



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**ESTUDIO DEL EFECTO DE UN SISTEMA DE EDIFICACIÓN TÉRMICAMENTE  
ACTIVADO SOBRE LAS CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**DOCTORA EN CIENCIAS EN INGENIERIA**

PRESENTA:  
**M.C. MARÍA MAGDALENA VILLAR RAMOS**

BAJO LA DIRECCIÓN DE:  
**DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO**

EN CODIRECCIÓN DE:  
**DR. IVÁN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ**

**CUNDUACÁN, TABASCO, MARZO DE 2026**

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de Cunduacán, el 10 de marzo de 2026, el que suscribe **MARÍA MAGDALENA VILLAR RAMOS** estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 192D20004, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título y titulada **ESTUDIO DEL EFECTO DE UN SISTEMA DE EDIFICACIÓN TÉRMICAMENTE ACTIVADO SOBRE LAS CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS.**

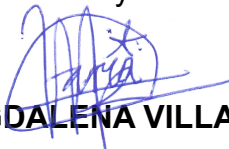
### DECLARO QUE

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 10 de marzo de 2026.

Nombre y firma



**MARÍA MAGDALENA VILLAR RAMOS**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2026  
año de  
Margarita  
Maza

**JEFATURA DE POSGRADO**

Cunduacán, Tabasco a 02 de marzo de 2026.  
**MEM/AP-DAIA/05/2026**


PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA DE LA DAIA  
DE: COMISIÓN SINODAL  
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

**ESTUDIO DEL EFECTO DE UN SISTEMA DE EDIFICACIÓN TÉRMICAMENTE  
ACTIVADO SOBRE LAS CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS**

Desarrollado por la MCI: **MARÍA MAGDALENA VILLAR RAMOS**, del **Doctorado en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

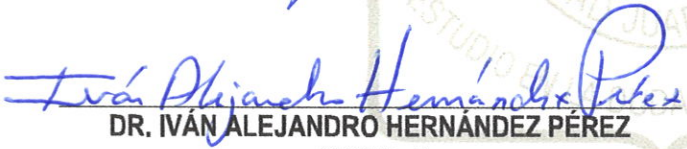
**COMITÉ SINODAL**

  
DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO  
PRESIDENTE

  
DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA  
SECRETARIO

  
DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO  
VOCAL 1

  
DR. PÍO SIFUENTE GALLARDO  
VOCAL 2

  
DR. IVÁN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ  
VOCAL 3

  
DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ  
VOCAL 4

  
DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ  
VOCAL 5



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2026  
año de  
Margarita  
Maza

## DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR/316/2026  
**FECHA:** 03 de marzo de 2026  
**ASUNTO:** Autorización de  
impresión definitiva

**MCI. MARÍA MAGDALENA VILLAR RAMOS**  
PASANTE DE DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
**PRESENTE**

En virtud de haber elaborado su trabajo de TESIS denominado:

**"Estudio del efecto de un sistema de edificación térmicamente activado sobre las condiciones de confort térmico en viviendas"**

Para obtener el grado de **Doctorado en Ciencias en Ingeniería** y en el cual ha tenido como Directora de Tesis a la Dra. Karla María Aguilar Castro y su Co-director el Dr. Iván Alejandro Hernández Pérez.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
**DIRECTORA**



**DIRECCIÓN**

c.c.p. Archivo  
DRA'DMFM / MCA'RACT

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 10 de marzo de 2026.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada: **ESTUDIO DEL EFECTO DE UN SISTEMA DE EDIFICACIÓN TÉRMICAMENTE ACTIVADO SOBRE LAS CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS.**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABORADORES

NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE  
**MARÍA MAGDALENA VILLAR RAMOS**

NOMBRE Y FIRMA DEL DIRECTOR DE TESIS  
**DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO**

**DEDICATORIAS**

A mis hijos Carlos y Carolina, por ser mi principal motor para ser una mejor persona, profesionista y madre.

A Dios por permitirme darme el valor, sabiduría e inteligencia para continuar desarrollándome en todos los aspectos.

¡Gracias!

## AGRADECIMIENTOS

Al Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el valioso apoyo recibido para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la oportunidad de realizar mis estudios de formación profesional, por las facilidades y apoyos brindados para el desarrollo de este trabajo de Tesis.

A mi directora de tesis la Dra. Karla María Aguilar Castro, por su apoyo en todos los aspectos y siempre impulsarme a ser mejor cada día, como mujer, profesionista y ser humano.

A los miembros de mi comité revisor, al Dr. Iván Hernández Pérez, al Dr. Edgar Vicente Macías Melo, al Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera, al Dr. Pío Sifuentes Gallardo, a la Dra. Ebelia del Ángel Meraz, al Dr. Juan Barajas Fernández por su tiempo, comentarios y por el conocimiento aportado para que este trabajo de investigación se llevara a cabo.

A Mimi por apoyarme y animarme en todo lo que hago.

A mi familia, por su apoyo incondicional para continuar desarrollándome de manera profesional y personal.

¡Infinitas Gracias!

## Índice

	<b>Pág.</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	X
<b>Lista de Figuras</b> .....	XII
<b>Resumen</b> .....	XV
<b>Asbtract</b> .....	XVI
<b>Nomenclatura</b> .....	XVII
<b>CAPÍTULO I. Introducción</b>	
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Estructura de la Tesis.....	10
<b>CAPÍTULO II. Marco Teórico</b>	
2.1 Procesos físicos de intercambio energético.....	11
2.1.1 Conducción.....	11
2.1.2 Convección.....	12
2.1.3 Radiación.....	12
2.2 Medidor de coeficiente convectivo ( <i>HTCM</i> ).....	13
2.3 Carga térmica.....	13
2.4 Sistema de Construcción Activado (TABS).....	14
2.5 Modelo global de transferencia de calor.....	17
2.6 EneeryPlus.....	17
2.7 Vivienda tipo en México.....	19
2.7.1 Materiales de construcción en México.....	20
2.8 Clasificación climática en México.....	22

**CAPÍTULO III. Objetivos**

3.1 Hipótesis.....	26
3.2 Objetivo general.....	26
3.2.1 Objetivos particulares .....	26
3.3 Alcances del proyecto .....	27

**CAPÍTULO IV. Diseño y construcción del sistema experimental**

4.1 Diseño del techo con TABS.....	28
4.1.1 Modelo físico .....	28
4.1.2 Simulación en PDE Modeler de Matlab .....	32
4.1.3 Comportamiento térmico.....	35
4.1.4 Análisis y diseño estructural del techo con TABS .....	38
4.1.5 Prueba de resistencia a la compresión del concreto .....	46
4.2 Construcción del sistema experimental .....	52
4.2.1 Base soporte .....	54
4.2.2 Carcasa del sistema .....	56
4.2.3 Armado estructural de las muestras .....	57
4.3 Instrumentación de la base soporte y carcasa del sistema experimental.....	61

**CAPÍTULO V. Metodología**

5.1 Diseño y procedimiento experimental .....	67
5.2 Procedimiento para la obtención del modelo global .....	69
5.3 Procedimiento de acoplamiento .....	72

**CAPÍTULO VI. Análisis de resultados y discusión**

6.1 Evaluación de un techo TABS.....	77
6.1.1 Pruebas experimentales sin recirculación de agua .....	77

6.1.2 Pruebas experimentales con recirculación de agua .....	82
6.2 Modelo global de transferencia de calor .....	89
6.3 Acoplamiento del modelo global de transferencia y EnergyPlus .....	91
6.3.1 Ganancia de Calor .....	92
6.3.2 Análisis energético de L-TABS .....	101
<b>CONCLUSIONES</b> .....	115
<b>RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS</b> .....	119
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	120
<b>ANEXO A</b> .....	128
<b>ANEXO B</b> .....	160
<b>ANEXO C</b> .....	168

## Lista de tablas

Tabla	Descripción	Pág.
1.1	Tecnologías de construcción en techos	4
2.1	Propiedades de los materiales de construcción en viviendas	21
2.2	Climas para el análisis de la vivienda tipo	23
4.1	Condiciones de frontera para las simulaciones	31
4.2	Pérdidas por fricción en el interior de tuberías	34
4.3	Resultados promedios de la simulación de un techo con TABS y una losa de referencia	36
4.4	Momento máximo a la flexión para los Casos A y B	41
4.5	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión del concreto	49
4.6	Dimensiones y materiales reportados en la literatura para celdas calorimétricas	53
4.7	Materiales utilizados en el armado de acero para las losas	57
4.8	Materiales para la mezcla de concreto para la elaboración de las losas	60
4.9	Configuración de sensores del sistema experimental	65
5.1	Condiciones de las pruebas experimentales.	67
6.1	Resultados promedio del conjunto de pruebas experimentales.	88
6.2	Climas de la República Mexicana para el análisis de la vivienda tipo	91

---

---

6.3	Resultados promedios de flux de calor bajo diferentes climas de la República Mexicana	100
6.4	Resultados promedio de calor removido por enfriamiento y por calentamiento, bajo diferentes climas de la República Mexicana	107
6.5	Resultados promedios de kg CO <sub>2</sub> por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana	112
6.6	Costo de energía eléctrica por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana	114

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Lista de figuras

Figura	Descripción	Pág.
1.1	Modelo físico de las ganancias de calor en una vivienda	2
2.1	Modelo físico de un TABS en una losa de concreto	15
2.2	Climas en la República Mexicana de acuerdo con INEGI	22
4.1	Modelo físico del techo de referencia	29
4.2	Modelo físico de la losa de concreto con tubos intercambiadores de calor propuesto	30
4.3	Variables de estudio en el diseño de losa propuesta	32
4.4	Perfil de temperatura de los mejores casos vs la losa de referencia	37
4.5	Diseño de la losa propuesta	39
4.6	Diseño estructural de la losa de concreto reforzado	42
4.7	Diseño en 2D de la losa propuesta	43
4.8	Diseño en 3D de las losas propuestas	45
4.9	Comportamiento de la resistencia de la mezcla de concreto en función del tiempo de curado	49
4.10	Procedimiento para la elaboración, curado y determinación de la resistencia de los cilindros de concreto	51
4.11	Diseño de la estructura de la base soporte del sistema experimental	54
4.12	Proceso de construcción de la base soporte	55
4.13	Construcción y aislamiento de la estructura de la base del sistema	56
4.14	Proceso y construcción del armado de acero de las losas propuestas	58
4.15	Construcción, colocación de sensores y fijación de la cimbra	59
4.16	Proceso de vaciado de la mezcla de concreto	60

<b>4.17</b>	Proceso de armado de sistema de adquisición de datos	62
<b>4.18</b>	Proceso de manufactura de medidor de coeficiente convectivo	63
<b>4.19</b>	Esquema de instrumentación del prototipo experimental	64
<b>4.20</b>	Sistema experimental final en el sitio de pruebas	66
<b>5.1</b>	Diagrama general del procedimiento experimental del sistema propuesto	69
<b>5.2</b>	Condiciones de simulación para obtención del modelo global de transferencia de calor a través de las losas experimentales	70
<b>5.3</b>	Diagrama de metodología para obtener el modelo de transferencia de calor en una losa	72
<b>5.4</b>	Vista superior de la vivienda tipo con distribución de espacio	74
<b>5.5</b>	Vista isométrica de la vivienda con distribución de espacio en Energy Plus	74
<b>5.6</b>	Diagrama de metodología de acoplamiento del modelo de transferencia de calor en una vivienda tipo	76
<b>6.1</b>	Comportamiento de la temperatura superficial exterior e interior de L-TABS, L-REF Y L-AIR	78
<b>6.2</b>	Comportamiento del flux de calor en la superficie exterior e interior L-TABS, L-REF Y L-AIR	80
<b>6.3</b>	Comportamiento de la temperatura ambiente interior cercano a L-TABS, L-REF y L-AIR	81
<b>6.4</b>	Comportamiento de la temperatura superficial exterior e interior de L-TABS, L-REF Y L-AIR	83
<b>6.5</b>	Comportamiento del flux de calor exterior e interior de L-TABS, L-REF Y L-AIR	85
<b>6.6</b>	Comportamiento de la temperatura en la superficie de L-TABS, L-REF y L-AIR para el conjunto de pruebas	86

<b>6.7</b>	Validación del modelo de transferencia de calor con datos experimentales	90
<b>6.8</b>	Comportamiento del flujo de calor interior en la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes climas de la República Mexicana	94
<b>6.9</b>	Comportamiento del flux de calor en la superficie interior por cada envoltente de la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes climas de la República Mexicana	98
<b>6.10</b>	Cargas térmicas promedio por enfriamiento por mes bajo diferentes climas de la República Mexicana	103
<b>6.11</b>	Cargas térmicas promedio por calentamiento por mes bajo diferentes climas de la República Mexicana	105
<b>6.12</b>	Energía eléctrica promedio por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana	108

---

## RESUMEN

En este estudio se evaluó térmicamente un techo con intercambiador de calor embebido, conocido como Sistema de Construcción Térmicamente Activado (TABS), mediante un análisis teórico-experimental con el propósito de reducir el consumo de energía eléctrica y mejorar el confort térmico en edificaciones. Se diseñó y construyó un módulo experimental para cuantificar el flujo de calor en tres configuraciones de techo: TABS con recirculación de agua (L-TABS), techo con circulación de aire (L-AIR) y una muestra de referencia (L-REF). El análisis incluyó simulaciones térmicas y estructurales para definir parámetros de diseño como el diámetro, separación y profundidad de los tubos, así como el tipo y caudal del fluido, utilizando *Matlab*® y herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD). A partir de estos análisis se definió un modelo estructural seguro y eficiente, empleando concreto reforzado, material estructural y considerando las normas para concreto estructural. Posteriormente, se realizaron ensayos experimentales instrumentados mediante un prototipo experimental diseñado con una cámara calorimétrica móvil y un sistema de acondicionamiento de aire para medir temperatura, flujo de calor, humedad relativa e irradiancia solar. Los resultados mostraron que el sistema TABS redujo la temperatura interior de la losa hasta en 28°C y disminuyó el flujo de calor interior hasta en 185.6 W·m<sup>-2</sup> respecto al sistema convencional. Con base en los datos obtenidos, se desarrolló y validó un modelo global de transferencia de calor con un ajuste superior al 97%, el cual se acopló a una vivienda tipo en *EnergyPlus* para evaluar su desempeño anual en seis climas representativos de México. Los resultados evidenciaron reducciones en las cargas de enfriamiento, el consumo eléctrico, las emisiones de CO<sub>2</sub> y los costos energéticos. De forma cuantitativa, las emisiones mensuales de CO<sub>2</sub> presentaron valores máximos en climas cálido-húmedos, alcanzando hasta 2517.42 kg, mientras que los valores mínimos se registraron en meses templados, con emisiones cercanas a 25.45 kg. Estos resultados confirman el impacto de las condiciones climáticas en el consumo energético y en las emisiones asociadas, concluyendo que los techos con intercambiadores embebidos representan una alternativa viable y sostenible para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en viviendas.

**Palabras Claves:** TABS, Confort térmico, Modelo Global, EnergyPlus, Eficiencia Energética.

**ABSTRACT**

In this study, the thermal performance of a roof with an embedded heat exchanger, known as a Thermally Activated Building System (TABS), was evaluated through a theoretical–experimental approach to reduce electricity consumption and improve thermal comfort in buildings. An experimental module was designed and constructed to quantify heat flux under three roof configurations: TABS with internal water recirculation (L-TABS), an air-circulation roof (L-AIR), and a reference roof (L-REF). The analysis included thermal and structural simulations to define key design parameters, including tube diameter, spacing, and depth, as well as the type and flow rate of the working fluid, using Matlab® and computational fluid dynamics (CFD) tools. From these analyses, a safe and efficient structural model was established using reinforced concrete, in accordance with structural concrete design standards. Subsequently, instrumented experimental tests were conducted using a prototype consisting of a mobile calorimetric chamber and an air-conditioning system to measure temperature, heat flux, relative humidity, and solar irradiance. The results showed that the TABS system reduced the interior slab temperature by up to 28°C and decreased the interior heat flux by up to 185.6 W·m<sup>-2</sup> compared to the conventional roof system. Based on experimental data, a global heat transfer model was developed and validated with an accuracy greater than 97%. This model was later coupled to a typical dwelling in EnergyPlus to evaluate its annual performance under six representative climates in Mexico. The simulation results demonstrated reductions in cooling loads, electricity consumption, CO<sub>2</sub> emissions, and energy costs. Quantitatively, monthly CO<sub>2</sub> emissions reached maximum values of up to 2517.42 kg in warm-humid climates, while minimum values of approximately 25.45 kg were recorded during temperate months. These findings confirm the strong influence of climatic conditions on energy consumption and associated emissions, concluding that roofs with embedded heat exchangers represent a viable and sustainable alternative for improving energy efficiency and thermal comfort in residential buildings.

**Keywords:** TABS, Thermal comfort, Global model, EnergyPlus, Energy efficiency.

## Nomenclatura

Variables	Descripción	Unidades
A	Área	$m^2$
AC	Equipo de acondicionamiento de aire	-
CD	Carga de diseño de la edificación	$kg\ m^{-2}$
CM	Carga muerta de la edificación	$kg\ m^{-2}$
$C_p$	Calor específico	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
CS	Carga de servicio de la edificación	$kg\ m^{-2}$
CV	Carga viva de la edificación	$kg\ m^{-2}$
d	Distancia o separación entre tubos	m
$\frac{dT}{dn}$	Cambios de la temperatura en dirección normal al área en función de x, y, z	-
D	Diámetro interno de tubo	m
E	Consumo de energía	K W h
$f$	Factor de fricción	-
$g$	Aceleración de la gravedad	$m\ s^{-2}$
$h$	Coefficiente convectivo	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
H	Espesor de la losa	m
$H_{rp}$	Pérdida de energía por fricción por metro de tubería	m
I	Irradiancia solar	$W\ m^{-2}$
L	Losa	-
$L_c$	Longitud del claro o área a techar	m
$L_o$	Longitud	m
M	Momento a la flexión de una viga o sección	$kg\ m$
p	Distancia o profundidad en la losa con respecto al eje y	m

P	Carga máxima aplicada por la máquina de compresión simple	ton
$q''$	Flux de calor	W m <sup>-2</sup>
$q$	Flujo de calor	W
Q	Flujo o caudal de un fluido	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
$r$	Rugosidad	-
$s$	Superficie	-
R	Resistencia a la compresión del concreto	kg cm <sup>-2</sup>
Re	Número de Reynolds	-
RH	Humedad relativa	%
$t$	Tiempo	min
T	Temperatura	°C
$\dot{V}$	Flujo o caudal de un fluido	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
W	Longitud de la losa	m
W <sub>A</sub>	Peso distribuido en una sección o viga	kg m <sup>-1</sup>
$x$	Dirección en x	m
$y$	Dirección en y	m

### Letras griegas

$\alpha$	Absortancia solar	Adimensional
$\epsilon$	Emitancia	Adimensional
$\lambda$	Conductividad térmica	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\rho$	Reflectancia	Adimensional
$\infty$	Fluido	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>

### Subíndices

$ae$	Ambiente exterior
$ai$	Ambiente interior

ce	Convectivo exterior
ci	Convectivo interior
cond	Por conducción
conv	Por convección
e	Exterior
exp	Experimental
<i>fe</i>	Fluido de entrada
<i>fs</i>	Fluido de salida
H	Medidor de coeficiente convectivo
i	Interior
m	Media
max	Máximo
min	Mínimo
mod	Modelado
pi	Pared interior
prom	Promedio
r	Flujo removido por el flujo másico
rad	Por radiación
re	Radiativo exterior
ri	Radiativo interior
s	Superficie
se	Superficie exterior
si	Superficie interior
<i>T</i>	Transversal del cilindro de concreto
Total	De toda la envolvente

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Generalidades

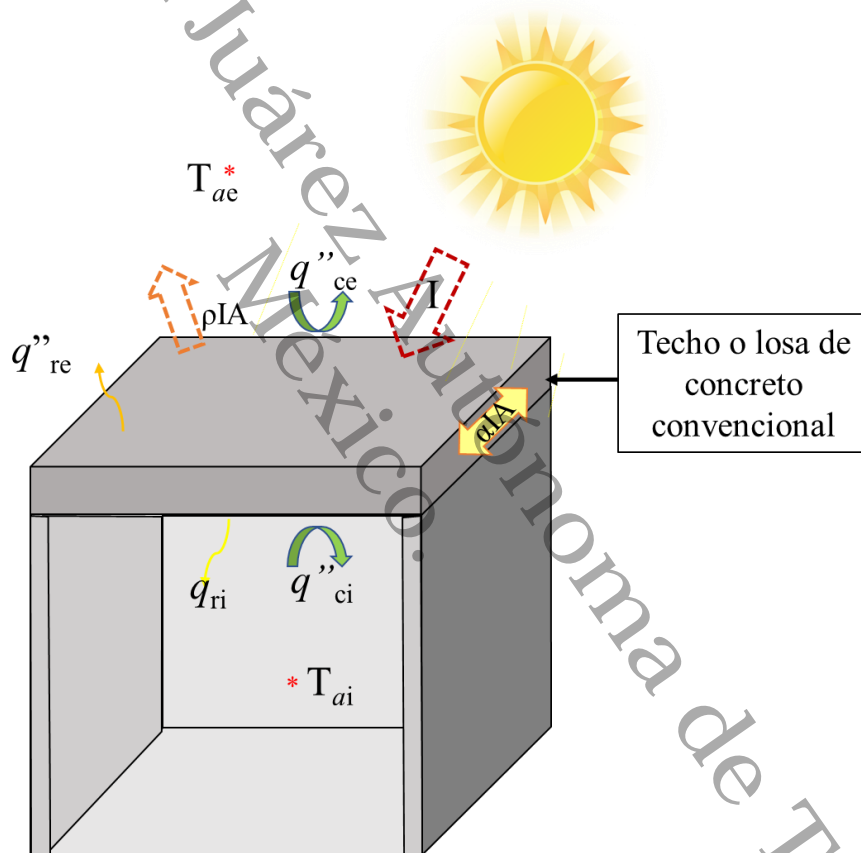
De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) aproximadamente desde la mitad del siglo pasado se han registrado alteraciones en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos. Sin embargo, en las últimas décadas el cambio climático ha generado impactos significativos en los sistemas naturales y humanos a nivel global. Un efecto notable de esta transformación es el incremento acelerado en el consumo de electricidad para garantizar el confort térmico, impulsado tanto por el cambio climático y el crecimiento de la población. Se estima que la cantidad de energía consumida por el sector residencial y de la construcción en el mundo en 2021 fue del 30%, del cual el 37% de la energía está relacionada con emisiones de CO<sub>2</sub> (United Nations Environment Programme, 2022).

Una edificación es una construcción o un recinto hecho de diferentes materiales destinado para ser habitado, por lo que una vivienda se considera una edificación. Los principales componentes de una edificación son: paredes, piso, ventanas, puertas y techo. Como se puede ver en la Figura 1.1, las principales ganancias de calor se obtienen a través del techo de una vivienda debido a su geometría y orientación, cuando ésta no se encuentra con un sombreado. Cuando la irradiancia solar ( $I$ ) incide sobre la superficie del techo, una parte de esta energía es absorbida por el techo ( $\alpha IA$ ) y transmitida a través del techo de concreto por conducción. Parte de esta energía absorbida también se transmite hacia el interior y exterior del recinto por convección ( $q_{ci}$  y  $q_{ce}$ ) y por radiación al interior y exterior ( $q_{ri}$  y  $q_{re}$ ). La energía absorbida que se transmite primero por conducción a través del material y después por convección con el fluido del recinto,

incrementa la temperatura en el interior ( $T_{ai}$ ). Por otro lado, parte de la energía que incide sobre la superficie exterior del techo ( $\rho IA$ ) es reflejada al ambiente ( $T_{ae}$ ). De igual manera, este fenómeno sucede con las paredes del sistema, con la excepción de que la incidencia de la energía se da en un plano vertical, provocando una menor absorción de energía.

**Figura 1.1**

*Modelo físico de las ganancias de calor en una vivienda*



*Nota.* La figura muestra el modelo físico de las principales ganancias de calor en una vivienda, considerando los mecanismos de radiación y convección. Fuente: Elaboración propia.

Para mitigar los efectos del clima en el interior de las edificaciones, ha surgido el interés de buscar y analizar alternativas de construcción que ayuden a reducir o

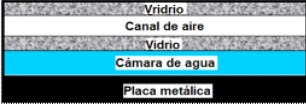

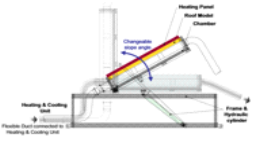

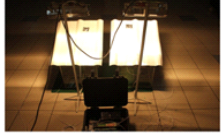

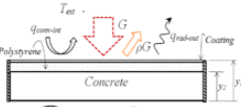





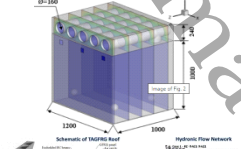

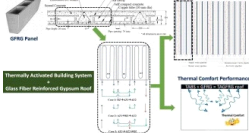

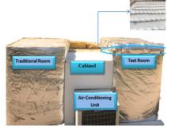

aumentar las cargas térmicas en las edificaciones, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y mitigar el consumo global de energía eléctrica, mediante el uso de energías renovables (Carnieletto et al., 2024; Rakesh et al., 2023).

## 1.2 Antecedentes

Como se mencionó anteriormente, las mayores ganancias de calor en una edificación residencial se obtienen a través del techo. Esto, debido a la cantidad de irradiación solar absorbida por este componente (Tong et al., 2014). Por esta razón, resulta fundamental analizarlo y explorar estrategias efectivas para minimizar la transferencia de calor hacia el interior. La mayoría de los estudios enfocados en techos se han centrado en la evaluación de colectores solares (Juanicó, 2008), techos ventilados (Xamán et al., 2010), cubiertas reflectivas (Hernández-pérez, 2015), y Sistemas de Construcción Térmicamente Activado (por sus siglas en inglés TABS) (Yu et al., 2019). En la Tabla 1.1 se presentan de forma esquemática las principales alternativas utilizadas en techos para reducir el consumo de energía y mejorar el confort al interior de las edificaciones. Esta información se presenta de forma extendida en el **Anexo A**.

De acuerdo con la norma ISO 11855 un TABS puede ser utilizado para ayudar a disminuir o aumentar la temperatura en el espacio interior de un recinto. La incorporación de este sistema en la envolvente de la edificación facilita el aprovechamiento de la energía solar, ya que el fluido de trabajo puede reutilizarse en diversas aplicaciones (International Organization for Standardization, 2012). Esto no solo ayuda a optimizar el uso de los recursos disponibles, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mitigando su impacto ambiental (Carnieletto et al., 2024). Diversos autores han analizado la aplicación de TABS, los cuales han sido llamados con diferentes nombres dependiendo la aplicación y la ubicación en la envolvente de la construcción (Shi et al., 2024; Wu et al., 2022).

**Tabla 1.1**  
*Tecnologías de construcción en techos*

Tecnología	Tipo de Estudio		Modo	Autor (es)
	T	E		
Colector solar	X			Juanico, (2008) 
Techo ventilado		X		Lee et al., (2009) 
Recubrimiento con aislante térmico		X		Yew et al., (2013) 
Cubierta reflectiva	X			Hernández-pérez et al., (2014) 
TABS		X		Leo Samuel et al., (2018) 
TABS		X		Dharmasastha et al., (2020) 
TABS	X			Abed et al., (2024) 
TABS		X		Dharmasastha et al., (2023) 
TABS con PCM		X		Ali et al., (2025) 

*Nota.* La tabla presenta las principales tecnologías de construcción en techos orientadas a la reducción del consumo de energía y a la mejora del confort térmico en edificaciones, con base en los trabajos más representativos reportados por diversos autores.

Para determinar la influencia de los techos con TABS en las condiciones de confort térmico de los edificios se han desarrollado varios trabajos. Por ejemplo, Gwerder et al., (2008) propusieron un algoritmo de control para que el TABS cumpla los requisitos de confort en el interior de los edificios. El método propuesto incorpora el cambio entre los modos de calefacción y refrigeración del TABS para satisfacer el confort térmico. Los investigadores utilizaron el algoritmo en un ejemplo de simulación. Consideraron una construcción de 6 m de largo, 6 m de ancho y 3 m de alto con tuberías de 0.015 m de diámetro empotradas en una losa de hormigón del techo de 0.25 m de grosor, y consideraron una separación entre las tuberías de 0.2 m. Los autores demostraron que el TABS mantenía la temperatura del aire interior entre 21 y 27°C todo el año a partir del análisis de la temperatura horaria. Wit & Wisse (2012) reportaron otra estrategia de control para TABS, en la que el modo de funcionamiento (refrigeración o calefacción) se determina por la temperatura media del aire interior. Los autores analizaron el comportamiento térmico del TABS integrado en el techo de dos edificios. Los autores realizaron pruebas experimentales durante 6264 horas para el caso A y 6200 horas para el caso B. El confort térmico en el interior del edificio se evaluó con límites de temperatura adaptables. Los resultados demostraron que el TABS podía mantener las condiciones de confort de los dos edificios, debido a que la mayoría de las temperaturas del aire interior que se midieron se encontraban dentro de las zonas de satisfacción del 80 al 90% durante el periodo de pruebas. En el caso de Hassan & Abdelaziz (2022) realizaron una estrategia de control predictivo con un TABS híbrido mediante una simulación en TRNSYS® y Matlab® para calcular el porcentaje de ahorro de energía y el porcentaje de insatisfacción del sistema. Para las especificaciones del edificio consideraron una habitación de con un espacio de 70 m<sup>2</sup> y una altura de 3 m entre el techo y el piso. Los resultados demostraron que el porcentaje de horas de satisfacción aumentaron un 25.1%, mientras que el consumo máximo de electricidad disminuyó 18.8%. Abed et al. (2024) realizaron un análisis numérico de un techo con TABS por donde circula aire, con el objetivo de analizar algunos parámetros como la

velocidad y temperatura de entrada del fluido para predecir el impacto que tienen sobre los ahorros de energía y controlar la temperatura interior mejorando el confort en una edificación. Los autores utilizaron ANSYS Fluent para simular una habitación de  $1\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1\text{ m}$  y encontraron que cuando el fluido entra a una temperatura entre  $18\text{ °C}$  y  $20\text{ °C}$  y a una velocidad de  $1\text{ m s}^{-1}$  se puede obtener un confort térmico de forma constante, contribuyendo así a una disipación mayor de calor. La investigación desarrollada por Su et al. (2015) incluyó una cámara experimental para probar un techo de hormigón con tubos embebidos. Los autores examinaron la influencia de diferentes valores de tres factores (temperatura del agua de suministro, caudal volumétrico del agua y distancia entre los tubos embebidos) en la transferencia de calor del techo. Encontraron que suministrando agua a temperaturas de  $11 - 14\text{ °C}$  y un caudal volumétrico de  $0.26 - 0.33\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ , y la distancia entre tubos de la temperatura del aire interior de la cámara experimental oscilaba entre  $25$  y  $28\text{ °C}$  y la capacidad de refrigeración del techo era de  $40$  y  $50\text{ W m}^{-2}$ . Por su parte, Rey Martínez et al. (2015) analizaron la calidad del aire interior y el confort térmico de un edificio durante 10 semanas en verano. El edificio constaba de cuatro plantas y un TABS alimentado por agua fría y una torre de refrigeración. Los autores comprobaron que, durante los periodos de ocupación, la temperatura de funcionamiento se mantenía entre  $23$  y  $25\text{ °C}$ , y los niveles de  $\text{CO}_2$  se situaban en  $850\text{ ppm}$ . Los autores concluyeron que la integración de la eficiencia energética contribuye a la reducción del uso de energía y a la calidad del ambiente interior. En otro estudio del mismo grupo, Zhang et al. (2016) construyeron una cámara experimental para analizar las variaciones de temperatura en las superficies, en el aire interior y las variaciones de flujo térmico debido al techo de hormigón con tubos embebidos. Las dimensiones de la cámara experimental fueron de  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2.82\text{ m}$  (largo, ancho y alto), construida con bloques de hormigón celular, el suelo y el techo fueron aislados con poliestireno extruido. Al mismo tiempo, la losa está compuesta por un panel de hormigón de  $0.12\text{ m}$  con tubos de polietileno PE-RT de  $0.02\text{ m}$  de diámetro, colocados en forma de "S" con una separación de  $0.15$

m entre los tubos. Los autores variaron la carga mediante una resistencia eléctrica, la temperatura inicial en el interior, la humedad relativa inicial en el interior, la temperatura del aire de entrada en el interior, la temperatura y el flujo de agua en los tubos. Los autores concluyeron que la relación entre la radiación térmica y la transferencia total de calor desde el techo oscilaba entre el 40% y el 60%. Además, se demostró que la temperatura de la superficie y del aire interior se mantenía estable entre 21.1°C y 25.8°C, y que la diferencia de temperatura entre el techo y el ambiente interior oscilaba entre 5 - 7°C. En Chung et al. (2017) se describe un estudio de simulación destinado a estudiar un edificio incorporado con TABS en el techo, en el que se utilizó el software de simulación *EnergyPlus* para aplicar diferentes estrategias de control en cada zona del edificio objeto de estudio. Los autores variaron la temperatura de suministro de agua de 19 a 25°C en la zona interior y en el perímetro para la calefacción y la refrigeración, agrupando las pruebas en tres casos de estudio. Chung et al., concluyeron que, al separar el edificio propuesto en zonas con diferentes estrategias de control según las necesidades de cada planta, el confort térmico mejoraba en un 5%. En el estudio experimental presentado por Dharmasastha et al. (2020), se analizó el comportamiento térmico de un sistema híbrido integrado por un TABS acoplado a un techo de yeso reforzada con fibra de vidrio. Construyeron una cámara de pruebas de 3.46 m de largo, 3.46 m de ancho y 3.15 m de alto con tubos de cobre de 0.01 m de diámetro interno incrustados en el techo, en condiciones de calor y humedad de la ciudad de Chennai, India. Los autores comprobaron que los TABS redujeron hasta 5.1°C la temperatura de la superficie interior del techo y 6.7°C el aire interior de la cámara de pruebas. Años más tarde, Dharmasastha et al. (2023) analizaron de forma experimental un modelo adaptativo de confort térmico, con la finalidad de verificar el efecto que tiene la trayectoria del flujo del agua sobre el confort térmico del sistema en condiciones de clima tropical. Sin embargo, los autores encontraron que modificar la distribución del flujo de agua no tiene un efecto significativo en el confort térmico. Los autores concluyeron que los casos propuestos se mantienen en un 90% de la satisfacción

térmica con una temperatura operativa entre 28.1 y 29.2°C. Autores como Ali et al. (2025) realizaron un estudio experimental de un TABS en el techo con recirculación de agua geotérmica. Los autores recircularon agua en tubos de PPR con 0.011 m de diámetro a una temperatura constante de 22°C en el techo con TABS con la finalidad de analizar el comportamiento del sistema sobre las ganancias térmicas, y lo compararon con una losa tradicional, ambos recintos median 0.85 m × 0.85 m × 1 m. Los autores concluyeron que con un caudal de 1 L min<sup>-1</sup> se puede reducir un 90.13% el flujo de calor en la superficie interior del techo y la temperatura de la superficie interior a 16.24 °C. Michalak (2025) realizó un estudio experimental de un TABS en el techo en modo calentamiento en la oficina de un edificio con la finalidad de estimar el coeficiente de transferencia de calor interno por convección (CHTCs) y radiación (RHTCs) mediante el software Matlab®. El recinto donde se realizó el estudio tiene una dimensión de 7.95 m × 5.80 m × 3.1 m (largo, ancho y alto), los autores encontraron que el coeficiente de transferencia de calor por convección fue de 0.80 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> y el coeficiente de transferencia de calor por radiación fue de 5.66 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>.

Los autores han mostrado teóricamente que, los TABS de techo pueden contribuir de manera significativa a la reducción de las cargas térmicas, principalmente aquellas derivadas de la irradiancia solar. Desde una perspectiva experimental, se han desarrollado y evaluado distintos dispositivos de prueba. Sin embargo, la literatura reporta que los sistemas de almacenamiento e intercambio térmico integrados a la envolvente se han implementado tanto en losas como en muros y fachadas. No obstante, diversas soluciones pasivas y activas basadas en la masa térmica como los muros tipo Trombe y fachadas termo activas evidencian un uso significativo de paredes como elemento de transferencia térmica. Dentro de la literatura hay varios aspectos que se han ignorado como el estudio de las caídas de presión, las configuraciones de los tubos, la medición de flujo de calor en las componentes de las edificaciones, así como, la medición de las diferentes aportaciones de la radiación solar. Es

importante señalar que los estudios reportados sobre techos no han abordado el comportamiento del sistema TABS en su totalidad, sino que han analizado sus componentes de manera individual. Esto representa una oportunidad para contribuir al desarrollo de esta área, complementando las investigaciones en el área de ahorro de energía en edificaciones mediante un estudio teórico experimental de la tecnología TABS.

En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo evaluar térmicamente un techo con intercambiador de calor embebido (TABS) mediante un enfoque teórico-experimental, orientado a la reducción del consumo de energía eléctrica y a la mejora del confort térmico en edificaciones ubicadas en climas cálido-húmedos y templados. Si bien los sistemas TABS han sido estudiados principalmente en escenarios internacionales y bajo condiciones climáticas distintas, aún existe una limitada evidencia experimental integral que considere de manera conjunta el comportamiento térmico, estructural y energético de estos sistemas en condiciones climáticas representativas de México. En este sentido, el trabajo propone el desarrollo y validación de un modelo global de transferencia de calor que permita analizar su desempeño bajo condiciones climáticas específicas, así como su aplicación en la evaluación energética anual de viviendas. De esta manera, se busca aportar elementos que fortalezcan el conocimiento disponible sobre la viabilidad del TABS como alternativa sostenible para la eficiencia energética en edificaciones, particularmente en contextos donde la información experimental validada es todavía incipiente.

### 1.3 Estructura de la tesis

A continuación, se describen los capítulos siguientes que conforman este documento de tesis:

- En el Capítulo 2, Marco teórico, se presentan los fundamentos que sirven para comprender y sustentar los modelos matemáticos y la parte experimental que se desarrollará en los siguientes capítulos.
- En el Capítulo 3, Objetivos, se presenta la hipótesis, el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance del proyecto.
- En el Capítulo 4, Diseño y construcción del sistema experimental, se presenta la metodología del proceso de diseño y construcción del prototipo desarrollado.
- En el Capítulo 5, Metodología, se presenta el procedimiento utilizado para la evaluación experimental de las muestras bajo estudio, así como, la metodología de acoplamiento a una vivienda bajo diferentes condiciones ambientales.
- En el Capítulo 6, Análisis de resultados y discusión, se presentan y analizan los resultados de las pruebas experimentales realizadas, así como, el modelo global de transferencia de calor y el acoplamiento del techo con TABS a una vivienda tipo.

Finalmente, se cuenta con la sección de conclusiones y recomendaciones, en la cual se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir de la realización de este trabajo de investigación y se establecen recomendaciones para trabajos futuros.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Procesos físicos de intercambio energético

La transferencia de calor es el proceso en el cual la energía es transferida de un sistema a otro. Esta energía transferida, comúnmente llamada energía térmica y que es consecuencia de un gradiente de temperatura (Incropera et al., 2011). La transferencia de calor por unidad de área es llamado flux de calor y se calcula con la Ecuación 1.

$$q'' = \frac{q}{A} \quad (1)$$

Donde  $q$  es el calor transferido por unidad de tiempo,  $A$  es el área perpendicular a la dirección. La transferencia de calor se lleva a cabo mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

##### 2.1.1 Conducción

El mecanismo de transferencia de calor por conducción se da mediante la interacción directa de las moléculas. La transferencia de calor por conducción puede ser expresada con la *Ley de Fourier* (Incropera et al., 2011). En donde, la transferencia de calor por conducción es proporcional al comportamiento de un material expuesto a un gradiente de temperatura y al área normal a la dirección del flujo como se observa en la Ecuación 2.

$$q_{\text{cond}} = -\lambda(T)A \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la conductividad térmica de un material,  $\frac{dT}{dx}$  es la dirección del gradiente de temperatura.

### 2.1.2 Convección

El mecanismo de transferencia de calor por convección ocurre debido al movimiento molecular de un fluido. La transferencia de calor por convección se puede presentar en dos formas: por convección natural, que es cuando el movimiento de las moléculas como resultado de la diferencia de densidades ocasionada por los cambios de temperatura del fluido; y por convección forzada, que es cuando el movimiento de las moléculas ocurre por acción de una fuerza externa al sistema. Para determinar la transferencia de calor por convección se puede utilizar la *Ley de enfriamiento de Newton* (Incropera et al., 2011). En donde, el flujo de calor es proporcional a un gradiente de temperatura de una superficie y la temperatura de un fluido en un área como se presenta en la Ecuación 3.

$$q_{\text{conv}} = h A (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

Donde  $h$  es el coeficiente convectivo,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_{\infty}$  es la temperatura del fluido.

### 2.1.3 Radiación

La radiación es un mecanismo de transferencia de energía o calor a través de ondas electromagnéticas, capaz de propagarse tanto en el vacío como al interactuar con una superficie. A diferencia de otros modos de transferencia de calor, la radiación no requiere un medio material para su transmisión. La cantidad de calor transferido por radiación en una superficie puede calcularse con la *Ley de Stefan-Boltzmann* (Incropera et al., 2011) mediante la Ecuación 4.

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A T_R^4 \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emitancia de la superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ), y  $T_R$  es la temperatura absoluta de la superficie.

## 2.2 Medidor de coeficiente convectivo (*HTCM*)

El medidor de coeficiente convectivo es un dispositivo utilizado para calcular el coeficiente de ganancia de calor solar. El medidor de coeficiente convectivo consiste en una placa de cobre con un recubrimiento negro mate, aislado por la parte posterior con una placa de poliestireno extruido con un recubrimiento de aluminio y un marco de aluminio (National Fenestration Rating Council, 2020). Entre las dos placas se coloca un medidor de flujo de calor y sensores de temperatura para obtener la diferencia de temperatura entre las placas. La lectura de los sensores es monitoreada y registrada mediante un sistema adquisidor de datos en un intervalo de tiempo. El coeficiente convectivo al exterior ( $h_e$ ) se puede calcular con la Ecuación 5.

$$h_e = \frac{\alpha_{se} I A_H - \left( \lambda_H A_H \left( \frac{T_{mH}}{L_{oH}} \right) \right)}{A_H (T_{sH} - T_{\alpha e})} \quad (5)$$

Donde  $A_H$  es el área del *HTCM*,  $\lambda_H$  la conductividad térmica del *HTCM*,  $T_{mH}$  es la temperatura media del *HTCM*,  $L_{oH}$  es la longitud del *HTCM*,  $T_{sH}$  es la temperatura superficial del *HTCM*.

## 2.3 Carga térmica

Cuando se habla de acondicionamiento de edificaciones, las cargas térmicas es un término ampliamente utilizado. La carga térmica es la cantidad de energía que se necesita para añadir o retirar calor de una edificación para mantener la temperatura ambiente a una temperatura deseada o de confort térmico (Rudoy & Cuba, 1979). Existen dos tipos de cargas térmicas dependiendo la necesidad de la edificación:

- Carga de calefacción, es la cantidad de energía térmica que se añade a una edificación para incrementar la temperatura ambiente.

- Carga de refrigeración, es la cantidad de energía térmica que se retira a una edificación para disminuir la temperatura ambiente.

#### 2.4 Sistema de Construcción Térmicamente Activado (TABS)

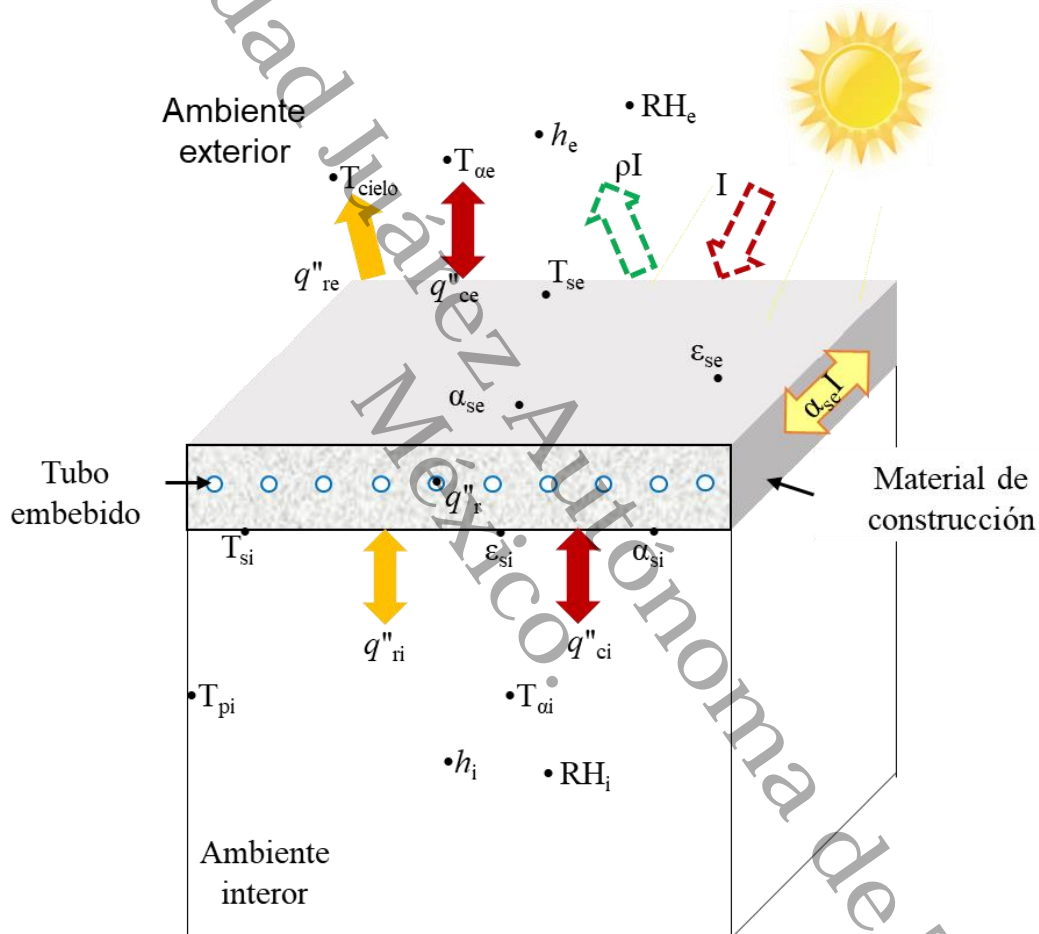
Un sistema de construcción térmicamente activado (TABS) es un sistema compuesto por tubos intercambiadores de calor, por lo general, se encuentran embebidos en un material de construcción de la edificación. Estos tubos intercambian calor directamente con la masa térmica del edificio y ayudan a mejorar el confort térmico en el espacio interior de las edificaciones, generado por las ganancias o pérdidas de calor (Rakesh et al., 2023). Este sistema puede implementarse en los diferentes componentes de una edificación, es decir, en sus paredes, techo e incluso piso.

En la Figura 2.1 se presenta el modelo físico de un techo con tubos intercambiadores, embebidos en una losa de concreto expuesta a condiciones ambientales exteriores: Temperatura ambiente ( $T_{ae}$ ), Temperatura de cielo ( $T_{cielo}$ ) Coeficiente convectivo ( $h_e$ ) y Humedad relativa ( $RH_e$ ). Como se muestra en la figura, la irradiancia solar ( $I$ ) incide sobre la superficie exterior de la losa, parte de esa energía es reflejada ( $\rho I$ ), y parte es absorbida ( $\alpha_{se} I$ ). Parte de la energía absorbida se disipa en forma de calor por convección y radiación hacia el interior ( $q''_{ci}$ ,  $q''_{ri}$ ) y en forma de calor por convección y radiación hacia el exterior ( $q''_{ce}$ ,  $q''_{re}$ ). Parte de la energía disipada al interior es absorbida por la losa, incrementando así la temperatura en la superficie exterior ( $T_{se}$ ) y en la superficie interior de la losa ( $T_{si}$ ), dependiendo de las propiedades de la superficie de la losa ( $\varepsilon, \alpha, \rho$ ). A su vez, de la energía que es absorbida a través de la losa, una parte es transferida al ambiente interior y la otra parte, es absorbida/removida por el fluido que se encuentra en el interior de los tubos embebidos en el concreto ( $q''_r$ ). Las condiciones de ambiente interior consideran la Temperatura ambiente

( $T_{ci}$ ), Temperatura de las paredes ( $T_{pi}$ ), Coeficiente convectivo ( $h_i$ ) y Humedad relativa ( $RH_i$ ).

**Figura 2.1**

*Modelo físico de un TABS en una losa de concreto*



*Nota.* El gráfico ilustra el modelo físico de los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en el elemento constructivo de un techo con tubos intercambiadores de calor. Fuente: Elaboración propia.

El flux de calor al interior ( $q''_i$ ) se puede calcular mediante un balance de energía del interior, así como, considerando la energía del exterior y la energía removida

por el sistema TABS. El  $q''_i$  se puede calcular mediante la Ecuación 6, donde,  $q''_i$  es la suma del flux radiativo ( $q''_{ri}$ ) que se puede calcular mediante la Ecuación 7 y el flux convectivo ( $q''_{ci}$ ) al interior de la cámara de ambiente controlado y se puede calcular mediante la Ecuación 8.

$$q''_i = q''_{ri} + q''_{ci} \quad (6)$$

$$q''_{ri} = \sigma \varepsilon_{si} (T_{si}^4 - T_{pi}^4) \quad (7)$$

$$q''_{ci} = h_i (T_{si}^4 - T_{ai}^4) \quad (8)$$

Donde el flujo de calor al interior también se puede calcular como en la Ecuación 9. En donde, el  $q''_i$  es igual a la suma de la energía absorbida por la losa, el flux de calor radiativo al exterior (Ecuación 10), el flux de calor convectivo al exterior (Ecuación 11), y el flux de calor removido por el fluido en el interior de los tubos intercambiadores de calor (Ecuación 12). Mediante la Ecuación 13, se puede calcular la diferencia de temperatura que existe entre el fluido de salida y el de entrada.

$$q''_i = \alpha_{se} I + q''_{re} + q''_{ce} - q''_r \quad (9)$$

$$q''_{re} = \sigma \varepsilon_{se} (T_{cielo}^4 - T_{se}^4) \quad (10)$$

$$q''_{ce} = h_e (T_{ae}^4 - T_{se}^4) \quad (11)$$

$$q''_r = \frac{\dot{m}_f C p_f (\Delta T)}{A_L} \quad (12)$$

$$\Delta T = T_{fs} - T_{fe} \quad (13)$$

Los TABS pueden ser analizados mediante dispositivos de calorimetría, estos dispositivos o prototipos nos permiten medir parámetros térmicos y solares bajo condiciones reales al exterior.

## 2.5 Modelo global de transferencia de calor

Muchos de los problemas de la vida diaria pueden ser estudiados mediante formulaciones matemáticas. El estudio de los fenómenos físicos relacionados con la transferencia de calor puede ser representado mediante modelos matemáticos sustentados en principios y leyes físicas. Un modelo matemático nos ayuda a identificar todas las variables que influyen en los fenómenos y la interdependencia de dichas variables. Estos modelos matemáticos son resueltos mediante técnicas o métodos apropiados, con los que se obtienen resultados aproximados razonables. Entre estos modelos se encuentran los de función de transferencia, los cuales representan un sistema de ecuaciones diferenciales lineal en el dominio de la frecuencia y son invariantes en el tiempo (Ogata, 2010). En el contexto de la transferencia de calor, una función de transferencia establece la relación entre una variable de entrada y una de salida del sistema a través de una ecuación lineal que describe su comportamiento. Esta relación puede expresarse matemáticamente mediante la Ecuación 14 (Ogata, 2010):

$$a_0y + a_1\dot{y} + \dots + a_{n-1}\dot{y} + a_ny = b_0x + b_1\dot{x} + \dots + b_{m-1}\dot{x} + b_mx \quad (n \geq m) \quad (14)$$

Donde  $y$  es la salida del sistema y  $x$  es la entrada,  $a, b$  representan las constantes de ajuste del modelo que representa el comportamiento de un sistema.

Para resolver una ecuación de transferencia de calor se pueden utilizar métodos numéricos que pueden ser resueltos mediante códigos computacionales. Los códigos computacionales ofrecen ventajas en cuanto a costo, velocidad, en donde, se puede incluir numerosas variables para simular condiciones reales o ideales.

## 2.6 EnergyPlus

La modelación energética de edificaciones es necesaria para entender el consumo energético en edificaciones. *EnergyPlus* es un software utilizado para

simulación energética de una edificación de uso libre desarrollado en 1997 por la oficina de Tecnologías de la construcción (BTO, por sus siglas en inglés) del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés) y puesto en uso en 2001 (US Department of Energy, 2022,).

*EnergyPlus* está basado en la herramienta de análisis de cargas de edificios y termodinámica de sistemas (BLAST, por sus siglas en inglés) y DOE-2. *EnergyPlus* modela el consumo energético de una edificación mediante modelos matemáticos que proveen una representación aproximada de un sistema. Dentro de las capacidades de *EnergyPlus* se encuentran:

- La solución integrada y simultánea de las condiciones térmicas de una zona.
- La solución basada en balances térmicos de los efectos radiativo y convectivo.
- La interacción de las zonas térmicas y el entorno colocando pasos de tiempos definidos por el usuario.
- Modelación combinada de transferencia de calor y masa entre zonas.
- Inclusión de modelos con diferentes tipos de ventanas.
- Cálculos de iluminación y deslumbramiento.
- Inclusión de componentes basados en equipos de climatización.
- Estrategias de control de climatización e iluminación.
- Interfaz de simulación con otros motores de simulación.
- Impresión de informes de resultados resumidos y detallados.

El uso de *EnergyPlus* como software para la modelación de la losa TABS nos permite determinar su factibilidad de uso bajo otras condiciones con la inclusión de archivos de datos meteorológicos creado por el usuario, el análisis de la conducción transitoria de calor a través de la envolvente utilizando funciones de transferencia de conducción, el cálculo de cargas de enfriamiento.

## 2.7 Vivienda tipo en México

De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social total (CONEVAL) existe un rezago habitacional del 44.7% del total con carencias en sus materiales o condición de hacinamiento (CONEVAL, 2018). En México, se reporta que un 42% de las viviendas tienen dos dormitorios, 32% un dormitorio, 20% tres dormitorios, 5% cuatro dormitorios y 1% cinco dormitorios o más (INEGI, 2020).

Con el fin de mejorar la calidad estructural, de diseño y constructiva de las viviendas en México se han desarrollado los Criterios Técnicos para una Vivienda Adecuada (Secretaría de Desarrollo Agrario & Comisión Nacional de Vivienda, 2019). Las viviendas pueden clasificarse por precio en el mercado, forma de construcción, por números de viviendas o niveles (Comisión Nacional de vivienda, 2017). Las viviendas clasificadas por precio en el mercado se subclasifican por superficies construidas desde 40 m<sup>2</sup> hasta más de 188 m<sup>2</sup>. Las viviendas clasificadas por forma de construcción implican su construcción por medio de empresas desarrolladoras o por autoconstrucción. Mientras que, las viviendas clasificadas por número de viviendas se subclasifican en unifamiliar y plurifamiliar; donde estas pueden ser de uno o más niveles. Con respecto a la dimensión para los espacios habitables se han establecidos dimensiones mínimas, en el caso del dormitorio es de 7.29 m<sup>2</sup>; mientras que, para la cocina es de 3.30 m<sup>2</sup>, el área de usos múltiples es de 12 m<sup>2</sup> y el baño 2.73 m<sup>2</sup>. Para el diseño adecuado de una vivienda, se debe tomar en cuenta la altura de los espacios por zona climática de acuerdo con lo establecido en el Código de Edificación y Vivienda con una altura mínima de 2.3 m para un clima frío y de 2.7 m para un clima cálido húmedo (Comisión Nacional de vivienda, 2017; Secretaría de Desarrollo Agrario & Comisión Nacional de Vivienda, 2019).

### 2.7.1 Materiales de construcción en México

Los materiales de una construcción dependen de las características del país, la ciudad o la localidad, del tipo de clima, orientación geográfica, el uso al que se destinara, entre otros. Una vivienda comúnmente está compuesta por paredes, techo, piso, puertas y ventanas hechos de diferentes materiales. De acuerdo con el INEGI en México hay 35,219,141 inmuebles, destinados para viviendas particulares, de los cuales el 53% cuenta con piso de concreto, el 92% con paredes de concreto, tabique, ladrillo, cemento o block y el 79% están hechas con losa de concreto (INEGI, 2020). Para evitar las ganancias de calor y sobrecalentamiento debido a la radiación directa que entra por las ventanas de una vivienda, el manual de criterios técnicos para una vivienda adecuada sugiere que se debe utilizar acristalamiento con control solar con un coeficiente de sombra mínimo de 0.6 (Secretaría de Desarrollo Agrario & Comisión Nacional de Vivienda, 2019). Mientras que, para el material de las puertas sugiere que resguarde de la intemperie a sus habitantes y depende de las costumbres de la región. Las principales propiedades físicas y ópticas de los materiales se enlistan en la Tabla 2.1, como la conductividad térmica, densidad, calor específico, absorptancia, emitancia y transmitancia.

**Tabla 2.1.***Propiedades de los materiales de construcción en viviendas*

Material	Conductividad térmica ( $W m^{-1} K^{-1}$ )	Densidad ( $kg m^{-3}$ )	Calor específico ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )	Absortancia (Adim)	Emitancia (Adim)	Transmitancia (Adim)	Referencia
Concreto reforzado	1.74	2300	-	-	-	-	NOM-020-ENER-2011
	1.74	2300	840	0.6	0.82	-	Ávila-hernández et al. (2020)
	0.93	2306.6	653.14	-	-	-	ASHRAE (2021)
	1.4	2300	880	0.6	0.88-0.93	-	Incropera et al. (2011)
Block de concreto	1.7	-	-	-	-	-	NOM-008-ENER-2001
	-	1700	-	-	-	-	NOM-020-ENER-2011
	1	-	-	-	-	-	Incropera et al. (2011)
Mortero (Cemento y arena)	0.63	2000	-	-	-	-	NOM-008-ENER-2001
	-	2000	-	-	-	-	NOM-020-ENER-2011
	0.72	1860	780	-	-	-	Incropera et al. (2011)
	0.72	1890	837	-	-	-	Ávila-hernández et al. (2020)
Vidrio sencillo	0.93	2200	-	-	-	0.79	NOM-020-ENER-2011
	1.4	2500	750	-	0.90 - 0.95	-	(Incropera et al., 2011)
Aluminio	204	2700	-	-	-	-	NOM-008-ENER-2001
	-	-	-	0.14	0.84	-	(Incropera et al., 2011)
Roble	0.18	753	-	-	-	-	NOM-008-ENER-2001, NOM-020-ENER-2011
	0.176	752.8	2375.7	-	-	-	ASHRAE (2021)
	0.16	720	1255	-	-	-	Incropera et al. (2011)
Cedro	0.13	505	-	-	-	-	NOM-008-ENER-2001, NOM-020-ENER-2011
	0.17	545	2385	-	-	-	Incropera et al. (2011)
Pino	0.162	663	-	-	-	-	NOM-008-ENER-2001, NOM-020-ENER-2011
	0.117	432.49	-	-	-	-	ASHRAE (2021)
	0.15	640	2805	-	0.82 - 0.92	-	Incropera et al. (2011)

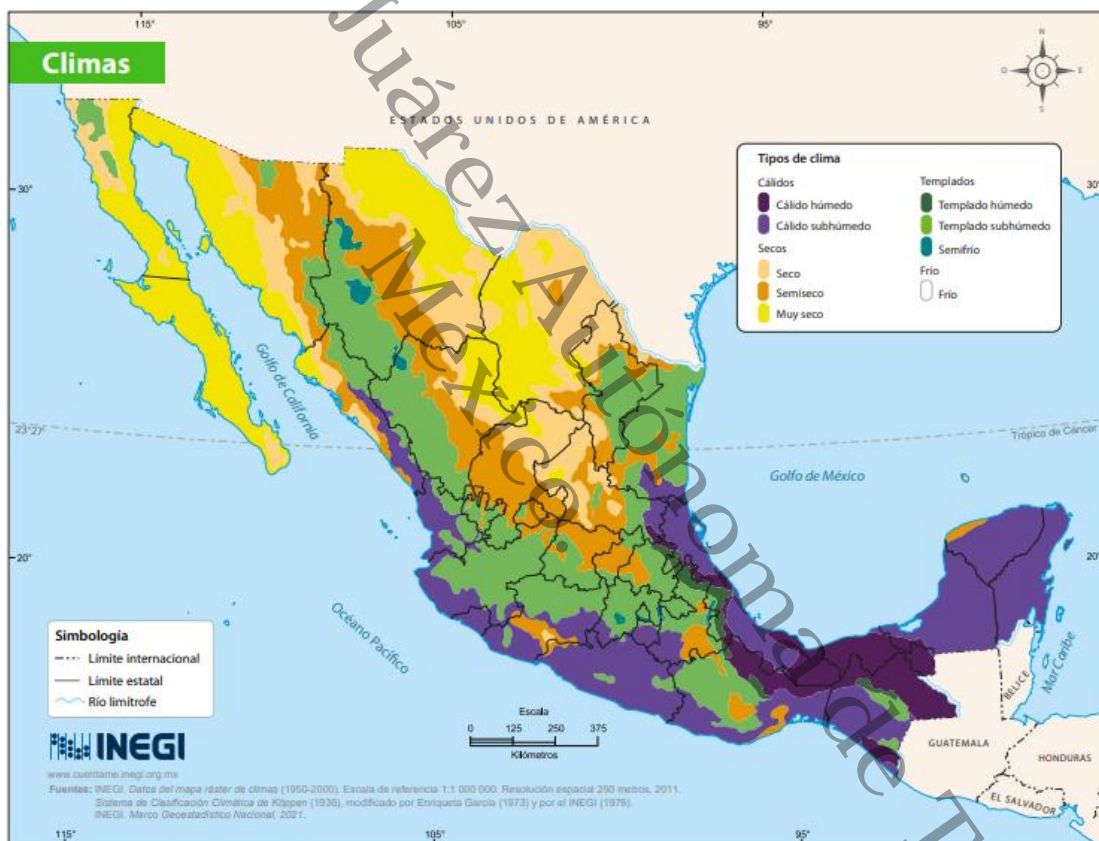
*Nota.* Esta tabla muestra las propiedades termofísicas de diversos materiales empleados en sistemas constructivos, tales como la conductividad térmica, la densidad, el calor específico, la absortancia, la emitancia y la transmitancia. Los datos fueron recopilados de la NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011 y de fuentes bibliográficas reconocidas, incluyendo ASHRAE (2021) e Incropera et al. (2011). \*Los guiones indican que el valor correspondiente no se encuentra disponible en la referencia consultada o no aplica para el material considerado. La palabra Adim, hace referencia a que la unidad de la propiedad es adimensional.

## 2.8 Clasificación climática en México

De acuerdo con el INEGI (2023), la República Mexicana está dividida en cuatro grupos climáticos: cálido, seco, templado y frío. En la Figura 2.2 se puede observar la localización y división de las zonas climáticas de la República Mexicana.

**Figura 2.2**

*Climas en la República Mexicana de acuerdo con INEGI*



*Nota.* El mapa muestra la clasificación climática de México, indicando la distribución espacial de los diferentes tipos de clima (cálidos, secos, templados y fríos) en el territorio nacional. Fuente: INEGI, (2021), con base en la clasificación climática de Köppen.

### *Ciudades seleccionadas para el análisis de la vivienda tipo*

Para simular las condiciones climáticas se seleccionaron seis ciudades de acuerdo con el tamaño de la ciudad, la clasificación y la representatividad del clima: Ciudad de México, Chihuahua, Mérida, Monterrey, Pachuca y Villahermosa. Los datos climáticos de las ciudades fueron tomados de los datos reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del sitio de pruebas experimentales. En la Tabla 2.2 se presentan las ciudades seleccionadas para análisis de una vivienda tipo de techo con TABS.

**Tabla 2.2**

*Climas para el análisis de la vivienda tipo*

<b>Ciudad</b>	<b>Clima</b>
Ciudad de México	Templado subhúmedo
Chihuahua	Muy seco
Mérida	Cálido subhúmedo
Monterrey	Seco
Pachuca	Semi seco
Villahermosa	Cálido húmedo

*Nota.* La tabla muestra las ciudades seleccionadas y su clasificación climática empleadas para el análisis del desempeño térmico y energético de una vivienda tipo con techo TABS. Los datos climáticos fueron obtenidos de los registros de la CONAGUA.

Villahermosa, capital de Tabasco, es la ciudad más poblada de la entidad con 340,060 habitantes. Se localiza en la latitud 17°59'N y longitud 92°55'O, a una altitud promedio de 9 metros sobre el nivel del mar, y abarca una superficie de 61.17 km<sup>2</sup> (INEGI, 2020). Villahermosa tiene un clima cálido húmedo con nivel de humedad relativa mayor al 90%. Villahermosa alcanza una temperatura máxima media anual de 36.8°C y mínima promedio de 25.4°C.

La ciudad de Mérida es la capital del Estado de Yucatán y una población de 995,129 habitantes. Mérida se encuentra ubicada a  $20^{\circ}58'N$   $89^{\circ} 37' O$  y 14 m sobre el nivel del mar y una superficie de  $874.4 \text{ km}^2$ . Mérida tiene un clima cálido subhúmedo con una temperatura máxima media anual de  $33.5^{\circ}\text{C}$  y una temperatura mínima media anual de  $18.5^{\circ}\text{C}$ , con humedad relativa media de 70%.

La ciudad de Chihuahua es la capital del Estado de Chihuahua, tiene una superficie de  $8382 \text{ km}^2$ . Chihuahua tiene una población de 937,674 habitantes, está situado a  $28^{\circ}38'N$   $106^{\circ} 04' O$  con una altura media de 1424 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2020). Chihuahua tiene un clima muy seco con niveles de humedad relativa de 45%. Chihuahua alcanza temperaturas máxima media anual de  $26.2^{\circ}\text{C}$  y mínima media anual de  $11.1^{\circ}\text{C}$ .

La ciudad de Monterrey es la capital y la ciudad más grande del Estado de Nuevo León. Monterrey cuenta con un área de  $324.4 \text{ km}^2$  y con 1,142,994 habitantes. Monterrey se encuentra en  $25^{\circ}40'N$   $100^{\circ}18'O$ , a una altitud de 540 m (INEGI, 2020). Monterrey cuenta con una temperatura máxima media anual de  $28.4^{\circ}\text{C}$  y una mínima media de  $16.3^{\circ}\text{C}$ . con una humedad relativa de 66.5%.

Pachuca es la capital del Estado de Hidalgo, está situada a  $20^{\circ}07'N$   $98^{\circ}44'O$ , a una altura media de 2382 m sobre el nivel del mar. Pachuca tiene una población de 314,331 habitantes y una superficie de  $154.0 \text{ km}^2$  (INEGI, 2020). El clima de Pachuca es semi seco con una temperatura media anual de  $21.4^{\circ}\text{C}$  y una temperatura mínima media anual de  $6.6^{\circ}\text{C}$ . con una humedad relativa media de 62%.

La Ciudad de México, capital de la República Mexicana, está situada en el centro del país, a una latitud de  $19^{\circ}25'N$  y una longitud de  $99^{\circ}08'O$ , con una altitud promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de  $1,494.3 \text{ km}^2$  y alberga una población de 9,209,944 habitantes (INEGI, 2020). El

clima de la ciudad es templado subhúmedo, con una temperatura máxima media anual de 24.1°C y una mínima media anual de 11.1°C, mientras que la humedad relativa promedio es del 57.7%.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## CAPÍTULO III

### OBJETIVOS

#### 3.1 Hipótesis

La incorporación de un sistema TABS en la losa del techo de una edificación tipo, validado mediante técnicas calorimétricas, produce una disminución significativa en la carga térmica de enfriamiento, lo que a su vez genera una reducción medible en el consumo eléctrico de climatización y una mejora cuantificable en los indicadores de confort térmico interior, en comparación con una configuración de techo convencional.

#### 3.2 Objetivo general

Evaluar un techo con intercambiador de calor embebido mediante el estudio teórico-experimental utilizando técnicas calorimétricas con el fin de reducir el consumo de energía eléctrica en edificaciones para establecer condiciones de confort térmico.

##### 3.2.1 Objetivos particulares

- Diseñar la configuración de una celda calorimétrica mediante un análisis teórico de energía y momento con el fin de determinar la configuración de la celda y la ubicación de los instrumentos de medición que permita una adecuada determinación de los flujos de calor en función de las temperaturas, velocidad del flujo de aire y humedad.
- Desarrollar la celda calorimétrica de prueba considerando las desviaciones por los efectos de borde de la muestra de techo bajo prueba, así como, la selección de materiales, instrumentos y sensores que permitan determinar las cargas térmicas y su incertidumbre.

- Realizar un estudio experimental de un techo con intercambiador de calor embebido, utilizando la celda calorimétrica desarrollada, mediante un análisis paramétrico variando las propiedades y la velocidad del fluido para analizar su efecto sobre la carga térmica.
- Desarrollar un modelo global de transferencia de calor de un techo con intercambiador de calor embebido a partir de los resultados experimentales considerando un análisis de sensibilidad de parámetros para determinar la factibilidad de uso del techo bajo otras condiciones climáticas y de operación.
- Evaluar una vivienda tipo considerando el modelo global de transferencia de calor desarrollado con el fin de cuantificar la capacidad que tiene el techo con intercambiador de calor embebido en la reducción de las cargas térmicas de enfriamiento.

### 3.3 Alcances del proyecto

Para el diseño y construcción del sistema TABS, se consideraron los criterios y configuraciones reportados en estudios previos sobre techos con estos sistemas. El diseño del prototipo experimental que se desarrolló cuenta con algunas secciones y características que delimitan su funcionalidad, a continuación, se enlistan:

- El prototipo está limitado para colocar tres muestras de losa de concreto armado de 0.50 m de largo y 0.50 de ancho.
- El prototipo cuenta con una cámara aislada en donde se pueden variar las condiciones ambientales al interior.
- El prototipo está diseñado para moverlo y ubicarlo de acuerdo con las necesidades de irradiancia solar y sombreado.

## CAPITULO IV

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

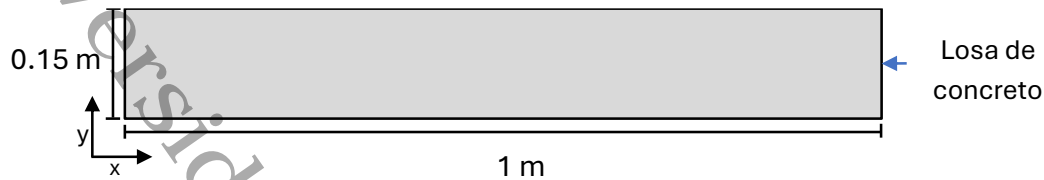
#### 4.1 Diseño del techo con TABS

Para el diseño y construcción del techo con TABS se consideraron los requerimientos y limitantes reportados en la literatura. La configuración del techo se propuso considerando aspectos de las normas mexicanas de construcción y confort térmico en las edificaciones.

Para el diseño del techo de pruebas se realizaron dos tipos de análisis: un análisis térmico y un análisis de mecánica estructural. El análisis térmico se realizó mediante simulaciones en un programa de Dinámica de Fluido Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), con la finalidad de determinar la mejor configuración en términos de la transferencia de calor. Para ello, se evaluó la influencia de parámetros como la separación entre los tubos intercambiadores de calor ( $d$ ), el diámetro de la tubería ( $D$ ) y la profundidad de embebido ( $p$ ) dentro de la losa de concreto. Por otro lado, el análisis de mecánica estructural permitió determinar la carga máxima a compresión del techo con TABS, así como, la configuración del armado de acero.

##### 4.1.1 Modelo físico

Para la configuración propuesta, se realizaron simulaciones utilizando PDE Modeler de Matlab® como herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El estudio con CFD nos permitió obtener una aproximación del comportamiento en 2D de la temperatura y los flujos de calor en la superficie interior y exterior del techo, así como del techo de referencia. En la Figura 4.1 se muestra el modelo físico del techo de concreto de referencia, el cual, mide 0.15 m de espesor y 1 m de longitud.

**Figura 4.1***Modelo físico del techo de referencia*

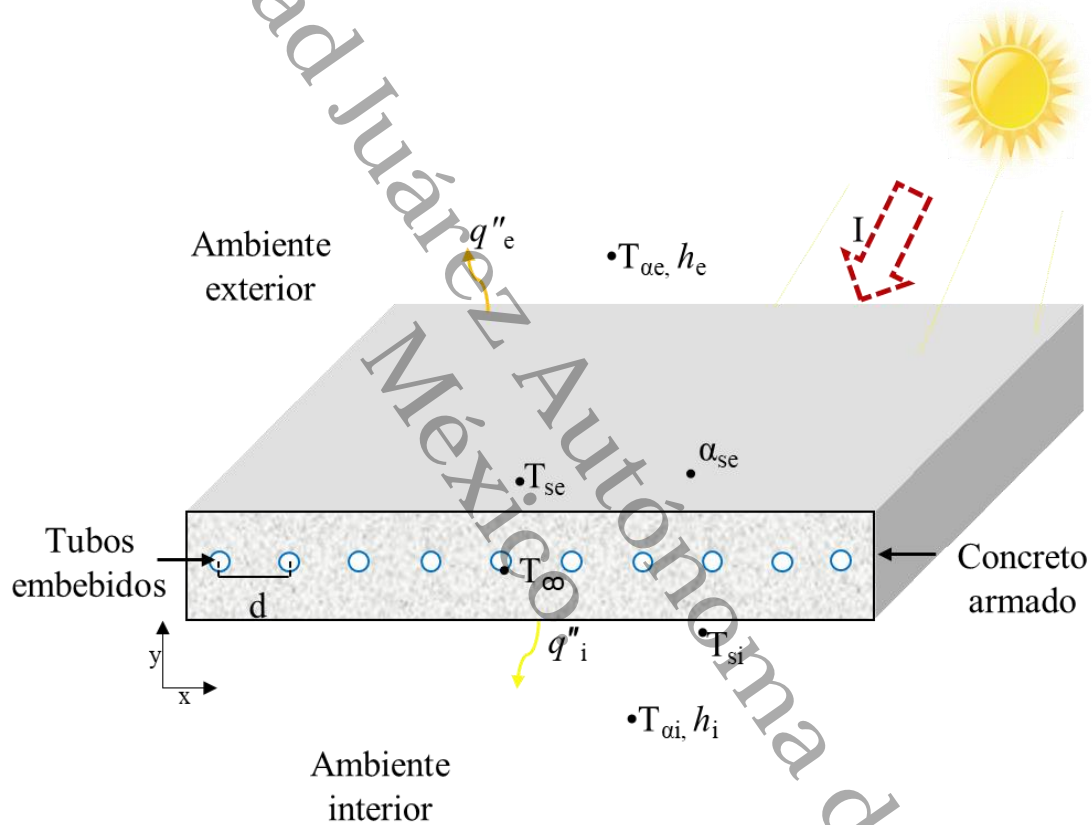
*Nota.* La figura muestra el modelo físico en 2D del techo de concreto de referencia, con un espesor de 0.15 m y una longitud de 1 m, utilizado como muestra base para la comparación del desempeño térmico. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.2 se presenta el modelo físico del techo con tubos intercambiadores, embebidos en la losa de concreto de 0.15 m de espesor y 1 m de longitud. El techo con TABS está expuesto a condiciones ambientales del clima cálido húmedo del municipio Cunduacán, Tabasco, con valores de irradiancia máxima promedio de  $1055.50 \text{ W m}^{-2}$  y una temperatura ambiente exterior máxima promedio de  $39.5^\circ\text{C}$  ( $T_{ac}$ ), considerando las estaciones más calurosas de la región (primavera y verano). Estos valores fueron obtenidos de una estación meteorológica ubicada en el Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco de la UJAT. El valor de absorptancia solar de la superficie exterior de la losa ( $\alpha_{se}$ ) de concreto es 0.70, que corresponde a un recubrimiento reflectivo rojo terracota y una conductividad térmica del concreto ( $\lambda_{concreto}$ ) de  $1.28 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . La superficie interior de la losa se encuentra en interacción con la temperatura del aire de una habitación con una temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$  ( $T_{ai}$ ). Se considera que la transferencia de calor en la superficie exterior e interior de la losa se presenta por convección-conducción, representada por un coeficiente convectivo en el exterior ( $h_e$ ) y un coeficiente convectivo en el interior ( $h_i$ ). Las propiedades termo-físicas del concreto y del fluido en el interior y exterior de la losa se enlistan en la Tabla 4.1 (Secretaría de Energía, 2011). Para simular el fluido que circula por los tubos intercambiadores

de calor se utilizaron las propiedades termo-físicas del agua y del aire a 25°C ( $T_{\infty}$ ) (Incropera et al., 2011); en donde se realizó el cálculo del coeficiente convectivo en la superficie interior de la tubería.

**Figura 4.2**

*Modelo físico de la losa de concreto con tubos intercambiadores de calor propuesto*



*Nota.* La figura presenta el modelo físico de una losa de concreto con tubos intercambiadores de calor embebidos, mostrando la disposición geométrica de los tubos, así como las variables térmicas relevantes asociadas a la superficie exterior y al interior del material, empleadas para el análisis del comportamiento térmico del sistema. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.1.***Condiciones de frontera para las simulaciones*

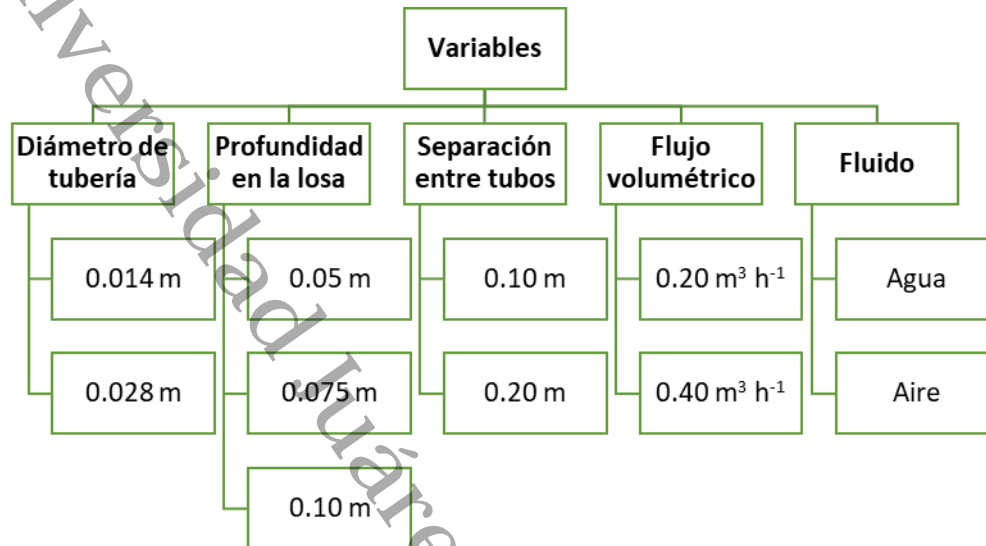
$\lambda_{\text{concreto}}$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\alpha_{\text{se}}$	I (W m <sup>-2</sup> )	$h_e$ (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	$h_i$ (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	$T_{ae}$ (°C)	$T_{ai}$ (°C)	$T_{\infty}$ (°C)
1.28	0.7	1055.50	13	6	39.5	25	25

*Nota.* La tabla muestra las condiciones de frontera empleadas en las simulaciones térmicas del sistema, definidas con base en los parámetros establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011).

Con el fin de identificar la mejor configuración del techo con TABS, se realizó un análisis paramétrico donde se consideró: 1) una losa de concreto de 0.15 m de espesor (H) y una longitud de 1 m (W), en donde se propusieron tubos de 0.014 m (equivalente a ½" nominal) y 0.028 m (equivalente a 1" nominal) de diámetro real interno (D); 2) una separación entre tubos (d) de 0.10 y 0.20 m, dejando una distancia de 0.05 m entre la orilla lateral de la losa y el tubo; y 3) una distancia o espesor con respecto a la losa de concreto en el eje y (p) de 0.05, 0.075 y 0.10 m. Este último, con el fin de identificar la mejor ubicación de la tubería en el eje y, que permita minimizar las ganancias de calor hacia la superficie interior de la losa de concreto. En el interior del tubo intercambiador de calor se hacer circular agua o aire a un flujo 0.20 y 0.40 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. En la Figura 4.3 se muestra las principales variables del estudio paramétrico del diseño de losa propuesta descrita anteriormente.

**Figura 4.3**

*Variables de estudio en el diseño de losa propuesta*



*Nota.* La figura muestra las variables de estudio consideradas en el diseño de la losa propuesta. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Simulación en PDE Modeler de Matlab®

Para la simulación, se tomó como referencia el modelo físico de la losa de concreto con intercambiadores, representado en la Figura 4.4. El análisis se llevó a cabo utilizando PDE Modeler de Matlab®, una herramienta especializada en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales en 2D aplicadas a la transferencia de calor. En este proceso, se consideró lo siguiente:

- Las fronteras laterales Este y Oeste son consideradas como adiabáticas.
- La superficie exterior de la losa tiene interacción con la Irradiancia solar a través de la cubierta reflectiva, establecida como rojo terracota.
- La temperatura del aire interior y del fluido de trabajo es un valor constante.

A continuación, se describe el procedimiento realizado para desarrollar las simulaciones en la aplicación PDE Modeler de Matlab® en 2-D.

1. Se dibujó la geometría de losa propuesta en 2-D, se especificaron las medidas de la losa de concreto; posición de los tubos intercambiadores de calor, diámetro y separación entre tubos.
2. Se especifican las condiciones de frontera, en donde se eligió una condición de frontera de Neumann para cada una de las fronteras. Se calculan y establecen los valores de coeficientes de transferencia de calor, mediante la ecuación de condición de frontera y las propiedades termo-físicas de las superficies y del ambiente.
3. Se estableció el tipo de ecuación como elíptica y el coeficiente de conducción de calor del concreto.
4. Se aplica la generación de malla y refinado de la malla.
5. Se aplica resolver solución, y se especifica la propiedad a graficar de la solución (en este caso, la temperatura).
6. Para extraer los datos de temperatura promedio en la superficie exterior ( $T_{se}$ ) y temperatura promedio en la superficie interior ( $T_{si}$ ) de la losa de concreto, se exportó la malla y la solución en una matriz de puntos, y se almacenan en una hoja de datos en Excel. Los datos de temperatura obtenidos se grafican y se calcula el flujo de calor en la superficie interior de la losa ( $q''_{si}$ ).

Para determinar los coeficientes de transferencia de calor del agua y del aire a 25°C, se utilizaron las siguientes correlaciones de convección forzada en flujo interno para tubos circulares (Mataix, 2004):

- Correlación de Hausen. Para régimen laminar con un Reynolds ( $Re$ )<2300.
- Correlación de Dittus-Boelter. Para régimen turbulento con un Reynolds ( $Re$ )>4000.

Para calcular el factor de fricción ( $f$ ) se hizo mediante la Ecuación de Colebrook representada en la Ecuación 15, tomando en cuenta la rugosidad ( $r$ ) del PVC, cobre y acero galvanizado; posteriormente para determinar las pérdidas de energía por fricción por el interior de tuberías ( $H_{rp}$ ), se utilizó la Ecuación de Darcy-Weisbach que se puede calcular mediante la Ecuación 16 (Mataix, 2004).

$$\frac{1}{f} = -2 \log_{10} \left( \frac{rD}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (15)$$

$$H_{rp} = f \frac{L_o}{D} \times \frac{\dot{V}/A^2}{2g} \quad (16)$$

Donde  $D$  es el diámetro del tubo en m,  $\text{Re}$  es el número adimensional de Reynolds,  $g$  es la aceleración de la gravedad en  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $\dot{V}$  es el flujo o caudal del fluido en  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  y  $A$  el área del tubo en  $\text{m}^2$ . Los resultados obtenidos para cada uno de los materiales y de los caudales propuestos, se muestran en la Tabla 4.2. Se puede observar que las pérdidas por fricción por metro son mayores en tubería con una rugosidad en materiales como la del acero galvanizado que las del PVC y cobre. Este análisis contribuirá en la selección de los materiales a considerar en la construcción del techo con TABS.

**Tabla 4.2**

*Pérdidas por fricción en el interior de tuberías*

Material	$r$ (m)	$D$ (m)	$\dot{V}$ ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	$H_{rp}$ (m)
PVC y cobre	1.00E-06	0.014	0.2	1.73E-02
			0.4	5.73E-02
		0.028	0.2	6.52E-04
			0.4	2.12E-03
Acero galvanizado	1.50E-04	0.014	0.2	2.24E-02
			0.4	8.24E-02
		0.028	0.2	7.16E-04
			0.4	2.46E-03

*Nota.* Resultados de pérdidas de energía por fricción en tuberías de diferentes propiedades, obtenidos mediante simulación en PDE Modeler de Matlab®.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.3 Comportamiento térmico

Se realizaron simulaciones con un total de 29 combinaciones y para cada caso se obtuvo el perfil de temperaturas en función de la posición. En la Tabla 4.3 se presentan las combinaciones del diseño experimental y los resultados obtenidos de la simulación del techo con TABS, así como, de la losa de referencia (CR).

En los resultados obtenidos de la Tabla 4.3, bajo las condiciones climáticas del municipio de Cunduacán, Tabasco, se puede observar que la superficie exterior de la losa de referencia alcanza una temperatura promedio de  $80.5^{\circ}\text{C}$  y en la superficie interior de la losa una temperatura de  $56.3^{\circ}\text{C}$ , con un flux de calor promedio en la superficie interior de  $206.4\text{ W m}^{-2}$ . Mientras que, con el diseño propuesto de un techo con TABS y el agua como fluido de trabajo, se puede observar que conforme se cambia la ubicación de los tubos intercambiadores de calor embebidos en la losa de concreto, de 0.05 a 0.010 m en el eje y, la temperatura de la superficie interior y exterior puede disminuir hasta  $28.1^{\circ}$  y  $29.4^{\circ}\text{C}$  respectivamente, comparada con la losa de referencia. Con respecto a la ganancia de calor de la superficie interna de la losa, se observa que esta puede disminuir hasta  $185.6\text{ W m}^{-2}$  cuando se utilizan tubos de 0.028 m de diámetro y se fijan a una separación de 0.10 m y una profundidad de 0.05 m. Una vez realizadas las combinaciones para el agua (Caso 1 - 24), se seleccionaron aquellos en los que la temperatura promedio de la superficie interior de la losa fue menor, para realizar las simulaciones con aire como fluido de trabajo (Casos 25 - 28). En esta etapa, se observó que, para los Casos 25 - 28, la temperatura mínima promedio en el interior alcanzó los  $46.5^{\circ}\text{C}$ , mientras que en la superficie exterior alcanzó los  $73.5^{\circ}\text{C}$ , con un flujo de calor promedio en la superficie interior de  $141.6\text{ W m}^{-2}$ . Estos resultados indican que, en comparación con la losa de referencia, la temperatura en la superficie exterior e interior disminuyó en  $7^{\circ}\text{C}$  y  $9.8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, mientras que el flujo de calor hacia la superficie interior se redujo en  $64.8\text{ W m}^{-2}$ . De la tabla de resultados se puede observar que las ganancias de temperatura y de flujo de calor al interior de la habitación son

menores si se utiliza el agua como fluido de trabajo, en lugar del aire, debido a las propiedades termo-físicas de ambos fluidos.

**Tabla 4.3**

*Resultados promedios de la simulación de un techo con TABS y una losa de referencia*

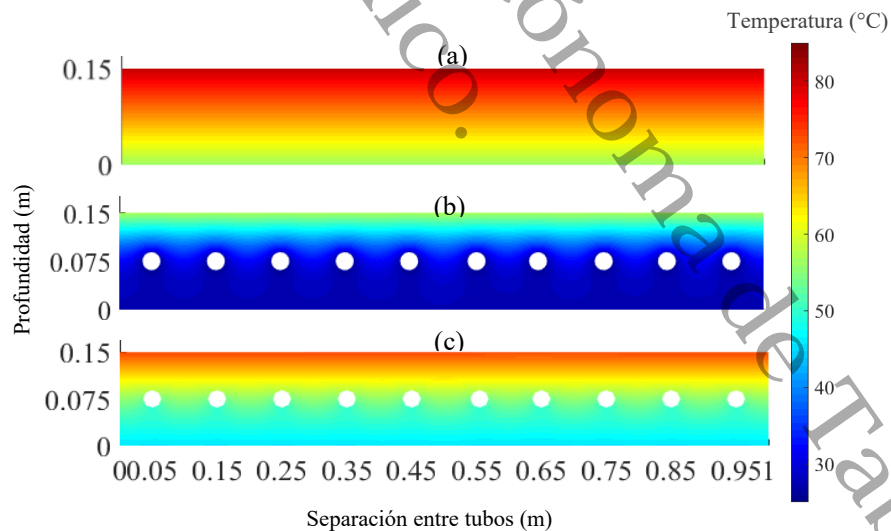
# Caso	D (m)	p (m)	d (m)	$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Fluido de trabajo	T <sub>se</sub> (°C)	T <sub>si</sub> (°C)	q'' <sub>si</sub> (W m <sup>-2</sup> )
CR	-	-	-	-	-	80.5	56.3	206.4
1			0.10	0.20		64.3	30.6	37.0
2		0.05		0.40		63.7	29.7	31.1
3			0.20	0.20		67.7	35.8	71.5
4				0.40		66.9	34.8	64.4
5				0.20		60.2	30.9	38.9
6	0.014	0.075	0.10	0.40		59.4	30.0	32.3
7			0.20	0.20		64.5	36.2	73.9
8				0.40		63.5	35.1	66.7
9			0.10	0.20		54.9	31.2	41.0
10		0.1		0.40		53.8	30.3	34.7
11			0.20	0.20		60.6	36.8	77.6
12				0.40		59.4	35.7	70.5
13			0.10	0.20	Agua	62.6	28.4	22.5
14		0.05		0.40		62.4	28.2	20.8
15			0.20	0.20		65.4	33.0	52.9
16				0.40		65.5	32.7	50.6
17			0.10	0.20		57.9	28.5	23.3
18	0.028	0.075		0.40		57.6	28.3	21.5
19			0.20	0.20		61.9	33.1	53.4
20				0.40		61.5	32.7	51.1
21			0.10	0.20		51.8	28.8	25.3
22		0.1		0.40		51.4	28.6	23.6
23			0.20	0.20		56.7	33.7	57.7
24				0.40		55.9	33.7	57.7
25	0.014		0.10	0.20		76.3	50.7	169.8
26	0.028	0.075		0.40		77.9	52.9	184.2
27	0.014		0.20	0.20	Aire	73.5	46.5	141.6
28	0.028			0.40		76.0	50.0	165.0

*Nota.* Resultados promedio de la simulación térmica de un techo con TABS y de la losa de referencia para distintas configuraciones y fluidos de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.4 se presentan los perfiles de temperatura del Caso 18, Caso 27, en comparación con la losa de referencia, CR. Los Casos 18 y 27 fueron seleccionados debido a que su configuración, permite una implementación estructural adecuada para su construcción respetando los criterios normativos de construcción (Gobierno de la Ciudad de México, 2017). Sin embargo, si se compara el comportamiento del agua y el aire, en la figura puede observar que las temperaturas en la superficie interior del Caso 18 y 27 alcanzan temperaturas de 28.3 y 50.0°C, mientras que la losa de referencia puede alcanzar temperaturas de 56.3°C. Estos resultados muestran que, si se utilizara un techo con TABS utilizando agua como fluido de trabajo, se podría obtener una disminución significativa de hasta 28°C en la superficie interior de una losa, contribuyendo a disminuir las ganancias de calor y a la mejora del ambiente en el interior de un recinto.

**Figura 4.4**

*Perfil de temperatura de los mejores casos vs la losa de referencia*



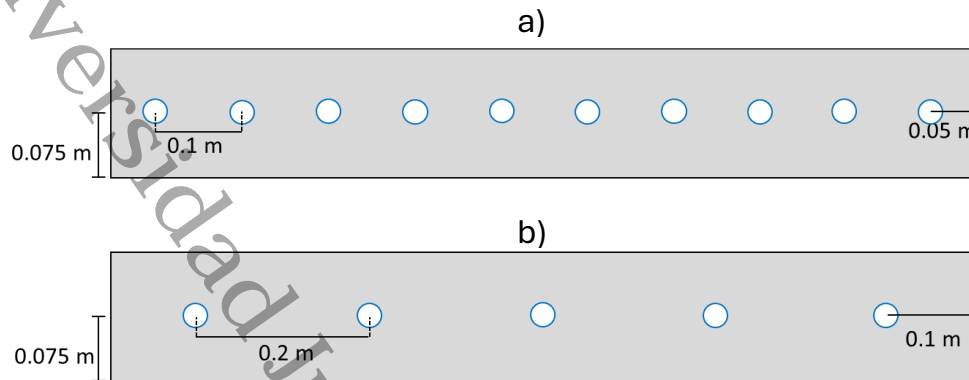
*Nota.* La figura muestra los perfiles de temperatura correspondientes a los casos analizados: (a) losa de concreto de referencia (CR), (b) Caso 18 y (c) Caso 27, obtenidos a partir de la simulación térmica del sistema. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4 Análisis y diseño estructural del techo con TABS

Para la construcción de una vivienda existen normativas adecuadas para cada tipo de proyecto donde se involucre, por lo tanto, es necesario controlar la calidad y seguridad del concreto. Para ello, existen normas que rigen la clasificación y aplicación del concreto en las construcciones como el Reglamento para concreto estructural ACI 318S y la Norma sobre la Calidad del Concreto N·CMT·2·02·005/04 (American Concrete Institute, 2014; Norma M·MMP·2·02·056/06, Revenimiento Del Concreto Fresco, 2006).

A partir de la simulación realizada en Matlab®, se identificó que la mejor ubicación de los tubos intercambiadores de calor se encuentra a 0.075 m de profundidad. Además, se realizó un análisis y diseño estructural para las diferentes separaciones entre tubos, con apoyo del área de Ingeniería Civil para fortalecer el diseño experimental. Estas actividades permitieron diseñar un techo con TABS capaz de reducir las ganancias de calor en el interior de una edificación, garantizando al mismo tiempo la seguridad estructural en las viviendas donde se implemente.

Considerando el análisis realizado se definió que el diseño de la losa será de concreto reforzado, con dimensiones de 1 m de largo  $\times$  1 m de ancho y 0.15 m de espesor. De acuerdo con el diseño de la losa obtenido de la simulación, se fijaron los tubos a una profundidad de 0.075 m, a una separación de 0.10 y 0.20 m entre tubos y una separación 0.05 y 0.10 m de los tubos y las superficies laterales de la losa. En la Figura 4.5 se muestra el diseño de la losa propuesta. En la Figura 4.5 a) se puede observar que hay un total de diez tubos intercambiadores de calor, con una separación de 0.10 m. Mientras que, en la Figura 4.5 b) se observan cinco tubos intercambiadores de calor con una separación de 0.20 m.

**Figura 4.5***Diseño de la losa propuesta*

*Nota.* La figura muestra el diseño de la losa propuesta con dos configuraciones de separación entre tubos intercambiadores de calor: (a) separación entre tubos de 0.10 m y (b) separación entre tubos de 0.20 m. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el diseño de las losas propuestas (Figura 4.5) se realizaron los cálculos para obtener las cargas permanentes y cargas variables. En la Ecuación 17 se puede calcular la carga permanente o carga muerta que es el peso total de la construcción, donde se incluyen los pesos de sus componentes: losa, pisos, plafón. Por otra parte, la carga variable o carga viva se puede calcular mediante la Ecuación 18. Dicha carga, incluye las acciones establecidas por reglamento de acuerdo con el uso de la estructura, conforme a lo indicado en las Normas Técnicas Complementarias de la CDMX (NTC-CDMX-2017), así como, las acciones asociadas a las condiciones de servicio. Dentro de estas se contemplan los efectos térmicos, los cuales, de acuerdo con la normativa, se consideran como acciones que pueden inducir deformaciones y esfuerzos por variaciones de temperatura en los elementos estructurales. Aunque estos efectos no representan un incremento de peso o masa adicional sobre la losa, sí forman parte de las condiciones que deben considerarse en el análisis estructural para garantizar el adecuado desempeño y seguridad de la edificación.

La sumatoria de la carga viva y la carga muerta, da como resultado la carga de servicio, que es la carga que determina la condición diaria que tendrá el edificio y se puede calcular mediante la Ecuación 19. La carga de diseño se utiliza para aumentar la seguridad en la edificación, mediante factores de seguridad establecidos, esta carga nos ayudará a determinar la cantidad mínima de acero en la construcción de la losa y se puede calcular mediante la Ecuación 20.

$$CM = \sum(\text{Espesor}) \times (\text{Peso volumétrico del material}) = 483 \text{ kg m}^{-2} \quad (17)$$

$$CV = \text{Casa-Habitación (NTC-CDMX-2017)} = 190 \text{ kg m}^{-2} \quad (18)$$

$$CS = CM + CV = 673 \text{ kg m}^{-2} \quad (19)$$

$$CD = (1.3 CM + 1.5 CV) = 912.9 \text{ kg m}^{-2} \quad (20)$$

Donde CM es la carga muerta, CV es la carga viva, CS es la carga de servicio, y CD es la carga de diseño, todas en  $\text{kg m}^{-2}$ .

Para determinar cuánto peso soportará la losa de concreto reforzado diseñada, esta se dividió en secciones de menor tamaño llamados elementos estructurales (Caso A y Caso B), para los casos de la Figura 4.5. A continuación, se describen las condiciones de cada caso:

#### **Caso A.**

Separación entre tubos de 0.10 m, con una viga de 0.06 m × 0.15 m.

Peso distribuido en una sección o viga ( $W_A$ ) = (0.1 m) × (912.9  $\text{kg m}^{-2}$ ) = 91.29  $\text{kg m}^{-1}$

#### **Caso B.**

Separación entre tubos de 0.20 m, con una viga de 0.165 m × 0.15 m.

Peso distribuido en una sección o viga ( $W_A$ ) = (0.2 m) × (912.9  $\text{kg m}^{-2}$ ) = 182.58  $\text{kg m}^{-1}$

Para los casos A y el B, en donde se tiene un elemento estructural o una viga apoyada con una carga uniformemente distribuida se requiere realizar el cálculo del máximo momento a flexión en una viga simple apoyada con carga distribuida sobre una superficie lineal mediante la Ecuación 21. En la Tabla 4.4 se reportan los momentos máximos a la flexión ( $M_{\max}$ ) para los Casos A y B, con dos áreas o claros seleccionados, de 3 y 6 m.

$$M_{\max} = \frac{W_A L_C^2}{8} \quad (21)$$

Donde  $W_A$  es el peso distribuido en una sección o viga en  $\text{kg m}^{-1}$  y  $L_C$  es la longitud del claro o área a techar en m.

**Tabla 4.4**

*Momento máximo a la flexión para los Casos A y B*

	$L_C = 3 \text{ m}$	$L_C = 6 \text{ m}$
$M_{\max}$ Caso A	102 kg m	205 kg m
$M_{\max}$ Caso B	410 kg m	822 kg m

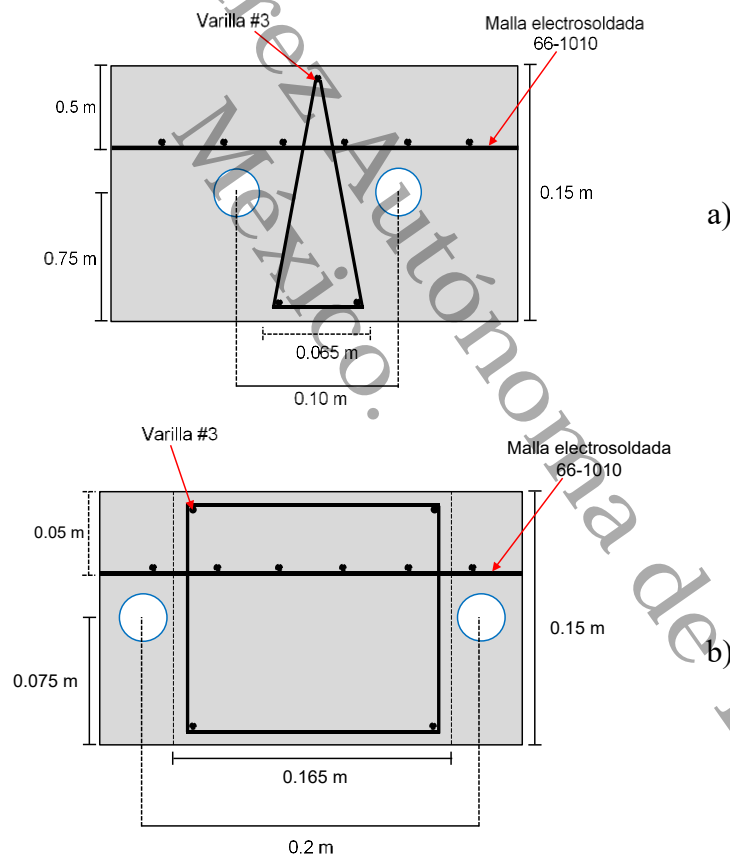
*Nota.* Momentos máximos a la flexión para los Casos A y B, calculados para claros de 3 y 6 m mediante la Ecuación 21.

En la Figura 4.6 se muestran los diseños de una sección de la losa de los casos A y Caso B, con la distribución y ubicación de las varillas de acero que permita soportar la carga de  $200 \text{ kg m}^{-2}$ . Este criterio de diseño se fundamenta en lo establecido por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, las cuales señalan que el dimensionamiento del refuerzo debe garantizar la resistencia y seguridad estructural ante las cargas de servicio previstas (Gobierno de la Ciudad de México, 2017). Como puede observarse, para ambos casos se plantea colocar una malla electrosoldada 66-1010 a una distancia de la superficie interior de 0.010 m. En la Figura 4.6 a) se puede

observar que, entre cada tubo intercambiador de calor se puede colocar una configuración triangular y una configuración rectangular, mientras que, para el Caso B de la Figura 4.6 b) se propone una configuración rectangular, en ambos casos con el uso de varilla # 3. La selección del número de varilla se realiza de acuerdo con el cálculo del máximo momento a la flexión vs cantidad de acero mínimo. En donde, se realizaron cálculos para obtener el máximo momento a flexión con carga distribuida y la cantidad de acero máxima, para una habitación con un claro de 3 y de 6 m.

**Figura 4.6**

*Diseño estructural de la losa de concreto reforzado*



*Nota.* La figura muestra el diseño estructural de la losa de concreto reforzado correspondiente a (a) Caso A y (b) Caso B, incluyendo la disposición del acero

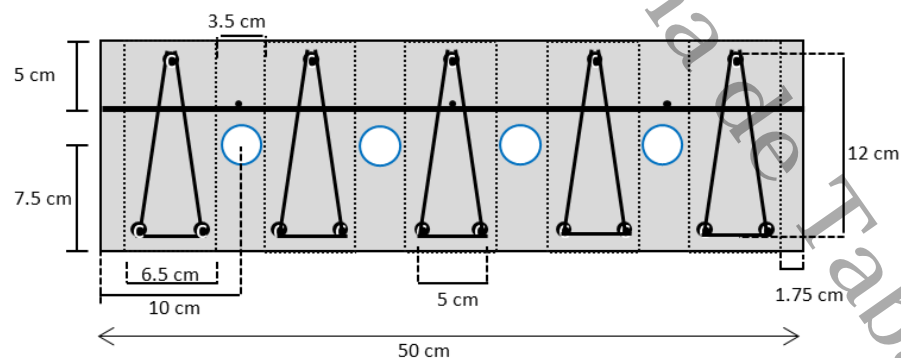
de refuerzo y la malla electrosoldada considerada en el análisis estructural. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 4.6 ambos casos cumplen con los requerimientos estructurales, por lo cual la selección del modelo a implementar dependerá de aspectos relacionados con optimización de la cantidad de material y facilidad de implementación. Esto debido a que, para su implementación posterior en losas reales, estos aspectos contribuirán a su uso, así como, a la factibilidad técnica y económica de la propuesta de techo.

Para este estudio, se seleccionó el diseño estructural Caso A de la Figura 4.6. A partir de esta selección, se realizó el diseño 3D en SolidWorks® de las losas que se implementarán, considerando la muestra de techo con TABS (L-TABS), la muestra de techo con una losa referencia (L-REF) y la muestra de techo por donde circula aire (L-AIR) En la Figura 4.7 se muestra el diseño en 2D de la losa propuesta con tubos interiores, a partir de la cual se obtuvo la distribución base para el modelo 3D.

**Figura 4.7**

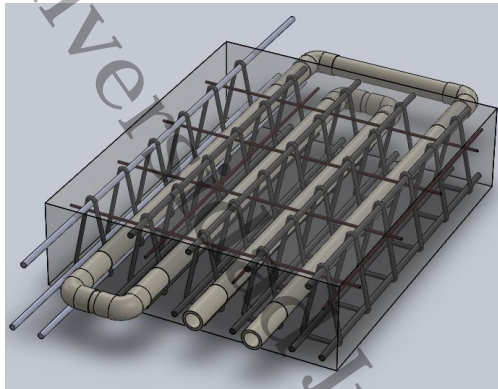
*Diseño en 2D de la losa propuesta*



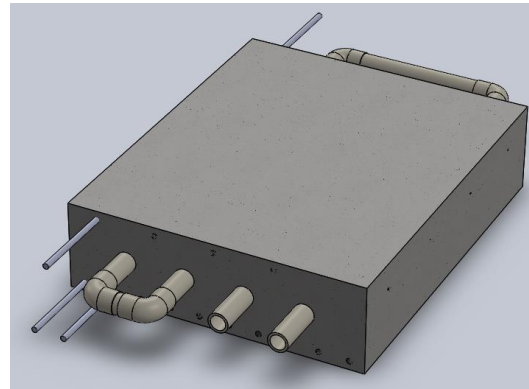
*Nota.* La figura muestra el diseño bidimensional de la losa propuesta utilizado para el análisis del sistema. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.8 se presenta el esquema de los modelos en 3D de las losas que se analizarán en este trabajo de investigación. En las figuras de la izquierda se muestra el interior de las losas, en donde se puede observar la distribución de las varillas, la separación y distribución del armado de acero, así como la distribución de los ductos. En las figuras ubicadas a la izquierda se muestra la vista interior de las losas, donde se aprecia con mayor detalle la distribución del acero de refuerzo, incluyendo la disposición, separación y configuración del armado estructural, así como la ubicación de los ductos o tubos intercambiadores de calor embebidos en el concreto. Esta representación permite identificar la forma en que los elementos estructurales y térmicos se integran dentro de la losa, garantizando tanto la resistencia mecánica como la funcionalidad del sistema TABS. Por otra parte, en las figuras ubicadas a la derecha se presentan las vistas exteriores de las losas, las cuales muestran la geometría general del elemento constructivo y su acabado superficial. Estas vistas permiten comprender la relación entre la estructura interna y su forma final, así como la posición relativa de los ductos dentro del volumen de la losa.

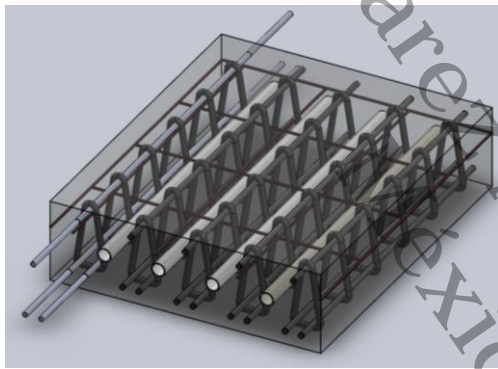
En estos modelos se tomaron en cuenta las consideraciones estructurales y térmicas para su óptimo funcionamiento. Por otra parte, se puede observar una sección de tres varillas de 0.15 m de largo que se dejarán al exterior del concreto por cada lado, esto con la finalidad de medir el efecto de la corrosión en cada una de las losas, desde el punto de vista de concreto. Esto, debido a que el armado de acero de la losa de concreto se encuentra en contacto directo con el concreto y éste a su vez con techo con TABS.

**Figura 4.8***Diseño en 3D de las losas propuestas*

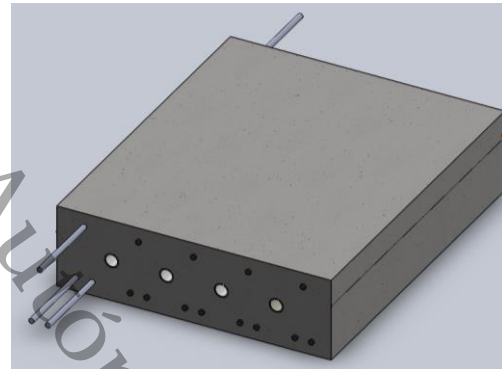
a) Vista interior de L-TABS



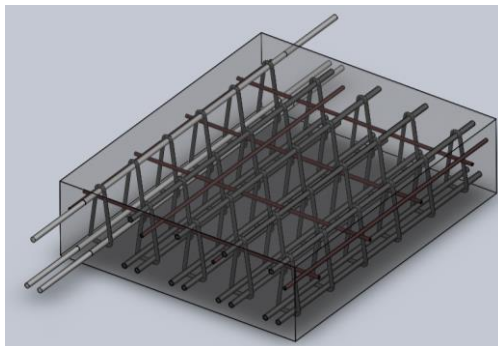
b) Vista exterior de L-TABS



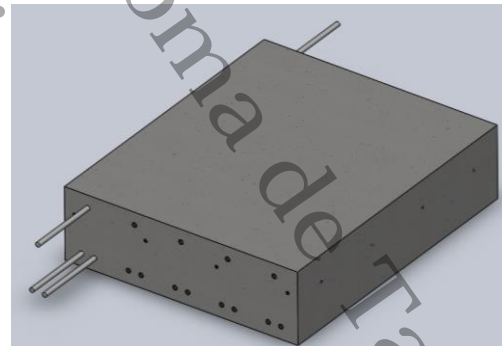
c) Vista interior de L-AIR



d) Vista exterior de L-AIR



e) Vista interior de L-REF



f) Vista exterior de L-REF

*Nota.* La figura presenta el diseño tridimensional de las losas propuestas, incluyendo: (a) vista interior de la L-TABS, (b) vista exterior de la L-TABS, (c) vista interior de la L-AIR, (d) vista exterior de la L-AIR, (e) vista interior de la L-REF y (f) vista exterior de la L-REF. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.5 Prueba de resistencia a la compresión del concreto

Para medir la calidad y durabilidad del concreto a utilizar en la construcción de la celda calorimétrica, se llevó a cabo la prueba de resistencia a la compresión simple. La prueba de resistencia a la compresión del concreto o prueba del concreto, se utiliza para determinar la carga máxima de deformación en un área de muestra o cilindro de ensaye, esta se mide en  $f'c$  ( $\text{kg cm}^{-2}$ ). Dentro del análisis de diseño estructural se fijó una carga máxima a la compresión de  $200 \text{ kg cm}^{-2}$ , tomando aspectos de la NORMA NTC-CDMX-2017 (Gobierno de la Ciudad de México, 2017) para concreto residencial. Para llevar a cabo la dosificación de la mezcla de concreto, se realizó bajo el Método de Diseño de Mezclas del American Concrete Institute (American Concrete Institute, 2014).

##### *Procedimiento de elaboración de cilindros de concreto*

A partir de la dosificación de la mezcla del concreto se elaboraron seis cilindros de concreto, llamados mezcla de control, en donde se consideró el procedimiento descrito por Hernández López & Santana Sánchez (2018). El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

1. Se elaboró la mezcla de concreto con la siguiente cantidad de materiales: 7 litros de agua, 9.32 kg de cemento, 39.87 kg de grava y 22.51 kg de arena.
2. Se realizó la limpieza de los moldes metálicos para cilindros de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura.
3. Se realizó el armado y ajuste de tornillos de sujeción de los moldes, y posteriormente, fueron engrasados para poder retirar la muestra con facilidad.
4. Se llevó a cabo el cribado de la arena con la malla número 4 del ASTM ( $0.00475 \text{ m}$ ).
5. Se realizó la preparación de la mezcla en revolvedora:

- a. Limpieza de revolvedora.
  - b. Encendido de revolvedora.
  - c. Adición del 10% del agua requerida.
  - d. Adición de grava.
  - e. Adición de arena.
  - f. Adición del cemento requerido por la dosificación de la mezcla.
  - g. Adición del agua restante.
  - h. Se mezclaron todos los componentes de 3 - 5 minutos en la revolvedora.
6. Se llevó a cabo la prueba de revenimiento de acuerdo con lo establecido en la Norma M-MMP-2-02-056/06 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2020), la cual midió 0.1 m desde la mezcla hasta el cono de revenimiento.
  7. Se realizó el vaciado de la mezcla de concreto en los moldes cilíndricos en una superficie nivelada y firme. Se llenó el molde en tres capas y se compactó varillando 25 veces cada capa, adicionando un vibrado con martillo de goma en los laterales del molde para evitar quedará atrapado aire.
  8. Se realizó el desmolde de los cilindros de concreto, 24 horas después de su elaboración. Posteriormente se realizó el curado de cilindros al introducirlos en una pileta de agua, de acuerdo con la Norma ASTM C31 (ASTM C31, 2018).

#### *Ensayo de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto*

Para llevar a cabo el ensayo de resistencia a la compresión simple, a los 7 días se retiraron del agua de curado dos cilindros de concreto y se realizó el cálculo del peso volumétrico del cilindro, mediante lo establecido por la Norma Mexicana

NMX-C073-0NNCCE-2004 (ONNCCE, 2004). Posteriormente, se llevó a ensayo de compresión en la Prensa digital marca DAVI con un alcance de presión máxima de 120 toneladas, ubicada en el Laboratorio de Suelos de la DAIA, mediante lo establecido por la Norma M-MMP-2-02058/04 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004). Una vez concluida la medición, se realizó la recolección de resultados del ensayo de cada cilindro, para el cálculo de la resistencia a la compresión, obtenida a través de la carga aplicada por la prensa digital, los cuales fueron registrados en la Tabla 4.6 para su posterior análisis. Este mismo procedimiento fue llevado a cabo para los cilindros restantes, para 14 y 28 días. Para el cálculo de la resistencia a la compresión del concreto en  $\text{kg cm}^{-2}$  se realizó mediante la Ecuación 21, en donde se utilizó la carga máxima suministrada por la prensa y el área transversal del cilindro de concreto de prueba.

$$R = \frac{P}{A_T} \quad (21)$$

Donde P es la carga máxima aplicada por la máquina de compresión en ton y  $A_T$  es el área transversal del cilindro en  $\text{cm}^2$ .

Como se puede observar en la Tabla 4.5, se muestran los datos obtenidos para cada cilindro de concreto, para un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días. Dentro de los resultados obtenidos de la prueba a la resistencia por compresión, se puede observar que la carga mínima aplicada a los cilindros de concreto fue de 22.01 ton y una carga máxima aplicada de 31.2 ton. Además, se observa de igual manera que la resistencia aumentó de 125.8 a 208.9  $\text{kg cm}^{-2}$ , conforme los días de curado aumentaron de 7 hasta 28 días. En la Figura 4.9 se presenta de forma gráfica el comportamiento de la resistencia promedio de compresión del concreto, en donde, se observa la comparación entre la resistencia teórica establecida en el análisis de diseño estructural y las resistencias promedio de la mezcla de control.

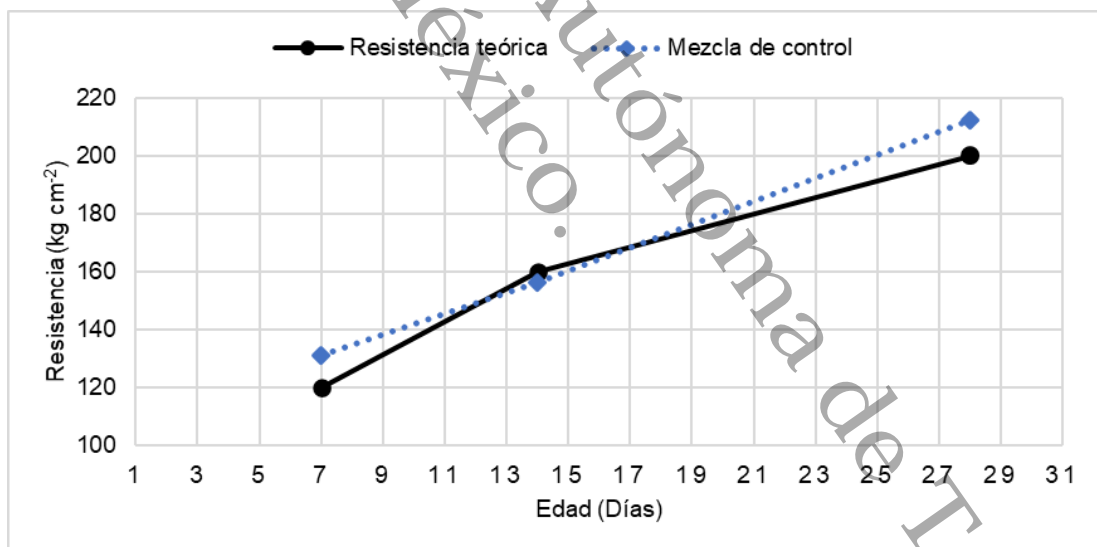
**Tabla 4.5***Resultados de la prueba de resistencia a la compresión del concreto*

Muestra	Edad (Días)	Revenimiento (cm)	Peso (kg)	Peso Volumétrico ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Área transversal ( $\text{cm}^2$ )	Carga máx. (ton)	Resistencia		Resistencia promedio	
							( $\text{kg cm}^{-2}$ )	(%)	( $\text{kg cm}^{-2}$ )	(%)
1	7		12.3	2350.1	174.8	22	125.8	62.9	131	65.5
2			12.4	2361	174.8	23.8	136.1	68		
3	14	10	12.3	2345.2	174.8	23.3	133.6	66.8	156.1	78
4			12.4	2360.7	174.8	31.2	178.6	89.3		
5	28		12.3	2346.9	174.8	36.5	208.9	104.4	212.3	106.1
6			12.3	2359.3	174.8	37.7	215.8	107.9		

*Nota.* Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades de curado. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.9**

*Comportamiento de la resistencia de la mezcla de concreto en función del tiempo de curado*



*Nota.* La figura muestra la evolución de la resistencia a la compresión de la mezcla de concreto en función de la edad de curado, comparando los valores teóricos con los resultados de la mezcla de control. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los seis cilindros de concreto ensayados muestra que, tras 28 días de curado, su resistencia promedio alcanza  $212.3 \text{ kg cm}^{-2}$ . Este resultado

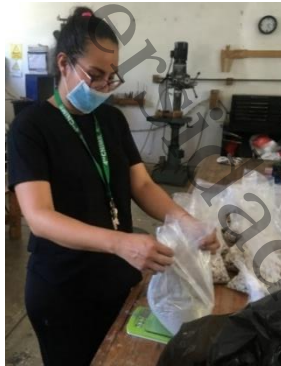
confirma que las proporciones empleadas en la mezcla cumplen con la resistencia especificada de  $200 \text{ kg cm}^{-2}$  en el diseño estructural para viviendas, conforme a la Norma Técnica de Construcción de la Ciudad de México NTC-CDMX-2017 (Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

En la Figura 4.10 se presenta de forma esquemática el procedimiento general que se llevó a cabo desde la elaboración de la mezcla de concreto, la construcción de los cilindros y la realización de las pruebas de resistencia a la compresión simple del concreto, de acuerdo con lo que se describió anteriormente. Inicialmente se presenta la etapa de medición y preparación de los materiales, donde se realizó el pesaje del cemento, arena, grava y agua conforme a la dosificación establecida, seguido del cribado de la arena para asegurar una adecuada granulometría. Posteriormente, se elaboró la mezcla de concreto procurando su homogeneidad para garantizar propiedades mecánicas uniformes.

El procedimiento, descrito anteriormente, continuó con la prueba de revenimiento para evaluar la trabajabilidad del concreto fresco y verificar su adecuada consistencia antes del vaciado en moldes cilíndricos. Una vez colados, los especímenes fueron sometidos a un proceso de curado controlado para favorecer el desarrollo de su resistencia. Finalmente, se realizaron las mediciones y las pruebas de compresión simple en los cilindros, con el fin de determinar las propiedades mecánicas del concreto y comprobar que cumpliera con las condiciones estructurales requeridas para la fabricación de las losas.

**Figura 4.10**

*Procedimiento para la elaboración, curado y determinación de la resistencia de los cilindros de concreto*



a) Medición de materiales.



b) Cribado de la arena.



c) Preparación de la mezcla.



d) Prueba de revenimiento.



e) Vaciado del concreto en los moldes.



f) Curado de los cilindros.



g) Medición de los cilindros.



h) Ensayo del cilindro.

*Nota.* La figura muestra las etapas del proceso experimental para la elaboración y evaluación del concreto: (a) medición de materiales, (b) cribado de la arena, (c) preparación de la mezcla, (d) prueba de revenimiento, (e) vaciado del concreto en los moldes, (f) curado de los cilindros, (g) medición de los cilindros y (h) ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Construcción del sistema experimental

Considerando el modelo físico del techo con TABS y el diseño del techo de pruebas propuesto se realizó el diseño del sistema experimental completo. El sistema experimental considera un espacio donde se mantendrán condiciones controladas del aire, al que llamaremos en lo sucesivo cámara. Para construir e instrumentar el prototipo experimental, se revisaron trabajos previos reportados en la literatura, con la finalidad de establecer los criterios que permitieran obtener un espacio con una distribución homogénea de temperatura y flujo de aire en contacto con la superficie interior de las muestras de techo.

La Tabla 4.6 muestra los aspectos obtenidos de la revisión de la literatura. A partir de la información analizada, se observó que los autores que han trabajado con sistemas térmicamente activados reportan el uso de celdas o cámaras, una de referencia y una celda de prueba, en la mayoría de los estudios experimentales trabajan bajo condiciones controladas. Para la construcción de la celda calorimétrica utilizan el concreto como principal material y como fluido para circular por los tubos intercambiadores de calor, seleccionan al agua. Mientras que, para los tubos utilizan diversos materiales, entre los cuales se encuentra el PVC, cobre y polietileno reticulado.

**Tabla 4.6***Dimensiones y materiales reportados en la literatura para celdas calorimétricas*

Ubicación del intercambiador de calor	Dimensiones	Materiales		Fluido	Autor
		Cámara	Tubos		
Pared	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara termostática: <math>4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}</math></li> <li>• Cámara de pruebas: <math>4\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}</math></li> </ul>	-	-	Agua	Venko et al. (2015)
Piso, Pared	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara principal: <math>5\text{ m} \times 2.67\text{ m} \times 5.61\text{ m}</math></li> <li>• Cámara de prueba (1 y 2): <math>5\text{ m} \times 2.67\text{ m} \times 2.805\text{ m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto</li> <li>• Fibra de madera</li> </ul>	-	-	Schmelas et al. (2015)
Techo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara principal: <math>2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2.80\text{ m}</math></li> <li>• Cámara principal: <math>7.26\text{ m} \times 4.7\text{ m} \times 3\text{ m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto</li> <li>• Hormigón</li> </ul>	PE-RT (20 mm Ø)	Agua	Zhang et al. (2016)
Pared	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara 1: <math>3.3\text{ m} \times 3.35\text{ m} \times 2.8\text{ m}</math></li> <li>• Cámara 2: <math>3.3\text{ m} \times 2.25\text{ m} \times 2.8\text{ m}</math></li> </ul>	-	-	-	Zhu et al. (2016)
Pared	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara de pruebas: <math>2.25\text{ m} \times 1.6\text{ m} \times 1.2\text{ m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto</li> </ul>	Cobre (12 mm Ø)	Agua/ anticongelante	Ibrahim et al. (2017)
Techo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara de pruebas: <math>3.6\text{ m} \times 4.7\text{ m} \times 3.1\text{ m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto</li> <li>• Lana mineral</li> <li>• Poliestireno</li> </ul>	PVC (17 mm Ø)	-	Nageler et al. (2018)
Techo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Techo: 0.16 m</li> </ul>	-	Cobre (10 mm Ø)	Agua	Hu et al. (2018)
Pared	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara de pruebas: <math>5.25\text{ m} \times 2.7\text{ m} \times 2.7\text{ m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ladrillo alveolar</li> <li>• Concreto</li> <li>• Poliestireno</li> </ul>	Polietileno (18 mm Ø)	Agua	Romaní et al. (2018)
Techo, Piso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara de pruebas: <math>3.46\text{ m} \times 3.46\text{ m} \times 3.15\text{ m}</math></li> <li>• Techo: 0.15 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto</li> </ul>	PEX (16 mm Ø)	Agua	Leo Samuel et al. (2019)

*Nota.* La tabla resume estudios previos sobre sistemas de construcción térmicamente activados, considerando las dimensiones de las cámaras experimentales, la ubicación del intercambiador de calor, los materiales empleados y el fluido de trabajo utilizado en cada investigación. La información fue recopilada a partir de las fuentes citadas en la tabla. \*Las dimensiones de la cámara son largo, ancho y alto.

Las dimensiones del arreglo experimental se consideraron de acuerdo con lo reportado en la literatura. El arreglo experimental se diseñó de tal manera que la base soporte permita colocar los tres techos de prueba bajo las mismas condiciones ambientales. Para lo cual, se considera incluir un deflector que

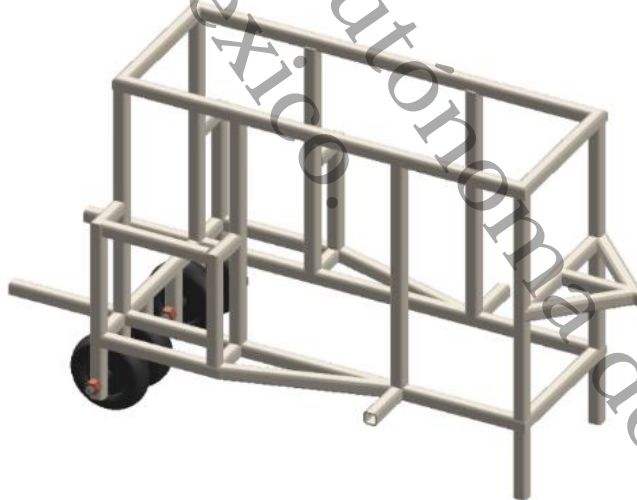
direccione el flujo de aire. La construcción del prototipo experimental se dividió en tres secciones: 1) base soporte, 2) carcasa del sistema, 3) losa.

#### 4.2.1 Base soporte

La base soporte del sistema consta de una estructura metálica con llantas adicionales para su traslado hacia la zona de medición. Esto con la finalidad de facilitar el traslado de las losas de prueba con un vehículo, ya que se calcula que el arreglo experimental tendrá un peso aproximado de 450 kg. En la Figura 4.11 se observa una vista transversal del diseño de la base soporte, que fue realizada mediante el software de diseño asistido por computadora SolidWorks®.

#### Figura 4.11

*Diseño de la estructura de la base soporte del sistema experimental*



*Nota.* La figura muestra el diseño en 3D de la estructura de la base soporte del sistema experimental. Fuente: Elaboración propia.

La base soporte fue construida con forma rectangular con 45 tramos de PTR cuadrado de acero de 0.0508 m (2"), con dos puertas hechas con ángulo de acero de 0.0254 m (1"). A la base soporte adicionaron y fijaron 4 llantas en la parte

inferior para mover el sistema hacia la zona de prueba. Una vez construida la base soporte del sistema, fue recubierto con esmalte primario gris mate de Comex®, para proteger la carcasa de acero contra la corrosión al estar en contacto con la atmósfera y el agua. En la Figura 4.12 se observa el proceso de construcción de la base soporte y el proceso de recubrimiento.

**Figura 4.12**

*Proceso de construcción de la base soporte*

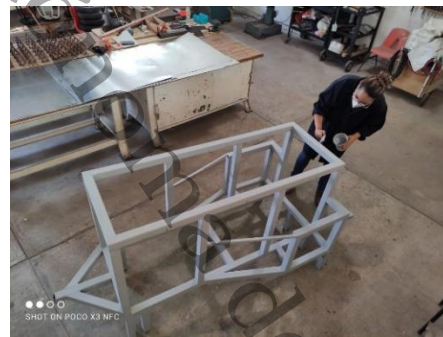


a) Corte de piezas y soldado de base superior

b) Proceso de soldado de base soporte



c) Base soporte construida.



d) Proceso de pintado de la base soporte del sistema.

*Nota.* La figura muestra el proceso de construcción de la base soporte del sistema experimental: (a) corte de piezas y soldado de la base superior, (b) proceso de soldadura de la base soporte, (c) base soporte construida y (d) proceso de pintado de la base soporte. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.2 Carcasa del sistema

La carcasa fue recubierta con lámina de acero galvanizado de calibre 18 y aislado térmicamente con secciones de poliestireno extruido (Foamular®) de 0.0508 m (2") de espesor. En la Figura 4.13 se puede observar la implementación del aislamiento de las paredes interiores de la carcasa, las cuales fueron recubiertas con pintura blanca mate de la marca Comex®, con propiedades térmicas conocidas. Esto con la finalidad de minimizar el efecto de los alrededores en la cuantificación de las ganancias de calor y contribuir a obtener un ambiente homogéneo en el interior del prototipo experimental. Para proteger la carcasa de acero contra la corrosión al estar en contacto con la atmósfera y el agua, se le colocó esmalte alquidálico blanco mate de la marca Comex®.

**Figura 4.13**

*Construcción y aislamiento de la estructura de la base del sistema*



a) Proceso de recubrimiento de la carcasa.



b) Proceso de aislamiento de las paredes en el interior.



c) Proceso de pintado de paredes en el interior.



d) Proceso de pintado de las paredes al exterior.

*Nota.* La figura muestra el proceso de construcción y aislamiento de la estructura de la base del sistema: (a) recubrimiento de la carcasa, (b) aislamiento de las paredes interiores, (c) pintado de las paredes interiores y (d) pintado de las paredes exteriores. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 Armado estructural de las muestras

Para la implementación del sistema experimental, se realizó el diseño de los techos propuestos en un software de diseño asistido por computadora (CAD). Este proceso incluyó el análisis estructural y la selección del diseño óptimo a partir de las simulaciones presentadas en la sección anterior.

#### *Construcción del armado de acero*

Considerando el análisis y diseño estructural de un techo, el cual se ha presentado en la sección anterior, se llevó a cabo la construcción del armado de acero que es la estructura de soporte del concreto. De acuerdo con los resultados obtenidos del cálculo del máximo momento a la flexión vs la cantidad de acero mínimo se realizó la selección del número de varilla, el número de malla electrosoldada, la configuración de las viguetas, así como, la distribución y ubicación del armado. En la Tabla 4.7 se enlistan los materiales utilizados para la construcción del armado de acero para las tres losas de concreto. Las tres losas propuestas contienen la misma cantidad de material en el armado. El armado está compuesto por viguetas triangulares de alambón de 2/8", varillas de acero de 3/8", en donde se plantea el uso de una malla electrosoldada de calibre 10 y un entramado de 0.1524 m × 0.1524 m (6" x 6").

**Tabla 4.7**

*Materiales utilizados en el armado de acero para las losas*

Cantidad	Nombre	Material
30	Estribos	Alambón de 2/8"
15	Varillas	Acero de 3/8"
1	Malla electrosoldada	Alambre 66-1010

*Nota.* La tabla presenta los materiales utilizados en el armado de acero de la losa, indicando la cantidad, el tipo de elemento y el material empleado en el refuerzo estructural. Fuente: Elaboración propia.

El armado de acero de cada losa de concreto se realizó con apoyo de un trabajador de la construcción, esto con el fin de realizar los amarres con la técnica utilizada en el campo real. En la Figura 4.14 se presenta el material utilizado y el proceso de construcción del armado de acero de los techos.

**Figura 4.14**

*Proceso y construcción del armado de acero de las losas propuestas*



a) Armado de estructura de acero para una losa.

b) Configuración del armado para tres losas.

*Nota.* La figura muestra el proceso de construcción del armado de acero de las losas propuestas: (a) armado de la estructura de acero para una losa y (b) configuración del armado para tres losas. Fuente: Elaboración propia.

#### *Construcción y colado de las losas de concreto*

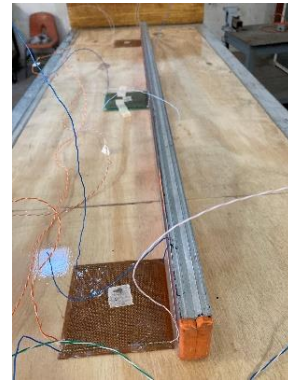
Después de realizar la construcción del armado de acero de las losas propuestas, se procedió con la elaboración de la cimbra de la losa y la colocación del armado de acero sobre la base soporte del sistema experimental. Para retirar con mayor facilidad la cimbra de madera, se realizó un recubrimiento de aceite a la madera. En la Figura 4.15 se puede observar la construcción de la cimbra de madera, la colocación de los sensores de temperatura y de flujo de calor, el fijado de la cimbra a la base soporte del sistema experimental y engrasado de la cimbra de madera.

**Figura 4.15**

*Construcción, colocación de sensores y fijación de la cimbra*



a) Construcción de la cimbra de madera.



b) Colocación de sensores.



c) Fijado de la cimbra a la base soporte de los techos.



d) Recubrimiento de la madera.

*Nota.* La figura muestra el proceso de construcción de la cimbra, la colocación de sensores y la fijación a la base soporte de los techos: (a) construcción de la cimbra de madera, (b) colocación de sensores, (c) fijado de la cimbra a la base soporte y (d) recubrimiento de la madera. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la mezcla de concreto con las cantidades estimadas para las tres losas de concreto, considerando el diseño de la mezcla de concreta propuesta en la prueba a la resistencia de concreto. En la Tabla 4.8 se puede observar las cantidades de los materiales utilizados para la mezcla de concreto. La mezcla de concreto se realizó y se vació en tres partes iguales en el armado de acero con la finalidad de no dañar los sensores de temperatura y de flujo de calor. En la Figura 4.16 se puede observar el proceso de vaciado de la mezcla y

la losa final de concreto sobre la base soporte del prototipo experimental, después del proceso de fraguado durante 7 días.

**Tabla 4.8**

*Materiales para la mezcla de concreto para la elaboración de las losas*

Material	Cantidad
Cemento (kg)	58.58
Grava (kg)	250.61
Arena (kg)	141.49
Agua (L)	44.00

*Nota.* La tabla presenta los materiales y las cantidades empleadas para la elaboración de la mezcla de concreto utilizada en la construcción de las losas.

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.16**

*Proceso de vaciado de la mezcla de concreto*



a) Vaciado de la mezcla de concreto.



b) Vaciado final de la mezcla de concreto.



c) Losa de concreto fraguada y desmoldada.

*Nota.* La figura muestra el proceso de vaciado de la mezcla de concreto: (a) vaciado inicial de la mezcla, (b) vaciado final y (c) losa de concreto fraguada y desmoldada. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Instrumentación de la base soporte y carcasa del sistema experimental

Como parte de la instrumentación del sistema, se utilizaron sensores RTD PT1000 de clase B para medir las temperaturas en el ambiente interior y en el ambiente exterior. Además, para medir la cantidad de energía que incide sobre los techos (irradiancia solar), se colocó un piranómetro de primera clase, con un rango de medición de 0 a 2000 W m<sup>-2</sup> y una sensibilidad de 10 μV W<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

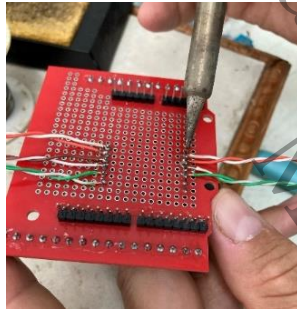
Para calcular la presión, la temperatura en la superficie de cielo en el ambiente interior y exterior, así como, la humedad relativa se realizó la construcción de dos sistemas de adquisición de datos mediante un microcontrolador con comunicación por conexión USB. En la Figura 4.17 se puede observar la conexión de los sensores de temperatura, presión y humedad relativa. Cada sistema de adquisición fue realizado con la placa ARDUINO UNO, en donde se conectó el sensor de presión barométrica BMP180 (300 - 1100 hPa), el sensor de temperatura y humedad relativa DHT11(0°C - 50°C y 20% - 90% RH) y un sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 (-70°C - 380°C). Este dispositivo de adquisición de datos tiene la capacidad de almacenar información sin el uso de una alimentación, ya que está instrumentado y fue programado para almacenar los datos mediante una tarjeta SD que cuenta con una pila de respaldo para su funcionamiento sin alimentación.

**Figura 4.17***Proceso de armado de sistema de adquisición de datos*

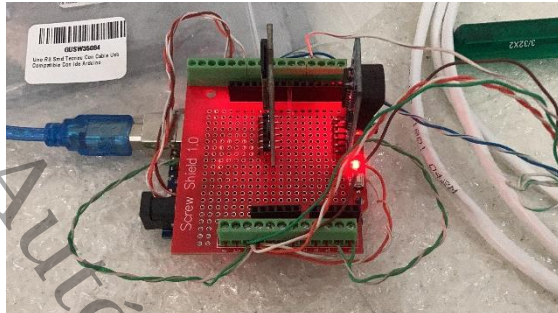
a) Placa ARDUINO UNO



b) Colocación de sensores



c) Proceso de soldado de sensores



e) Sistema de adquisición de datos final

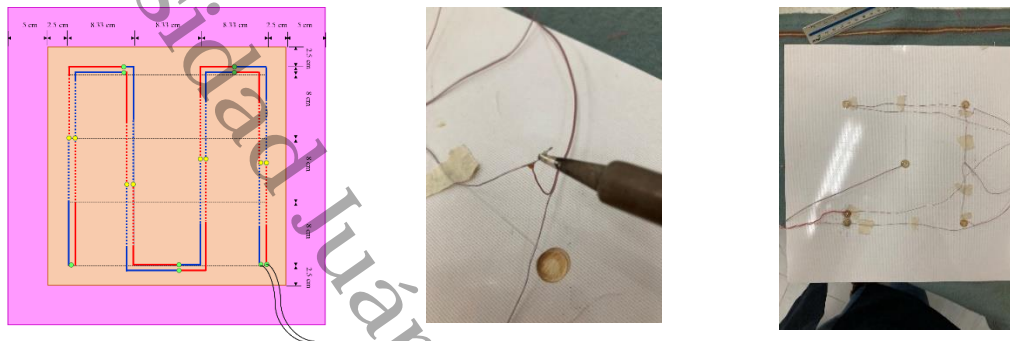
*Nota.* La figura muestra el proceso de armado del sistema de adquisición de datos: (a) placa Arduino UNO, (b) colocación de sensores, (c) proceso de soldadura de sensores y (d) sistema de adquisición de datos final. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se diseñó y manufacturó un medidor de coeficiente convectivo (*HTCM*) con la finalidad de medir las ganancias de calor al sistema por convección debido al ambiente exterior. El medidor de coeficientes convectivos se manufacturó mediante el procedimiento NFRC 201 (National Fenestration Rating Council, 2020) para mediciones de coeficientes de ganancias de calor solar. El medidor de coeficiente convectivo fue construido con placa fenólica de 0.3 x 0.3 m, ángulo de aluminio de 0.0508 m (2"), Foamular de 0.0508 m (2") y

termopilas de termopar tipo T. En la Figura 4.18 se puede observar el proceso de manufactura e instrumentación del *HTCM*.

**Figura 4.18**

*Proceso de manufactura de medidor de coeficiente convectivo*



a) Diseño del medidor de coeficiente convectivo.

b) Proceso de soldado de termopilas.

c) Sellado de termopilas y unión a cables para conexión.

*Nota.* La figura muestra el proceso de manufactura e instrumentación del medidor de coeficiente convectivo, incluyendo: (a) el diseño del dispositivo, (b) el proceso de soldadura de las termopilas y (c) el sellado de las termopilas y su unión a los cables de conexión, conforme al procedimiento NFRC 201. Fuente: Elaboración propia.

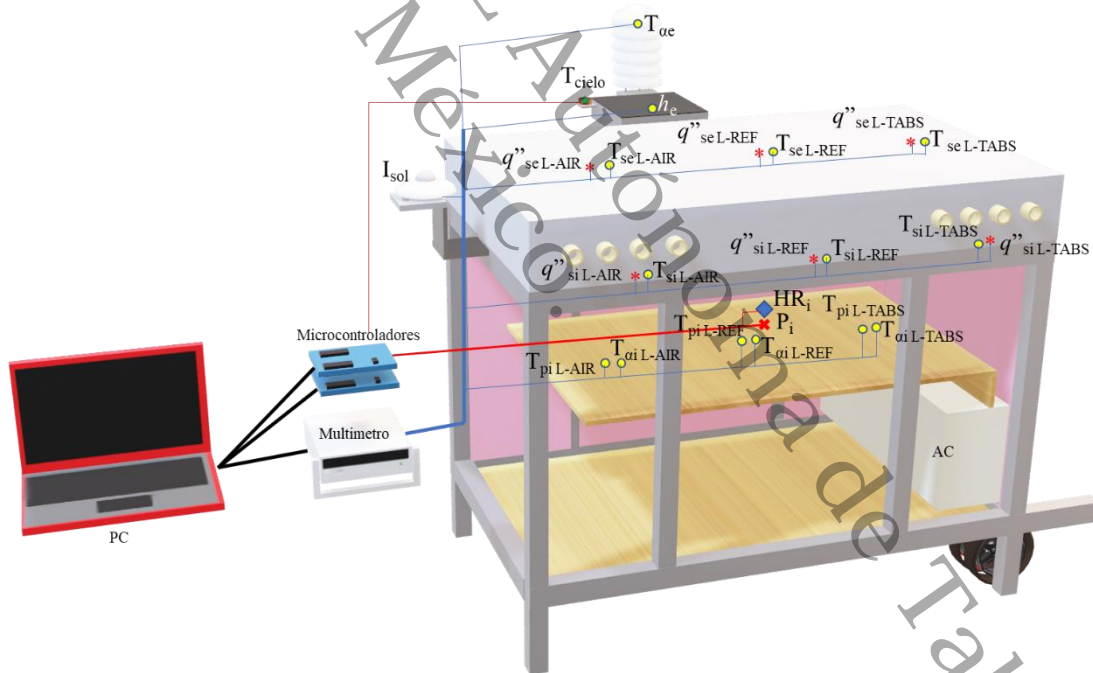
En la Figura 4.19 se presenta un esquema con la instrumentación del sistema experimental de pruebas, en donde se puede observar la ubicación de cada uno de los sensores dentro de la cámara. En la Tabla 4.9 se presenta la configuración de los sensores programados en el sistema adquisidor de datos y la localización en el sistema experimental.

En la Figura 4.20 se presenta el sistema experimental final instrumentado e instalado en el sitio de pruebas, operando bajo condiciones reales de ambiente exterior. En esta etapa se puede observar la integración de todos los componentes del prototipo, incluyendo las losas experimentales, el sistema de

adquisición de datos, los sensores de temperatura y flujo de calor, así como, los elementos de soporte y protección. La instalación en campo permitió someter el sistema a condiciones climáticas reales, tales como irradiancia solar, variaciones de temperatura ambiente, humedad y cambios de viento, con el objetivo de evaluar su desempeño térmico en un entorno representativo. Esta disposición facilitó el monitoreo continuo de las variables de estudio y la recolección de datos experimentales necesarios para analizar el comportamiento térmico de las losas, validar el modelo de transferencia de calor y comparar el funcionamiento de cada configuración bajo condiciones reales de operación.

**Figura 4.19**

*Esquema de instrumentación del prototipo experimental*



*Nota.* La figura presenta el esquema de instrumentación del prototipo experimental, mostrando la ubicación de los sensores de temperatura, flujo de calor y humedad relativa, así como el sistema de adquisición de datos empleado para el monitoreo de las variables térmicas. Fuente: Elaboración propia.

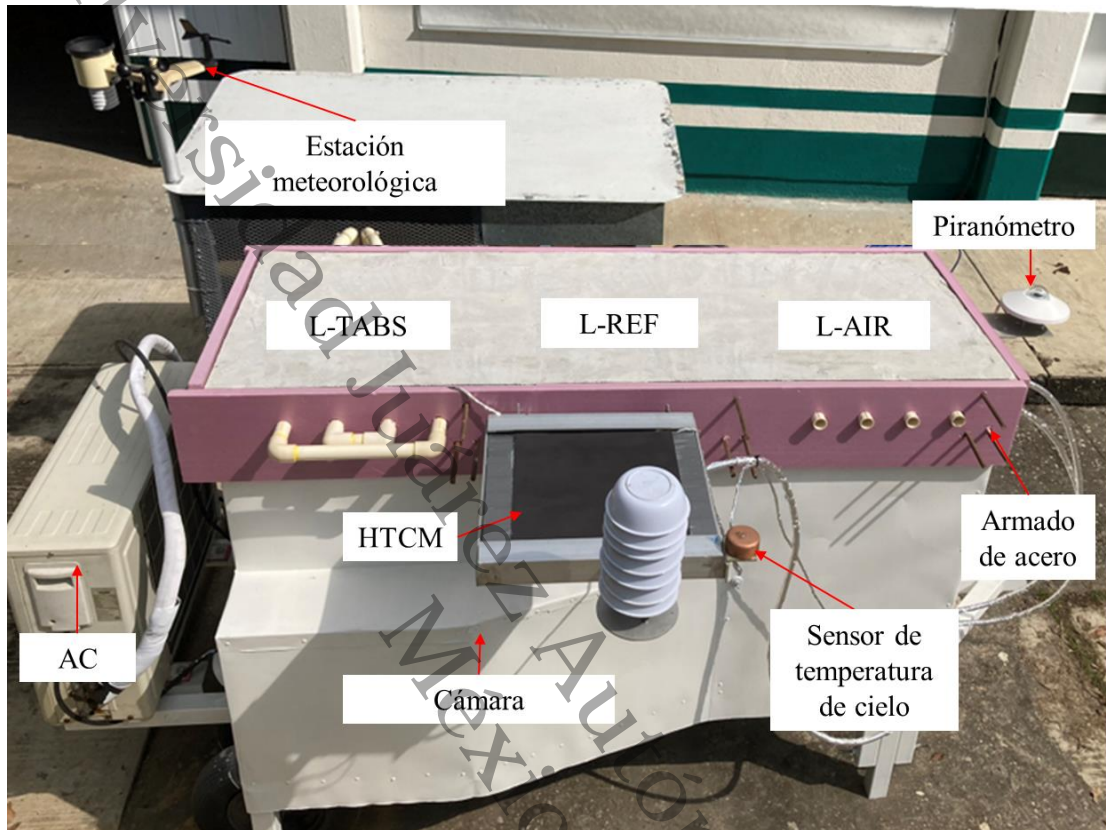
**Tabla 4.9***Configuración de sensores del sistema experimental*

Descripción	Unidad de medición	Nomenclatura
Temperatura superficie interior L-AIR	$\Omega$	$T_{si\ L-AIR}$
Temperatura superficie interior L-REF	$\Omega$	$T_{si\ L-REF}$
Temperatura superficie interior L-TABS	$\Omega$	$T_{si\ L-TABS}$
Temperatura superficie exterior L-AIR	$\Omega$	$T_{se\ L-AIR}$
Temperatura superficie exterior L-REF	$\Omega$	$T_{se\ L-REF}$
Temperatura superficie exterior L-TABS	$\Omega$	$T_{se\ L-TABS}$
Flujo de calor superficie exterior L-AIR	V	$q_{si\ L-AIR}$
Flujo de calor superficie exterior L-REF	V	$q_{si\ L-REF}$
Flujo de calor superficie exterior L-TABS	V	$q_{si\ L-TABS}$
Flujo de calor superficie interior L-AIR	V	$q_{se\ L-AIR}$
Flujo de calor superficie interior L-REF	V	$q_{se\ L-REF}$
Flujo de calor superficie interior L-TABS	V	$q_{se\ L-TABS}$
Temperatura ambiente interior L-AIR	$\Omega$	$T_{ai\ L-AIR}$
Temperatura ambiente interior L-REF	$\Omega$	$T_{ai\ L-REF}$
Temperatura ambiente interior L-TABS	$\Omega$	$T_{ai\ L-TABS}$
Temperatura pared interior L-AIR	$\Omega$	$T_{pi\ L-AIR}$
Temperatura pared interior L-REF	$\Omega$	$T_{pi\ L-REF}$
Temperatura pared interior L-TABS	$\Omega$	$T_{pi\ L-TABS}$
Temperatura ambiente exterior	$\Omega$	$T_{ae}$
Irradiancia solar	V	$I_{sol}$
Humedad relativa ambiente interior	%	$HR_i$
Humedad relativa ambiente exterior	%	$HR_e$
Presión atmosférica en el interior	Pa	$P_i$
Temperatura de cielo	$^{\circ}C$	$T_{cielo}$

*Nota.* La tabla presenta la descripción de las variables medidas durante la instrumentación del prototipo experimental, indicando su unidad de medición y la nomenclatura utilizada para cada parámetro térmico, ambiental y de flujo de calor en los sistemas L-AIR, L-REF y L-TABS. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.20**

*Sistema experimental final en el sitio de pruebas*



*Nota.* La figura muestra el sistema experimental final instalado en el sitio de pruebas. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGÍA

#### 5.1 Diseño y procedimiento experimental

Con la finalidad de comparar el comportamiento del techo donde recircula agua (L-TABS) en las cargas de enfriamiento, se realizaron pruebas experimentales con el techo de referencia (L-REF) y el techo donde circula aire (L-AIR) bajo las mismas condiciones que L-TABS. Lo anterior, con el fin de establecer la línea base para el análisis del comportamiento térmico de las muestras y conocer el efecto por separado de las variables del sistema. El diseño experimental para el desarrollo de este trabajo se presenta en la Tabla 5.1, en donde, L-TABS se clasificó en dos tipos de pruebas: sin recirculación de agua y con recirculación de agua.

**Tabla 5.1**

*Condiciones de las pruebas experimentales*

No. Prueba	Condición en la cámara	Duración	Condiciones del fluido
1	Sin enfriamiento	96 horas	Sin recirculación de agua.
2	Con enfriamiento, 25°C	48 horas	Sin recirculación de agua.
3	Con enfriamiento, 25°C	48 horas	Con recirculación de agua, 25°C, a un caudal máximo (0.31 L min <sup>-1</sup> ).
4	Con enfriamiento, 25°C	48 horas	Con recirculación de agua, 25°C, con un caudal medio (0.62 L min <sup>-1</sup> ).
5	Con enfriamiento, 25°C	48 horas	Con recirculación de agua, 25°C, con un caudal mínimo (1.25 L min <sup>-1</sup> ).

*Nota.* La tabla presenta las condiciones establecidas para las pruebas experimentales, incluyendo la condición térmica en la cámara, la duración de cada ensayo y las condiciones de operación del fluido de trabajo durante las pruebas. Fuente: Elaboración propia.

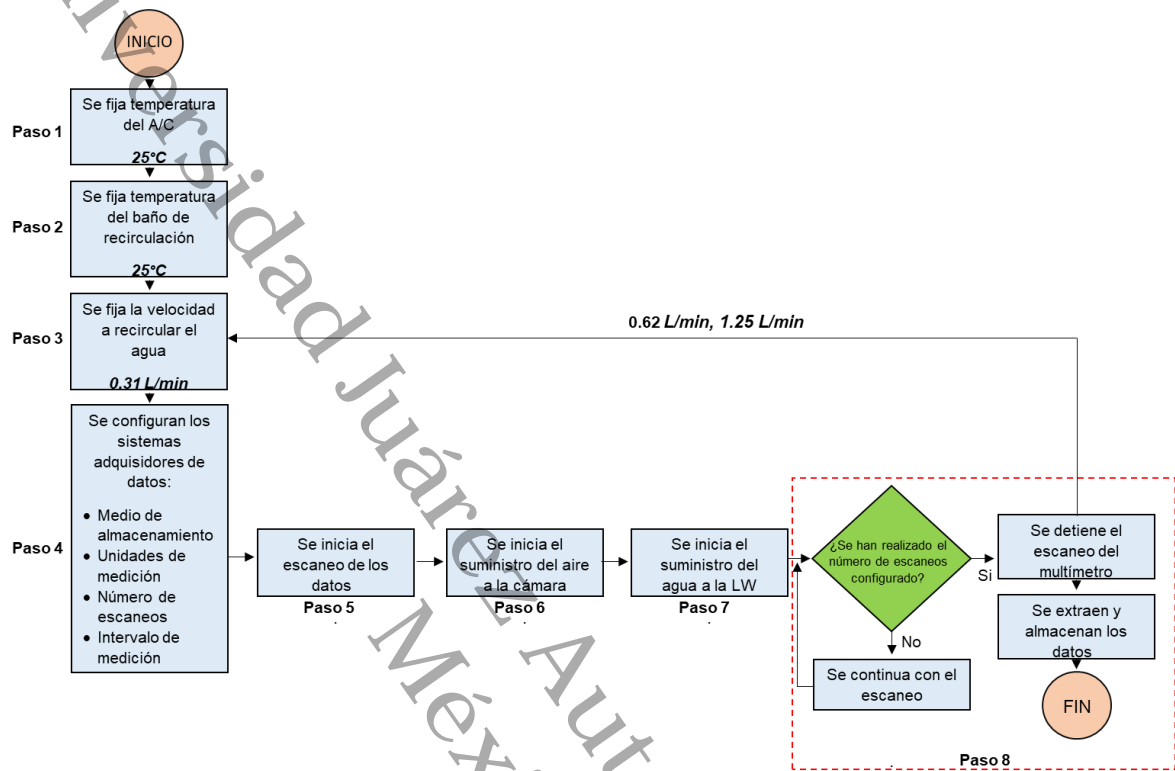
En la Figura 5.1 se presenta un diagrama del procedimiento experimental que se llevó a cabo para realizar las pruebas experimentales en L-TABS en las Pruebas 3 – 5, en donde se varió la velocidad del suministro de agua, considerando la capacidad del flujómetro. A continuación, se presenta el procedimiento que se siguió para realizar las pruebas experimentales:

- **Paso 1.** Se fija la temperatura en el sistema de acondicionamiento de aire en el interior de la cámara.
- **Paso 2.** Se fija la temperatura en el baño de recirculación.
- **Paso 3.** Se fija la velocidad a suministrar el agua que recircula en L-TABS.
- **Paso 4.** Se configuran los sistemas adquirentes de datos: la unidad de almacenamiento de los datos, los canales con las unidades de medición, número de escaneos e intervalo de medición.
- **Paso 5.** Se inicia el escaneo y registro de los datos experimentales mediante una memoria de almacenamiento externa, hasta que se realice el número de escaneos programados.
- **Paso 6.** Se inicia el suministro de aire en la cámara.
- **Paso 7.** Se inicia el suministro del agua con el baño de recirculación en L-TABS.
- **Paso 8.** Al terminar el periodo de tiempo de medición o escaneos, se detiene la medición por los sistemas adquirentes de datos y se extraen las memorias de almacenamiento. Y por último se almacenan los datos en un ordenador para ser procesados y analizados.

Realizados todos los pasos anteriores, se repiten los pasos del 2 al 8 en donde se incrementó la velocidad del agua de recirculación en L-TABS. Los datos experimentales obtenidos de las pruebas se procesaron y analizaron mediante el software Matlab® para obtener el comportamiento de las temperaturas, presión atmosférica, humedad relativa, irradiancia solar y flujos de calor en cada una de las losas.

**Figura 5.1**

*Diagrama general del procedimiento experimental del sistema propuesto*



*Nota.* La figura presenta el diagrama del procedimiento experimental seguido durante la realización de las pruebas, incluyendo la configuración de las condiciones térmicas, el ajuste del sistema de adquisición de datos y la secuencia de operación del suministro de aire y del fluido de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Procedimiento para la obtención del modelo global

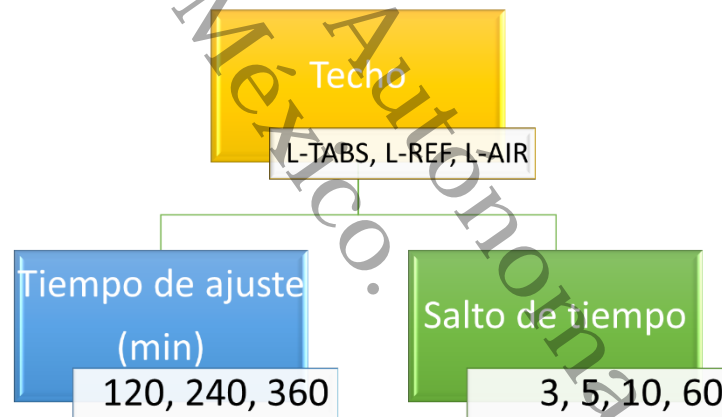
Como parte de los objetivos de esta tesis, se desarrolló un modelo de transferencia de calor para evaluar la factibilidad de un techo de concreto activado térmicamente. Este modelo se construyó a partir de los datos obtenidos en un conjunto de pruebas experimentales previamente presentadas. Para

resolver la transferencia de calor a través del techo de concreto, se usó el método de funciones de transferencia.

Para el desarrollo del modelo global de transferencia se desarrolló una metodología. Esta metodología se realizó para cada una de las losas, debido a que se consideraron como diferentes sistemas constructivos: techo con recirculación de agua (L-TABS), techo de referencia (L-REF) y para el techo donde circula aire (L-AIR). En la Figura 5.2 se presentan las condiciones de cada una de las simulaciones para la obtención del modelo global de transferencia.

**Figura 5.2.**

*Condiciones de simulación para obtención del modelo global de transferencia de calor a través de las losas experimentales*



*Nota.* La figura presenta las condiciones de simulación consideradas para la obtención del modelo global de transferencia de calor, incluyendo los tipos de losa analizados (L-TABS, L-REF y L-AIR), los tiempos de ajuste y los saltos de tiempo empleados en el análisis. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.3 describe el procedimiento seguido para desarrollar el modelo global de transferencia de calor de cada techo analizado. Para este propósito, se diseñó y programó un código computacional utilizando el software Matlab®. Dentro del

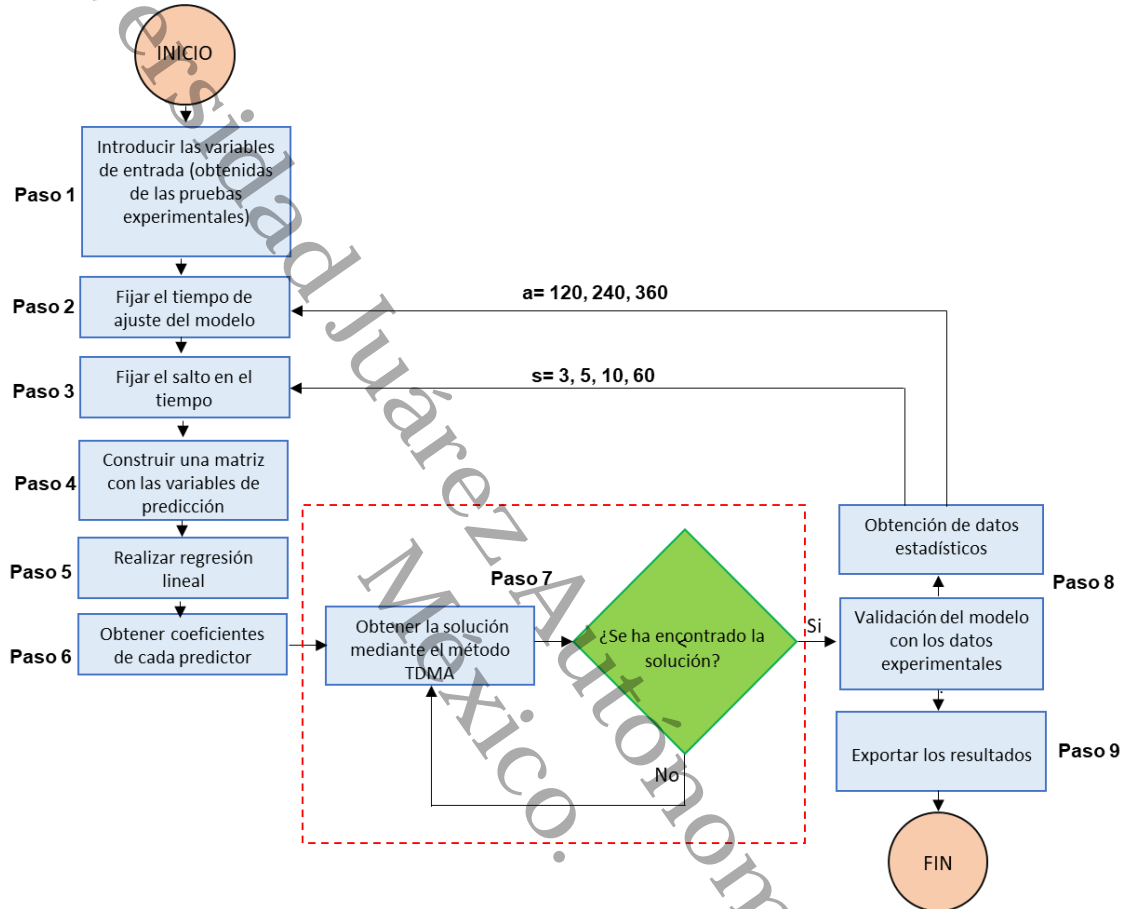
código computacional para obtener las funciones de transferencia se varió: el tiempo de ajuste del modelo y los saltos de tiempo. El procedimiento fue el siguiente:

- **Paso 1.** Se introducen las variables predictoras, obtenidas en las pruebas experimentales.
- **Paso 2.** Se fija el tiempo de ajuste del modelo a 120 min.
- **Paso 3.** Se fija el salto en el tiempo, un salto de 3 min.
- **Paso 4.** Se construye una matriz de datos con las variables de predicción.
- **Paso 5.** Se realiza la regresión lineal.
- **Paso 6.** Se obtienen los coeficientes de cada predictor.
- **Paso 7.** Se calcula la transferencia de calor a través del techo y se obtiene la solución mediante el método TDMA.
- **Paso 8.** Se realiza la validación del modelo con los datos experimentales y se realizan cálculos estadísticos del modelo.
- **Paso 9.** Se exportan los resultados a un archivo \*.csv para su análisis y procesamiento.

Una vez que se han realizado todos los pasos anteriores, se repiten los pasos del 4 al 9 con los saltos de tiempo de 5, 10 y 60 min. Cuando se concluyen con los saltos de tiempo se repiten los pasos del 3 al 9 para los tiempos de ajuste de 240 y 360 min. Una vez realizada esta metodología se analizan los datos estadísticos, con la finalidad de seleccionar el modelo con el menor error y mejor ajuste.

**Figura 5.3**

Diagrama de metodología para obtener el modelo de transferencia de calor en una losa



*Nota.* La figura muestra el diagrama de la metodología empleada para la obtención del modelo de transferencia de calor en una losa, desde la definición de variables de entrada y parámetros numéricos hasta la validación del modelo con datos experimentales. Fuente: Elaboración propia.

**5.3 Procedimiento de acoplamiento**

Una vez obtenido el modelo global de transferencia de calor que representa el comportamiento de L-TABS, se continuó con su acoplamiento a una vivienda tipo,

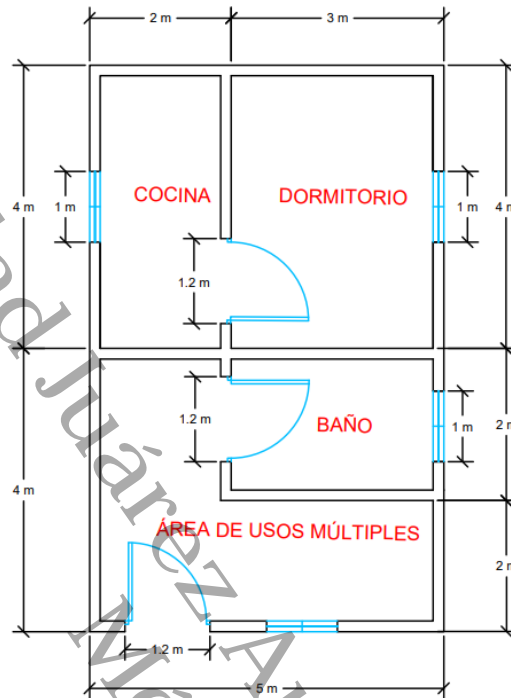
con la finalidad de determinar la factibilidad de uso de un techo activado térmicamente con agua. El acoplamiento del modelo global de transferencia de calor se realizó mediante el software de análisis energético *EnergyPlus*.

Para realizar la simulación energética acoplando el modelo de transferencia de calor de L-TABS se realizó una revisión de la literatura para proponer el modelo físico de la vivienda tipo, en donde, se consideraron y seleccionaron las condiciones climáticas, materiales de construcción. Para la simulación se seleccionaron las características de una vivienda de interés social para uso habitacional en México de acuerdo con el Código de Edificación y Vivienda (CONAVI, 2017). Por lo que, el diseño seleccionado fue una vivienda de interés social de un nivel con 40 m<sup>2</sup> con una altura de 3 m, que cuenta con una habitación, un baño, una cocina y área de usos múltiples.

La vivienda se simuló considerando orientación al norte y considerando las condiciones climáticas del municipio de Cunduacán, Tabasco. La orientación norte se seleccionó considerando las actividades que se desarrollan dentro de la vivienda, colocando al norte las áreas que requieren menores temperatura y donde se desarrollan actividades prolongadas (dormitorio y cocina) (CONAVI, 2017). En la Figura 5.4 se puede observar una vista superior de la distribución arquitectónica de la edificación seleccionada, en donde se muestran de manera clara los espacios interiores y sus dimensiones principales. Esta representación permite identificar la organización de las áreas que conforman la vivienda tipo, así como la relación entre los distintos recintos y la disposición general de la envolvente. En la Figura 5.5 se observa una imagen de la vista isométrica de la vivienda, en donde se pueden observar las medidas y ubicación de las ventanas y puertas. Los materiales utilizados para la vivienda fueron: concreto armado para el techo; revoco y block para la pared (pared compuesta); y concreto armado para el piso. Adicionalmente, se consideró utilizar vidrio sencillo (3 mm) para las ventanas y madera para la puerta.

**Figura 5.4**

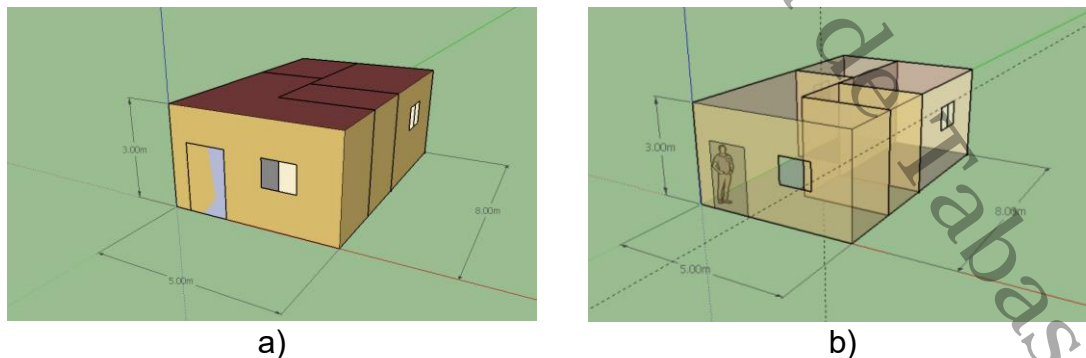
*Vista superior de la vivienda tipo con distribución de espacio*



*Nota.* La figura muestra la vista superior de la vivienda tipo, indicando la distribución de los espacios interiores y sus dimensiones generales empleadas para el análisis térmico y energético. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.5**

*Vista isométrica de la vivienda con distribución de espacio en Energy Plus*



*Nota.* La figura muestra la vista isométrica de la vivienda tipo modelada en *EnergyPlus*, donde se presenta: (a) la vista completa con los diferentes

componentes constructivos y (b) la vista con transparencia de los componentes para visualizar la distribución espacial interna. Fuente: Elaboración propia.

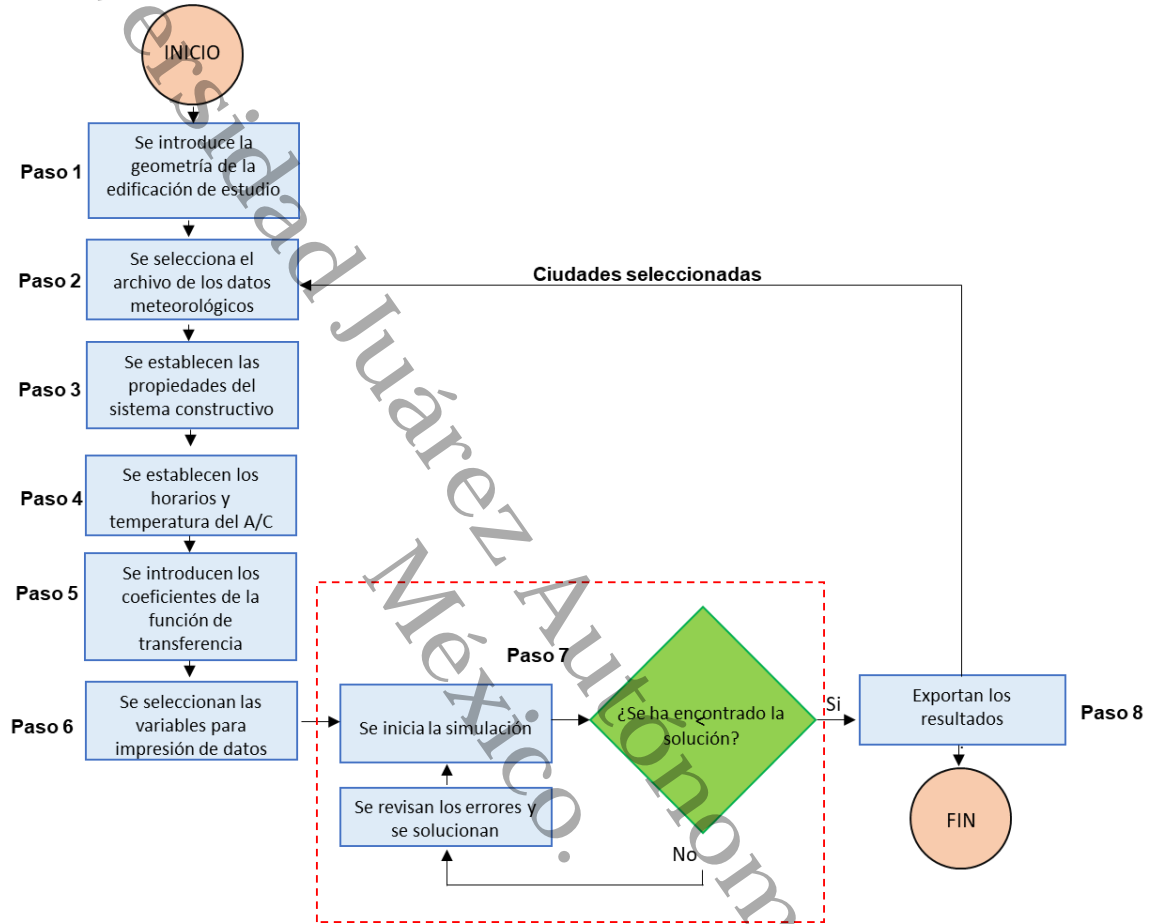
En la Figura 5.6 se presenta el procedimiento que se realizó para el acoplamiento del modelo global de transferencia a una vivienda tipo, el cual consta de los siguientes pasos:

- **Paso 1.** Se introduce la geometría de la edificación a estudiar, vivienda tipo.
- **Paso 2.** Se selecciona el archivo (.EPW) de los datos climatológicos de la ciudad de estudio.
- **Paso 3.** Se establecen las propiedades termofísicas del sistema constructivo.
- **Paso 4.** Se establecen horarios y temperatura de uso del sistema de aire acondicionado (A/C).
- **Paso 5.** Se introducen las funciones de transferencia del sistema constructivo, que es el obtenido a partir del estudio experimental.
- **Paso 6.** Se seleccionan las variables de estudio a imprimir, temperatura y flujo de calor.
- **Paso 7.** Se inicia la simulación, hasta obtener los resultados y en dado caso, corrección de errores.
- **Paso 8.** Se exportan los resultados a un archivo \*.csv para su análisis y post-procesamiento.

Una vez que se han realizado todos los pasos anteriores, se repiten los pasos del 2 al 8 con los diferentes archivos climatológicos de las ciudades de estudio con los diferentes sistemas constructivos. Una vez realizada la metodología mencionada se analizan los datos obtenidos.

**Figura 5.6**

*Diagrama de metodología de acoplamiento del modelo de transferencia de calor en una vivienda tipo*



*Nota.* La figura presenta el diagrama de la metodología empleada para el acoplamiento del modelo de transferencia de calor en una vivienda tipo, desde la definición de la geometría y las condiciones climáticas, hasta la simulación y exportación de resultados. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 6.1 Evaluación de un techo TABS

Con el fin de buscar la reducción del consumo de energía eléctrica en edificaciones manteniendo condiciones de confort térmico, se realizó la evaluación térmica teórico-experimental de un techo TABS. Para ello, se realizaron pruebas experimentales en un prototipo diseñado y construido en este trabajo de tesis (Capítulo 4). Una vez obtenidos las mediciones experimentales se determinaron los flux de calor y se obtuvo el modelo global de transferencia de calor que representa el comportamiento térmico del techo bajo las condiciones de pruebas establecidas. Posteriormente, con el fin de analizar cómo se comporta el techo TABS evaluado, se acopló de forma teórica a una vivienda tipo y se evaluó su comportamiento bajo seis condiciones climáticas diferentes. Lo anterior, nos permitirá evaluar su factibilidad en la reducción del consumo de energía eléctrica en edificaciones manteniendo condiciones de confort térmico.

Se realizaron pruebas experimentales en L-REF y L-AIR bajo las mismas condiciones que L-TABS con el procedimiento experimental propuesto en el Capítulo 5. Las pruebas experimentales se dividieron en dos tipos: a) sin recirculación de agua y b) con recirculación.

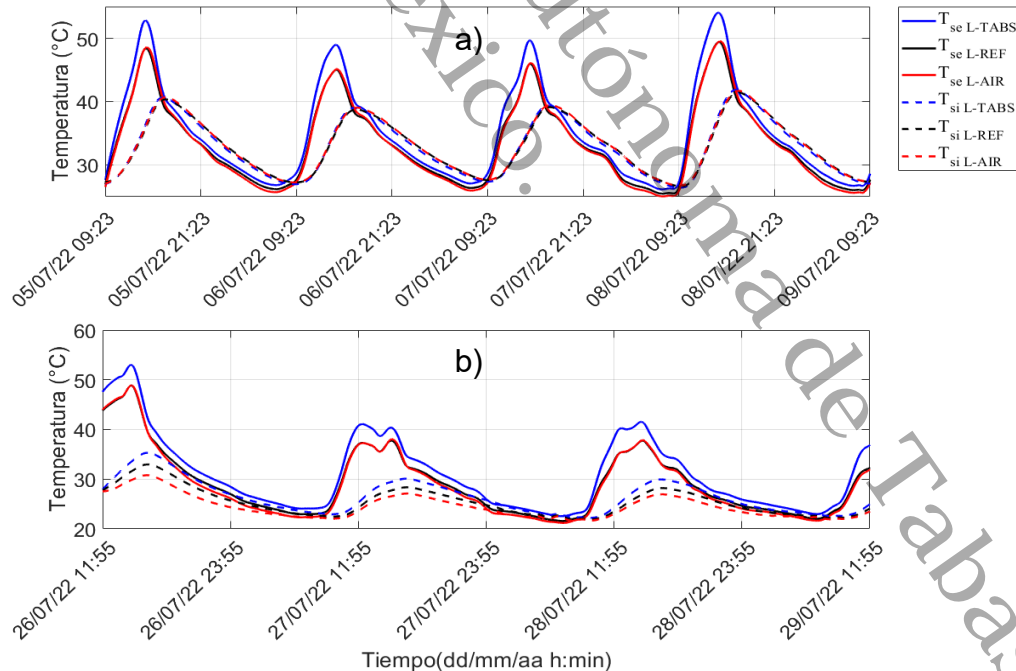
##### 6.1.1 Pruebas experimentales sin recirculación de agua

Las pruebas sin recirculación de agua en L-TABS se realizaron con la finalidad de analizar si el comportamiento del sistema es independiente de las condiciones climáticas del día de prueba. En la Figura 6.1 se puede observar el comportamiento de la temperatura en la superficie exterior ( $T_{se}$ ) y la temperatura

en la superficie interior ( $T_{si}$ ) en estado transitorio, para los techos (L-TABS, L-REF y L-AIR). En la Figura 6.1a se muestra la temperatura en las superficies de la Prueba 1, mientras que en la Figura 6.1b se representa la temperatura en las superficies de la Prueba 2. En la Figura 6.1 puede observarse que, la  $T_{se}$  y la  $T_{si}$  de los tres techos disminuyó  $10^{\circ}\text{C}$  en promedio cuando el enfriamiento se activó. Sin embargo, se puede observar que el comportamiento de la  $T_{si}$  de las tres losas fue similar como se puede observar en la Prueba 1. Mientras que, cuando se activó el sistema de aire acondicionado en el interior de la cámara (Prueba 2), la  $T_{si}$  de las losas disminuyeron y se separaron debido al intercambio de energía por convección entre el aire y la superficie interior de los techos. Siendo L-TABS en el que se alcanza la mayor temperatura, seguida de L-REF y L-AIR.

**Figura 6.1**

*Comportamiento de la temperatura superficial exterior e interior de L-TABS, L-REF Y L-AIR*



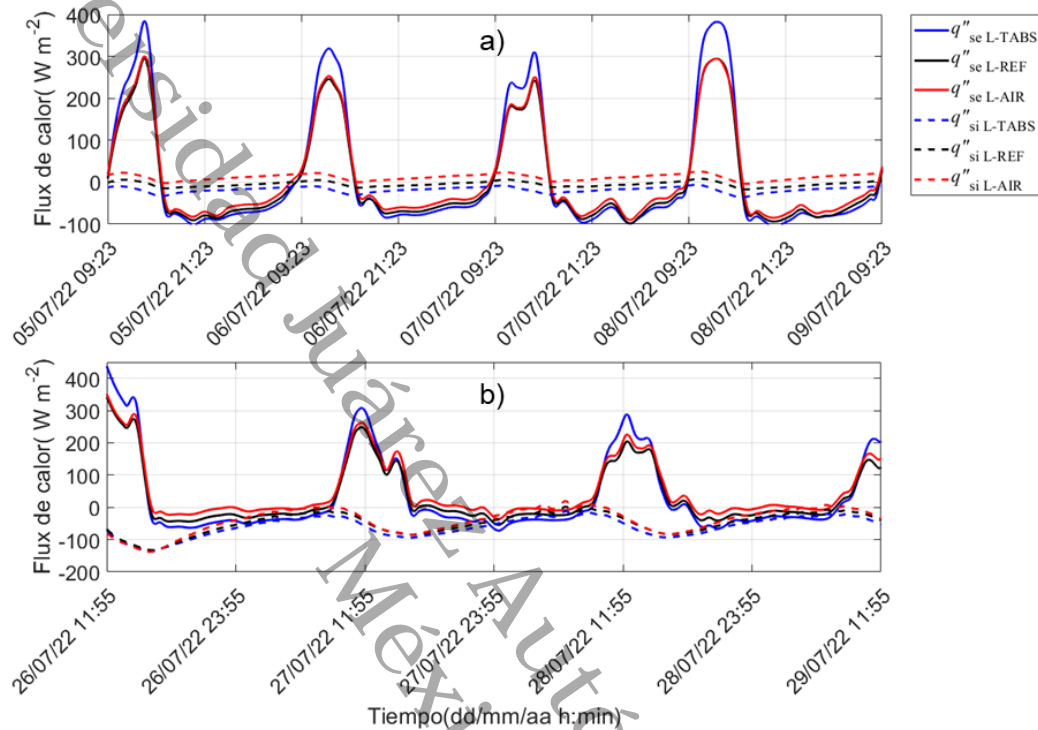
*Nota.* La figura muestra la variación temporal de la temperatura superficial exterior ( $T_{se}$ ) e interior ( $T_{si}$ ) de las losas L-TABS, L-REF y L-AIR durante: (a)

Prueba 1 sin enfriamiento y (b) Prueba 2 con enfriamiento en la cámara. Fuente: Elaboración propia.

La transferencia de calor en las superficies de las losas está representada en la Figura 6.2, en donde se presentan el flux de calor en la superficie exterior ( $q''_{se}$ ) y el flux de calor en la superficie interior ( $q''_{si}$ ) de la Prueba 1 (Figura 6.2a) y Prueba 2 (Figura 6.2b). En la Figura 6.2a se puede observar que el intercambio de calor en la superficie exterior de L-TABS, L-REF y L-AIR fue mayor cuando el enfriamiento no se encuentra activado, sin embargo, se hace negativo durante la noche cuando se da el intercambio por radiación con la bóveda celeste. Por otra parte, cuando el intercambio de calor en la superficie interior de L-TABS, L-REF y L-AIR muestran un incremento negativo, este comportamiento puede deberse al intercambio de calor por conducción-convección que se da entre el aire de la cámara y la superficie interior de los techos. Analizando el comportamiento del flux de calor en la superficie exterior de L-TABS con respecto a L-REF y L-AIR, se puede observar que durante el día el  $q''_{se}$  incrementa por arriba de los  $200 \text{ W m}^{-2}$ , pero durante la noche se mantiene por debajo de los  $-100 \text{ W m}^{-2}$  y por debajo de las otras losas. Con respecto al  $q''_{si}$  se observa que en ambas pruebas el intercambio de calor en la L-TABS se mantiene por debajo de los flujos de otros techos de prueba. En conjunto, considerando ambas pruebas, puede decirse que L-TABS reduce el flujo de calor interior en un orden promedio de 10 a  $20 \text{ W m}^{-2}$  frente a las otras losas, evidenciando un mejor control del intercambio térmico hacia el interior de la vivienda.

**Figura 6.2**

Comportamiento del flux de calor en la superficie exterior e interior L-TABS, L-REF Y L-AIR



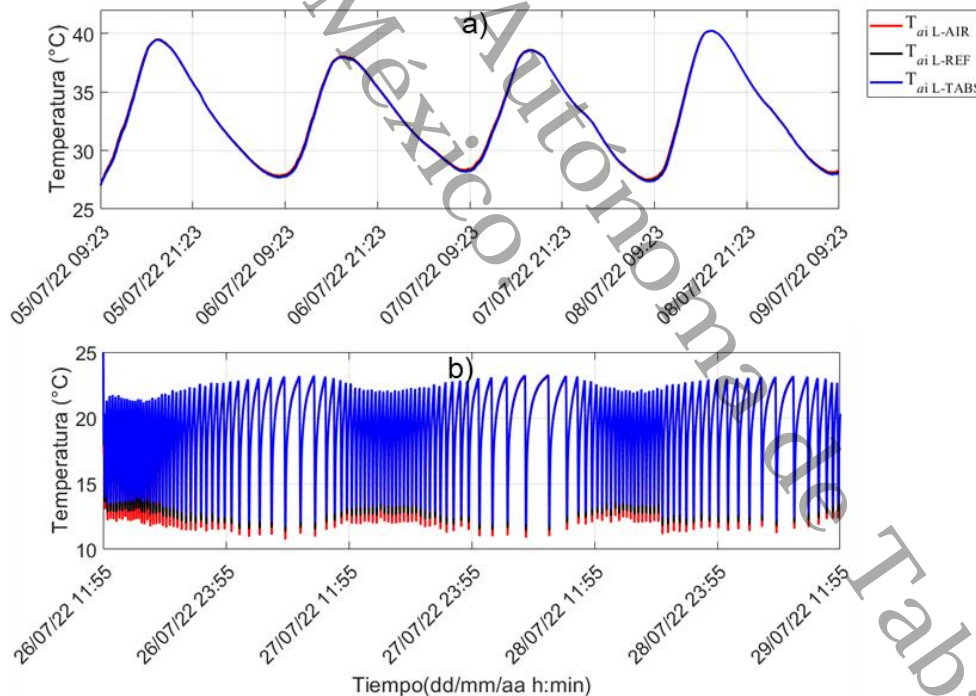
*Nota.* La figura muestra la variación temporal del flujo de calor en la superficie exterior ( $q''_{se}$ ) e interior ( $q''_{si}$ ) de las losas L-TABS, L-REF y L-AIR durante: (a) Prueba 1 sin enfriamiento y (b) Prueba 2 con enfriamiento en la cámara. Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de analizar el intercambio de energía entre las superficies de las losas y el aire del interior de la cámara, se midió la temperatura ambiente interior ( $T_{ai}$ ) a una distancia cercana de la superficie de cada una de las losas. El comportamiento de la  $T_{ai}$  en la Prueba 1 y 2 pueden observarse en la Figura 6.3. En donde, la Figura 5.3a representa el comportamiento de la  $T_{ai}$  en la Prueba 1 y la Figura 6.3b el comportamiento de la  $T_{ai}$  de la Prueba 2. En ambas pruebas se puede observar que el comportamiento de la  $T_{ai}$  para todas las losas se mantiene con el mismo comportamiento y magnitud. Lo anterior, corrobora que

las muestras de techo se encuentran expuestas bajo las mismas condiciones de temperatura. En la Prueba 1 se alcanza una temperatura máxima de 40°C con un comportamiento similar al de la irradiancia solar durante el día. Por otra parte, es notorio observar que para la Prueba 2 se observa la entrada y salida del sistema de aire acondicionado, el cual está fijado a 25°C. Como puede observarse el sistema alcanza un promedio menor a 20°C, esta temperatura aún se considera dentro del intervalo de temperatura de confort. Este desfase del dispositivo y la temperatura observado en la gráfica nos sugiere que se debe al sistema de control del aire acondicionado.

**Figura 6.3**

*Comportamiento de la temperatura ambiente interior cercano a L-TABS, L-REF y L-AIR*



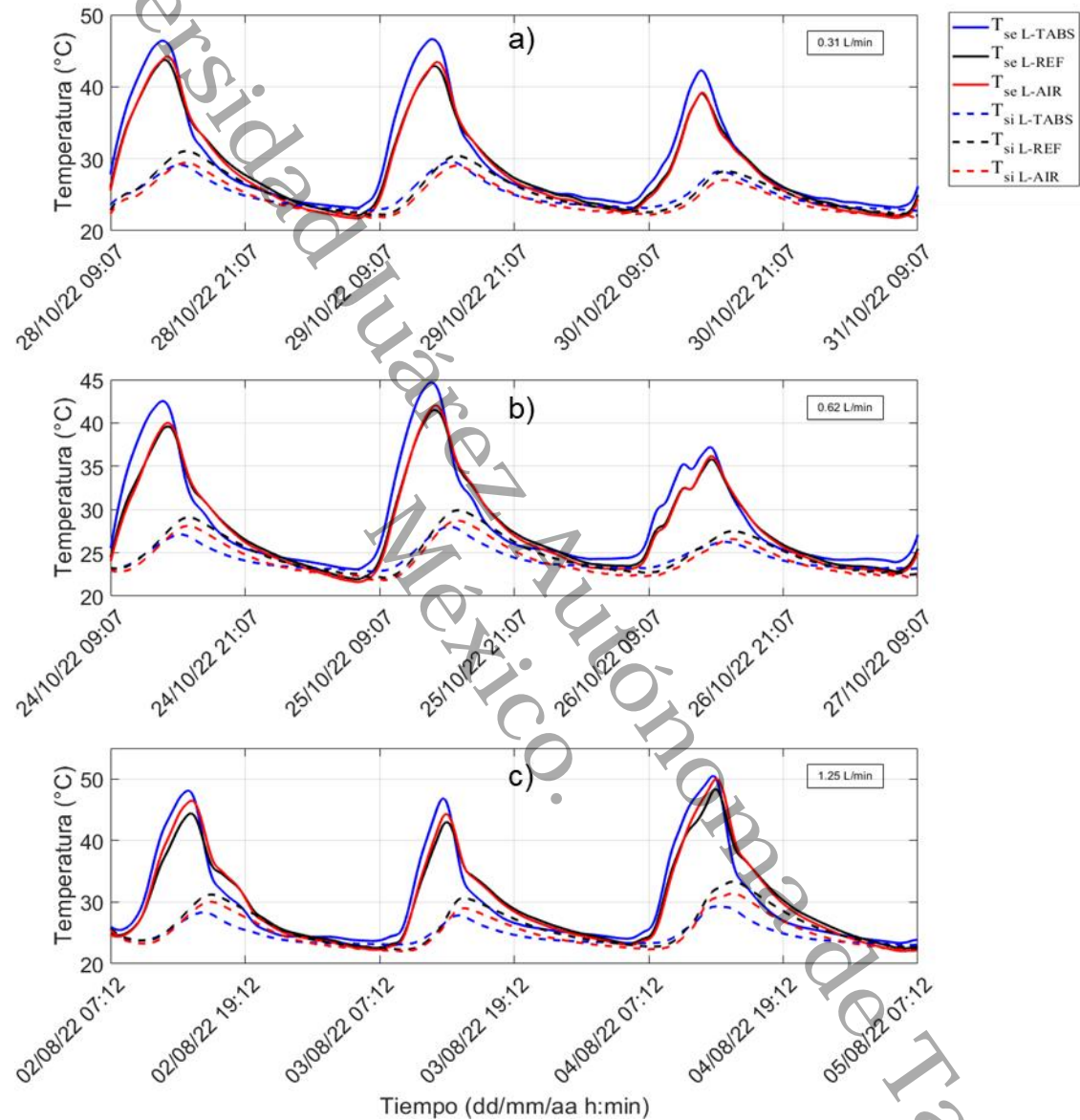
*Nota.* La figura muestra la variación temporal de la temperatura ambiente interior ( $T_{ai}$ ) cercana a las losas L-TABS, L-REF y L-AIR durante: (a) Prueba 1 sin enfriamiento y (b) Prueba 2 con enfriamiento en la cámara. Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.2 Pruebas experimentales con recirculación de agua

Las pruebas con recirculación de agua se realizaron con la finalidad de comparar el efecto que tiene recircular agua variando la velocidad del caudal. El intervalo del caudal utilizado para L-TABS fue de  $0.31 - 1.25 \text{ L min}^{-1}$  de acuerdo con lo presentado en la Tabla 5.1 (Capítulo 5). En la Figura 6.4 se puede observar el comportamiento de la  $T_{se}$  y la  $T_{si}$  en la Prueba 3, 4 y 5. En esta figura se puede observar que los comportamientos de la temperatura de superficie interior y exterior son similares en las tres pruebas con magnitudes diferentes. Sin embargo, se observa que con el menor caudal la temperatura mostró mayor intercambio de energía en la losa de agua. Este fenómeno puede deberse a que el agua recorre en menor tiempo la tubería y alcanza a remover mayor energía por conducción-convección de la losa de concreto. Con respecto a la  $T_{si}$ , se observa que esta se mantiene por debajo de los  $35^\circ\text{C}$ . Es importante observar que durante las horas de incidencia solar L-TABS presenta las temperaturas más altas en la superficie exterior, sin embargo, en la superficie interior, es L-TABS la que logra obtener la menor temperatura, siendo esto más notorio a menor caudal. La L-REF es en la que se obtuvieron las  $T_{si}$  mayores mostrando que las mejoras con las L-AIR y L-TABS representan una reducción de las ganancias de calor.

**Figura 6.4**

Comportamiento de la temperatura superficial exterior e interior de L-TABS, L-REF y L-AIR



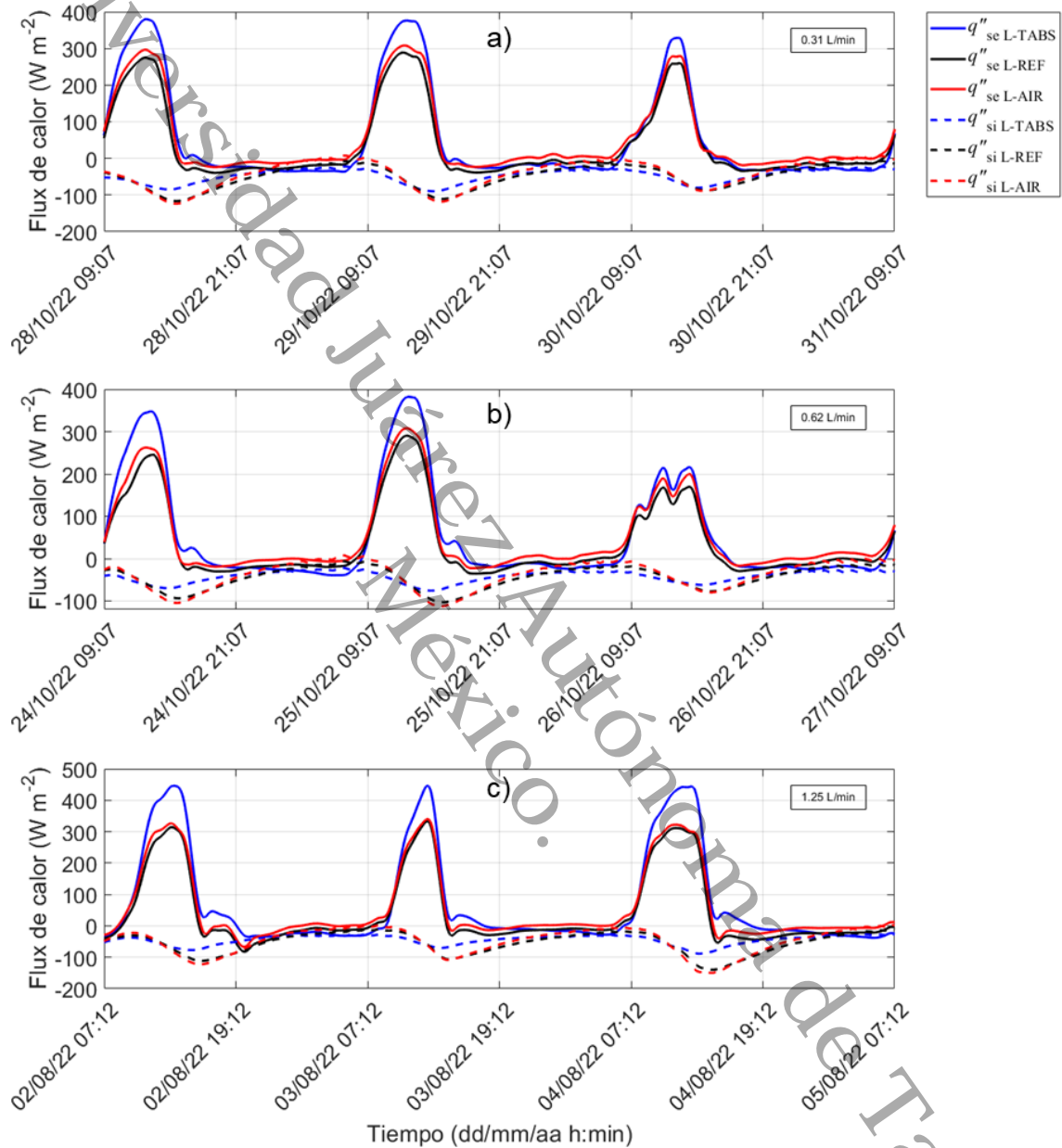
*Nota.* La figura muestra la variación temporal de la temperatura superficial exterior ( $T_{se}$ ) e interior ( $T_{si}$ ) de las losas L-TABS, L-REF y L-AIR durante: (a) Prueba 3, (b) Prueba 4 y (c) Prueba 5. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6.5 se presenta el flux de calor en la superficie exterior ( $q''_{se}$ ) y el flux de calor en la superficie interior de las losas ( $q''_{si}$ ), durante las tres pruebas con recirculación de agua con diferentes caudales. A partir de los resultados obtenidos se observa que el intercambio de calor en L-TABS es mayor durante el día y durante el periodo de la noche este intercambio disminuye por debajo de las otras losas. Con respecto a la superficie interior de las losas ocurre lo contrario, conforme disminuye la irradiancia solar el intercambio es más negativo acercándose a cero durante la noche, cuando la temperatura del ambiente exterior disminuye dado al intercambio radiativo-convectivo que ocurre con la bóveda celeste. Es interesante notar que las diferencias entre las superficies se reducen a medida que incrementa el caudal.

A partir de las pruebas experimentales se elaboró la gráfica de la Figura 6.6, con el fin de analizar de forma grupal los resultados y las tendencias que hay en cada una de las losas. Se puede observar que la  $T_{se}$  y  $T_{si}$  disminuyen cuando se controla la temperatura al interior de la cámara (Prueba 2) y cuando se recircula agua (Prueba 3, 4 y 5). También, se puede observar que L-TABS presenta un cambio significativo en la  $T_{si}$  cuando se inicia la recirculación de agua, obteniendo más beneficios a menores caudales (Prueba 3 y 4). Por otra parte, en el caso de L-REF se mantiene con temperaturas más altas que las otras dos losas. Estos resultados muestran que L-TABS presenta beneficios en la reducción de las ganancias de calor al interior, mejorando la temperatura en la superficie interior de la losa.

**Figura 6.5**

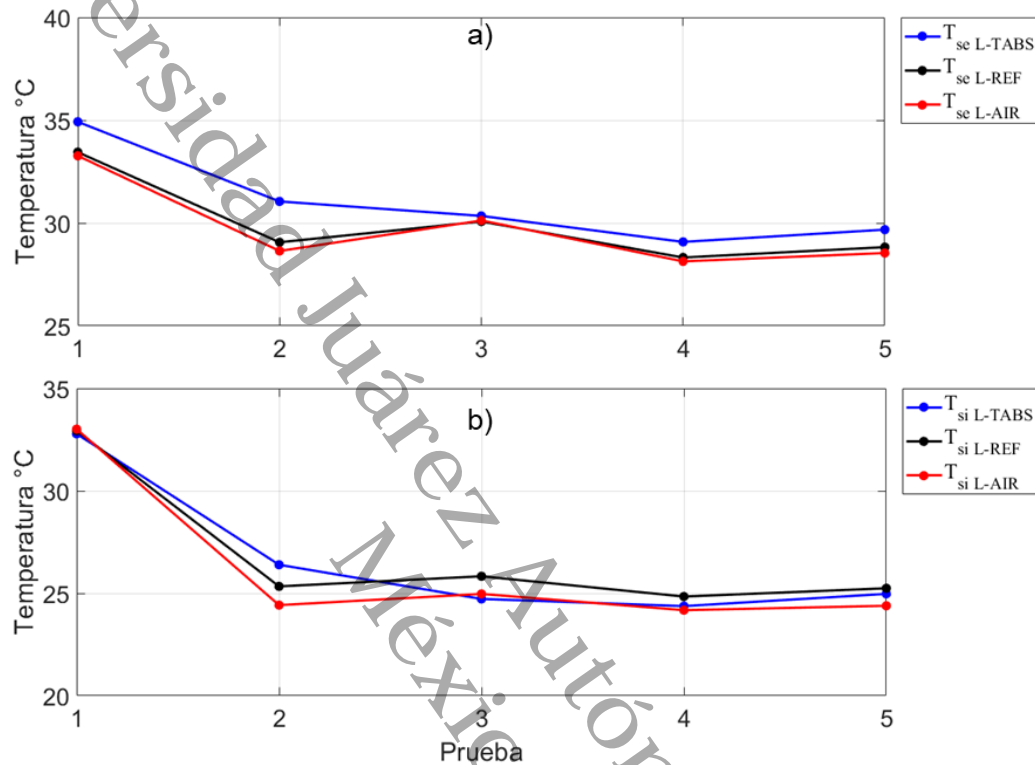
Comportamiento del flux de calor exterior e interior de L-TABS, L-REF Y L-AIR



*Nota.* La figura muestra la variación temporal del flux de calor en las superficies exterior e interior de las losas L-TABS, L-REF y L-AIR durante: (a) Prueba 3, (b) Prueba 4 y (c) Prueba 5. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.6**

Comportamiento de la temperatura en la superficie de L-TABS, L-REF y L-AIR para el conjunto de pruebas



*Nota.* La figura muestra el comportamiento de la temperatura superficial de las losas L-TABS, L-REF y L-AIR para el conjunto de pruebas realizadas, considerando: (a) la superficie exterior y (b) la superficie interior. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos del conjunto de pruebas experimentales se presentan de forma resumida en la Tabla 6.1. En la tabla pueden observarse los resultados promedios, máximos y mínimos de las principales variables a analizar. Este conjunto de resultados son la fuente para el análisis de los sistemas de losas propuestas, que contribuirá a los cálculos de factibilidad del sistema y el análisis de una vivienda tipo. A continuación, se presenta un análisis de las principales variables.

*Temperatura de superficie exterior ( $T_{se}$ ).*

$T_{se\ L-AIR}$  (promedio de 28.1°C a 33.3°C) muestra los valores más bajos en todas las pruebas.  $T_{se\ L-REF}$  mostró un comportamiento similar a  $T_{se\ L-AIR}$ , pero con ligeras variaciones.  $T_{se\ L-TABS}$  presentó los valores más altos en comparación con las otras dos, alcanzando hasta 55.1°C cuando no había recirculación de agua.

*Temperatura de superficie interior ( $T_{si}$ )*

$T_{si\ L-AIR}$  mostró valores menores en comparación con  $T_{se\ L-TABS}$ , con promedios entre 24.4°C y 33°C.  $T_{si\ L-REF}$  y  $T_{si\ L-TABS}$  mantienen un comportamiento similar, con pequeñas diferencias entre ellas. En cuanto a  $T_{si\ L-TABS}$ , se pudo observar que mantiene los valores mínimos y que la losa se mantiene relativamente fría en el interior.

*Flux de calor en la superficie exterior ( $q''_{se}$ )*

$q''_{se\ L-REF}$  presenta los menores valores promedio (5.2 a 50.7 W m<sup>-2</sup>) comparado con  $q''_{se\ L-AIR}$  y  $q''_{se\ L-TABS}$ . La variación del flux de calor en la superficie exterior de las losas mostró una dependencia del nivel de irradiancia solar y la temperatura ambiente exterior.

*Flux de calor en la superficie interior ( $q''_{si}$ )*

$q''_{si\ L-REF}$  y  $q''_{si\ L-TABS}$  muestran una menor variación del flux de calor, que  $q''_{si\ L-AIR}$ . Mientras que  $q''_{si\ L-AIR}$  mantiene valores promedio altos de flux de calor entre 11.8 y -40.9 W m<sup>-2</sup>. Sin embargo, la diferencia del flux de calor entre la superficie exterior e interior de L-TABS es mayor comparado con la de las otras losas.

**Tabla 6.1**  
Resultados promedio del conjunto de pruebas experimentales

Prueba	1			2			3			4			5		
	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx
$T_{se\ L-AIR}$ (°C)	33.3	25	50.4	28.6	20.8	50.5	30.1	21.5	50.1	28.1	21.1	42.3	28.5	21.3	44.4
$T_{se\ L-REF}$ (°C)	33.4	25.4	50.6	29.1	21.4	50.6	30.1	22.2	48.6	28.3	21.7	41.9	28.8	21.9	44.2
$T_{se\ L-TABS}$ (°C)	34.9	26.2	55.1	31	22.5	54.7	30.3	23.3	50.2	29.1	23.1	44.6	29.7	23.2	46.7
$T_{si\ L-AIR}$ (°C)	33	26.7	41.8	24.4	20.4	31.5	25	20.6	33.9	24.2	20.2	29.4	24.4	20.2	30.3
$T_{si\ L-REF}$ (°C)	32.9	26.7	41.5	25.3	21	33.4	25.8	21.4	33.8	24.8	21.1	30.4	25.2	21.2	31.5
$T_{si\ L-TABS}$ (°C)	32.8	26.4	42	26.4	21.6	35.7	24.7	22.1	31.4	24.4	22.2	28.4	25	22.1	30
$T_{ai\ L-AIR}$ (°C)	33	27	40.2	19.3	7.5	30.9	19.2	7.7	33.8	19.5	7.8	23.2	19.4	7.9	23.1
$T_{ai\ L-REF}$ (°C)	33	27	40.2	19.5	8.7	30.7	19.4	8.8	33.8	19.7	9	23.2	19.6	9	23.2
$T_{ai\ L-TABS}$ (°C)	32.9	27.1	40.2	19.6	9.6	30.5	19.5	9.8	33.8	19.8	10.2	23.2	19.7	10	23.2
$q''_{se\ L-AIR}$ (W/m <sup>2</sup> )	14.4	-107.2	347.1	52.2	-69.4	349.6	66.8	-113.6	360.8	59.5	-26	312.8	57.5	-25.2	316.7
$q''_{se\ L-REF}$ (W/m <sup>2</sup> )	5.2	-115.4	342.5	34.6	-82.4	337.9	50.7	-118.7	348.1	44.1	-38.7	294.3	40.2	-40.8	296.4
$q''_{se\ L-TABS}$ (W/m <sup>2</sup> )	14.2	-112.4	442.3	34.8	-92.1	425.8	82.8	-40.4	462.2	62	-40.4	386	56.4	-36.5	385.5
$q''_{si\ L-AIR}$ (W/m <sup>2</sup> )	11.8	-5.2	25.9	-39.7	-204.6	25.6	-47.5	-216.5	23.4	-37.8	-191.5	27.6	-40.9	-205.3	27.1
$q''_{si\ L-REF}$ (W/m <sup>2</sup> )	-4.6	-17.9	8.7	-48.4	-170.5	8.8	-53.3	-183.6	5.8	-43.6	-153.9	9.2	-48.6	-166.4	7.8
$q''_{si\ L-TABS}$ (W/m <sup>2</sup> )	-18	-37.2	-5	-59.3	-157.8	-5.4	-44.9	-120.6	5.7	-42.7	-111.6	-10.1	-47.7	-122.4	-9.1
$T_{ac}$ (°C)	30.1	24.4	38.7	29.4	23.2	39.4	30.3	24.1	39.4	29.3	23.9	38.5	29.1	23.8	37.9
$I_{sol}$ (W/m <sup>2</sup> )	179.4	-4.2	1091	180.1	-3.5	1122.5	216.4	-4.1	1034.3	187	-2.3	868.4	182.5	-3	936.7

Nota. La tabla presenta los valores promedio (Prom), mínimos (Mín) y máximos (Máx) de las variables térmicas y de flux de calor obtenidas durante el conjunto de pruebas experimentales para las losas L-TABS, L-REF y L-AIR. Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Modelo global de transferencia de calor

El modelo global de transferencia de calor se obtuvo considerando el procedimiento descrito en la Sección 5.2 (Capítulo 5). Con lo cual se pudo identificar que un techo con TABS puede ser representado mediante un modelo global de transferencia de calor, y para calcular la transferencia de calor a través de una losa de concreto se puede utilizar como método de solución el método de funciones de transferencia. Lo anterior, debido a que el método de funciones de transferencia utiliza una ecuación diferencial lineal en donde se calculan coeficientes constantes para un sistema constructivo. Para este estudio, el modelo de transferencia de calor para determinar el flux de calor al interior de un techo con TABS se representa mediante la Ecuación 14.

$$q''_{si}(t) = \left( -a_0 T_{ai}^{t+1} - \sum_j^n a_j T_{ai}^t + b_0 T_{ae}^{t+1} + \sum_j^n b_j T_{ae}^t - \sum_j^z c_j I \right) \quad (14)$$

Donde,  $t$  es el tiempo,  $T_{ai}$  es la temperatura ambiente interior,  $T_{ae}$  es la temperatura ambiente exterior,  $I$  es la irradiancia solar, la variable  $n$  representa el número de términos de temperatura,  $z$  representa el número de términos de irradiancia solar, y  $a, b, c$  representan los coeficientes constantes o funciones de transferencia.

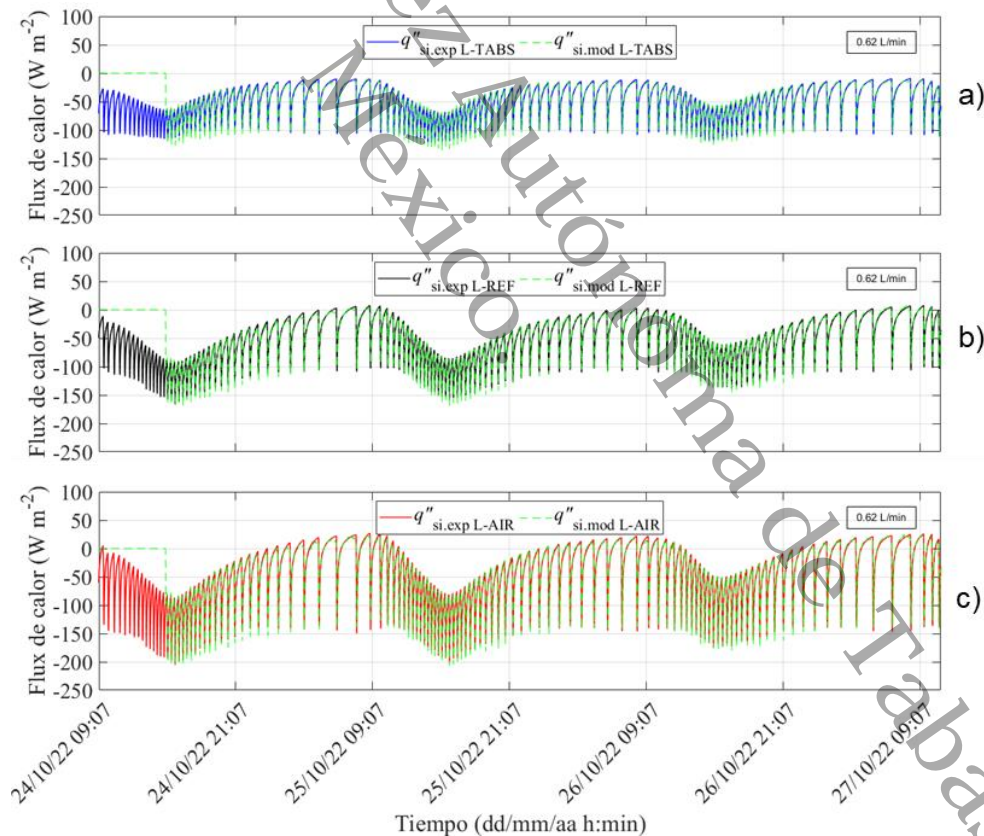
Para seleccionar el modelo con el mejor ajuste de datos se realizó un análisis estadístico, en donde se diseñó y programó un código computacional en el software Matlab® obteniendo un total de 24 casos. Para el análisis estadístico se consideraron tres tiempos de ajuste ( $t$ ) con 120 min, 240 min y 360 min; y cuatro saltos en el tiempo de 3, 5, 10 y 60 min para la regresión lineal.

El modelo de transferencia de calor seleccionado fue el que presentó el tiempo de ajuste de 360 min con salto en el tiempo de 3 min. El modelo fue validado con

los datos experimentales, en el **ANEXO B** se presentan los datos estadísticos y la selección del modelo que presentó el mejor ajuste con los datos experimentales. En la Figura 6.7 se puede observar el flux de calor en la superficie interior del modelo seleccionado ( $q''_{si.mod}$ ) y el flux de calor en la superficie interior de los datos experimentales ( $q''_{si.exp}$ ), para cada una de las losas (L-TABS, L-REF, L-AIR). El comportamiento comparativo de los datos experimentales medidos y los obtenidos con el modelo presentan un ajuste del 97% para L-REF y 98% para L-TABS y L-AIR. Lo anterior, valida que el modelo reproduce adecuadamente los datos experimentales.

**Figura 6.7**

*Validación del modelo de transferencia de calor con datos experimentales*



*Nota.* La figura muestra la validación del modelo de transferencia de calor mediante la comparación entre los valores experimentales y los resultados del

modelo para el flux de calor en la superficie interior de las losas: (a) L-TABS, (b) L-REF y (c) L-AIR. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3 Acoplamiento del modelo global de transferencia y EnergyPlus

Una vez validado el modelo global de transferencia de calor, se llevó a cabo la simulación energética en el programa de *Energy Plus* para un periodo de un año típico con diferentes condiciones climáticas. Para simular las condiciones climáticas se seleccionaron seis ciudades: Ciudad de México, Chihuahua, Mérida, Monterrey, Pachuca y Villahermosa; las características de las ciudades seleccionadas fueron descritos en el Capítulo 2. Los datos climáticos de las ciudades fueron tomados de los datos reportados por CONAGUA y del sitio de pruebas experimentales. En la Tabla 6.2 se presentan los climas seleccionados para análisis de una vivienda con TABS.

**Tabla 6.2**

*Climas de la República Mexicana para el análisis de la vivienda tipo*

Ciudad	Caso
Ciudad de México	C1
Chihuahua	C2
Mérida	C3
Monterrey	C4
Pachuca	C5
Villahermosa	C6

*Nota.* La tabla presenta las ciudades seleccionadas y su clasificación por caso para el análisis del desempeño térmico y energético de la vivienda tipo. Los datos climáticos fueron obtenidos de los registros reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del sitio de pruebas experimentales.

Con los datos obtenidos de la simulación, se realizó un análisis energético donde se consideró la ganancia de calor en la edificación, la ganancia de calor a través de la envolvente de la edificación, cargas térmicas.

### 6.3.1 Ganancia de calor

En la Figura 6.8 se puede observar la ganancia de calor al interior de la vivienda tipo en donde se consideró la energía transferida por conducción-convección a través de la superficie de las paredes y de L-TABS, con una recirculación de agua a una temperatura de 25°C en distintas ciudades de México a lo largo de un año.

La gráfica de la Ciudad de México (Figura 6.8 a) presenta oscilaciones de flujo entre aproximadamente -3000 y 3000 W, con un comportamiento relativamente estable durante el año. Se observan picos de ganancia entre marzo y junio, lo que coincide con los meses de mayor radiación solar. Hacia los meses de invierno (noviembre a enero), los valores tienden a ser más negativos, indicando pérdidas térmicas. En Chihuahua (Figura 6.8 b), el flujo térmico muestra un rango más amplio, con picos que superan los 6000 W durante los meses de verano y pérdidas de hasta -4000 W en invierno. Esto demuestra una alta variabilidad estacional, típica de climas semiáridos o desérticos.

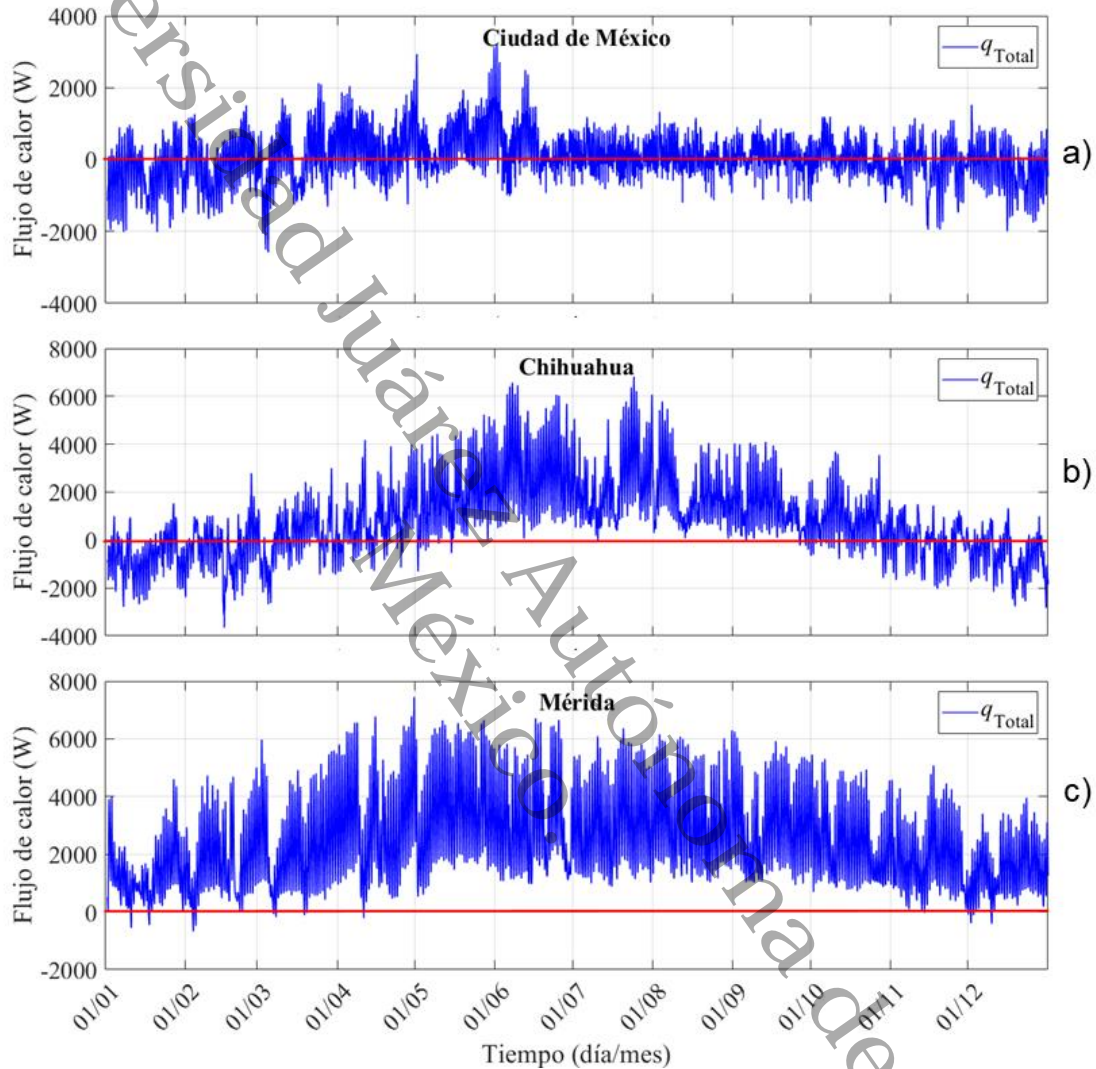
Por su parte, en la ciudad de Mérida (Figura 6.8 c) los valores más altos de flujo de calor total alcanzaron picos cercanos a 7000 W durante gran parte del año, especialmente entre marzo y septiembre. Esto indica una ganancia térmica constante y elevada, típica de un clima cálido-húmedo. En Monterrey (Figura 6.8 d) se observa un comportamiento intermedio entre Chihuahua y Mérida. Los picos de flujo positivo alcanzan alrededor de 6000 W, mientras que las pérdidas no superan los -3000 W. La mayor actividad se concentra entre abril y septiembre, lo que refleja una fuerte influencia de la radiación solar estival y una disminución hacia el invierno.

En Pachuca (Figura 6.8 e) se observan oscilaciones de flujo de calor que varían aproximadamente entre  $-2500$  y  $2500$  W, evidenciando un comportamiento térmico con alternancia entre ganancias y pérdidas a lo largo del año. Durante los meses de marzo a julio se observan los valores más altos del flujo, correspondientes a la época de mayor radiación solar. En contraste, de noviembre a febrero predominan los valores negativos, indicando pérdidas térmicas por las bajas temperaturas. Este patrón revela que Pachuca presenta un clima templado con transiciones marcadas entre estaciones, donde las ganancias y pérdidas tienden a compensarse, manteniendo un comportamiento térmico relativamente equilibrado.

Finalmente, en la gráfica de Villahermosa (Figura 6.8 f) se aprecia un flujo de calor predominantemente positivo durante todo el año, con oscilaciones que alcanzan valores cercanos a los  $7000$  W. Este comportamiento refleja un régimen térmico dominado por ganancias de calor, principalmente entre marzo y agosto, coincidiendo con los meses de mayor radiación solar e intensidad térmica. En general, la tendencia positiva del flujo indica que Villahermosa mantiene una acumulación constante de calor, característica de su clima cálido-húmedo, donde el sistema TABS debe operar mayormente en modo de enfriamiento para mantener el confort térmico interior.

**Figura 6.8**

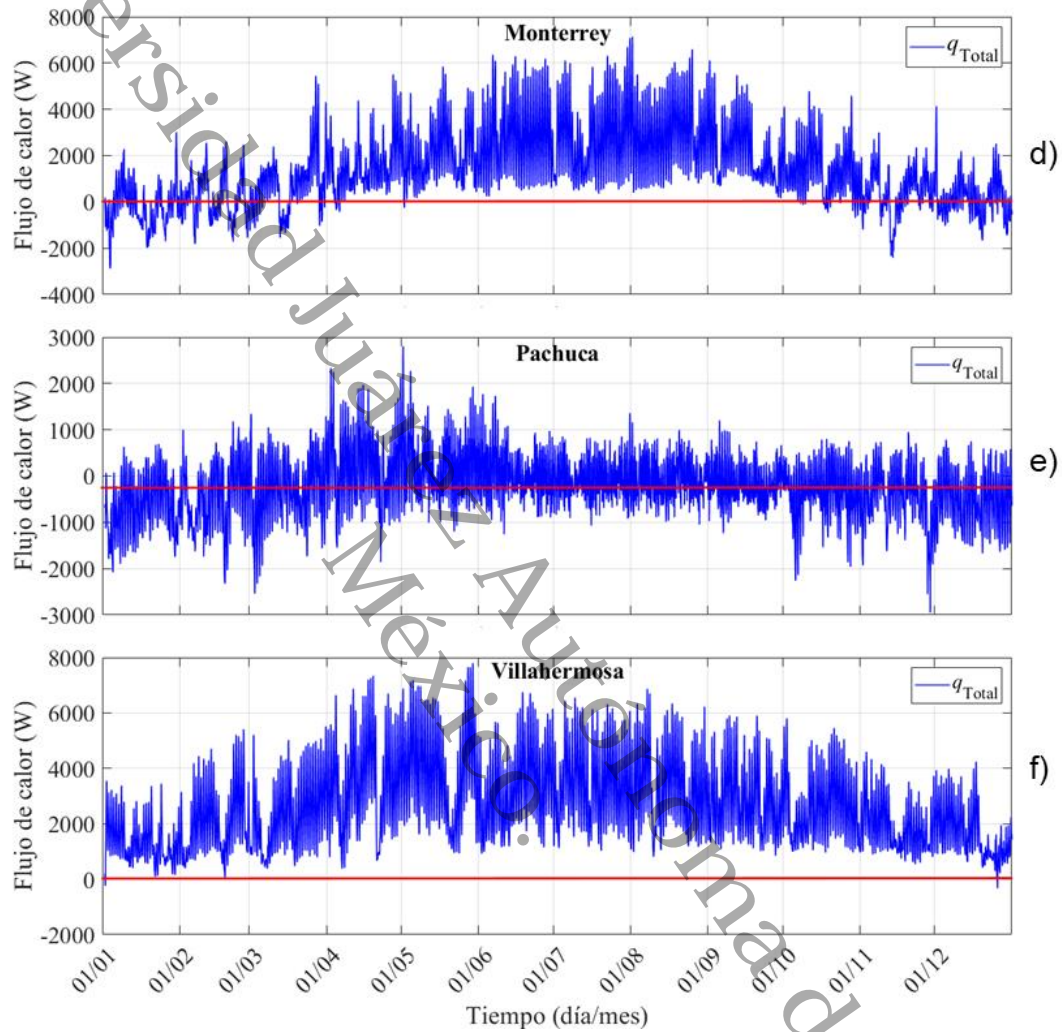
Comportamiento del flujo de calor interior en la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes climas de la República Mexicana



*Nota.* La figura muestra la variación temporal del flujo de calor interior en la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (a) Ciudad de México, (b) Chihuahua, (c) Mérida. \*La figura continua en la siguiente página

**Figura 6.8 (Cont.)**

Comportamiento del flujo de calor interior en la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes climas de la República Mexicana



*Nota.* Continuación de la Figura 6.8. La figura muestra la variación temporal del flujo de calor interior en la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (d) Monterrey, (e) Pachuca y (f) Villahermosa. Fuente: Elaboración propia

El análisis del flux de calor en losas de concreto activadas térmicamente es fundamental para evaluar su eficiencia energética y su impacto en el confort térmico de los edificios. En la Figura 6.9 se presenta la energía transferida al interior, la cual fue aportada por cada superficie de la vivienda, considerando variables como la temperatura ambiental, la irradiancia solar y las propiedades térmicas de la vivienda tipo propuesta. El comportamiento del flux de calor en las diferentes ciudades fue de la siguiente manera:

- Ciudad de México. Presenta una variación térmica moderada, con un flux de calor máximo de  $33.54 \text{ W m}^{-2}$  y un mínimo de  $-51.11 \text{ W m}^{-2}$ . El valor promedio de  $-8.88 \text{ W m}^{-2}$  indica una pérdida neta de calor relativamente baja en comparación con el resto de las ciudades, lo que sugiere un comportamiento térmico más estable y una menor demanda de acondicionamiento energético para mantener condiciones interiores confortables.
- Chihuahua. Muestra la mayor amplitud térmica de las ciudades, con un flux máximo de  $48.63 \text{ W m}^{-2}$  y un mínimo de  $-69.89 \text{ W m}^{-2}$ . El promedio de  $-19.22 \text{ W m}^{-2}$  refleja pérdidas térmicas considerables asociadas a su clima extremo. Esta variabilidad coincide con lo observado en la figura, donde se aprecia un comportamiento más pronunciado durante los periodos invernales, lo que implica una mayor exigencia energética para compensar los cambios estacionales.
- Mérida. Registra uno de los flux con valores promedio más negativos ( $-36.31 \text{ W m}^{-2}$ ), con un mínimo de  $-67.53 \text{ W m}^{-2}$  y un máximo de apenas  $2.79 \text{ W m}^{-2}$ . Este comportamiento indica que el flujo térmico está dominado por pérdidas constantes desde la losa hacia el interior, propias de un clima cálido-húmedo con alta radiación solar y elevadas temperaturas exteriores durante gran parte del año.
- Monterrey. Presenta un flux máximo de  $42.89 \text{ W m}^{-2}$  y un mínimo de  $-73.20 \text{ W m}^{-2}$ , con un valor promedio de  $-25.60 \text{ W m}^{-2}$ . Estos resultados

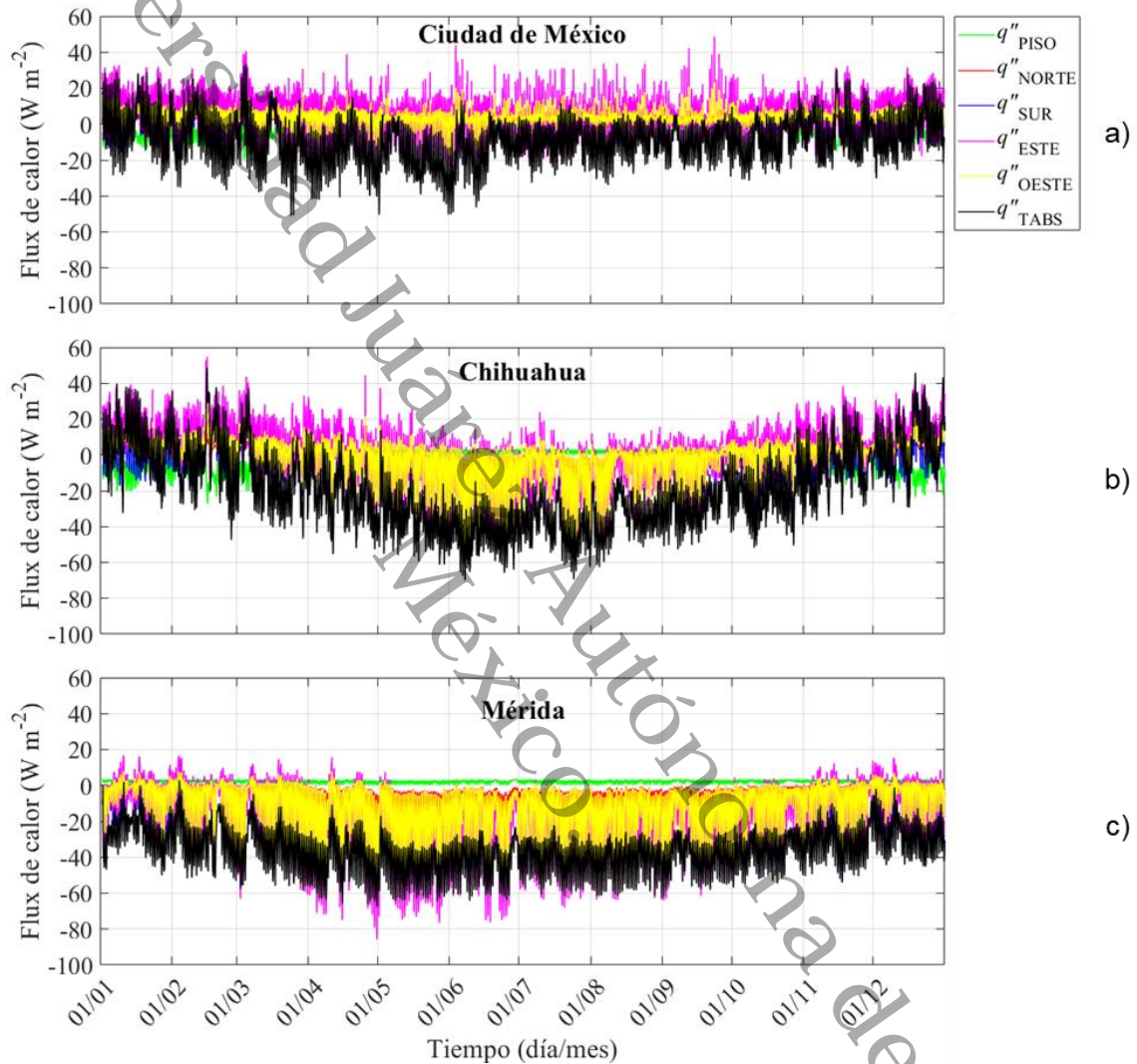
evidencian un régimen térmico con pérdidas predominantes y variaciones estacionales marcadas, donde los intercambios térmicos se intensifican tanto en invierno como en verano, generando una demanda energética respecto a las ciudades más cálidas.

- Pachuca. Reporta un flux máximo de  $38.00 \text{ W m}^{-2}$  y un mínimo de  $-45.86 \text{ W m}^{-2}$ , con un promedio de  $-4.52 \text{ W m}^{-2}$ , el más cercano a cero entre las ciudades analizadas. Este resultado indica un balance térmico más equilibrado, en el que las ganancias y pérdidas de calor tienden reducir la carga térmica sobre la losa.
- Villahermosa. Presenta un flux máximo de  $0.00 \text{ W m}^{-2}$  y un mínimo de  $-71.27 \text{ W m}^{-2}$ , con un promedio de  $-38.10 \text{ W m}^{-2}$ , el más negativo de las ciudades. Esto evidencia pérdidas térmicas predominantes y continuas hacia el interior, asociadas a las condiciones de clima cálido-húmedo con elevada humedad y temperatura exterior constante, lo que incrementa la transferencia térmica a través de la envolvente.

Los resultados muestran que las ciudades con climas cálido-húmedos (Mérida y Villahermosa) presentan los valores de flux de calor promedio más negativos, indicando mayores flujos térmicos hacia el interior, mientras que las ciudades con climas templados o de menor radiación (Ciudad de México y Pachuca) muestran un comportamiento más estable y cercano a un balance térmico. En cambio, ciudades como Chihuahua y Monterrey presentan cambios de temperatura más marcados a lo largo del año, propios de sus climas más secos y extremos, lo que se traduce en diferencias más grandes entre los valores máximos y mínimos de flux de calor registrados.

**Figura 6.9**

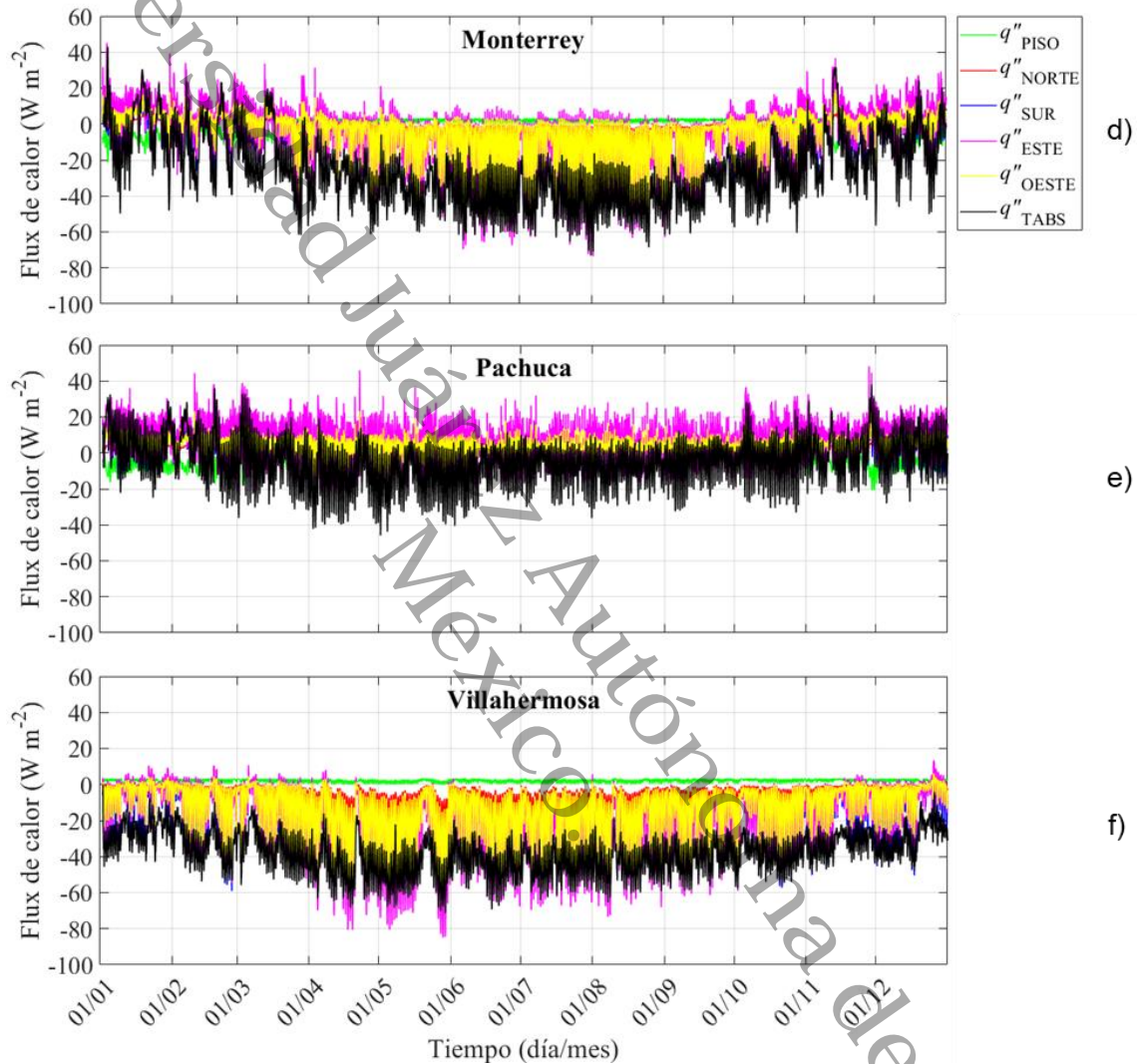
Comportamiento del flux de calor en la superficie interior por cada envolvente de la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes climas de la República Mexicana



*Nota.* La figura muestra la variación temporal del flujo de calor en la superficie interior de cada envolvente de la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (a) Ciudad de México, (b) Chihuahua, (c) Mérida. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.9 (Cont.)**

Comportamiento del flux de calor en la superficie interior por cada envolvente de la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes climas de la República Mexicana



*Nota.* Continuación de la Figura 6.9. La figura muestra la variación temporal del flujo de calor en la superficie interior de cada envolvente de la vivienda tipo durante un año, bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (d) Monterrey, (e) Pachuca y (f) Villahermosa. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6.3 se presentan los resultados promedios del flux de calor en la superficie interior de L-TABS ( $q''_{si}$ ) bajo condiciones de las diferentes ciudades seleccionadas. En la primera columna se presenta las ciudades seleccionadas para el análisis, en la segunda columna el flux de calor mínimo ( $q''_{si \text{ min}}$ ), en la tercera columna el flux de calor máximo ( $q''_{si \text{ max}}$ ), en la cuarta columna el flux de calor promedio ( $q''_{si \text{ prom}}$ ), en la quinta columna el día con el  $q''_{si \text{ min}}$  y en la última columna el día con el  $q''_{si \text{ max}}$ . El comportamiento del flux de calor varía significativamente según el clima de cada ubicación, afectando la capacidad de la losa para almacenar y liberar energía térmica de manera eficiente. En climas cálidos, la losa actúa como disipador térmico, mientras que, en climas fríos puede utilizarse para proporcionar calefacción pasiva. Este análisis permite comprender mejor la respuesta térmica de la losa y su potencial para optimizar el consumo energético en distintas regiones.

**Tabla 6.3**

*Resultados promedios de flux de calor bajo diferentes climas de la República Mexicana*

Ciudad	L-TABS				
	$q''_{si \text{ min}}$ (W m <sup>-2</sup> )	$q''_{si \text{ max}}$ (W m <sup>-2</sup> )	$q''_{si \text{ prom}}$ (W m <sup>-2</sup> )	Día $q''_{si \text{ min}}$	Día $q''_{si \text{ max}}$
Ciudad de México	-51.11	33.54	-8.88	24 marzo	05 marzo
Chihuahua	-69.89	48.63	-19.22	7 junio	16 febrero
Mérida	-67.53	2.79	-36.31	30 abril	04 febrero
Monterrey	-73.20	42.89	-25.60	31 julio	04 enero
Pachuca	-45.86	38.00	-4.52	1ro mayo	29 noviembre
Villahermosa	-71.27	0	-38.10	29 mayo	02 enero

*Nota.* La tabla presenta los resultados promedio del flux de calor en la superficie interior ( $q''_{si}$ ) para la vivienda tipo bajo distintos climas de la República Mexicana. Se indican: el valor mínimo ( $q''_{si \text{ min}}$ ), el valor máximo ( $q''_{si \text{ max}}$ ), el valor promedio ( $q''_{si \text{ prom}}$ ) y las fechas en que ocurren los valores mínimo y máximo en W m<sup>-2</sup>. Los datos corresponden a resultados anuales obtenidos mediante la simulación del modelo acoplado de transferencia de calor. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2 Análisis energético de L-TABS

Para realizar el análisis energético de la vivienda tipo se consideraron las cargas térmicas por enfriamiento y calentamiento durante el año simulado. En la Figura 6.10 se pueden observar las cargas térmicas por enfriamiento ( $Q_{\text{enfriamiento}}$ ), mientras que en la Figura 6.11 se puede observar las cargas térmicas por calentamiento ( $Q_{\text{calentamiento}}$ ) para cada una de las ciudades seleccionadas.

En términos de enfriamiento, los resultados muestran que las mayores cargas térmicas se concentran en los climas cálido-húmedos, particularmente en Villahermosa y Mérida. En enero se registraron los valores más altos del año, alcanzando aproximadamente  $7.91 \times 10^{10}$  J en Villahermosa y  $7.39 \times 10^{10}$  J en Mérida, lo que indica una demanda considerable de disipación de calor incluso en los meses de invierno. A lo largo del año, estas ciudades mantienen valores elevados y relativamente constantes, con cargas que superan frecuentemente los  $7.00 \times 10^9$  J y alcanzan máximos cercanos a  $1.03 \times 10^{10}$  J, esto último para el mes de mayo en Villahermosa. Este comportamiento confirma que en climas cálidos y húmedos la necesidad de enfriamiento es prácticamente permanente debido a la alta radiación solar, la humedad y la baja variación térmica estacional.

En ciudades con climas extremos como Chihuahua y Monterrey también se observan cargas significativas por enfriamiento, aunque con mayor variación estacional. Por su parte, Chihuahua presenta un incremento importante durante los meses cálidos, alcanzando valores del orden de  $7.47 \times 10^9$  J en junio. Mientras que, Monterrey muestra picos similares en verano, con valores cercanos a  $7.99 \times 10^9$  J para el mes de agosto. Esto indica que en estos climas el sistema requiere mayor capacidad de disipación de calor durante el verano, sin embargo, la demanda disminuye notablemente en los meses fríos.

Por el contrario, en ciudades con clima templado como Ciudad de México y Pachuca, las cargas por enfriamiento son considerablemente menores durante

todo el año. En Pachuca, por ejemplo, los valores mensuales oscilan entre aproximadamente  $2.10 \times 10^8$  J y  $1.07 \times 10^9$  J. Mientras que, en Ciudad de México la mayoría de los meses presentan cargas por debajo de  $1.5 \times 10^9$  J, lo que evidencia una menor necesidad de enfriamiento debido a condiciones ambientales más moderadas.

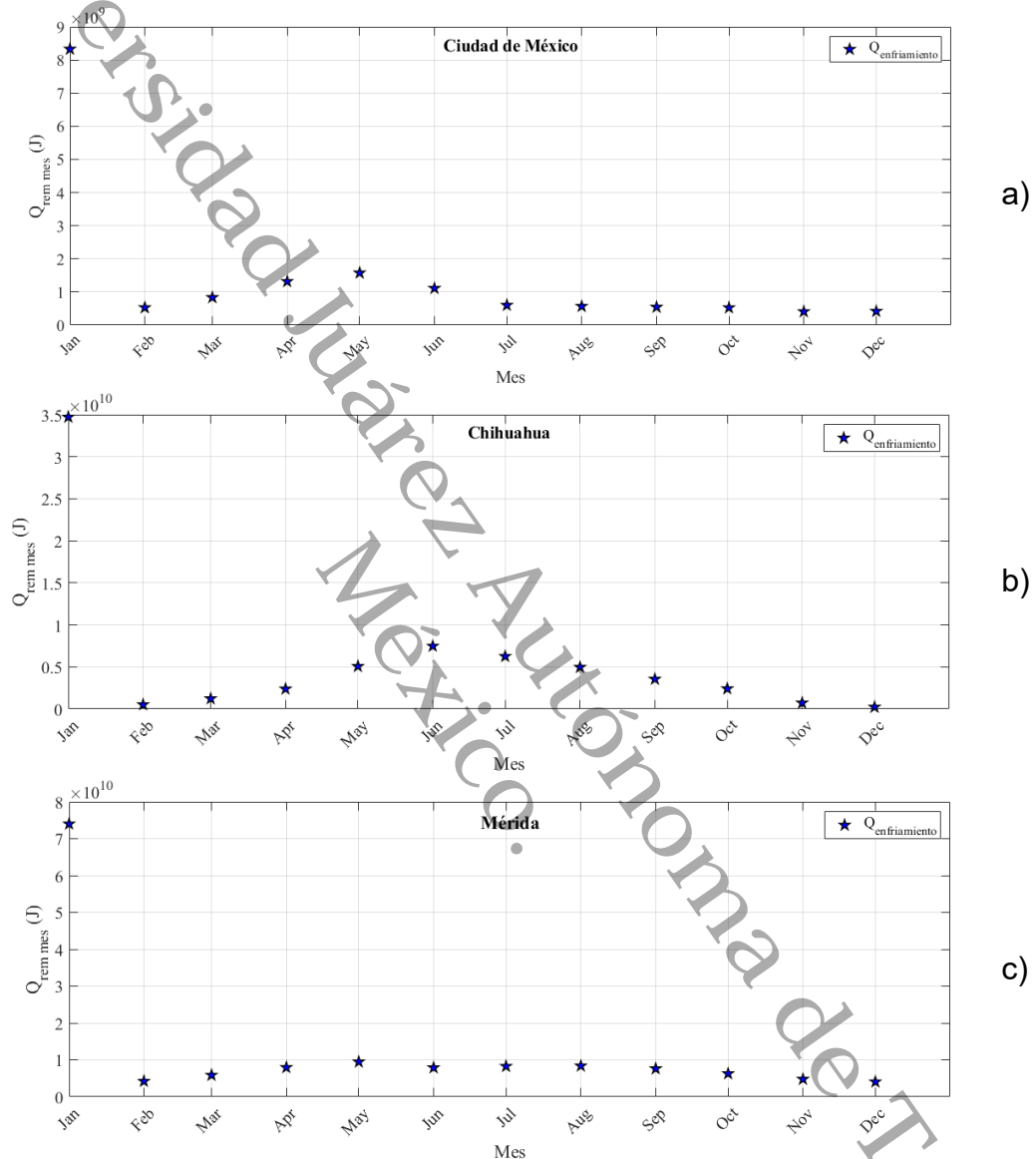
En cuanto a las cargas por calentamiento, el comportamiento es inverso. Las mayores demandas se presentan en climas templados y fríos. Pachuca registra los valores más altos del año, con un máximo de aproximadamente  $1.56 \times 10^{10}$  J en diciembre y valores superiores a  $1.0 \times 10^{10}$  J en enero, lo que refleja una importante necesidad de aporte térmico durante el invierno. De forma similar, la Ciudad de México presenta cargas relevantes por calentamiento, con valores de hasta  $6.08 \times 10^9$  J en enero y más de  $1.05 \times 10^9$  J en diciembre, lo que confirma la presencia de condiciones frías en ciertos periodos del año.

En este mismo sentido, Chihuahua y Monterrey también presentan demandas considerables de calentamiento en invierno, con valores que alcanzan aproximadamente  $5.75 \times 10^9$  J y  $3.03 \times 10^9$  J en enero, respectivamente. Esto evidencia la influencia de las bajas temperaturas nocturnas y las altas temperaturas en estas regiones. Sin embargo, durante los meses cálidos estas cargas disminuyen notablemente e incluso se vuelven prácticamente nulas en verano.

En contraste, en los climas cálido-húmedos de Mérida y Villahermosa la carga por calentamiento es prácticamente despreciable durante la mayor parte del año. En Mérida solo se registraron valores relativamente pequeños en los primeros meses del año, con un máximo cercano a  $4.16 \times 10^7$  J en enero, mientras que en Villahermosa los valores son cercanos a cero en casi todos los meses, lo que indica que las condiciones térmicas rara vez requieren aporte de calor.

**Figura 6.10**

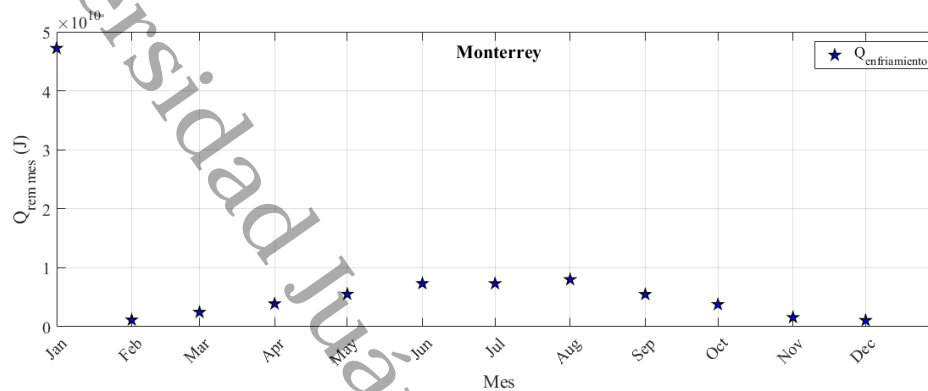
*Cargas térmicas promedio por enfriamiento por mes bajo diferentes climas de la República Mexicana*



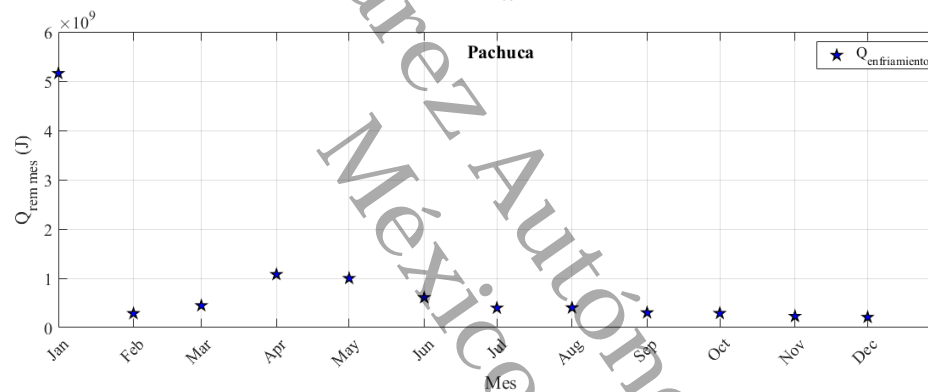
*Nota.* La figura muestra las cargas térmicas promedio mensuales por enfriamiento en la vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (a) Ciudad de México, (b) Chihuahua, (c) Mérida. \*La figura continua en la siguiente página. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.10 (Cont.)**

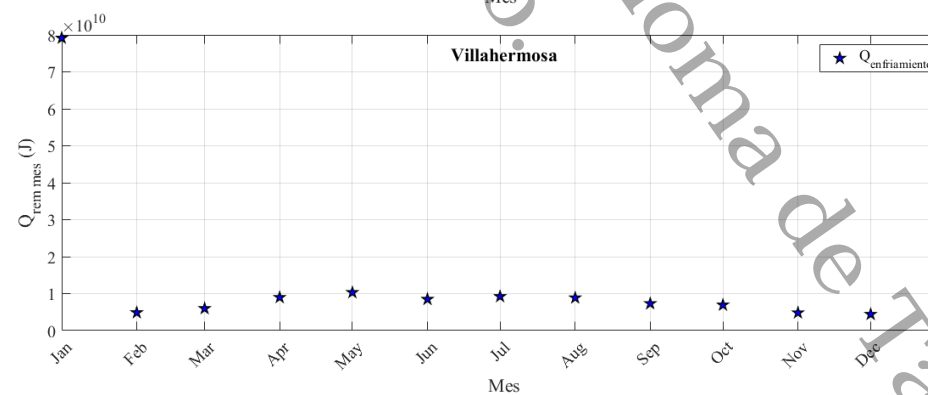
*Cargas térmicas promedio por enfriamiento por mes bajo diferentes climas de la República Mexicana*



d)



e)

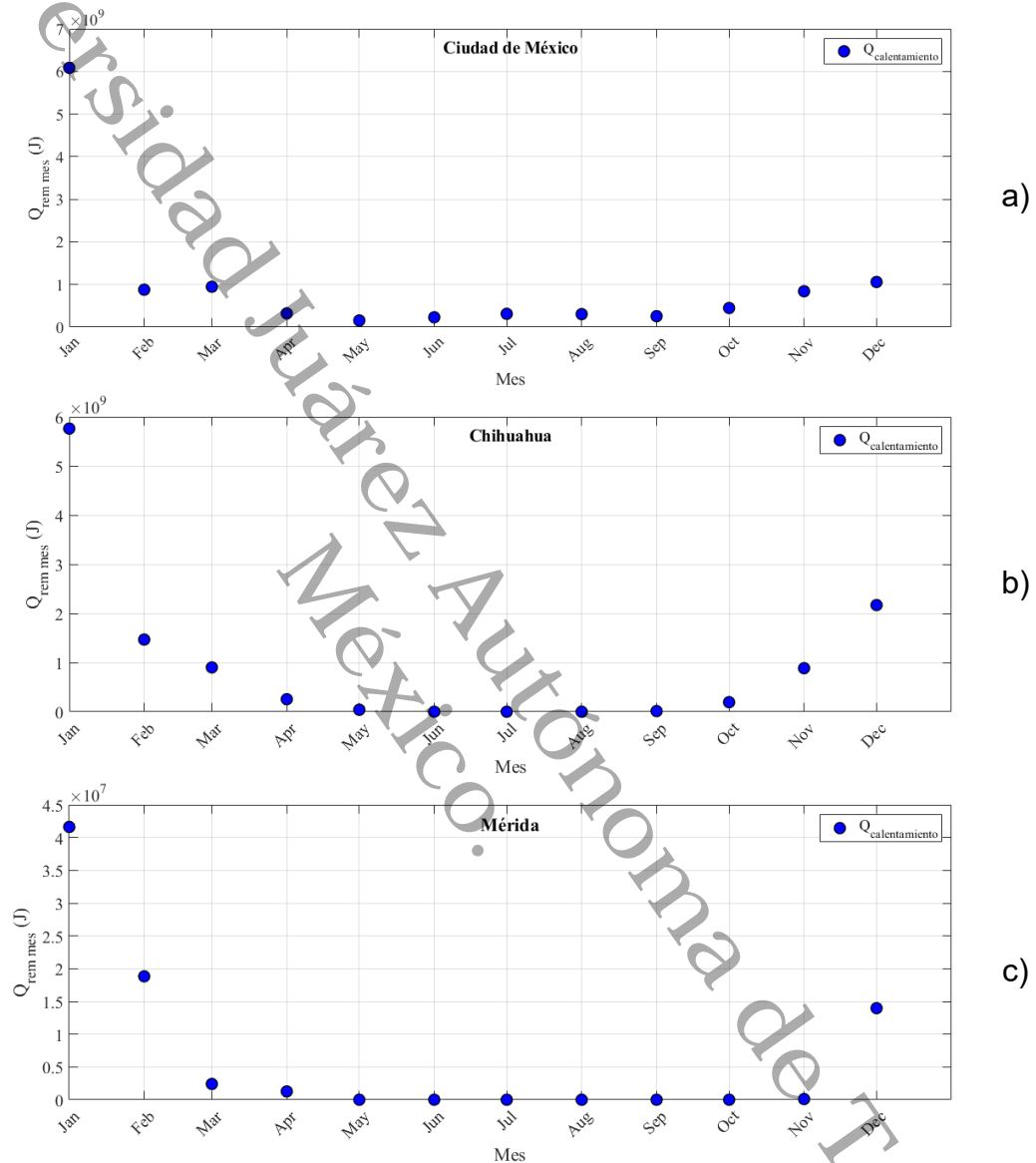


f)

*Nota.* Continuación de la Figura 6.10. La figura muestra las cargas térmicas promedio mensuales por enfriamiento en la vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (d) Monterrey, (e) Pachuca y (f) Villahermosa. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.11**

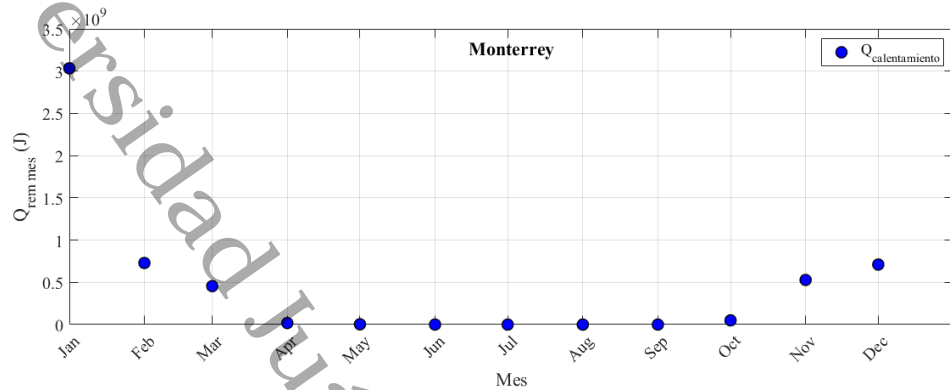
*Cargas térmicas promedio por calentamiento por mes bajo diferentes climas de la República Mexicana*



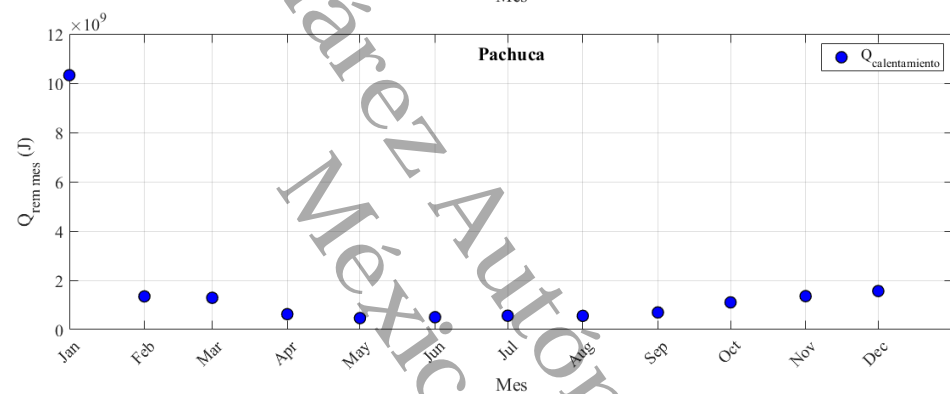
*Nota.* La figura muestra las cargas térmicas promedio mensuales por calentamiento en la vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (a) Ciudad de México, (b) Chihuahua, (c) Mérida. La figura continua en la siguiente página. Fuente: Elaboración propia

**Figura 6.11 (Cont.)**

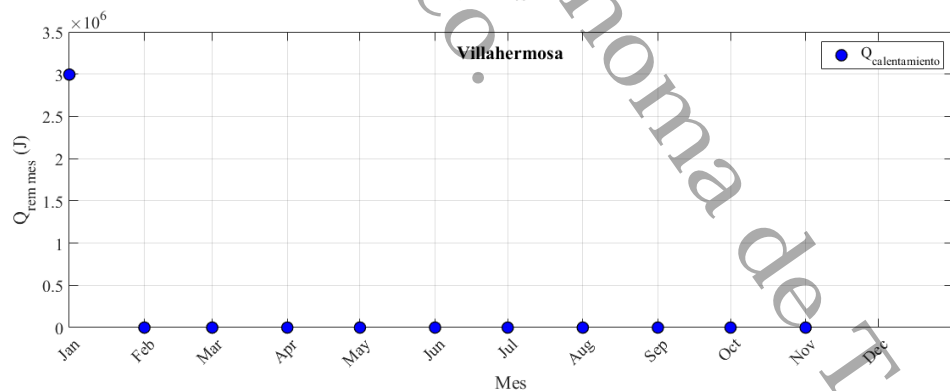
*Cargas térmicas promedio por calentamiento por mes bajo diferentes climas de la República Mexicana*



d)



e)



f)

*Nota.* Continuación de la Figura 6.11. La figura muestra las cargas térmicas promedio mensuales por calentamiento en la vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (d) Monterrey, (e) Pachuca y (f) Villahermosa. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6.4 se puede observar que la mayor energía removida para enfriamiento y calentamiento ocurrió en el mes de enero, siendo éste el mes en donde las temperaturas ambientales son menores debido a que se encuentran en la estación más fría del año. Estos resultados muestran que el comportamiento energético del sistema con TABS está fuertemente determinado por el clima local. En regiones cálido-húmedas predominan las cargas por enfriamiento durante todo el año, mientras que en climas templados y fríos el consumo energético se distribuye entre necesidades de enfriamiento en verano y calentamiento en invierno. Esta diferencia estacional explica las tendencias observadas en las Figuras 6.10 y 6.11 y confirma que el uso de losas termo activadas puede contribuir a moderar las cargas térmicas, especialmente en climas con alta demanda de enfriamiento. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Rakesh et al., (2023) & Moussa et al., (2025) donde el sistema se encuentra ligado las condiciones climáticas del lugar.

**Tabla 6.4**

*Resultados promedio de calor removido por enfriamiento y por calentamiento, bajo diferentes climas de la República Mexicana*

Ciudad	$Q_{\text{enfriamiento}} \text{ (J)}$	$Q_{\text{calentamiento}} \text{ (J)}$
Ciudad de México	8.33E+09	5.19E+10
Chihuahua	3.47E+10	3.49E+10
Mérida	7.40E+10	5.20E+09
Monterrey	4.72E+10	2.31E+10
Pachuca	5.16E+09	6.24E+10
Villahermosa	7.91E+10	2.87E+09

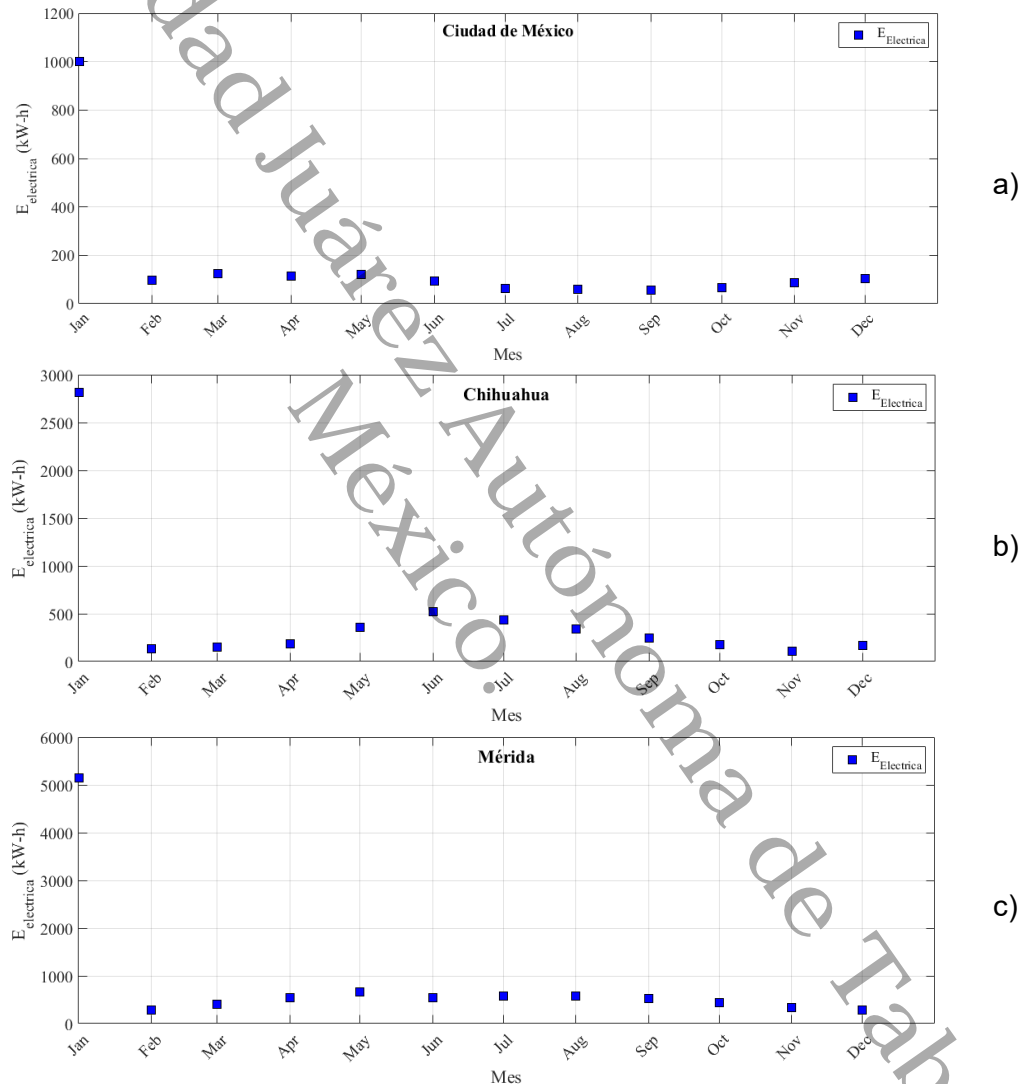
*Nota.* La tabla presenta los valores promedio anuales del calor removido por enfriamiento y por calentamiento, expresados en Joules (J) distintas condiciones climáticas representativas de la República Mexicana. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la evaluación de la vivienda con el L-TABS se consideró el consumo de energía eléctrica por el sistema, el COP convencional de sistemas de aire acondicionado y las cargas térmicas para cada mes. En la Figura 6.12 se puede

observar la energía eléctrica total del sistema por mes, para cada una de las ciudades seleccionadas.

**Figura 6.12**

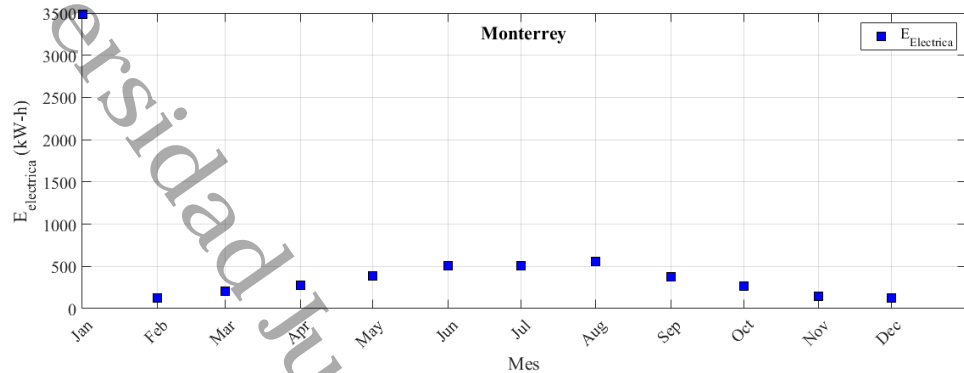
*Energía eléctrica promedio por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana*



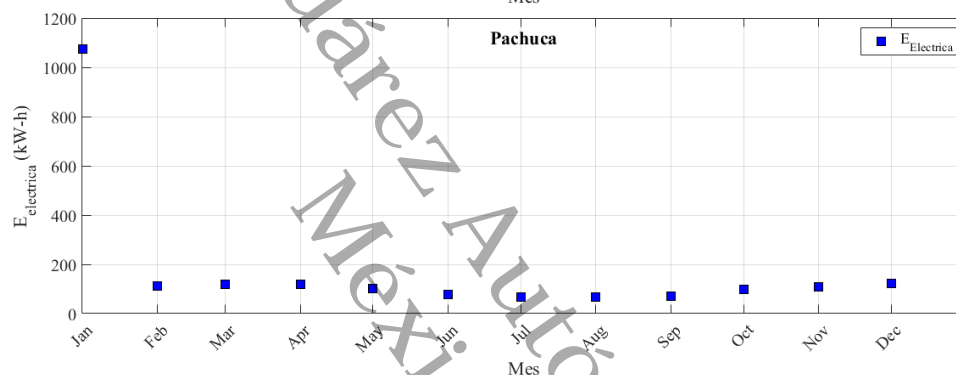
**Nota.** La figura muestra el consumo promedio mensual de energía eléctrica en la vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondientes a: (a) Ciudad de México, (b) Chihuahua, (c) Mérida. La figura continua en la siguiente página. Fuente: Elaboración propia Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.12 (Cont.)**

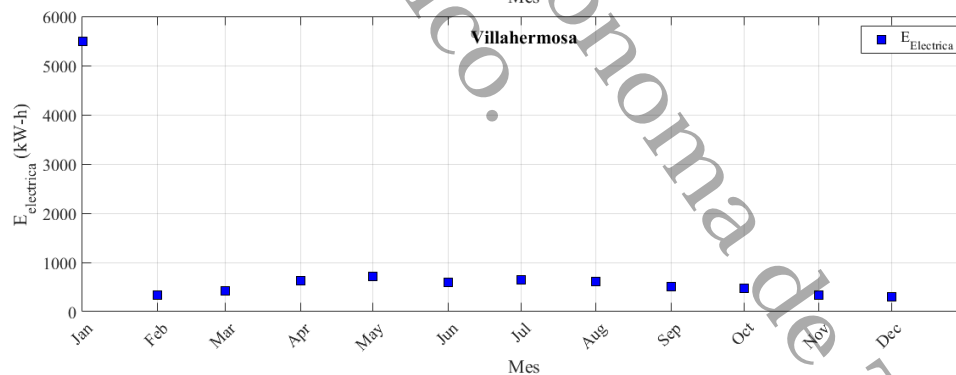
*Energía eléctrica promedio por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana*



d)



e)



f)

*Nota.* La figura muestra el consumo promedio mensual de energía eléctrica en la vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana, correspondiente a: (d) Monterrey, (e) Pachuca y (f) Villahermosa. Fuente: Elaboración propia.

Para medir la eficiencia del L-TABS se realizaron los cálculos de costos y generación de CO<sub>2</sub> por consumo de energía eléctrica, considerando el factor de conversión de kWh a CO<sub>2</sub> y el costo de energía eléctrica suministrada a las viviendas por CFE. En la Tabla 6.5 se pueden observar los kg de CO<sub>2</sub> por mes para cada ciudad generado con el sistema propuesto.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 6.5, se observa una variación significativa en la generación mensual de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo de energía eléctrica en la vivienda tipo para las distintas ciudades analizadas, evidenciando una clara dependencia de las condiciones climáticas y de la demanda energética estacional. En términos generales, se identifica una tendencia a la disminución de las emisiones durante el segundo semestre del año en varias localidades, lo cual puede atribuirse a una menor demanda de enfriamiento o a condiciones climáticas más moderadas que reducen el consumo energético.

En climas templados como Ciudad de México y Pachuca, se pudo observar que las emisiones de CO<sub>2</sub> se mantienen relativamente bajas a lo largo del año, presentando valores mínimos de 25.45 kg en septiembre para la Ciudad de México y 30.48 kg en julio para Pachuca. Este comportamiento sugiere que la demanda energética para climatización es menor en estas regiones, lo que se traduce en una reducción directa de las emisiones asociadas al consumo eléctrico. Asimismo, se observa que estas ciudades presentan variaciones moderadas entre los meses de mayor y menor emisión, lo que indica una menor sensibilidad a cambios estacionales extremos.

Por otro lado, en ciudades con climas extremos o con mayor demanda energética, como Chihuahua y Monterrey, las emisiones muestran una mayor variabilidad mensual. En Chihuahua se registra un valor mínimo de 50.68 kg de CO<sub>2</sub> en noviembre, mientras que, en Monterrey se alcanza un valor de 56.89 kg

en diciembre, lo cual coincide con periodos de menor requerimiento energético. Sin embargo, estas ciudades presentan incrementos considerables en otros meses del año, lo que refleja la influencia tanto de las necesidades de enfriamiento en verano como de calentamiento en invierno. En contraste, los climas cálido - húmedos como Mérida y Villahermosa presentan los niveles más altos de emisiones durante gran parte del año, debido a la elevada y constante demanda de enfriamiento. A pesar de observarse una ligera reducción hacia el final del año, los valores mínimos siguen siendo significativamente mayores en comparación con otras ciudades, registrándose 128.95 kg de CO<sub>2</sub> en diciembre para Mérida y 140.27 kg en el mismo mes para Villahermosa. Esto indica que, incluso en los periodos de menor consumo relativo, la carga térmica ambiental continúa siendo elevada, lo que mantiene una demanda constante de energía eléctrica. Estos patrones coinciden con (Hassan & Abdelaziz, 2022), quienes reportan variabilidad dependiendo de la estación del año en sistemas TABS.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que la generación de CO<sub>2</sub> está estrechamente relacionada con las condiciones climáticas locales y con el comportamiento de la demanda energética a lo largo del año. Es notable destacar, que las ciudades con climas cálido-húmedos presentaron las emisiones de CO<sub>2</sub> más altas y sostenidas, mientras que, los climas templados mostraron menores niveles y menor variabilidad. Esta tendencia refuerza la importancia de implementar soluciones pasivas y sistemas de control térmico eficientes, como el uso de losas termo activadas, ya que su aplicación puede contribuir a reducir el consumo energético y, en consecuencia, disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de electricidad en edificaciones residenciales.

**Tabla 6.5**

*Resultados promedios de kg CO<sub>2</sub> por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana*

Mes	Ciudad					
	Ciudad de México CO <sub>2</sub> (kg)	Chihuahua CO <sub>2</sub> (kg)	Merida CO <sub>2</sub> (kg)	Monterrey CO <sub>2</sub> (kg)	Pachuca CO <sub>2</sub> (kg)	Villahermosa CO <sub>2</sub> (kg)
Enero	458.44	1287.65	2354.91	1597.84	492.38	2517.42
Febrero	44.76	62.73	134.14	59.80	51.90	154.61
Marzo	56.64	67.37	186.10	92.70	55.23	190.02
Abril	52.13	83.68	252.28	124.39	54.16	285.31
Mayo	55.07	162.43	300.63	175.71	46.58	328.00
Junio	42.70	237.76	250.36	233.06	35.42	269.52
Julio	29.02	198.89	262.64	232.75	30.48	293.57
Agosto	27.77	157.84	266.32	254.17	30.51	281.93
Septiembre	25.45	113.19	242.03	174.49	31.72	232.56
Octubre	30.97	82.46	199.36	121.78	44.30	220.40
Noviembre	39.71	50.68	151.53	66.84	50.46	152.99
Diciembre	46.98	75.81	128.95	56.89	56.42	140.27

*Nota.* La tabla presenta los valores promedio mensuales de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en kg, estimados para la vivienda tipo bajo distintas condiciones climáticas representativas de la República Mexicana. Los valores corresponden a las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica requerido para los procesos de enfriamiento y calentamiento, obtenidas a partir de los resultados de la simulación energética anual. Fuente: Elaboración propia.

El costo de energía eléctrica consumida por la vivienda tipo se presenta en la Tabla 6.6, en donde se presentan los valores promedio por mes de energía eléctrica para cada ciudad considerando el esquema tarifario para uso doméstico de CFE del 2025 (para todos los estados \$0.8 MNX por kWh, considerando que para ese año las tarifas domésticas de la CFE con subsidio, Tarifas 1 a 1F,

en consumo básico se encuentran en un rango aproximado de \$0.70 a \$1.50 MXN por kWh). Como se puede observar en la Tabla, los costos de consumo de energía en pesos son menores en los estados de la República Mexicana con climas fríos comparado con los de clima cálido. En términos generales, los mayores costos se concentran en las ciudades con clima cálido - húmedo, particularmente en Villahermosa y Mérida. En estas localidades, el consumo energético asociado al enfriamiento es prácticamente constante durante todo el año, lo que se traduce en gastos elevados y sostenidos. Por ejemplo, en enero se registraron valores máximos cercanos a \$4,397.24 MNX en Villahermosa y \$4,113.37 MNX en Mérida, mientras que incluso en los meses de menor demanda, como diciembre, los costos permanecen relativamente altos, con valores de \$245.02 MNX y \$225.25 MNX, respectivamente. Este comportamiento evidencia la fuerte dependencia del consumo eléctrico respecto a la necesidad continua de climatización en climas cálidos.

En ciudades con clima seco o extremo como Chihuahua y Monterrey, los costos presentan una variación estacional más marcada. Durante los meses fríos, el gasto energético aumenta debido a la necesidad de calentamiento, alcanzando en enero valores de \$2,249.18 MNX para Chihuahua y \$2,790.99 MNX en Monterrey. Sin embargo, conforme avanza el año y las temperaturas se estabilizan, los costos disminuyen considerablemente, llegando en noviembre a valores cercanos a \$88.52 MNX para Chihuahua y \$99.36 MNX en diciembre para Monterrey. Esto indica que, aunque existe una demanda energética importante, esta se concentra en periodos específicos del año.

Por otro lado, en climas templados como Ciudad de México y Pachuca, los costos de energía eléctrica son significativamente menores en comparación con el resto de las ciudades. En la Ciudad de México se observa uno de los valores más bajos del análisis, con un gasto mínimo aproximado de \$48.50 MNX en agosto, mientras que, en Pachuca el costo mensual oscila entre \$53.25 MNX y \$98.56

MNX en la mayoría de los meses. Esta reducción se debe a que las condiciones climáticas moderadas disminuyen tanto la necesidad de enfriamiento como de calentamiento, lo que reduce el consumo energético total. Como se pudo observar, los resultados muestran que el impacto económico del consumo eléctrico está estrechamente ligado al clima local. Mientras que, en regiones cálidas el gasto energético es elevado y constante por la necesidad permanente de enfriamiento, en climas templados y fríos el consumo es menor y más variable a lo largo del año.

**Tabla 6.6**

*Costo de energía eléctrica por mes, bajo diferentes climas de la República Mexicana*

Mes	Ciudad					
	Ciudad de México (MXN)	Chihuahua (MXN)	Merida (MXN)	Monterrey (MXN)	Pachuca (MXN)	Villahermosa (MXN)
Enero	\$800.77	\$2,249.18	\$4,113.37	\$2,790.99	\$860.06	\$4,397.24
Febrero	\$78.19	\$109.57	\$234.30	\$104.46	\$90.65	\$270.05
Marzo	\$98.93	\$117.68	\$325.07	\$161.92	\$96.46	\$331.92
Abril	\$91.05	\$146.16	\$440.66	\$217.28	\$94.60	\$498.36
Mayo	\$96.19	\$283.72	\$525.13	\$306.91	\$81.36	\$572.93
Junio	\$74.59	\$415.29	\$437.32	\$407.09	\$61.87	\$470.77
Julio	\$50.69	\$347.41	\$458.76	\$406.55	\$53.25	\$512.78
Agosto	\$48.50	\$275.70	\$465.18	\$443.97	\$53.28	\$492.46
Septiembre	\$44.45	\$197.71	\$422.75	\$304.78	\$55.40	\$406.23
Octubre	\$54.09	\$144.03	\$348.23	\$212.72	\$77.38	\$384.98
Noviembre	\$69.36	\$88.52	\$264.69	\$116.76	\$88.14	\$267.24
Diciembre	\$82.06	\$132.43	\$225.25	\$99.36	\$98.56	\$245.02

*Nota.* La tabla presenta el costo promedio mensual de la energía eléctrica, expresado en pesos mexicanos (MXN), estimado para la vivienda tipo bajo distintas condiciones climáticas representativas de la República Mexicana. Los valores corresponden al consumo energético requerido para los procesos de enfriamiento y calentamiento, calculados a partir de los resultados de la simulación energética anual y considerando las tarifas eléctricas vigentes.

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó térmicamente un Sistema de Construcción Térmicamente Activado (TABS) mediante un análisis teórico-experimental, con el propósito de reducir el consumo de energía eléctrica en edificaciones y promover condiciones de confort térmico. Para lo cual, se diseñó, construyó y evaluó un módulo que permite fijar condiciones de ambiente interior y cuantificar el flujo de calor a través de tres muestras de techo de manera simultánea: un sistema TABS con recirculación interior de agua (L-TABS), una losa con circulación de aire (L-AIR) y una muestra de losa de referencia (L-REF). A partir de los datos obtenidos se desarrolló y validó un modelo global de transferencia de calor, el cual fue posteriormente acoplado a una vivienda tipo en *EnergyPlus* para evaluar su comportamiento anual en seis climas representativos de México. Los principales hallazgos obtenidos son:

### *Análisis de la temperatura*

- Las pruebas experimentales confirmaron que la losa activada térmicamente (L-TABS) reduce las ganancias térmicas internas y mantiene temperaturas interiores de la losa inferiores a las de la losa de referencia, especialmente cuando se emplea recirculación de agua. Se observó una disminución de hasta 28°C en la temperatura interior, evidenciando su capacidad para estabilizar el comportamiento térmico de la envolvente. Este comportamiento es consistente con estudios sobre TABS en techos, donde la activación hidráulica permite extraer calor de la masa térmica y atenuar picos de temperatura (Moussa et al., 2025; Yang et al., 2024).
- Asimismo, la superficie exterior del sistema L-TABS alcanzó temperaturas cercanas a 55 °C durante el día en condiciones sin recirculación, lo que indica una mayor absorción de radiación solar. Sin embargo, este calor no se transfirió de manera directa al interior, confirmando el efecto

amortiguador de la inercia térmica del concreto, en concordancia con lo reportado en la literatura sobre techos activados (Yu et al., 2020).

#### *Análisis del flux de calor*

- El comportamiento del flujo de calor mostró diferencias claras entre las configuraciones de techo. En el caso de L-TABS, el flux de calor hacia la superficie interior ( $q''_{si}$ ) se redujo considerablemente respecto a la losa convencional, alcanzando disminuciones de hasta  $185.6 \text{ W m}^{-2}$  en comparación con L-REF. Este resultado confirma la capacidad del sistema para limitar la transferencia térmica durante los periodos de mayor carga solar (Romaní et al., 2016).
- La respuesta térmica del sistema mostró una fuerte dependencia del caudal de agua. Dentro del intervalo evaluado ( $0.31\text{--}1.25 \text{ L min}^{-1}$ ), los caudales menores favorecieron una mayor remoción de energía térmica y mejores valores de temperatura interior. Este comportamiento coincide con investigaciones que destacan la importancia del control hidráulico para optimizar el intercambio térmico en sistemas TABS (Abed et al., 2024; Hu et al., 2022).

#### *Análisis del modelo global de transferencia de calor*

- El modelo global desarrollado reprodujo adecuadamente los datos experimentales, alcanzando un ajuste superior al 97% para L-REF y cercano al 98% para L-TABS y L-AIR, lo que valida su aplicación en simulaciones energéticas. Este nivel de concordancia coincide con metodologías reportadas en la literatura para el acoplamiento de modelos térmicos simplificados en plataformas como EnergyPlus (Yu et al., 2020; Zhang et al., 2015).
- El acoplamiento del modelo a una vivienda tipo permitió evaluar el comportamiento anual en seis climas representativos de México, mostrando una fuerte dependencia climática en las cargas térmicas. En

climas cálidos-húmedos, como Mérida y Villahermosa, se registraron las mayores cargas de enfriamiento, con valores mensuales del orden de  $7.3 \times 10^{10}$  a  $7.9 \times 10^{10}$  J. En climas templados, como Ciudad de México, las cargas máximas fueron considerablemente menores ( $\approx 8.3 \times 10^9$  J), mientras que en climas fríos o con mayor variabilidad térmica, como Chihuahua y Pachuca, se observaron demandas importantes de calentamiento, superiores a  $1.0 \times 10^{10}$  J en temporada invernal. Estos resultados confirman que el desempeño del sistema depende directamente del clima y de la interacción entre radiación solar, temperatura ambiente y capacidad de disipación nocturna de la losa (Rakesh et al., 2023; Moussa et al., 2025).

#### *Análisis energético y emisiones de CO<sub>2</sub>*

- El análisis energético anual evidenció reducciones en el consumo eléctrico destinado al enfriamiento, lo que se reflejó en menores emisiones de CO<sub>2</sub>. De forma cuantitativa, los valores máximos se presentaron en climas cálidos-húmedos, alcanzando hasta 2517.42 kg mensuales, mientras que los mínimos fueron cercanos a 25.45 kg en meses templados en la Ciudad de México. Esta variación estacional confirma la influencia directa del clima sobre el consumo energético y las emisiones asociadas Hassan & Abdelaziz (2022).
- El análisis económico mostró también una fuerte dependencia climática. En ciudades cálidas como Mérida y Villahermosa, los costos mensuales superaron los \$500 MXN durante periodos de alta demanda térmica, mientras que, en ciudades templadas, como Ciudad de México, se registraron valores mínimos cercanos a \$44.45 MXN. Esto indica que la viabilidad económica del sistema aumenta en zonas con altas cargas de enfriamiento, especialmente cuando se integra con estrategias de

operación eficiente o almacenamiento térmico (Lind et al., 2023; Preßmair et al., 2024).

Los resultados experimentales y de simulación confirmaron que el sistema TABS demostró ser una solución efectiva para mejorar el desempeño térmico de edificaciones residenciales en distintos climas de México. El modelo térmico desarrollado y validado experimentalmente, con un ajuste superior al 97%, valida que la integración de sistemas TABS en techos permite reducir cargas térmicas internas, disminuir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, mejorar el confort térmico y contribuir a la eficiencia energética en edificaciones, en concordancia con criterios internacionales de sustentabilidad y confort térmico (ASHRAE, ISO 7730).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda planear una estrategia de control del caudal; reducir el caudal durante picos diurnos y aumentarlo según demanda nocturna, con el fin de mejorar el confort térmico en el ambiente interior y aumentar la eficiencia del sistema.
- Se recomienda incorporar acabados reflectivos/recubrimientos o una capa delgada aislante/ exterior reflectante para reducir la absorción solar y disminuir la carga sobre el sistema. Lo anterior, evitaría pérdidas de eficiencia por el fenómeno de calentamiento extremo en el exterior.
- Se recomienda continuar el estudio y sincronizar la operación de la losa L-TABS con el aire acondicionado (set point y horarios) para aprovechar la inercia térmica y reducir ciclos del compresor. Es decir, usar la losa L-TABS como primer nivel de remoción térmica y el HVAC para un mejor ajuste. Esto aprovecharía el beneficio observado en la  $T_{si}$  y reduciría el consumo eléctrico.
- Se recomienda estudiar diferentes temperaturas de agua y estrategias de preenfriamiento nocturno para maximizar la capacidad de enfriamiento pasivo, maximizar la reducción de consumo eléctrico y emisiones de  $CO_2$ .
- Se recomienda en simulaciones futuras incluir el efecto de la humedad, infiltración real de la vivienda, perfiles horarios de ocupación, y variación dinámica del COP del equipo de aire acondicionado para estimaciones energéticas y económicas más precisas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abed, M. H., Al-Asadi, H. A., Oleiwi, A., Kadhim, S. A., Al-Yasiri, M., Alsayah, A. M., & Nayyef, D. R. (2024). Improving building energy efficiency through ventilated hollow core slab systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104793. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2024.104793>
- Ali, M. F. M., Latif, Y. A., Rasheed, R. H., Alsayah, A. M., Abed, A. F., Alshukri, M. J., Hussein, K. K. A., & Al-Manea, A. (2025). Hybrid active slab with outer PCM Panels – Geothermal well to reduce the heat gain of a building roof. *International Journal of Thermofluids*, 25, 100993. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2024.100993>
- American Concrete Institute. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14)*.
- ASHRAE. (2021). *2021 Ashrae Handbook*.
- ASTM C31. (2018). *Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra*. 1–9.
- Ávila-hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-pérez, I., & Téllez-velázquez, E. (2020). *Energy & Buildings Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico*. 209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109709>
- Building Environment Design — Design, Dimensioning, Installation and Control of Embedded Radiant Heating and Cooling Systems (ISO 11855) (2012). <https://www.iso.org>
- Carnieletto, L., Kazanci, O. B., Olesen, B. W., Zarrella, A., & Pasut, W. (2024). Combining energy generation and radiant systems: Challenges and possibilities for plus energy buildings. *Energy and Buildings*, 325, 114965. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.114965>
- Chung, W. J., Park, S. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2017). Control of thermally activated building system considering zone load characteristics. *Sustainability (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/su9040586>
- Comisión Nacional de vivienda. (2017). *Código de edificación de vivienda*.

- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2018). *Estudio Diagnóstico del Derecho a la Vivienda Digna y Decorosa 2018*. <https://www.coneval.org.mx/quienessomos/InvestigadoresAcademicos/>
- De Wit, A. K., & Wisse, C. J. (2012). Hydronic circuit topologies for thermally activated building systems – design questions and case study. *Energy and Buildings*, 52, 56–67. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.05.010>
- Dharmasastha, K., Nagendra, S. M. S., & Maiya, M. P. (2023). Hydronic flow path analysis on the thermal comfort performance of radiant cooling system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, 101727. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2023.101727>
- Dharmasastha, K., Samuel, D. G. L., Nagendra, S. M. S., & Maiya, M. P. (2020). Experimental investigation of thermally activated glass fibre reinforced gypsum roof. *Energy and Buildings*, 228, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110424>
- Gwerder, M., Lehmann, B., Tödtli, J., Dorer, V., & Renggli, F. (2008). Control of thermally-activated building systems (TABS). *Applied Energy*, 85(7), 565–581. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.08.001>
- Hassan, M. A., & Abdelaziz, O. (2022). A novel adaptive predictive control strategy of hybrid radiant-air cooling systems operating in desert climates. *Applied Thermal Engineering*, 214, 118908. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118908>
- Hernández López, I. G., & Santana Sánchez, M. (2018). *Diseño de una mezcla de concreto empleando Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición (RCD) mejorada con aditivos sustentables*.
- Hernández-pérez, I. (2015). *Estudio de la transferencia de calor de cubiertas reflectivas (cool roofs) en techos de edificaciones bajo condiciones climáticas de la República Mexicana*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Gilbert, H., Xamán, J., Chávez, Y., & Shah, B. (2014). Thermal Performance of a Concrete Cool Roof under Different Climatic

- Conditions of Mexico. *Energy Procedia*, 57, 1753–1762. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.164>
- Hu, R., Li, X., Liang, J., Wang, H., & Liu, G. (2022). Field study on cooling performance of a heat recovery ground source heat pump system coupled with thermally activated building systems (TABSS). *Energy Conversion and Management*, 262, 115678. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115678>
- Hu, Z., Luo, B., He, W., Hu, D., Ji, J., & Ma, J. (2018). Performance study of a dual-function roof solar collector for Chinese traditional buildings application. *Applied Thermal Engineering*, 128, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.019>
- Ibrahim, M., Wurtz, E., Anger, J., & Ibrahim, O. (2017). Experimental and numerical study on a novel low temperature façade solar thermal collector to decrease the heating demands: A south-north pipe-embedded closed-water-loop system. *Solar Energy*, 147, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.036>
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (J. & S. Wiley, Ed.; seventh).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Viviendas 2020*. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/vivienda.aspx?tema=P>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). *Mapas. Climatología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia>
- Juanicó, L. (2008). A new design of roof-integrated water solar collector for domestic heating and cooling. *Solar Energy*, 82(6), 481–492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.12.007>
- Leo Samuel, D. G., Nagendra, S. M. S., & Maiya, M. P. (2018). Parametric analysis on the thermal comfort of a cooling tower based thermally activated building system in tropical climate – An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 138(April), 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.077>
- Leo Samuel, D. G., Shiva Nagendra, S. M., & Maiya, M. P. (2019). A sensitivity analysis of the design parameters for thermal comfort of thermally activated

- building system. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 44(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-1033-5>
- Lind, J., Möllerström, E., Averfalk, H., & Ottermo, F. (2023). Energy flexibility using the thermal mass of residential buildings. In *Energy and Buildings* (Vol. 301). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113698>
- Mataix, C. (2004). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Marcombo.
- Michalak, P. (2025). Experimental Study on Heat Transfer Coefficients in an Office Room with a Radiant Ceiling During Low Heating Loads. *Energies*, 18(7), 1591. <https://doi.org/10.3390/en18071591>
- Moussa, R. R., Jestenieh, N. M., & Ismaeel, W. S. E. (2025). *Using Thermally Activated Building Systems for indoor thermal comfort in hot arid regions*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6930589/v1>
- Nageler, P., Schweiger, G., Pichler, M., Brandl, D., Mach, T., Heimrath, R., Schranzhofer, H., & Hochenauer, C. (2018). Validation of dynamic building energy simulation tools based on a real test-box with thermally activated building systems (TABS). *Energy and Buildings*, 168, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.025>
- National Fenestration Rating Council. (2020). *NFRC 201-2020-Procedure for Interim Standard Test Method for Measuring the Solar Heat Gain Coefficient of Fenestration Systems Using Calorimetry Hot Box Methods*.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004, Industria de La Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba, Diario Oficial de la Federación. (2004).
- Norma M·MMP·2·02·058/04, Resistencia a La Compresión Simple de Cilindros de Concreto, MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales 1 (2004). <https://normas.imt.mx/>
- Norma M·MMP·2·02·056/06, Revenimiento Del Concreto Fresco, 16 MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales 4 (2006). <https://normas.imt.mx/>
- NORMA Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolverte de Edificios No Residenciales, 91 Diario Oficial de la Federación 160 (2012). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, “Eficiencia Energética En Edificaciones - Envoltante de Edificios Para Uso Habitacional,” Diario Oficial de la Federación (2011).  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM\\_020\\_ENER\\_2011.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf)
- Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, 96-BIS Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017).  
[https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/83/\\_N\\_C/ONC/83\\_N\\_CONCRETO.pdf](https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/83/_N_C/ONC/83_N_CONCRETO.pdf)
- Ogata, Katsuhiko. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Pearson.
- Preßmair, G., Amann, W., Stipsits, A., Schoisengeier, S., & Wenig, F. (2024). Thermally Activated Building Structures as Flexibility Option for the Electricity Market. *International Sustainable Energy Conference - Proceedings*, 1. <https://doi.org/10.52825/isecon.v1i.1132>
- Rakesh, C., Vivek, T., & Balaji, K. (2023a). Experimental investigation on cooling surface heat transfer behavior of a thermally activated building system in warm and humid zones. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103254. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103254>
- Rakesh, C., Vivek, T., & Balaji, K. (2023b). Experimental investigation on cooling surface heat transfer behavior of a thermally activated building system in warm and humid zones. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103254. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103254>
- Rey Martínez, F. J., Chicote, M. A., Villanueva Peñalver, A., Tejero González, A., & Velasco Gómez, E. V. (2015). Indoor air quality and thermal comfort evaluation in a spanish modern low-energy office with thermally activated building systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(8), 1091–1099. <https://doi.org/10.1080/23744731.2015.1056655>
- Romaní, J., Cabeza, L. F., Pérez, G., Pisello, A. L., & de Gracia, A. (2018). Experimental testing of cooling internal loads with a radiant wall. *Renewable Energy*, 116, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.051>

- Romaní, J., De Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2016). Simulation and control of thermally activated building systems (TABS). In *Energy and Buildings* (Vol. 127, pp. 22–42). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.057>
- Rudoy, W., & Cuba, J. F. (1979). *Cooling and Heating Load Calculation Manual* (ASHRAE, Ed.; Vol. 158).
- Schmelas, M., Feldmann, T., & Bollin, E. (2015). Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm. *Energy and Buildings*, 103, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.012>
- Secretaría de Desarrollo Agrario, T. y U., & Comisión Nacional de Vivienda. (2019). *Criterios técnicos de una vivienda adecuada*. [www.sedatu.gob.mx](http://www.sedatu.gob.mx)[www.conavi.gob.mx](http://www.conavi.gob.mx)
- Shi, S., Merabtine, A., & Bennacer, R. (2024). Radiant systems and solar-driven overheating: A comprehensive literature analysis over a decade. *Building and Environment*, 259, 111659. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2024.111659>
- Su, L., Li, N., Zhang, X., Sun, Y., & Qian, J. (2015). Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant cooling panel. *Applied Thermal Engineering*, 84, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.045>
- Tong, S., Li, H., Zingre, K. T., Wan, M. P., Chang, V. W. C., Wong, S. K., Toh, W. B. T., & 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>
- United Nations Environment Programme (2022). (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. [www.globalabc.org](http://www.globalabc.org).
- US Department of Energy. (2022a). *Documentation Engineering Reference*.
- US Department of Energy. (2022b). *Documentation Input Output Reference*.
- Venko, S., Pavlovič, E., Vidrih, B., Arkar, C., & Medved, S. (2015). An experimental study of mixed convection over various thermal activation lengths of vertical TABS. *Energy and Buildings*, 98, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.036>

- Wu, Y., Zhao, H., Sun, H., Duan, M., Lin, B., & Wu, S. (2022). A review of the application of radiative sky cooling in buildings: Challenges and optimization. *Energy Conversion and Management*, 265, 115768. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115768>
- Xamán, J., Mejía, G., Álvarez, G., & Chávez, Y. (2010). Analysis on the heat transfer in a square cavity with a semitransparent wall: Effect of the roof materials. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(10), 1920–1932. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.05.023>
- Yang, X., Liu, D., Tian, Z., Deng, N., Wang, R., Jiang, Y., Tang, R., & Zong, Y. (2024). Comparison of different control methods on the thermally activated building system (TABS) with large energy flexibility. *Applied Thermal Engineering*, 254, 123863. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.123863>
- Yew, M. C., Ramli Sulong, N. H., Chong, W. T., Poh, S. C., Ang, B. C., & Tan, K. H. (2013). Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction. *Energy Conversion and Management*, 75, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.024>
- Yu, G., Du, C., Chen, H., & Xiong, L. (2019). A dynamic model based on response factor method and seasonal performance analysis for integration of flat plate solar collector with building envelope. *Applied Thermal Engineering*, 150(December 2018), 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.159>
- Yu, J., Leng, K., Ye, H., Xu, X., Luo, Y., Wang, J., Yang, X., Yang, Q., & Gang, W. (2020). Study on thermal insulation characteristics and optimized design of pipe-embedded ventilation roof with outer-layer shape-stabilized PCM in different climate zones. *Renewable Energy*, 147, 1609–1622.
- Zhang, C., Heiselberg, P. K., Pomianowski, M., Yu, T., & Jensen, R. L. (2015). Experimental study of diffuse ceiling ventilation coupled with a thermally activated building construction in an office room. *Energy and Buildings*, 105, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.048>
- Zhang, X., Li, N., Su, L., Sun, Y., & Qian, J. (2016a). Experimental study on the characteristics of non-steady state radiation heat transfer in the room with

concrete ceiling radiant cooling panels. *Building and Environment*, 96, 157–169.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.006>

Zhang, X., Li, N., Su, L., Sun, Y., & Qian, J. (2016b). Experimental study on the characteristics of non-steady state radiation heat transfer in the room with concrete ceiling radiant cooling panels. *Building and Environment*, 96, 157–169.

Zhu, Q., Li, A., Xie, J., Li, W., & Xu, X. (2016). Experimental validation of a semi-dynamic simplified model of active pipe-embedded building envelope. *International Journal of Thermal Sciences*, 108, 70–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.004>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

# Anexo A

Artículo JCR

A review of thermally activated building systems (TABS) as an alternative for improving the indoor environment of buildings



Review

## A Review of Thermally Activated Building Systems (TABS) as an Alternative for Improving the Indoor Environment of Buildings

María M. Villar-Ramos <sup>1</sup>, Iván Hernández-Pérez <sup>2,\*</sup>, Karla M. Aguilar-Castro <sup>2</sup>, Ivett Zavala-Guillén <sup>3</sup>, Edgar V. Macías-Melo <sup>3</sup>, Irving Hernández-López <sup>4</sup> and Juan Serrano-Arellano <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Doctorado en Ciencias en Ingeniería, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán 86690, Tabasco, Mexico

<sup>2</sup> División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán 86690, Tabasco, Mexico

<sup>3</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, Baja California, Mexico

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora (UNISON), Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, Hermosillo 83000, Sonora, Mexico

<sup>5</sup> División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/IT de Pachuca, Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto 42080, Hidalgo, Mexico

\* Correspondence: ivan.hernandezp@ujat.mx



**Citation:** Villar-Ramos, M.M.; Hernández-Pérez, I.; Aguilar-Castro, K.M.; Zavala-Guillén, I.; Macías-Melo, E.V.; Hernández-López, I.; Serrano-Arellano, J.A. Review of Thermally Activated Building Systems (TABS) as an Alternative for Improving the Indoor Environment of Buildings. *Energies* 2022, 15, 6179. <https://doi.org/10.3390/en15176179>

Academic Editors: Shi-Jie Cao and Wei Feng

Received: 31 July 2022

Accepted: 21 August 2022

Published: 25 August 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** Among the alternatives for improving the thermal comfort conditions inside buildings are the thermally activated building systems (TABS). They are embedded in different building components to improve the indoor air temperature. In this work, a review and analysis of the state of the art of TABS was carried out to identify their potential to improve thermal comfort conditions and provide energy savings. Furthermore, this study presents the gaps identified in the literature so that researchers can develop future studies on TABS. The articles found were classified and analyzed in four sections, considering their implementation in roofs, walls, floors, and the whole envelope. In addition, aspects related to the configuration of the TABS and the fluid (speed, temperature, and mass flow rate) were analyzed. It was found that when TABS are implemented in roofs, walls, and floors, a reduction in the indoor temperature of a building of up to 14.4 °C can be obtained. Within the limitations of the TABS, the complexity and costs of their implementation compared to the use of air conditioning systems are reported. However, the TABS can provide energy savings of up to 50%.

**Keywords:** thermally activated building systems; thermal comfort; thermal mass; energy savings; radiant envelope; heat exchanger pipes

### 1. Introduction

According to experts from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change has impacted all countries [1]. The level of electricity consumption for thermal comfort has increased dramatically due to population growth. Moreover, in the last decade, significant changes in many meteorological phenomena and weather conditions have occurred in the world. It is estimated that the amount of energy consumed by the residential and construction sector in 2018 was 36%, of which 39% of the energy was related to CO<sub>2</sub> emissions worldwide [2].

A building is a construction or an enclosure made of different materials destined to be inhabited or destined to be used for conducting other activities. It is well known that most of the heat gains of the building envelope occur due to the received solar irradiance, the heat exchange with the outdoor environment, and its geometry and orientation. These heat gains or losses of the building envelope usually cause the inhabitants to use an air conditioning

system to achieve thermal comfort. The scientific community has begun to search for and analyze construction alternatives that can reduce or increase thermal loads in buildings and reduce global electricity consumption through renewable energy [3,4]. Several construction alternatives to improve the indoor environment of a building are available, such as earth-to-air heat exchangers [5–7], ventilated roofs [8–10], reflective materials [11–13], passive design strategies [14–16], and thermally activated building systems (TABS) [17–19], among others. These design strategies also contribute to the proposal of intervention alternatives for the rehabilitation of spaces, considering the occupants, thermal adaptation, and energy use [14].

TABS can reduce heat gains or losses because of the heat exchange from embedded pipes installed in different building components. These pipes exchange heat directly with the thermal mass of the building and improve the temperature of the indoor environment [20]. Inside the pipes, water or air is generally circulated; these pipes are embedded in roofs, floors, or walls, depending on factors such as the climatic zone, orientation, and construction materials, among others. TABS are used to decrease or increase the temperature in the indoor space of an enclosure. The integration of the system with the construction structure allows the use of solar energy to be included, since the working fluid can be reused for other applications, helping to reduce pollution from greenhouse gases. According to the literature, the cost of implementing TABS is higher than traditional HVAC systems. However, the energy saving provided by TABS is 25% higher compared to the lifetime of a traditional air conditioning system. Using water as the working fluid in TABS increases energy savings because water can transport energy 3500 times more effectively than air. Among the advantages of using TABS over HVAC systems are: high indoor air quality, greater energy efficiency and smaller size, and low maintenance costs [21]. Although thermally activated systems have been studied, analysis of the envelope is required to obtain a better performance [22].

Various authors have analyzed the application of TABS, which have been referred to with different names depending on the application and the location in the building envelope. The literature is not consistent in labeling TABS. Table 1 summarizes the different names used for TABS.

Table 1. Other names used for TABS and their applications.

Name	Location	Mode
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hollow core slab</li> <li>• Embedded tubes with hot/cold fluids</li> <li>• Slab cooling/heating system</li> <li>• Floor heating system</li> <li>• In slab heating floor</li> <li>• Radiant floor</li> <li>• Concrete core</li> <li>• Pipe-embedded envelope</li> <li>• Radiant slab cooling</li> <li>• Concrete core cooling slab</li> <li>• Thermally activated building constructions</li> <li>• Active building storage systems</li> <li>• Embedded hydronic pipe systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Floor</li> <li>• Roof</li> <li>• Wall</li> <li>• Whole envelope</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heating</li> <li>• Cooling</li> </ul>

TABS have been used for both heating and cooling and are located in different sections of a building envelope depending on their application. Previous review articles on TABS are available and discuss several aspects related to the thermal behavior of this technology. For instance, Rhee and Kim [23] analyzed the basic and applied literature on radiant heating and cooling systems embedded in the building envelope. The authors analyzed the main uses of radiant systems and thermal comfort, their cooling/heating capacity, obtained from different approaches such as computational fluid dynamics (CFD) analysis, energy simulation, system configuration, and control strategies for use at other times of

the day. In the literature, TABS have also been analyzed according to their application, design, topology, and control strategies. Romani et al. [24] analyzed TABS based on their application's simulation and control strategies. The authors studied the system's generalities and design and classified the TABS by mode of operation, position, and working fluid. Romani et al. classified the TABS as radiant floor, radiant ceiling, hollow core slab, concrete core, and pipe-embedded envelope. Ma et al. [25] conducted a review of the state of the art of energy storage and dissipation in TABS. The authors focused on the extraction of energy from the indoor environment of buildings and how it can be reused in other systems. The authors concluded that by applying TABS correctly, an improvement in energy efficiency can be obtained. The possibilities and limitations of using TABS on walls were analyzed, such as in a work published by Krajčik and Šikula [26]. The authors examined the use of TABS and compared four types of wall cooling system. Krajčik et al. [27] carried out a review on TABS embedded in walls and their use as thermal barriers, with a focus on the reduction in thermal loads. The authors selected only systems with pipes embedded in the wall for heating and cooling. Krajčik et al. classified the wall system and the thermal barriers by their function, the configuration of material layers, and the location of the pipes. On the other hand, the analysis of TABS has also been considered in works incorporating insulation materials, such as phase change materials, as studied by Cai et al. [28], which contribute to improving the indoor environment and storing energy.

A bibliometric analysis was performed in order to explore the existing status of the literature on TABS. Figure 1 shows a visual map where some aspects of the selected articles were analyzed. To search for the term "Thermally Activated Building System", the Scopus database was used by prioritizing the publication period from 2015 to 2022. To input the collected results, the open-source software VOSviewer, was used. It was found that the most cited topics in the literature related to the term were: (1) thermally activated, (2) cooling systems, (3) energy efficiency, (4) heat storage, and (5) thermal comfort. Figure 2 shows the countries of origin where the most articles about TABS have been published for the last seven years. TABS are being researched extensively in China, the United States, Germany, Spain, Belgium, and India, among others.

The present study aims to explore the state of the art of TABS in buildings and to present information that would help researchers to develop new practices, technologies, and research directions. The reviewed and analyzed articles were obtained mainly from databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar by prioritizing the publication period from 2015 to 2022. Within the criteria for selecting the articles, only articles in which the heat exchanger tubes were embedded in a building envelope component (either roof, wall, or floor), or even in the whole building envelope, were considered. This work is divided into four sections, with the main findings highlighted when TABS are installed on roofs, walls, floors, and the whole building envelope. In each section, a summary table describes the applications of TABS in the building envelope, the type of climate studied, the mode of operation, the TABS features, and the simulation methods.

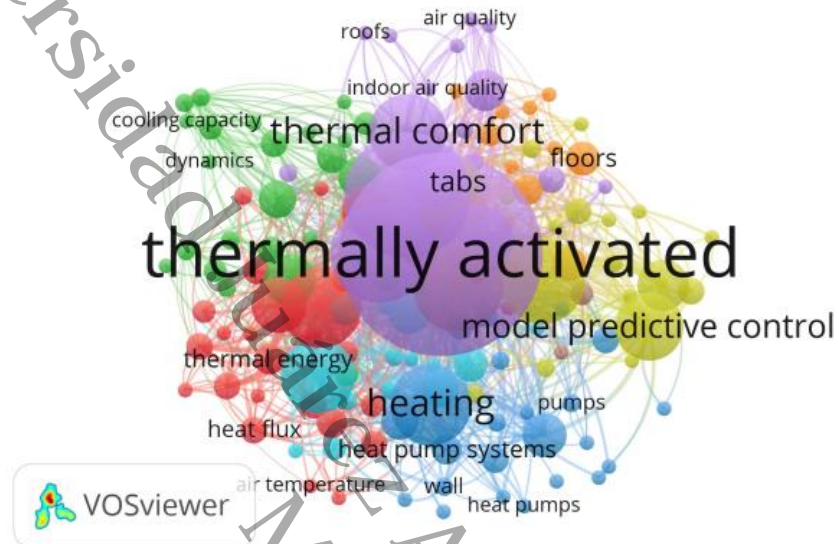


Figure 1. Network of keywords relating to thermally activated building systems.

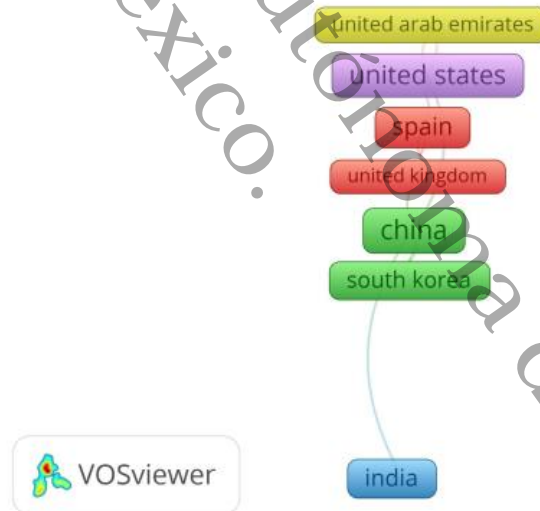


Figure 2. Network of the origins of papers about thermally activated building systems.

## 2. TABS Embedded in Building Roofs

Building roofs are usually the building components with the most significant temperature fluctuations, and they receive solar energy for more hours than any other component. Thus, in zones with a warm climate, building roofs are sources of unwanted heat that affect

indoor thermal comfort conditions. This section focuses on the research works related to TABS integrated into building roofs. The improvements in thermal comfort, combinations with other technologies, and the energy savings provided by this technology are given in this section.





### 2.1. Potential of TABS to Improve Thermal Comfort When Installed in Roofs

The thermal comfort conditions inside buildings depend on variables such as air relative humidity, air temperature, and air speed, among others [29,30]. Several studies were conducted to determine the influence of roofs with TABS on the indoor air temperature of buildings, which can be considered as a method of assessing the thermal comfort improvements provided by TABS.

One of the first studies was that presented by Gwerder et al. [31], who proposed a control algorithm for TABS to comply with comfort requirements. The proposed method incorporates the change between the heating and cooling modes of the TABS to satisfy thermal comfort. The algorithm was tested in a simulation example. The hourly temperature analysis demonstrated that the TABS maintained the indoor air temperature between 21 and 27 °C for the whole year. Another control strategy for TABS in which the operating mode (heating or cooling) is determined by the average indoor air temperature was reported by Wit and Wisse [32]. They analyzed the thermal behavior of TABS with different hydronic typologies integrated into the roof of two office buildings. After several experimental tests, the results demonstrated that TABS could maintain the comfort conditions of the two buildings because most of the measured indoor air temperatures fell within the 80–90% satisfaction zones during the testing period. In another study of a roof integrated with TABS, Rey Martínez et al. [33] analyzed the indoor air quality and thermal comfort of a building. The building had four floors, TABS powered by a water chiller, and a cooling tower. The authors found that the operating temperature remained between 23 and 25 °C and the CO<sub>2</sub> levels at 850 ppm during occupancy. A simulation study of a building incorporated with TABS in the roof is described in Chung et al. [34]. EnergyPlus simulation software was used to apply different control strategies in each area of the case study building. The authors varied the water supply temperature from 19 to 25 °C in the interior zone and the perimeter for heating and cooling, grouping the tests into three case studies. Chung et al. concluded that by separating the proposed building into zones with different control strategies according to each floor's needs, the thermal comfort improved by 5%. The experimental study presented by Dharmasastha et al. [35] analyzed the thermal behavior of a hybrid system integrated with a TABS coupled to a gypsum roof reinforced with fiberglass (TAGFRG). They built a test chamber with copper tubes of 0.01 m internal diameter embedded in the roof under hot and humid conditions in Chennai, India. The authors found that the TABS decreased up to 5.1 °C in the roof interior surface temperature and 6.7 °C in the indoor air of the test chamber. Saw et al. [36] studied the thermal behavior of a roof cooling system with a closed-loop pulsating heat pipe (CLPHP) and compared it with a bare metal roof system design. The authors proposed a rooftop CLPHP as an active cooling system for a tropical climate. This system consisted of a closed circuit of copper pipe, placed between two aluminum plates under a sheet roof and insulated on the lower surface. Methanol was used as a working fluid in the copper pipe circuit. They simulated solar radiation using two halogen lamps. Saw et al. found that a cool roof system with CLPHP reduced the indoor air temperature of the test cabin from 34 °C to 29.6 °C compared to the bare metal roof system.

Table 2 summarizes the studies presented in this section. The authors determined the influence of TABS installed in building roofs on thermal comfort by analyzing the indoor air temperature, satisfaction zone compliance, and comfort improvement percentage. The influence of TABS installed in roofs appears to be beneficial for increasing the thermal comfort in buildings.

Table 2. Improvements in thermal comfort of buildings with TABS embedded in roofs.

Reference	Weather	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[31]	-	H, C	F = Water, DBP = 0.2 m, $\phi$ = 0.015 m		The thermal comfort can be maintained between 21 and 27 °C if TABS are used with intermittent operation.
[32]	Temperate	H, C	F = Water	-	TABS maintained the indoor air temperature within 80–90% of comfort satisfaction zone.
[33]	-	C	F = Water	-	TABS maintained the indoor air temperature in a range between 23 and 25 °C.
[34]	-	H, C	F = Water		A control strategy by zones improves the thermal comfort by 5% with the TABS installed in the roof.
[35]	Warm and humid	C	F = Water, DBP = 0.054 m, $\phi$ = 0.01 m		TABS decreased the indoor air temperature of the test chamber by up to 6.7 °C.
[36]	Tropical	C	F = Methanol, $\phi$ = 0.00635 m		A CLPHP coupled to a metal roof reduced the indoor air temperature by up to 13% compared with the bare metal roof system.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes, and  $\phi$  = diameter of the pipes.

## 2.2. Combination of TABS with Other Technologies for Roofs

Several research works analyzed the combination of TABS with other technologies to improve the indoor temperature of buildings. In the reported studies, TABS was combined with solar collectors, ground heat exchangers, and materials that favor energy storage. Wu et al. [37] developed a numerical model to analyze the behavior of a combined heating system formed by solar air collectors connected to a TABS with intermittent operation. The authors observed that the solar air collector inlet temperature ranged from 17 to 24 °C, while the air collector outlet temperature ranged from 35 to 62 °C, with an average efficiency of 47.1%. They concluded that with the proposed system an acceptable thermal comfort temperature could be maintained inside the building ranging from 17 to 24 °C. In a recent study, Chung et al. [38] simulated the behavior of a coupled system (TABS + ground heat exchanger) considering 28 climatic conditions and varying the burial depth of the ground heat exchanger. The authors found that the coupled system removed the peak thermal loads by up to 75%, while a chiller cooling system removed it by 32%. They also found that in this coupled system, the climatic conditions caused variations in the load-handled ratio, obtaining better results in warm humid climates when the depth of the ground heat exchanger was buried at 2 m.

Other authors studied the combination of TABS with phase change material (PCM). A study of roofs with PCM and TABS is also available. Yu et al. [39] studied a roof with embedded tubes through which air circulated. They validated and compared through a CFD numerical simulation the thermal properties of the system with a PCM as insulation. The authors proposed a concrete roof with a thickness of 0.19 m and a layer of 0.03 m of paraffin as the PCM. The results show that the optimum phase transition temperature increases linearly by approximately 2 °C when the average temperature of the outdoor air rises. Compared to a roof without PCM, they found that the interior surface temperature decreases by between 3.7 and 4.0 °C in different regions of China. In a more recent study, the same authors [40] proposed a ventilated roof model with embedded pipes and a stabilized layer of PCM (VRSP). The authors developed a steady-state three-dimensional heat transfer model of the VRSP system in ANSYS FLUENT. The convective heat transfer

coefficient on the interior surface of the roof was  $8.72 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  and  $23.26 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  on the exterior surface, and the indoor air temperature was set at  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . The effect of the phase transition temperature, the thickness of the PCM layer, and the airflow rate in the tubes was studied. The researchers found that the optimal design of the roof had a phase transition temperature of  $29\text{--}31 \text{ }^\circ\text{C}$ , a thickness of the PCM layer of  $0.02\text{--}0.35 \text{ m}$ , and an airflow rate of  $1.4\text{--}2.5 \text{ m s}^{-1}$ . It was shown that the optimum design reduced the average temperatures of the interior surface by a factor ranging between  $0.4$  and  $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$  compared to the non-ventilated roof. Moreover, the daily heat gain of the roof was reduced by a factor ranging between  $9$  and  $82\%$ . In a recent study, Heidenthaler et al. [41] performed a comparative analysis of TABS embedded in concrete and wooden roof slabs. The authors used the finite element analysis (FEA) simulation software HTflux. They analyzed four basic variants of fir and beech wood, of which they obtained five additional combinations. They also varied the depth at which the tubes were embedded ( $0.03$  and  $0.06 \text{ m}$ ). The authors concluded that by using wood in TABS, adequate heat flux densities can be achieved for heating in low-energy buildings, supplying the fluid at higher temperatures compared to concrete structures. The authors found that the basic combination of beech (radial/tangential) with  $6 \text{ cm}$  embedded pipes has a potential energy storage capacity  $53\%$  greater than a concrete structure. Other authors that analyzed the behavior of a roof TABS coupled with a ground source heat pump (GSHP) were Hu et al. [42]. The authors carried out an energetic and exergetic analysis of a building for summer and winter. The authors found that adding a cooling tower improves system performance with an efficiency of up to  $16\%$ , maintaining the indoor ambient temperature within the range of  $18\text{--}26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Table 3 summarizes the studies presented in this section. The coupling of TABS with other technologies such as solar collectors or ground heat exchangers is expected to increase the cooling or heating effect that TABS provides. Such a combination of technologies demonstrates that TABS can be integrated into renewable energy sources and will help to reduce the emission of greenhouse gases. Moreover, as mentioned above, the combination of TABS with other technologies such as PCM increases the thermal mass of the building roofs, which enhances the peak indoor air temperature reduction.

**Table 3.** Studies that analyzed the combination of TABS with other roof technologies.

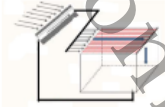
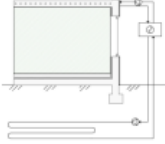
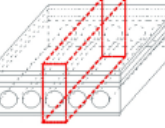
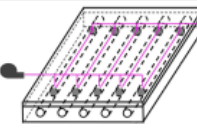
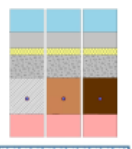

Reference	Weather	Mode *	TABS Features *	Model	Combination
[37]	Cold region	H	$F = \text{Air}$ , $\text{DBP} = 0.12 \text{ m}$ , $\phi = 0.04 \text{ m}$ , $v = 2 \text{ m s}^{-1}$		Solar air collector and TABS
[38]	Equatorial, arid, warm temperature, snow, polar	H, C	-		Horizontal ground heat exchanger and TABS
[39]	Cool, winter, hot summer, mild regions	-	$F = \text{Air}$ , $\text{DBP} = 0.024 \text{ m}$ , $\phi = 0.08 \text{ m}$		PCM and TABS

Table 3. Cont.


Reference	Weather	Mode *	TABS Features *	Model	Combination
[40]	-	-	F = Air, DBP = 0.024 m, $\phi = 0.08$ m		PCM and TABS
[41]	-	H	F = Water, DBP = 0.15 m, $\phi = 0.016$ m		Wood and TABS
[42]	Cold winter	H, C	F = Water		GSHP with TABS.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes, and  $v$  = fluid velocity.

2.3. Potential of TABS to Reduce the Energy Consumption When Installed in Roofs

The reduction in the energy consumption of air-conditioned buildings due to the incorporation of TABS in building roofs was analyzed in two research works. In the first work, Lehmann et al. [43] investigated the functionality and application range of a TABS by simulating a typical office in TRNSYS. The authors analyzed thermal comfort aspects, maximum allowable heat gains in the room, and the re-cooling of the building mass. They studied a building that was 6 m long, 5 m wide, and 3 m high facing west. This room had pipes of 0.020 m internal diameter embedded in a 0.3 m-thick concrete roof slab and a 0.25 m separation between pipes. It was found that the maximum allowable total heat gains were  $39 \text{ W m}^{-2}$  with carpet in the room and  $32 \text{ W m}^{-2}$  with a false floor, with a room temperature between 21 and 24 °C. Furthermore, the authors found that the TABS reduced the energy consumption for cooling by 50% compared to the base case. The second study is a simulation study mentioned in Section 2.1. Chung et al. [34] also estimated the influence of the TABS installed on the roof on the thermal loads of the building prototype. They found that compared to the reference case, the heating load was reduced by 10%, the cooling load was reduced by 36%, and the total energy consumption decreased by 13% due to the TABS. Table 4 summarizes the studies presented in this section, where the authors demonstrated the potential of TABS for reducing energy consumption and reducing heating and cooling loads.

Table 4. Reductions in energy consumption provided by TABS embedded in building roofs.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[34]	H, C	F = Water		The heating load was reduced by 10%, the cooling load was reduced 36%, and total energy consumption decreased by 13% with the TABS.
[43]	C	F = Water, DBP = 0.25 m, $\phi = 0.020$ m, $\dot{m} = 13 \text{ kg h}^{-1}$	-	The TABS reduced the energy consumption by 50% in cooling mode.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes, and  $\dot{m}$  = mass flow rate.

### 3. TABS Embedded in Building Walls



The walls of a building are another type of building envelope component that exchange energy with the outdoor environment because of their significant surface area. Several studies about TABS on building walls have been carried out. TABS embedded in walls is a potential solution to improve their thermal behavior by increasing or decreasing heat losses and saving energy. The aim of this section is to introduce the simulation methods to predict the behavior of TABS, the most suitable configuration, and other techniques to improve the design and construction of TABS.

#### 3.1. Influence of the Flow Characteristics on the Thermal Behavior of TABS Embedded in Walls

Some authors have carried out experimental studies with TABS in walls, where they have varied the fluid parameters such as inlet temperature and fill ratio to analyze the thermal behavior of building walls with TABS. Zhu et al. [44] proposed a two-phase thermosyphon loop (TPTL) incorporated into a thermally activated wall and tested it under winter conditions. The authors carried out experimental tests using a test wall 1 m wide, 0.9 m, high, and 0.2 m thick with embedded tubes of 0.009 m internal diameter, using ethanol as a working fluid. The authors varied the fluid temperature from 25 to 65 °C and the fluid fill ratio from 60 to 144%. The authors found that the fill ratio between the volume of the working fluid and the evaporator volume has a critical impact on the thermal resistance and the starting behavior of the TPTL. They found that the optimal fill ratio is around 116%. A theoretical–experimental study of pipes embedded in a wall for analyzing the influence of pipe depth and spacing on the indoor temperature gradient was carried out by Romani et al. [45]. They installed an experimental prototype in Spain, which measured 2.85 × 1.85 × 1.95 m. The prototype walls were made of alveolar brick, with 0.016 m-diameter polyethylene tubes embedded 0.036 m from the interior surface and a 0.15 m separation between each pipe. The experimental results obtained by the authors show that the indoor temperature near the east, west, and south walls remains between 25 and 31 °C.

Table 5 summarizes the articles about wall-embedded TABS and the influence that the working fluid has on thermal behavior. As can be seen, TABS does not only use water as the working fluid.

**Table 5.** Influence of the flow on TABS embedded in walls.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[44]	H	F = Ethanol, DPB = 0.20 m, $\phi = 0.00822$ m		The system exchanges 25.5 W m <sup>-2</sup> with the internal surface of the wall
[45]	-	F = Water, DPB = 0.05–0.30, $\phi = 0.016$ m		The temperature difference between the inner and outer surface of the wall decreases by up to 20 °C

\* H = heating, F = fluid, DPB = distance between the pipes, and  $\phi$  = diameter of the pipes.

#### 3.2. Prediction of the Behavior of TABS Embedded in Walls

Some works have analyzed the thermal behavior of building walls with TABS by modeling the system. The authors have analyzed the system using different methods such as resistance–capacitance (RC), the number of transfer units (NTU), and finite difference (FD). Fluid parameters such as inlet temperature, inlet velocity, and mass flow rate were

analyzed. Some of these studies have been validated with experimental data, such as that of Todorović et al. [46]. The authors used the analytical expression of Faxen-Rydberg-Huber to determine the thermal characteristics of walls heated by embedded tubes. This expression was experimentally and theoretically verified using three heated wall panels with different structures and geometric characteristics. The panels operated in heating mode, the temperature of the water from feeding the pump was set at 40 °C, and the volumetric flow circulated at 2 L min<sup>-1</sup>. The authors compared measurements of the average surface temperature of the panels, using a test contact, thermistors, and a thermal imaging camera. The differences between the average temperatures of the panel surfaces were 1.8 to 4.5% when measured using a non-contact and contact method. The authors concluded that the difference between the analytically calculated average temperature and the experimental measurements is 13.7 and 8.6% by contact and non-contact methods, respectively. A model of the frequency-domain finite difference (FDFD) of the thermal behavior of a building wall construction was developed by Xie et al. [47]. The researchers built a test room to validate the model, being 5.6 m long, 3.3 m wide, and 2.8 m high, divided into two test chambers by a 0.31 m-wide wall. The experimental test had embedded polypropylene tubes of 0.02 m diameter placed with a separation of 0.2 m. The authors varied the water inlet temperature to 17.5, 19, and 20 °C, while the water inlet velocity was set at 0.5 m s<sup>-1</sup>. They found that by supplying the water in the tubes at 17.5 °C, a heat exchange with the wall internal surface of 25.5 W m<sup>-2</sup> could be obtained. The results show that the finite difference model could predict the behavior of construction with embedded pipes. The relative errors were 6.5% and 4.4% between the measurement and the prediction by the FDFD model for the external surface heat flux and the pipe-embedded building envelope internal pipe surface heat flux, respectively. In other research by the same group, Zhu et al. [48] developed a semi-dynamic thermal model of an active pipe-embedded building. The model consists of construction with embedded pipes in a 3 m-high and 2 m-wide wall. This model was coupled with a resistance and capacitance model (RC) that predicts heat transfer along the width of the structure and a number of transfer units model (NTU) to evaluate heat transfer in the pipes. To assess the behavior of the semi-dynamic model, they developed a CFD model in FORTRAN that functioned as an experimental virtual test for comparison. They tested and verified three case studies where the water inlet temperature was set at 20 °C, varying the water inlet velocity from 0.5 to 0.7 m s<sup>-1</sup> and the thermophysical properties of the wall; the pipe spacing was 0.02 m. The authors observed that the changes in the heat fluxes taken away by the water are not obvious with different velocities in the water. Meanwhile, an average difference of about 0.5 °C in the outlet temperature of the fluid was found throughout the day. The results demonstrate that the semi-dynamic model predicts the thermal behavior of a TABS with a relative error of 5%. Later, Zhu et al. [49] validated a simplified semi-dynamic model of a chamber with tubes embedded in the envelope. They built two chambers with a controlled environment to perform the validation, one with pipes embedded in the envelope and the other without embedded pipes as a reference. The walls of the chambers were made of alveolar brick, with a layer of cement mortar covering both surfaces of the walls, with polybutylene tubes of 0.020 m in diameter embedded in the layer of cement mortar. The water velocity was varied from 0.8 to 0.5 m s<sup>-1</sup>, and the water temperature from 18 to 19 °C. The authors concluded that the difference between the model and the experimental validation was minimal. The average relative error to predict the outlet water temperature was less than 0.10 °C, while the heat transferred to the water had a difference of 11%. Other authors that varied the flow rate with a numerical model were Ibrahim et al. [50], who analyzed the behavior of the surface temperatures and the fluid of a chamber with TABS in the walls through which water circulated. To compare the experimental results with the numerical model, they used two chambers: a reference sample, and the other as a test. The experimental chambers measured 2.25 × 1.6 × 1.2 m (length, width, and height), composed of concrete walls with a thickness of 0.12 m with a layer of 0.04 m aerogel plaster. The copper pipes were embedded in the aerogel plaster and placed in a serpentine shape, with a separation between pipes of 0.10 m. The authors used

a mixture of 60% water and 40% antifreeze as the working fluid, with a variable volumetric flow rate of 5.53–11.6 L h<sup>-1</sup> controlled by a pump in a closed circuit. The authors found that the performance of the wall with TABS is affected by the weather, the indoor temperature, the solar absorptivity of the envelope, and the mass flow rate. Qu et al. [51] investigated the relationship between the design and the operating parameters of a thermally activated wall system (TAW) using a mathematical model developed in COMSOL and validated with experimental data from a test chamber. The variables analyzed were the separation between each tube, the area of the thermally activated wall, the flow rate, and the inlet temperature of the water. The authors proposed optimal design graphics for a thermally activated wall system for China's climatic zones. The test chamber measured 2 m × 2 m × 2 m, and was thermally activated on the south wall with embedded tubes, where three separations between tubes (0.01, 0.02, and 0.03 m) were tested. The water flow circulating through the TAW had a velocity of 0.2 m s<sup>-1</sup>, and a heat pump supplied three different temperatures (15, 17 and 19 °C). The results indicate that the water inlet temperature and the indoor air temperature affected the heat transfer of the TAW. They found that the maximum inner wall surface temperature occurred for a separation between tubes of 0.02 m and a water velocity of 0.2 m s<sup>-1</sup>, and the maximum and minimum values reached 1.78 °C and 1.80 °C during the cooling and heating mode.

Other studies have analyzed the effect that the arrangement, the separation and the distance between the pipes have on the indoor temperature. Jiang et al. [52] investigated the influence of the velocity and the type of arrangement on the performance considering the changes in the water temperature. They compared two TABS arrangements in a numerical study: a serial pipe-embedded wall (SPW) and a wall with embedded tubes connected in parallel (PPW). The authors found that the inlet water temperature had a more significant effect on the interior temperature than the sol-air temperature. The authors observed that reducing the water temperature below 26 °C in summer and increasing the temperature above 18 °C in winter reduced the cooling and heating thermal loads. Romani et al. [45] made a numerical model of a radiant wall in 2D, validated with an experimental prototype. The radiant wall was simulated using the finite volume method (FVM). The parametric study showed that the separation and the depth at which the pipes are placed significantly influenced the walls thermal behavior. The authors obtained better performance when placing the pipes at a depth of 0.045 and 0.065 m and with a separation of 0.0125 and 0.0150 m because the heat fluxes and the temperature inside are minimized.

Table 6 summarizes the articles about models developed for TABS embedded in walls. Among the variables analyzed are the fluid supply velocity, the fluid inlet temperature, and the configuration of the pipes that supply the fluid. As can be seen, TABS are mostly used for heating and use water as the working fluid. Furthermore, TABS have different arrangements and configurations depending on the building construction methods.

Table 6. Models developed to predict the behavior of TABS.



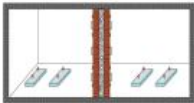
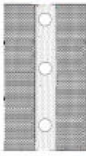
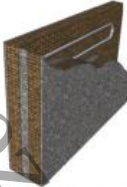



Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Simulation Method/Model	Simulation Tool
[45]	-	F = Water, DPB = 0.05–0.30, $\phi = 0.016$ m		FVM	-
[46]	H	F = Water, DBP = 0.07 and 0.10 m, $\phi = 0.016$ m and 0.0116 m, $\dot{V} = 2$ L h <sup>-1</sup> ,		Faxen-Rydberg-Huber	-

Table 6. Cont.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Simulation Method/Model	Simulation Tool
[47]	H, C	F = Water, DBP = 0.20 m, $\phi = 0.020$ m, $v = 0.5$ m s <sup>-1</sup>		DFD	FLUENT
[48]	-	F = Water, DBP = 0.20 m, $\phi = 0.02$ m, $v = 0.5-0.7$ m s <sup>-1</sup>		RC-NTU	Program written in FORTRAN Code
[49]	H, C	F = Water, DBP = 0.20 m, $\phi = 0.02$ m, $v = 0.8-0.5$ m s <sup>-1</sup>		RC-NTU	-
[50]	H	F = Water, antifreeze, DPB = 0.10 m, $\phi = 0.012$ m, $\dot{V} = 5.3-116$ L h <sup>-1</sup>		-	TRNSYS
[51]	H, C	F = Water, DPB = 0.10, 0.20, and 0.30 m, $\phi = 0.02$ m, $v = 0.2$ m s <sup>-1</sup>		FEM	COMSOL
[52]	H, C	F = Water, DPB = 0.08 m, $\phi = 0.008$ m, $v = 2.7$ m s <sup>-1</sup>		FVM	FLUENT

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes,  $\dot{V}$  = volumetric flow rate, and  $v$  = fluid velocity.




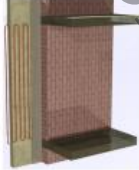
### 3.3. Heat Losses and Heat Dissipation of Walls Integrated with TABS

A building wall integrated with TABS can reduce the heat losses of buildings in winter. Ibrahim et al. [50] found that heat losses were reduced by between 9% and 35% in the Mediterranean climates when a wall with embedded pipes was used. On the other hand, a building wall integrated with TABS can dissipate heat more effectively than a conventional wall. Li and Zhang [53], analyzed the behavior of a wall implanted with heat pipes (WIHP). The authors compared the WIHP with a conventional wall in the summer months in Tianjin, China. The WIHP wall dimensions were 1.72 m long, 1.72 m wide, and 0.34 m thick, with 24 capillary tubes of 0.002 m in diameter and a length of 0.60 m. The authors concluded that the WIHP system had a greater heat dissipation effect in the summer. Its heat transfer capacity was 50.7 kW m<sup>-2</sup>, and the average temperature of the WIHP was 2 °C lower than the conventional wall. Other authors, such as Iffa et al. [54], included the use of an insulating material for energy storage and saving. The authors coupled an active insulation system with a TABS embedded in a wall. They analyzed the behavior of the system through simulation and experimental tests. It was found that if both

systems are coupled, a flux of up to  $81.92 \text{ W m}^{-2}$  can be transferred from the wall to the air. Thermal barriers were proposed by Krzaczek et al. [55] to maintain the changes in the internal energy of the walls at a level close to zero. They proposed a thermal barrier model in residential construction, which consisted of a system of tubes embedded in the walls to heat or cool a building, controlled by a fuzzy logic program. The pipes were supplied by water without antifreeze at  $25.3 \text{ }^\circ\text{C}$  for summer and  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$  for winter. The experimental test period was 17 months. They found that the control method through the thermal barrier system was efficient for maintaining a comfortable temperature inside, finding that the temperature variations in the exterior and interior wall of construction were less than  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Table 7 summarizes the studies presented in this section. These research works indicate that walls integrated with TABS allow heat gains to the indoor of buildings to be reduced. However, it is important to analyze the most suitable configurations to increase heat dissipation, because a reduction of  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  in the case of the study reported by Li and Zhang [53] could be considered low if the complexity of the installation of the TABS on the walls is considered.

**Table 7.** Heat losses and heat dissipation of TABS embedded in walls.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[50]	H	F = Water, antifreeze, DPB = 0.10 m, $\phi = 0.012 \text{ m}$ , $\dot{V} = 5.3\text{--}116 \text{ L h}^{-1}$		With the system proposed the heat losses were reduced from 35% to 9%.
[53]	C	$\phi = 0.0042 \text{ m}$		The system has a heat transfer capacity of $50.7 \text{ kW m}^{-2}$ . The temperature of the wall with TABS was $2 \text{ }^\circ\text{C}$ lower than a conventional wall.
[54]	H	F = Water, DPB = 0.076–0.152 m, $\phi = 0.019 \text{ m}$		The TABS reduced the temperature of the wall by $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .
[55]	H, C	F = Water, DPB = 0.20 m, $\phi = 0.025 \text{ m}$ ,		The control method through the thermal barrier system was able to maintain a comfortable temperature inside, with a temperature variation smaller than $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DPB = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes, and  $\dot{V}$  = volumetric flow rate.

### 3.4. TABS Walls and Other Techniques for Energy Saving

The TABS is studied for its capacity to improve buildings' indoor thermal comfort; some authors have proposed integrating new insulating materials and techniques to control the system. Comparing two TABS arrangements in a numerical study, Jiang et al. [52] found that the energy load reduction rate of a serial pipe-embedded wall (SPW) system is higher (25.2%) than that of a wall with embedded tubes connected in parallel (PPW) (8.7%). The influence of the TABS on heating energy consumption in a typical Serbian home was determined by Stojanović et al. [56]. The authors simulated a TABS in EnergyPlus. The TABS was fed with groundwater, where three supply temperatures were

used: 10, 14, and 18 °C. The authors concluded that when the TABS is used for heating, energy savings of up to 75% can be obtained with a supply temperature of 18 °C. Furthermore, they emphasized that all renewable sources can be used as an energy source for the TABS when it is used for heating. Guerrero et al. [57] proposed a new prefabricated panel for residential building facades. The authors proposed the integration of phase change materials (PCM) and concrete as structural elements. In this structure, water circulates through heat exchange pipes embedded in mortar cement, made of plastic material with an outer diameter of 0.01 m and a separation of 0.10 m between the pipes. The inlet water temperature and the distance between pipes were varied, from 30 to 45 °C and from 0.08 to 0.12 m, respectively. The authors concluded that the system design depends on the meteorological conditions; if it is designed for winter, a phase change temperature around 24 °C is required. If it is used for summer, the required phase change temperature is around 20 °C. The efficiency was reduced to 6% when the distance increased from 0.08 m to 0.12 m. On the other hand, the efficiency reached approximately 7% with the increasing inlet water temperature of 45 °C. Chen et al. [58] also proposed a thermo-activated PCM composite wall (TAPCW). The TAPCW consisted of placing an intermediate layer with tubes embedded in a macro-encapsulated PCM on the outer side. The authors used a validated numerical model to study the thermal and energy-saving performance of TAPCW under winter weather conditions in northern China. The authors analyzed different values for the spacing between each tube, the thickness of the PCM, and the orientation. The parametric study showed that the separation between pipes has a more significant influence on the system than the thickness of the PCM. They found that a separation between pipes of 0.01 m could be used for the thermal barrier function and a separation between tubes of 0.075 m for the heating function. The researchers also found that the TAPCW oriented to the north was more effective because it had an interior temperature increase of up to 1.8 °C and reduced energy consumption by 65%. Guerrero Delgado et al. [59] characterized and evaluated a panel designed for facades with an integrated TABS. As a first stage, the authors studied the behavior of the TABS through modeling in ANSYS FLUENT operated under different climatic zones. In the second stage, the authors integrated the TABS into a building using a simplified model to evaluate the energy demand and the system energy-saving potential. Guerrero Delgado et al. concluded that the proposed TABS is fully compatible with renewable energies, showing that energy savings of up to 40% for heating can be obtained. Kisilewicz et al. [60] present preliminary results of the thermal behavior of a thermally activated wall coupled with a ground heat exchanger. The authors compared an actively insulated wall against a reference wall under Hungarian climatic conditions. The thermally activated insulated wall construction consisted of a concrete layer on the outside, a layer of extruded polystyrene, tubes embedded in reinforced concrete, and an interior layer of extruded polystyrene. As working fluid in the embedded tubes, in summer, they used refrigerant at a lower temperature than that of the indoor air and a temperature higher than that of outdoor air in winter. The authors concluded that thermally activated insulation significantly improves the exterior wall's insulation parameters because, in the periods analyzed, they obtained a reduction in total energy loss through the external walls from 53 to 81%. To control the water supply temperature in the system, Qu et al. [61] proposed a model for the heat transfer of a TABS in walls under the climatic conditions of Beijing, China. The authors built a test chamber to validate the energy consumption and simulated indoor temperature in EnergyPlus. The test cabin had the following dimensions: 0.8 m long, 0.8 m wide, and 0.8 m high. It had embedded tubes of 0.02 m in diameter and separation between pipes of 0.05 m. The results indicate that pre-cooling a room overnight and reducing the water supply temperature can improve thermal comfort and reduce the unit capacity by over 35%. Kalús et al. [62] proposed the design of a thermally activated precast panel. The authors presented the development of a facade system, through calculations and a parametric study of the system for heating and cooling mode. They discovered that a number of variables, including pipe diameter, distance between the pipes, pipe dimensions, mean heat transfer medium temperature, and the heat storage

capacity of building structures, affect the thermal and cooling performance of thermal insulation panels.

Table 8 shows the main works on thermally activated walls. These studies analyzed the behavior of TABS by changing parameters such as fluid velocity, temperature, and the location of the pipes, among others. These changes resulted in energy savings from 40 to 75%. Furthermore, by adding a layer of PCM to the TABS wall system, it is possible to obtain up to 65% energy savings.

**Table 8.** Energy savings of TABS embedded in walls and other techniques.

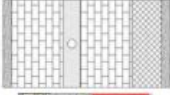
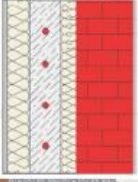

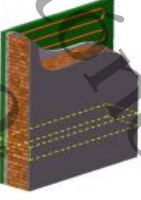



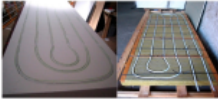
Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[52]	H, C	F = Water, DPB = 0.08 m, $\phi = 0.008$ m, $v = 2.7$ m s <sup>-1</sup>		A serial pipe-embedded wall reduced energy load rate by 25.2% while a wall with embedded tubes connected in parallel reduced it by 8.7%.
[56]	H	F = Water		When the TABS is adapted for heating a home, it can provide energy savings of up to 75%.
[57]	H	F = Water, DPB = 0.08, 0.10, 0.12 m, $\phi = 0.01$ m, $v = 2.7$ m s <sup>-1</sup>		The efficiency of the TABS increases by up to 7% when the inlet temperature increases, and when increasing the distance between the pipes it decreases by up to 6%.
[58]	H	F = Water, DPB = 0.15 m, $\phi = 0.02$ m		The thermo-activated PCM composite wall increased the indoor temperature and reduced energy consumption by 65%.
[59]	H	F = Water, DPB = 0.10 m, $\phi = 0.01$ m, $v = 1-2$ m s <sup>-1</sup>		The TABS provided energy savings of up to 40% in heating mode.
[60]	H, C	F = Refrigerant, Water, DPB = 0.2 m, $\phi = 0.02$ m		TABS improves the exterior wall's insulation parameters because it causes a reduction in total energy loss from 53 to 81%.

Table 8. Cont.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[61]	H, C	F = Water, DPB = 0.15 m, $\phi = 0.014$ m		The proposed system reduced the discomfort rate by over 35%.
[62]	H, C	-		The proposed panel application is most suitable for buildings made with materials with good thermal conductivity and heat accumulation.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DPB = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes, and  $v$  = fluid velocity.

#### 4. TABS Embedded in Floor

This section focuses on TABS installed in the floor, their configurations, and materials used to improve the thermal comfort of the buildings.

##### 4.1. Strategies for Improving the Behavior of TABS Embedded in Floors

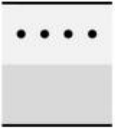
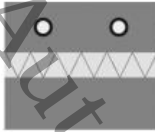

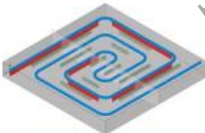

Some authors have chosen to analyze floor TABS by simulating their behavior to improve thermal comfort [63]. Joe and Karava [64] developed a model predictive control (MPC) to optimize its behavior, reduce energy consumption and costs, and increase thermal comfort. The authors compared simulated and experimental data from three buildings in heating and cooling mode: (1) with a hydronic radiant floor system, (2) with a wall diffuser, and (3) with a roof diffuser. The authors found that significant energy and cost reductions were achieved compared to a traditional HVAC system. The cost savings were close to 34%, and the energy savings were 16%. Meanwhile, the building with the radiant floor system obtained energy savings of 50% and 29% compared to buildings 2 and 3. In the case of Feng et al. [65], they analyzed the impact of solar radiation on floor cooling in order to find the cooling load of the proposed system. The authors modeled the system in Energy Plus with a total of 864 simulations. The authors found the floor cooling capacity to be 35.6–44.0 W m<sup>-2</sup> at an operating temperature of 24 °C. Yang et al. [66] analyzed the behavior of a radiant floor heating system embedded in concrete. The authors analyzed the behavior of the system by simulating different scenarios in Modelica. The separation between tubes (100–500 mm), the thickness of the concrete (50–190 mm) and the temperature of the water supply (35–60 °C) were varied. The authors found that by supplying a water temperature of 35 °C, the indoor temperature was kept below the comfort temperature. However, increasing the separation between tubes and supplying a higher temperature increased the thermal comfort. With respect to the thickness of the concrete, the authors found that by increasing the thickness, fewer disturbances were obtained in the indoor air temperatures, but the energy consumption of electricity increased.

Some authors have analyzed the behavior of TABS using different construction materials on the floor. To analyze its thermal behavior and the ability to store heat, Ma et al. [67] proposed a radiant floor with embedded pipes. The authors analyzed the thermal behavior of the radiant concrete panel experimentally and with a simplified model. They compared two concrete blocks with aluminum-plastic (XPAP) embedded pipes, where one block had aluminum fins attached to the bottom surface of the pipe and another block had embedded tubes without fins. Inside the pipes, water was circulated at three different temperatures, 25.0 °C, 29.8 °C and 34.6 °C. The authors found that the radiant floor with aluminum fins reduced the temperature through the concrete block and improved energy storage, increasing exponentially with increasing fin height. The authors concluded that the height and material of the fins integrated into the tubes have a significant effect on the energy

storage rate. Other authors that analyzed the effect of varying construction materials on the behavior of TABS were Pardo et al. [68]. The authors developed an RC model of a TABS embedded in the floor and compared two types of materials as a cover, granite and wood. The authors analyzed 216 dwellings, where they varied the location, glazing, insulation, heat capacity and orientation. The authors found that wooden floors can offer a good performance when compared to materials with high thermal conductivity. With wood as floor covering, a 6.4% reduction in energy demand and a 1.4% reduction in comfort hours were obtained.

Table 9 summarizes the studies that analyzed the behavior of TABS in flats. The various authors have not only analyzed the behavior of TABS, but have also varied the construction materials. It can be seen that most of the works were carried out for heating, varying the configuration.

**Table 9.** Studies that analyzed strategies for improving the behavior of floor TABS.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[64]	H, C	F = Water		When applying the MPC, the indoor temperature was 22–26 °C for the cooling mode and 17–25 °C for the heating mode. Soil temperature was maintained in a range of 15 to 29 °C.
[65]	C	F = Water		The radiant floor increased its cooling capacity up to 140 W m <sup>-2</sup> .
[66]	H	F = Water, DBP = 0.1–0.5 m, $\phi = 0.026$ m		A tube spacing of 0.3 m maintained a comfort temperature of 21 to 25 °C
[67]	H	F = Water, DBP = 0.15 m, $\phi = 0.02$ m		Implementing aluminum fins on the heat exchanger tubes improves the thermal behavior of a floor. Storage capacity increases with fin material embedded in exchanger tubes.
[68]	H	F = Water, DPB = 0.15 m, $\phi = 0.016$ m, $\dot{V} = 200$ L h <sup>-1</sup>		By using the TABS on the floor, the energy demand decreased by 18% and thermal comfort increased by 14%.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes,  $v$  = fluid velocity, and  $\dot{V}$  = volumetric flow rate.

#### 4.2. Combination of TABS with Other Technologies for Floors

Floor TABS have also been coupled with other systems in order to improve system efficiency and thermal performance. Park et al. [69] conducted a study to estimate the thermal comfort and energy consumption of a TABS combined with a radiant floor heating system (RFHS) and an air conditioning system package (PAC). The authors performed the analysis using simulations from EnergyPlus of a conventional residence construction

and a low-thermal-load residential construction, in which they proposed 17 different combinations. The authors found that combining TABS with other systems showed better thermal comfort. However, the configurations TABS-PAC and TABS in cooling mode maintained the indoor comfort conditions. The authors suggested that the TABS should be operated under pre-cooling conditions considering the occupancy and cooling load of the building. Cen et al. [70] experimentally compared the behavior of a radiant floor system with a fan coil. The authors analyzed the influence of the size of the space on thermal comfort, using a variable space height of 3, 5, 7 and 9 m. The authors found that the indoor air temperature is similar using either of the two systems when the height of the room is 5, 7 and 9 m, with a temperature of 20.8 to 25.4 °C. However, they found that the air velocity is lower at all heights when using a radiant floor system (0.03 to 0.04 m s<sup>-1</sup>) than when using a fan coil (0.09 to 0.12 m s<sup>-1</sup>). The authors concluded that the thermal comfort is better with a radiant floor system when the size of the space is lower. Zhang et al. [71] combined radiant floor cooling with an underfloor ventilation system (RFCUV). The manuscript focused on developing a dynamic model for radiant floor energy savings compared to the proportional integral derivative model. The water supplied to the radiant floor was 22 °C to 24 °C. The authors found that the system had an energy saving of 17.5%, 8.2% for the air-cooled chiller and 20.5% for the air handling unit. The behavior of a composite hybrid radiant floor was evaluated by Gu et al. [72] in a hot and humid climate. The authors proposed four case studies where they combined the floor coil, fan coil and outdoor air unit in an office divided by zones. The water was supplied to the tubes by means of an air source heat pump in a temperature range of 7 °C to 45 °C. The best case was the one with the combination of the four elements, with a surface temperature of the floor that dropped to 22.8 °C, a relative humidity from 52.1 to 59%, and an average floor heat flux of 60 W m<sup>-2</sup>. A study of radiant floor heating was conducted by Hwang et al. [73]. The authors performed a simulation of a radiant heating floor assisted by air source heating systems in residential buildings, increasing the floor temperature by 1 °C (20–25 °C). The authors found that there are greater energy savings (59.2%) when only the air heat pump works and the floor temperature is lower (20 °C), whereas when only the radiant floor works, the temperature increases (25 °C), thermal comfort decreases, and there is no energy saving. When the radiant floor is assisted by the heat pump, energy savings of 19.6% to 37.6% are obtained. In the case of Sharifi et al. [74], an algorithm was developed to determine the optimal load split of a hybrid TABS. The floor TABS was coupled with a ground source heat pump. They used a design methodology that guaranteed thermal comfort and a reduction in energy use. The authors analyzed the behavior of the system and found that the proposed algorithm reduced the cooling demand by 45% and the heating energy demand by 38%. Authors such as Zhu et al. [75] experimentally analyzed the coupling of a radiant floor and a fan coil cooling (RFCAFC) system in a place with a humid climate. The tubes were made of PE-RT and embedded in a concrete floor with polystyrene insulation and mortar. The system had the ability to automatically change the temperature of the fluid depending on weather conditions. The authors analyzed three different climatic conditions: (1) low temperature and high humidity; (2) high temperature and low humidity; and (3) average temperature and humidity. Zhu et al. found that the fan coil can reach 73.8% of the proportion of the cooling load. The case study with medium temperature and humidity consumed 11.36 kWh<sup>-1</sup>, 15.4% less energy than the case with low temperature and high humidity. With this coupling the authors were able to maintain the soil surface temperature at 23 °C. Ren et al. [76] carried out an experimental analysis of radiant floor cooling (RFC) with a floor cooling source and displaced ventilation. The authors implemented control strategies with intermittent operation of the system and varying the speed and supply of water flow in the tubes, according to climatic conditions. The authors suggested that there should be a pre-cooling time to reduce the temperature inside the construction. With the proposed control strategies, the surface temperature of the floor decreased to 23.6 °C, with a difference of 4 °C between the radiant temperature and indoor air.

The floor studies presented in this section are summarized in Table 10. The table indicates that floor TABS have also been coupled with other systems in order to save energy and reduce the indoor temperature of buildings.

**Table 10.** Studies that analyzed the combination of floor TABS with other technologies.





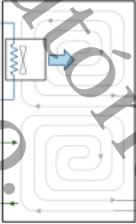
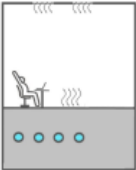
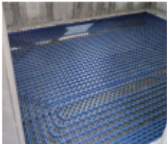
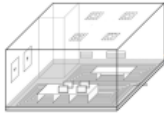
Reference	Mode*	TABS Features *	Model	Findings
[69]	H, C	F = Water, DPB = 0.2 m, $\phi = 0.02$ m		The indoor air temperature remained at 26 °C with a TABS and an air conditioning system.
[70]	C	F = Water		With a height of 5 m in a room, the radiant floor helps to improve thermal comfort, maintaining a temperature of 20.36 °C.
[71]	C	F = Water, DBP = 0.01 m, $\phi = 0.01$ m		With the model predictive control, there is an energy saving of up to 17.5%, with an operating temperature of up to 24.5 °C.
[72]	C	F = Water, DBP = 0.05 m, $\phi = 0.01$ m		With the coupling of the radiant floor + fan coil + air source heat pump, a comfort temperature of 24.6–26.4 °C can be achieved indoors.
[73]	H	F = Water		The radiant floor heating has a better performance when the floor temperature is 22 °C, providing an energy saving of 37.6%.
[74]	H, C	F = Water		TABS maintained the indoor air temperature between 21 and 26 °C.
[75]	C	F = Water, DBP = 0.06 m, $\phi = 0.012$ m		With the RFC AFC, the indoor air temperature remained in the range of 25.4–26.6 °C.

Table 10. Cont.

Reference	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[76]	C	F = Water		The interior temperature was maintained between 26 °C and 27 °C with the proposed system.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes, and  $\phi$  = diameter of the pipes.

### 5. TABS Installed in Several Building Components

In this section are presented the TABS studied to decrease or increase the indoor temperature of buildings when they are installed in more than one building component, and in some cases, TABS was coupled with other technologies. Authors around the world have analyzed different parameters and scenarios with TABS and some have evaluated the utilization of TABS in the whole building envelope.

#### *Indoor Temperature Behavior of Buildings with TABS Installed in Several Building Components*

TABS has been analyzed to decrease or increase the temperature of indoor buildings. These systems can be embedded in one or several building envelope components and can be coupled with other technologies. Khan et al. [77] used a TABS embedded in the roof and floor working in cooling mode. The authors performed simulations using MATLAB and EnergyPlus to evaluate the thermal behavior and the energy-saving potential of TABS. The models were calibrated and validated with experimental data. The authors proposed two cases: one with a conventional air-cooling system and one with the proposed TABS. The authors found that the TABS provided up to 30% of energy savings compared to the traditional system. Leo Samuel et al. [78] studied a hybrid passive cooling system, which consisted of a cooling tower connected to a TABS. The system was proposed for five different climatic regions in twelve cities in India. The authors used COMSOL Multiphysics software to perform simulations of the hybrid cooling system. They compared different scenarios, such as floor and roof cooled TABS (RF) and all-surface cooled TABS (AS), in terms of cooling performance for various climatic zones. They concluded that TABS (RF) configuration in arid climates reduced the indoor air temperature up to 9.5 °C and the TABS (AS) configuration up to 14.4 °C. In contrast, in humid tropical climates, the reductions reached up to 4.4 °C and 6.6 °C, respectively. Later, Leo Samuel et al. [79] carried out a study using CFD and analyzed a TABS with embedded pipes in the roof and floor. In these pipes, they circulated water with outlet and return from a cooling tower. To validate the model, they built a prototype of dimensions 3.46 × 3.46 × 3.15 m, with a roof and floor thickness of 0.15 m. The authors found that the TABS maintained an indoor air temperature between 23.5 and 28 °C.

Some parameters were varied by Leo Samuel et al. [80] to analyze the thermal behavior of TABS. The authors numerically and experimentally analyzed the influence of three parameters: spacing, vertical position, and the arrangement of pipes embedded in the roof and floor. They found that by reducing the separation between pipes from 0.3 to 0.1 m and moving the pipes to the direction of the interior surface from 0.135 to 0.015 m reduced the indoor air temperature by between 1.6 and 2.7 °C, respectively. Meanwhile, changing the arrangement of the pipes from coil to parallel reduced the indoor air to 32.1 °C. The authors reached such reductions with a separation of 0.1 m, and a vertical position of 0.015 m, and a parallel arrangement of the pipes reduced the indoor air temperature by up to 6.8 °C, reaching a comfort temperature of 29 °C in semi-arid weather. In the same year, Leo Samuel et al. [81] simulated the performance of TABS under a warm weather scenario. The authors used COMSOL Multiphysics to analyze the influence of the temperature and inlet velocity of water and the number of components with TABS for cooling. The CFD model was validated using experimental data from a previous study

of the authors. The researchers found that the parameter that had the most significant effect on thermal comfort was the number of cooling surfaces. They showed that if all the room surfaces are cooled, with a flow of  $19 \text{ L h}^{-1}$  of water, it reduced the average indoor temperature by up to  $5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . The same authors, Leo Samuel et al. [82], performed experimental tests of a scale room with a thermally activated construction system, using water pipes embedded in concrete in the roof, floor, and walls, with separate water flow controls. The experimental prototype measured  $3.5 \times 3.5 \times 3.15 \text{ m}$  with a 15 cm-thick reinforced concrete slab, surrounded by trees and structures that provided partial shade. They used  $\frac{1}{2}$ " schedule 40 PVC pipes, with a 10 cm separation between pipes. They studied temperature, relative humidity, air speed, and water flow through the pipes. The authors found that if only the cooling is activated on the roof, the indoor temperature remained around  $33.1 \text{ }^\circ\text{C}$ . However, when the cooling is activated on the walls, floor, and roof, the temperature decreases to  $29.2 \text{ }^\circ\text{C}$ . The authors concluded that this system, coupled with a passive ventilation system, increases its feasibility in climates with unfavorable conditions and works with a fluid at relatively high temperatures. To study the internal diameter of the heat exchanger pipes, the thermal conductivity of the pipes, and the thickness of the roof slab and floor, Leo Samuel et al. [83] analyzed the influence of those parameters of TABS on thermal comfort. They used a model built into COMSOL Multiphysics that was validated using experimental data obtained in the authors' previous work. They concluded that increasing the thermal conductivity of the pipes from  $0.14$  to  $1.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  considerably improves the cooling performance of the system. They found that the best combination of features studied was an internal diameter of the pipe of  $0.0017 \text{ m}$ , a thermal conductivity of the pipe of  $0.14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  and a thickness in the roof and floor of  $0.2 \text{ m}$ . This combination reduced the indoor operating temperature by  $4.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Michalak [18] carried out measurements and analyzed a TABS implemented in a building used as the primary heating and cooling source. The TABS was coupled with additional heating and cooling units such as fan coils, floor heating and air handling units (AHUs). The measurements were carried out during four months in an office with periods of occupation. The measurements were focused on variables such as indoor air temperature and the temperature of the floor. The authors also calculated predicted percentage of dissatisfied (PPD) and predicted mean vote (PMV). The average soil surface temperature was between  $20.6$  and  $26.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , while the average vertical air temperature was from  $22.5$  to  $23.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , the PMV ranged from  $0.52$  to  $1.50$ , and less than 30% of the people expressed thermal dissatisfaction. The system analyzed by Michalak had  $1275 \text{ kWh}$  of exchange energy for cooling and  $2500 \text{ kWh}$  for heating. The author concluded that implementing a TABS with mechanical ventilation systems improves the thermal comfort conditions of an office. Other authors that conducted an experimental study of a hybrid TABS were Dharmasastha et al. [84]. They carried out an analysis of a TABS coupled with a gypsum roof reinforced with fiberglass (TAGFRG), where they varied the supply temperature of the water that passed through the pipes embedded in the roof, walls, and floors. The authors found that by decreasing the supply water temperature from  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ , the interior surface temperature of the roof can decrease by as much as  $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ . However, the authors found that cooling just the roof of the building only lessened the effects that the outside ambient temperature had on indoor air temperature fluctuations. On the other hand, they found that if water was recirculated throughout the whole envelope of the test chamber, the thermal comfort increased, with a satisfaction percentage of 90%. Montenegro and Hongn [85] carried out a parametric study of TABS using a numerical model. The authors used experimental data from previous works to validate the model and subsequently compared the thermal behavior of two horizontal TABS configurations: floor and roof. The authors varied the separation between pipes (from  $0.1$  to  $0.3 \text{ m}$ ), the volumetric flow, and the supply water temperature, as well as the distance between the pipes and the surface in contact with the interior environment of an enclosure. The authors concluded that the variables with the greatest influence on the thermal behavior of the TABS design are the separation between pipes and the water supply temperature, considered as the key parameters for increasing heat transfer between the construction

element and the indoor environment. They proposed to reduce the separation between the tubes and the depth where they are installed, since this maximizes the removal of heat from the room to be cooled. The authors concluded that the potential for heat removal from a roof with TABS is 20–30% greater than the TABS on the floor. Oravec et al. [86] compared six radiant heating systems to make a guide that allows choosing a system according to its application. The authors compared six heating systems with PE-Xa pipes with different diameters, embedded in the floor, in the floor with metal fins, and in the wall (TABS or air gap). The authors analyzed the thermal performance, necessary heating area, thermal storage, and construction costs and the application of TABS in retrofitted buildings. They demonstrated that the behavior of TABS depends on the location of the tubes. The best performance was obtained by the Wall system (TABS) with a heating flux of  $96 \text{ W m}^{-2}$ . The authors suggest that floor heating shows an acceptable thermal performance, controllability, and storage capacity.

Table 11 summarizes the works that analyzed the installation of TABS in different building envelope components at the same time. In addition, TABS with an insulation system in the roof and the influence on the thermal comfort of the occupants were studied.

**Table 11.** Improvements in thermal comfort when TABS are used in several building components.







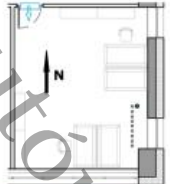

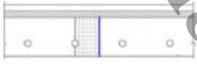
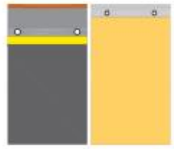
Reference	Weather	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[77]	-	C	F = Water, DPB = 0.10 and 0.15 m, $\phi = 0.015 \text{ m}$		The radiant cooling systems provided energy savings of up to 30% compared to a traditional system.
[78]	Semi-arid, arid, humid subtropical, tropical wet and dry, tropical wet	C	F = Water		The TABS in the roof reduced the operative temperature by $9.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , while the TABS in all surfaces reduced it by $14.4 \text{ }^\circ\text{C}$ .
[79]	Hot semi-arid	C	F = Water, DPB = 0.20 m, $\phi = 0.024 \text{ m}$		The system maintained indoor air temperature between $23.5 \text{ }^\circ\text{C}$ and $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .
[80]	Hot semi-arid	C	F = Water, DPB = 0.02 m, $\phi = 0.00128 \text{ m}$		The indoor air temperature was reduced by $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ when the separation between pipes was increased; $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$ by moving the pipes to the interior surface direction; and $22.1 \text{ }^\circ\text{C}$ by changing the arrangement of the tubes from coil to parallel.

Table 11. Cont.

Reference	Weather	Mode *	TABS Features *	Model	Findings
[81]	Hot and dry summer	C	F = Water, DPB = 0.2 m, $\phi = 0.013$ m		The number of cooling surfaces was the parameter that had the most significant effect on thermal comfort. If all the room surfaces are cooled, the average indoor temperature is reduced by up to 5.7 °C.
[82]	Tropical wet, Dry climate	C	F = Water, DPB = 0.2 m, $\phi = 0.016$ m		When TABS cooling was activated only on the roof, the indoor temperature remained at 33.1 °C. Meanwhile, when the TABS cooling was activated on the entire envelope, the temperature decreased to 29.2 °C.
[83]	-	C	F = Water, DPB = 0.2 m, $\phi = 0.01$ m, $v = 0.4$ m s <sup>-1</sup>		Increasing the thermal conductivity of the pipes improves the system's cooling performance. The system can reduce the indoor operating temperature by 4.7 °C.
[18]	-	H, C	F = Water		Implementing a TABS with mechanical ventilation systems improves the thermal comfort conditions in an enclosure.
[84]	Warm and humid	C	F = Water, DBP = 0.054 m, $\phi = 0.01$ and 0.015 m		The TABS reduced the indoor air temperature by 2.1 °C when the temperature of the cooling water was reduced from 26 °C to 18 °C.
[85]	-	C	F = Water, $\dot{V} = 8$ L min <sup>-1</sup>		Heat removal in an enclosure increases when tube spacing and tube depth are decreased. The potential of a roof is higher (20–30%) compared to a floor TABS, with the same characteristics.
[86]	-	H	F = Water, DBP = 0.8–0.30 m, $\phi = 0.009$ –0.020 m		The thermal performance depends on the location of the tubes with respect to the indoor environment.

\* H = heating, C = cooling, F = fluid, DBP = distance between the pipes,  $\phi$  = diameter of the pipes,  $v$  = fluid velocity, and  $\dot{V}$  = volumetric flow rate.

6. Results and Discussion

The objective of this study was to review the state of the art of TABS. In this study, the thermal behavior of TABS in roofs, walls, and floors was analyzed. TABS can be implemented both in a building component and in the entire envelope, helping to maximize

its efficiency. In the review of the literature, it was found that the TABS can be named differently on some occasions depending on their location in the envelope and on their mode of operation: thermally activated building constructions, radiant cooling/heating systems, and active building storage systems, among others. The development of this study helped us to determine the main variables that were studied by the authors and conceptualize it as a summary in tables. Most of the reported works analyzed the behavior of the indoor ambient temperature in order to reach thermal comfort. Other aspects analyzed by the authors were the effect of changing the characteristics of the fluid on the indoor ambient temperature, the energy-saving capacity and the capacity of the cooling/heating load. The results of the manuscripts analyzed in this work are presented below.

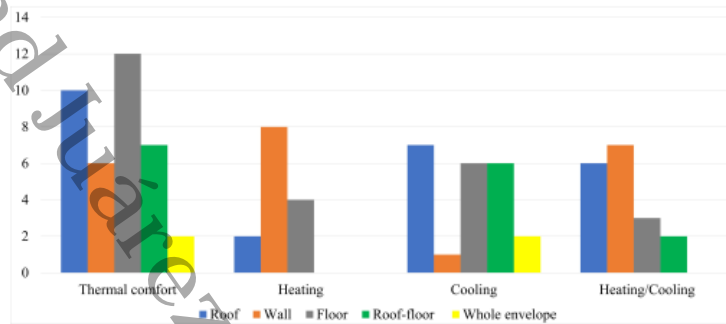
Regarding the improvements in thermal comfort provided by TABS when installed in building roofs, the results are reported in terms of the reductions in indoor air temperature (6.7 °C) [35], the range in which the indoor air temperature remains (21–28 °C) [31,33] and the percentage of time in which the indoor temperature is the satisfaction zone (within 80–90%) [32]. On the other hand, the energy savings provided by TABS when embedded in building roofs were reported in a few works [34,43]. It was shown that TABS can provide energy savings between 13 and 50%.

The research on TABS embedded in building walls has shown that this technology can provide energy savings for heating by a factor ranging between 40 and 75% [56,58,59]. Several studies developed theoretical models validated with experimental results. These models were used to find the adequate values for pipe separation and pipe depth within the walls [45,48,50,51], water inlet temperature for cooling or heating [45,47], and water velocity and volumetric flow rate [47,48,50]. Modeling studies are relevant for the design of TABS because they allow researchers to find suitable values for the parameters mentioned above. Studies on TABS embedded in floors reveal that they are mostly made with tubes with diameters smaller than 0.012 m. The values reported in floor TABS in terms of indoor ambient temperature range from 21 °C to 27 °C [66,69,74,75]. The energy saving in floor TABS can reach 17.5%.

Other studies show that when TABS are installed in more than one building envelope component, they provide an essential contribution to the improvement in thermal comfort. The results are reported in terms of the indoor air temperature reductions or in terms of the interval in which the indoor air temperature remains. When the roof and floor had embedded TABS, and were used for cooling, it was shown that the indoor air temperature was reduced between 4.4 and 9.5 °C. When all the building envelope components (roofs, walls, and floor) have embedded TABS and are used for cooling, the indoor air temperature reductions range between 6.6 and 14.4 °C depending on the type of weather of the zone [78]. Other research shows that when TABS was activated in the whole envelope, it maintained the indoor air temperature at around 29 °C. When only the roof was activated, the indoor air temperature remained about 33 °C [82]. Some researchers showed that when TABS are installed in the building roof and the floor, the indoor air temperature is maintained between 23.5 and 28 °C [79].

Figure 3 classifies the research works considered in the current review according to the results presented by each work. Four main groups were formed: (1) research works that studied the influence of TABS on the thermal comfort conditions; (2) research works that studied TABS for heating; (3) research works that studied TABS for cooling; and (4) research works that studied TABS for heating and cooling. Regarding the first group, most of the existing studies were developed for buildings with TABS embedded in floor. Few studies on thermal comfort were developed for TABS embedded in the whole envelope. Regarding the second group, most of the existing studies for heating were developed for TABS embedded in walls; only few studies were developed for roofs. Regarding the third group, most of the studies on TABS were developed for roofs and the roof–floor, and a few studies for TABS embedded in walls. Finally, most studies were developed for TABS embedded in walls in the fourth group, and few were developed on the roof–floor.

The studies analyzed indicated that most TABS were developed for TABS embedded in roofs and walls. Embedded TABS have been combined with phase change materials (PCM) [40,57,58], with a reduction in the indoor temperature from 0.4 to 4.7 °C. TABS are mostly applied to cooling and are embedded in roofs, with an indoor temperature from 21 to 29.6 °C. Meanwhile, TABS embedded in walls are developed for heating and cooling/heating depending on the outdoor environment.



**Figure 3.** Studies developed for TABS in different building components.

From the analysis of the available literature, it is possible to identify alternatives that can contribute to thermal comfort in buildings. TABS is one of these alternatives that offers many benefits, but it has some limitations. Among the benefits that the authors report is the integration of TABS with systems that use renewable energy in the heating mode, and the recirculation of the working fluid of TABS for the needs of the users of the same building. Its energy storage capacity has been reported as a benefit, which can be increased by integrating a layer of PCM [20,26,57]. As part of the limitations of the TABS are the control strategies, because when there are several sections, it is necessary to activate them independently. According to some authors, it was found that appropriate control and operation strategies are required to reduce energy waste when changing the mode from cooling to heating (or vice versa) [32]. Furthermore, it has been reported that TABS cannot remove latent heat loads, which occur when the temperature of the building's interior environment drops below the dew point. This causes condensation to occur inside the building, which affects its hygrothermal behavior. To contribute to this, some authors propose the integration of systems with the ability to dehumidify the interior environment of the building and prevent the accumulation of condensate, especially in places with a humid climate [35]. On the other hand, another reported limitation of TABS is the complexity and costs of its implementation compared with the use of [20] air conditioning systems.

## 7. Conclusions

This study presents a review of the state of the art of TABS, where its different configurations and its implementation in the different building components (roof, wall, and floor) or the whole envelope were analyzed. Furthermore, their coupling with other systems was analyzed. Relevant results from the literature related to the thermal behavior and the critical parameters of these systems were discussed. TABS are becoming an attractive branch of research for those that analyze measures for improving the indoor environment of buildings. Several gaps were identified in the literature, and the following can be concluded:

- TABS have not been analyzed from a structural mechanics point of view. From the knowledge of the authors, there are not yet studies that have considered the effect of the embedded pipes on the mechanical behavior of building components such as roofs and walls. This fact is crucial in roofs because of its role in a building; researchers

should find the maximum diameter of the pipes and the optimal separation between them that does not affect the structural behavior of the roof.

- The thermal behavior of building components with TABS depends on many parameters; some of these parameters are: (a) type of building component, (b) orientation of the building wall; (b) type of arrangement of the pipes; (c) separation between the pipes or pipe spacing; (d) diameter of the pipes; (e) material of the pipes; (f) thermo-physical properties of the fluid that circulates within the pipes; and (g) volumetric or mass flow rate of the fluid. Thus, optimization methods such as genetic algorithms or other artificial intelligence techniques should be used to find the optimum value for the parameters involved in a good design of TABS embedded in building components.
- Regarding the type of arrangement of the pipes, TABS in series or in a serpentine-type arrangement have been extensively studied. However, other types of pipe arrangement, such as parallel, mixed or even tree-shaped, should be explored to find the best arrangement that benefits the thermal performance of TABS for each application.
- The effect of fins on the thermal performance of TABS embedded in building components needs further development. Few studies have analyzed this measure when TABS are installed on building floors; the results show that the system with fins improves the thermal storage capacity compared with the traditional system.
- A building component with embedded TABS designed for heating is expected to have a material in the exterior layer with a high solar absorptance. On the contrary, a component with embedded TABS designed for cooling is expected to have a material in the exterior layer with a low solar absorptance. However, when the building component performs both heating and cooling, a layer with a suitable value of solar absorptance should be selected. Future studies on finding the optimal value of solar absorptance should be performed to improve the efficiency of TABS.
- The coupling of TABS with other systems that contribute to improve the thermal behavior of a building, such as green roofs and walls, and ventilated roofs and walls, has not been explored. These passive techniques could help to improve the thermal behavior of TABS.

In accordance with that mentioned above, it can be said that TABS are systems with limitations and opportunities. Within the main limitations are the costs of installation and implementation. However, any new development that changes the paradigm of how it is built in the traditional way has implications that are reflected in the cost of installation, operation, and maintenance. However, the opportunities offered by TABS, according to the studies analyzed, can be said to far outweigh the limitations. This is due to the fact that TABS present the versatility to adapt to different constructions, climates, and types of materials, among others. Therefore, based on what was analyzed in this study, it can be said that TABS contribute to lowering the temperature inside a building, which is reflected in the reduction of up to 50% in energy consumption due to the use of air conditioning systems. Therefore, the trend of the use of TABS is expected to increase as a strategy to contribute to the reduction in thermal loads in buildings. However, experimental studies are required under real conditions of use and structural criteria must be taken into account in order to implement TABS as a strategy that not only offers benefits from a thermal point of view, but also offers safety for building occupants.

**Author Contributions:** Conceptualization, I.H.-P. and M.M.V.-R.; writing—original draft preparation, M.M.V.-R., I.H.-P., K.M.A.-C., I.Z.-G., E.V.M.-M., I.H.-L. and J.S.-A.; writing—review and editing, I.H.-P. and M.M.V.-R.; supervision, I.H.-P. and K.M.A.-C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Acknowledgments:** The first author acknowledges the grant provided by the National Council of Science and Technology (CONACYT-México).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

#### Nomenclature

C	Cooling
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide
DPB	Distance between pipes (m)
F	Fluid
H	Heating
$\dot{m}$	Mass flow rate (kg s <sup>-1</sup> )
$\dot{V}$	Volumetric flow rate (L h <sup>-1</sup> )
$v$	Fluid velocity (m s <sup>-1</sup> )

#### Abbreviations

AHUs	Air handling units
AS	All-surface cooled TABS
Bio-PCM	Bio-based phase change material
CFD	Computational fluid dynamics
CLPHP	Closed-loop pulsating heat pipe
FD	Finite difference
FDFD	Frequency-domain finite difference
FEA	Finite element analysis
FVM	Finite volume method
GSHP	Ground source heat pump
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MPC	Model predictive control
NTU	Numbers of transfer units method
PAC	Air conditioning system package
PCM	Phase change material
PE-RT	Polyethylene of raised temperature
PE-Xa	Cross-linked polyethylene
PMV	Predicted mean vote
PPD	Predicted percentage of dissatisfied
ppm	Parts per million
PPW	Parallel pipe-embedded wall
RC	Resistance-capacitance method
RF	Floor and roof cooled TABS
RFC	Radiant floor cooling
RFCAFC	Radiant floor and fan coil cooling
RFCUV	Radiant floor cooling with underfloor ventilation system
RFHS	Radiant floor heating system
SPW	Serial pipe-embedded wall
TABS	Thermally activated building system
TAGFRG	Gypsum roof reinforced with fiberglass
TAPCW	Thermo-activated PCM composite wall
TAW	Thermally activated wall system
TPTL	Two-phase thermosyphon loop
VRSP	Ventilated roof model with embedded pipes and a stabilized layer of PCM
WIPH	Wall implanted with heat pipes
XPAP	Aluminum-plastic pipe
<b>Greek Symbols</b>	
$\phi$	Diameter of the pipes (m)

## References

1. IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; 151p. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (accessed on 30 July 2022).
2. IEA. *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*; IEA: Paris, France, 2019. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (accessed on 30 July 2022).
3. Tong, S.; Li, H. An efficient model development and experimental study for the heat transfer in naturally ventilated inclined roofs. *Build. Environ.* **2014**, *81*, 296–308. [\[CrossRef\]](#)
4. Ozariso, B. Energy effectiveness of passive cooling design strategies to reduce the impact of long-term heatwaves on occupants' thermal comfort in Europe: Climate change and mitigation. *J. Clean. Prod.* **2022**, *330*, 129675. [\[CrossRef\]](#)
5. Haghighi, A.; Maerefat, M. Design guideline for application of earth-to-air heat exchanger coupled with solar chimney as a natural heating system. *Int. J. Low-Carbon Technol.* **2015**, *10*, 294–304. [\[CrossRef\]](#)
6. Peñalosa Peña, S.A.; Jaramillo Ibarra, J.E. Potential Applicability of Earth to Air Heat Exchanger for Cooling in a Colombian Tropical Weather. *Buildings* **2021**, *11*, 219. [\[CrossRef\]](#)
7. Michalak, P. Impact of Air Density Variation on a Simulated Earth-to-Air Heat Exchanger's Performance. *Energies* **2022**, *15*, 3215. [\[CrossRef\]](#)
8. Kharrufa, S.N.; Adil, Y. Upgrading the building envelope to reduce cooling loads. *Energy Build.* **2012**, *55*, 389–396. [\[CrossRef\]](#)
9. Bunkholt, N.S.; Säwén, T.; Stockhaus, M.; Kvannd, T.; Gullbrekken, L.; Wahlgren, P.; Lohne, J. Experimental Study of Thermal Buoyancy in the Cavity of Ventilated Roofs. *Buildings* **2020**, *10*, 8. [\[CrossRef\]](#)
10. Lee, H.; Ozaki, A.; Choi, Y.; Iqbal, M. Performance Improvement Plan of Air Circulation-Type Solar Heat-Storage System Using Ventilated Cavity of Roof. *Energies* **2021**, *14*, 1606. [\[CrossRef\]](#)
11. Silva, C.M.; Gomes, M.G.; Silva, M. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy Build.* **2016**, *116*, 318–325. [\[CrossRef\]](#)
12. Zingre, K.T.; Kumar Devs, K.; Wan, M.P. Analysing the Effect of Substrate Properties on Building Envelope Thermal Performance in Various Climates. *Energies* **2020**, *13*, 5119. [\[CrossRef\]](#)
13. Barozzi, B.; Pollastro, M.C. Assessment of the Impact of Cool Roofs in Temperate Climates through a Comparative Experimental Campaign in Outdoor Test Cells. *Buildings* **2016**, *6*, 52. [\[CrossRef\]](#)
14. Ozariso, B.; Altan, H. A novel methodological framework for the optimisation of post-war social housing developments in the South-eastern Mediterranean climate: Policy design and life-cycle cost impact analysis of retrofitting strategies. *Sol. Energy* **2021**, *225*, 517–560. [\[CrossRef\]](#)
15. Suárez, R.; Escandón, R.; López-Pérez, R.; León-Rodríguez, L.; Klein, T.; Silvester, S. Impact of Climate Change: Environmental Assessment of Passive Solutions in a Single-Family Home in Southern Spain. *Sustainability* **2018**, *10*, 2914. [\[CrossRef\]](#)
16. Bugenings, L.A.; Kamari, A. Bioclimatic Architecture Strategies in Denmark: A Review of Current and Future Directions. *Buildings* **2022**, *12*, 224. [\[CrossRef\]](#)
17. Romani Picas, J.; Pérez Luque, G.; Gracia Cuesta, A.D. Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump. *Renew. Energy* **2017**, *105*, 520–529. [\[CrossRef\]](#)
18. Michalak, P. Selected Aspects of Indoor Climate in a Passive Office Building with a Thermally Activated Building System: A Case Study from Poland. *Energies* **2021**, *14*, 860. [\[CrossRef\]](#)
19. Almeida, R.M.S.F.; Vicente, R.d.S.; Ventura-Gouveia, A.; Figueiredo, A.; Rebelo, F.; Rogue, E.; Ferreira, V.M. Experimental and Numerical Simulation of a Radiant Floor System: The Impact of Different Screed Mortars and Floor Finishings. *Materials* **2022**, *15*, 1015. [\[CrossRef\]](#)
20. Romani Picas, J.; Cabeza, L.F.; Pérez Luque, G.; Pisello, A.L.; Gracia Cuesta, A.D. Experimental testing of cooling internal loads with a radiant wall. *Renew. Energy* **2018**, *116*, 1–8. [\[CrossRef\]](#)
21. Resources, E.D. *Radiant Cooling, Energy Design Resources: Building Envelope Design*; Financial Times Energy, Inc.: Boulder, CO, USA, 2003.
22. Ma, P.; Wang, L.S.; Guo, N. Modeling of TABS-based thermally manageable buildings in Simulink. *Appl. Energy* **2013**, *104*, 791–800. [\[CrossRef\]](#)
23. Rhee, K.N.; Kim, K.W. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Build. Environ.* **2015**, *91*, 166–190. [\[CrossRef\]](#)
24. Romani Picas, J.; Gracia Cuesta, A.D.; Cabeza, L.F. Simulation and control of thermally activated building systems (TABS). *Energy Build.* **2016**, *127*, 22–42. [\[CrossRef\]](#)
25. Ma, P.; Wang, L.S.; Guo, N. Energy storage and heat extraction—From thermally activated building systems (TABS) to thermally homeostatic buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *45*, 677–685. [\[CrossRef\]](#)
26. Krajčik, M.; Šikula, O. The possibilities and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *164*, 114490. [\[CrossRef\]](#)
27. Krajčik, M.; Arica, M.; Šikula, O.; Šimko, M. Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers. *Energy Build.* **2021**, *253*, 111476. [\[CrossRef\]](#)
28. Cai, R.; Sun, Z.; Yu, H.; Meng, E.; Wang, J.; Dai, M. Review on optimization of phase change parameters in phase change material building envelopes. *J. Build. Eng.* **2021**, *35*, 101979. [\[CrossRef\]](#)

29. Dong, W.; Chen, Y.; Bao, Y.; Fang, A. A validation of dynamic hygrothermal model with coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes. *J. Build. Eng.* **2020**, *32*, 101484. [\[CrossRef\]](#)
30. Wei, M.; Wang, B.; Liu, S. Numerical Simulation of Heat and Moisture Transfer of Wall with Insulation. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1300*, 012029. [\[CrossRef\]](#)
31. Gwerder, M.; Lehmann, B.; Tödtli, J.; Dorer, V.; Renggli, F. Control of thermally-activated building systems (TABS). *Appl. Energy* **2008**, *85*, 565–581. [\[CrossRef\]](#)
32. De Wit, A.; Wisse, C. Hydronic circuit topologies for thermally activated building systems—design questions and case study. *Energy Build.* **2012**, *52*, 56–67. [\[CrossRef\]](#)
33. Rey Martínez, F.J.; Chicote, M.A.; Peñalver, A.V.; González, A.T.; Gómez, E.V. Indoor air quality and thermal comfort evaluation in a Spanish modern low-energy office with thermally activated building systems. *Sci. Technol. Built Environ.* **2015**, *21*, 1091–1099. [\[CrossRef\]](#)
34. Chung, W.J.; Park, S.H.; Yeo, M.S.; Kim, K.W. Control of thermally activated building system considering zone load characteristics. *Sustainability* **2017**, *9*, 586. [\[CrossRef\]](#)
35. Dharmasastha, K.; Samuel, D.L.; Nigendra, S.S.; Maiya, M. Experimental investigation of thermally activated glass fibre reinforced gypsum roof. *Energy Build.* **2020**, *228*, 110424. [\[CrossRef\]](#)
36. Saw, L.; Yew, M.; Yew, M.; Chong, W.; Poon, H.; Liew, W.; Yeo, W. Development of the closed loop pulsating heat pipe cool roof system for residential buildings. *Case Stud. Therm. Eng.* **2021**, *28*, 101487. [\[CrossRef\]](#)
37. Wu, M.; Liu, X.; Tang, H. Simulation Analysis on the Solar Heating System Combined with Tabs in Lhasa, China of Annex 59. *Energy Proc.* **2015**, *78*, 2439–2444. [\[CrossRef\]](#)
38. Chung, W.J.; Park, S.H. Utilization of Thermally Activated Building System with Horizontal Ground Heat Exchanger Considering the Weather Conditions. *Energies* **2021**, *14*, 7927. [\[CrossRef\]](#)
39. Yu, J.; Yang, Q.; Ye, H.; Huang, J.; Liu, Y.; Tao, J. The optimum phase transition temperature for building roof with outer layer PCM in different climate regions of China. *Energy Procedia* **2019**, *158*, 3045–3051. [\[CrossRef\]](#)
40. Yu, J.; Leng, K.; Ye, H.; Xu, X.; Luo, Y.; Wang, J.; Yang, X.; Yang, Q.; Gang, W. Study on thermal insulation characteristics and optimized design of pipe-embedded ventilation roof with outer-layer shape-stabilized PCM in different climate zones. *Renew. Energy* **2020**, *147*, 1609–1622. [\[CrossRef\]](#)
41. Heidenthaler, D.; Leeb, M.; Schnabel, T.; Huber, H. Comparative analysis of thermally activated building systems in wooden and concrete structures regarding functionality and energy storage on a simulation-based approach. *Energy* **2021**, *233*, 121138. [\[CrossRef\]](#)
42. Hu, R.; Li, X.; Liang, J.; Wang, H.; Liu, G. Field study on cooling performance of a heat recovery ground source heat pump system coupled with thermally activated building systems (TABS). *Energy Convers. Manag.* **2022**, *262*, 115678. [\[CrossRef\]](#)
43. Lehmann, B.; Dorer, V.; Koschütz, M. Application range of thermally activated building systems tabs. *Energy Build.* **2007**, *39*, 593–598. [\[CrossRef\]](#)
44. Zhu, L.; Yang, Y.; Chen, S.; Sun, Y. Thermal performance study on a façade-built-in two-phase thermosyphon loop for passive thermo-activated building system. *Energy Convers. Manag.* **2019**, *199*, 112059. [\[CrossRef\]](#)
45. Romani, J.; Cabeza, L.F.; de Gracia, A. Development and experimental validation of a transient 2D numeric model for radiant walls. *Renew. Energy* **2018**, *115*, 859–870. [\[CrossRef\]](#)
46. Todorović, R.I.; Banjac, M.J.; Vasiljević, B.M. Analytical and experimental determination of the temperature field on the surface of wall heating panels. *Therm. Sci.* **2015**, *19*, 497–507. [\[CrossRef\]](#)
47. Xie, J.; Xu, X.; Li, A.; Zhu, Q. Experimental validation of frequency-domain finite-difference model of active pipe-embedded building envelope in time domain by using Fourier series analysis. *Energy Build.* **2015**, *99*, 177–188. [\[CrossRef\]](#)
48. Zhu, Q.; Xu, X.; Gao, J.; Xiao, F. A semi-Dynamic simplified therm model of active pipe embedded building envelope based on frequency finite difference method. *Int. J. Therm. Sci.* **2015**, *88*, 170–179. [\[CrossRef\]](#)
49. Zhu, Q.; Li, A.; Xie, J.; Li, W.; Xu, X. Experimental validation of a semi-dynamic simplified model of active pipe-embedded building envelope. *Int. J. Therm. Sci.* **2016**, *108*, 70–80. [\[CrossRef\]](#)
50. Ibrahim, M.; Wurtz, E.; Anger, J.; Ibrahim, O. Experimental and numerical study on a novel low temperature façade solar thermal collector to decrease the heating demands: A south-north pipe-embedded closed-water-loop system. *Sol. Energy* **2017**, *147*, 22–36. [\[CrossRef\]](#)
51. Qu, S.; Hu, W.; Yuan, S.; Yin, R.; Ji, R. Optimal design and operation of thermally activated wall in the ultra-low energy buildings in China. *Buil. Simul.* **2020**, *13*, 961–975. [\[CrossRef\]](#)
52. Jiang, S.; Li, X.; Lyu, W.; Wang, B.; Shi, W. Numerical investigation of the energy efficiency of a serial pipe-embedded external wall system considering water temperature changes in the pipeline. *J. Build. Eng.* **2020**, *31*, 101435. [\[CrossRef\]](#)
53. Li, Z.; Zhang, Z. Dynamic heat transfer characteristics of wall implanted with heat pipes in summer. *Energy Build.* **2018**, *170*, 40–46. [\[CrossRef\]](#)
54. Iffa, E.; Hun, D.; Salonvaara, M.; Shrestha, S.; Lapsa, M. Performance evaluation of a dynamic wall integrated with active insulation and thermal energy storage systems. *J. Energy Storage* **2022**, *46*, 103815. [\[CrossRef\]](#)
55. Krzaczek, M.; Florczuk, J.; Tejchman, J. Improved energy management technique in pipe-embedded wall heating/cooling system in residential buildings. *Appl. Energy* **2019**, *254*, 113711. [\[CrossRef\]](#)

56. Stojanović, B.V.; Janevski, J.N.; Mitković, P.B.; Stojanović, M.B.; Ignjatović, M.G. Thermally activated building systems in context of increasing building energy efficiency. *Therm. Sci.* **2014**, *18*, 1011–1018. [\[CrossRef\]](#)
57. Guerrero Delgado, M.C.; Sánchez, J.; Álvarez, S.; Tenorio Ríos, J.A.; Cabeza, L.F.; Bartolomé, C.; Pavón Moreno, M.C. Evaluation of the behavior of an innovative thermally activated building system (TABS) with PCM for an efficient design. *E3S Web Conf.* **2019**, *111*, 8.
58. Chen, S.; Yang, Y.; Olomi, C.; Zhu, L. Numerical study on the winter thermal performance and energy saving potential of thermo-activated PCM composite wall in existing buildings. *Buil. Simul.* **2020**, *13*, 237–256. [\[CrossRef\]](#)
59. Delgado, M.G.; Ramos, J.S.; Domínguez, S.; Ríos, J.A.T.; Cabeza, L.F. Building thermal storage technology: Compensating renewable energy fluctuations. *J. Energy Storage* **2020**, *27*, 101147. [\[CrossRef\]](#)
60. Kisilewicz, T.; Fedorczak-Cisak, M.; Barkanyi, T. Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. *Energy Build.* **2019**, *205*, 109541. [\[CrossRef\]](#)
61. Qu, S.; Su, S.; Li, H.; Hu, W. Optimized control of the supply water temperature in the thermally activated building system for cold climate in China. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *51*, 101742. [\[CrossRef\]](#)
62. Kalús, D.; Gašparík, J.; Janík, P.; Kubica, M.; Št'astný, P. Innovative Building Technology Implemented into Facades with Active Thermal Protection. *Sustainability* **2021**, *13*, 4438. [\[CrossRef\]](#)
63. Arroyo, J.; Spiessens, F.; Helsen, L. Comparison of Model Complexities in Optimal Control Tested in a Real Thermally Activated Building System. *Buildings* **2022**, *12*, 539. [\[CrossRef\]](#)
64. Joe, J.; Karava, P. A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. *Appl. Energy* **2019**, *245*, 65–77. [\[CrossRef\]](#)
65. Feng, J.D.; Schiavon, S.; Bauman, F. New method for the design of radiant floor cooling systems with solar radiation. *Energy Build.* **2016**, *125*, 9–18. [\[CrossRef\]](#)
66. Yang, X.; Pan, L.; Guan, W.; Tian, Z.; Wang, J.; Zhang, C. Optimization of the configuration and flexible operation of the pipe-embedded floor heating with low-temperature district heating. *Energy Build.* **2022**, *269*, 112245. [\[CrossRef\]](#)
67. Ma, J.; Yang, Y.; Zheng, X.; Dai, B.; Zhu, D.; Liu, Q. Impact on heat storage performance of concrete radiant floor with finned water supply pipes. *J. Build. Eng.* **2021**, *44*, 103351. [\[CrossRef\]](#)
68. Ruiz-Pardo, Á.; Rodríguez Jara, E.Á.; Conde García, M.; Ríos, J.A.T. Influence of Wood Properties and Building Construction on Energy Demand, Thermal Comfort and Start-Up Lag Time of Radiant Floor Heating Systems. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 2335. [\[CrossRef\]](#)
69. Park, S.H.; Chung, W.J.; Yeo, M.S.; Kim, K.W. Evaluation of the thermal performance of a Thermally Activated Building System (TABS) according to the thermal load in a residential building. *Energy Build.* **2014**, *73*, 69–82. [\[CrossRef\]](#)
70. Cen, C.; Jia, Y.; Liu, K.; Geng, R. Experimental comparison of thermal comfort during cooling with a fan coil system and radiant floor system at varying space heights. *Build. Environ.* **2018**, *141*, 71–79. [\[CrossRef\]](#)
71. Zhang, D.; Cai, N.; Cui, X.; Xia, X.; Shi, J.; Huang, X. Experimental investigation on model predictive control of radiant floor cooling combined with underfloor ventilation system. *Energy* **2019**, *176*, 23–33. [\[CrossRef\]](#)
72. Gu, X.; Cheng, M.; Zhang, X.; Qi, Z.; Liu, J.; Li, Z. Performance analysis of a hybrid non-centralized radiant floor cooling system in hot and humid regions. *Case Stud. Therm. Eng.* **2021**, *28*, 101645. [\[CrossRef\]](#)
73. Hwang, Y.J.; Jeong, J.W. Energy Saving Potential of Radiant Floor Heating Assisted by an Air Source Heat Pump in Residential Buildings. *Energies* **2021**, *14*, 1321. [\[CrossRef\]](#)
74. Sharifi, M.; Mahmoud, R.; Himpe, E.; Laverge, J. A heuristic algorithm for optimal load splitting in hybrid thermally activated building systems. *J. Build. Eng.* **2022**, *50*, 104160. [\[CrossRef\]](#)
75. Zhu, X.; Liu, J.; Zhu, X.; Wang, X.; Du, Y.; Miao, J. Experimental Study on Operating Characteristic of a Combined Radiant Floor and Fan Coil Cooling System in a High Humidity Environment. *Buildings* **2022**, *12*, 499. [\[CrossRef\]](#)
76. Ren, J.; Liu, J.; Zhou, S.; Kim, M.K.; Song, S. Experimental study on control strategies of radiant floor cooling system with direct-ground cooling source and displacement ventilation system: A case study in an office building. *Energy* **2022**, *239*, 122410. [\[CrossRef\]](#)
77. Khan, Y.; Khare, V.R.; Mathur, J.; Bhandari, M. Performance evaluation of radiant cooling system integrated with air system under different operational strategies. *Energy Build.* **2015**, *97*, 118–128. [\[CrossRef\]](#)
78. DG, L.S.; Nagendra, S.S.; Maiya, M. Feasibility analysis of passive thermally activated building system for various climatic regions in India. *Energy Build.* **2017**, *155*, 352–363.
79. Leo Samuel, D.; Nagendra, S.S.; Maiya, M. Simulation of indoor comfort level in a building cooled by a cooling tower–concrete core cooling system under hot-semiarid climatic conditions. *Indoor Built Environ.* **2017**, *26*, 680–693. [\[CrossRef\]](#)
80. Samuel, D.L.; Nagendra, S.S.; Maiya, M.P. Parametric analysis on the thermal comfort of a cooling tower based thermally activated building system in tropical climate—An experimental study. *Appl. Therm. Eng.* **2018**, *138*, 325–335. [\[CrossRef\]](#)
81. Leo Samuel, D.; Shiva Nagendra, S.; Maiya, M. An analysis of operating parameters in the cooling tower-based thermally activated building system. *Indoor Built Environ.* **2018**, *27*, 1175–1186. [\[CrossRef\]](#)
82. Leo Samuel, D.; Shiva Nagendra, S.; Maiya, M. A study of pipe parameters on the performance of cooling tower-based thermally activated building system. *Indoor Built Environ.* **2018**, *27*, 219–232. [\[CrossRef\]](#)
83. Samuel, D.L.; Nagendra, S.S.; Maiya, M. A sensitivity analysis of the design parameters for thermal comfort of thermally activated building system. *Sādhanā* **2019**, *44*, 48. [\[CrossRef\]](#)

84. Dharmasastha, K.; Leo Samuel, D.; Shiva Nagendra, S.; Maiya, M. Thermal comfort of a radiant cooling system in glass fiber reinforced gypsum roof-an experimental study. *Appl. Therm. Eng.* **2022**, *214*, 118842. [[CrossRef](#)]
85. Montenegro López, F.J.; Hongn, M.E. Estudio computacional de un sistema de acumulación estructural orientado a refrescamiento bioclimático: Primeros resultados. *Av. En Energías Renov. Y Medio Ambiente* **2020**, *24*, 51–61.
86. Oravec, J.; Šikula, O.; Kračák, M.; Arıcı, M.; Mohapl, M. A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance analysis. *J. Build. Eng.* **2021**, *36*, 102133. [[CrossRef](#)]

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

## **Anexo B**

Análisis estadístico y selección del modelo

El análisis estadístico del modelo de regresión lineal se realizó con el objetivo de identificar la relación más adecuada entre las variables del estudio y garantizar que el modelo seleccionado represente de manera precisa los datos experimentales. Para ello, se evaluaron distintos modelos de regresión (Tabla B.1), en donde se obtuvieron un total de 24 casos y se seleccionó el más adecuado con base en criterios estadísticos fundamentales.

**Tabla B.1.**

*Condiciones de cada caso para las P3, P4 y P5*

No. Prueba	No. Caso	Paso de tiempo	Tiempo de la regresión (min)
3	1	3	120
	2	5	
	3	10	
	4	60	
	5	3	
	6	60	
	7	3	
	8	60	
	9	3	
	10	5	
4	11	10	120
	12	60	
	13	3	
	14	60	
	15	3	
	16	60	
	17	3	
	18	5	
5	19	10	120
	20	60	
	21	3	
	22	60	
	23	3	
	24	60	

*Nota.* La tabla presenta las condiciones evaluadas para un total de 24 casos correspondientes a las Pruebas 3, 4 y 5. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se calculó la relación significativa entre las variables (F), lo que permitió determinar si la variable independiente tiene un impacto real sobre la variable dependiente. Esto se realizó a partir de las varianzas de la muestra en el ANOVA y el análisis del valor p, asegurando que los coeficientes del modelo fueran estadísticamente significativos dentro de un nivel de confianza aceptable.

Además, se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual mide el grado de ajuste del modelo a los datos experimentales. Un valor de  $R^2$  cercano a 1 indica que el modelo explica una gran proporción de la variabilidad observada en los datos, lo que lo convierte en un buen predictor. También se calculó la varianza del error (MSE), que proporciona información sobre la dispersión de los valores residuales respecto a la recta de regresión. Un modelo con una variación de error baja sugiere que las predicciones son más precisas y que el ajuste es adecuado.

Por último, se utilizó el Error Estándar de la Estimación (EEE) para evaluar la precisión de las predicciones realizadas por el modelo. Un EEE más bajo indica menor dispersión de los datos en torno a la línea de regresión, lo que sugiere un mejor ajuste.

A través de estos análisis estadísticos, se seleccionó el modelo que mejor representaba los datos experimentales, asegurando que la relación establecida fuera significativa y que las predicciones fueran confiables. Este enfoque permitió tomar decisiones basadas en evidencia cuantitativa y mejorar la precisión del modelo para su aplicación en el contexto de estudio.

Considerando el ajuste del modelo de transferencia de calor a las pruebas experimentales, se obtuvo que el Caso 15 representó el modelo con el mejor ajuste, con un tiempo de regresión de 360 min, un paso en el tiempo de 3, con un total de 363 coeficientes. Como se puede observar en la Tabla B.1. el modelo no fue el que obtuvo el menor tiempo de cómputo, sin embargo, fue el que obtuvo

los mejores datos estadísticos. Este modelo obtuvo un  $R^2$  de 0.985, una relación de 719.822, un valor p de 0, un MSE de 9.727 y un EEE de 2.981. En la Tabla B.2 se presentan los coeficientes de ajuste del modelo seleccionado.

**Tabla B.1.**

*Datos estadísticos de P4 con el modelo de transferencia de calor bajo diferentes condiciones*

Tiempo de la regresión (min)	Paso de tiempo	No. coeficientes	$T_{\text{computo}}$ (seg)	$R^2$	Relación significativa (F)	p	Varianza de error (MSE)	EEE
120	3	123	16.977	0.981	1856.881	0	11.987	3.414
	5	75	16.000	0.979	2788.954	0	13.141	3.595
	10	39	15.368	0.968	3524.594	0	20.144	4.469
	60	9	14.959	0.924	7017.686	0	47.318	6.873
240	3	243	18.063	0.984	1025.303	0	10.679	3.175
	60	15	16.508	0.944	5259.821	0	35.295	5.931
360	3	363	17.475	0.985	719.822	0	9.727	2.981
	60	21	15.057	0.956	4566.951	0	27.265	5.209

*Nota.* La tabla muestra los datos estadísticos obtenidos en la Prueba 4, a partir del modelo de transferencia de calor bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo parámetros comparativos utilizados para evaluar el ajuste y la variabilidad de los resultados. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla B.2.**

*Coefficientes para las variables  $I_{sol}$ ,  $T_{si}$  y  $T_{oe}$  para el Caso 15*

Coefficiente	Valor del coeficiente	Coefficiente	Valor del coeficiente	Coefficiente	Valor del coeficiente
$a_0$	-0.00038515	$b_0$	0.03353763	$c_0$	-0.62224638
$a_3$	0.00178461	$b_3$	-0.03562707	$c_3$	0.66021085
$a_6$	0.00370175	$b_6$	-0.03163053	$c_6$	-0.65868769
$a_9$	-6.8057E-06	$b_9$	0.00355519	$c_9$	0.70057687
$a_{12}$	-0.00011467	$b_{12}$	-0.09061839	$c_{12}$	-0.25468554
$a_{15}$	-0.00234294	$b_{15}$	-0.09672241	$c_{15}$	-0.06061582
$a_{18}$	-0.00261193	$b_{18}$	-0.12136862	$c_{18}$	-1.53814331

a21	0.00056958	b21	-0.10915394	c21	1.02559926
a24	0.00093175	b24	-0.14120229	c24	0.41510716
a27	0.00127638	b27	-0.19990621	c27	-0.25341759
a30	0.00388652	b30	-0.09170691	c30	0.44580506
a33	-0.00187569	b33	-0.2228273	c33	-1.25589254
a36	0.00089265	b36	-0.24064205	c36	0.04179262
a39	-0.00455256	b39	-0.2271558	c39	-0.42016808
a42	-0.00324409	b42	-0.24696314	c42	1.77574391
a45	0.0011895	b45	-0.2979589	c45	-1.08044152
a48	0.00495913	b48	-0.29357982	c48	0.56043771
a51	0.00228558	b51	-0.24688629	c51	-0.34595984
a54	0.00014201	b54	-0.32937596	c54	-0.66353121
a57	-0.00200057	b57	-0.34057075	c57	0.1387053
a60	-0.00168535	b60	-0.41031732	c60	-0.06343309
a63	-0.00276235	b63	-0.3499087	c63	0.74055999
a66	0.00187969	b66	-0.38796053	c66	-0.72113354
a69	0.00182574	b69	-0.38250577	c69	0.29743298
a72	-8.2992E-05	b72	-0.34435078	c72	-0.09920587
a75	2.9469E-05	b75	-0.408874	c75	-0.13248519
a78	0.00517684	b78	-0.43183691	c78	-0.61835305
a81	-0.00584118	b81	-0.43710827	c81	-0.14347357
a84	0.0010753	b84	-0.41050079	c84	0.76485438
a87	-0.00306519	b87	-0.41710993	c87	-0.47495109
a90	0.00057277	b90	-0.35906581	c90	-0.94266474
a93	-4.1131E-05	b93	-0.38790382	c93	0.18628088
a96	0.00276868	b96	-0.43082232	c96	1.01232548
a99	-0.00156309	b99	-0.4221809	c99	0.20293443
a102	0.00355424	b102	-0.47095275	c102	-0.95523705
a105	-0.00018048	b105	-0.35889895	c105	0.80738357
a108	8.8684E-05	b108	-0.36009708	c108	-0.54354927
a111	-0.00253326	b111	-0.38342815	c111	0.18206575
a114	-0.00342108	b114	-0.38872038	c114	-1.96275637
a117	0.00220025	b117	-0.3211059	c117	0.85850972
a120	0.00486051	b120	-0.31276923	c120	1.30243366

a123	0.00017735	b123	-0.30407634	c123	-0.3789478
a126	0.00071235	b126	-0.34367531	c126	0.13913093
a129	0.00021703	b129	-0.25309118	c129	-1.23563532
a132	0.00014413	b132	-0.20025889	c132	0.96981234
a135	-0.00591222	b135	-0.2721501	c135	-1.65038256
a138	-0.00042561	b138	-0.18959484	c138	1.22680739
a141	0.00339379	b141	-0.17239695	c141	-0.31198171
a144	0.00367734	b144	-0.17405279	c144	0.23236566
a147	-0.00181397	b147	-0.14262398	c147	0.12408871
a150	-0.00183791	b150	-0.04607688	c150	-0.67416062
a153	-0.00156068	b153	-0.07859057	c153	0.79391331
a156	0.00400353	b156	-0.0844284	c156	0.08254252
a159	-0.00084148	b159	-0.06438979	c159	0.42588928
a162	0.0015762	b162	0.04402612	c162	-1.42596207
a165	-0.00082023	b165	0.01786647	c165	0.497803
a168	0.00047585	b168	0.00609723	c168	-0.48055771
a171	0.00068434	b171	0.0930578	c171	0.84535233
a174	-0.00398858	b174	0.09650831	c174	-0.57898219
a177	-0.00269096	b177	0.1171096	c177	0.02711797
a180	0.00110669	b180	0.17391726	c180	0.66670435
a183	0.00072096	b183	0.19644614	c183	-0.10342427
a186	0.0046308	b186	0.09825763	c186	-0.634744
a189	-0.00171108	b189	0.22844281	c189	1.02119003
a192	0.0003796	b192	0.26316193	c192	-1.45021428
a195	-0.00254284	b195	0.28750568	c195	1.58584415
a198	0.00112922	b198	0.22799248	c198	-1.23569182
a201	-0.00508794	b201	0.32064868	c201	-0.07839935
a204	0.00174087	b204	0.3414174	c204	0.61599946
a207	-0.00080944	b207	0.3262537	c207	0.01626469
a210	0.00390085	b210	0.32057858	c210	0.27471746
a213	0.00089021	b213	0.4022925	c213	-0.32370961
a216	0.00089584	b216	0.37938923	c216	0.11011413
a219	-0.0039234	b219	0.39245837	c219	-0.5864185
a222	0.00065706	b222	0.35833066	c222	0.25353723

a225	-0.0011307	b225	0.46056008	c225	0.71066072
a228	-0.00244013	b228	0.3327773	c228	-1.4647935
a231	-0.00117025	b231	0.43122812	c231	0.78438415
a234	-0.00200088	b234	0.45440703	c234	0.67919917
a237	0.0040512	b237	0.40174663	c237	-0.13050751
a240	0.00041415	b240	0.41779877	c240	-0.38304129
a243	-0.00328735	b243	0.44105525	c243	0.95679211
a246	0.00206633	b246	0.31237332	c246	-0.26134132
a249	-0.00068311	b249	0.45789588	c249	-0.30964284
a252	-0.00013467	b252	0.36851317	c252	-0.28308277
a255	-0.00024856	b255	0.34402631	c255	-0.05317637
a258	0.00027202	b258	0.41609044	c258	0.76352656
a261	0.00234722	b261	0.32705763	c261	-0.59368725
a264	-0.00445835	b264	0.30476267	c264	-0.55325445
a267	-0.00260818	b267	0.28858345	c267	-0.57327401
a270	-0.00132195	b270	0.28848187	c270	0.90728175
a273	-0.00410808	b273	0.23983889	c273	-0.0919966
a276	-0.00180516	b276	0.23951197	c276	-0.09365787
a279	0.00413607	b279	0.21396543	c279	1.63476574
a282	0.00092958	b282	0.18888485	c282	-0.72583269
a285	-0.00092773	b285	0.09634113	c285	-1.17121935
a288	-0.0008358	b288	0.12057211	c288	-0.02916697
a291	-0.00181617	b291	0.1746181	c291	0.49164945
a294	0.00196771	b294	0.02496363	c294	0.16472426
a297	-0.00371626	b297	0.03842473	c297	0.10375878
a300	0.00098156	b300	0.02780737	c300	-0.4144245
a303	0.00171661	b303	-0.05515503	c303	0.76176864
a306	0.00103381	b306	0.01737176	c306	-0.22801787
a309	-0.00422086	b309	-0.07619984	c309	-1.66156605
a312	-0.00327817	b312	-0.06696357	c312	1.5112201
a315	-2.0392E-05	b315	-0.10888264	c315	-1.48299995
a318	-6.5467E-05	b318	-0.16401442	c318	1.54752676
a321	-0.00325975	b321	-0.24071711	c321	-0.79911761
a324	0.00112275	b324	-0.13476787	c324	0.50098002

a <sub>327</sub>	0.00065512	b <sub>327</sub>	-0.12384634	c <sub>327</sub>	-0.17654845
a <sub>330</sub>	-0.00047959	b <sub>330</sub>	-0.21579693	c <sub>330</sub>	-0.21321683
a <sub>333</sub>	-0.00220144	b <sub>333</sub>	-0.1876302	c <sub>333</sub>	0.28165423
a <sub>336</sub>	-0.00064581	b <sub>336</sub>	-0.20224611	c <sub>336</sub>	0.60814845
a <sub>339</sub>	0.00398025	b <sub>339</sub>	-0.29032247	c <sub>339</sub>	-0.73066303
a <sub>342</sub>	-5.1309E-05	b <sub>342</sub>	-0.20695834	c <sub>342</sub>	-0.59317688
a <sub>345</sub>	-0.00168248	b <sub>345</sub>	-0.10413989	c <sub>345</sub>	0.39756252
a <sub>348</sub>	0.00062828	b <sub>348</sub>	-0.09436432	c <sub>348</sub>	0.24858651
a <sub>351</sub>	0.00085384	b <sub>351</sub>	-0.06472546	c <sub>351</sub>	-0.33058031
a <sub>354</sub>	-0.00294666	b <sub>354</sub>	0.09314533	c <sub>354</sub>	-0.53490248
a <sub>357</sub>	0.00072602	b <sub>357</sub>	0.17550291	c <sub>357</sub>	0.37808691
a <sub>360</sub>	0.00094971	b <sub>360</sub>	5.6743022	c <sub>360</sub>	0.57332717

*Nota.* La tabla presenta los coeficientes obtenidos para las variables de irradiancia solar, temperatura superficial interior y temperatura ambiente exterior correspondientes al Caso 15, empleados en el análisis y ajuste del modelo de transferencia de calor. Fuente: Elaboración propia.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

## **Anexo C**

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

**Tabla C.1.***Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional*

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
<b>Título de Tesis:</b>	Estudio del efecto de un sistema de edificación térmicamente activado sobre las condiciones de confort térmico en viviendas
<b>Autores de la Tesis:</b>	M.C.I. María Magdalena Villar Ramos Dra. Karla María Aguilar Castro
<b>ORCID:</b>	0000-0002-4085-7733 0000-0003-2611-2820
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>En este estudio se evaluó térmicamente un techo con intercambiador de calor embebido, conocido como Sistema de Construcción Térmicamente Activado (TABS), mediante un análisis teórico-experimental con el propósito de reducir el consumo de energía eléctrica y mejorar el confort térmico en edificaciones. Se diseñó y construyó un módulo experimental para cuantificar el flujo de calor en tres configuraciones de techo: TABS con recirculación de agua (L-TABS), techo con circulación de aire (L-AIR) y una muestra de referencia (L-REF). El análisis incluyó simulaciones térmicas y estructurales para definir parámetros de diseño como el diámetro, separación y profundidad de los tubos, así como el tipo y caudal del fluido, utilizando Matlab® y herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD). A partir de estos análisis se definió un modelo estructural seguro y eficiente, empleando concreto reforzado, material estructural y considerando las normas para concreto estructural. Posteriormente, se realizaron ensayos experimentales instrumentados mediante un prototipo experimental diseñado con una cámara calorimétrica móvil y un sistema de acondicionamiento de aire para</p>

	<p>medir temperatura, flujo de calor, humedad relativa e irradiancia solar. Los resultados mostraron que el sistema TABS redujo la temperatura interior de la losa hasta en 28°C y disminuyó el flujo de calor interior hasta en 185.6 W·m<sup>-2</sup> respecto al sistema convencional. Con base en los datos obtenidos, se desarrolló y validó un modelo global de transferencia de calor con un ajuste superior al 97%, el cual se acopló a una vivienda tipo en EnergyPlus para evaluar su desempeño anual en seis climas representativos de México. Los resultados evidenciaron reducciones en las cargas de enfriamiento, el consumo eléctrico, las emisiones de CO<sub>2</sub> y los costos energéticos. De forma cuantitativa, las emisiones mensuales de CO<sub>2</sub> presentaron valores máximos en climas cálido-húmedos, alcanzando hasta 2517.42 kg, mientras que los valores mínimos se registraron en meses templados, con emisiones cercanas a 25.45 kg. Estos resultados confirman el impacto de las condiciones climáticas en el consumo energético y en las emisiones asociadas, concluyendo que los techos con intercambiadores embebidos representan una alternativa viable y sostenible para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en viviendas.</p>
<b>Palabras claves de la Tesis:</b>	TABS, Confort térmico, Modelo Global, EnergyPlus, Eficiencia Energética.
<b>Referencias citadas:</b>	Ver página 120 a 127.