



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico

Tesis de maestría

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN TECHO VENTILADO ELABORADO CON FIBRA DE COCO”

Presentada por

Ing. Alexa Iomara Estrada Zuñiga

Como requisito para la obtención del grado de

Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis

Dr. Efraín Simá Moo

Codirector de tesis

Dra. Yvonne Chávez Chena

Cuernavaca, Morelos a junio del 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLOGÍA
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor., 16/junio/2025

Oficio No. SAC/140/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ALEXA IOMARA ESTRADA ZUÑIGA
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

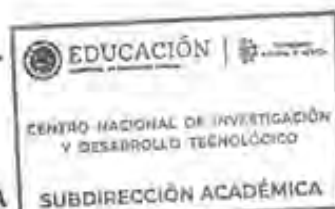
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Estudio experimental de un techo ventilado elaborado con fibra de coco", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lrtiz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., 29/mayo /2025

OFICIO No. DIM/073/2025

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Alexa Iomara Estrada Zuñiga con número de control M23CE022, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Estudio experimental de un techo ventilado elaborado con fibra de coco" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Efraín Simá Moo
Director de tesis

Dra. Yvonne Chávez Chena
Codiector de tesis

Dr. Jesús Arce Landa
Revisor 1

Dr. Miguel Ángel Chagolla A.
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2108,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet



Dedicatoria

A Dios, por guiarme y acompañarme en cada paso de este camino. Su presencia me ha dado luz en los desafíos.

A mi familia, mi mayor fortaleza y motivo de inspiración. Su amor, apoyo incondicional y confianza en mí han sido fundamentales para alcanzar este logro. Esto es para ustedes.

Agradecimientos

Antes que nada, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), antes CONAHCYT, por el respaldo financiero que permitió llevar a cabo este proyecto. Su apoyo ha sido un pilar para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco al Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por haber sido mi hogar académico durante esta etapa. Su apoyo, recursos y el entorno de aprendizaje que ofrece hicieron posible este trabajo y mi crecimiento profesional.

Agradezco al Dr. Efraín Simá Moo por permitirme llevar a cabo este trabajo de investigación y por la valiosa orientación a lo largo de todo el proceso. Sus comentarios y sugerencias, tanto en el ámbito profesional como personal, fueron muy importantes para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco al Dr. Rafael Alavéz Ramírez por brindarnos el apoyo al proporcionarnos el material de trabajo durante el desarrollo de este estudio, su disposición y colaboración fueron fundamentales para la realización de las actividades.

A mis revisores, la Dra. Yvonne Chávez Chena, el Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda, el Dr. Jesús Arce Landa y la Dra. Samanta López Salazar, por su tiempo, dedicación y valiosas observaciones que realizaron para mejorar y enriquecer la calidad de mi investigación.

A los doctores que me impartieron clase durante mi maestría por su valioso conocimiento y enseñanza. En especial, quiero expresar mi agradecimiento a la Lic. Patricia Armas, una bella persona, quien brindó un gran apoyo tanto en el ámbito académico como personal.

A Jesús, quien ha sido mi mayor apoyo en este camino. Tu comprensión y amor me ayudaron a superarme y seguir adelante, el camino no ha sido fácil, pero juntos alcanzaremos el éxito.

A mis compañeros de maestría por su apoyo, las risas compartidas y los valiosos consejos, que hicieron de este recorrido una experiencia inolvidable.

Por último, y con el mayor de los agradecimientos, a mis padres y hermanos, quienes son mi todo. Su amor incondicional, su apoyo constante y su confianza en mí fueron la fuerza que me impulsó a recorrer este camino. Han sido mi pilar en cada desafío y mi mayor motivación para seguir adelante. Además, con cariño a mis mascotas que partieron durante mi maestría; su amor y compañía siempre estarán en mi corazón.

Contenido

Contenido	I
Lista de Figuras	III
Lista de Tablas	VII
Nomenclatura.....	VIII
Símbolos	VIII
Acrónimos	XI
Resumen	XII
Abstract.....	XIII
1 CAPÍTULO 1 Introducción.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Revisión de la literatura	4
1.4 Objetivos.....	10
1.4.1 General.....	11
1.4.2 Específicos.....	11
1.5 Alcance	11
1.6 Estructura de la tesis	11
2 CAPÍTULO 2 Marco teórico.....	13
2.1 Modelo físico de una vivienda.....	13
2.2 Tipos de techo	15
2.2.1 Techo de concreto tradicional.....	15
2.2.2 Techo compuesto con fibras naturales.....	16
2.2.3 Cubiertas.....	17
2.2.4 Techos ventilados	18
2.3 Mecanismos de transferencia de calor	20
2.3.1 Conducción.....	21
2.3.2 Convección	23
2.3.3 Radiación.....	24
2.4 Balance de energía en la edificación	26
2.5 Softwares de simulación	37

2.6	Consideraciones para la simulación en evolución libre y con HVAC.....	38
2.7	BESTest 600	40
2.8	Indicadores de desempeño térmico	42
3	CAPÍTULO 3 Construcción e instrumentación	51
3.1	Diseño y descripción.....	51
3.2	Construcción.....	52
3.3	Configuración.....	53
3.4	Instrumentación.....	53
3.5	Pruebas	58
4	CAPÍTULO 4 Simulación energética.....	65
4.1	Simulación energética	65
4.2	Datos meteorológicos y detalles del sitio	65
4.3	Módulos experimentales para la simulación	68
4.4	Desarrollo de geometrías de los módulos experimentales	68
4.5	Estudio comparativo.....	71
5	CAPÍTULO 5 Simulación de vivienda.....	85
5.1	Vivienda residencial.....	85
5.2	Análisis de desempeño de la vivienda evolución libre	90
5.3	Análisis de desempeño de la vivienda con cargas de enfriamiento, demanda energética y emisiones de CO ₂	102
5.3	Análisis de costos	104
6	CAPÍTULO 6 Conclusiones y recomendaciones	109
5.4	Conclusiones.....	109
5.5	Recomendaciones.....	110
7	Referencias	111
8	Apéndice.....	120

Lista de Figuras

Figura 1.1 a) Techos verdes, b) recubrimientos reflectivos, c) techos compuestos, d) techo con material de baja conductividad térmica, e) fibra ecoaislante, f) techo ventilado.....	3
Figura 2.1 Mecanismos de transferencia de calor que intervienen entre el aire interior de la habitación, los elementos de la envolvente y el ambiente exterior: (a) modelo físico de un muro, (b) corte transversal a lo largo del eje este - oeste, (c) corte transversal a lo largo del eje norte - sur, (d) modelo físico de una losa de concreto.	15
Figura 2.2 Modelo físico de un techo tradicional.....	16
Figura 2.3 Techo con cubierta de fibras naturales[68].	17
Figura 2.4 Vivienda con paneles multicapa[69].	17
Figura 2.5 Modelo físico de una cubierta de lámina con relleno de fibra de coco.....	18
Figura 2.6 Modelo físico de un techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.....	20
Figura 2.7 Intercambio energético en la edificación.	28
Figura 2.8 Balance de calor en las zonas térmicas.....	30
Figura 2.9 Modelo matemático de la cubierta con fibra de coco.	32
Figura 2.10 Modelo matemático del techo ventilado de lámina con fibra de coco.....	33
Figura 2.11 Diagrama de flujo del proceso de la simulación.	39
Figura 2.12 Geometría y dimensiones de los casos (a) 600, (b) 610 y (c) 620.	41
Figura 3.1 Losa de concreto del módulo experimental.	51
Figura 3.2 Composición del módulo de pruebas experimentales.....	52
Figura 3.3 Construcción de los módulos experimentales.....	52
Figura 3.4 Módulos terminados para la fase de instrumentación.....	52
Figura 3.5 Distribución de los sensores de medición en los módulos experimentales: a) techo de concreto, b) techo con cubierta de lámina con relleno de fibra de coco, c) techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.	54
Figura 3.6 Distribución de los sensores sobre la placa Arduino MEGA para almacenamiento de datos.	55
Figura 3.7 Distribución de los módulos experimentales en la cubierta del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus mecánica.	56

Figura 3.8 Diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos en Arduino.	56
Figura 3.9 Colocación de los sensores de temperatura sobre las superficies del módulo experimental, y posicionamiento de la losa sobre los módulos experimentales.	57
Figura 3.10 Configuraciones de techo: a) módulo de referencia, b) cubierta de lámina, c) cubierta de lámina con relleno de fibra de coco, d) techo ventilado de lámina d) techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.	58
Figura 3.11 Sensores al centro del canal del aire de: a) techo ventilado de lámina, b) techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.	58
Figura 3.12 Módulos experimentales con sus puntos de análisis para el estudio: a) techo de referencia (TC), b) cubierta de lámina (CL), c) cubierta de lámina con relleno de fibra de coco (CLC), d) techo ventilado de lámina (TVL) y e) techo de lámina con relleno de fibra de coco (TVLC).	59
Figura 3.13 Temperaturas experimentales de los puntos de estudio para las configuraciones de cubierta: a) temperaturas superficiales externas, b) temperaturas superficiales internas de la losa de concreto, c) temperaturas del aire al interior del módulo experimental.	61
Figura 3.14 Temperaturas experimentales de los puntos de estudio para las tres configuraciones de techo ventilado: a) temperaturas superficiales externas, b) temperatura superficiales internas de la losa de concreto, c) temperaturas del aire al interior del módulo experimental.	63
Figura 4.1 Condiciones climatológicas para la simulación energética de módulos y vivienda correspondientes al periodo del 27 de abril al 2 de mayo del presente año: a) temperatura, b) radiación solar, c) velocidad del viento, d) humedad relativa.	66
Figura 4.2 Condiciones climatológicas para la simulación energética de los módulos y vivienda correspondientes al periodo del 10 al 14 de octubre del presente año: a) temperatura, b) radiación solar, c) velocidad del viento, d) humedad relativa.	67
Figura 4.3 Geometrías del módulo con: a) cubierta de lámina y coco y b) techo ventilado de lámina y fibra de coco.	69
Figura 4.4 Elaboración y edición de la cubierta de lámina con coco.	70
Figura 4.5 Elaboración y edición del techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.	70

Figura 4.6 Geometrías de los módulos experimentales en Design Builder: a) cubiertas, b) techos ventilados.	71
Figura 4.7 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo de referencia en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.....	73
Figura 4.8 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo con cubierta de lámina en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la lámina, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.	75
Figura 4.9 Temperaturas experimentales y simuladas de la cubierta de lámina con relleno de fibra de coco en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.....	77
Figura 4.10 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo de referencia en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.....	79
Figura 4.11 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo con techo ventilado de lámina en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.	81
Figura 4.12 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo con techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.	83
Figura 5.1 Planos de la vivienda en: a) planta baja, b) planta alta.	86
Figura 5.2 Fachadas de la vivienda: a) sur, b) norte.....	86
Figura 5.3 Fachadas de la viviendas a) norte, b) sur.	87
Figura 5.4 Vista de la vivienda en a) planta alta y b) planta baja.	87
Figura 5.5 Vivienda con losa de concreto tradicional (referencia).....	88
Figura 5.6 Vivienda con techo ventilado de lámina.	88
Figura 5.7 Vivienda con techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.....	88
Figura 5.8 Techo ventilado de las viviendas a 1° de inclinación.....	89
Figura 5.9 Periodo de simulación.....	89
Figura 5.10 Paso de tiempo de las simulaciones.....	89

Figura 5.11 Temperaturas de confort térmico y desempeño de las viviendas con diferentes configuraciones de techo en: a) planta alta y b) planta baja.....	91
Figura 5.12 Temperaturas durante la temporada más cálida de VR, CL, CLC, TVL y TVLC en: a) planta alta y b) planta baja.....	94
Figura 5.13 Temperaturas durante la temporada fría de VR, CL, CLC, TVL y TVLC en: a) planta y b) planta baja.....	96
Figura 5.14 Distribución del confort, refrigeración y calefacción de las configuraciones en la temporada cálida en: a) planta alta y b) planta baja.....	98
Figura 5.15 Distribución del confort, refrigeración y calefacción de las configuraciones en la temporada fría en: a) planta alta y b) planta baja.....	100
Figura 5.16 Distribución anual del confort, refrigeración y calefacción de las configuraciones en: a) planta alta y b) planta baja.....	101
Figura 5.17 Cargas de enfriamiento, demanda energética y emisiones de CO ₂ de las configuraciones de techo.	103
Figura 5.18 Planos de la modificaciones para las configuraciones de techo.....	105
Figura 5.19 Emisiones de CO ₂ de las configuraciones.....	108

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Propiedades conductivas de los materiales.....	22
Tabla 2.2 Valores convectivos exteriores e interiores de techo, muro y suelo de concreto.....	23
Tabla 2.3 Propiedades de pintura blanca [88][89].....	26
Tabla 2.4 Detalles de construcción de las ventanas de doble hoja para los casos 600's y simulación de vivienda.	26
Tabla 2.5 Resultados y comparación de los resultados de los casos 600's con respecto a ANSI/ASHRAE 140/2011.	41
Tabla 4.1 Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del de referencia.....	73
Tabla 4.2. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio de la cubierta de lámina.	75
Tabla 4.3. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio de la cubierta de lámina con relleno de fibra de coco.....	77
Tabla 4.4. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del techo de referencia.	79
Tabla 4.5. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del techo ventilado de lámina.	81
Tabla 4.6. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del techo de lámina con relleno de fibra de coco.....	83
Tabla 5.1. Temperaturas mensuales de planta alta y planta baja de las configuraciones de techo.....	92
Tabla 5.2. Distribución de costos para diferentes configuraciones de techo.....	107

Nomenclatura

q_{conv}	Flujo de calor convectivo $Wm^{-2}K^{-1}$	T_{inve}	Temperatura interna de la ventana °C
q_{cond}	Flujo de calor conductivo $Wm^{-1}K^{-1}$	T_{cto}	Temperatura del cuarto °C
q_{rad}	Flujo de calor radiativo Wm^{-2}	C_p	Calor específico $Jkg^{-1}K^{-1}$
G	Radiación solar Wm^{-2}	k	Conductividad $Wm^{-1}K^{-1}$
V_{viento}	Velocidad del viento ms^{-1}	R	Resistencia térmica $m^{-2}KW^{-2}$
T_o	Temperatura ambiente °C	h_c	Coeficiente convectivo $Wm^{-2}K^{-1}$
T_{sky}	Temperatura del cielo °C		
T_{inte}	Temperatura interna del techo °C	T_{so}	Temperatura superficial externa de la losa de concreto o lámina °C
T_{inmu}	Temperatura interna del muro °C	T_{si}	Temperatura superficial interna de losa de concreto °C
T_{insu}	Temperatura interna del suelo °C	T_{in}	Temperatura del aire al interior del módulo °C
V_{vto}	Velocidad del viento ms^{-1}	T_{amb}	Promedio mensual de la temperatura ambiente exterior °C
I_T	Radiación total Wm^{-2}	I_{bT}	Radiación total directa Wm^{-2}
I_{gT}	Radiación reflejada Wm^{-2}	I_{dT}	Radiación difusa Wm^{-2}
q''_{sol}	Radiación solar Wm^{-2}	q''_{LWR}	Radiación de onda larga térmica Wm^{-2}
$q''_{con,e}$	Transferencia por convección con el aire exterior $Wm^{-2}K^{-1}$	q''_{ko}	Flujo de calor por conducción $Wm^{-1}K^{-1}$
q''_{sw}	Radiación de onda corta Wm^{-2}	$q''_{con,i}$	Flujo de calor convectivo en el nodo de aire $Wm^{-2}K^{-1}$
q''_{LWS}	Radiación térmica emitida de equipos eléctricos Wm^{-2}	q''_{LWX}	Transferencia de calor por radiación en superficies internas Wm^{-2}
q''_{ki}	Flujo de calor por conducción en elementos constructivos $Wm^{-1}K^{-1}$	A_i	Área de las superficies m^2
$F_{i,j}$	Factor de vista entre superficies i y j	$T_i^4 - T_j^4$	Temperaturas de las superficies involucradas en la transferencia de calor °C
$C_z \frac{dT_z}{dt}$	Energía almacenada del aire de la zona térmica J	q''_{conv}	Cargas convectivas generadas de equipos W
T_{eq}	Diferencia de temperatura entre el equipo °C	T_{az}	Temperatura del aire de la zona °C
q_{surf}	Transferencia de calor por convección de superficies internas y el aire de la zona $Wm^{-2}K^{-1}$	h_i	Coeficiente convectivo interior $Wm^{-2}K^{-1}$

T_{surf}	Temperatura de la superficie °C	q''_{zonas}	Transferencia de calor entre zonas adyacentes en aberturas $Wm^{-2}K^{-1}$
$\dot{m}_i$	Flujo masico del aire kg/s^{-1}	T_{z1}	Diferencia de temperatura entre la zona 1 °C
T_{z2}	Diferencia de temperatura entre la zona 2 °C	q''_{inf}	Transferencia de calor de infiltración del aire exterior $Wm^{-2}K^{-1}$
$\dot{m}_{inf}$	Flujo masico de aire infiltrado kg/s^{-1}	T_{dei}	Diferencia de temperatura entre el aire exterior o interior °C
q''_{sys}	Energía térmica suministrada del sistema HVAC kWh	$\dot{m}_{sys}$	Caudal masico del aire del HVAC kg/s^{-1}
T_{suin}	Diferencia de temperatura entre el aire de suministro	$q''_{\alpha sol}$	Flujo de calor por radiación directa y difusa Wm^{-2}
q''_{conv}	Flujo de calor por convección exterior $Wm^{-2}K^{-1}$	h_{coex}	Coefficiente de convección exterior $Wm^{-2}K^{-1}$
A	Área de la superficie m^2	T_{air}	Temperatura del aire exterior °C
q''_{sky}	Intercambio radiativo Wm^{-2}	F_{gnd}	Factor de vista de la superficie externa a la superficie del suelo
F_{sky}	Factor de vista de la superficie externa del cielo	F_{air}	Factor de vista de la superficie externa del aire
T_{gnd}	Temperatura de la superficie del suelo	A_n	Ángulo de incidencia de los rayos del sol °
S	Área de la superficie m^2	S_s	Área soleada de la superficie m^2
I_b	Intensidad de la radiación solar directa Wm^{-2}	I_s	Intensidad de la radiación difusa Wm^{-2}
I_g	Intensidad de la radiación difusa reflejada por el suelo Wm^{-2}	F_{ss}	Factor de vista entre la superficie y el cielo
F_{sg}	Factor de vista entre la superficie y el suelo	Q_{ento}	Carga de enfriamiento kWh
Q_{gas}	Ganancia térmica solar Wm^{-2}	Q_{gasin}	Ganancias térmicas internas Wm^{-2}
Q_{vent}	Ganancia o pérdida de calor debidas a la ventilación Wm^{-2}	Q_{alte}	Almacenamiento térmico kWh
Q_{cale}	Carga térmica de calefacción kWh	Q_{inf}	Pérdidas de calor por infiltración de aire kWh
Q_{tran}	Pérdidas de calor por transmisión kWh	Co_{tal}	Consumo total de energía kWh
Q_{ter}	Cargas térmicas de calefacción o refrigeración kWh	η_{sis}	Eficiencia de cada sistema o equipo individual kWh
U	Coefficiente global de transferencia de calor	R_{total}	Resistencia térmica total del sistema constructivo m^2KW^{-1}
R_{int}	Resistencia térmica de la capa interna m^2KW^{-1}	di	Espesor de cada capa del material m
ki	Conductividad térmica del material $Wm^{-1}K^{-1}$	R_{ext}	Resistencia térmica de la capa externa m^2KW^{-1}

k	Conductividad térmica del material $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	d	Espesor del material m
T_c	Temperatura de confort $^{\circ}\text{C}$	T_o	Temperatura media exterior $^{\circ}\text{C}$
Fac_{emi}	Factor de emisiones CO_2/kWh	emi_{CO_2}	Emisión de CO_2
$ener_{con}$	Energía consumida kWh	Q	Flujo de calor $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
T_{int}	Temperatura interior $^{\circ}\text{C}$	T_{ext}	Temperatura exterior $^{\circ}\text{C}$
y	Valores simulados	x	Valores experimentales
n	Número de datos		
Símbolos griegos			
ρ^*	Reflectancia	σ	Constante de Stefan- Boltzmann $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
α^*	Absortancia	τ	Espesor m
ε	Emitancia	ρ	Densidad kgm^{-3}
μ	Viscosidad del aglutinante Pa s^{-1}		

Acrónimos

TC	Techo de concreto
VR	Vivienda de referencia
CL	Cubierta de lámina
CLC	Cubierta de lámina con relleno de fibra de coco
TVL	Techo ventilado de lámina
TVLC	Techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco
CENIDET	Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
PCM	Material de cambio de fase
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado

Resumen

En el presente trabajo de tesis se rediseño, construyó y evaluó experimentalmente el comportamiento térmico de un techo ventilado ligero con una cubierta de fibra de coco (TVLC), con el objetivo de analizar su impacto en el confort térmico, la demanda de energía y las emisiones de dióxido de carbono en edificaciones residenciales.

Para ello, se rediseñaron, construyeron e instrumentaron tres módulos experimentales en dos fases. En la primera, se evaluaron dos cubiertas: una cubierta de lámina (CL) y otra de lámina con relleno de fibra de coco (CLC), mientras que el tercer módulo, utilizado como referencia, contó con una losa de concreto (TC). En la segunda fase, se implementaron los techos ventilados, uno de lámina (TVL) y el otro de lámina con relleno de fibra de coco (TVLC). Estos incorporaron un canal de aire de 0.2 m de altura con una inclinación de 5° respecto a la horizontal, con el objetivo de analizar su efecto en la ventilación y el comportamiento térmico. Tanto las cubiertas como los techos ventilados fueron comparados con el módulo de referencia, evaluando su desempeño bajo las condiciones climáticas de Cuernavaca, Morelos, México, caracterizadas por inviernos secos y templados, y veranos cálidos y húmedos. Posteriormente, los datos obtenidos fueron utilizados para validar la configuración en un software de simulación energética, lo que permitió extender el análisis a una edificación residencial.

Los resultados mostraron que la implementación del TVLC tuvo un impacto significativo en la reducción de temperaturas extremas en el interior de la edificación, logrando disminuir las máximas diurnas hasta 4.7 °C en comparación con la configuración de vivienda de referencia (VR). Los resultados obtenidos de eficiencia energética, emisiones y costos operativos fueron calculados de manera anual. En términos de eficiencia energética, el TVLC presentó menores cargas térmicas, con un valor de 3684.6 kWh, mientras que la VR registró 5434.4 kWh, evidenciando una mayor acumulación de calor. Esto se reflejó en la demanda eléctrica, donde el TVLC requirió 1473.8 kWh, mientras que la VR tuvo un consumo superior de 2173.7 kWh. Además, el TVLC mostró una reducción en las emisiones de CO₂, con un total de 0.64 tCO₂, en contraste con las 0.95 tCO₂ generadas por la VR, lo que representa una disminución del 32.6 % en la huella de carbono. Finalmente, en términos de costos operativos, la configuración TVLC presentó un costo de \$5635.6 \$/m², lo que representa un ahorro del 9.3 % en comparación con la configuración VR, cuyo costo fue de \$6214.8 \$/m².

Abstract

In this thesis, the thermal behavior of a lightweight ventilated roof with a coconut fiber cover (TVLC) was redesigned, built, and experimentally evaluated, with the aim of analyzing its impact on thermal comfort, energy demand, and carbon dioxide emissions in residential buildings.

To achieve this, three experimental modules were redesigned, constructed, and instrumented in two phases. In the first phase, two roof types were assessed: a conventional sheet metal roof (CL) and a sheet metal roof with coconut fiber insulation (CLC), while the third module, used as a reference, featured a concrete slab (TC). In the second phase, ventilated roofs were implemented: one with sheet metal (TVL) and the other with sheet metal and coconut fiber insulation (TVLC). These included a 0.2 m-high air channel with a 5° slope relative to the horizontal, in order to analyze its effect on ventilation and thermal behavior. Both the roof covers and ventilated roofs were compared to the reference module, evaluating their performance under the climatic conditions of Cuernavaca, Morelos, Mexico, characterized by dry and mild winters and warm, humid summers. The data collected were then used to validate the configuration in an energy simulation software, allowing for extended analysis in a residential building.

The results showed that the implementation of the TVLC had a significant impact on reducing extreme indoor temperatures, lowering daytime peaks by up to 4.7 °C compared to the reference housing configuration (VR). Energy efficiency, emissions, and operational costs were evaluated on an annual basis. In terms of energy efficiency, the TVLC exhibited lower thermal loads, with a value of 3684.6 kWh, while the VR configuration registered 5434.4 kWh, indicating greater heat accumulation. This was reflected in the electricity demand, where the TVLC required 1473.8 kWh, compared to the higher consumption of 2173.7 kWh in the VR. Furthermore, the TVLC showed a reduction in CO₂ emissions, with a total of 0.64 tCO₂, in contrast to the 0.95 tCO₂ generated by the VR, representing a 32.6% reduction in the carbon footprint. Finally, in terms of operational costs, the TVLC configuration presented a cost of \$5635.6 MXN/m², representing savings of 9.3% compared to the VR configuration, which reached \$6214.8 MXN/m².

Capítulo 1

Este capítulo presenta la definición del problema y una revisión bibliográfica, que incluye el análisis de trabajos experimentales, teóricos, teórico-experimentales y patentes. En este contexto, se abordaron temas relevantes como las fibras naturales, las cubiertas ecoaislantes y los techos ventilados. Además, se definen los objetivos, alcance y finalmente se presenta una descripción breve del contenido de este trabajo.

1.1 Introducción

En el periodo más reciente, el cambio climático ha causado gran preocupación por los efectos de las alteraciones inesperadas en la temperatura y el medio ambiente, debido al efecto de las acciones humanas sobre el aumento de temperatura en la atmósfera, el océano y la tierra. De acuerdo con un estudio en 2021, la temperatura global promedio aumentó en 1 °C, lo que muestra la diferencia entre las temperaturas medias registradas entre 2010 y 2019 [1]. A causa del cambio climático, la sociedad presenta inconvenientes al interior de las viviendas, además, algunos usuarios carecen de la información adecuada sobre el uso de materiales de construcción al momento de construir las edificaciones. Como resultado, las personas se han visto obligadas a recurrir a sistemas activos de climatización, lo que indica una falta de conciencia respecto a los impactos ambientales asociados con el uso de estos sistemas. Respecto al año 2016, el 40 % del consumo global de energía se constituyó por el sector de construcción, además, las emisiones totales de gases de efecto invernadero fueron de 33 %. En conclusión, se prevé que para 2040, los edificios se conviertan en la principal fuente de emisiones [2].

Por este motivo, con el propósito de reducir el consumo de energía en las edificaciones y una reducción de los gases de efecto invernadero, expertos a nivel mundial investigan diferentes estrategias de construcción pasivas, donde se aporta aislamiento. Cada vez se presta más atención a las estrategias que no requieren energía eléctrica, ya que se instalan o implementan exclusivamente en la envolvente del edificio. Ciertas estrategias pasivas son la utilización de paredes compuestas, recubrimientos reflectivos, acristalamientos múltiples, chimeneas solares, techos verdes y techos ventilados [3],[4] como se observan en la Figura 1.1.

De los sistemas que componen una vivienda, el techo es la parte más importante debido a que contribuye aproximadamente entre 31% y 55% del incremento total de calor dentro de una edificación [5]. Sin embargo, otros factores afectan la envolvente, como el diseño. Por lo tanto, es importante analizar detalladamente los criterios de rendimiento de la cubierta, ya que el uso incorrecto de materiales durante la construcción puede causar daños, como filtraciones de lluvia, durante la durabilidad del edificio. Por otro lado, la falta de mantenimiento y limpieza periódicos provoca que el techo sufra efectos negativos debido a las condiciones ambientales cambiantes, el viento y la radiación solar son elementos climáticos que influyen en el tipo, magnitud y alcance del daño en los componentes del techo [6]. Igualmente, el sobrecalentamiento urbano se ve favorecido por una mayor captación de energía solar, el uso de materiales de construcción que retienen el calor en áreas metropolitanas, y la disminución de la vegetación en las ciudades son otro de los motivos del aumento de temperatura y la demanda de energía.

Los techos representan entre el 20 y 25 % de la superficie total de cada ciudad, algunos estudios muestran que temperaturas extremas que estos presentan van desde los -46 a 110 °C [7],[8]. Cálculos realizados en diversas ciudades alrededor del mundo indican que el impacto energético global de las temperaturas urbanas elevadas puede alcanzar hasta 70 kWh/°C por persona. Además, la demanda máxima de electricidad se incrementa entre un 0.4 % y un 4.6 % por cada grado de aumento en la temperatura ambiental [9]. Por lo tanto, el tamaño, la forma, la ubicación y las características de los espacios influyen en el rendimiento térmico del techo [10].

De esta manera, con el propósito de mejorar el rendimiento térmico y la eficiencia energética de edificios comerciales, de servicios, públicos y residenciales, se han establecido e implementado regulaciones [11] y estrategias a través de la envolvente [12]. Algunas estrategias para la envolvente son los techos fríos, materiales de cambio de fase, cubiertas verdes, y cubiertas ecoaislantes. De manera que el aislamiento térmico de la envolvente no es solo una cuestión económica sino ambiental, es relevante el diseño de un método para optimizar tanto la economía como el medio ambiente [17]. Se prevé que las edificaciones resulten ecológicamente saludables para los habitantes, en la actualidad, los biocompuestos y fibras naturales se consideran el principal tipo de material para permitir la construcción de

edificios ecológicos [18]. Por consiguiente, las cubiertas son importantes en la gestión de cargas térmicas en climas fríos y cálidos [19]. Por esta razón, una envolvente mejorada reduce las demandas de energía térmica, aumenta la eficiencia y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero [20].

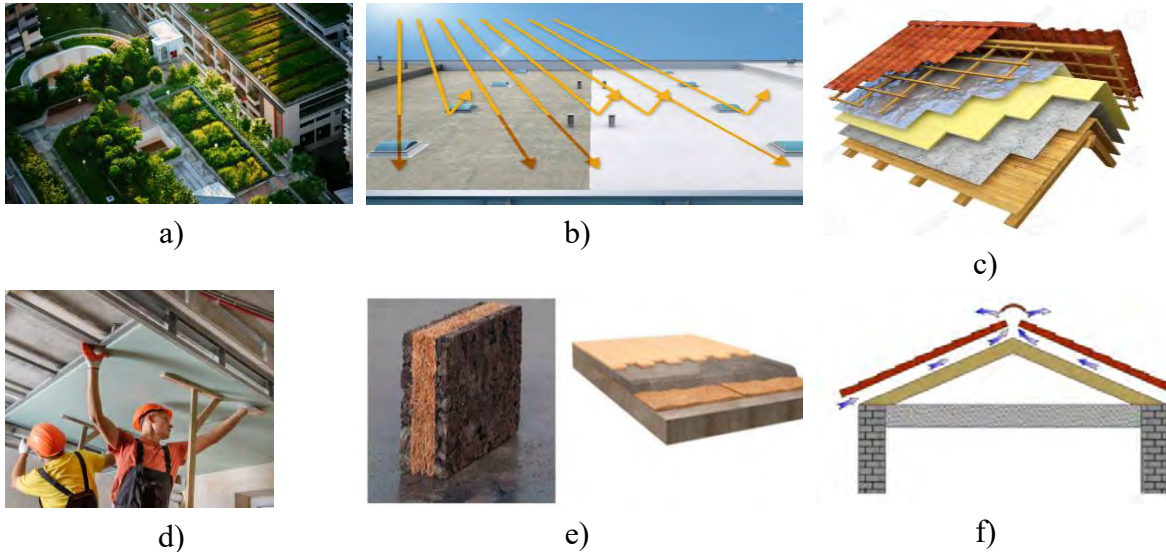


Figura 1.1 a) Techos verdes, b) recubrimientos reflectivos, c) techos compuestos, d) techo con material de baja conductividad térmica, e) fibra ecoaislante, f) techo ventilado.

1.2 Planteamiento del problema

En las últimas décadas, el aumento de las temperaturas a nivel global ha generado una creciente preocupación por el confort térmico en las edificaciones, especialmente en regiones con climas cálidos. Una parte considerable de la ganancia térmica en las viviendas ocurre a través del techo, lo que incrementa la demanda de energía para refrigeración y, por ende, el consumo eléctrico y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de las estrategias pasivas de mitigación térmica, los techos ventilados han demostrado ser eficaces al incorporar una cavidad de aire que reduce la transmisión de calor hacia el interior. Sin embargo, existe una oportunidad de mejora al combinar esta técnica con materiales naturales y sostenibles que posean propiedades aislantes, como la fibra de coco.

A pesar del potencial que representa el uso de materiales orgánicos en la construcción, existe poca información cuantitativa sobre el impacto real que tiene la fibra de coco en la reducción de cargas térmicas y consumo energético en techos ventilados ligeros.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo cuantificar el ahorro de energía térmica que puede alcanzarse mediante la implementación de TVLC, y comparar su desempeño térmico y energético con un TC. Lo anterior, con el propósito de evaluar su viabilidad como una solución pasiva de mejora para edificaciones ubicadas en climas cálidos.

Para abordar esta cuestión, se construyó y evaluó experimentalmente un TVLC en un módulo físico bajo condiciones reales. Posteriormente, se realizó una simulación energética en DesignBuilder acoplándolo a una vivienda, con el fin de analizar su desempeño térmico, demanda energética anual y emisiones de CO₂. Los resultados obtenidos fueron comparados con otras configuraciones, lo que permitió cuantificar los beneficios térmicos y energéticos del sistema propuesto.

1.3 Revisión de la literatura

Los techos ventilados han sido ampliamente estudiados debido a su capacidad para mejorar el confort térmico y la eficiencia energética en edificaciones. **Zingre et al. 2015** [21] analizaron techos reflectantes ventilados en comparación con techos de concreto tradicionales y techos ventilados no reflectantes, lo que se concluye que la reflectancia reduce la ganancia de calor en un 51 % y contribuye a un buen aislamiento térmico durante el día; sin embargo, limita la disipación de calor durante la noche. **Bianco et al. 2016** [22] demostraron que estos sistemas proporcionan condiciones térmicas e higrométricas óptimas durante el verano e invierno, lo que los convierte en una solución viable para la reducción de la carga térmica en climas diversos con un flujo mínimo de calor de 81 W/m². Posteriormente, **Bianco et al. 2018** [23] profundizaron en la influencia de los techos ventilados en edificaciones residenciales, destacando su impacto positivo en el confort térmico y el ahorro energético donde se analizaron tres configuraciones bidimensionales mediante Ansys-Fluent y obtuvieron un flujo de calor de 134 W/m² la pared superior de la cavidades.

Por otro lado, **Yu et al. 2020** [24] evidenciaron que la inclusión de una capa de material de cambio de fase (PCM) en un techo ventilado puede reducir la temperatura máxima en hasta 4.1 °C, mejorando significativamente su desempeño térmico. De manera similar, **Calati et al. 2021** [25] evaluaron un sistema de cubierta ventilada con soporte plástico y determinaron

que este diseño disminuye la ganancia de calor solar en un 70 % con respecto a techos convencionales.

La altura del canal de ventilación es un factor determinante en la eficiencia de los techos ventilados. **Lee *et al.* 2009** [26] analizaron factores que afectan la ventilación en techos, concluyendo que un techo ventilado reduce la carga térmica en comparación con techos convencionales, además, con la inclinación más pronunciada se obtuvo una reducción de 10.4 °C en una cavidad. **Mintorogo *et al.* 2015** [27] compararon techos de concreto con y sin cavidad de fibra de coco de 0.1 m de espesor, determinaron que la superficie del techo sin relleno alcanzó 41 °C al mediodía, en contraste con los 28.7 °C del techo con cavidad. Un año después, **Li *et al.* 2016** [28] encontraron que un canal de ventilación de 0.1 m de espesor mejora significativamente la velocidad del flujo de aire, optimizando la disipación de calor. Estudios posteriores, como los de **Wang *et al.* 2023** [29], indicaron que el espesor óptimo del canal de aire aumenta con la longitud del techo y que debe estar entre 16.7 y 21.8 °C, mientras que **Wang *et al.* 2024** [30] establecieron que un espaciado de 1.3 m y una velocidad de entrada de aire entre 1 y 1.5 m/s generan la mayor eficiencia energética. **Chen *et al.* 2023** [31] determinaron que el espacio de aire óptimo para un techo ventilado es de 0.07 m con un caudal de 60 m³/h, lo que permite mantener la temperatura en la superficie a 24 °C, logrando así una reducción térmica significativa.

El ángulo de inclinación también juega un papel relevante en el rendimiento térmico de los techos ventilados. **Li *et al.* 2016** [28] y **Tang *et al.* 2020** [32] coincidieron en que un ángulo de entre 33 y 40 °C mejora la ventilación y la resistencia térmica, lo que contribuye al ahorro energético. En un estudio específico, **Kain *et al.* 2020** [33] analizaron la influencia de los techos ventilados en estructuras a dos aguas, determinando que este diseño reduce la humedad en las tejas en un 1 % y ajusta la velocidad del aire entre 0.06 y 0.25 m/s, lo que permite preservar los revestimientos de techos de madera.

En otro estudio, **Hou *et al.* 2021** [34] compararon configuraciones de techos ventilados y concluyeron que reducen efectivamente la temperatura exterior y mejoran el confort térmico hasta en un 47 % bajo condiciones extremas de calor. **Bamdad 2023** [35] evaluó el impacto de estos techos en distintas zonas climáticas y evidenció que en climas tropicales y

subtropicales pueden reducir las cargas energéticas anuales en un 14 % y 22 %, respectivamente. Sin embargo, en climas fríos y templados suaves, se observó un incremento en la demanda energética total del edificio. **Maya 2022** [36] estudió el comportamiento térmico de un techo verde ventilado con 30 cm en el canal de aire, observando que logró reducir la temperatura media anual de la vivienda de 26.3 a 25.3 °C, lo que evidencia la importancia del canal y el contexto climático en el diseño de techos eficientes.

La elección de materiales en la construcción de techos ventilados es fundamental para mejorar su desempeño térmico. **Alavéz-Ramírez et al. 2014** [37] determinaron que un techo prefabricado con relleno de fibra de coco presentó un tiempo de retardo de 3.5 horas y un factor de decremento térmico del 43 %, mientras que la opción sin relleno no mostró efecto de amortiguamiento. **Darsana et al. 2016** [38] desarrollaron un molde sustituyendo el 10 % de cemento por fibras de coco, esta adición mejora las propiedades de carga de rotura y ductilidad, además de resultar en un material más ligero y económicamente accesible. En el mismo año **Hwang et al. 2016** [39] evaluaron la incorporación de fibras de coco en compuestos cementosos, encontrando que todos los materiales tratados mostraron excelentes propiedades mecánicas, con una reducción del agrietamiento plástico y una mejor respuesta al impacto. Más tarde, **Bui et al. 2020** [40] estudiaron las propiedades de las fibras de coco, y encontraron que la conductividad térmica disminuyó de 0.052 a 0.024 Wm⁻¹K⁻¹ al aumentar la densidad de 30 a 120 kg/m⁻³, lo que las convierte en excelentes candidatas para la fabricación de morteros reforzados. **Asim et al. 2020** [41] examinaron el comportamiento térmico de hormigón reforzado con diversas fibras naturales, lo que mostró que las mezclas con fibras de coco y basalto mejoraron el aislamiento térmico entre un 6.5 % y un 17.4 %, y de un 5.8 % a un 17.1 %, respectivamente, a medida que aumentaba el contenido de fibra. También, **Yu et al. 2020** [24] encontraron que la inclusión de PCM reduce la temperatura máxima en techos ventilados, contribuyendo a un mejor control térmico.

Shao et al. 2022 [42] estudiaron un techo ventilado en forma de sándwich, se concluyó que este diseño es eficaz para mantener un ambiente térmico interior estable y reducir 2.5 °C la temperatura interior del prototipo. En el mismo año, **Warsi y Anis 2022** [43] compararon hormigón simple con y sin fibra de coco, se concluyó que la adición de un 1 % a 5 % de fibra mejoró la capacidad de carga a compresión del hormigón en un 13 % y redujo su peso total.

Un año después, **Kumar et al. 2023** [44] determinaron que el techo ventilado con canal de aire de 40 cm y cubierta secundaria de fibra de coco presenta una reducción en la temperatura interior del cubículo de prueba de 8.4 °C.

Wang et al. 2024 [45] desarrollaron un sistema de enfriamiento por rociado en techos ventilados, demostrando que esta estrategia mejora significativamente la eficiencia energética y el confort térmico en climas cálidos. **Saini et al. 2024** [46] determinaron que las fibras naturales como la fibra de coco son una alternativa respetuosa con el medio ambiente al sustituir otros materiales, ya que aportan propiedades y durabilidad a los sistemas constructivos a través de varillas, laminados, fibras, se obtuvo una resistencia a la tracción entre 200 y 1000 MPa con un módulo de elasticidad que oscila entre 10 y 70 GPa. **Demirdağ et al. 2024** [47] estudiaron hormigones reforzados con fibra de coco y vidrio, se observó que la inclusión de fibra de coco mejoró la resistencia al impacto en 15 % y 20 % en la resistencia a la flexión, lo que los hace una opción factible para aplicaciones en estructuras sujetas a cargas dinámicas. Además, **Shah et al. 2024** [48] desarrollaron un material aislante donde se utilizó cáscaras de coco, y se demostró que este material es eficaz en la reducción de la conductividad térmica.

De este modo, las fibras naturales han ganado prestigio en el ámbito de la construcción y la infraestructura como materiales sostenibles, destacándose por su bajo impacto ambiental y su contribución a prácticas ecoamigables. Algunas de las fibras más utilizadas son el lino, yute, ramio, cáñamo, kenaf, algodón y la fibra de coco [49]. Las fibras de coco son reconocidas debido a la amplia disponibilidad de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción mundial de coco alcanza aproximadamente 62 millones de toneladas métricas al año [50], incluso aportan coste económico, excelente capacidad de aislamiento térmico y baja densidad [44]. Por otro lado, **Ali 2011** [51] amplió el campo de estudio al mostrar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la fibra de coco, subrayando su potencial en aplicaciones constructivas añadiendo 2 % de la fibra de coco mejora las propiedades ya mencionadas. En una investigación posterior, **Ali et al. 2012** [52] encontraron que el concreto armado con 5 % de fibra de coco y una longitud de 5 cm presenta las mejores propiedades aislantes.

Dada su disponibilidad y propiedades térmicas, la fibra de coco ha sido ampliamente estudiada como material de construcción. **Quiñones-Bolaños *et al.* 2021** [53] evidenciaron que un 15 % de fibra de coco en mortero reduce la conductividad térmica de 1.4 a 0.27 W/m² y mejora el confort térmico entre 0.5 y 1.5 °C. **Ahmad *et al.* 2022** [54] determinaron que la adición de un 2 % al 3 % de fibra de coco al cemento mejora la capacidad de compresión y flexión en un 12 % y 47 %, respectivamente. En investigaciones más recientes, **Watchrodom 2023** [55] encontró que el fibrocemento de coco reduce la temperatura hasta en 4 °C con respecto a la temperatura ambiente. **Bandaranayake *et al.* 2023** [56] identificaron que el aumento en el grosor de la fibra de coco en paneles compuestos disminuye la temperatura interna en un rango de 3.2 % a 5.5 %. **Segura *et al.* 2024** [57] propusieron el desarrollo de paneles multicapa a base de fibra de coco, donde los resultados mostraron que los paneles compuesto de fibra de coco con albaricoque y melocotón mejoran la absorción acústica en 70 %, y presentan buena resistencia térmica, 0.14 – 0.16 Wm⁻¹K⁻¹.

En un análisis experimental, **Asasutjarita *et al.* 2007** [58] desarrollaron tableros de cemento ligero con fibra de coco y determinaron la longitud óptima de la fibra fue de 1 a 6 cm de fracción, y la proporción óptima de la mezcla (cemento:fibra:agua) en peso fue de 2:1:2. Por otro lado, respecto a las dimensiones **Mintorogo *et al.* 2015** [59] compararon techos de concreto con y sin cavidad de fibra de coco, estableciendo que la temperatura de la superficie del techo sin relleno alcanzó 41 °C al mediodía, mientras que el techo con cavidad se mantuvo en 28.7 °C. **Thanushan *et al.* 2019** [60] investigaron bloques de cemento de tierra reforzados con fibra de coco, descubriendo que la integración del 0.75 % de fibra de coco no solo reduce la densidad seca, sino que también mejoró la resistencia residual, la ductilidad, la tenacidad y la absorción de energía. **Ali *et al.* 2022** [61] analizaron cómo la incorporación de fibras de coco afecta diversas propiedades del concreto, los resultados mostraron que la fibra de coco reduce la densidad del concreto en 2.5 %, y aumenta la resistencia al impacto en un 25 %. Por otro lado, **Martinelli *et al.* 2023** [62] realizaron una revisión exhaustiva sobre el uso, producción, tratamientos y características de la fibra de coco, por lo que están hechas de celulosa en 32-43%, hemicelulosa 0.15-0.25 % y lignina 40-45 % y además analizaron la utilización de mallas de fibra de coco incrustadas en compuestos cementosos para incrementar el rendimiento y la longevidad de los materiales. Se concluyó que la adición de estas fibras reduce el impacto ambiental y presentan mejoras en las propiedades físicas y

mecánicas de los materiales de construcción a base de cemento. **Kumar et al. 2023** [44] evaluaron recubrimientos aislantes con fibra de coco, concluyendo que las esteras secas mitigan el calor en un 41.45 % y las esteras húmedas un 36.3 % esta combinación mantiene interiores frescos en condiciones de calor extremo.

Respecto a los trabajos teórico- experimentales **Bekkouche et al. 2014** [63] analizaron la influencia de las envolventes en la temperatura interna de los edificios mediante modelos matemáticos basados en principios termodinámicos, se implementaron muros con diferentes materiales locales y se obtuvo una reducción de hasta 5 °C en las temperaturas interiores durante los periodos cálidos. **Li et al. 2020** [64] realizaron pruebas en techos ventilados con y sin PCM, determinando que la inclusión de PCM reduce la temperatura máxima interior del techo en un rango de 16.9 % a 18.8 % en comparación con un techo convencional. En el mismo año, **Li et al. 2020** [64] evaluaron dos cámaras de prueba a escala real de un techo ventilado, tanto con como sin PCM, lo que determinó que el flujo de calor acumulado a través del techo ventilado fue 5479.1 kJm⁻², mientras que el techo ventilado con PCM solo alcanzó 161.4 kJm⁻². Por otro lado, **Bandaranayake et al. 2023** [56] demostraron que la fibra de coco es una excelente alternativa al poliuretano en paneles aislantes, proporcionando una conductividad térmica de entre 0.02 y 0.04 W/m²K⁻¹ y reduciendo la temperatura interna de las viviendas en un 3.2 % a 5.5 %.

Finalmente hay patentes que incorporan fibra de coco, **Loredo et al. 2015** [65] formularon un material impermeabilizante y aislante térmico a base de desechos de polímeros, el cual se adhiere fuertemente al concreto y resiste cambios de temperatura y humedad, así como la exposición solar y el tránsito peatonal. Cuando se aplica al techo, actúa como una membrana elastomérica altamente reflexiva debido al color blanco, que mejora las propiedades aislantes térmicas. Además, su elaboración permite la incorporación de otros materiales aislantes, como cenizas volcánicas, espumas de polímeros, jal, celulosa, fibras de vidrio y fibras de coco. Por otro lado, **Lancaster 2024** [66] desarrolló una estera compuesta reforzada para el revestimiento interior de canales de concreto, la cual consta de una malla inferior, una malla tridimensional con salientes y canales alternantes, y una malla superior. Entre la malla inferior y la tridimensional, se incorpora una matriz de fibras de coco y nylon reciclado, lo

que la hace apta para su uso con vegetación sembrada, proporcionando estabilización permanente para el canal y reforzando la vegetación madura.

La revisión bibliográfica de techos ventilados revela una creciente importancia buscando alternativas para el mejoramiento del desempeño térmico de edificaciones, reducir el consumo de energía y promover la sostenibilidad. Los techos ventilados han emergido como una estrategia efectiva para abordar estos desafíos, y su contribución en la eficiencia energética de los edificios es notable.

El techo es una parte esencial de cualquier estructura, y su diseño puede generar un efecto notable en la temperatura interna de un edificio. Los techos ventilados se destacan por su capacidad para reducir la carga térmica en un espacio habitable al permitir la circulación de aire en el espacio bajo el techo. Esto facilita la disipación del calor acumulado, contribuyendo a la reducción de la temperatura en el interior y reduciendo la necesidad de sistemas de climatización, lo que resulta en un ahorro de energía.

En la literatura, se han documentado varios tipos de techos ventilados, incluyendo los compuestos con PCM, entre otros. Sin embargo, en los últimos años, se ha observado un creciente interés en el uso de techos ventilados con fibras naturales, específicamente fibras de coco. Las fibras de coco se destacan por su sostenibilidad, bajo costo y disponibilidad, además de su capacidad para proporcionar aislamiento térmico y control de humedad.

Los parámetros importantes para considerar al diseñar techos ventilados incluyen la geometría del espacio bajo el techo, la velocidad y dirección del viento, la conductividad térmica de los materiales utilizados y la ubicación geográfica del edificio. Estos factores influyen en la eficacia del sistema de techo ventilado y su capacidad para reducir el consumo de energía.

1.4 Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance de la tesis.

1.4.1 General

Construir y evaluar experimentalmente el comportamiento térmico de un techo ventilado ligero con una cubierta de fibra de coco (TVLC).

1.4.2 Específicos

- Diseñar y construir un prototipo de techo ventilado ligero con cubierta de fibra de coco.
- Diseñar pruebas experimentales para analizar el comportamiento térmico del prototipo de techo propuesto.
- Instrumentar los módulos experimentales para comparar el comportamiento térmico de dos tipos de techo diferentes: techo convencional y techo ventilado ligero con cubierta de fibra de coco.
- Obtener los datos experimentales y realizar un análisis de resultados de los módulos experimentales.
- Familiarización con el software de simulación energética para validar el comportamiento térmico del techo ventilado ligero.
- Análisis del efecto del techo ventilado ligero con cubierta de fibra de coco sobre el confort térmico, demanda de energía y emisiones de dióxido de carbono en una edificación residencial.

1.5 Alcance

El techo ventilado fue evaluado experimentalmente al ser acoplado a un módulo sometido a las condiciones climáticas de Cuernavaca, Morelos, y se comparó con un prototipo de techo convencional durante dos periodos de tiempo definidos. Posteriormente, mediante un software de simulación energética, el techo ventilado con cubierta de fibra de coco se acopló a una edificación residencial para evaluar su impacto en el confort térmico, la tasa de ahorro de energía y la reducción de emisiones de dióxido de carbono por año.

1.6 Estructura de la tesis

El Capítulo 2 presenta el marco teórico, modelos físicos y matemáticos asociados a la envolvente en edificaciones, analizando la influencia de sus componentes principales en el comportamiento térmico. Además, se abordan los mecanismos de transferencia de calor, su

impacto en la eficiencia energética, los indicadores de desempeño térmico y el uso del software de simulación.

Posteriormente, el capítulo 3 aborda el proceso de construcción e instrumentación del módulo experimental, un componente esencial para el desarrollo de la investigación. Se abordaron las etapas de diseño, materiales y montaje, así como la incorporación de los sensores utilizados.

En el capítulo 4, se describe el análisis de la simulación en Design Builder de los módulos experimentales que incorporan diversas cubiertas, techos ventilados y las viviendas en conformidad con la NOM-020 ENER-2011, destacando su impacto en el rendimiento energético, por último, se presentan las validaciones de cubiertas y techos ventilados.

Por otro parte, el capítulo 5 presenta los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y análisis realizados en los capítulos anteriores, así como una discusión crítica de estos hallazgos.

A lo largo de la tesis se han sintetizado los hallazgos más relevantes sobre el rendimiento energético de los módulos experimentales. A partir de estos resultados, se proponen recomendaciones orientadas a mejorar el diseño de cubiertas y techos ventilados en edificaciones, así como a impulsar la implementación de prácticas sostenibles en el ámbito arquitectónico y constructivo.

Una vez contextualizado el problema de estudio y expuesta la información recopilada en la revisión bibliográfica, así como los objetivos y alcances del trabajo, el siguiente capítulo se enfoca en el desarrollo del marco teórico. En él, se profundiza en los fundamentos relacionados con la envolvente térmica de las edificaciones, abordando los principales mecanismos de transferencia de calor, los componentes que influyen en el desempeño térmico y los indicadores que permiten su evaluación. Asimismo, se presenta el enfoque utilizado para la simulación computacional.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan los conceptos para comprender la relación con los mecanismos de transferencia de calor en los sistemas que conforman la vivienda.

2.1 Modelo físico de una vivienda

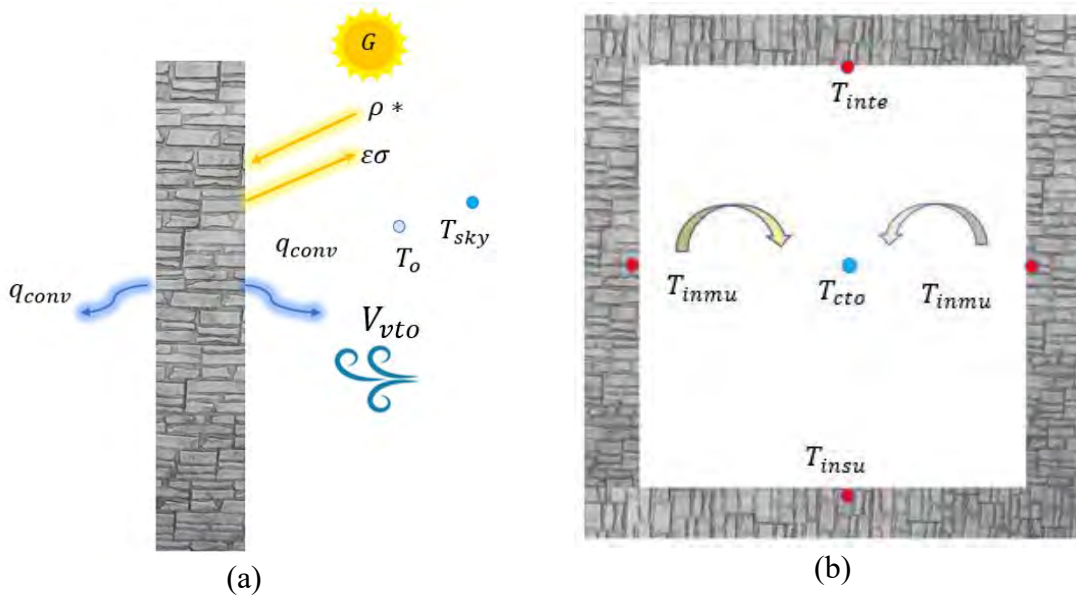
En cualquier edificación, la forma en que interactúa con el entorno tiene un impacto significativo en su consumo energético. Elementos como la radiación solar, humedad relativa, temperatura exterior y velocidad del viento, contribuyen a la energía que recibe el edificio. Estos elementos presentan variaciones a lo largo del tiempo y están condicionados por factores como el clima y la estación del año, lo que repercute en las necesidades térmicas de la vivienda. Por ello, resulta importante comprender el proceso de transferencia de calor en cada uno de los componentes del sistema, como los muros, el suelo, las ventanas y el techo. En la Figura 2.1 se presentan los modelos físicos de los componentes del edificio y el ambiente exterior. Asimismo, se presenta un modelo físico que representa las condiciones ambientales relacionadas con la temperatura.

En la Figura 2.1a se representa el modelo físico de un muro, donde se identifican diversos fenómenos de transferencia de calor. En la superficie externa, el muro recibe radiación solar G directa y difusa, además de reflejar una parte de esta hacia el entorno $\rho *$. También se presenta una transferencia de calor por convección q_{conv} tanto en la cara exterior como en la interior del muro q_{conv} . En el lado externo, esta convección está influenciada por la velocidad del viento V_{vto} , la temperatura del aire exterior T_o y la temperatura del cielo T_{sky} , que a su vez afectan el intercambio térmico por radiación de onda larga entre el muro y el cielo. En el interior, el intercambio convectivo ocurre entre la superficie del muro y el aire del espacio habitable.

Posteriormente, en la Figura 2.1b y Figura 2.1c se presentan las temperaturas registradas en una habitación cerrada. Se inicia con la temperatura interior del techo T_{inte} , seguida de las

temperaturas internas de los muros T_{inmu} además de la temperatura del suelo T_{insu} y, finalmente la temperatura interior de la ventana T_{inve} . La interacción de todas estas temperaturas contribuye a determinar la temperatura del cuarto T_{cto} .

Finalmente, se plantea el modelo físico de la losa de concreto en la Figura 2.1d, en el cual se integran las componentes de radiación solar G directa y difusa, así como la reflectancia superficial hacia el entorno $\rho *$. El modelo incluye las condiciones de contorno ambientales, tales como la temperatura del aire T_o , la temperatura del cielo T_{sky} y la velocidad del viento V_{vto} . Dado que la superficie superior de la losa se encuentra expuesta a la radiación solar G , se produce un incremento térmico que induce un flujo de calor por conducción q_{cond} hacia el interior de toda la losa. Esta distribución no uniforme de temperatura origina, además, transferencias de calor por radiación q_{rad} y convección q_{conv} entre la superficie expuesta y el ambiente circundante.



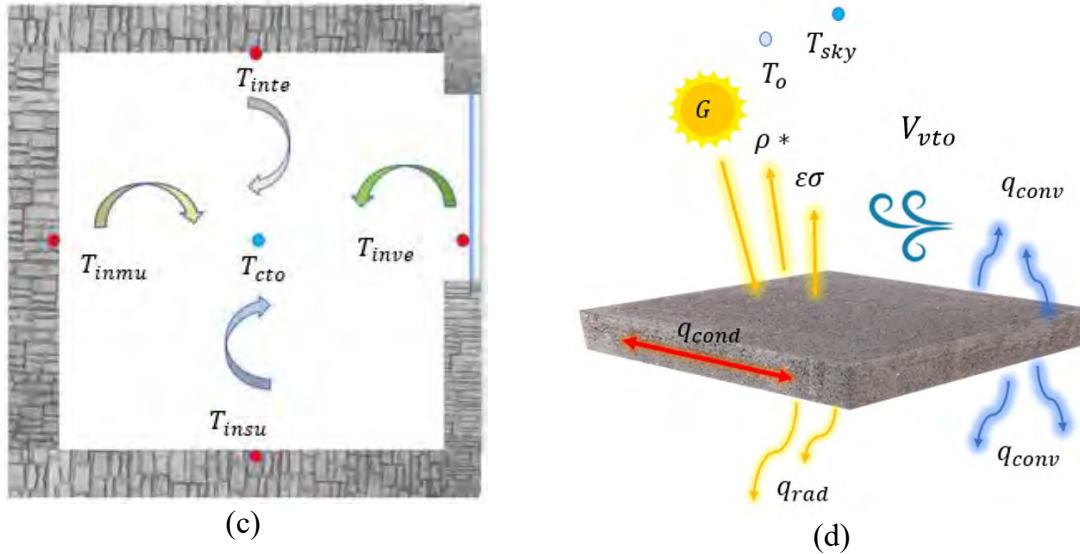


Figura 2.1 Mecanismos de transferencia de calor que intervienen entre el aire interior de la habitación, los elementos de la envolvente y el ambiente exterior: (a) modelo físico de un muro, (b) corte transversal a lo largo del eje este - oeste, (c) corte transversal a lo largo del eje norte - sur, (d) modelo físico de una losa de concreto.

2.2 Tipos de techo

Los techos son elementos fundamentales en la envolvente de una edificación, ya que no solo protegen del clima exterior, sino que también influyen en la transferencia de calor y el confort térmico interior. Existen diversos tipos de techos, cuya clasificación depende de su diseño, materiales y capacidad de aislamiento térmico como se observa a continuación.

2.2.1 Techo de concreto tradicional

En la Figura 2.2 se presenta el modelo físico del techo de losa de concreto tradicional en una representación simplificada, donde también es posible observar parcialmente la habitación. Este techo está conformado por una losa de concreto expuesta a las condiciones climáticas, siendo la radiación solar G uno de los principales factores que afectan su comportamiento térmico.

La losa de concreto recibe radiación solar G tanto directa como difusa, y debido a sus propiedades como superficie opaca, parte de la energía incidente es reflejada ρ^* , mientras que otra fracción es absorbida $\epsilon\sigma$. La energía absorbida genera un aumento progresivo de la temperatura en la losa, lo que provoca una diferencia térmica entre esta y el aire circundante, tanto en la superficie exterior como en la interior. Esta diferencia de temperaturas da lugar a

flujos de calor por radiación q_{rad} y convección q_{conv} en ambas direcciones. Un fenómeno similar ocurre en los muros, influyendo en el incremento o disminución de la temperatura al interior de la habitación.

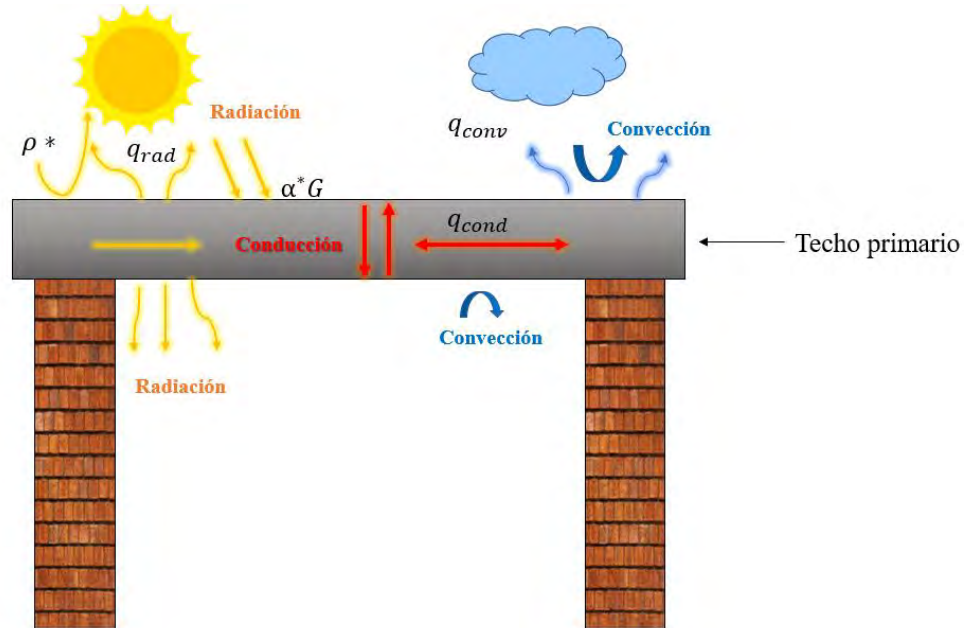


Figura 2.2 Modelo físico de un techo tradicional.

2.2.2 Techo compuesto con fibras naturales

Un techo compuesto con fibras naturales está formado por materiales orgánicos como el coco, bambú, cáñamo, yute o lino, que se combinan con resinas u otros compuestos para mejorar su resistencia y durabilidad. Estos techos ofrecen excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico, lo que contribuye a mantener temperaturas interiores más estables y a reducir la necesidad de calefacción o refrigeración. Este tipo de techo se utiliza principalmente en proyectos de arquitectura ecológica y construcción sostenible, donde se priorizan materiales naturales y la eficiencia energética [67], en la Figura 2.3 se muestran dos ejemplos.



Figura 2.3 Techo con cubierta de fibras naturales[68].

2.2.3 Cubiertas

Los techos con cubiertas están diseñados para ofrecer protección ante las condiciones climáticas y mejorar el desempeño térmico de una edificación. Estas cubiertas pueden estar compuestas por diversos materiales, cada uno con características específicas en cuanto a aislamiento térmico, reflectancia y durabilidad. En la Figura 2.4 se muestra una vivienda con paneles multicapa.



Figura 2.4 Vivienda con paneles multicapa[69].

No obstante, en la Figura 2.5, se observa el modelo físico de un sistema que está compuesto por una losa de concreto en la parte inferior, seguida de una cubierta secundaria de fibra de coco de espesor 2.54 cm, con una lámina de color blanco de 0.1 mm de espesor. La función principal de la cubierta secundaria es proteger la losa de concreto de la exposición directa a la radiación solar G (tanto directa como difusa). Una parte de la radiación directa que alcanza la parte superior de la cubierta se refleja al ambiente debido al color blanco de la lámina ρ^* (reflectancia), mientras la parte restante es absorbida α^*G por la lámina (coco). Posteriormente, se genera un intercambio de calor por conducción q_{cond} que viaja desde la

lámina hacia la capa de fibra de coco. Del mismo modo, la fibra de coco transmite calor por conducción al entrar en contacto con la superficie externa de la losa de concreto. Por último, la cubierta disipa el calor acumulado mediante convección q_{conv} y radiación térmica q_{rad} . El aire a alta temperatura en contacto con la lámina y la fibra de coco asciende, y permite la entrada de aire a baja temperatura por medio de la convección q_{conv} , mientras que las superficies emiten radiación de onda larga hacia el entorno. Estos mecanismos reducen la temperatura del sistema y limitan la transferencia de calor hacia el interior.

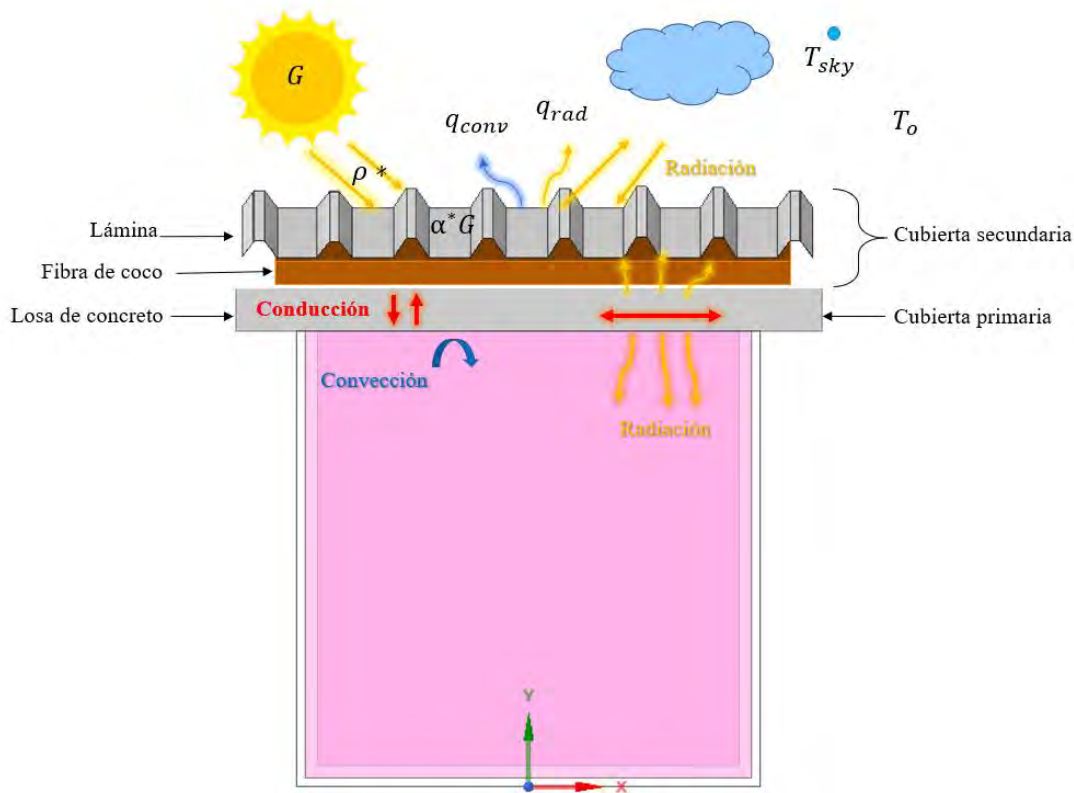


Figura 2.5 Modelo físico de una cubierta de lámina con relleno de fibra de coco.

2.2.4 Techos ventilados

Un techo ventilado es un sistema que incorpora una capa de aire sobre la superficie exterior del techo, lo que facilita la circulación de aire, ver Figura 2.6. Esta ventilación natural ayuda a regular la temperatura en el interior, reduciendo el calor durante los meses cálidos y evitando la condensación en los meses fríos, lo que previene la acumulación de humedad y el daño por moho. Los techos ventilados son especialmente útiles en edificaciones con techos planos, y se aplican tanto en viviendas como en edificios comerciales o industriales [70].

La Figura 2.6 muestra el modelo físico del techo ventilado, conformado por una cubierta secundaria de lámina blanca inclinada 5° respecto a la horizontal, un relleno de fibra de coco, un canal de aire y una losa de concreto. El desempeño térmico del techo ventilado está influenciado por dos mecanismos principales: convección q_{conv} y radiación térmica q_{rad} . La cubierta secundaria favorece la circulación del aire, generando un flujo convectivo que facilita la disipación del calor y evita su acumulación. A medida que la temperatura del aire dentro del canal aumenta, este se vuelve menos denso; el cambio de la densidad permite que ascienda debido a las fuerzas de flotación, concentrando el aire a alta temperatura en la parte superior del canal. Los vientos predominantes inducen la entrada de aire a menor temperatura, removiendo el aire caliente del interior del canal. Este proceso de renovación continua del aire dentro del canal de ventilación contribuye a mantener temperaturas más estables. Simultáneamente, el intercambio convectivo entre la superficie exterior de la lámina y el aire exterior permite que parte del calor absorbido en la superficie de la lámina se libere hacia el entorno, reforzando la disipación térmica y reduciendo la temperatura del techo.

Además, la cubierta secundaria protege la losa de concreto frente a condiciones climáticas adversas, reduciendo su exposición directa a la radiación solar G y la humedad. La inclinación de 5° facilita el drenaje del agua de lluvia y optimiza la ventilación natural, promoviendo la renovación del aire en el canal de ventilación. La lámina blanca incrementa la reflectancia de la radiación solar α^*G , minimizando la absorción de calor. La fibra de coco, debido a su baja conductividad térmica, limita la transferencia de calor por conducción q_{cond} y convección q_{conv} , manteniendo a una menor temperatura el aire dentro del canal. Asimismo, la envolvente de madera recubierta con pintura blanca refuerza la disipación térmica al reflejar parte de la radiación incidente, mientras que el flujo de aire en el canal contribuye a minimizar la transferencia de calor hacia la losa de concreto.

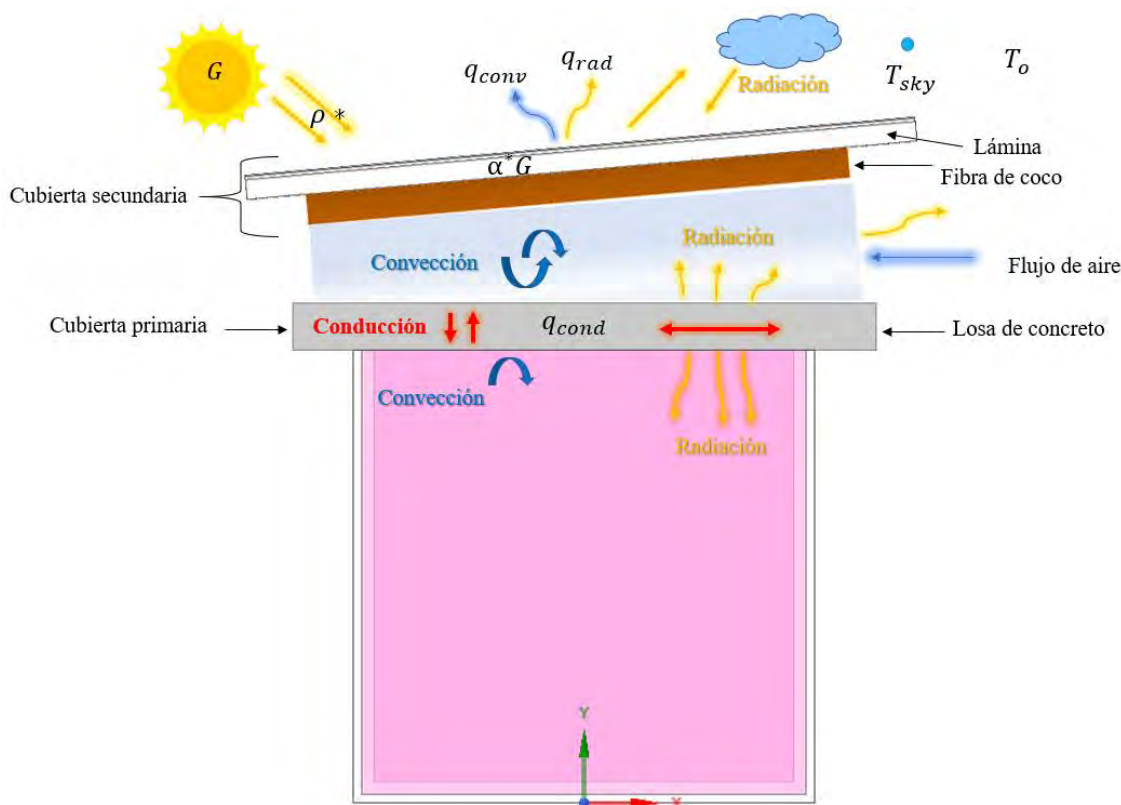


Figura 2.6 Modelo físico de un techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.

2.3 Mecanismos de transferencia de calor

En el contexto de la edificación, el balance permite cuantificar la interacción energética entre el ambiente exterior y los distintos componentes del edificio, como muros, ventanas, suelo y techos, considerando los mecanismos de transferencia de calor.

Los muros de las edificaciones son importantes en la regulación térmica de los espacios interiores, ya que actúan como barreras entre el ambiente exterior y el interior del inmueble. Las ganancias de calor a través de los muros varían, comúnmente se estima que representan entre un 15 % y un 25 % del total de las ganancias térmicas de un edificio. Este porcentaje se debe principalmente a la conductividad térmica de los materiales que conforman los muros, como el ladrillo, el concreto o el yeso, los cuales permiten el paso del calor desde el exterior hacia el interior, así como su orientación. Las ventanas son responsables de entre un 10 % y un 25 % del total de calor que ingresa al interior de un edificio, dependiendo de varios factores, como el tipo de cristal, el aislamiento del marco, la orientación del edificio y las condiciones climáticas locales [71].

Posteriormente, el suelo experimenta ganancias de calor que oscilan entre un 5 % y un 10 %, debido a varios factores relacionados con la eficiencia térmica y el diseño arquitectónico del inmueble [72],[73]. Estas ganancias térmicas influyen directamente en la temperatura general de la vivienda, es importante entender que el suelo actúa como un acumulador de calor debido a su inercia térmica.

Por último, los techos de las edificaciones experimentan un incremento de temperatura que oscila entre el 31 % y 55 %, resultado de una interacción compleja de factores térmicos y climáticos que afectan su desempeño [5]. Este fenómeno tiene como principal causa la radiación solar, que incide directamente sobre la superficie del techo, combinada con la ausencia de un aislamiento térmico adecuado. Estos elementos de la edificación (muros, techos, ventanas y suelos) mantienen una interacción continua con el entorno y están sujetos a los tres mecanismos de transferencia de calor, los cuales se describen a continuación.

2.3.1 Conducción

La conducción es el proceso de transferencia de calor a través de un material sólido, líquido o gaseoso (estos últimos siempre y cuando no haya movimiento de las partículas), debido a la diferencia de temperatura entre sus regiones. Este fenómeno ocurre por contacto entre las partículas dentro del material que transfieren su energía. La velocidad de conducción depende de la conductividad térmica del material, el gradiente de temperatura y el área de contacto. El fenómeno se describe mediante la Ley de Fourier en la Ec. (2.1):

$$\dot{Q}_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad 2.1$$

En donde $\dot{Q}_{cond}$ (W m^{-2}) es el flujo de calor por unidad de área que es transferido a través de una superficie perpendicular a la dirección de transferencia y proporcional al gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dx}$. Además, k ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) representa la conductividad térmica del material, la cual cuantifica su capacidad para transmitir calor a través del material. En condiciones de estado estable, el gradiente de temperatura se expresa en la Ec. (2.2):

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad 2.2$$

Entonces, el flujo de calor por unidad de área se observa en la Ec. (2.3):

$$\dot{Q}_{cond} = -k \frac{T_2 - T_1}{\Delta_x} = -k \frac{dT}{dx} \quad 2.3$$

A continuación, en la Tabla 2.1 se presentan las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en la vivienda, módulos experimentales y BESTest con sus respectivas referencias.

Tabla 2.1 Propiedades termofísicas de los materiales.

Elemento	Material	τ m	C_p Jkg ⁻¹ K ⁻¹	k Wm ⁻¹ K ⁻¹	ρ Kgm ⁻³	ρ^*	R m ² KW ⁻¹
Vivienda de referencia [75]							
Techo	Yeso	0.015	1000	0.372	800		
	Concreto	0.10	840	1.74	2300		
	Impermeabilizante	0.02	800	0.17	1127		
Muros	Yeso	0.015	1000	0.372	800		
	Ladrillo	0.14	800	0.81	1600		
	Mortero	0.015	837	0.72	1890		
Suelo	Mortero	0.1	840 a 1000	0.6 a 1.2	1600 a 2400		
	Mosaico	0.01	795	1.136	2600		
Módulos experimentales [75]							
	Material OSB	0.018	1880	0.13	650		
	Aislante térmico	0.0254	1470	0.0288	10		
	Losa de concreto	0.10	840	1.74	2300		
	Fibra de coco con aglutinante			0.0350			2856.51 °C·cm/W
	Lámina PINTRO [76],[77],[78]	0.001	480	0.1 a 0.5	7850	0.7–0.9 [79][80]	
BESTest 600's							
Muros	Tabla roca	0.012	840	0.160	950		0.075
	Fibra de vidrio	0.066	840	0.040	12		1.650
	Madera	0.009	900	0.140	530		0.064
Techo	Tabla roca	0.010	840	0.160	950		0.063
	Fibra de vidrio	0.1118	840	0.040	12		2.794
	Madera	0.019	900	0.140	530		0.136
Piso	Madera	0.025	1200	0.140	650		0.179
	Aislante	1.003		0.040			25.374

2.3.2 Convección

Por otro lado, la convección, en cambio, se produce cuando el calor se transfiere entre una superficie y el aire en movimiento, tanto en la superficie exterior del muro, en contacto con el aire exterior, como en la superficie interior, donde el aire en contacto con la pared cede o recibe calor, siendo más eficiente cuando hay circulación de aire, con el viento exterior o con sistemas de ventilación. La tasa de transferencia de calor por convección se describe mediante la Ley de Enfriamiento de Newton, la cual se expresa en la Ec. (2.4):

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad 2.4$$

donde, $\dot{Q}_{conv}$ (W m^{-2}) es el flujo de calor convectivo, h representa el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$), el cual depende de las propiedades del fluido, la diferencia de temperaturas entre el sólido y el fluido y la velocidad del fluido, entre otros parámetros, y A es el área superficial a través de la cual se transfiere el calor por convección, T_s corresponde a la temperatura de la superficie en contacto con el fluido y T_{∞} es la temperatura del fluido.

A continuación, en la Tabla 2.2 se presentan algunos valores de los coeficientes convectivos exteriores e interiores de techo, muro y suelos.

Tabla 2.2 Valores convectivos exteriores e interiores de techo, muro y suelo de concreto.

Referencia	Correlación $\text{W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$	Observaciones
Coeficientes convectivos exteriores de un techo de concreto.		
B. H. Mitchell, Building Environmental Science: Methods and Technique [81].	$h_c = 10 - 20$	Se utiliza en entornos con sistemas de ventilación o ventiladores, típicamente en un rango de velocidad de aire de 0.5 a 2 m/s.
Coeficientes convectivos interiores de un techo de concreto		
Khalifa & Khalifa and Marshall [82],[83].	$h_c = 2.35$	Estudio experimental sobre superficies interiores de edificios utilizando una celda de prueba interior de tamaño real (2.35 x 2.95 x 2.08 m ³).
Coeficientes convectivos exteriores de un muro de concreto.		
McQuiston et al. 2016 [84].	$h_c = 10 \text{ a } 20$	Se aplica en convección forzada moderada, la velocidad tiende a

estar entre 0.5 y 2 m/s. Los espacios cuentan con sistemas de climatización a temperaturas entre 20-25 °C.		
Coeficientes convectivos de interiores de un muro de concreto.		
Holman et al. 2010 [85]	$h_c = 5$ a 10	Abarca desde convección natural en superficies interiores hasta convección forzada intensa en exteriores o aplicaciones industriales con velocidades de aire menores a 0.1 m/s y superiores a 5 m/s.
Coeficientes convectivos de exteriores de un suelo de concreto.		
ASHRAE. (2017) [86]	$h_c = 5$ a 15	Se aplica en una habitación sin HVAC donde el aire está en reposo o presenta una circulación muy débil con velocidades inferiores a 0.1 m/s en climas templados y donde el aire aumenta o si el espacio tiene una ligera circulación de aire.
Coeficientes convectivos de interiores de un suelo de concreto.		
Incropera et al. 2007 [87]	$h_c = 5$ y 10	Se realiza en superficies horizontales y verticales, con una temperatura constante sin ser sometidas a flujos de aire forzado sin ventiladores ni HVAC.

2.3.3 Radiación

Por último, la radiación se refiere a la transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas, siendo la radiación solar una fuente importante de calor, especialmente en las paredes exteriores expuestas al sol, que, al calentarse, emiten radiación térmica hacia el interior de la vivienda.

A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere un medio material para propagarse, ya que ocurre a través de ondas electromagnéticas. La cantidad máxima de radiación que una superficie puede emitir a una temperatura termodinámica T_s está determinada por la Ley de Stefan-Boltzmann, expresada en la Ec. (2.5):

$$\dot{Q}_{emax} = \sigma A_s T_s^4 \quad 2.5$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann. Una superficie ideal que emite radiación térmica a la máxima intensidad posible se denomina cuerpo negro. Sin embargo, en superficies reales, la radiación emitida es menor y se expresa en la Ec. (2.6):

$$\dot{Q}_{emax} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad 2.6$$

donde ε es la emisividad de la superficie, cuyo valor varía entre 0 y 1, representando la eficiencia con la que un material emite energía térmica en comparación con un cuerpo negro. Otra propiedad relevante es la absorptividad α que indica la fracción de radiación incidente que es absorbida por la superficie. Su valor también varía entre 0 y 1 y se expresa mediante la Ec. (2.7):

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \dot{Q}_{inc} \quad 2.7$$

donde $\dot{Q}_{inc}$ es la cantidad de radiación que impacta sobre la superficie y α la absorptividad de la misma. La diferencia entre la radiación emitida y la absorbida determina la transferencia neta de calor por radiación. Cuando una superficie de emisividad ε , el área superficial A_s a cierta temperatura T_s está completamente rodeada por una superficie más grande a temperatura T_{alr} , y separada por un medio transparente a la radiación (como aire), la tasa neta de transferencia de calor por radiación se define en la Ec. (2.8):

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad 2.8$$

Para simplificar se define un coeficiente radiativo h_{rad} y se expresa la ecuación en función de la diferencia de temperatura de manera más conveniente en la Ec. (2.9):

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^2 - T_{alr}^2) (T_s^2 + T_{alr}^2) \quad 2.9$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^2 - T_{alr}^2) (T_s - T_{alr}) (T_s + T_{alr}) \quad 2.10$$

$$\dot{Q}_{rad} = h_{rad} A_s (T_s - T_{alr}) \quad 2.11$$

donde el coeficiente radiativo se define en la Ec. (2.12):

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{alr}^2) (T_s + T_{alr}) \quad 2.12$$

Este coeficiente incluye los efectos de la radiación térmica y depende significativamente de las temperaturas de las superficies involucradas. Por otra parte, en la Tabla 2.3 se muestran los valores de la pintura blanca utilizada en la experimentación.

Tabla 2.3 Propiedades de pintura blanca [88][89].

Color	Capacidad de absorción α	Emisividad ε	Reflectancia ρ^*
Blanco	10 - 20	0.85 - 0.95	0.80 - 0.90

En la Tabla 2.4 se muestran los detalles específicos de la construcción de las ventanas de doble acristalamiento: espesor de las hojas de vidrio, propiedades termofísicas y ópticas.

Tabla 2.4 Detalles de construcción de las ventanas de doble hoja para los casos 600's y simulación de vivienda.

Número de ventanas	2
Espesor cristal	3.175 mm
Espesor entre vidrios	13 mm
Índice de refracción	1.526
Transmitancia	0.86156
Conductividad térmica del vidrio	1.06 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Conductancia del vidrio	333 Wm ⁻² K ⁻¹
Coefficiente convectivo-radiactivo aire	6.297 Wm ⁻² K ⁻¹
Coefficiente combinado superficie exterior	21.00 Wm ⁻² K ⁻¹
Coefficiente combinado superficie interior	8.29 Wm ⁻² K ⁻¹
Coefficiente global de transferencia de calor, U .	3.0 Wm ⁻² K ⁻¹
Emisividad	0.9
Densidad del cristal	2500 kgm ⁻³
Calor específico del cristal	750 Jkg ⁻¹ K ⁻¹

2.4 Balance de energía en la edificación

La Figura 2.7 ilustra los flujos energéticos tanto internos como externos que afectan la edificación. Para una descripción detallada de los modelos matemáticos utilizados, se recomienda consultar el manual de usuario de EnergyPlus. La radiación solar constituye el intercambio de energía más significativo en la envolvente de un edificio. Este fenómeno se expresa a través de la radiación total que incide en la superficie, denotada como (I_T) que

implica la radiación total directa (I_{bT}), la reflejada (I_{gT}) y la difusa (I_{dT}). Es importante destacar que los datos sobre radiación solar obtenidos de la estación meteorológica son de carácter global. Por esta razón, EnergyPlus aplica correlaciones desarrolladas por Duffie (1974), Hay J. (1980), Perez R. (1990) y Reindl (1990) para calcular los componentes mencionados de la radiación. En consecuencia, la radiación total incidente sobre una superficie exterior se expresa como se observa en la Ec. (2.13).

$$I_T = I_{bT} + I_{gT} + I_{dT} \quad 2.13$$

Las superficies exteriores de la edificación interactúan con el ambiente, intercambiando energía a través de distintos mecanismos de transferencia de calor. La Figura 2.7 ilustra el comportamiento térmico de estas superficies.

El balance energético que describe este intercambio de energía se expresa mediante la Ec. (2.14):

$$q''_{sol} + q''_{LWR} + q''_{con,e} - q''_{ko} = 0 \quad 2.14$$

donde q''_{sol} es la radiación solar, que incluye la directa, reflejada y difusa. Este flujo depende de factores como la ubicación, el ángulo de incidencia, la inclinación del muro, las propiedades del material de la superficie y las condiciones climáticas. Sin embargo q''_{LWR} es la radiación de onda larga térmica, resultante del intercambio de energía entre la superficie, el cielo y el suelo. Además, $q''_{con,e}$ es la transferencia de calor por convección con el aire exterior y, q''_{ko} es el flujo de calor por conducción a través del muro. En este balance, todos los términos se consideran positivos cuando el flujo neto se dirige hacia la superficie, excepto la conducción, que tradicionalmente se asume como positiva cuando el calor se transfiere del exterior hacia el interior del muro.

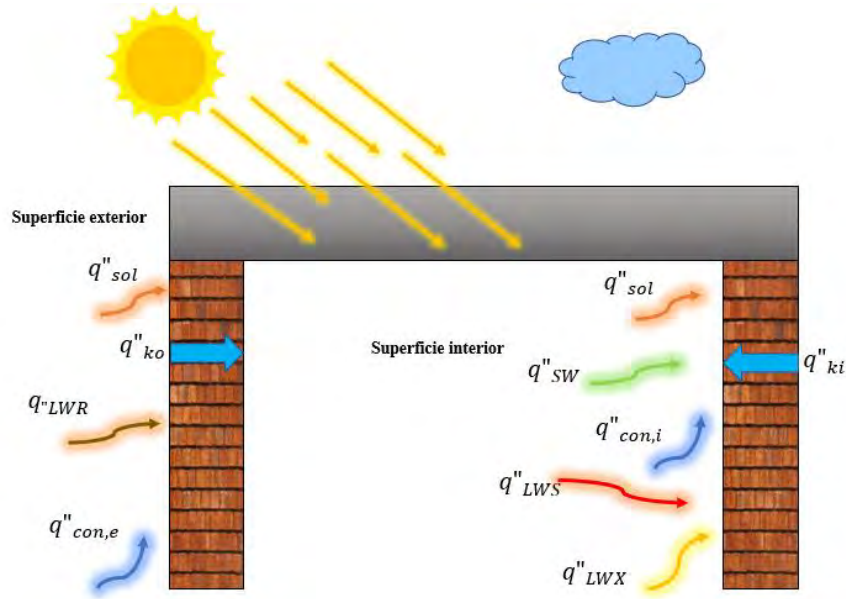


Figura 2.7 Intercambio energético en la edificación.

Por otro lado, el comportamiento térmico en el interior de la edificación involucra el equilibrio energético en las superficies internas de la zona, el cual se modela mediante tres procesos de transferencia de calor acoplados:

1. Conducción a través de los elementos de construcción.
2. Convección con el aire interior.
3. Absorción y reflexión de radiación de onda corta, proveniente de la radiación solar que ingresa a través de las ventanas y de fuentes internas como iluminación artificial.
4. Intercambio de radiación de onda larga, que incluye la absorción y emisión de calor por superficies internas, equipos y ocupantes, como se observa en la Ec. (2.15):

$$q''_{sol} + q''_{sw} + q''_{con,i} + q''_{LWS} + q''_{LWX} + q''_{ki} = 0 \quad 2.15$$

donde q''_{sol} es la radiación solar absorbida por la superficie, q''_{sw} es la radiación de onda corta generada por la iluminación artificial, $q''_{con,i}$ es el flujo de calor convectivo en el nodo de aire, q''_{LWS} es la radiación térmica emitida por equipos eléctricos, q''_{LWX} es la transferencia de calor radiativo entre las superficies internas de la edificación y q''_{ki} es el flujo de calor por conducción a través de los elementos constructivos.

En EnergyPlus, el aire interior se modela como un medio completamente transparente a la radiación de onda larga, lo que significa que no participa en el intercambio de calor radiativo entre las superficies. Esta suposición es físicamente válida debido a la baja concentración de vapor de agua en el aire y las cortas distancias entre superficies dentro del espacio.

Para el cálculo del intercambio de radiación de onda larga entre las superficies internas, EnergyPlus emplea el modelo de intercambio “gris”, basado en el concepto ScriptF desarrollado por Hottel (1967). Este procedimiento asume que:

1. Las superficies tienen propiedades de radiación gris, es decir, sus coeficientes de absorción, emisión y reflexión son independientes de la longitud de onda.
2. Toda la radiación emitida es difusa, lo que implica que la energía térmica se distribuye uniformemente en todas las direcciones.
3. Una vez determinados los coeficientes de intercambio ScriptF, el flujo de calor radiativo de onda larga entre dos superficies, se calcula mediante la Ec. (2.16):

$$q_{ij} = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad 2.16$$

donde A_i representa el área de las superficies, $F_{i,j}$ es el factor de vista entre las superficies i y j , que define la proporción de radiación intercambiada entre ellas, y $T_i^4 - T_j^4$ son las temperaturas de las superficies involucradas en la transferencia de calor.

2.4.1 Temperatura del aire en la zona térmica

Para determinar la temperatura del aire en cada zona térmica (habitación), se considera el volumen total del espacio como un nodo único. El cálculo se basa en un balance de energía y humedad, cuyas ecuaciones se resuelven mediante un método predictor-corrector para mejorar la precisión en la estimación de las variables térmicas.

El balance de energía en el aire de la zona incluye los siguientes flujos térmicos:

- Aporte de calor del sistema de climatización (HVAC).
- Intercambio de calor entre zonas adyacentes.
- Pérdidas o ganancias de calor por infiltración de aire exterior.

- Transferencia de calor por convección con las superficies internas (paredes, techo, suelo) y objetos presentes en la zona.

En la Figura 2.8 se representa gráficamente el intercambio energético en la zona térmica, mientras que en la Ec. (2.17) siguiente se describe matemáticamente el balance de energía.

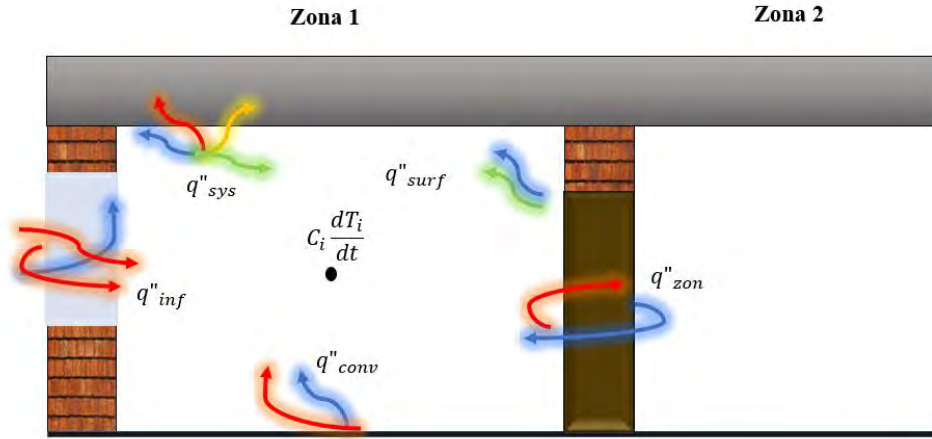


Figura 2.8 Balance de calor en las zonas térmicas

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = q''_{conv} + q''_{surf} + q''_{zonas} + q''_{inf} + q''_{sys} \quad 2.17$$

donde $C_z \frac{dT_z}{dt}$ representa la energía almacenada en el aire de la zona térmica, q''_{conv} corresponde a las cargas convectivas generadas por equipos eléctricos y la presencia de ocupantes, determinada en función de las propiedades del equipo (h_i y A_i) y la diferencia de temperatura entre el equipo (T_{eq}) y el aire de la zona (T_{az}) en la Ec. (2.18):

$$q''_{conv} = h_i A_i (T_{eq} - T_{az}) \quad 2.18$$

Si existen múltiples fuentes de calor, la carga térmica total se obtiene sumando todas las contribuciones convectivas (personas o equipos eléctricos): $\sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i$

Donde q''_{surf} representa la transferencia de calor por convección entre las superficies internas y el aire de la zona, que depende del área de la superficie A_i , el coeficiente

convectivo interior (h_i) y las temperaturas de la superficie (T_{surf}) y del aire de la zona (T_{az}) y se expresa mediante la Ec. (2.19):

$$q''_{surf} = h_i A_i (T_{surf} - T_{az}) \quad 2.19$$

q''_{zonas} describe la transferencia de calor por mezcla de aire entre zonas adyacentes, a través de aberturas como puertas, ventanas o huecos. Se expresa mediante el flujo masico de aire ($\dot{m}_i$) y la diferencia de temperatura entre la zona 1 (T_{z1}) y la zona 2 (T_{z2}) como:

$$q''_{zonas} = \dot{m}_i C_p (T_{z1} - T_{z2}) \quad 2.20$$

Además, q''_{inf} representa la transferencia de calor debida a la infiltración de aire exterior a través de aberturas, determinada por el flujo másico de aire infiltrado $\dot{m}_{inf}$ y la diferencia de temperatura entre el aire exterior T_{∞} e interior T_{∞} y se representa en la Ec. (2.21):

$$q''_{inf} = \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad 2.21$$

Posteriormente, q''_{sys} define la energía térmica suministrada por el sistema de climatización (calefacción o refrigeración), calculada en función del caudal másico de aire proveniente del sistema $\dot{m}_{sys}$ y la diferencia de temperatura entre el aire de suministro T_{suin} y el aire de la zona T_z y se calcula en la Ec.(2.22):

$$q''_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{suin} - T_z) \quad 2.22$$

La Ec. (2.23) establece que la suma de todas las cargas térmicas en la zona y la energía aportada o extraída por el sistema de climatización deben ser iguales al cambio en la energía almacenada en la zona. Una vez que se sustituyen los términos en la ecuación del balance de calor y se resuelve, se obtiene la temperatura del aire en la zona térmica en función del tiempo para cada instante de análisis.

$$T_z^t = \frac{A + B + C + D + E - F}{G + H + I + J + K} \quad 2.23$$

dónde:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i & B &= \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i T_{eq} & C &= \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{z1} \\ D &= \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} & E &= \dot{m}_{sys} C_p T_{suin} & F &= \left(\frac{C_z}{S_t} \right) \left(-3T_z^{t-St} + \frac{3}{2}T_z^{t-2St} - \frac{1}{3}T_z^{t-3St} \right) \\ G &= \left(\frac{11}{6} \right) \frac{C_z}{S_t} & H &= \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i & I &= \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p \\ J &= \dot{m}_{inf} C_p & K &= \dot{m}_{sys} C_p \end{aligned}$$

2.4.2 Balance global de energía de la cubierta

El balance energético de una cubierta considera todas las entradas y salidas de calor que afectan su temperatura superficial e interna, ver Figura 2.9, y se expresa mediante la Ec. (2.24):

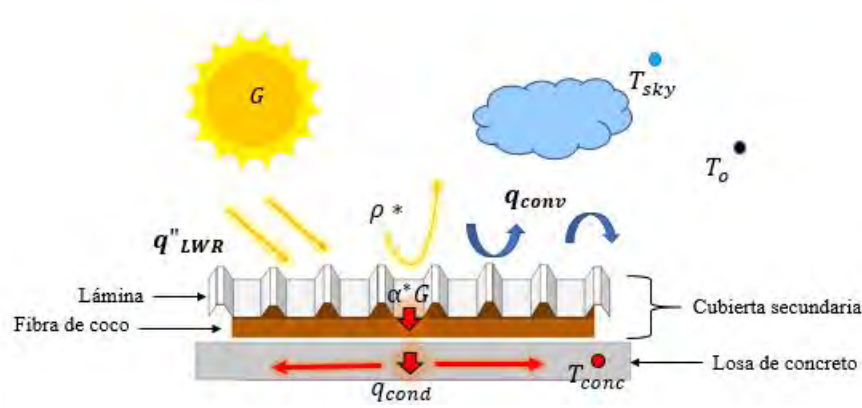


Figura 2.9 Modelo matemático de la cubierta con fibra de coco.

$$q''_{sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} + q_{cond} = 0 \quad 2.24$$

Donde q''_{sol} es la radiación solar, que incluye la directa, reflejada y difusa. Este flujo depende de factores como el color, orientación, propiedades del material de la superficie y condiciones climáticas. No obstante, q''_{LWR} es la resultante del intercambio de energía entre la superficie, el cielo y el suelo. Además, q''_{conv} es la transferencia de calor por convección con el aire

exterior y, q_{cond} es la transferencia de calor por conducción entre las superficies, dependiendo del espesor y conductividad térmica de los materiales que la componen.

2.4.3 Balance global de energía del techo ventilado

Enseguida, se muestra el balance global de energía para un techo ventilado mediante las herramientas de calculo que brinda el software Energy Plus-DesignBuilder, ver Figura 2.10. Esto implica analizar los diversos tipos de energía que ingresan y se liberan del sistema, así como las acumulaciones de calor en el espacio del techo.

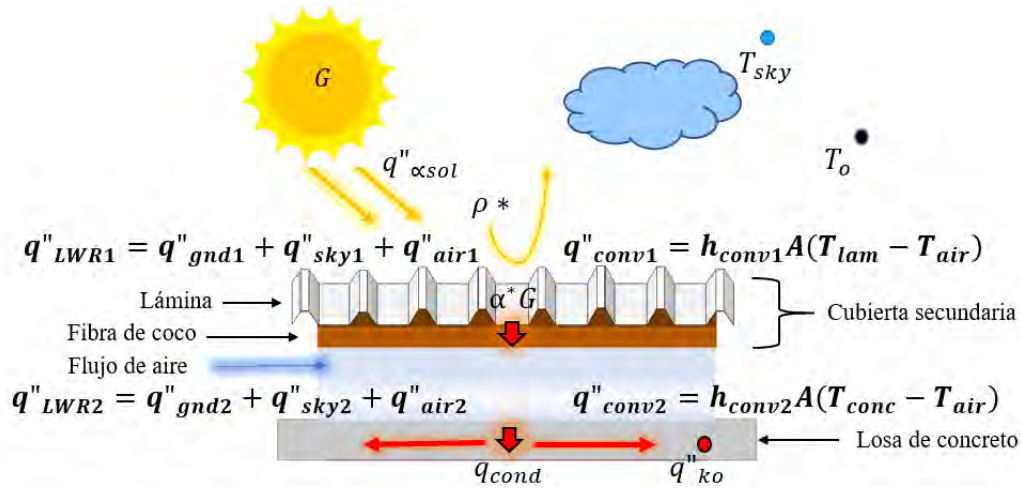


Figura 2.10 Modelo matemático del techo ventilado de lámina con fibra de coco.

El intercambio de energía en las edificaciones se deriva de la interacción entre las superficies externas y el entorno circundante. En este contexto, la losa de concreto experimenta un intercambio de calor por convección (q''_{conv}), que es complementado por la radiación de onda larga (q''_{LWR}), así como por la radiación solar directa y difusa ($q''_{\alpha_{sol}}$), y el flujo de calor por conducción a través de la losa (q''_{ko}), por lo que el balance se denota por la Ec. (2.25):

$$q''_{conv} + q''_{LWR} + q''_{\alpha_{sol}} + q''_{ko} = 0 \quad 2.25$$

donde:

q_{conv} = flujo de calor por convección

q''_{LWR} = flujo de calor por radiación de onda larga

$q''_{\alpha_{sol}}$ = flujo de calor por radiación solar directa y difusa

q''_{ko} = flujo de calor por conducción a través de la losa de concreto

La transferencia de calor por convección superficial se representa mediante la ecuación clásica, la cual describe el intercambio térmico entre una superficie y el fluido circundante como se observa en la Ec. (2.26):

$$q''_{conv} = h_{coex}A(T_{surf} - T_{air}) \quad 2.26$$

donde:

q''_{conv} = flujo de calor por convección exterior

h_{coex} = coeficiente de convección exterior

A = área de la superficie

T_{surf} = temperatura de la superficie

T_{air} = temperatura del aire exterior

El flujo de calor por convección, tanto en el interior como en el exterior de la losa, se debe al intercambio térmico entre la superficie y el aire que la rodea. Este proceso depende del coeficiente de convección exterior h_{coex} que varía con las condiciones atmosféricas y el viento, y de la diferencia de temperatura entre la temperatura de la superficie de la losa T_{surf} y la temperatura del aire exterior T_{air} . Cuando el aire tiene temperatura más baja que la pérdida, el calor fluye desde la superficie hacia el aire, mientras que, si el aire es a temperatura alta, el flujo de calor será en sentido contrario. Además, la superficie de la losa también emite radiación de onda larga q''_{LWR} , que es la radiación térmica que emiten los cuerpos en función de su temperatura. Este flujo de calor por radiación es un proceso continuo en el que la losa irradia energía hacia el cielo y el entorno circundante. El techo ventilado, al tener una lámina blanca, minimiza la absorción de radiación solar al reflejarla en su mayoría. Sin embargo, también emite radiación de onda larga en función de su propia temperatura y la de la losa que lo acompaña.

La radiación solar incide en la superficie exterior del techo ventilado. Una parte de esta radiación es directa, proveniente directamente del sol, mientras que la otra es difusa, reflejada por el cielo y el entorno $q''_{\alpha sol}$. La lámina blanca de la cubierta refleja gran parte de la

radiación solar, lo que reduce el calor que alcanza el concreto, minimizando la acumulación de calor en la estructura. Sin embargo, una fracción de esta energía solar se transmite a través de la lámina y del relleno de fibra de coco q_{cond} , que actúa como un aislante térmico para reducir el flujo de calor hacia la losa.

Por último, el calor que atraviesa el techo y el relleno de fibra de coco eventualmente llega a la superficie de la losa de concreto. Este calor fluye por convección q_{conv} a través de la masa de la losa, transmitiéndose gradualmente al interior. La cantidad de calor que atraviesa la pérdida dependerá de la conductividad térmica del concreto y del gradiente de temperatura a través del espesor.

El intercambio de radiación de onda larga q''_{LWR} se determina considerando la absorptancia de la superficie α^*G , las temperaturas superficiales T_{surf} , así como las temperaturas del cielo T_{sky} y del suelo q''_{sky} , junto con los factores de visibilidad del cielo y del suelo. Asimismo, el flujo total de calor radiativo de onda larga q''_{LWR} se expresa como la suma de los componentes que resultan del intercambio de radiación con el suelo, el cielo y el aire como se observa en la Ec. (2.27):

$$q''_{LWR} = q''_{gnd} + q''_{sky} + q''_{air} \quad 2.27$$

donde:

q''_{sky} = intercambio radiativo con el suelo

q''_{sky} = intercambio radiativo con el cielo

q''_{sky} = intercambio radiativo con el aire

Se aplica la ley de Stefan – Boltzmann a cada uno de los componentes, y se obtiene la Ec. (2.28):

$$q''_{LWR} = \varepsilon\sigma F_{gnd}(T^4_{gnd} - T^4_{surf}) + \varepsilon\sigma F_{sky}(T^4_{sky} - T^4_{surf}) + \varepsilon\sigma F_{air}(T^4_{air} - T^4_{surf}) \quad 2.28$$

donde:

ε = emisividad de la superficie

σ = constante de Stefan – Boltzmann

F_{gnd} = factor de vista de la superficie externa a la superficie del suelo

F_{sky} = factor de vista de la superficie externa del cielo

F_{air} = factor de vista de la superficie externa del aire

T_{surf} = temperatura de la superficie externa

T_{gnd} = temperatura de la superficie del suelo

T_{sky} = temperatura del cielo

T_{air} = temperatura del aire

A través de coeficientes de transferencia de calor, se puede linealizar la ecuación anterior, resultando en la siguiente Ec. (2.29):

$$q''_{LWR} = h_{r,gnd}(T_{gnd} - T_{surf}) + h_{r,sky}(T_{sky} - T_{surf}) + h_{r,air}(T_{air} - T_{surf}) \quad 2.29$$

donde:

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon \sigma F_{gnd}(T_{surf}^4 - T_{gnd}^4)}{T_{surf} - T_{gnd}} \quad 2.30$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon \sigma F_{sky}(T_{surf}^4 - T_{sky}^4)}{T_{surf} - T_{sky}} \quad 2.31$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon \sigma F_{air}(T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}} \quad 2.32$$

La ganancia solar total en la superficie exterior resulta de la radiación directa y difusa absorbida por el material, la cual depende de diversos factores, como la ubicación geográfica, la orientación e inclinación de la superficie, las propiedades térmicas del material y las condiciones climáticas. Este fenómeno se expresa mediante la Ec. (2.33).

$$q''_{sol} = \alpha \cdot (I_b \cdot \cos A_n \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg}) \quad 2.33$$

donde:

α = absorptancia solar de la superficie

A = ángulo de la incidencia de los rayos del sol

S = área de la superficie

S_s = área soleada de la superficie

I_b = intensidad de la radiación solar directa

I_s = intensidad de la radiación difusa

I_g = intensidad de la radiación difusa reflejada por el suelo

F_{ss} = factor de vista entre la superficie y el cielo

F_{sg} = factor de vista entre la superficie y el suelo

2.5 Softwares de simulación

Los softwares de simulación energética son herramientas informáticas que permiten modelar, analizar y prevenir el comportamiento energético de sistemas y edificios. Estos programas se utilizan en diferentes etapas de la trayectoria de un proyecto, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento de los sistemas energéticos. Además, permiten evaluar el impacto ambiental, el confort térmico y la eficiencia de los sistemas de climatización, iluminación y otros componentes de un edificio o infraestructura.

Los softwares más utilizados se describen a continuación, se inicia con EnergyPlus que facilita la simulación del desempeño energético de un edificio de forma detallada, analizando la interacción de los sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado (HVAC), iluminación y otros elementos. Además, permite evaluar el confort térmico y la calidad del aire interior, lo que es esencial para diseñar edificios más sostenibles y eficientes. EnergyPlus es altamente preciso y flexible, pero puede requerir un nivel avanzado de conocimiento para su uso.

Por otra parte, TRNSYS se destaca por la flexibilidad y capacidad de modelar sistemas complejos, como los de energía renovable (solar, eólica, geotérmica, etc.). TRNSYS es útil para simular el rendimiento energético de estos sistemas en combinación con otros componentes del edificio. Su enfoque modular permite a los usuarios diseñar y simular sistemas energéticos personalizados de manera precisa y detallada. Además, TRNSYS es adecuado para realizar simulaciones a largo plazo y para evaluar el desempeño de sistemas de energía renovable.

No obstante, OpenStudio es un entorno de desarrollo de código abierto que facilita la simulación energética utilizando el motor de simulación de EnergyPlus. Este software es ideal para los usuarios que desean personalizar y adaptar sus modelos de simulación energética. OpenStudio permite la creación de modelos complejos, la integración con otros sistemas y el análisis de diferentes aspectos del rendimiento energético de un edificio. Al ser de código abierto, también ofrece una sociedad activa de usuarios que contribuye al desarrollo de nuevas herramientas y funcionalidades.

Posteriormente, DesignBuilder basado en EnergyPlus, es conocido por su interfaz gráfica amigable y su capacidad para realizar simulaciones detalladas de edificios. Este software es útil para evaluar la eficiencia energética, el confort térmico y la iluminación natural y artificial en edificios. También permite simular el rendimiento de los sistemas HVAC y optimizar los materiales de construcción. DesignBuilder facilita el modelado energético de los edificios y presenta los resultados de forma visual y accesible para los usuarios.

Cabe mencionar, que en este estudio se eligió DesignBuilder, el cual permite explorar y optimizar de manera eficiente varios aspectos del diseño de edificios, como la elección de materiales, la iluminación natural y el consumo de energía, con un enfoque en soluciones sustentables [90], [91], [92] y [93].

2.6 Consideraciones para la simulación en evolución libre y con HVAC

La simulación de edificaciones es una herramienta indispensable para evaluar y optimizar el rendimiento energético, térmico y ambiental de las construcciones. Para llevar a cabo una simulación efectiva, es necesario seguir una serie de pasos, que van desde la definición de

objetivos, la selección de variables y visualización de los resultados. Una vez terminada la simulación se comparan los resultados con datos experimentales para validarlos, en caso de no tener resultados satisfactorios, se ajustan parámetros y se vuelve a realizar la simulación. En la Figura 2.11 se presenta el diagrama de flujo del proceso para realizar la simulación.

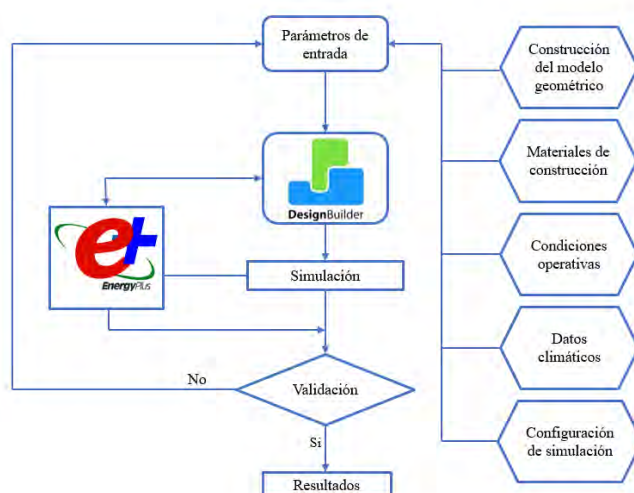


Figura 2.11 Diagrama de flujo del proceso de la simulación.

A continuación, se describe el proceso que se constituye de tres puntos importantes.

- I. Parámetros de entrada, en esta etapa, se definen todas las variables necesarias para la simulación, incluyendo:
 - Modelo geométrico del edificio: se construye la representación de la edificación con sus zonas térmicas (habitaciones) y aberturas (puertas, ventanas y huecos).
 - Materiales de construcción: Se especifica el número de capas, el tipo de material y sus propiedades termofísicas.
 - Condiciones operativas: Se ingresan datos sobre la ocupación del edificio, uso de iluminación, equipos eléctricos, sistemas HVAC y horarios de funcionamiento. En caso de ser requerido para la simulación.
 - Datos climáticos: Se incorpora un archivo *.EPW, con la información meteorológica del sitio de estudio, incluyendo coordenadas geográficas.
 - Configuración de simulación: Se establecen parámetros como el paso de tiempo, el porcentaje de sombreado, la convergencia y los resultados a visualizar.

- II. Simulación: una vez definidos los parámetros, se ejecuta la simulación en DesignBuilder o EnergyPlus. Para ello, se genera un archivo IDF, que contiene toda la información del edificio y se utiliza en EnergyPlus para procesar el análisis térmico.
- III. Visualización de resultados: Los datos finales pueden presentarse de manera gráfica o exportarse a formatos como xlsx para su análisis detallado.

A continuación, se aborda el tema de BESTest 600's, una evaluación diseñada para medir las habilidades del usuario en el manejo del software DesignBuilder.

2.7 BESTest 600

En este apartado se demuestra la evaluación de habilidades del usuario, este tipo de evaluación permite identificar áreas donde los usuarios mejoran la comprensión o destreza en el uso del software, lo que resulta indispensable para maximizar la eficiencia y precisión en los proyectos. El BESTest (Building Energy Simulation Test) es una metodología estandarizada para evaluar y verificar la precisión de las simulaciones energéticas generadas por el usuario. A través de esta prueba, se analiza la capacidad del usuario para modelar correctamente diversos aspectos de un edificio, como la envolvente térmica, los sistemas de climatización y las condiciones de ventilación, entre otros. La realización de un BESTest permite asegurar que los resultados obtenidos en las simulaciones sean consistentes con estándares reconocidos, lo que garantiza la confiabilidad de las predicciones energéticas, en la Tabla 2.1 sección 2.3.1 apartado BESTest y Tabla 2.4 sección 2.3.3. se presentan las propiedades termofísicas de los componentes de la envolvente y acristalamientos del edificio para el BESTest.

A continuación, se muestran las características geométricas junto con las propiedades de los materiales que conforman las edificaciones de los casos 600, 610, y 620, además se hace mención de la localización del sitio. Es importante mencionar que el caso 610 es idéntico al caso 600, pero se añade un elemento de sombreado en la fachada sur. El caso 620 varía solo por la disposición de las ventanas.

En los detalles del sitio la ubicación específica es el Aeropuerto de Denver Stapleton, Colocado, E.U.A y los datos meteorológicos de la estación WMO 724690. En la Figura 2.11a

se presenta el detalle de las dimensiones de la geometría principal, caso 600, y en las Figuras 2.12b y Figura 2.12c se presentan los detalles adicionales para evaluar diferentes efectos sobre el comportamiento térmico del edificio.

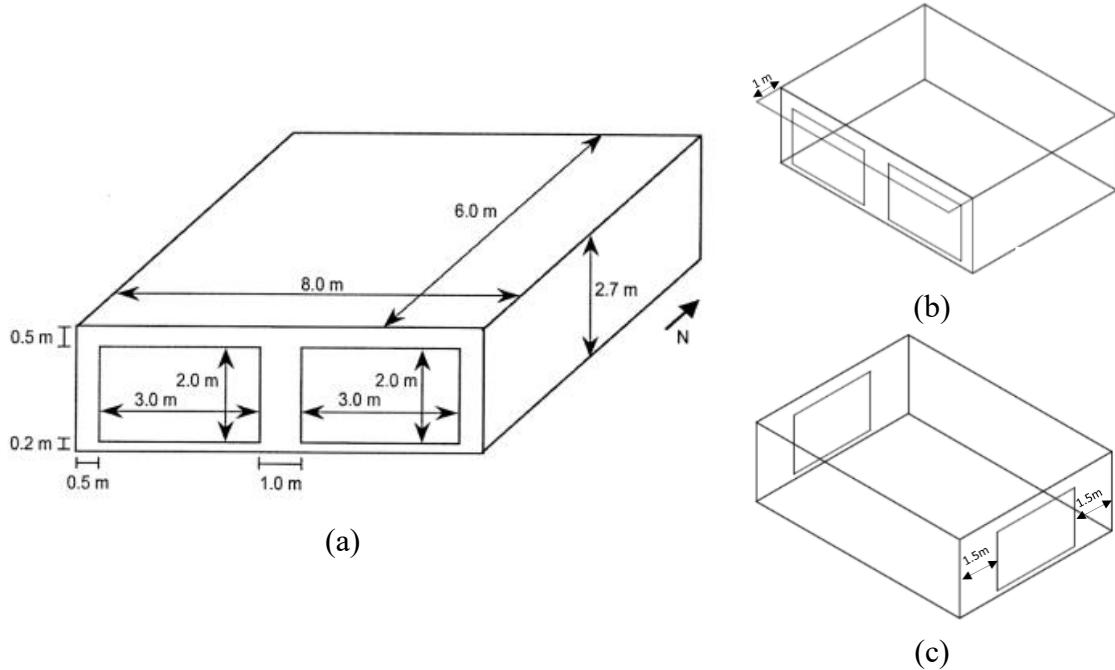


Figura 2.12 Geometría y dimensiones de los casos (a) 600, (b) 610 y (c) 620.

En la Tabla 2.5 se presentan los resultados obtenidos de la simulación energética de los casos 600's. Estos resultados se comparan con respecto a los datos reportados en el estándar ANSI/ASHRAE 140/2011 [128]. Los parámetros de análisis que se comparan son: carga térmica anual de calentamiento y enfriamiento y valor máximo (pico) para ambas cargas.

Tabla 2.5 Resultados y comparación de los resultados de los casos 600's con respecto a ANSI/ASHRAE 140/2011.

Caso	600	610	620
Calentamiento anual (MWh)			
Mínimo	4.296	4.355	4.613
Máximo	5.709	5.786	5.944
Promedio BESTest	5.046	5.098	5.328
Presente trabajo	4.690	4.730	4.868
Diferencia %	7.3 %	7.4 %	9.02 %
Enfriamiento anual (MWh)			
Mínimo	6.137	3.915	3.417
Máximo	8.448	6.1390	5.482

Promedio BESTest	7.053	5.144	4.416
Presente trabajo	6.877	4.851	4.311
Diferencia %	2.5 %	5.8 %	2.4 %
Pico de calentamiento (KW)			
Mínimo	3.437	3.437	3.591
Máximo	4.354	4.354	4.379
Promedio BESTest	3.952	3.947	3.998
Presente trabajo	3.906	3.895	3.911
Diferencia %	1.1 %	1.3 %	2.2 %
Pico de enfriamiento (KW)			
Mínimo	5.965	5.669	3.634
Máximo	7.188	6.673	5.096
Promedio BESTest	6.535	6.090	4.393
Presente trabajo	6.695	6.275	4.140
Diferencia %	2.4 %	2.9 %	5.9 %

Con base en la diferencia porcentual que se presenta en la Tabla 2.5 para los cuatro parámetros de análisis y comparación, se concluye que los resultados se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para el BESTEST, por lo tanto, la familiarización con el software de simulación energética es hasta el momento satisfactoria, lo que da paso a la simulación de edificios más complejos.

Después de realizar el BESTest 600 de DesignBuilder, que permite evaluar con precisión las simulaciones energéticas, es importante abordar los indicadores de desempeño térmico. Estos indicadores son herramientas para medir la eficiencia energética y el confort térmico en edificaciones. Permiten analizar cómo los diferentes parámetros de diseño, como el aislamiento, la ventilación y los sistemas HVAC, influyen en el rendimiento térmico general, que ayuda a optimizar los edificios para un mejor uso de energía y el bienestar de sus ocupantes.

2.8 Indicadores de desempeño térmico

Los indicadores de desempeño térmico son esenciales para analizar cómo se comporta un edificio en términos de eficiencia energética y confort térmico [94],[95]. Estos parámetros permiten evaluar el rendimiento térmico de un espacio y facilitar el diseño de soluciones que optimizan el uso de la energía, a continuación, se describen los indicadores más relevantes.

2.8.1.1 Carga térmica

La carga térmica es un indicador que determina la cantidad de energía requerida para mantener un espacio en un rango de temperatura adecuado para el confort de los ocupantes. Se clasifica en dos tipos: calefacción, que busca incrementar la temperatura del ambiente, y refrigeración, que tiene la finalidad de reducir la temperatura interior. Realizar un cálculo de estas cargas es necesario para el dimensionamiento adecuado de los sistemas de climatización, como calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), garantizando tanto un rendimiento eficiente como un ahorro energético a largo plazo.

El cálculo de las cargas térmicas se ve influenciado por múltiples factores, como las propiedades de los materiales de construcción, la orientación del edificio, las condiciones climáticas exteriores y, el número de personas que utilizan el espacio. Estos cálculos se realizan mediante herramientas y métodos estandarizados, como los establecidos por ASHRAE, que ofrecen un enfoque detallado para calcular las variaciones térmicas en tiempo real, considerando las fluctuaciones horarias y las pérdidas y ganancias de calor. Estas herramientas permiten diseñar sistemas de climatización eficientes y adaptados a las necesidades específicas de cada edificación. Para ecuaciones específicas, el Manual de fundamentos de ASHRAE proporciona métodos y formulaciones detallados a los que se hace referencia con frecuencia en los modelos EnergyPlus, incluida la siguiente forma general para la carga de refrigeración en la Ec. (2.34) [96]:

$$Q_{ento} = \Sigma(Q_{gas} + Q_{gasin} + Q_{vent}) - Q_{alm term} \quad 2.34$$

donde:

Q_{ento} = carga de enfriamiento

Q_{gas} = ganancia térmica solar

Q_{gasin} = ganancias térmicas internas

Q_{vent} = ganancia o pérdida de calor debidas a la ventilación

Q_{alte} = almacenamiento térmico

Q_{cale} = carga térmica de calefacción

Q_{inf} = pérdidas de calor por infiltración de aire

Q_{tran} = pérdidas de calor por transmisión

Y para la calefacción, la ecuación se ajusta para tener en cuenta la pérdida de calor hacia el exterior y las ganancias térmicas por infiltración y cargas internas se da por la Ec. (2.35) [71]:

$$Q_{cale} = \Sigma(Q_{inf} + Q_{ventilación} + Q_{tran}) - Q_{gasin} \quad 2.35$$

La carga térmica total de un espacio está influenciada por diversos fenómenos que afectan tanto el enfriamiento como la calefacción del ambiente interno. Por un lado, Q_{ento} representa la energía necesaria para reducir la temperatura interna hasta un nivel confortable, teniendo en cuenta las fuentes de calor que ingresan al espacio. Entre estas, se encuentra Q_{gas} , correspondiente a la ganancia térmica solar que ingresa al edificio a través de ventanas, paredes y otras superficies expuestas al sol, influenciada por la orientación, el tipo de vidrio y la incidencia de radiación solar.

Además, Q_{gasin} engloba las ganancias térmicas internas generadas por ocupantes, equipos eléctricos e iluminación, que aumentan la temperatura interna. Otro factor relevante es Q_{vent} , asociado al intercambio de aire entre el interior y el exterior mediante ventilación natural o forzada, lo que contribuye tanto a ganancias como a pérdidas de calor. Por su parte Q_{alte} refleja la capacidad de los materiales de construcción para almacenar y liberar calor, como ocurre con el concreto o el ladrillo, afectando la dinámica térmica diaria.

En cuanto a Q_{cale} cuantificar la energía necesaria para elevar la temperatura interna y compensar pérdidas térmicas, entre las que destacan Q_{inf} , derivada del ingreso no controlado de aire exterior a través de grietas o aberturas, Q_{tran} , que corresponde al flujo de calor a través de los materiales del edificio debido a diferencias de temperatura entre el interior y el exterior. Estos fenómenos, en conjunto, determinan las necesidades energéticas para mantener un ambiente confortable dentro del espacio construido.

2.8.1.2 Consumo energético

En el contexto de los edificios, el consumo de energía abarca la cantidad total de energía necesaria para mantener el confort térmico, la iluminación, los equipos y otras necesidades

operativas. La fórmula general para estimar el consumo de energía en edificios, especialmente en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), se presenta en la Ec. (2.36) y se expresa:

$$Con_{tal} = \sum \frac{Q_{termicas}}{\eta_{sistema}} \quad 2.36$$

donde:

Co_{tal} = consumo total de energía

Q_{ter} = cargas térmicas de calefacción o refrigeración

η_{sis} = es la eficiencia de cada sistema o equipo individual.

El consumo total de energía Co_{tal} en un edificio se determina sumando las cargas térmicas generadas por los sistemas de calefacción y refrigeración, las cuales se conocen como cargas térmicas de calefacción o refrigeración Q_{ter} . Estas cargas dependen de varios factores, como la temperatura interna deseada, las pérdidas o ganancias térmicas del edificio y las condiciones climáticas exteriores.

Para determinar el consumo de energía asociado con estos sistemas, se debe considerar la eficiencia de cada sistema o equipo individual η_{sis} , que representa la capacidad del equipo para convertir la energía consumida en energía útil para calefacción o refrigeración. La eficiencia influye directamente en la cantidad de energía necesaria para alcanzar las condiciones térmicas requeridas en el interior del edificio. De esta manera, el consumo total de energía estará determinado no solo por las cargas térmicas, sino también por la eficiencia de los sistemas encargados de generar o eliminar calor.

Esta fórmula agrega el consumo de energía de cada componente del sistema en función de su carga y eficiencia individuales. Los modelos de energía de los edificios, como los que se realizan en EnergyPlus o DesignBuilder, utilizan este método al incorporar un balance detallado de las ganancias y pérdidas de calor debido a factores como la ocupación, la iluminación, el equipo y las características de la envolvente (por ejemplo, aislamiento, ventanas, hermeticidad) [97],[98],[99],[100].

2.8.1.3 Coeficiente global de transferencia de calor (U)

El coeficiente U , también conocido como valor U , es una medida para evaluar la eficiencia térmica de los materiales que componen la envolvente de un edificio. Este valor indica la cantidad de calor que se transfiere a través de una superficie, como paredes, ventanas, techos o suelos. Cuanto más bajo sea el coeficiente U , mejor es la capacidad del material para resistir el flujo de calor, lo que conlleva una mayor capacidad de aislamiento térmico. La fórmula principal del coeficiente de transmisión térmica [101],[102] está en la Ec. (2.37):

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad 2.37$$

donde:

R_{total} = es la resistencia térmica total del sistema constructivo, calculada en la Ec. (2.38):

$$R_{total} = R_{int} + \sum \frac{d_i}{k_i} + R_{ext} \quad 2.38$$

donde:

R_{int} =Resistencia térmica de la capa interna (m^2KW^{-1}), que depende del tipo de fluido en contacto con la superficie interior del material.

d_i = Espesor de cada capa del material (m)

k_i = Conductividad térmica del material ($Wm^{-1}K^{-1}$), que representa la capacidad de conducción térmica de cada material.

R_{ext} = Resistencia térmica de la capa externa (m^2KW^{-1}), que considera la transferencia de calor por convección y radiación en la superficie exterior del material.

Si el elemento constructivo es homogéneo y tiene solo una capa, la ecuación se simplifica a la Ec. (2.39):

$$U = \frac{k}{d} \quad 2.39$$

donde:

k = Conductividad térmica del material $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

d = Espesor del material (m).

Esto significa que cuanto mayor sea el espesor, menor será la transmisión térmica, y cuanto mayor sea la conductividad térmica, más rápido se transmitirá el calor.

2.8.1.4 Índices de confort térmico

Existen diversos índices que miden cómo perciben los ocupantes las condiciones térmicas del interior de un edificio. El índice de temperatura operativa y el índice de confort térmico son ejemplos, y combinan factores como la temperatura, la humedad y la velocidad del aire para evaluar el bienestar térmico. El confort térmico es una experiencia subjetiva, donde las personas no perciben ni frío ni calor excesivo, y se sienten cómodos en su entorno. Esta sensación depende de múltiples factores, internos y externos como el metabolismo y la actividad física, el tipo de ropa, la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del aire y la radiación térmica.

En este estudio se aplicó un modelo propuesto por Nicol en 2004 [103], para condiciones de confort en áreas de clima cálido-húmedo. El método describe a la temperatura de confort de la forma siguiente en la Ec. (2.40):

$$T_c = 0.534T_{amb} + 12.9\text{ }^{\circ}\text{C} \quad 2.40$$

donde T_c es la temperatura de confort, y T_o es la temperatura media exterior. El rango de temperatura de la zona de confort se obtiene mediante la Ec. (2.41):

$$T_c \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C} \quad 2.41$$

2.8.1.5 Factor de emisiones

Hace referencia a la cantidad de gases contaminantes liberados por cada unidad de actividad o consumo energético. Este valor se utiliza para calcular las huellas de carbono y el impacto ambiental de las acciones humanas. La magnitud de este factor depende del tipo de fuente de

energía o proceso evaluado. Por ejemplo, la quema de combustibles fósiles, como el carbón, produce más emisiones de CO₂ que las fuentes de energía renovable.

Los factores de emisión se expresan generalmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de energía consumida o actividad realizada, como toneladas de CO₂/kWh de electricidad producida o por cada litro de combustible quemado. Se utilizan para estimar la huella de carbono de un edificio, transporte o actividad industrial.

Estos valores permiten a las empresas y gobiernos implementar estrategias para mitigar las emisiones y optimizar el uso de energía en función de la sostenibilidad ambiental, [104],[105].

La Ec. (2.42), es la ecuación general para calcular el factor de emisiones, [106],[107]:

$$Fac_{emi} = \frac{emi_{CO_2}}{ener_{cons}} \quad 2.42$$

donde:

Fac_{emi} = factor de emisiones

emi_{CO_2} = emisión de CO₂

$ener_{con}$ = energía consumida

El factor de emisión Fac_{emi} se utiliza para calcular la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que se emite por cada unidad de energía consumida. La emisión de CO₂ emi_{CO_2} representa la cantidad total de dióxido de carbono liberado al ambiente como resultado de este consumo energético, ya sea de manera directa, como ocurre en la combustión de combustibles fósiles, o indirecta, cuando la electricidad utilizada proviene de fuentes fósiles. Por último, la energía consumida $ener_{con}$ es la cantidad total de energía utilizada por un sistema o proceso.

2.8.1.6 Flujo de calor

El flujo de calor se refiere al movimiento de energía térmica de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura, como resultado de una diferencia de temperatura, este flujo ocurre por medio de la conducción, convección o radiación, dependiendo del medio

y las condiciones del sistema. Se mide en unidades de energía por área y es necesario para entender las pérdidas o ganancias térmicas en función de la temperatura externa.

La ecuación para el cálculo del flujo de calor [108], es la Ec. (2.43):

$$Q = U \cdot A \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad 2.43$$

donde:

Q = es el flujo de calor

U = es el coeficiente de transmisión térmica

A = área de la superficie a través de la cual ocurre la transferencia de calor

T_{int} = temperatura interior

T_{ext} = temperatura exterior

El flujo depende de varios factores, siendo el coeficiente de transmisión térmica U uno de los más importantes, ya que mide la capacidad de un material para conducir calor. Un valor más alto de U indica una mayor transferencia de calor. La transferencia de calor ocurre a través de una superficie de área A , que es la zona por donde se produce este intercambio térmico. Además, la diferencia de temperatura entre el interior T_{int} y el exterior T_{ext} del edificio es importante para determinar el flujo de calor, ya que cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será el flujo térmico hacia o desde el espacio interior.

Los indicadores de desempeño térmico son herramientas para evaluar la eficiencia energética y el confort térmico de los edificios. Estos indicadores permiten medir aspectos, como la carga térmica, las ganancias y pérdidas de calor, la temperatura superficial de la envolvente y el rendimiento de los sistemas HVAC. Su importancia radica en proporcionar información necesaria para optimizar el diseño de las edificaciones. Además, contribuyen a reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂, lo cual es indispensable para cumplir con las normativas ambientales y fomentar la construcción de edificios más ecológicos y eficientes. De esta manera, los indicadores térmicos no solo mejoran la calidad del ambiente interior, sino que son importantes en la mejora del desempeño ambiental de la edificación.

Una vez definidos los fundamentos teóricos y los indicadores utilizados para evaluar el desempeño térmico de las edificaciones, el siguiente capítulo se centra en el desarrollo práctico de esta investigación. En él, se describe la construcción e instrumentación del módulo experimental, diseñado con el propósito de obtener datos que permitan analizar el comportamiento térmico de diferentes configuraciones constructivas. Este apartado presenta el proceso constructivo, los materiales empleados y el sistema de medición implementado, así como los resultados preliminares derivados de las pruebas experimentales.

Capítulo 3

Construcción e instrumentación

En este apartado, se expone la construcción e instrumentación del módulo experimental desarrollado para esta investigación. Se detalla el proceso, los materiales y los sensores empleados en la configuración del sistema. Asimismo, se muestran los resultados obtenidos a través de las pruebas experimentales, que proporcionan un análisis preliminar de los datos recolectados y la relevancia para los objetivos de esta investigación.

3.1 Diseño y descripción

En la Figura 3.1 se muestra la representación del techo tradicional, el cual está compuesto únicamente de una losa de concreto armado de 1.2 m^2 y 0.10 m de espesor e incorpora una agarradera de metal por cada lado. Además, en la Figura 3.2 se muestra la representación gráfica del módulo experimental que está compuesto por una cavidad de madera de 1 m^3 . Las paredes exteriores son de madera tipo OSB (Oriented Strand Board) de 0.018 m de espesor, y están revestidas con pintura blanca reflectante, en el interior las paredes se forraron con aislante térmico (poliestireno) de 0.025 m de espesor, además, toda la cavidad se encuentra reforzada en las esquinas por una estructura metálica para soportar el peso de la losa de concreto.

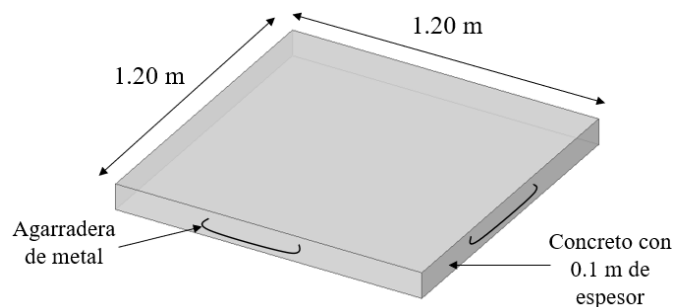


Figura 3.1 Losa de concreto del módulo experimental.

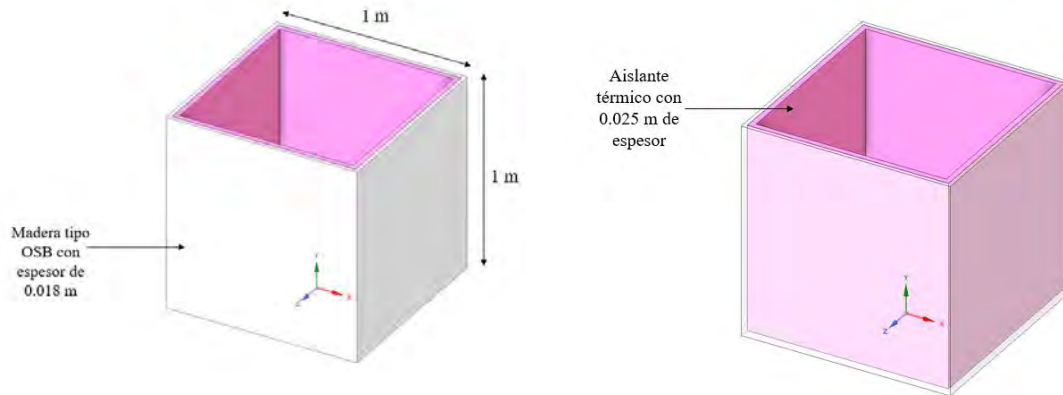


Figura 3.2 Composición del módulo de pruebas experimentales.

3.2 Construcción

Con base en el diseño, se realizó el corte del material y al ensamblaje de los módulos, como se ilustra en la Figura 3.3. En la Figura 3.4 se presenta la estructura final de los tres módulos de prueba, completados tras su ensamblaje y recubiertos con una capa de pintura blanca. Con este enfoque se pretende proporcionar protección adicional contra las condiciones climáticas, lo que asegura la durabilidad y la estética de los módulos experimentales.



Figura 3.3 Construcción de los módulos experimentales.



Figura 3.4 Módulos terminados para la fase de instrumentación.

3.3 Configuración

Se realizaron pruebas experimentales en tres módulos con configuraciones de techo distintas, durante dos periodos de tiempo, organizados en dos etapas. En la primera etapa, se instalaron cubiertas, ver Figura 3.5b. En la segunda etapa, estos módulos fueron modificados con un techo ventilado ver Figura 3.5c.

3.4 Instrumentación

Para el monitoreo térmico se instrumentaron tres módulos experimentales, con configuraciones distintas como se mencionó previamente. La Figura 3.5 muestra con detalle la disposición de los sensores para las cubiertas y techos ventilados. La distribución de los sensores de temperatura se organizó en dos conjuntos: uno correspondiente a la losa de concreto y otro enfocado en la envolvente de la cavidad.

Dentro de la losa de concreto se colocaron tres termopares tipo T (incertidumbre ± 0.5 °C), los datos de los sensores se obtuvieron mediante un adquisidor de datos Keysight 32972A. En la cavidad se colocaron 20 sensores tipo DS18B20 digitales (incertidumbre ± 0.5 °C) con capacidad de medir desde -55 °C hasta 125 °C. Estos sensores se colocaron sobre la superficie interna de las paredes entre la madera, aislante térmico, en la parte inferior de la lámina, y entre lámina y fibra de coco, sin embargo, en los techos ventilados también se colocaron en el canal de aire y en la parte superior a 0.20 m de distancia del módulo. Además, se instalaron 13 sensores analógicos NTC (incertidumbre ± 0.5 °C) que son termistores negativos de coeficiente de temperatura, los sensores se situaron en la parte interna y externa del módulo como se observa en la Figura 3.5. La adquisición de mediciones a través de sensores digitales y analógicos fue mediante una placa de Arduino MEGA, a la cual, se le incorporó un reloj y una memoria de almacenamiento para la adquisición de datos como se observa en la Figura 3.6, además, se aprecia con puntos de colores el conexionado realizado de cada Arduino.

La selección de sensores respondió tanto a criterios técnicos como a limitaciones operativas. Si bien los termopares tipo T ofrecen buena precisión y estabilidad para registrar temperaturas dentro de la masa térmica de la losa, su uso requiere un adquisidor. En este caso, se contó únicamente con un sistema Keysight 34972A, lo que restringió su empleo a tres puntos de medición. Para complementar el monitoreo en zonas con mayor cantidad de

puntos de interés, como cavidades, superficies internas y exteriores del módulo, se optó por sensores digitales DS18B20 y sensores analógicos NTC. Estos dispositivos, además de ser compatibles con plataformas de bajo costo como Arduino MEGA, ofrecieron una solución accesible económicamente para ampliar la cobertura espacial del registro térmico. Su incertidumbre similar a la de los termopares ($\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) permitió mantener la coherencia en los datos obtenidos, facilitando la comparación entre distintas ubicaciones y configuraciones constructivas.

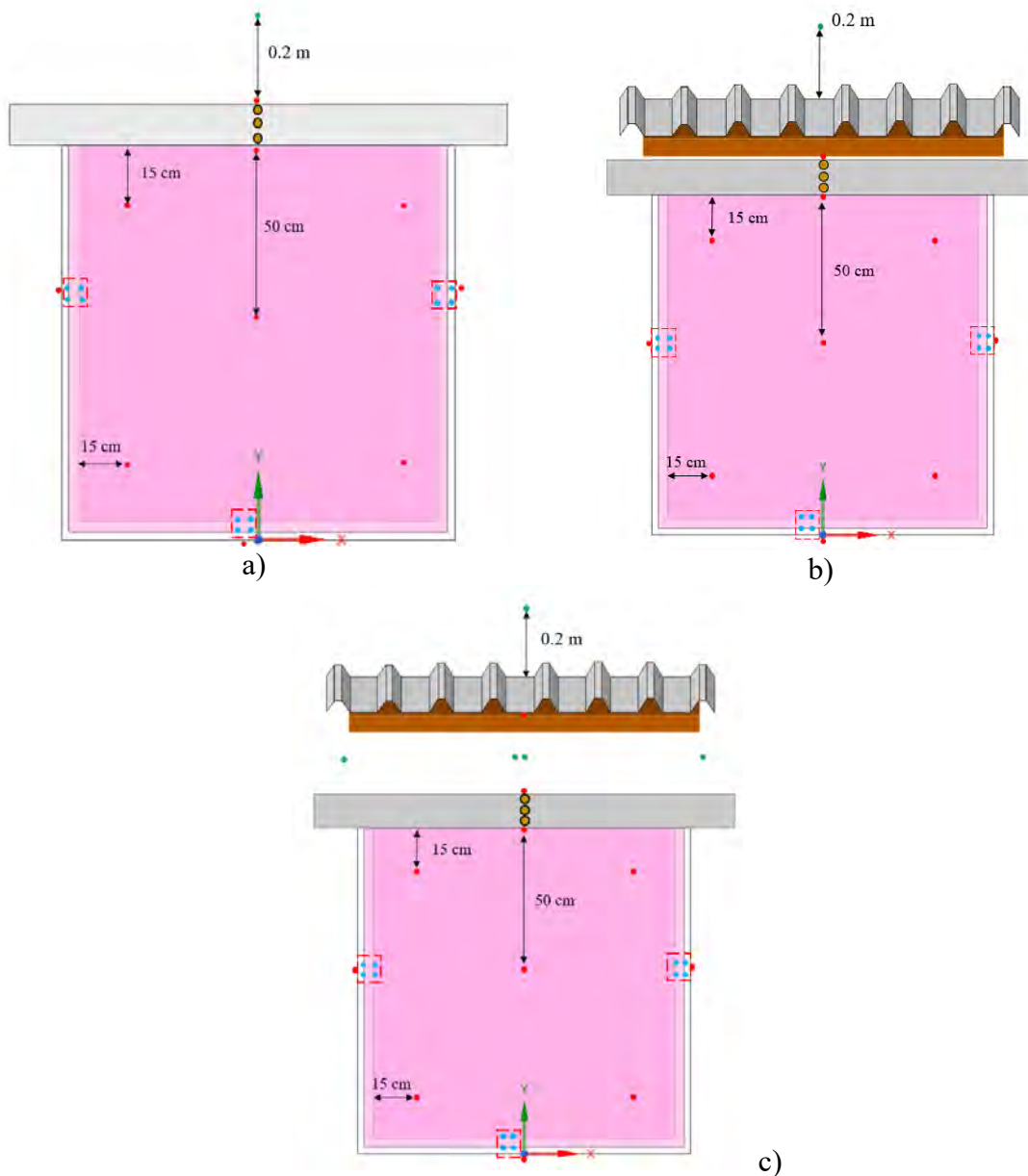


Figura 3.5 Distribución de los sensores de medición en los módulos experimentales: a) techo de concreto, b) techo con cubierta de lámina con relleno de fibra de coco, c) techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.

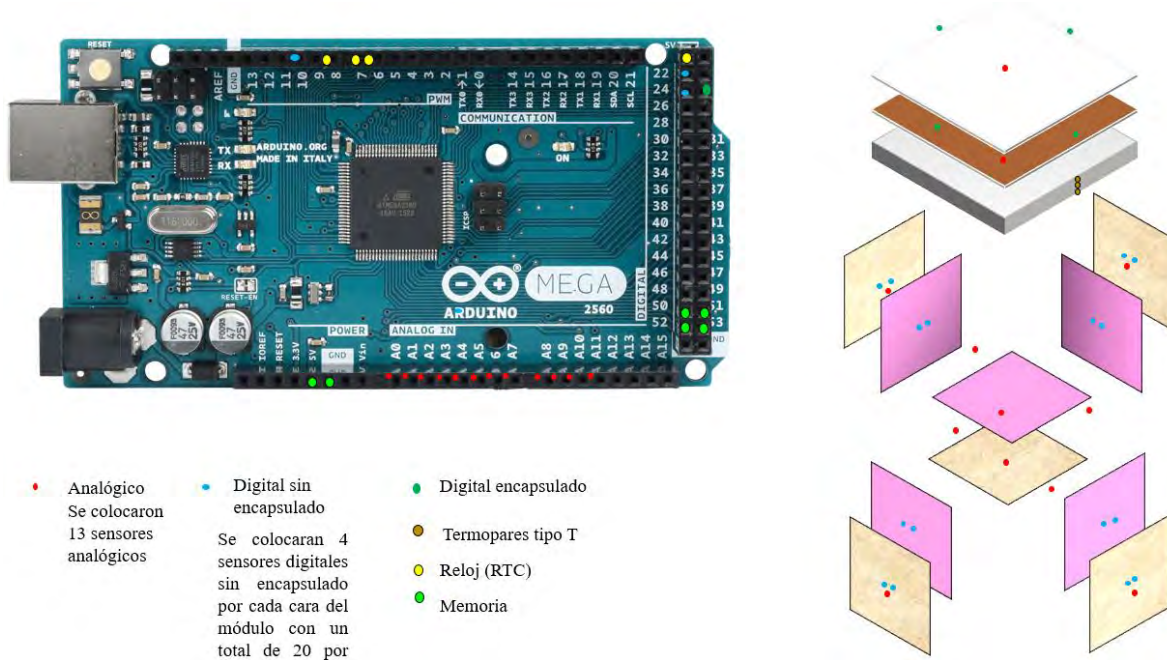


Figura 3.6 Distribución de los sensores sobre la placa Arduino MEGA para almacenamiento de datos.

Por otro lado, las condiciones meteorológicas fueron medidas utilizando una estación meteorológica Vaisala Maws100, que registró la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), la humedad relativa (%), la velocidad del viento (m/s) y la radiación solar (W/m^2). La estación incluye un sensor multicanal Vaisala WXT536, el cual presenta un margen de error de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ para la temperatura, $\pm 3\%$ para la humedad relativa, y $\pm 3\%$ para la velocidad del viento. En cuanto a la radiación solar, se utilizó un piranómetro Vaisala QMS101, con un margen de error de $\pm 1\%$.

En la Figura 3.7 se muestra la distribución de los módulos experimentales instalados en la cubierta del edificio del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus mecánica, ubicado en Cuernavaca, Morelos.

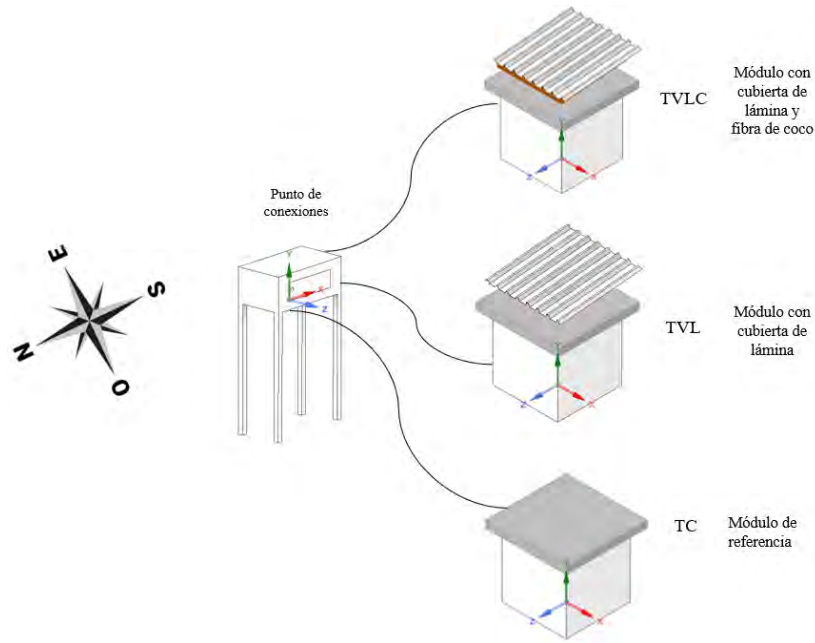


Figura 3.7 Distribución de los módulos experimentales en la cubierta del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus mecánica.

Una vez establecida la ubicación de los sensores, así como la ubicación y distribución de los módulos experimentales, en la Figura 3.8 se muestra el diagrama de flujo programado en el software de Arduino. Este diagrama consiste en una serie de comandos de programación que le indican al microcontrolador la configuración para dar inicio y qué tareas debe ejecutar durante su funcionamiento.

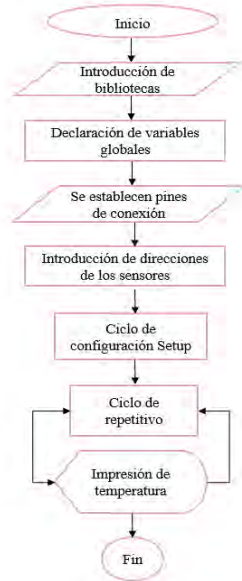


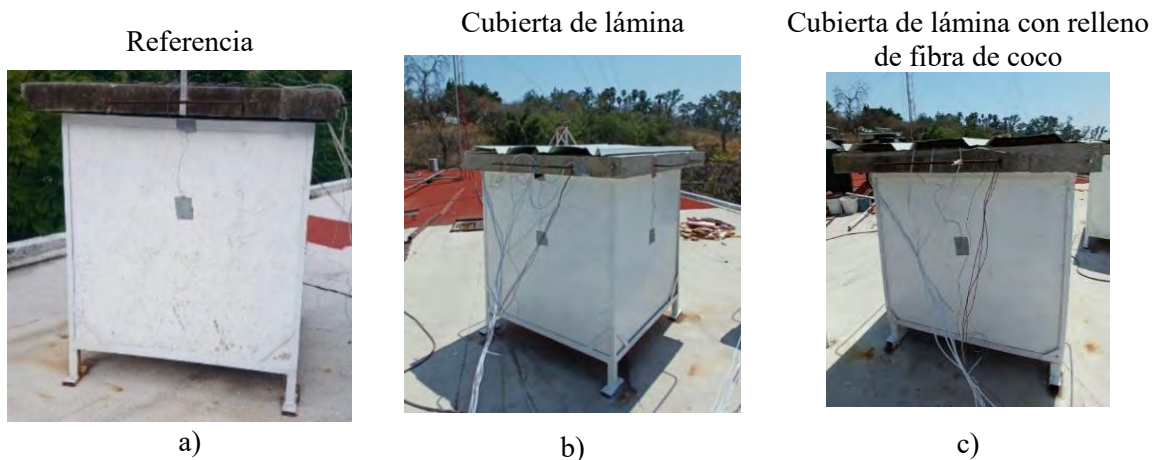
Figura 3.8 Diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos en Arduino.

En la Figura 3.9, se muestra el desarrollo de la instrumentación dentro de los módulos experimentales, una vez colocados y orientados los módulos junto con las losas, se colocó un sensor analógico en la parte central de cada cara de la madera OSB de los tres módulos y uno en la parte superior central de la losa de concreto. Sin embargo, en el caso de los techos ventilados, en el TVL se dispuso un sensor en la parte inferior central de la lámina y en el TVLC uno entre la lámina y la fibra de coco. Una vez terminada la instrumentación interna, se hizo el levantamiento de losas por medio de una grúa para colocar los módulos en la parte inferior, asimismo, al momento de levantar cada una de las losas, se colocó un sensor analógico en la parte inferior central de la losa para cubiertas y ventilados, ver Figura 3.9. Por último, se realizó el etiquetado y pruebas de funcionamiento con Arduino MEGA para la corroboración de estos.



Figura 3.9 Colocación de los sensores de temperatura sobre las superficies del módulo experimental, y posicionamiento de la losa sobre los módulos experimentales.

Finalmente, se colocaron las cubiertas y techos ventilados a cada módulo experimental según sea el caso ver Figura 3.10, además, se colocó un sensor analógico en cada techo ventilado en la parte central del canal de aire como se muestra en la Figura 3.11.





d)



e)

Figura 3.10 Configuraciones de techo: a) módulo de referencia, b) cubierta de lámina, c) cubierta de lámina con relleno de fibra de coco, d) techo ventilado de lámina e) techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.



a)



b)

Figura 3.11 Sensores al centro del canal del aire de: a) techo ventilado de lámina, b) techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.

Con la instrumentación de los módulos experimentales completada, el sistema se encontró en condiciones para pruebas experimentales. La integración de los sensores y dispositivos de medición ha sido realizada conforme a lo establecido para el estudio, lo cual permite la recolección de datos. Con esta fase concluida, se procede a la realización de pruebas experimentales.

3.5 Pruebas

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en dos etapas, la primera con cubiertas y la segunda con techos ventilados. Este enfoque buscó analizar el desempeño térmico de las configuraciones propuestas y determinar su relación costo-beneficio, y resaltar la importancia de comparar la efectividad de las cubiertas convencionales frente a las ventiladas, identificando si estas últimas representan una mejora significativa en términos de confort térmico y eficiencia energética.

Enseguida, se presentan los resultados experimentales obtenidos para cada configuración de techo en relación con la superficie de análisis, tal como se muestra en la Figura 3.12. Se inicia con la temperatura superficial externa de la losa de concreto o lámina según corresponda a cada caso T_{so} , seguida de la temperatura superficial interna de la losa de concreto T_{si} , y la temperatura del aire al interior del módulo experimental T_{in} .

Módulos experimentales con sus puntos de análisis

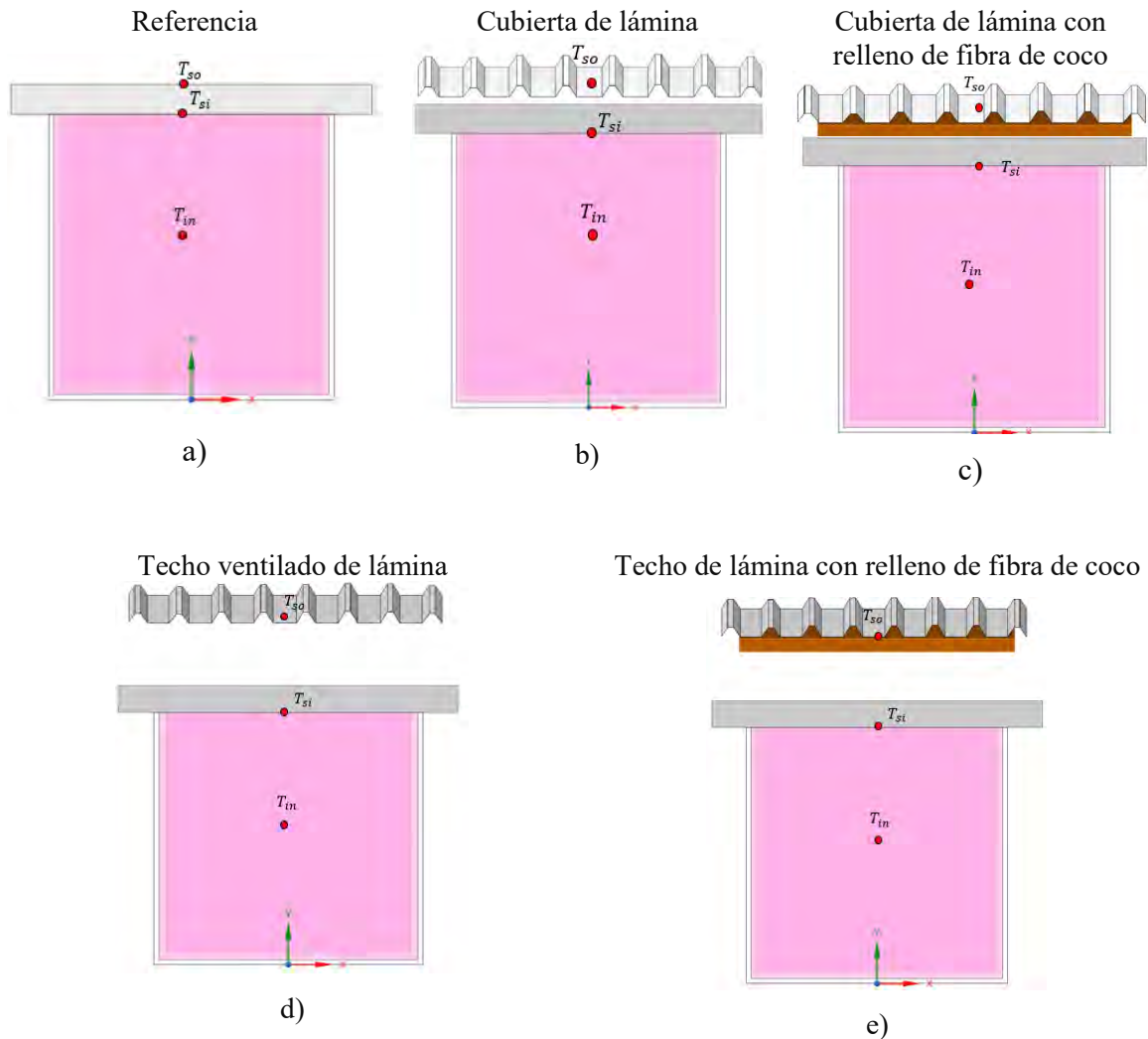


Figura 3.12 Módulos experimentales con sus puntos de análisis para el estudio: a) techo de referencia (TC), b) cubierta de lámina (CL), c) cubierta de lámina con relleno de fibra de coco (CLC), d) techo ventilado de lámina (TVL) y e) techo de lámina con relleno de fibra de coco (TVLC).

3.5.1.1 Cubiertas

La adquisición de datos de temperatura de las cubiertas corresponde del día 27 de abril al 2 de mayo del 2024, en la Figura 3.13 se muestran las temperaturas reportadas en la fase experimental. El análisis de temperaturas en los módulos experimentales evidencia diferencias significativas en el comportamiento térmico de las configuraciones evaluadas. El TC, constituido por losa de concreto, alcanzó las temperaturas más altas, con valores máximos de 50.1 °C y mínimos de 16.8 °C en la superficie externa. Este comportamiento refleja la alta capacidad de absorción de calor del concreto y su capacidad limitada para disiparlo. Por otro lado, el módulo de CL registró temperaturas externas máximas y mínimas de 35.5 °C y 20.6 °C, respectivamente, lo que se atribuye a la mayor reflectividad del material, que reduce la absorción de radiación solar directa. En contraste, el módulo CLC mostró una mayor estabilidad térmica, con temperaturas máximas de 35.1 °C y mínimas de 22.8 °C. Esto confirma el efecto aislante del relleno de fibra de coco, que reduce el flujo de calor hacia la superficie exterior.

En cuanto a las temperaturas internas de las losas, el TC mostró máximos de 47.8 °C y mínimos de 17.1 °C, reflejando la inercia térmica del concreto, que almacena y libera calor de manera gradual. El módulo de CL los valores oscilaron entre 35.6 °C y 20.7 °C, indicando una menor acumulación de calor gracias a la menor conductividad térmica del material. Por su parte, el módulo con la CLC alcanzó temperaturas internas de 35.0 °C y 23.0 °C, lo que sugiere que el relleno actuó como un amortiguador térmico efectivo, reduciendo la transferencia de calor al interior.

Las temperaturas del aire interior de los módulos también reflejan diferencias importantes. El TC registró máximos de 41.5 °C y mínimos de 17.9 °C, con variaciones marcadas debido a las propiedades térmicas del concreto, que tiende a absorber y liberar calor de forma lenta, generando mayores fluctuaciones térmicas. La CL presentó un rango más moderado, con máximos de 35.3 °C y mínimos de 20.3 °C, gracias al efecto reflectante de la lámina blanca, que reduce la absorción de radiación solar. Por su parte, la CLC alcanzó máximos y mínimos de 37.2 °C y 23.3 °C respectivamente, lo que sugiere una mayor estabilidad térmica atribuible a la fibra de coco, que actúa como aislante al reducir la ganancia como la pérdida de calor a través de la cubierta.

Estos resultados reflejan la interacción de fenómenos térmicos, como la absorción y emisión de radiación, que explican las elevadas temperaturas en el módulo de concreto; la acumulación térmica, que destaca en materiales de alta inercia como el concreto; y la conducción y aislamiento, donde la fibra de coco actúa como un efectivo aislante, minimizando los picos térmicos y las fluctuaciones extremas. Las configuraciones con materiales reflectantes y aislantes demostraron un desempeño superior al mejorar las condiciones térmicas interiores, subrayando la importancia de un diseño adecuado para optimizar el confort térmico.

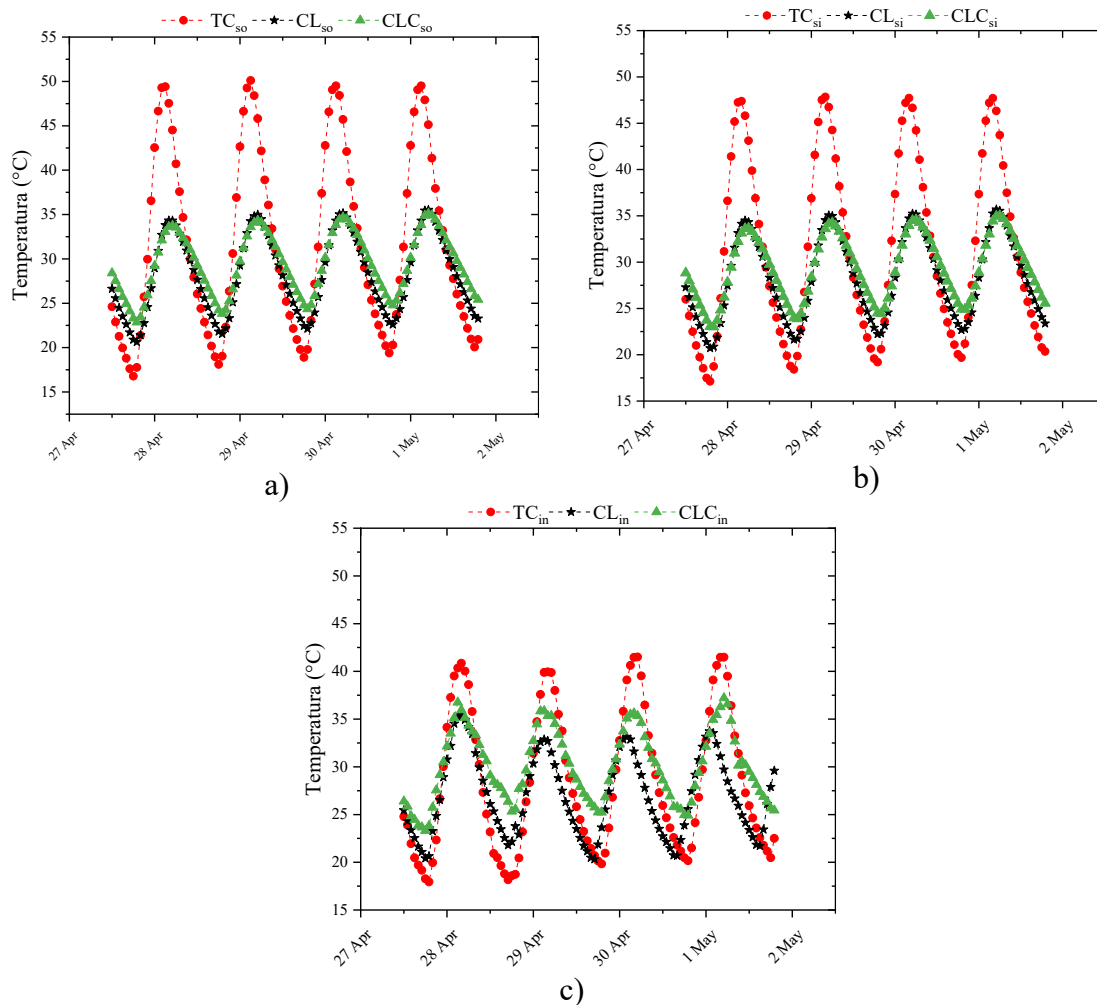


Figura 3.13 Temperaturas experimentales de los puntos de estudio para las configuraciones de cubierta: a) temperaturas superficiales externas, b) temperaturas superficiales internas de la losa de concreto, c) temperaturas del aire al interior del módulo experimental.

Una vez analizados los resultados correspondientes a las configuraciones con cubiertas, se da paso al estudio de los techos ventilados. Los datos experimentales de esta segunda configuración se obtuvieron en un periodo distinto, por lo que su análisis se presenta de forma

separada. Estas configuraciones buscan evaluar el efecto del canal de ventilación sobre el comportamiento térmico del módulo y su impacto en la temperatura interior.

3.5.1.2 Techos ventilados

La recolección de datos de temperatura de los techos ventilados se llevó a cabo del 10 al 14 de octubre del 2024. En la Figura 3.14 se presentan las temperaturas registradas igualmente durante la fase experimental, se evidencian las variaciones térmicas en comparación a la cubiertas antes presentadas.

El TC, alcanzó temperaturas máximas de 42.0 °C y mínimas de 11.5 °C en la superficie externa de la losa. La alta masa térmica del concreto, junto con la exposición directa a la radiación solar, favorece el almacenamiento de calor durante el día y una mayor disipación por irradiación durante la noche. Por su parte, los techos ventilados mostraron comportamientos térmicos diferenciados en la superficie externa de la lámina, debido a la presencia de un canal de aire que mejora la transferencia de calor por convección. El TVL registró una temperatura máxima de 36.8 °C y una mínima de 10.8 °C. En este caso, el color blanco de la lámina contribuye a la reflectancia de la radiación solar, y reduce la cantidad de calor absorbido por la superficie y, en consecuencia, la temperatura máxima registrada. La configuración de TVLC presentó valores ligeramente inferiores, con 36.6 °C como máximo y 10.7 °C como mínimo. Esto sugiere que el aislamiento proporcionado por la fibra de coco ayuda a reducir aún más la acumulación de calor en la superficie externa.

En cuanto a la superficie interna de la losa, la configuración TC alcanzó una temperatura máxima de 41.0 °C y una mínima de 11.9 °C. La falta de aislamiento térmico en esta configuración explica la transmisión directa del calor desde la superficie externa hacia la interna. En comparación, el TVL redujo las temperaturas internas a 28.3 °C y 14.9 °C, para los valores máximo y mínimo respectivamente, gracias a la circulación de aire en el espacio ventilado, que disminuye la transferencia de calor hacia el interior. La configuración TVLC mostró un comportamiento similar, con una máxima de 28.1 °C y una mínima de 15.7 °C, pero con una mayor estabilidad térmica atribuida a las propiedades aislantes de la fibra de coco.

Finalmente, las temperaturas del aire al interior de los módulos evidenciaron diferencias significativas debido a los mecanismos de intercambio térmico con el entorno. El TC registró

una temperatura máxima de 33.4 °C y una mínima de 12.0 °C, resultado de la transferencia directa de calor desde las superficies calientes. En contraste, la configuración TVL obtuvo 29.8 °C como máxima y 13.9 °C como mínima, evidenciando el efecto de la ventilación en la reducción de temperaturas internas. El TVLC presentó los valores más bajos, con una temperatura máxima de 27.7 °C y una mínima de 16.5 °C, lo que confirma la eficacia combinada de la ventilación y el aislamiento térmico para mitigar el calentamiento interior y estabilizar las temperaturas.

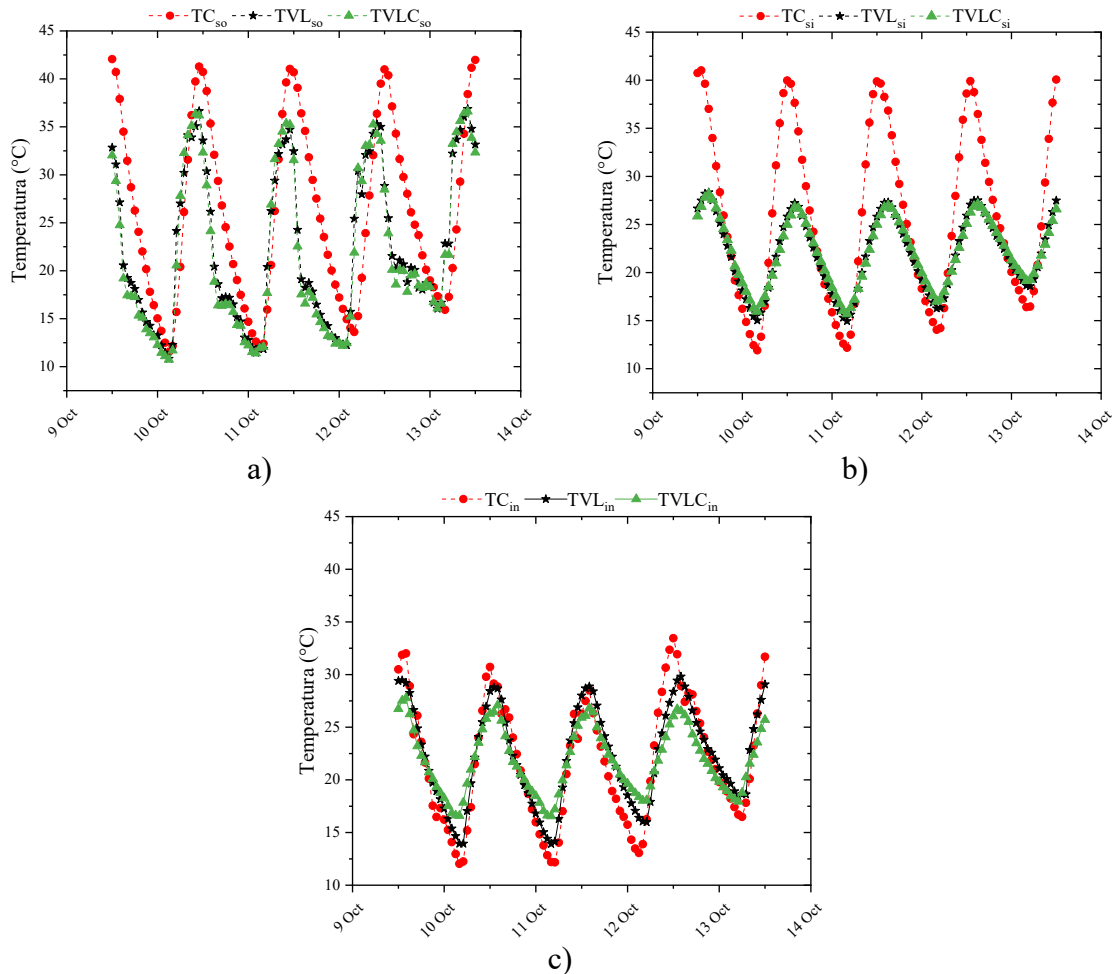


Figura 3.14 Temperaturas experimentales de los puntos de estudio para las tres configuraciones de techo ventilado: a) temperaturas superficiales externas, b) temperatura superficial interna de la losa de concreto, c) temperaturas del aire al interior del módulo experimental.

Con los resultados experimentales, se procede al capítulo siguiente, donde se introducen datos meteorológicos y características del sitio que serán utilizados para la simulación. Este paso permite evaluar la congruencia de los resultados obtenidos con aquellos generados mediante simulaciones, asegurando la calidad y confiabilidad de los datos. Además, se

llevará a cabo un análisis del comportamiento térmico conforme a la NOM-020-ENER-2011, que será complementado con la evaluación de las configuraciones de techo.

Capítulo 4

Simulación energética

En este capítulo se presentan los datos meteorológicos y las características del sitio, que permiten contextualizar las condiciones climáticas bajo las que se realizaron las mediciones. A continuación, se describen los módulos experimentales, destacando el desarrollo de las geometrías en el software DesignBuilder explicando las configuraciones empleadas para el análisis térmico.

En el apartado de estudio comparativo, se comparan los resultados experimentales con simulaciones realizadas, garantizando la congruencia y calidad de los datos obtenidos. Además, se analiza el comportamiento térmico de una vivienda residencial conforme a la NOM-020-ENER-2011, evaluando su desempeño en términos de confort térmico y, se complementa con añadir las dos configuraciones de techo ventilado.

4.1 Simulación energética

La simulación energética es una herramienta para analizar el comportamiento térmico de las edificaciones, permitiendo modelar y evaluar el impacto de diferentes variables, como los sistemas constructivos y las condiciones climáticas, sobre el desempeño térmico y energético de los edificios. En este contexto, la simulación se enfoca en cubiertas y techos ventilados, utilizando datos climáticos específicos.

4.2 Datos meteorológicos y detalles del sitio

Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran las condiciones climatológicas registradas en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, durante dos periodos específicos: del 27 de abril al 2 de mayo, y del 10 al 14 de octubre de 2024, estos datos fueron empleados para la simulación energética de los módulos experimentales. Cuernavaca se ubica al noroeste del estado de Morelos y tiene una extensión territorial de 199.7 Km², que representa el 4.1 % de la extensión territorial del estado, se localiza geográficamente al norte a una latitud de 19°01'29" y, al este a una

longitud de 99°10'50". La clasificación climática de Köppen-Geiger identifica este patrón de clima perteneciente a la categoría de Cwa [109]. Los módulos experimentales están orientados en dirección norte-sur. Los datos fueron obtenidos mediante la estación meteorológica Vaisala Maws100 configurada para registrar lecturas cada 10 minutos, a continuación, se exponen los datos meteorológicos registrados en las cubiertas.

4.2.1.1 Cubiertas

La recopilación de las variables climáticas correspondientes a las cubiertas se llevó a cabo del 27 de abril al 2 de mayo del 2024 como se muestra en la Figura 4.1. En este intervalo, la temperatura alcanzó un máximo de 35.2 °C y un mínimo de 20.1 °C. Asimismo, la radiación solar presentó un valor máximo de 1011.6 W/m², mientras que la velocidad del viento llegó a un pico de 2.5 m/s⁻¹. Por último, se obtuvo una humedad relativa promedio de 23.8 %.

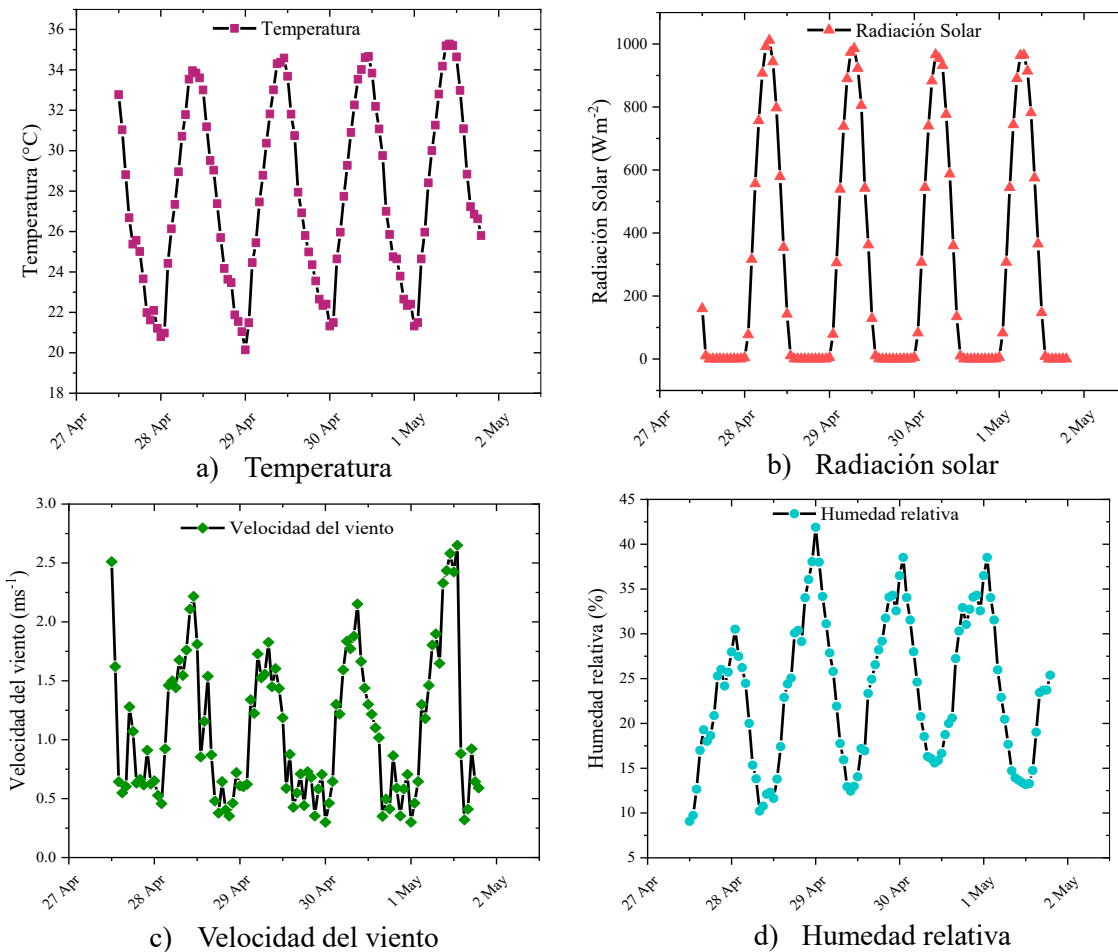


Figura 4.1 Condiciones climatológicas para la simulación energética de módulos correspondientes al periodo del 27 de abril al 2 de mayo del presente año: a) temperatura, b) radiación solar, c) velocidad del viento, d) humedad relativa.

4.2.1.2 Techos ventilados

El análisis de los datos climáticos correspondientes a los techos ventilados se realizó en el período del 10 al 14 de octubre del 2024. En este lapso, se registró una temperatura máxima de 27.2 °C y una mínima de 13.4 °C. Además, la humedad relativa alcanzó valores de hasta 79.6 %, con un mínimo de 25.4 %, mientras que la radiación solar máxima fue de 978.1 W/m². Por último, la velocidad del viento alcanzó un valor máximo de 1.8 m/s⁻¹.

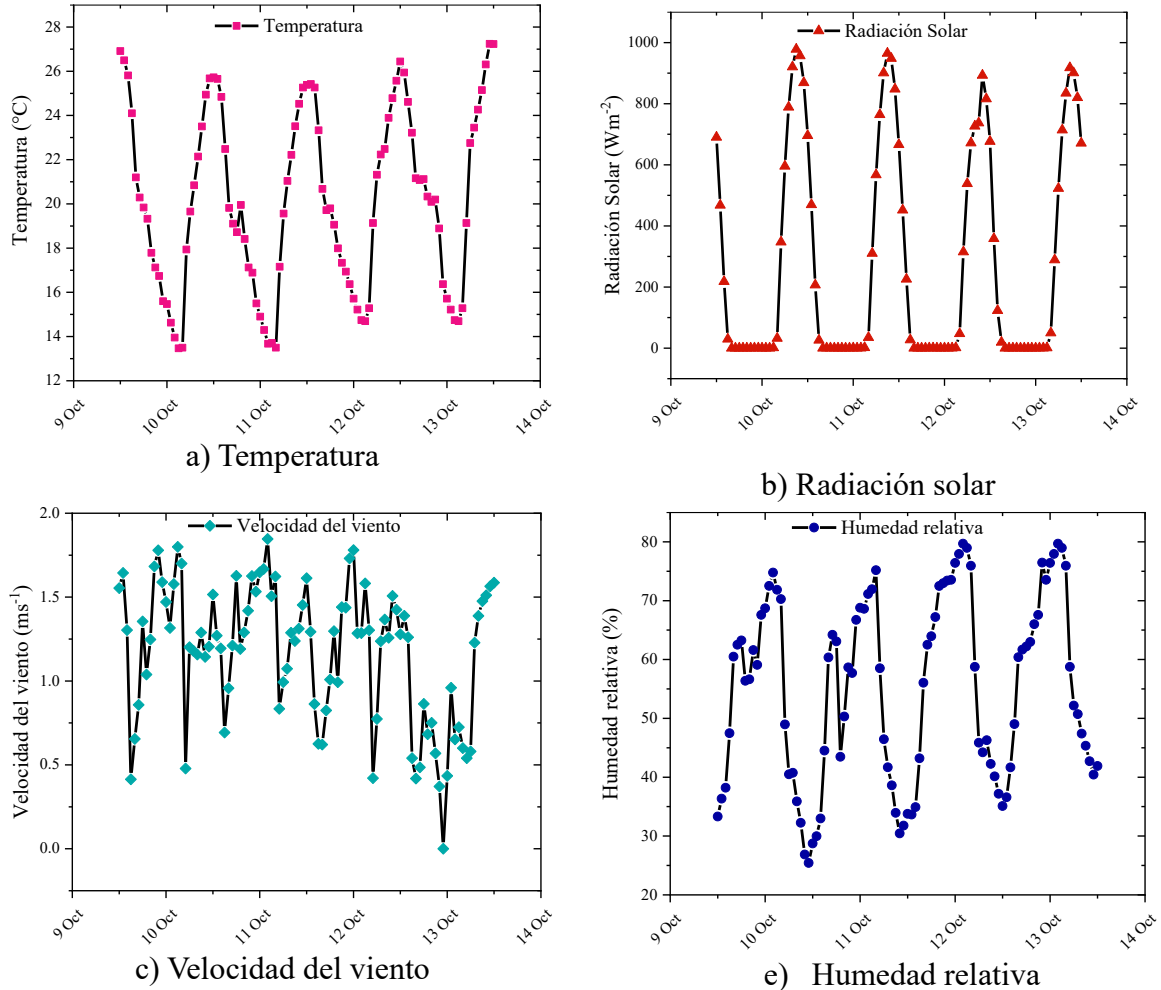


Figura 4.2 Condiciones climatológicas para la simulación energética de los módulos correspondientes al periodo del 10 al 14 de octubre del presente año: a) temperatura, b) radiación solar, c) velocidad del viento, d) humedad relativa.

Al comparar los periodos del 10 al 14 de octubre y del 27 de abril al 2 de mayo, se observan diferencias climáticas debido a que la primera etapa fue realizada en primavera y la segunda etapa en otoño. En abril-mayo, la temperatura fue más elevada, con máximas de 35.2 °C frente a 27.2 °C en octubre, y mínimas de 20.1 °C en comparación con 13.4 °C. Asimismo, la humedad relativa promedio en abril-mayo fue mucho menor (23.8 %) en contraste con el

máximo de 79.6 % registrado en octubre, indicando condiciones más secas para el primer periodo. La radiación solar también fue ligeramente superior en primavera 1011.6 W/m^2 frente a 978.1 W/m^2 , al igual que la velocidad del viento, que alcanzó un pico de 2.5 m/s^{-1} , mayor que los 1.8 m/s^{-1} de octubre. Estas variaciones reflejan un ambiente más cálido, seco y ventilado en el periodo primaveral en comparación con el otoñal.

4.3 Módulos experimentales para la simulación

En este apartado se describe el proceso para el desarrollo de las geometrías de los módulos experimentales: techo de losa de concreto, cubiertas y techos ventilados. En la Tabla 2.1 en el apartado de módulos experimentales de la sección 2.3.1 se muestran las propiedades termofísicas de los materiales empleados en la construcción de los módulos. Es importante destacar que estas propiedades son inherentes a los materiales utilizados durante el proceso experimental.

4.4 Desarrollo de geometrías de los módulos experimentales

Para realizar la simulación e implementar las cubiertas y los techos ventilados, se utilizó la herramienta “bloque de edificio” la cual permite asignarle propiedades termofísicas y superficiales. Como punto inicial, en el caso de las cubiertas, primero se creó una “cubierta” constituida por dos capas que en este caso es el concreto y la lámina, después, se creó otra constituida por tres capas concreto, fibra de coco y lámina.

En el caso de los techos ventilados, se creó una cubierta inclinada constituida por lámina y posteriormente lámina con fibra de coco. Una vez creadas las cubiertas se procede a la asignación de las propiedades térmicas y superficiales de cada una como se muestra en el siguiente procedimiento.

- I. Diseño de la geometría de cubiertas y techos ventilados: en la Figura 4.3a se muestra la geometría final de la cubierta y, en la Figura 4.3b del techo ventilado. La lámina tiene dimensiones de $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.001 \text{ m}$ para alto, ancho y espesor respectivamente, la capa de fibra de coco tiene dimensiones de $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.0254 \text{ m}$ para alto, ancho y espesor en ese orden conforme al modelo experimental.

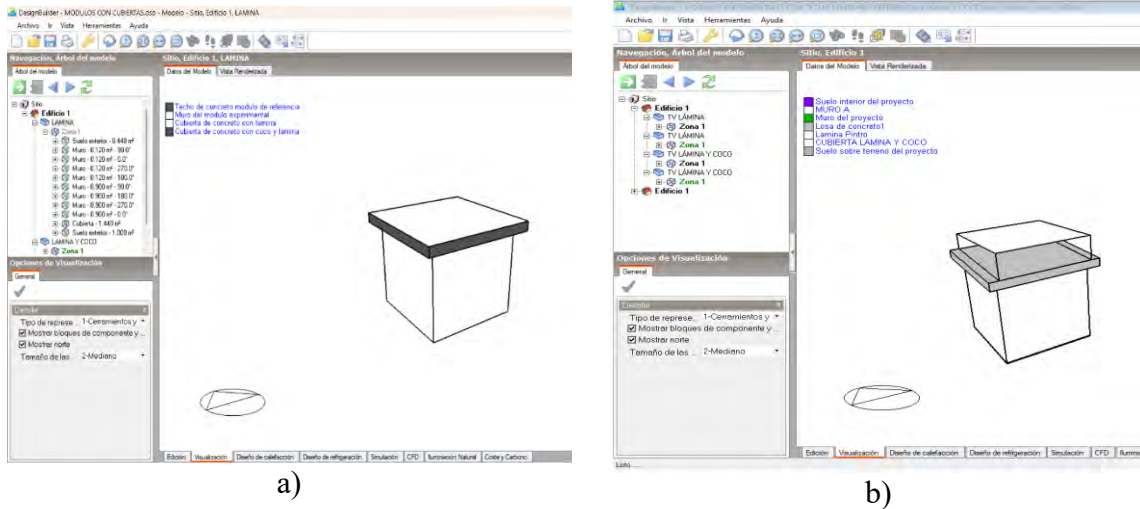


Figura 4.3 Geometrías del módulo con: a) cubierta de lámina y coco y b) techo ventilado de lámina y fibra de coco.

II. Elaboración y edición del material: el proceso subsecuente es crear el material y modificarlo con las propiedades térmicas y superficiales correspondientes. Es importante mencionar que las propiedades de los materiales son integradas en los cálculos que realiza el software de simulación, por ello, solo permite visualizar las temperaturas externas, en este caso es la temperatura exterior de la lámina para ambos techos ventilados.

Siguiendo con el procedimiento, respecto a la cubierta, en la Figura 4.4 se nombró por “CLC”, no obstante, para el techo ventilado se nombró por “TVLC”, como se observa en la Figura 4.5.

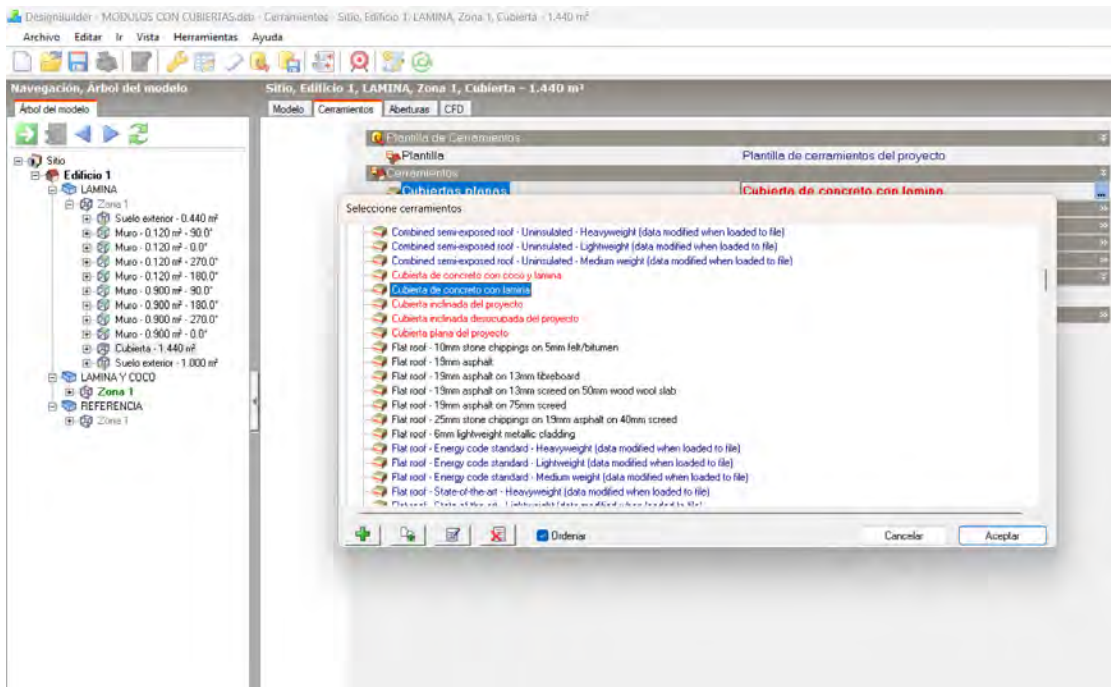


Figura 4.4 Elaboración y edición de la cubierta de lámina con coco.

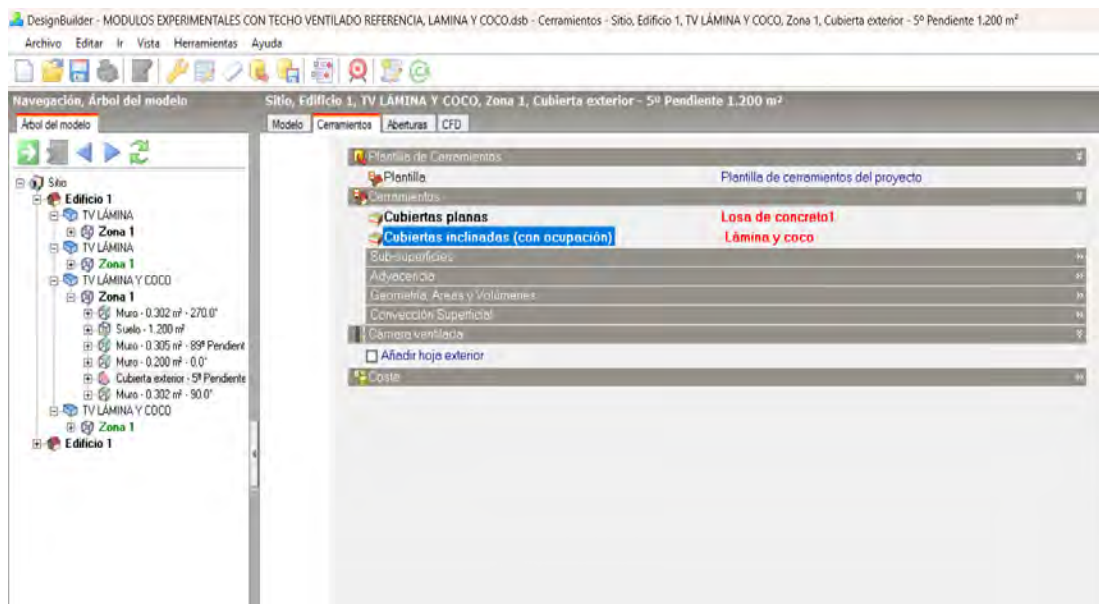
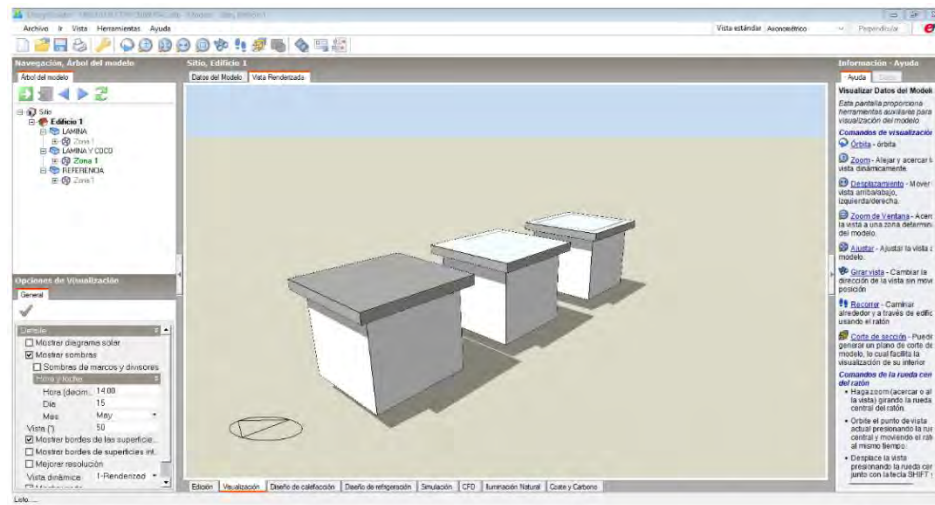
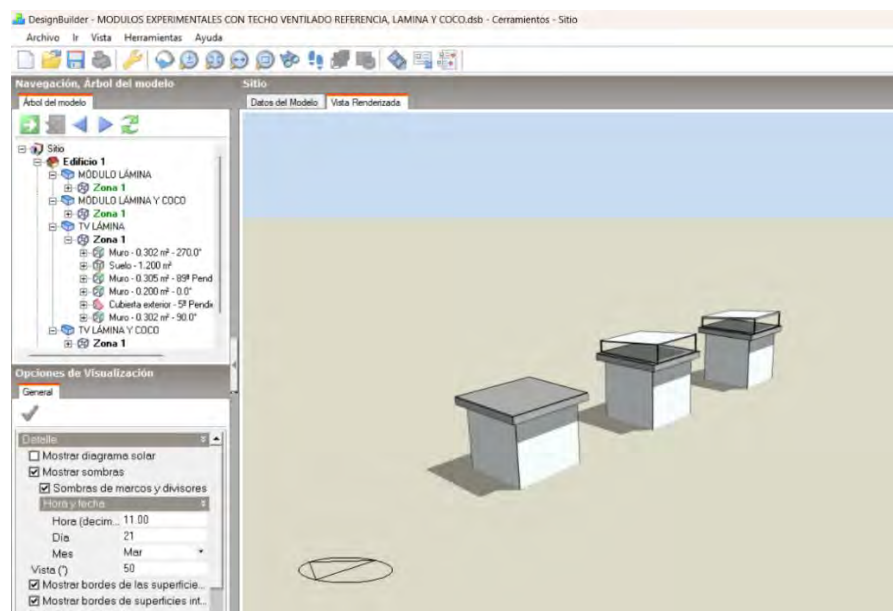


Figura 4.5 Elaboración y edición del techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.

En resumen, se definieron y modelaron las geometrías de la cubierta y el techo ventilado, siguiendo las dimensiones establecidas en el modelo experimental. Además, se elaboraron y personalizaron los materiales, incorporando las propiedades térmicas y superficiales necesarias para cada caso. A continuación, en la Figura 4.6 se muestran los módulos terminados para el comportamiento térmico en DesignBuilder.



a)



b)

Figura 4.6 Geometrías de los módulos experimentales en Design Builder: a) cubiertas, b) techos ventilados.

4.5 Estudio comparativo

En este apartado se presenta el estudio comparativo de resultados experimentales mediante simulaciones computacionales aplicadas a módulos con cubiertas y techos ventilados. Este proceso evalúa la exactitud de los modelos al comparar fenómenos como la transferencia de calor y el comportamiento térmico, asegurando su aplicabilidad en el diseño de sistemas energéticamente eficientes.

Para realizar un análisis a detalle de la validación se realizó una comparación entre los resultados experimentales con los resultados simulados por medio de error MBE (Mean Bias Error) el cual es una medida estadística utilizada para evaluar la precisión de un conjunto de datos en relación con un valor de referencia o una observación conocida, con el método anteriormente empleado por Maya en 2022 [110] se obtiene la siguiente ecuación:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y - x}{x}$$

Donde y son los valores simulados, x los valores experimentales, y n es el número de datos.

En el siguiente apartado se exponen las comparativas de los datos experimentales y simulados de cada una de las configuraciones, el orden de las gráficas se encuentra con respecto al punto de análisis que se presentó en la Figura 3.12 empezando por la temperatura superficial externa de la losa de concreto o lámina según la configuración $T_{s,o}$, la temperatura de la superficie interna de la losa de concreto $T_{s,i}$, y la temperatura del aire al interior del módulo experimental T_{in} , además, se hace mención del valor de error MBE (Mean Bias Error) de los datos.

4.5.1 Estudio comparativo de cubiertas

En la Figura 4.7 se exhiben los resultados obtenidos para el TC durante el periodo del 27 de abril al 2 de mayo del 2024, mostrando diferencias entre los valores experimentales y los simulados. En $TC_{s,o}$ las temperaturas máximas, mínimas y promedio contaron con diferencias de +2.6 °C, +3.2 °C y +1.4 °C, y un error promedio de 1.1 entre los resultados experimentales contra los simulados. Esto se atribuye a variaciones en la radiación solar, transferencia de calor por radiación y convección que se presentan en la losa.

En $TC_{s,i}$, fueron diferencias de +0.4 °C, +3.6 °C y +1.1 °C, y un error de 0.5; estas diferencias pueden explicarse por la inercia térmica del concreto y las propiedades térmicas asignadas en el modelo, como la conductividad y la capacidad calorífica. En TC_{in} , los valores obtuvieron diferencias de +2.5 °C, +3.2 °C y +2.3 °C, y un error promedio de 2.7, posiblemente asociado a la interacción del aire con las superficies, las propiedades

térmicas de los materiales circundantes y la ventilación natural que afecta la temperatura del aire.

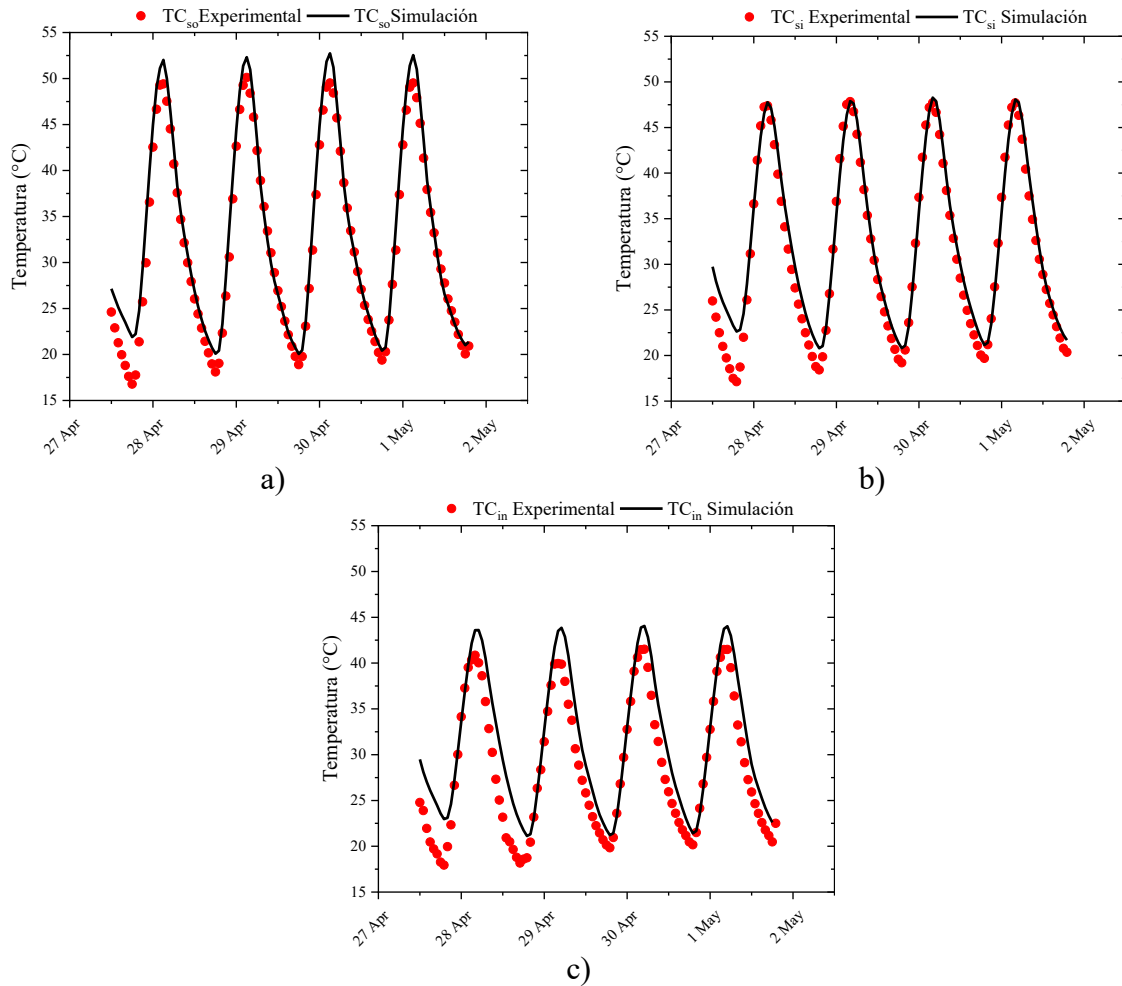


Figura 4.7 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo de referencia en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.

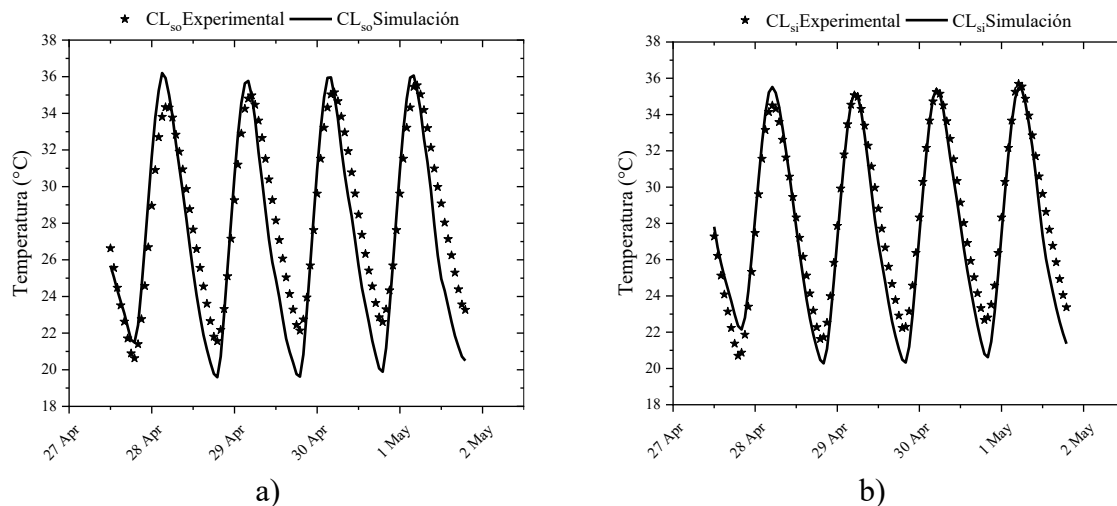
En la Tabla 4.1 se observa el Mean Bias Error (MBE) para las temperaturas máximas y mínimas, así como el promedio. En este caso la superficie que obtuvo un mayor porcentaje de error fue la temperatura al interior del módulo.

Tabla 4.1 Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del de referencia.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE
$T_{s,o}$	Experimental	50.1	16.7	31.7	1.1
	Simulados	52.7	20.0	33.1	
$T_{s,i}$	Experimental	47.8	17.1	31.3	0.5
	Simulados	48.2	20.7	32.4	
T_{in}	Experimental	41.5	17.9	28.4	2.7
	Simulados	44.0	21.1	31.2	

En la Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos para la CL, en CL_{so} , las temperaturas registraron diferencias de $+0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, para máxima, mínima y promedio respectivamente con un error promedio de 1.2. Estas discrepancias se explican por posibles variaciones en la radiación solar incidente y en el intercambio de calor por convección entre la superficie y el aire. En CL_{si} , los valores alcanzaron diferencias de $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, y un error promedio de 1.5. Estas diferencias están relacionadas con la capacidad térmica de la lámina y la inercia térmica del sistema, que influye en el tiempo de absorción y liberación de calor. Por último, en CL_{in} , las temperaturas alcanzaron diferencias de $+0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, y un error promedio de 0.9.

Cabe resaltar que, la inclusión de la lámina disminuyó la temperatura máxima en $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que indica que la cubierta actúa como una barrera para la radiación solar directa, limitando la ganancia de calor en la losa. Sin embargo, la temperatura mínima aumentó en $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido al efecto aislante de la lámina, que reduce la pérdida de calor hacia el ambiente durante la noche. En CL_{si} , se presentó una reducción de $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura máxima y, un incremento en la temperatura mínima, de $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que sugiere que la lámina retiene el calor acumulado, contribuyendo a un efecto de moderación térmica. En CL_{in} , la temperatura máxima disminuyó en $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que mejora las condiciones térmicas internas al reducir la ganancia de calor. No obstante, la mínima aumentó en $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido al efecto de almacenamiento térmico en el sistema debido a la cubierta, que retrasa la pérdida de calor durante la noche.



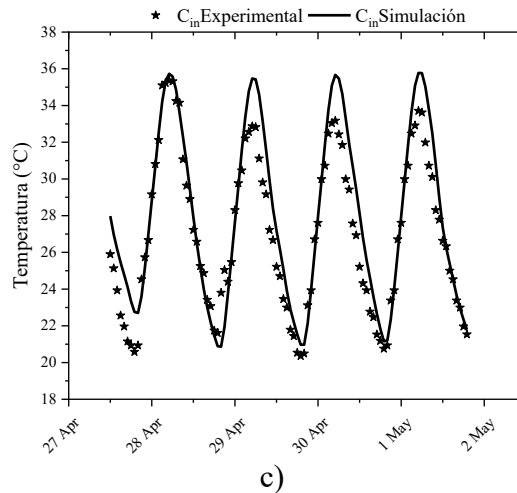


Figura 4.8 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo con cubierta de lámina en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la lámina, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.

En la Tabla 4.2 se observa el Mean Bias Error (MBE) para las temperaturas máximas y mínimas, así como también el promedio. En este caso la superficie que obtuvo un mayor porcentaje de error fue la temperatura interna de la losa de concreto.

Tabla 4.2. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio de la cubierta de lámina.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE
$T_{s,o}$	Experimental	35.5	20.6	28.2	1.2
	Simulados	36.2	19.5	27.3	
$T_{s,i}$	Experimental	35.6	20.7	28.3	1.5
	Simulados	35.5	20.2	27.6	
T_{in}	Experimental	35.3	20.3	26.9	0.9
	Simulados	35.7	20.8	27.9	

En la Figura 4.9 se presentan los resultados obtenidos para la configuración de CLC, los cuales muestran un comportamiento térmico diferente al de las configuraciones previas. En CLC_{so} , las diferencias observadas de temperatura son de 1.3 °C para la máxima, -3.0 °C para la mínima y -1.9 °C para el promedio, con un error del 1.9. Estas variaciones son consecuencia de la capacidad de la fibra de coco para mejorar el aislamiento térmico, reduciendo la transferencia de calor hacia la superficie exterior y manteniendo temperaturas más estables.

En CLC_{si} , los valores resultaron con una diferencia de +0.2 °C para la máxima, -1.9 °C para la mínima y -1.3 °C para el promedio, con un error total de 1.3. Este comportamiento se

explica por la capacidad del relleno de fibra de coco para moderar las fluctuaciones térmicas internas, proporcionando un aislamiento adicional que reduce el flujo de calor hacia el interior de la losa.

Finalmente, en CLC_{in} , las temperaturas fueron de $+1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la máxima, $+1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la mínima y $+1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el promedio, con un error de 2.3. Estas discrepancias se deben a la capacidad de la fibra de coco para almacenar y liberar calor, lo que afecta la temperatura interna al modificar la interacción del calor con el aire del módulo.

Conforme a los resultados obtenidos respecto a las temperaturas superficiales externas de la losa, en comparación con la configuración sin cubierta, la CL redujo la temperatura máxima en $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mínima en $+3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el promedio en $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la CLC generó una reducción adicional en la temperatura máxima de $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero mantuvo la mínima relativamente constante y el promedio en $+1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a CL. Estas diferencias son debido a la mayor capacidad de aislamiento térmico de la fibra de coco, que reduce la ganancia de calor y mejora el desempeño térmico de la cubierta.

Por otra parte, en las temperaturas superficiales internas de la losa, comparando con la configuración sin cubierta, la CL redujo la temperatura máxima en $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mínima en $+3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el promedio en $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la CLC proporcionó un aislamiento adicional, reduciendo ligeramente la temperatura máxima y mejorando la mínima en $+2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a la cubierta sin relleno.

Para concluir, las temperaturas al interior del módulo, en comparación con la configuración sin cubierta, la CL redujo la temperatura máxima del aire en $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mínima en $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el promedio en $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la configuración con fibra de coco mostró una ligera disminución adicional en la temperatura máxima de $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en el promedio de $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero un aumento en la mínima de $+2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las diferencias observadas se atribuyen a la capacidad de la fibra de coco para almacenar y liberar calor, moderando las fluctuaciones térmicas y mejorando el confort térmico en el interior del módulo.

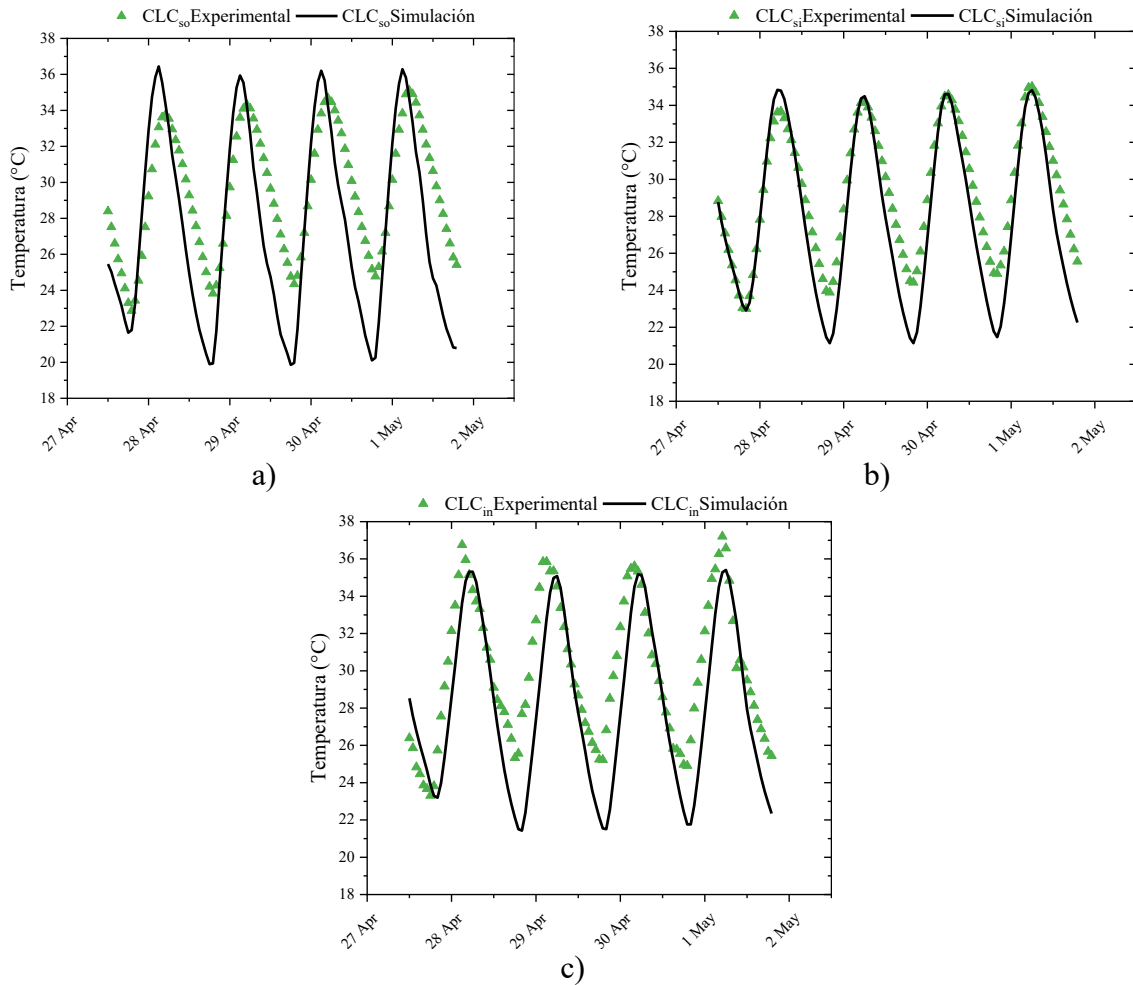


Figura 4.9 Temperaturas experimentales y simuladas de la cubierta de lámina con relleno de fibra de coco en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.

En la Tabla 4.3 se observa el Mean Bias Error (MBE) para las temperaturas máximas y mínimas, así como el promedio. En este caso la superficie que obtuvo un mayor porcentaje de error fue la temperatura exterior de la lámina.

Tabla 4.3. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio de la cubierta de lámina con relleno de fibra de coco.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE
$T_{s,o}$	Experimental	35.1	22.8	29.3	1.9
	Simulados	36.4	19.8	27.4	
$T_{s,i}$	Experimental	35.0	23.0	29.2	1.3
	Simulados	34.8	21.1	27.9	
T_{in}	Experimental	37.2	23.3	30.0	2.3
	Simulados	35.4	21.4	28.1	

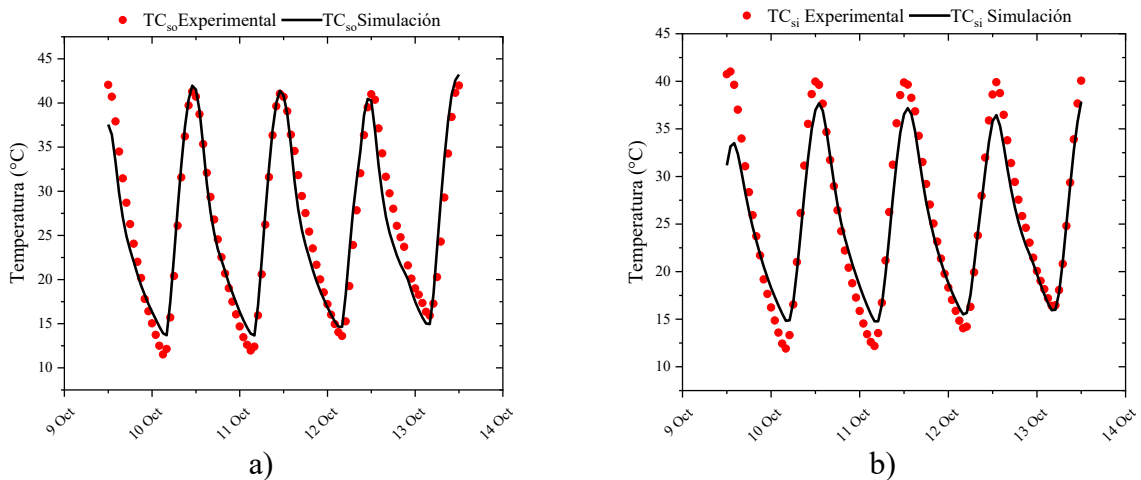
4.5.2 Estudio comparativo de techos ventilados

Con el propósito de observar las diferencias que se presentan debido al levantamiento de las cubiertas y convertirlas techos ventilados, se muestra a continuación los datos experimentales y simulados obtenidos de los techos ventilados durante el periodo de tiempo comprendido del 10 al 14 de octubre del 2024.

En la Figura 4.10 se presentan las temperaturas correspondientes al TC, se inicia con TC_{so} , donde los resultados mostraron diferencias en temperaturas máximas, mínimas y promedio con diferencias de $+1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un error de 0.4 entre los resultados. Esta discrepancia se debe a los efectos de la convección en la superficie externa de la losa o variaciones en la radiación solar.

En TC_{si} , se obtuvieron valores de $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas máxima, mínima y la promedio en ese orden. El error entre datos experimentales y simulados fue de 0.8. Esta diferencia se atribuye a la influencia de la inercia térmica del material de la pérdida, que absorbe y libera calor.

Finalmente, en cuanto a TC_{in} , los datos revelaron $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas máxima, mínima y promedio, con un error de 1.6. Esta pequeña diferencia está relacionada con la capacidad del modelo para representar adecuadamente los flujos de aire, aspectos que varían en función de las condiciones experimentales debido a factores como la dinámica del viento o la ubicación específica del módulo durante los días del estudio.



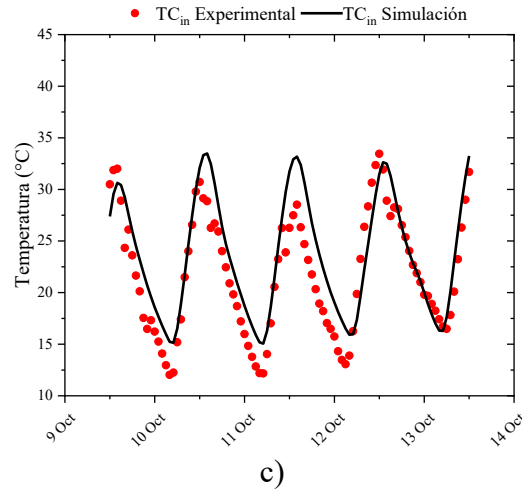


Figura 4.10 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo de referencia en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.

En la Tabla 4.4 se observa el Mean Bias Error (MBE) para las temperaturas máximas y mínimas, así como el promedio. En este caso la superficie que obtuvo un mayor porcentaje de error fue la temperatura al interior del módulo.

Tabla 4.4. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del techo de referencia.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE
$T_{s,o}$	Experimental	42.0	11.5	26.0	0.4
	Simulados	43.2	13.6	25.7	
$T_{s,i}$	Experimental	41.0	11.9	25.8	0.8
	Simulados	37.8	14.7	24.9	
T_{in}	Experimental	33.4	12.0	21.8	1.6
	Simulados	33.4	15.0	23.7	

En la Figura 4.11 se presentan las temperaturas obtenidas en los distintos puntos de análisis para el TVL. En $TVL_{s,o}$, se registró una temperatura máxima de 36.8 °C experimental frente a 35.5 °C simulada, una mínima de 10.8 °C comparada con 11.0 °C, y un promedio de 22.3 °C frente a 21.3 °C, con un error de 1.5. Estas temperaturas reflejan la influencia de la reflectancia de la lámina y la interacción del viento en el canal de aire. En $TVL_{s,i}$, los valores registrados muestran una temperatura experimental máxima de 28.3 °C frente a 32.5 °C simulada, una mínima de 14.9 °C comparada con 14.2 °C, y un promedio de 22.0 °C frente a 22.4 °C, con una diferencia promedio de 0.07 °C. Estas mediciones indican que el modelo captura de manera acertada los efectos de la conducción térmica a través del material y el flujo de aire en la cavidad ventilada, que influyen en el intercambio de calor.

Finalmente, en TVL_{in} , se obtuvo una temperatura máxima de 29.8 °C experimental frente a 29.2 °C simulada, una mínima de 13.9 °C comparada con 14.4 °C, y un promedio de 22.2 °C frente a 22.6 °C, con un error de 0.08. Estas temperaturas reflejan el equilibrio entre la acumulación de calor por radiación térmica desde las superficies internas y la ventilación natural.

En TC_{so} , el módulo presentó temperaturas máximas y promedio más elevadas, alcanzando 42.0 °C y 26.0 °C, respectivamente, en comparación con el TVL, que registró máximas experimentales de 36.8 °C y un promedio de 22.3 °C. Esta reducción de temperatura se debe principalmente a la ventilación en la cavidad, que mejora la disipación del calor acumulado por la radiación solar directa. Por otro lado, las mínimas en ambas configuraciones fueron similares, sugiriendo que, durante la noche, cuando predomina la pérdida de calor por radiación hacia el cielo, el sistema ventilado no influye significativamente en las temperaturas mínimas.

En la superficie interna de la losa, las diferencias son aún más notorias. Sin el TVL, se registraron temperaturas máximas experimentales de 41.0 °C, mientras que con el TVL estas disminuyeron a 28.3 °C. Asimismo, las temperaturas promedio se redujeron de 25.8 °C a 22.0 °C, lo cual se atribuye al efecto aislante de la cavidad ventilada, que limita la transferencia de calor desde la lámina externa hacia la losa. El modelo de simulación capturó adecuadamente esta dinámica, mostrando que la ventilación en la cavidad mejora la disipación del calor acumulado en la superficie externa y reduce la conducción hacia el interior.

Finalmente, en la temperatura al interior del módulo, la implementación del TVL también mostró beneficios evidentes. Sin el sistema ventilado, las temperaturas máximas experimentales llegaron a 33.4 °C, mientras que, con el TVL, estas disminuyeron a 29.8 °C. De manera similar, los valores promedio bajaron de 22.2 °C a 21.8 °C, destacando la capacidad del TVL para mitigar la acumulación de calor en el interior del módulo. Este comportamiento se explica por el equilibrio térmico generado por la ventilación natural, que regula la transferencia de calor entre las superficies internas y el aire del módulo, además de la reducción del calor transmitido desde la lámina externa.

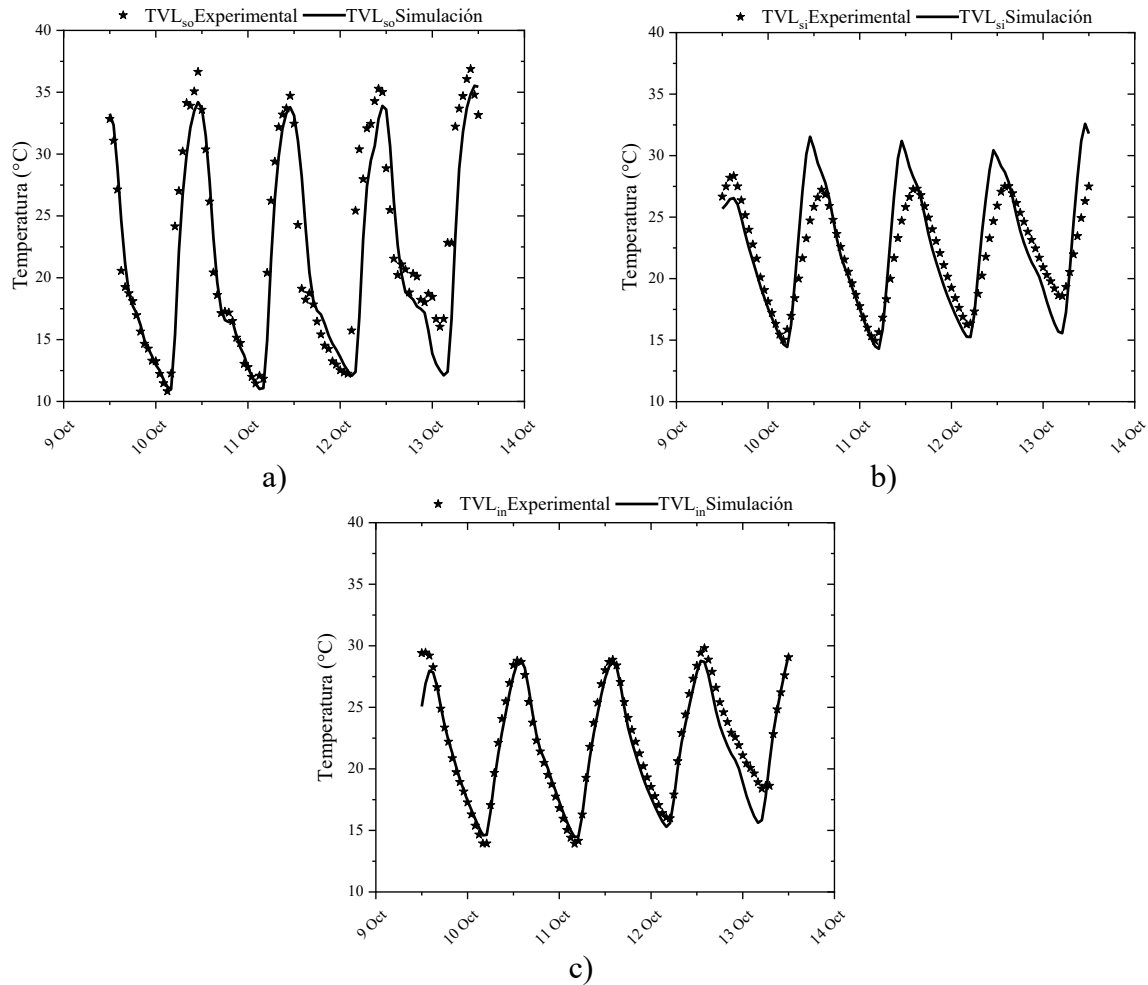


Figura 4.11 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo con techo ventilado de lámina en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.

En la Tabla 4.5 se observa el Mean Bias Error (MBE) para las temperaturas máximas y mínimas, así como el promedio. En este caso la superficie que obtuvo un mayor porcentaje de error fue la temperatura del exterior de la lámina.

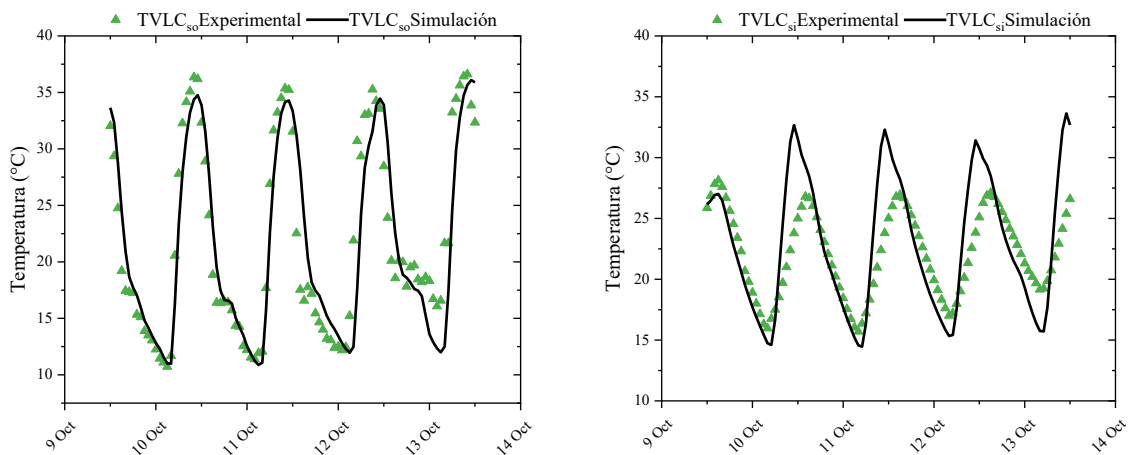
Tabla 4.5. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del techo ventilado de lámina.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE
$T_{s,o}$	Experimental	36.8	10.8	22.3	1.5
	Simulados	35.5	11.0	21.3	
$T_{s,i}$	Experimental	28.3	14.9	22.0	0.07
	Simulados	32.5	14.2	22.4	
T_{in}	Experimental	29.8	13.9	22.2	0.08
	Simulados	29.2	14.4	22.6	

Respecto al TVLC como se observa en la Figura 4.12, en la temperatura exterior de la lámina, las temperaturas experimentales fueron de 36.6 °C como máxima, 10.7 °C como mínima y un promedio de 21.8 °C, mientras que las simuladas alcanzaron 36.0 °C, 10.8 °C y 21.5 °C para máxima, mínima y promedio, respectivamente, con un error promedio de 0.37. Estas diferencias menores reflejan el balance entre la radiación solar incidente, que eleva la temperatura, y el enfriamiento por convección forzada, que ocurre debido al flujo de aire sobre la superficie externa. La lámina metálica, con alta conductividad térmica, responde rápidamente a los cambios de temperatura, un fenómeno bien representado por el modelo.

En $TVLC_{si}$, se registraron temperaturas experimentales de 28.1 °C como máxima, 15.7 °C como mínima y un promedio de 22.1 °C, mientras que las simuladas fueron de 33.6 °C, 14.4 °C y 22.9 °C, con un error de 0.45. Estas variaciones se explican por la conducción térmica a través del relleno de fibra de coco, que actúa como un aislante térmico al reducir la transferencia de calor desde la lámina hacia la losa, y por la capacidad térmica del concreto, que amortigua los cambios bruscos de temperatura.

Asimismo, en $TVLC_{in}$, las temperaturas experimentales alcanzaron 27.7 °C como máxima, 16.5 °C como mínima y un promedio de 21.8 °C, mientras que las simuladas fueron de 30.2 °C, 14.5 °C y 22.2 °C, con un error de 0.48. La disipación de calor al interior se ve influenciada por el equilibrio entre la acumulación de radiación térmica desde las superficies internas y la ventilación natural promovida por la configuración ventilada. La fibra de coco contribuye a reducir la transmisión de calor, mejorando el confort térmico del módulo.



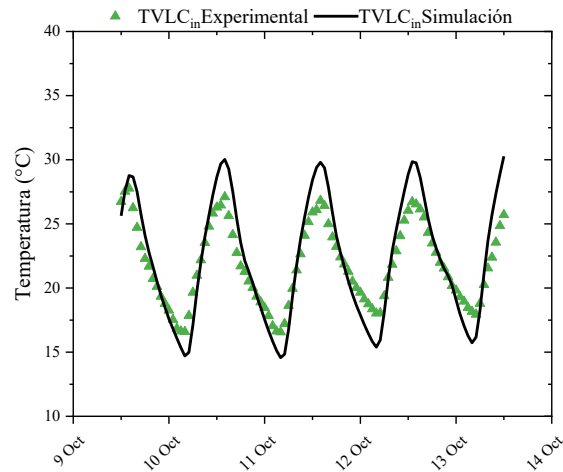


Figura 4.12 Temperaturas experimentales y simuladas del módulo con techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco en los diferentes puntos de estudio: a) superficie exterior de la losa de concreto, b) superficie interior de la losa de concreto, c) aire al interior del módulo.

En la Tabla 4.6 se observa el Mean Bias Error (MBE) para las temperaturas máximas y mínimas, así como el promedio. En este caso la superficie que obtuvo un mayor porcentaje de error fue la temperatura al interior del módulo.

Tabla 4.6. Valores máximos y mínimos de la temperatura en las zonas de estudio del techo de lámina con relleno de fibra de coco.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE
$T_{s,o}$	Experimental	36.6	10.7	21.8	0.37
	Simulados	36.0	10.8	21.5	
$T_{s,i}$	Experimental	28.1	15.7	22.1	0.45
	Simulados	33.6	14.4	22.9	
T_{in}	Experimental	27.7	16.5	21.8	0.48
	Simulados	30.2	14.5	22.2	

El análisis realizado en este capítulo proporcionó los datos meteorológicos y características del sitio necesarias para las simulaciones térmicas, además de validar los resultados experimentales obtenidos. La comparación entre los datos simulados y los experimentales mostró una correspondencia satisfactoria, con errores dentro de los márgenes aceptables [111], lo que confirma la precisión y confiabilidad del modelo para predecir el comportamiento térmico del sistema.

A partir de los datos comparados, se analiza el comportamiento térmico anual de la edificación, con énfasis en las horas de confort térmico, las estrategias requeridas para enfriamiento o calefacción, así como en la demanda energética y las emisiones de CO₂

asociadas al consumo eléctrico. El estudio comparativo realizado permite ajustar y adaptar el modelo para su uso en simulaciones térmicas, asegurando que los resultados reflejen con mayor exactitud el desempeño real de la vivienda. Finalmente, se incluye un análisis integral de costos para las distintas configuraciones evaluadas.

Capítulo 5

Simulación de vivienda

En el presente apartado se analiza el comportamiento térmico de la edificación a lo largo del año, con énfasis en la semana más cálida y más fría. Se evalúa el porcentaje de horas en confort y los periodos que requieren estrategias de enfriamiento o calefacción. Además, se examinan las cargas térmicas, la demanda energética y las emisiones de CO₂ asociadas al consumo eléctrico. Finalmente, se presenta un análisis de costos que considera la inversión inicial, el mantenimiento y los costos operativos.

5.1 Vivienda residencial

En México, la construcción de viviendas se rige por la NOM-020-ENER-2011, la cual establece estándares para garantizar la eficiencia energética en las edificaciones. Esta normativa exige que las construcciones cumplan con criterios específicos orientados a optimizar el consumo de energía. Entre los aspectos importantes, se considera el uso de aislamiento térmico para minimizar las pérdidas o ganancias de calor, promoviendo materiales que mejoren el desempeño energético. Además, se fomenta la incorporación de sistemas de ventilación que aseguren el confort térmico de los usuarios sin incrementar el consumo energético. También se prioriza el aprovechamiento eficiente de la iluminación, tanto natural como artificial, y el uso de tecnologías de climatización que cumplan con los niveles de eficiencia requeridos.

La configuración específica de la edificación se muestra en la Figura 5.1, se conforma de dos plantas, ambas con una altura de 2.5 m, la envolvente tiene un área de 160 m² y el techo 54.3 m², la fachada principal está orientada hacia el norte. En la Figura 5.2 se muestra la posición de los cerramientos y las dimensiones.

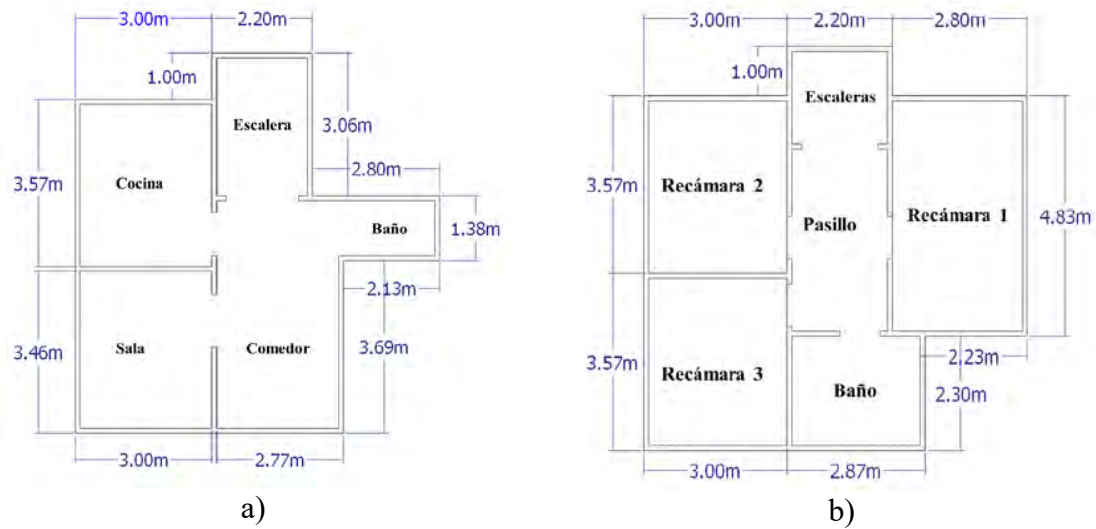


Figura 5.1 Planos de la vivienda en: a) planta baja, b) planta alta.

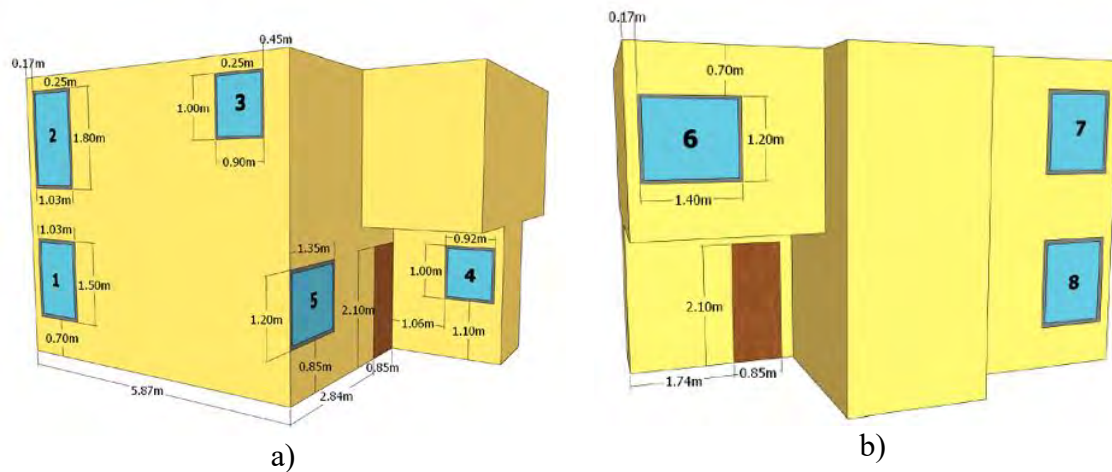


Figura 5.2 Fachadas de la vivienda: a) sur, b) norte

Las propiedades termofísicas de los materiales de construcción de la envolvente de la vivienda de referencia se muestran en Tabla 2.1 de la sección 2.3.1 en el apartado vivienda de referencia. Los materiales son fundamentales en la simulación energética para evaluar el comportamiento térmico. Los planos, orientación, propiedades de los materiales, disposición de componentes y aperturas de la edificación, se adquirieron del trabajo de Heard, 1993[112]. Por otro lado, en la Tabla 2.4 de la sección 2.3.3 se presentan las propiedades del acristalamiento transparente para las ventanas.

En la Figura 5.3 y Figura 5.4 se exhibe el diseño de la geometría desarrollado en DesignBuilder, tomando en cuentas las dimensiones, propiedades termofísicas y ópticas para el caso del acristalamiento en las ventanas.

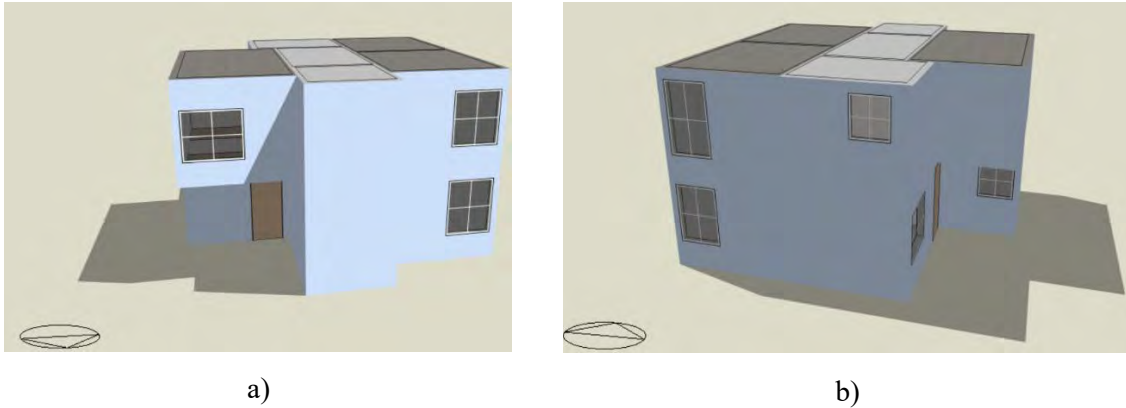


Figura 5.3 Fachadas de la viviendas a) norte, b) sur.

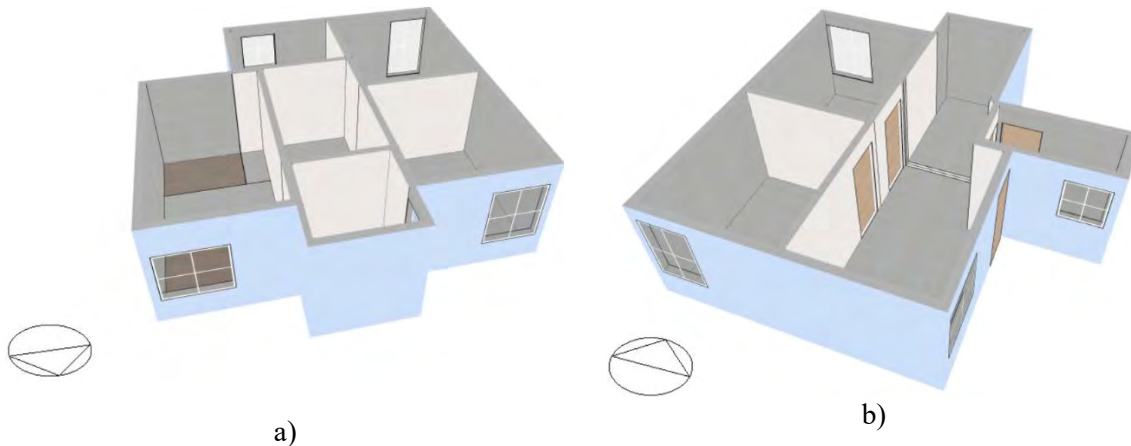


Figura 5.4 Vista de la vivienda en a) planta alta y b) planta baja.

A continuación, se presentan las geometrías de la viviendas empezando por el de referencia (Figura 5.5), seguido lámina (Figura 5.6) y lámina con relleno de fibra de coco (Figura 5.7), ambas viviendas con un ángulo de inclinación de 1° en los techos ventilados con el fin de garantizar un adecuado drenaje del agua, evitando la acumulación que podría ocasionar problemas de estanqueidad. Esta inclinación asegura el flujo de aire a través del canal, con alturas de 0.25 m al inicio y 0.37 m al final, favoreciendo la ventilación sin alterar significativamente el diseño estructural ni la funcionalidad del sistema como se muestra en la Figura 5.8.

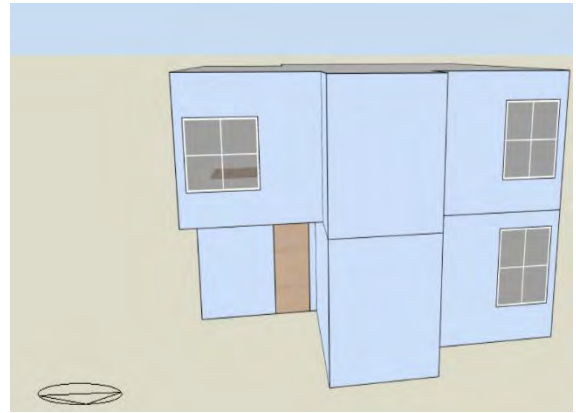
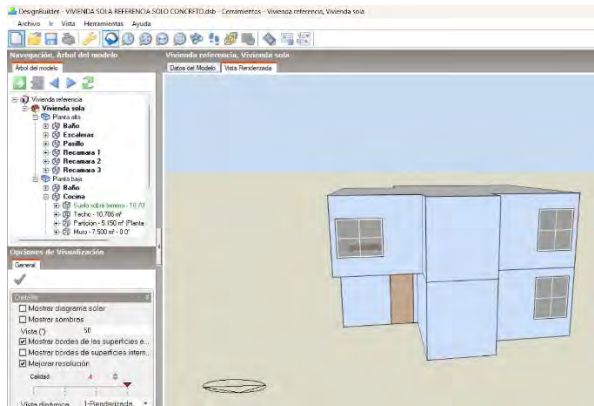


Figura 5.5 Vivienda con losa de concreto tradicional (referencia).

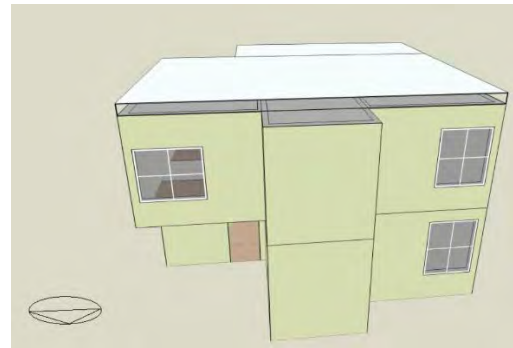
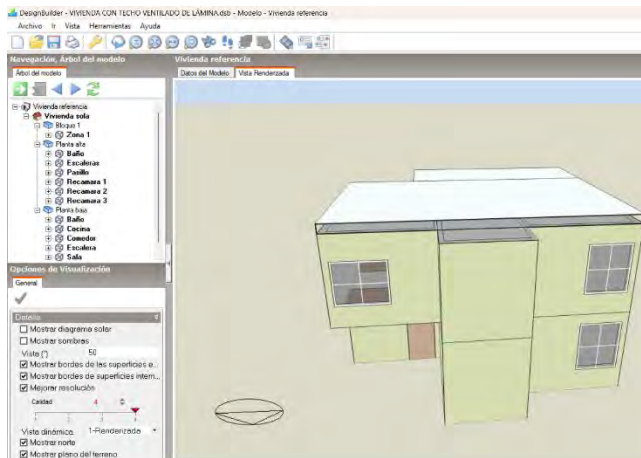


Figura 5.6 Vivienda con techo ventilado de lámina.

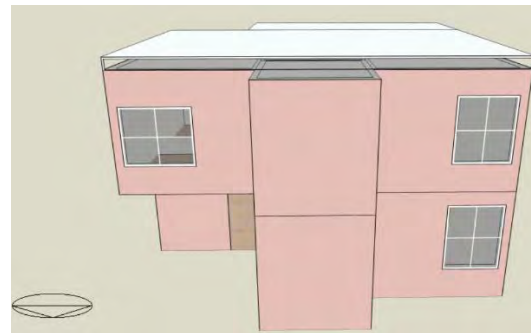
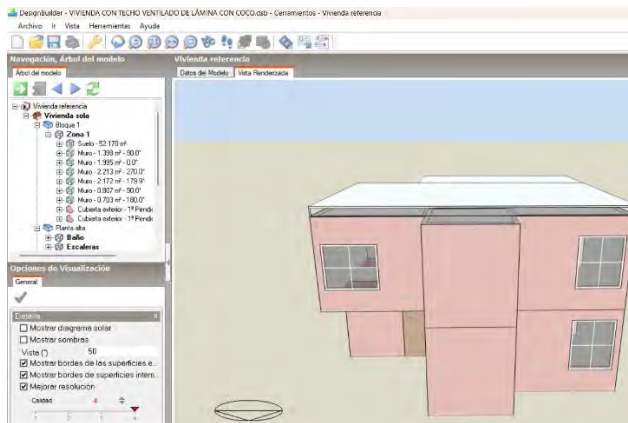


Figura 5.7 Vivienda con techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco.

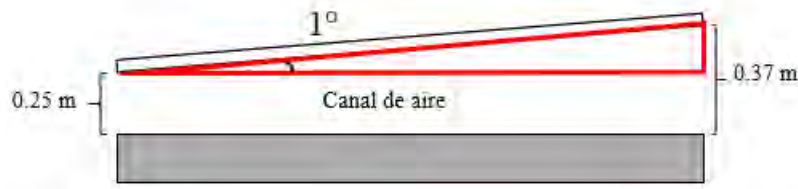


Figura 5.8 Techo ventilado de las viviendas a 1° de inclinación.

El periodo de simulación fue un año, del 1 de enero al 31 de diciembre del 2024 como se observa en la Figura 5.9, además, se utilizó el paso de tiempo de 1 minuto (60 etapas de simulación por hora), esto permite suavizar las fluctuaciones que podrían presentarse en intervalos más cortos, promoviendo un comportamiento consistente en los resultados simulados, ver Figura 5.10.

Editar Opciones de Cálculo

Opciones de Cálculo

General Opciones Resultados Administrador de Simulaciones

Descripción del Cálculo

Periodo de simulación

Desde

Día inicial 1

Mes inicial Ene

Hasta

Día final 31

Mes final Dic

☐ Ejecutar simulación para varios años

Figura 5.9 Periodo de simulación.

Editar Opciones de Cálculo

Opciones de Cálculo

General Opciones Resultados Administrador de Simulaciones

Opciones de Cálculo

Método de simulación 1-EnergyPlus

Etapas de simulación por hora 60

Tipo de temperatura para consignas 1-Temperatura del aire

Soleamiento

☒ Incluir todos los edificios en el cálculo de sombreado

☒ Incluir sombreado de las zonas excluidas en las simulaciones

☐ Modelar reflexiones exteriores (incluyendo sombreado sobre el terreno)

Distribución solar 2-Completa exterior

Método de cálculo de sombras 1-Promedio de cada intervalo

Intervalo de sombreado (días) 20

Algoritmo de modelado de cielo difuso 1-Cielo difuso simple

Avanzado

Figura 5.10 Paso de tiempo de las simulaciones.

5.2 Análisis de desempeño de la vivienda evolución libre

En este caso se va a tomar el modelo de Nicol [103], mencionado en la sección 2.11.1.4 y se define por la Ec. (5.1):

$$T_c = 0.534T_{amb} + 12.9 \quad 5.1$$

En la Figura 5.11 se presenta una comparativa de los resultados de temperatura en evolución libre para las configuraciones analizadas: VR, CL, CLC, TVL y TVLC. Este análisis incluye las temperaturas de planta alta y baja a lo largo del año.

En la planta alta, VR muestra un comportamiento fuera de la franja de confort térmico durante todo el año debido a la ausencia de aislamiento térmico y ventilación, lo que genera acumulación de calor por radiación solar directa y escasa disipación térmica hacia el exterior.

En las temperaturas promedio mensuales, se alcanza un máximo de 31.5 °C en abril y un mínimo de 24.6 °C en enero. En contraste, en planta baja, la absorción de calor en la planta alta actúa como un aislante que reduce la variabilidad térmica, registrándose una máxima de 26.4 °C en abril y una mínima de 23.0 °C en enero. En el caso de la configuración CL, en planta alta las temperaturas disminuyen ligeramente debido a la alta reflectancia de la lámina blanca, aunque el material metálico incrementa la transmisión de calor por conducción hacia el interior. Se registraron temperaturas máximas y mínimas anuales de 29.9 °C y 23.6 °C, respectivamente. En planta baja, la influencia térmica de la planta alta genera menores variaciones térmicas, con una máxima de 26.1 °C y una mínima de 22.8 °C.

Por su parte, la configuración CLC, al combinar el efecto reflectante de la lámina blanca con el aislamiento térmico de la fibra de coco colocada en su parte inferior, genera mayor estabilidad térmica en planta alta. Sin embargo, las temperaturas pueden ser ligeramente superiores en meses cálidos debido a la acumulación de calor latente en el material aislante. Se registraron máximas de 30.8 °C en abril y mínimas de 24.9 °C en enero. En planta baja, las temperaturas son similares a la configuración CL, alcanzando una máxima de 26.4 °C y una mínima de 23.1 °C.

En los techos ventilados, el TVL reduce la temperatura de planta alta debido al flujo de aire que hay debajo de la lámina blanca, lo que mitiga la acumulación de calor mediante la convección. Las temperaturas anuales máximas y mínimas fueron 30.3 °C en abril y 24.8 °C en enero. En planta baja, la ventilación minimiza la transmisión de calor hacia los niveles inferiores, con una máxima de 26.2 °C y una mínima de 23.0 °C.

Finalmente, el TVLC presenta las temperaturas más estables y reducidas entre todas las configuraciones. En planta alta, el efecto combinado del aislamiento térmico de la fibra de coco en la parte inferior de la lámina blanca y la ventilación disminuye significativamente las temperaturas máximas, alcanzando 27.9 °C en mayo y una mínima de 21.5 °C en enero. En la planta baja, las temperaturas también son menores, con una máxima de 25.4 °C en mayo y una mínima de 20.6 °C en enero, lo que resalta la eficacia de esta configuración. La diferencia en el mes de temperatura máxima del TVLC respecto a las otras configuraciones se debe a la combinación de su aislamiento térmico y ventilación, que modifican la respuesta térmica del techo ante las variaciones estacionales, por ejemplo, la fibra de coco en la parte inferior de la lámina retrasa el pico de temperatura, almacenando y liberando calor de manera diferente en comparación con configuraciones sin aislamiento o con menor masa térmica.

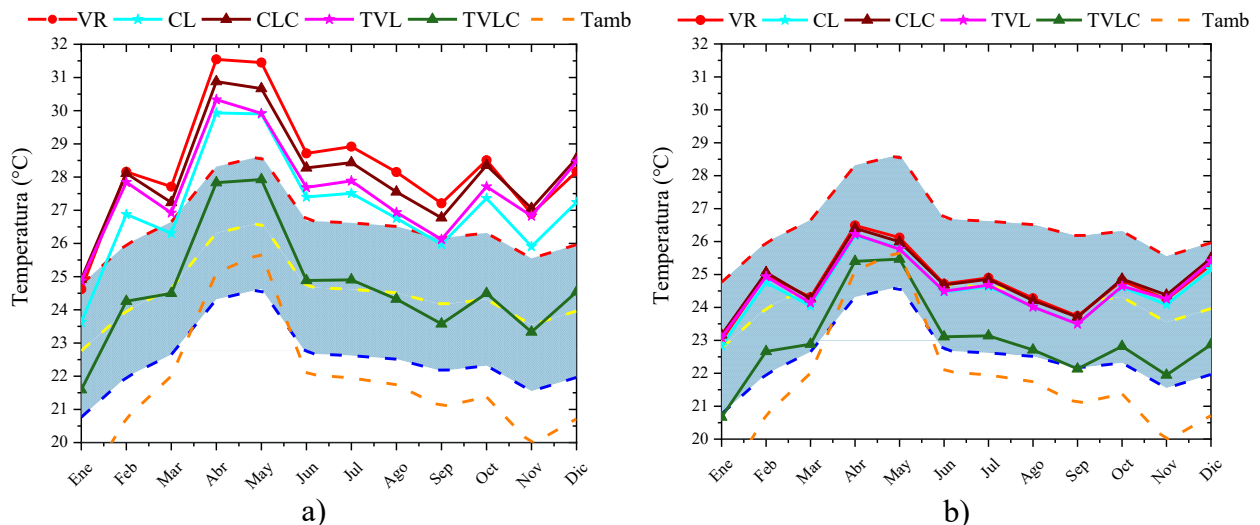


Figura 5.11 Temperaturas de confort térmico y desempeño de las viviendas con diferentes configuraciones de techo en: a) planta alta y b) planta baja.

Por otra parte, la ventilación debajo de la lámina disipa el calor, suavizando las variaciones extremas. Sin embargo, en abril, la radiación solar es alta, pero la ventilación disipa

eficientemente el calor, retrasando el mes de temperatura máxima hasta mayo, cuando la acumulación térmica es mayor.

La Tabla 5.1 resume las temperaturas máximas y mínimas mensuales por planta para cada configuración, destacando diferencias significativas entre ellas, además se presentan las temperaturas máximas y mínimas del confort de todo el año. La configuración TVLC presenta el mejor desempeño térmico, como se indica en la Tabla 5.1 (resaltada en color rosa), al registrar las temperaturas más bajas tanto en los valores máximos como en los mínimos a lo largo del año. Además, se mantiene dentro del rango de confort durante todo el año, como se muestra en la Figura 5.11.

Tabla 5.1. Temperaturas mensuales de planta alta y planta baja de las configuraciones de techo.

Temperaturas mensuales												
Mes	Configuraciones											
	Confort		VR		CL		CLC		TVL		TVLC	
	Min	Max	P.A.	P.B.	P.A.	P.B.	P.A.	P.B.	P.A.	P.B.	P.A.	P.B.
Ene.	20.7	24.7	24.6	23.0	23.6	22.8	24.9	23.1	24.8	23.0	21.5	20.6
Feb.	21.9	25.9	28.1	24.9	26.8	24.7	28.1	25.0	27.8	24.9	24.2	22.6
Mar.	22.6	26.6	27.7	24.3	26.3	24.0	27.2	24.2	26.9	24.1	24.4	22.8
Abr.	24.3	28.3	31.5	26.4	29.9	26.1	30.8	26.4	30.3	26.2	27.8	25.4
May.	24.6	28.6	31.4	26.1	29.9	25.8	30.6	25.9	29.9	25.7	27.9	25.4
Jun.	22.6	26.6	28.7	24.7	27.3	24.4	28.2	24.6	27.6	24.4	24.8	23.1
Jul.	22.6	26.6	28.9	24.8	27.5	24.6	28.4	24.8	27.8	24.6	24.9	23.1
Ago.	22.5	26.5	28.1	24.2	26.7	24.0	27.5	24.2	26.9	24.0	24.3	22.7
Sep.	22.1	26.1	27.2	23.7	25.9	23.5	26.7	23.7	26.1	23.4	23.5	22.1
Oct.	22.3	26.3	28.5	24.8	27.3	24.6	28.3	24.8	27.7	24.6	24.4	22.8
Nov.	21.5	25.5	26.8	24.2	25.9	24.0	27.0	24.3	26.8	24.2	23.3	21.9
Dic.	21.9	25.9	28.1	25.2	27.2	25.1	28.5	25.4	28.4	25.3	24.5	22.8
Min.	20.7	24.7	24.6	23.0	23.6	22.8	24.9	23.1	24.8	23.0	21.5	20.6
Max.	24.6	28.6	31.5	26.4	29.9	26.1	30.8	26.4	30.3	26.2	27.9	25.4
Prom.	22.4	26.4	28.3	24.7	27.0	24.5	28.0	24.7	27.6	24.5	24.6	22.9

A continuación, se presenta el comportamiento térmico de las configuraciones VR, CL, CLC, TVL y TVLC durante la semana más cálida del 13 al 19 de abril (primavera) y más fría del 16 al 22 de enero (invierno) en la Figura 5.12 y Figura 5.13.

En la planta alta, durante la temporada cálida, la configuración VR presenta una temperatura máxima de 41.4 °C y una mínima nocturna de 26.4 °C, manteniéndose dentro de la franja de confort solo durante cuatro días.

La configuración CL muestra una temperatura máxima de 38.2 °C, lo que representa una reducción de 3.2 °C respecto a VR. Las temperaturas mínimas durante la noche en CL fueron de 25.9 °C, solo 0.5 °C menos que VR. Por su parte, la configuración CLC presenta una temperatura máxima de 38.3 °C, lo que implica una reducción de 3.1 °C en las máximas respecto a VR, aunque las mínimas fueron ligeramente más altas (27.5 °C), con una diferencia de 1.1 °C.

El TVL alcanzó una temperatura máxima de 38.3 °C y una mínima de 26.4 °C, lo que representa una reducción de 3.1 °C en la máxima y una mínima casi idéntica a la de VR (una diferencia de solo 0.01 °C). Finalmente, el TVLC muestra el mejor desempeño térmico, con una temperatura máxima de 36.7 °C y una mínima de 23.3 °C, lo que representa una reducción de 4.7 °C en la máxima y 3.0 °C en la mínima en comparación con VR.

En la planta baja, las temperaturas máximas son considerablemente más bajas que en la planta alta en todos los ajustes. Las diferencias en las temperaturas máximas son mínimas, limitándose a variaciones decimales. En cuanto a las temperaturas mínimas, la VR registró 24.1 °C, la CL 23.8 °C, la CLC 24.1 °C, el TVL 23.8 °C y el TVLC 22.0 °C. El TVLC presentó una temperatura mínima de 2.1 °C más baja que VR, superando la franja de confort térmico.

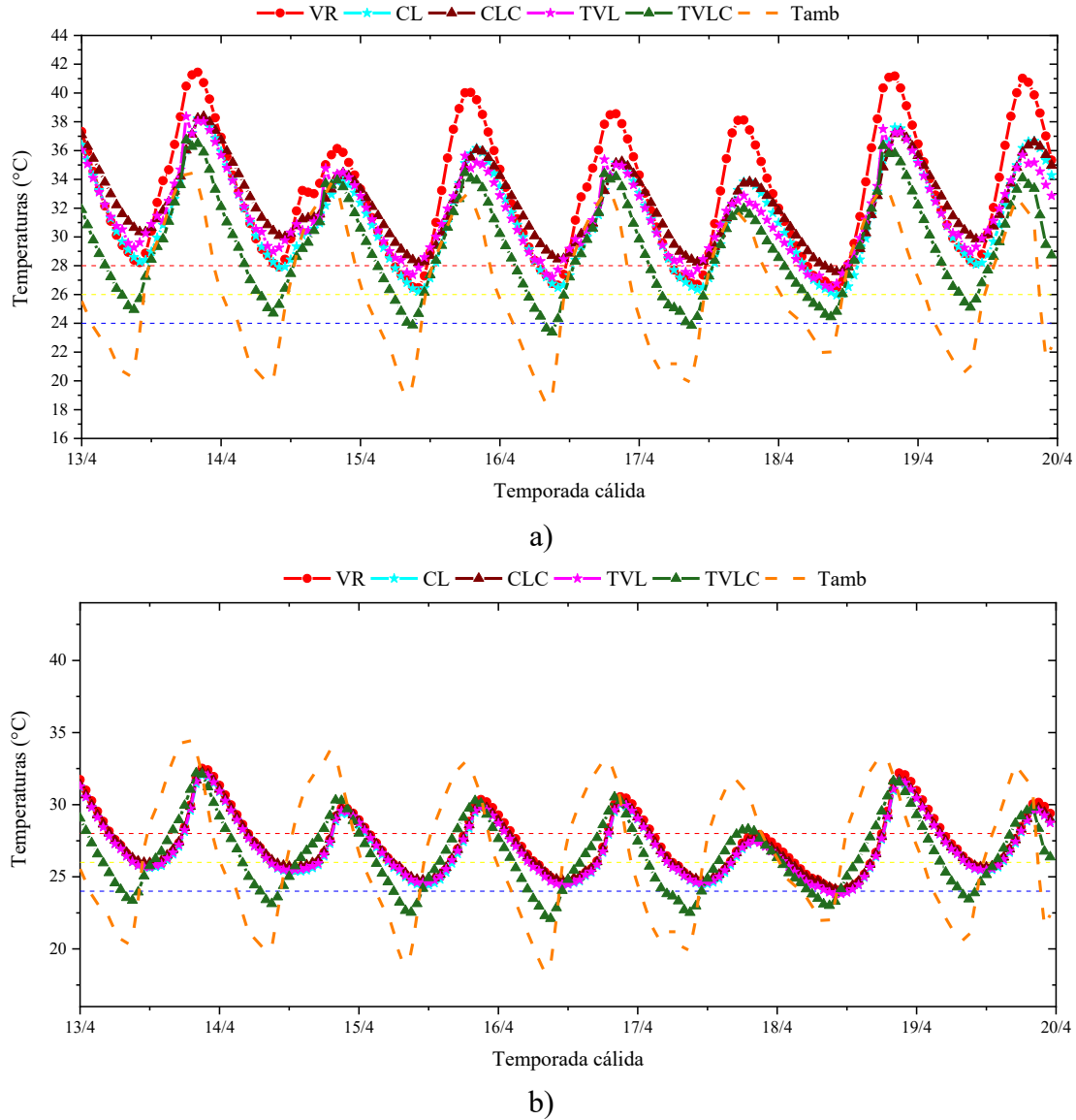


Figura 5.12 Temperaturas durante la temporada más cálida de VR, CL, CLC, TVL y TVLC en: a) planta alta y b) planta baja.

Posteriormente, en la Figura 5.13 se analiza el comportamiento de las configuraciones durante la temporada fría en la planta alta, donde todas presentan temperaturas superiores a la franja de confort en los últimos cinco días de la semana. La configuración VR registró una temperatura máxima de 34.7 °C, destacándose como la configuración con los picos más altos en comparación con los demás, mientras que su temperatura mínima fue de 15.3 °C.

Por otro lado, la configuración CL alcanzó una temperatura máxima de 31.8 °C y una mínima de 15.2 °C, con una diferencia de 2.9 °C y 0.1 °C, respectivamente, en comparación con la configuración VR. La configuración CLC, por su parte, presentó una temperatura máxima de

32.0 °C, con una diferencia de 2.7 °C respecto a la configuración VR, y una mínima de 16.9 °C, lo que implica un aumento de 1.6 °C en comparación con la configuración VR.

El TVL alcanzó una temperatura máxima de 33.6 °C, lo que representa una reducción de 1.1 °C en la máxima, pero una temperatura mínima de 16.4 °C, lo que muestra un aumento de 1.1 °C respecto a la VR. Finalmente, el TVLC registró las temperaturas más bajas entre todas las configuraciones, con una máxima de 31.2 °C y una mínima de 13.5 °C, presentando una notable reducción en ambas comparadas con la configuración VR.

En la planta baja, las temperaturas son menores a las de la planta alta. La configuración VR registró 29.0 °C como temperatura máxima y 17.5 °C como mínima, influenciadas por las propiedades termofísicas de la losa de concreto.

Por su parte, la configuración CL alcanzó una máxima de 28.6 °C y una mínima de 17.4 °C, con una ligera reducción de 0.4 °C en la máxima y 0,1 °C en la mínima respecto a la configuración VR. La configuración CLC registró temperaturas de 28.9 °C y 17.8 °C para la máxima y la mínima, lo que representa una ligera reducción de 0.1 °C en la máxima y un incremento de 0.3 °C en la mínima respecto a la VR.

El TVL obtuvo una temperatura máxima de 28.9 °C y una mínima de 17.6 °C, mostrando una reducción de 0.03 °C en la máxima y un aumento de 0.13 °C en la mínima respecto a la configuración VR. Finalmente, el TVLC alcanzó las temperaturas más bajas, con una máxima de 27.4 °C y una mínima de 14.6 °C, presentando aumentos de 1.6 °C y 2.9 °C, respectivamente, en comparación con la configuración VR.

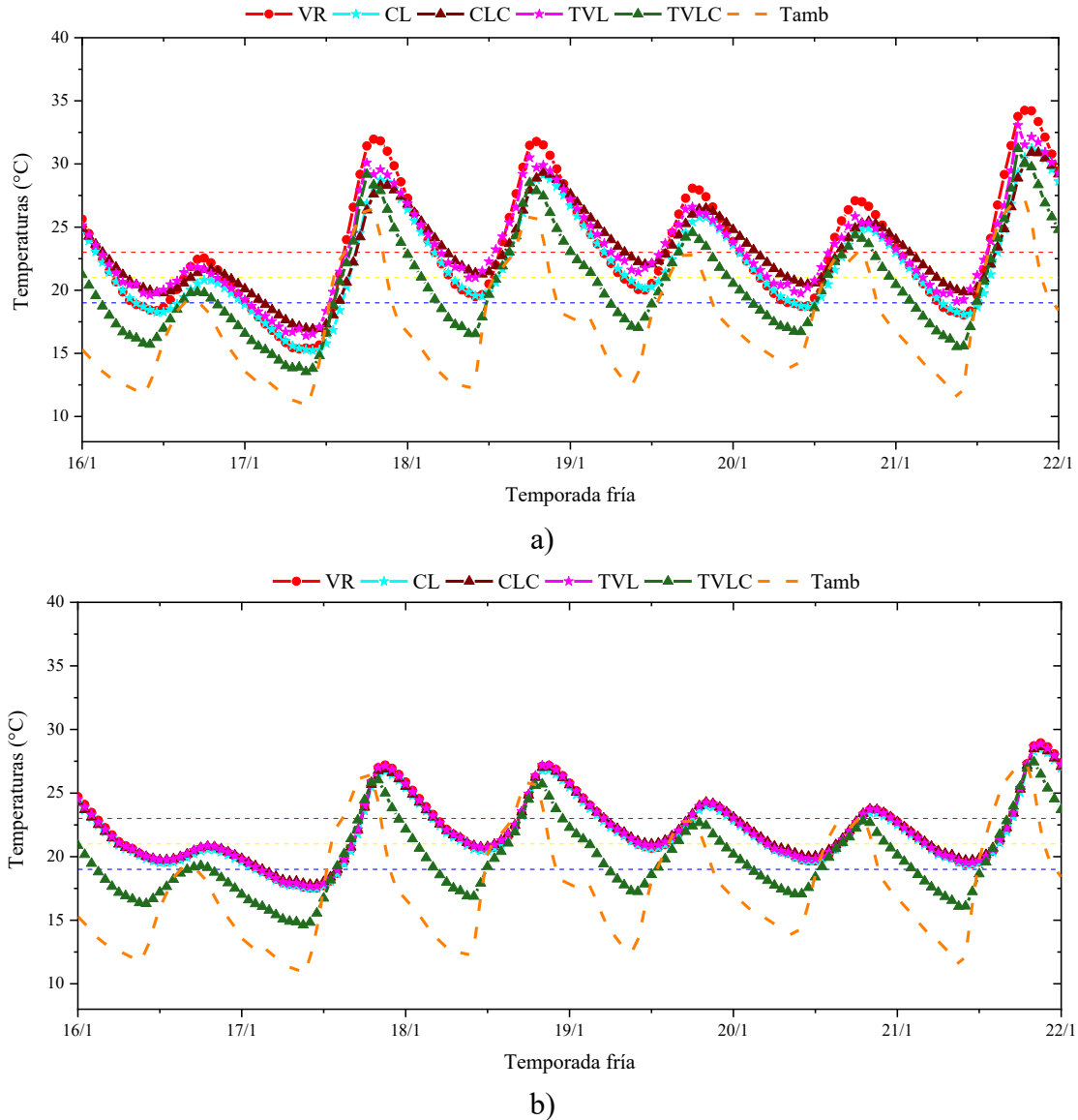


Figura 5.13 Temperaturas durante la temporada fría de VR, CL, CLC, TVL y TVLC en: a) planta y b) planta baja.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a cada configuración, donde se indica el porcentaje de horas en las que se requeriría calefacción, refrigeración o en las que se alcanza el confort térmico. Tal como se explicó anteriormente, estos resultados fueron obtenidos bajo condiciones de evolución libre, es decir, sin considerar el uso de sistemas activos de climatización ni el cálculo de cargas térmicas. Los porcentajes reportados de calefacción o refrigeración se derivan únicamente del comportamiento térmico de las temperaturas interiores: si estas se encuentran por debajo o por encima de los límites establecidos por la zona de confort, se considera que habría una necesidad de calefacción o

enfriamiento para mantener condiciones adecuadas. En cambio, cuando la temperatura se mantiene dentro de dichos límites, se clasifica como una hora de confort térmico.

Durante la semana cálida, los resultados obtenidos para la planta alta muestran diferencias significativas, como se aprecia en la Figura 5.14. La configuración VR alcanzó un 25.6 % de horas confort térmico y un 74.4 % de horas de refrigeración. La configuración CL mejoró el confort térmico, registrando un 30.3 %, mientras que la refrigeración se redujo al 69.7 %. En la configuración CLC, el porcentaje de horas de refrigeración aumentó al 86.9 %, mientras que las horas de confort térmico disminuyó al 13.1 %. La configuración TVL presentó un 80.3 % de horas refrigeración y un 19.7 % de horas de confort térmico, logrando reducir las temperaturas interiores durante el día, aunque sin mantenerlas dentro de la franja de confort durante toda la semana. Finalmente, la configuración TVLC obtuvo el mejor desempeño con un 38.1 % de horas de confort térmico, un 50.0 % de refrigeración y un 11.9 % de horas de calefacción, manteniéndose dentro de la franja de confort durante los siete días.

En la planta baja, ver Figura 5.14b, el confort térmico muestra un incremento en el porcentaje de horas en todas las configuraciones. La VR alcanzó un 62.5 % de horas de confort térmico, con un 24.4 % de horas de refrigeración y un 13.1 % de horas de calefacción. La configuración CL logró un porcentaje de horas de confort de 61.9 %, con un 20.2 % de horas de refrigeración y un 17.9 % de horas de calefacción. La configuración CLC registró un 66.6 % de horas de confort térmico, con un 20.9 % de horas de refrigeración y un 12.5 % de horas de calefacción, destacándose por su capacidad para mantener las temperaturas dentro de la franja de confort, reduciendo la necesidad de refrigeración y calefacción. En la configuración TVL, las horas de confort alcanzaron el 63.1 %, con un 20.2 % de horas de refrigeración y un 16.7 % de horas de calefacción. Finalmente, la configuración TVLC presentó 48.8 % de horas de confort térmico, con un 17.2 % de horas de refrigeración y un 34.0 % de horas de calefacción, mostrando una mayor necesidad de calefacción debido a las bajas temperaturas nocturnas.

Los resultados muestran diferencias claras entre la planta alta y la planta baja. En la planta alta, el confort térmico fue menor debido a la mayor exposición solar. La configuración VR tuvo el comportamiento térmico menos favorable, mientras que la configuración CL mejoró

ligeramente el confort. La configuración CLC aumentó la demanda de refrigeración, lo que indica que el aislamiento redujo las temperaturas, pero no mantuvo el confort. La TVLC tuvo el mejor desempeño, equilibrando refrigeración y calefacción. En la planta baja, el confort térmico fue mayor en todas las configuraciones por su menor exposición. La configuración CLC destacó por mantener temperaturas estables con baja demanda de climatización. En cambio, la configuración TVLC necesitó más calefacción por las bajas temperaturas nocturnas.

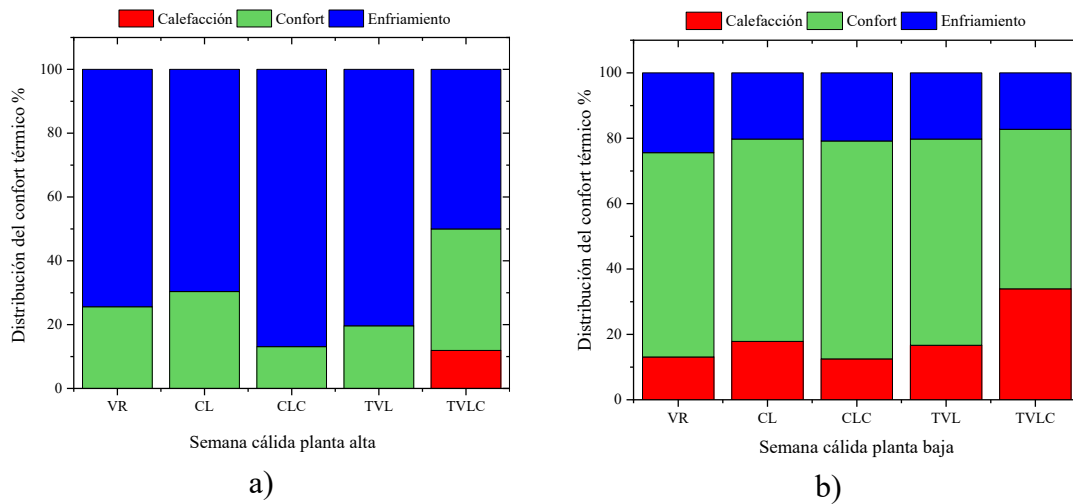


Figura 5.14 Distribución del confort, refrigeración y calefacción de las configuraciones en la temporada cálida en: a) planta alta y b) planta baja.

En la planta alta, los resultados de la temporada fría muestran variaciones en confort, refrigeración y calefacción según la configuración del techo como se observa en la Figura 5.15a. La configuración VR registró un 33.3 % de horas de confort, un 38.7 % de horas de refrigeración y un 28.0 % de horas de calefacción. La configuración CL mejoró las horas de confort al 38.7 %, con un incremento en horas de calefacción al 32.1 % y una reducción en horas de refrigeración al 29.2 %. La configuración CLC alcanzó un 48.8 % de horas de confort, con una reducción de horas de calefacción de 13.7 % y un aumento en horas de refrigeración de 37.5 %. La configuración TVL presentó un 46.5 % de horas de confort, 38.1 % de horas de refrigeración y 15.4 % de horas de calefacción. Finalmente, la configuración TVLC mostró un 31.6 % de horas de confort, un 17.2 % en horas de refrigeración y un aumento en horas de calefacción de hasta un 51.2 %.

En la planta baja, los valores reflejan diferencias en la distribución térmica como se muestra en la Figura 5.15b. La configuración VR registró 47.0 % de horas de confort, 25.6 % de horas de refrigeración y 27.4 % de horas de calefacción. La configuración CL alcanzó un 48.2 % de horas de confort, con una reducción en horas de refrigeración de 22.6 % y un ligero aumento en horas de calefacción de 29.2 %. La configuración CLC presentó un 47.0 % de horas de confort, con una refrigeración de 26.2 % y una ligera disminución en calefacción de 26.8 %. La configuración TVL mantuvo un confort del 46.4 %, con una refrigeración del 26.2 % y calefacción del 27.4 %. Finalmente, la configuración de TVLC mostró el porcentaje mayor de horas de calefacción con 60.1 %, acompañado de un 39.9 % de horas de confort y ausencia de refrigeración, lo que indica que esta configuración favorece temperaturas más bajas en la planta baja durante la temporada fría.

Los resultados de la temporada fría muestran variaciones en el confort térmico según la configuración del techo. En la planta alta, la configuración VR tuvo un menor desempeño, con un equilibrio entre calefacción y refrigeración, pero un confort térmico limitado. La configuración CL mejoró el confort, aunque con un incremento en la demanda de calefacción. La configuración CLC logró el mayor porcentaje de confort, reduciendo la necesidad de calefacción, pero con un ligero incremento en refrigeración. La configuración TVL presentó un comportamiento similar, mientras que la configuración TVLC mostró el mayor uso de calefacción, lo que indica una mayor pérdida de calor nocturna.

En la planta baja, las diferencias en la distribución térmica fueron más evidentes. La VR mantuvo un confort moderado con una demanda equilibrada de calefacción y refrigeración. Las configuraciones CL y CLC mostraron variaciones menores en la distribución térmica, con un ligero aumento en confort. La configuración TVLC destacó por su mayor demanda de calefacción y la ausencia de refrigeración, sugiriendo que esta configuración favorece temperaturas más bajas en la planta baja durante la temporada fría.

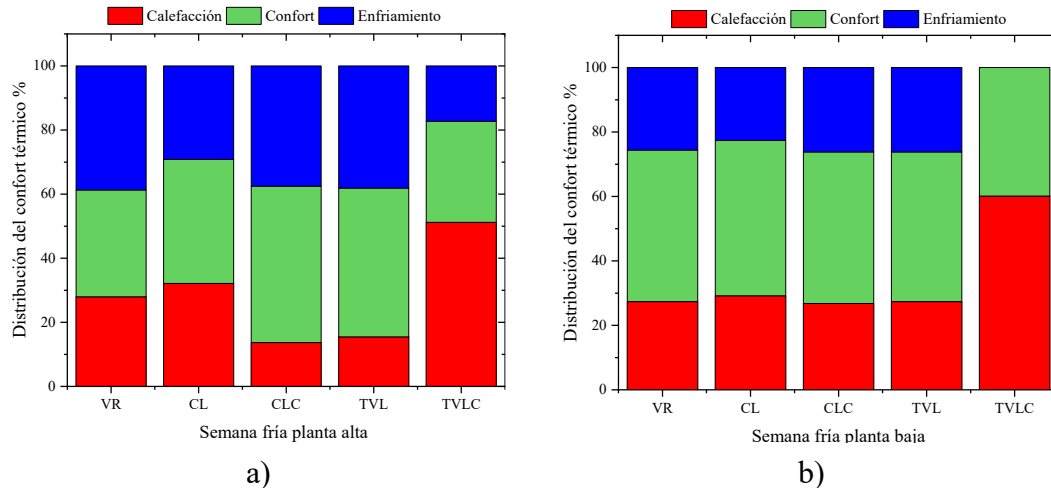


Figura 5.15 Distribución del confort, refrigeración y calefacción de las configuraciones en la temporada fría en: a) planta alta y b) planta baja.

En general, el análisis de las temperaturas en planta alta y planta baja facilitó identificar las variaciones térmicas entre las distintas configuraciones de techo y su impacto en el confort térmico. En la planta alta, se observaron temperaturas más elevadas y variaciones más pronunciadas, mientras que, en la planta baja, las condiciones térmicas fueron más estables debido a la menor exposición directa y al efecto de la masa térmica. Estos comportamientos se reflejan en el porcentaje de confort térmico, refrigeración y calefacción en evolución libre, donde algunos ajustes lograron obtener temperaturas dentro del confort, mientras que otros requirieron mayor demanda de calefacción o refrigeración según la temporada.

Por otro lado, desde un análisis anual como se observa en la Figura 5.16 se observaron diferencias significativas en el desempeño térmico de las configuraciones de techo. En la planta alta, la configuración VR presentó 91.7 % en refrigeración y solo 8.3 % en confort, mientras que la configuración CL mostró un ligero aumento en el confort térmico 25.0 % y 75.0 % de enfriamiento. Por otro lado, CLC no logró mantener condiciones de confort, requiriendo 100 % de enfriamiento a lo largo del año.

En contraste, el TVL tuvo un comportamiento con temperaturas más estables ya que alcanzó 91.7 % de confort y redujo la demanda de refrigeración al 8.3 %. Sin embargo, la mejor configuración fue TVLC, que registró 100 % de confort térmico durante todo el año. Este desempeño se debe a la combinación del canal de aire junto con la capacidad aislante de la

fibra de coco, que minimiza la transferencia de calor y regula mejor la temperatura en el interior.

En la planta baja, ver Figura 4.16b, la mayoría de las configuraciones se mantuvo dentro del rango de confort, aunque TVLC alcanzó 83.3 % de confort térmico y 16.7 % de calefacción requerida. Este comportamiento se explica porque la fibra de coco reduce la ganancia de calor en la planta alta, evitando que el calor se transfiera al nivel inferior. Además, la planta alta actúa como una barrera térmica, lo que genera temperaturas ligeramente más bajas en la planta baja.

Cabe destacar que, en condiciones reales, la incorporación de equipos eléctricos y ocupantes generará ganancias térmicas adicionales, lo que reducirá la necesidad de calefacción en la planta baja, optimizando aún más el desempeño térmico del TVLC en la vivienda.

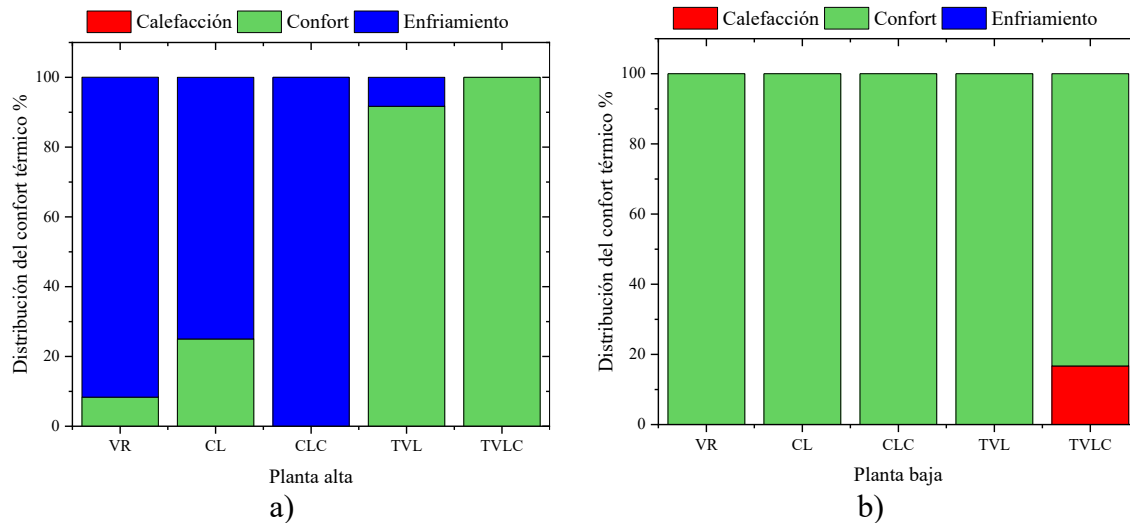


Figura 5.16 Distribución anual del confort, refrigeración y calefacción de las configuraciones en: a) planta alta y b) planta baja

A partir de estos resultados, se prosigue con el análisis del desempeño de la vivienda considerando las cargas de enfriamiento, seguido de la demanda energética y las emisiones de CO₂. Finalmente, se presenta un análisis de costos que integra los factores económicos y operativos de cada configuración.

5.3 Análisis de desempeño de la vivienda con cargas de enfriamiento, demanda energética y emisiones de CO₂

En regiones con clima Cwa según la clasificación de Köppen, como Cuernavaca, donde los inviernos son secos y templados y los veranos cálidos y húmedos, el desempeño térmico de las viviendas adquiere especial importancia en el diseño constructivo. En este panorama, las cargas de enfriamiento se convierten en un parámetro importante para evaluar el comportamiento térmico, mientras que las cargas de calefacción suelen ser irrelevantes debido a las condiciones climáticas predominantes [113]. Cabe señalar que los valores de temperatura que definen las condiciones de confort en este análisis coinciden con los establecidos bajo condiciones de evolución libre.

A continuación, en la Figura 5.17, se presenta el análisis de los resultados de un año de todas las configuraciones de techo donde se utilizó un COP de 2.5, que refleja la eficiencia del sistema de refrigeración utilizado en las viviendas[117]. La operación consiste en dividir la carga térmica (ya sea de enfriamiento o calefacción) entre el COP del sistema. De esta manera, se obtiene la cantidad de energía eléctrica que el equipo requeriría para cubrir dicha carga bajo condiciones ideales de operación.

Los resultados obtenidos sugieren que la configuración VR presenta las mayores cargas térmicas, con un valor de 5434.4 kWh, debido a la acumulación de calor en la losa de concreto. Este comportamiento térmico genera una alta demanda eléctrica de 2173.7 kWh y una significativa emisión de CO₂, alcanzando 0.95 tCO₂. En comparación, las configuraciones CL y CLC muestran una mejora notable. La carga térmica de CL es de 2458.3 kWh, mientras que CLC presenta un valor más alto con 2673.7 kWh. Esto se traduce en una menor demanda eléctrica en ambas configuraciones (983.3 kWh para CL y 1069.4 kWh para CLC) y emisiones de CO₂ también más bajas, con 0.43 tCO₂ para CL y 0.46 tCO₂ para CLC. En cuanto a los techos ventilados, el TVL reduce las cargas térmicas a 3471.7 kWh y el TVLC a 3684.6 kWh, con un impacto positivo en la demanda eléctrica, que alcanza 1388.6 kWh para TVL y 1473.8 kWh para TVLC. Las emisiones de CO₂ en estos techos ventilados se sitúan en 0.60 tCO₂ para el TVL y 0.64 tCO₂ para el TVLC. En resumen, las configuraciones con techos ventilados y las cubiertas de lámina con aislamiento, como CL,

CLC, TVL y TVLC, demuestran un desempeño superior en términos de reducción de cargas térmicas, demanda eléctrica y emisiones de CO₂, en comparación con la VR. La combinación de la ventilación y el aislamiento térmico es indispensable para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de las viviendas. La configuración CL mostró el mejor desempeño en cargas térmica, alcanzando 2458.3 kWh, lo que representa una reducción del 54.7 % respecto a la configuración VR (5434.4 kWh).

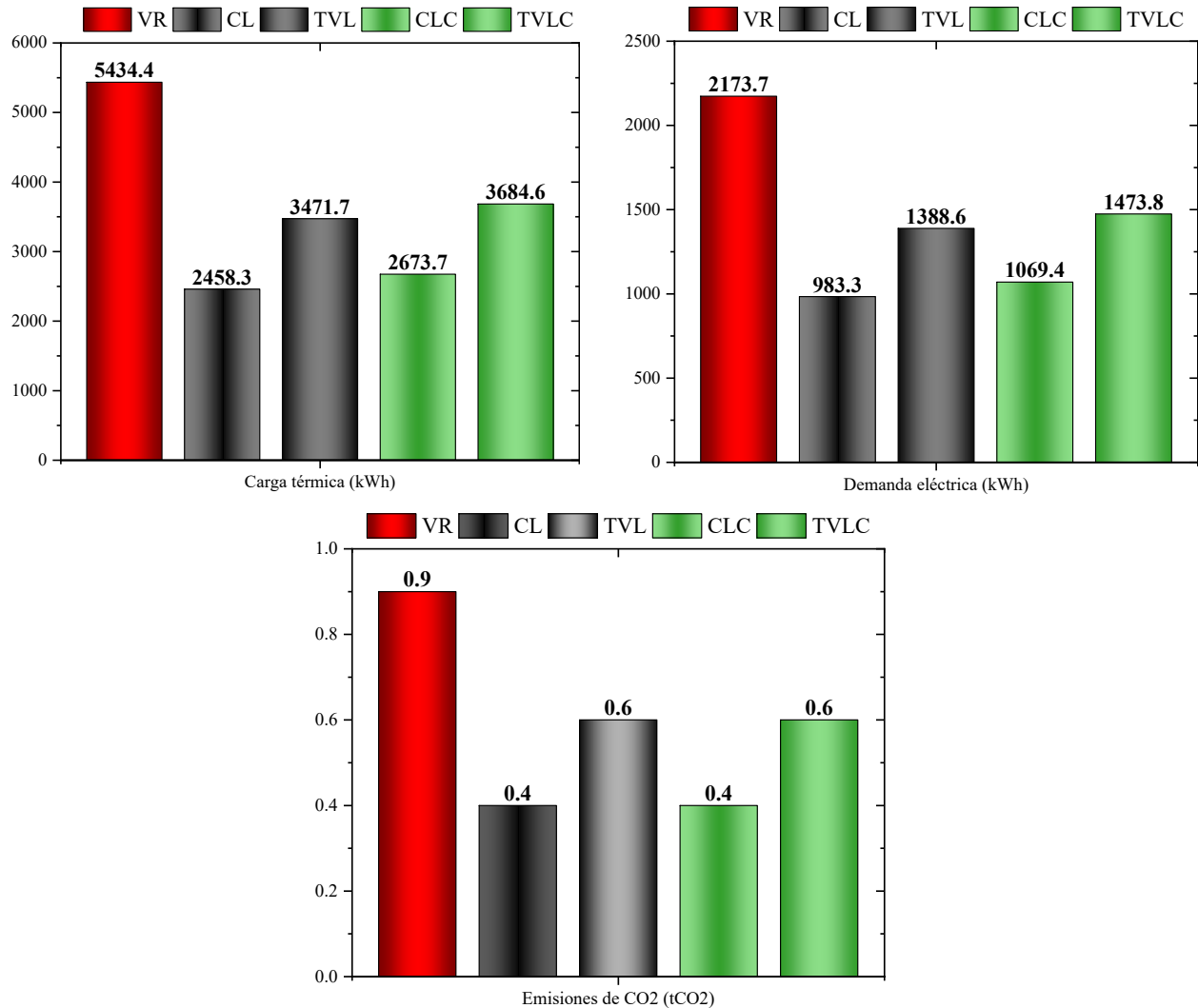


Figura 5.17 Cargas de enfriamiento, demanda energética y emisiones de CO₂ de las configuraciones de techo.

El desempeño térmico de la vivienda, medido a través de las cargas de enfriamiento, demanda energética y emisiones de CO₂, evidencia el impacto de las estrategias pasivas en la eficiencia y el confort. No obstante, su viabilidad depende del costo de implementación y operación, por lo que a continuación se analiza el aspecto económico de cada configuración.

5.3 Análisis de costos

Los techos ventilados han sido ampliamente estudiados en la literatura como una estrategia para mejorar el comportamiento térmico de las edificaciones en climas cálidos. Su diseño permite generar un flujo de aire a través de un canal en el techo, lo que reduce la transferencia de calor hacia el interior de la vivienda [114]. Sin embargo, además de los beneficios térmicos que proporcionan, es importante evaluar los costos asociados con su instalación, considerando la inversión inicial y los gastos operativos.

El análisis de costos comienza con la inversión inicial, definida como el conjunto de gastos necesarios para la implementación de un sistema o componente constructivo desde su fase inicial. Esta inversión incluye la adquisición de materiales, costos de mano de obra, transporte de insumos y cualquier otro recurso requerido para su instalación y correcto funcionamiento. Para su cálculo, se realizó la suma de todos estos elementos.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de mantenimiento anual, que representa los costos recurrentes necesarios para mantener el sistema en óptimas condiciones. Este valor se obtiene multiplicando el costo total del sistema por el porcentaje estimado de mantenimiento. Asimismo, se consideró el impacto de la inflación en los costos futuros de mantenimiento y operación. En México, la tasa de inflación es del 4.21 % [115], por lo que los costos anuales fueron ajustados según la inflación acumulada para reflejar su valor actualizado a lo largo del tiempo.

Posteriormente, se obtuvo el consumo energético de la vivienda, el cual lo proporcionó DesignBuilder. Este consumo, expresado en kWh, se multiplicó por la tarifa eléctrica mensual, publicada en el sitio oficial de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [116].

Finalmente, el costo operativo se determinó sumando el costo anual de la energía consumida y el costo anual de mantenimiento, proporcionando así una evaluación integral del impacto económico del sistema a lo largo del tiempo.

El análisis se realizó tomando en cuenta las zonas habitadas de la planta alta de la vivienda, en este caso las tres habitaciones y se excluyen las escaleras, baño, y pasillo como se muestra en la Figura 5.17, esto se hizo para las cubiertas y techos ventilados únicamente.

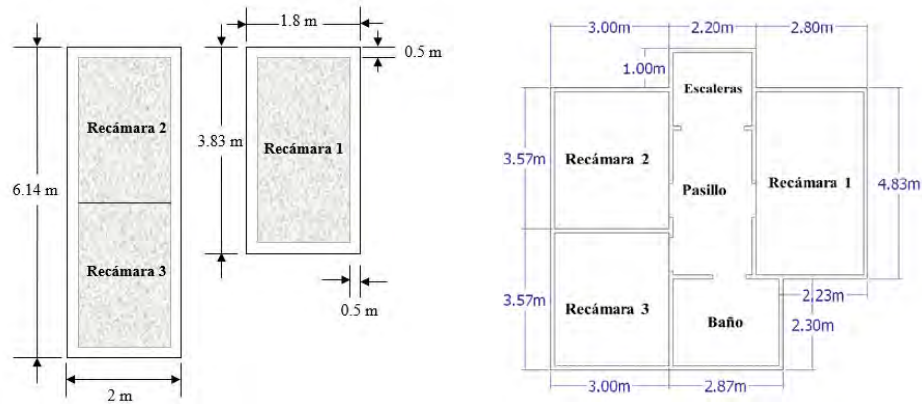


Figura 5.18 Planos de la modificaciones para las configuraciones de techo.

En la Tabla 5.2 se presentan los costos por metro cuadrado de la inversión inicial, mantenimiento e instalación y costos anuales de operación para cada configuración de techo. Estos valores se calculan en función de la demanda eléctrica, considerando un COP de 2.5 [117] teniendo un sistema eficiente. Los costos asociados a los materiales de la configuración VR provienen de la página de materiales de construcción [118], y el sitio oficial de THE HOME DEPOT [119].

Además, los costos de los materiales para las estructuras, lámina y pintura del TVL y el TVLC son de la Ferretería Marín [120], COMEX [121] y SODIMAC [122]. Por último, en la página habitissimo [123], se adquieren los costos de mano de obra para la instalación y hechura de todas las configuraciones.

El mantenimiento de techos es esencial para prolongar su vida útil y garantizar la seguridad estructural de una edificación. Aunque no existe un porcentaje fijo de mantenimiento anual aplicable a todos los techos, se recomienda reservar entre el 1% y el 4% del valor de la vivienda para gastos de mantenimiento anual [124]. Esto depende de diversos factores como las condiciones ambientales, el uso y la calidad de los materiales. No obstante, se utilizó el 2 % de mantenimiento para VR, CL, CLC, TVL, y TVLC.

En el caso de la configuración VR, el 2% es un estándar para materiales de construcción que tienen bajos requisitos de mantenimiento, como el concreto, este porcentaje incluye tanto costos directos (mano de obra, materiales) como indirectos (inspecciones, herramientas) [125]. Respecto a las cubiertas y techos ventilados se cuenta con el mismo porcentaje debido

a la inspección periódica de la integridad de la lámina, estructuras y la fibra de coco, además, la limpieza y pintura evita la acumulación de suciedad y mantiene la capacidad de ventilación [126][127].

Los costos operativos anuales de las diferentes configuraciones de techo reflejan ahorros notables, atribuibles a las propiedades físicas específicas de cada diseño:

- ✚ CL obtiene un ahorro del 54.8 % con \$2811.4 (\$/m²), debido a la reflectancia que aporta la lámina durante el día y la fácil disipación de calor gracias al grosor, lo que evidencia la transferencia de calor con convección hacia el ambiente.
- ✚ CLC aporta un 50.8 % con un costo operativo de \$3057.6, lo que demuestra el efecto estabilizador del relleno de fibra de coco aislante al limitar el flujo de calor hacia la superficie externa de la losa.
- ✚ TVL proporciona un 18.8 % a \$5043.7 como resultado de combinar la reflectancia de radiación solar con el canal de aire, lo que reduce la cantidad de calor absorbido hacia la superficie gracias a la circulación de aire.
- ✚ TVLC ofrece un 9.3 % a un costo operativo de \$5635.6, lo que confirma la eficacia combinada de la ventilación y el aislamiento térmico de la fibra de coco minimizando los picos térmicos y las fluctuaciones extremas. El aumento de estos costos se debe a que esta configuración, aporta aislamiento térmico durante el día y la noche, por lo que los sistemas de HVAC incorporan cierta calefacción gracias a la fibra de coco y por ello se registra un cierto consumo durante la noche, sin embargo, los costos de inversión inicial son mayores respecto a las otras configuraciones.

La mejor configuración en términos de ahorro y eficiencia operativa es la configuración CL, que logró un ahorro del 54.8% con un costo operativo de \$2811.4 \$/m². Esto se debe a la lámina, que ayuda a reducir la absorción de calor durante el día, combinada con su fácil disipación térmica gracias a su grosor. Esta configuración mejora significativamente la eficiencia térmica al promover la transferencia de calor hacia el ambiente a través de la convección, lo que contribuye a un menor consumo energético y costos operativos. El beneficio principal de la configuración CL radica en su balance entre costo y eficiencia

térmica, al ofrecer un ahorro significativo sin comprometer el confort interior, siendo una opción favorable para optimizar el consumo energético a largo plazo.

Tabla 5.2. Distribución de costos para diferentes configuraciones de techo.

Tipo de techo ventilado	Costo por m ² de techo (\$/m ²)	Costo de instalación o mantenimiento (\$/m ²)	Inversión inicial (\$/m ²)	Costo operativo anual, techo (\$/m ²)
VR	\$730.2	\$450	\$1180	\$6214.8
CL	\$309.4	\$250	\$559.4	\$2811.4
CLC	\$484.7	\$250	\$734.7	\$3057.6
TVL	\$369.7	\$250	\$619.7	\$5043.7
TVLC	\$2033.0	\$250	\$1275.1	\$5635.6

Las cubiertas y los techos ventilados ofrecen beneficios en el desempeño térmico al reducir las temperaturas internas, mejorar el confort y disminuir el consumo eléctrico en refrigeración, lo que ayuda a reducir los costos operativos. Además, prolongan la vida útil de la estructura al minimizar daños por humedad y acumulación de calor. Considerando que estos ajustes cubren una nueva superficie del techo ya que solo se toman en cuenta las zonas habitadas de la planta alta de la vivienda, que en este caso son las tres habitaciones y se descartan las escaleras, baño, y pasillo, se recalcularon las emisiones nuevamente utilizando un COP de 2.5 y se observa en la Figura 5.18. La VR se mantiene en 0.95 tCO₂ al no presentar modificaciones, mientras que CL reduce sus emisiones a 0.43 tCO₂, con una disminución de 0.30 tCO₂. La CLC, con 0.46 tCO₂, muestra un ligero aumento de 0.03 tCO₂. En los techos ventilados, el TVL registra 0.77 tCO₂, con un incremento de 0.17 tCO₂, y el TVLC alcanza 0.86 tCO₂, reflejando un aumento de 0.22 tCO₂.

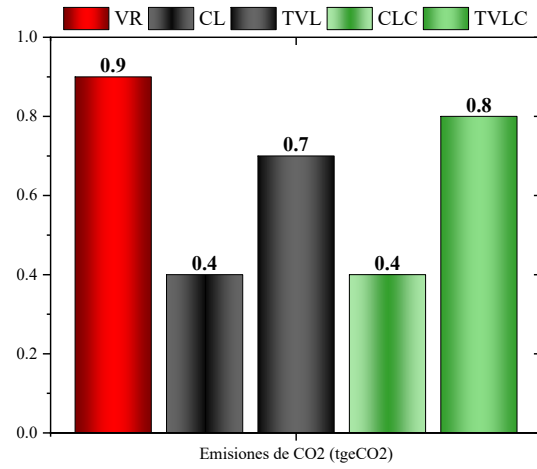


Figura 5.19 Emisiones de CO₂ de las configuraciones.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

5.4 Conclusiones

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 5, se presentan las conclusiones relacionadas con la tesis analizando el desempeño de la vivienda en evolución libre, las condiciones térmicas durante las temporadas cálida y fría, los porcentajes de confort térmico obtenidos por cada configuración en dichas temporadas, y, finalmente, el desempeño de la vivienda en términos de cargas de enfriamiento, demanda energética, emisiones de CO₂ y los costos asociados a cada configuración.

Desde el punto de vista térmico, la configuración de techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco mostró el mejor desempeño al mantener temperaturas más bajas y estables, seguida por el la cubierta de lámina y el techo ventilado de lámina, mientras que la cubierta de lámina con relleno de fibra de coco y la vivienda de referencia presentaron condiciones menos favorables debido a mayor acumulación de calor. En eficiencia energética, la cubierta de lámina con relleno de fibra de coco fue la opción más eficiente gracias al aislamiento de fibra de coco, que estabiliza la temperatura y reduce la demanda eléctrica. La cubierta de lámina también mostró buen desempeño con costos moderados, mientras que el techo ventilado de lámina y el techo ventilado de lámina con relleno de fibra de coco presentaron mayores cargas térmicas y demanda eléctrica ya que, aunque redujeron las temperaturas diurnas y nocturnas, también incrementaron las cargas de calefacción nocturna.

Económicamente, la cubierta de lámina resultó ser la opción más rentable, con el menor costo operativo y ahorro significativo frente a la vivienda de referencia. La cubierta de lámina con relleno de fibra de coco le siguió, destacando por la reducción de temperaturas que contribuyeron a menores costos. El techo ventilado de lámina y el techo ventilado de lámina

con relleno de fibra de coco, aunque con costos operativos más altos, también ofrecieron ahorros gracias a sus estrategias pasivas de ventilación y aislamiento.

En conclusión, la implementación de estrategias pasivas, como el aislamiento con fibra de coco y la ventilación natural, demostró ser una solución efectiva para mejorar el confort térmico y la eficiencia energética de la edificación. Estas medidas no solo contribuyen a la reducción del consumo eléctrico y las emisiones de CO₂, sino que también pueden generar beneficios económicos considerables.

5.5 Recomendaciones

Dada la estrategia pasiva utilizada y el amplio campo de investigación, se sugieren los siguientes puntos para trabajos futuros:

- Evaluar el comportamiento de las configuraciones en otros climas, como cálidos secos o tropicales húmedos para identificar su viabilidad en diferentes contextos geográficos.
- Investigar otros materiales sustentables o de bajo costo que puedan complementar o superar el desempeño térmico y económico de la fibra de coco.
- Realizar estudios paramétricos para optimizar el diseño de techos ventilados (TVL y TVLC), considerando la altura del canal de aire, orientación y materiales adicionales que puedan mejorar su desempeño.
- Explorar cómo la incorporación de estas soluciones impacta en comunidades locales, particularmente en zonas de bajos recursos, o analizar su aceptación social y viabilidad cultural.
- Evaluar el desempeño de las configuraciones cuando se combinan con sistemas activos de generación de energía, como paneles solares, y analizar su impacto en la reducción de costos operativos.
- Extender los principios de diseño analizados a viviendas tradicionales, como las mayas, para preservar su arquitectura adaptativa mientras se mejora su desempeño térmico.

Referencias

- [1] Matthews, H. D., & Wynes, S. (2022b). Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5°C. *Science*, 376(6600), 1404-1409. <https://doi.org/10.1126/science.abo3378>
- [2] Li, L., Sun, W., Hu, W., & Sun, Y. (2021b). Impact of natural and social environmental factors on building energy consumption: Based on bibliometrics. *Journal Of Building Engineering*, 37, 102136. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102136>
- [3] Jayasinghe, R., Abeyrathna, W., Jayasingha, K. R., De Silva, A. R., & Halwaturaa, R. U. (2023). Developing a low-cost thermally insulated ceiling sheet system using coir fibre. *Qeios*.
- [4] Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy And Buildings*, 209, 109709. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109709>
- [5] Si, P., Lv, Y., Rong, X., Shi, L., Yan, J., & Wang, X. (2020). An innovative building envelope with variable thermal performance for passive heating systems. *Applied Energy*, 269, 115175. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115175>
- [6] Gocer, C. (2024). A field investigation to evaluate the effects of prevailing wind and solar radiation on water-induced damage to the eaves of wooden fiber-board covered roofs. *Engineering Failure Analysis*, 159, 108135. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108135>
- [7] Gholami, M., Barbaresì, A., Tassinari, P., Bovo, M., & Torreggiani, D. (2020). A Comparison of Energy and Thermal Performance of Rooftop Greenhouses and Green Roofs in Mediterranean Climate: A Hygrothermal Assessment in WUFI. *Energies*, 13(8), 2030. <https://doi.org/10.3390/en13082030>
- [8] Tariku, F., Shang, Y., & Molleti, S. (2023). Thermal performance of flat roof insulation materials: A review of temperature, moisture and aging effects. *Journal Of Building Engineering*, 76, 107142. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107142>
- [9] Garshasbi, S., Feng, J., Paolini, R., Duverge, J. J., Bartesaghi-Koc, C., Arasteh, S., Khan, A., & Santamouris, M. (2023). On the energy impact of cool roofs in Australia. *Energy And Buildings*, 278, 112577. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112577>
- [10] Molleti, S., & Van Reenen, D. (2022). Development of Psi Factors for Thermal Bypass Due to Insulation Gaps in Low-Slope Roofing Assemblies. *Buildings*, 12(1), 68. <https://doi.org/10.3390/buildings12010068>
- [11] Michels, C., Güths, S., Marinoski, D. L., & Lamberts, R. (2021). Thermal performance and thermal resistance of fibre cement roof tiles: Experimental study. *Energy And Buildings*, 231, 110569. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110569>
- [12] Mousavi, S., Gijón-Rivera, M., Rivera-Solorio, C., & Rangel, C. G. (2022). Energy, comfort, and environmental assessment of passive techniques integrated into low-energy residential buildings in semi-arid climate. *Energy And Buildings*, 263, 112053. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112053>
- [13] Chen, J., Lu, L., Gong, Q., Wang, B., Jin, S., & Wang, M. (2021). Development of a new spectral selectivity-based passive radiative roof cooling model

-
- and its application in hot and humid region. *Journal Of Cleaner Production*, 307, 127170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127170>
- [14] Rangel, C. G., Rivera-Solorio, C., Gijón-Rivera, M., & Mousavi, S. (2022a). The effect on thermal comfort and heat transfer in naturally ventilated roofs with PCM in a semi-arid climate: An experimental research. *Energy And Buildings*, 274, 112453. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112453>
- [15] Fang, Y., Du, X., Zhao, H., Hu, M., & Xu, X. (2023). Assessment of green roofs' potential to improve the urban thermal environment: The case of Beijing. *Environmental Research*, 237, 116857. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116857>
- [16] Shariat, N., & Sanusi, S. H. (2020, 30 diciembre). The potential of coconut waste element as an alternative material for roof ceiling purpose. <https://fazpublishing.com/arnf/index.php/arnf/article/view/26>
- [17] Wang, H., Huang, Y., & Yang, L. (2022). Integrated Economic and Environmental Assessment-Based Optimization Design Method of Building Roof Thermal Insulation. *Buildings*, 12(7), 916. <https://doi.org/10.3390/buildings12070916>
- [18] Abdollahiparsa, H., Shahmirzaloo, A., Teuffel, P., & Blok, R. (2023). A review of recent developments in structural applications of natural fiber-Reinforced composites (NFRCS). *Composites And Advanced Materials*, 32, 263498332211475. <https://doi.org/10.1177/26349833221147540>
- [19] Juanicó, L. E. (2020). Thermal insulation of roofs by using multiple air gaps separated by insulating layers of low infrared emissivity. *Construction And Building Materials*, 230, 116931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116931>
- [20] Tariku, F., Shang, Y., & Molleti, S. (2023b). Thermal performance of flat roof insulation materials: A review of temperature, moisture and aging effects. *Journal Of Building Engineering*, 76, 107142. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107142>
- [21] Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T., & Lee, I. Y. L. (2015). Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. *Energy*, 82, 813-826.
- [22] Bianco, V., Diana, A., Manca, O., & Nardini, S. (2016). Thermal behavior evaluation of ventilated roof under variable solar radiation. *International Journal of Heat and Technology*, 34(S2), S346-S350.
- [23] Bianco, V., Diana, A., Manca, O., & Nardini, S. (2018). Numerical investigation of an inclined rectangular cavity for ventilated roofs applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 426-435.
- [24] Yu, J., Leng, K., Wang, F., Ye, H., & Luo, Y. (2020). Simulation Study on Dynamic Thermal Performance of a New Ventilated Roof with Form-Stable PCM in Southern China. *Sustainability*, 12(22), 9315.
- [25] Calati, M., Doretto, L., Zilio, C., & Mancin, S. (2021). 3D numerical simulation of a novel ventilated roof: thermal performance analysis and fluid flow behavior. *Science And Technology For The Built Environment*, 27(6), 819-831.
- [26] Lee, S., Park, S. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, 44(7), 1431-1439.
- [27] Mintonoro, D. S., Widigdo, W., & Juniwati, A. (2015). Application of coconut fibres as outer eco-insulation to control solar heat radiation on horizontal concrete slab rooftop. *Procedia Engineering*, 125, 765-772.

-
- [28] Li, D., Zheng, Y., Liu, C., Hu, Q., & Liu, X. (2016). Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters. *Sustainable Cities and Society*, 22, 86-93.
- [29] Wang, H., Zhou, H., Chen, K., Li, D., & Liu, Y. (2023). Experimental study on optimal layout and design parameters of spray cooling ventilated roof in hot climate region. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4846697
- [30] Wang, H., Wei, J., Guo, C., Yang, L., & Wang, Z. (2024). Numerical investigation of the effects of different influencing factors on thermal performance of naturally ventilated roof. *Energy*, 289, 130039.
- [31] Chen, Y., Li, X., Du, X. (2023) Thermal Performance of Double-Skin Roof with Inclined Upper Plate for Grain Depot: Modeling and Experimental Investigation. *Buildings* 2023, 13, 2672.
- [32] Tang, S., Akkurt, N., Zhang, K., Chen, L., & Ma, M. (2020). Effect of roof and ceiling configuration on energy performance of a metamaterial-based cool roof for low-rise office building in China. *Indoor And Built Environment*, 30(10), 1739-1750.
- [33] Kain, G., Idam, F., Federspiel, F., Réh, R., & Krišťák, L. (2020). Suitability of Wooden Shingles for Ventilated Roofs: An Evaluation of Ventilation Efficiency. *Applied Sciences*, 10(18), 6499.
- [34] Hou, M., Kong, X., Li, H., Yang, H., & Chen, W. (2021). Experimental study on the thermal performance of composite phase change ventilated roof. *Journal Of Energy Storage*, 33, 102060.
- [35] Bamdad, K. (2023). Cool roofs: A climate change mitigation and adaptation strategy for residential buildings. *Building And Environment*, 236, 110271.
- [36] Maya, S., & Alejandro, M. (2022). Estudio experimental y simulación numérica del comportamiento térmico de una vivienda residencial con techo verde ventilado. Tesis de maestría CENIDET.
- [37] Alavéz-Ramírez, R., Chiñas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V. J., Ortiz-Guzmán, M., & Lara-Romero, J. (2014). Thermal lag and decrement factor of a coconut-ferrocement roofing system. *Construction and Building Materials*, 55, 246-256.
- [38] Darsana, P., Abraham, R., Joseph, A. H., Jasheela, A., Binuraj, P., & Sarma, J. (2016). Development of coir-fibre cement composite roofing tiles. *Procedia Technology*, 24, 169-178.
- [39] Hwang, C., Tran, V., Hong, J., & Hsieh, Y. (2016). Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites. *Construction And Building Materials*, 127, 984-992.
- [40] Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Levacher, D. (2020). Determination and Review of Physical and Mechanical Properties of Raw and Treated Coconut Fibers for Their Recycling in Construction Materials. *Fibers*, 8(6), 37.
- [41] Asim, M., Uddin, G. M., Jamshaid, H., Raza, A., Tahir, Z. U. R., Hussain, U., Satti, A. N., Hayat, N., & Arafat, S. M. (2020). Comparative experimental investigation of natural fibers reinforced light weight concrete as thermally efficient building materials. *Journal Of Building Engineering*, 31, 101411.
- [42] Shao, N., Ma, L., Zhou, C., & Zhang, D. (2022). Experimental study on the heat transfer performance of the PVT ventilated roof as heat exchanger for heat pump system. *Renewable Energy*, 187, 995-1008.

-
- [43] Warsi, S., & Anis, M (2022). Study on coconut fibre reinforced concrete. *International Journal of Engineering, Management & Technology (IJEMT)*,1,9, 24-30.
- [44] Kumar, T. S., Shafi, K. A., Thomas, R. J., & Mohammed, J. (2023). Experimental evaluation of the thermal performance of coir mat and green facade as wall insulation in a tropical climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 40, 101757.
- [45] Wang, Haitao and Zhou, Huakun and Chen, Kewei and Li, Deliang and Liu, Yang, Experimental Study on Optimal Layout and Design Parameters of Spray Cooling Ventilated Roof in Hot Climate Region. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4891972> or.
- [46] Saini, K., Matsagar, V., & Kodur, V. R. (2024). Recent advances in the use of natural fibers in civil engineering structures. *Construction And Building Materials*, 411, 134364.
- [47] Demirdağ, C., Nodehi, M., Bideci, A., Bideci, Ö. S., Tuncer, M., Gençel, O., & Ozbakkaloglu, T. (2024). The use of natural (coconut) and artificial (glass) fibers in cement – polymer composites: An experimental study. *Construction & Building Materials*, 412, 134895.
- [48] Shah, K. W., Ong, P. J., Chua, M. H., Toh, S. H. G., Lee, J. J. C., Soo, X. y. D., Png, Z. M., Ji, R., Xu, J., & Zhu, Q. (2022). Application of phase change materials in building components and the use of nanotechnology for its improvement. *Energy And Buildings*, 262, 112018.
- [49] Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023b). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results In Engineering*, 19, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- [50] De Agricultura Y Desarrollo Rural, S. (s. f.). Producción de copra y coco en México. gob.mx.
- [51] Ali, M. (2011). Coconut fibre: A versatile material and its applications in engineering. *Journal of Civil engineering and construction Technology*, 2(9), 189-197.
- [52] Ali, M., Liu, A., Sou, H. C., & Chouw, N. (2012). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 814-825.
- [53] Quiñones-Bolaños, E., Gómez-Oviedo, M., Mouthon-Bello, J., Sierra-Vitola, L., Berardi, U., & Bustillo-Lecompte, C. (2021). Potential use of coconut fibre modified mortars to enhance thermal comfort in low-income housing. *Journal Of Environmental Management*, 277, 111503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111503>
- [54] Ahmad, J., Majdi, A., Al-Fakih, A., Deifalla, A., Althoey, F., Ouni, M. E., & El-Shorbagy, M. (2022c). Mechanical and Durability Performance of Coconut Fiber Reinforced Concrete: A State-of-the-Art Review. *Materials*, 15(10), 3601. <https://doi.org/10.3390/ma15103601>
- [55] Watchrodorn, N. (2023). Investigation of the thermal insulation walls of coconut fiber mixed with cement. *International Journal of Science and Innovative Technology*, 6(1), 70-77.

-
- [56] Bandaranayake, S., Arachchi, T. K., & Gamage, K. (2023). Comparative study to assess the thermal behaviour of sandwich roof panels with coconut fibre as an alternative core material to polyurethane. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 23(3), 14-18.
- [57] Segura, J., Belda, I. M., Juliá, E., & Gadea, J. (2024). Acoustic and thermal properties of panels made of fruit stones waste with coconut fibre. *Construction & Building Materials*, 426, 136054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136054>
- [58] Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmami, B., & Shin, U. (2007b). Development of coconut coir-based lightweight cement board. *Construction and Building Materials*, 21(2), 277-288.
- [59] Mintorogo, D. S., Widigdo, W., & Juniwati, A. (2015). Application of coconut fibres as outer eco-insulation to control solar heat radiation on horizontal concrete slab rooftop. *Procedia Engineering*, 125, 765-772.
- [60] Thanushan, K., Yogananth, Y., Sangeeth, P., Coonghe, J. G., & Sathiparan, N. (2019b). Strength and Durability Characteristics of Coconut Fibre Reinforced Earth Cement Blocks. *Journal Of Natural Fibers*, 18(6), 773-788.
- [61] Ali, B., Hawreen, A., Kahla, N. B., Amir, M. T., Azab, M., & Raza, A. (2022). A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials. *Construction & Building Materials*, 351, 128957.
- [62] Martinelli, F. R. B., Ribeiro, F. R. C., Marvila, M. T., Monteiro, S. N., Da Costa Garcia Filho, F., & De Azevedo, A. R. G. (2023). A Review of the Use of Coconut Fiber in Cement Composites. *Polymers*, 15(5), 1309.
- [63] Bekkouche, S. M. E. A., Benouaz, T., Cherier, M. K., Hamdani, M., Benamrane, N., & Yaïche. (2014). Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region. *Construction and Building Materials*, 52, 59-70.
- [64] Li, H., Li, J., Xi, C., Chen, W., & Kong, X. (2020). Experimental and numerical study on the thermal performance of ventilated roof composed with multiple phase change material (VR-MPCM). *Energy Conversion and Management*, 213, 112836.
- [65] Loreda, J.M. (2015). Impermeabilizante y aislante térmico a base de desechos de polímeros (Culiacán, Sinaloa, México. No. 29449204). Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. <https://www.gob.mx/imp>
- [66] Lancaster, T. L. (2024). Estera compuesta reforzada (INDIANA E.U.A. No. 855593-0). Mexicano de la Propiedad Industrial. Instituto <https://www.gob.mx/imp>
- [67] Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167-1174.
- [68] Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>.
- [69] Shine, E. (2023, 21 diciembre). The Top 10 Modular Home Builders in Ontario - Attainable Home. Attainable Home. <https://www.attainablehome.com/the-top-12-modular-home-builders-in-ontario/>
- [70] Carrascal, J., Álvarez, S., Cabeza, LF y Sánchez, M. (2007). Aplicación de materiales de cambio de fase en el sector de la construcción. (PCM). Centrohttps :

//digital.cs.es /flujo de bits /10261/7361 /1 /PCM %20CONSTRUCCIONES %C3 %93N %20GRISES % .TORROJA %2029% 20SEP.pdf

- [71] ASHRAE. (2017). ASHRAE Handbook: Fundamentals. [ENERGY MODELS://www.ashrae.org).
- [72] Pérez, S., & García, J. (2019). Eficiencia energética en la edificación: La importancia de la masa térmica. Edición.
- [73] Fernández, A., & Martín, J. (2021). Diseño pasivo y energías renovables en la construcción de viviendas.Ecoprensa.
- [74] Thomas, V. C. (2023). Heat gains and losses: roofs and walls. Energy Models.com. Energy Models ps://energy-models.com/heat-gains-and-losses-roofs-and-walls).
- [75] Ávila, A. (2019). Simulación de una vivienda con techo verde y su efecto en el confort Térmico. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico. Cuernavaca, Morelos.
- [76] Wilson, ART y Reilly, JJD (2016). Materials for Civil and Construction Engineers.
- [77] Ternio. (sf). Pintro. Recuperado de <https://amcen.ternium.com>
- [78] Dipacero. (sf). Lámina pintro. Recuperado de <https://www.dipacero.com>
- [79] Aceros Torices. (sf). Densidad del acero: ¿Qué es y para qué sirve? Recuperado el 6 de diciembre de 2024, de <https://acerostorices.com>
- [80] Propiedades de los materiales. (sf). Propiedades del acero al carbono.
- [81] Mitchell, B. H. (2007). Building environmental science: Methods and techniques. Blackwell Publishing.
- [82] Khalifa, A. J. N., & Marshall, R. H. (1990). Validation of heat transfer coefficients on interior surfaces of buildings using a full-scale interior test cell. International Journal of Heat and Mass Transfer. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(90\)90122-B](https://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90122-B).
- [83] Khalifa, A. J. N. (1989). Heat transfer processes in buildings.
- [84] McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2016). Heating, ventilating, and air conditioning: Analysis and design (7th ed.). John Wiley & Sons.
- [85] Holman, J. P. (2010). Heat transfer (10th ed.). McGraw-Hill.
- [86] ASHRAE. (2017). ASHRAE handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [87] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer (6th ed.). Wiley.
- [88] U.S. Department of Energy (DOE). (n.d.). Cool roofs. U.S. Department of Energy. Retrieved from <https://www.energy.gov/energysaver/cool-roofs>.
- [89] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). (2012). Cool Roof Rating Council. Retrieved from <https://coolroofs.org/>
- [90] Siengchin, S., et al. (2019). Tecnologías de construcción naturales.
- [91] Nacida en la Peza. (2008, 20 de abril). Mi agüelo carbonero de La Peza. Blogger. <https://nacidaenlapeza.blogspot.com/2008/04/mi-aguelo-carbonero-de-lapeza.html>
- [92] Grow Depot México. (Dakota del Norte). Fibra de coco.[https ://depósito de cultivo.com /producto/fibra -de -palma de coco/](https://depósito de cultivo.com/producto/fibra-de-palma-de-coco/)
- [93] Comercio Stroy. (Dakota del Norte). Agua mineral, colocada en Moscú. Comercio [https ://comercio-stroy.com/mk-stek-steklov](https://comercio-stroy.com/mk-stek-steklov)

-
- [94] PJ Fitzpatrick. (sin fecha). Ventilación de techos. PJ Fitzpatrick. <https://www.pjfitz.com/techos/servicios-adicionales/ventilacion-de-techos/>
- [95] Uchebnik Santechnika. (2018, 13 de enero). Lüftung des Gebäudes: Wie eine optima Luftzirkulation erreicht wird .[https : //de.uche.uchebniksantechnika.ru / b/deseo /lu-des -engañados-como -un -óptimo -circulación del aire .html](https://de.uche.uchebniksantechnika.ru/b/deseo/lu-des-engañados-como-un-óptimo-circulación-del-aire.html)
- [96] MDPI. (2022). Volumen II: Comportamiento térmico, eficiencia energética en edificaciones y construcción sostenible. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-5238-5>.
- [97] ASHRAE. (2017). Manual de ASHRAE: Fundamentos (2017). Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. <https://www.ashrae.org>
- [98] Software DesignBuilder. (nd). Manual de usuario de DesignBuilder. Recuperado https://designbuilder.co.uk/h/Contenido/DesignBuilder_.htm
- [99] Crawley, DB, Hand, JW, Kummert, M., y Griffith, BT (2001). EnergyPlus: programa de simulación energética. ASHRAE Transactions , 107(1), 12-24.
- [100] Thumann, A., y Mehta, D. (2016). Manual de auditorías energéticas (10.^a ed.). CRC Press.
- [101] ArchDaily. (s.f.). ¿Cómo calcular la transmitancia térmica (Valor U) en la envolvente material de un edificio? Recuperado el [fecha de acceso], de <https://www.archdaily.cl/cl/898485/como-calcular-la-transmitancia-termica-valor-u-en-la-envolvente-material-de-un-edificio>
- [102] Guardian Sun. (s.f.). El valor U o ¿Cómo se mide el aislamiento térmico? Recuperado el [fecha de acceso], de <https://www.guardiansun.es/tipos-de-ventanas-y-cristales/como-se-mide-el-aislamiento-termico-el-valor-u>
- [103] Nicol F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. Energy and Buildings. 36, 628–637.
- [104] Fargo Heating & Cooling. (sin fecha). Coeficiente de rendimiento: medición de la eficiencia en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.
- [105] Mendonça, ER y Silva, FA (2014). Eficiencia energética de los sistemas de calefacción y refrigeración: una comparación de COP en diferentes tecnologías. Energía y Edificaciones, 81, 105-113.
- [106] Agencia Internacional de Energía (AIE). (2019). Aspectos destacados de las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustible 2019. Agencia Internacional de Energía.
- [107] Hernández, P., & Ortega, R. (2012). Estimación de la huella de carbono de edificios y la eficiencia energética de las instalaciones. Revista de Energía y Tecnología, 34(2), 235-246.
- [108] Departamento de Energía de EE. UU. (2023). Aislamiento térmico para edificios. Energy.gov.
- [109] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Morelos (ProAire Morelos). [secretaria dehttps ://www.ir.metro/do/subidas /archivo adjunto/archivo /323929 /30_ProAire_Mo.pdf](https://www.ir.metro.do/subidas/archivo adjunto/archivo /323929 /30_ProAire_Mo.pdf)
- [110] Maya, S., & Alejandro, M. (2022). Estudio experimental y simulación numérica del comportamiento térmico de una vivienda residencial con techo verde ventilado. Tesis de maestría CENIDET.

-
- [111] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2014). ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. Atlanta, GA: ASHRAE.
- [112] Heard, C. (1993). Notes on the typical house description as used with SUNCODE.
- [113] Silvia Ríos, S. (2025). “ESTUDIO TÉORICO-EXPERIMENTAL DEL USO DE PAREDES VERDES EN UNA VIVIENDA y SU EFECTO EN EL CONFORT TÉRMICO” [Tesis de maestría]. CENIDET.
- [114] Jiménez Torres, M., Pérez Sánchez, MM, Ordoñez López, EE, Cruz Jiménez, BJ, & Bassam, A. (2020). Evaluación computacional de la implementación de techos ventilados en casas de interés social en Ciudad Cautel, Mérida. Puerta de investigación.
- [115] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025, 9 de enero). La inflación. <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/9563> □
- [116] <https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1.aspx>
- [117] Espiñeira, P. (2021, 26 abril). ¿Qué es COP y EER? Coeficientes de rendimiento y Eficiencia Energética en refrigeración y bomba de calor. caloryfrio.com. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html#cop>
- [118] Precios de Materiales de Construcción. (s. f.). Precios de materiales de construcción. <https://preciosdematerialesdeconstruccion.com.mx/>
- [119] <https://www.homedepot.com.mx/>
- [120] Ferreteria Marin en Cuernavaca, Morelos. (s. f.). <https://mexicoo.mx/ferreteria-marin-6361273>
- [121] Sitio oficial: <https://www.comex.com.mx>
- [122] <https://www.sodimac.com.mx/sodimac-mx/product/50615X/lam-rn-100-calibre-26-pintro-bco-305m/50615X/>
- [123] García, M., Martínez, A., Jiménez, R., Abi, Monroy, D., Buenrostro, J., Ruiz, R., Montes, L., Sánchez, A., Lopez, O., Hernandez, R. P., Leticia, Zepeda, R., Alfredo, Uranga, K. G. O., García, L., Jaramillo, J., Galan, D., Sanchez, J. C. G., . . . Perez, E. (s. f.). Habitissimo - Construcción, Remodelaciones y Mudanzas en México. habitissimo.com.mx. <https://www.habitissimo.com.mx/>
- [124] Papandrea, D. (2024, 1 abril). How Much to Budget for Home Maintenance. Investopedia. <https://www.investopedia.com/home-maintenance-budget-8608913#:~:text=The%20Percentage%20Rule,year%20for%20repairs%20and%20replacements.>
- [125] <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/ca03137d-d876-44eb-827d-727fb5738fe8/content>
- [126] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (s. f.). <https://www.imcyc.com.mx/>
- [127] ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LOS MANTENIMIENTOS DE PAVIMENTOS EN CONCRETO ASFÁLTICO y CONCRETO HIDRÁULICO. (2041). [Tesis de licenciatura, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL].

<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/ca03137d-d876-44eb-827d-727fb5738fe8/content>.

- [128] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2011). *ANSI/ASHRAE Standard 140-2011: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*. ASHRAE. https://upgreengrade.ir/admin_panel/assets/images/books/92954991244.pdf

Apéndice

Impact of Eco-Insulating Cover on Thermal Behavior: Study in an Experimental Module for Cwa Climate from Köppen Climate Classification

Alexa I. Estrada Zuñiga^a, E. Sima^a, Samanta López Salazar^a, R. Alavez-Ramírez^{a*}, Alejandro Maya^a

^aTecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos.

^{**}IPN/CIDHR, Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oax. C.P. 71230, Mexico

in23fce022@cenidet.tecnm.mx, efrah13un@cenidet.tecnm.mx, d18fce037@cenidet.tecnm.mx, ralavez@cenidet.tecnm.mx, a19fce073@cenidet.tecnm.mx

Abstract: In regions of warm subhumid climate, direct sun exposure can significantly increase the temperature of both the roof and indoor air, affecting the comfort and energy efficiency of living spaces. The inclusion of an eco-insulating roof offers a promising solution to mitigate this issue by combining reflective properties of solar radiation with heat dissipation capabilities, particularly through coconut fiber filling. This study experimentally analyzes the impact of an eco-insulating roof on the thermal behavior of a concrete slab and indoor air within an experimental module over 72 continuous hours in winter. It was compared against a white sheet roof and an uncovered concrete slab. The eco-insulating roof, composed of a white sheet with coconut fiber filling, managed to reduce the surface temperature of the slab by up to 14.5°C, compared to the 11.9°C reduction achieved with the white sheet alone. Additionally, it lowered the indoor air temperature of the module by 2.2°C compared to the uncovered concrete slab. These results demonstrate the benefits of the eco-insulating roof due to solar radiation reflection and the release of stored heat, improving temperatures by up to 5.7°C during the early hours of the day.

Keywords: eco-insulating roof, coconut fiber, natural fibers, thermal comfort, experimental analysis

1. Introducción

La energía eléctrica es un recurso esencial e integral para el desarrollo de actividades diarias, ya que influye de manera directa en los servicios básicos de los usuarios, la industria, las telecomunicaciones, el transporte, la agricultura, los comercios, hogares y oficinas para estimular el crecimiento y desarrollo económico del país. No obstante, hay diferentes factores que intervienen en el crecimiento de la demanda y el consumo de energía eléctrica, entre ellos los más importantes son: la construcción de viviendas debido al incremento poblacional, los factores climáticos y el uso de materiales de construcción inadecuados para la construcción de la envolvente de los edificios, estos factores impactan directamente en la comodidad lumínica y térmica de los usuarios (SENER, 2021).

En las últimas décadas instituciones gubernamentales y desarrolladores inmobiliarios en conjunto con investigadores en todo el mundo, han desarrollado e implementado estrategias de diseño y materiales de construcción amigables con el medio ambiente, que permitan reducir el consumo de energía destinado a sistemas de climatización de espacios interiores. Estas estrategias se conocen como "sistemas pasivos de climatización", las cuales incluyen: paredes verdes (Sorte et al., 2021), paredes compuestas (Sevilla-Flores et al., 2023), acristalamiento múltiple (Salazar et al., 2024), recubrimientos reflectivos (Cueva-Ortiz et al. 2019) y de baja emisividad (Somasundaram et al. 2020), películas de control solar (Pereira

et al., 2019), entre otros. No obstante, dentro de los elementos principales de la envolvente de los edificios, el techo aporta la mayor carga térmica, debido a la exposición directa a la radiación solar (Buildings Energy Data, 2011), por lo tanto, las mejoras de esta componente resultan ser necesarias.

Las estrategias de diseño para techos incluyen: cubiertas verdes (Yan et al., 2023) o reflectivas (Triano-Juarez et al., 2020), techos compuestos por materiales de baja conductividad térmica (Sánchez, 2021), materiales de cambio de fase (Rangel et al., 2022), entre otros. No obstante, recientemente ha crecido el interés por añadir capas secundarias a la cubierta de concreto tradicional; este sistema se le conoce en la literatura como "techo ventilado" (Ciampi et al., 2005).

No obstante, en la actualidad el costo de inversión de un techo ventilado es elevado, debido a esto, en años recientes ha crecido el interés de optar por alternativas más económicas y que presenten un impacto menos agresivo sobre el medio ambiente. En este sentido, Elfaieb et al. (2023) mencionan que la continua investigación en el desarrollo de nuevos métodos y formulaciones optimiza las propiedades y el rendimiento de los materiales constructivos a base de fibras naturales, las cuales son accesibles en el mercado y presentan excelentes cualidades físicas y mecánicas. Dentro de la amplia gama de fibras naturales, las más comunes son: sisal, yute, carpa, bambú, palma y coco, las cuales se pueden incorporar como cubierta secundaria a la losa de concreto.

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

**Samanta López Salazar, Alexa I. Estrada Zuñiga, Marte E.
Beltrán López, E. Simá**

Por su destacada participación con la presentación del Artículo
en el área Ingeniería Mecánica, eje estratégico Energía y Cambio Climático titulado:
Avances en Materiales de Aislamiento Térmico: Aerogeles, Paneles de Aislamiento al Vacío, Materiales de
Cambio de Fase y Ecoaislantes
En el marco del 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA), celebrado en el
Tecnológico Nacional de México, campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(TecNM/CENIDET), del 19 al 22 de noviembre de 2024

Cuernavaca, Morelos, 22 de noviembre de 2024



CITCA47524

<http://ojs.tecnm.mx/cenidet/verificar>

LORENZO O. HERNÁNDEZ
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

R6HieN1uH1BxyO1pxOMLXanEP8kahnUry5W0q2vTY/DfPc3e1c/11MS2epYXz6d4WuX+JEGgsrwa3wQMcx5bE+rN1
J1aC115N8/zc1lx8EIT3g/rBCBjenc45Z1ps+FMQIXIardjrrhWAOY58jawn7buliyyfcLRxtgOCN6sH12ngRbhh3aAb7
DQb5Sa2keC11D1uM6kZKx5S)Za1UGLr255ah67WQXlglUCPPS2aGLth1+rCvQ87S-J)6fR1v1.p72ULAdN1jDv/BQe5p
ncez7BDMa1LGOHvgT3Cpwnu+nHba71v1pL9hg)zanDjgcs2vade1YDHaCeA1Z4N+CTX8UppS1FFKepTVI:9e5vg--

ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
COORDINADORA GENERAL
III CITCA

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CITCA
3er CONGRESO INTERNACIONAL
DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**100%
LIBRE
DE PLÁSTICO**