. (2018). Passive cooling & climate responsive façade design exploring the limits of passive cooling strategies to improve the performance of commercial buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 175, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.016>
- Rahman, A., & Smith, A. D. (2018). Predicting heating demand and sizing a stratified thermal storage tank using deep learning algorithms. *Applied Energy*, 228(June), 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.064>
- Refahi, A. H., & Talkhabi, H. (2015). Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy*, 80, 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.030>
- Rincón, J., Almaso, N., & González, E. (2001). Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions. *Solar Energy*, 71(1), 71–80. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00010-X)
- Rodríguez, L. B., Rionda, R. A., Félix, F. C., Ríos, S. B., Miranda, B. H., Hernández, M. G., ... Nava, E. (2018). *Balance nacional de energía 2017*. 136. Retrieved from <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>
- Roslan, Q., Siti, I., Affandi, R., Mohd, M., & Azhaili, B. (2016). A literature review on the improvement strategies of passive design for the roofing system of the modern house in a hot and humid climate region. *Frontiers of Architectural Research*, 5(1), 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.10.002>
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>

- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>
- Savings, W. (2012). *Measurement and Verification Protocol*. 1(January).
- SEDEMA, S. del medio ambiente. (2008). *PROGRAMA DE CERTIFICACIÓN DE EDIFICACIONES SUSTENTABLES*.
- SENER. (2018). *Balance Nacional de Energía 2017*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.
- SENER, S. de E. (2011a). *Norma oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011*. 50, 50–60.
- SENER, S. de E. (2011b). *Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011*. 47.
- SENER, S. de E. (2012). *Norma oficial Mexicana NOM-024-ENER-2012*. 29.
- SENER, S. de E. (2014). *Norma oficial Mexicana NOM-009-ENER-2014*. 1–45.
- SENER, S. de E. (2017). *Hoja de ruta para el Código y Normas de Eficiencia Energética para Edificaciones en México* (p. 38). p. 38. México.
- SENER, S. de E. (2020). *prospectiva sector electrico mexico_2018-2032.pdf* (p. 145). p. 145. México.
- Shi, G. Z., Li, L. P., Song, C. F., Cheng, S. M., Tao, W. Q., & He, Y. L. (2016). 3D numerical thermal optimization of the roofs constructed with cast-in-situ hollow concrete floor system by finite volume method. *Energy and Buildings*, 131, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.018>
- Short, W., Packey, D., & Holt, T. (1995). A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 95(March), 73–81. <https://doi.org/NREL/TP-462-5173>
- SketchUp, T. I. (2020). Software de diseño 3D |SketchUp. Retrieved March 31, 2020, from

<https://www.sketchup.com/es>

- Sodha, M. S., Singh, S. P., & Kumar, A. (1985). Thermal performance of a cool-pool system for passive cooling of a non-conditioned building. *Building and Environment*, 20(4), 233–240. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(85\)90038-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(85)90038-1)
- Spanaki, A., Tsoutsos, T., & Kolokotsa, D. (2011). On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3523–3533. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.007>
- Stritih, U. (2003). Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings. *Energy and Buildings*, 35(11), 1097–1104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.07.001>
- Taghinia, J., Rahman, M. M., & Siikonen, T. (2015). Numerical simulation of airflow and temperature fields around an occupant in indoor environment. *Energy and Buildings*, 104, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.085>
- Tejera Oliver, J. L. (2013). *La contribución de las normas internacionales de la serie ISO 50000 a la Eficiencia Energética*. (Canales de mecánica y electricidad.), 22.
- Tong, S., Li, H., Zingre, K. T., Wan, M. P., Chang, V. W.-C., Wong, S. K., ... Lee, I. Y. L. (2014). Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate. *Energy and Buildings*, 76, 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.076>
- ToolBox, T. E. (2020). Absorbed Solar Radiation. Retrieved March 22, 2020, from https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d_1568.html
- Vijaykumar, K. C. K., Srinivasan, P. S. S., & Dhandapani, S. (2007). A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer climates. *Energy and Buildings*, 39(8), 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.009>
- Xamán, J., Cisneros-Carreño, J., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, I., Aguilar-Castro, K. M., & Macias-Melo, E. V. (2017). Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in Mexico. *Applied Thermal Engineering*,

123, 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.163>

Xamán, J., Rodríguez-Ake, A., Zavala-Guillén, I., Hernández-Pérez, I., Arce, J., & Saucedo, D. (2020). Thermal performance analysis of a roof with a PCM-layer under Mexican weather conditions. *Renewable Energy*, 149, 773–785. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.084>

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>

Yesilata, B., Isiker, Y., & Turgut, P. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1878–1882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014>

Zhang, Z., Tong, S., & Yu, H. (2016). Life Cycle Analysis of Cool Roof in Tropical Areas. *Procedia Engineering*, 169, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.048>

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>